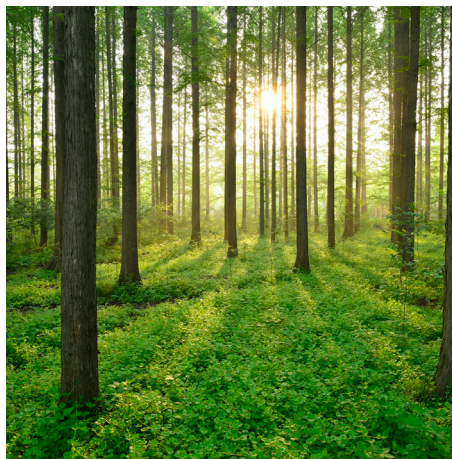
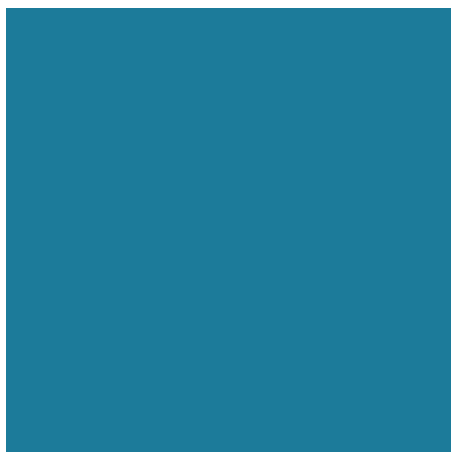


BATTERIENERGILAGRING I LITIUMJONBATTERIER

RAPPORT 2026:1163



RISK- OCH TILLFÖRLITLIGHETS-
ANALYS



Batterienergilagring i litiumjonbatterier

Konsekvensbedömning av explosion och spridning av
toxiska förbränningsprodukter

ALEXANDER M. ELIAS, EMIL PERSSON, PIERRE WAHLQVIST,
LARS MAGNUSSON, JOHAN LUNDIN, BRANDSKYDDSLAGET

ISBN 978-91-89918-46-7 | © Energiforsk mars 2026

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Programmet Risk- och tillförlitlighetsanalys 2021-2025 har initierat projektet Batterienergilagring i litiumjonbatterier. Projektet beskriver en metod för konsekvensbedömning av explosion och spridning av toxiska förbränningsprodukter.

Genom tillgång till beräkningsmodeller och standardiserade riktlinjer kommer resultatet att underlätta för att vidta åtgärder för att minimera risker och skydda både människor och miljö. PL Alexander Moen Elias har arbetat tillsammans med Johan Lundin, Emil Persson och Pierre Wahlqvist från Brandskyddslaget.

Stort tack till programstyrelsen för deras engagemang i projektet:

- | | |
|---|--|
| • Jenny Paulinder, Göteborg Energi Nät (ordförande) | • Magnus Brodin, Skellefteå Kraft Elnät |
| • Emil Welin, Vattenfall Eldistribution | • Göran Sandström, Umeå Energi |
| • Linus Hansson, Ellevio | • Hampus Halvarsson, Jämtkraft Elnät |
| • Niclas Ericsson, E.ON Energidistribution | • August Millqvist, Öresundskraft Elnät |
| • Geoffrey Jordaan, Svenska kraftnät | • Henric Johansson, Jönköping Energi Nät |
| • Fredrik Andersson, Elinorr | • Fredrik Sjödin, Installatörsföretagen |
| | • Carl Johan Wallnerström, Ei (adj) |

Följande bolag har deltagit som intressenter till projektet. Energiforsk framför ett stort tack till samtliga för värdefulla insatser.

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------|
| • Svenska kraftnät | Blåsjön Nät |
| • Ellevio AB | • Dala Energi Elnät |
| • Vattenfall Eldistribution | • Elektra Nät |
| • E.ON Energidistribution | • Gävle Energi |
| • Göteborg Energi Elnät | • Hamra Besparingsskog |
| • Elinorr | • Hofors Elverk |
| • Jämtkraft Elnät | • Härjeåns Nät |
| • Öresundskraft | • Härnösand Elnät |
| • Skellefteå Kraft | • Ljusdal Elnät |
| • Umeå Energi | • Malungs Elnät |
| • Kraftringen Nät | • Sandviken Energi Nät |
| • Jönköping Energi Nät | • Sundsvall Elnät |
| • PiteEnergi Elnät | • Söderhamn Elnät |
| • Karlstads El och Stadsnät | • Åsele Elnät |
| • Karlskoga Elnät | • Åsunda Kraft & Belys.fören. |
| • Elinorr ekonomisk förening; | • Övik Energi Nät |
| • Bergs Tingslags Elektriska | • Ei (adj) |
| • | |

Här redovisas resultat och slutsatser från ett projekt inom ett forskningsprogram som drivs av Energiforsk. Det är rapportförfattaren/-författarna som ansvarar för innehållet.

Stockholm i januari 2026

Susanne Stjernfeldt

Sammanfattning

Övergången till förnybar, intermittent elproduktion ökar behovet av storskaliga energilagringslösningar. Batterienergilagrar (BESS) baserade på litiumjonteknologi har snabbt etablerats som en central teknik, men avsaknaden av harmoniserade svenska regelverk för brandskydd och explosionssäkerhet skapar betydande osäkerheter. Denna rapport adresserar behovet av robusta metoder för konsekvensbedömning av två kritiska risker: gasexplosion vid termisk rusning och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand.

Syftet är att utvärdera befintliga metoder för bedömning av konsekvensområden, analysera osäkerheter i indata och utveckla praktisk vägledning för industri, myndigheter och konsulter. Målen omfattar översyn av regelverk och standarder, analys av inträffade händelser, parameterstudier samt framtagande av generiska bedömningsunderlag för tidiga projektskeden.

Metodiken bygger på en femdelad litteraturstudie, workshop med branschaktörer, analys av inträffade händelser och parameteranalyser för explosion (NFPA 68, SS EN 14994) samt spridning av toxiska komponenter i brandgaser (HF, VOC, PM10).

Resultaten visar att deflagrationer kan ge tryckpåverkan och kastzoner upp till ca 25 m, och att skadliga halter av toxiska förbränningsprodukter normalt begränsas till närområdet (<30 m). Spridningsmodeller tenderar vidare att överskatta beräknade avstånd vid konservativa antaganden, särskilt om hänsyn ej tas till termisk stigningskraft och kemisk reaktionsbenägenhet.

Diskussionen understryker att BESS inte bör betraktas som högriskanläggningar vid korrekt konstruktion och drift, men att krav på dokumenterad riskanalys, dimensionering av tryckavlastning och samordning med räddningstjänst är avgörande. Rapporten rekommenderar kombination av explosionsförebyggande ventilation, tryckavlastning, skyddsavstånd och robust detektion. Bilaga A innehåller praktisk vägledning för projektering och upphandling.

Vidare arbete bör omfatta validering av beräkningsmodeller för batterigassammansättningar, studier av spridning vid rykande termisk rusning samt utveckling av harmoniserade nationella riktlinjer med tydliga acceptanskriterier.

Nyckelord

Litiumjonbatterier, Energilagrar, BESS, Brand, Explosion, Deflagration, Deflagrationsskydd, Termisk rusning, NFPA 68, SS EN 14994, spridningsmodellering, toxiska förbränningsprodukter, batterigas.

Summary

The transition to renewable, intermittent power generation increases the need for large-scale energy storage solutions. Lithium-ion Battery Energy Storage Systems (BESS) have rapidly become a key technology, yet the absence of harmonized Swedish regulations for fire and explosion safety creates significant uncertainty. This report addresses the need for robust methods to assess two critical risks: gas explosions during thermal runaway and the dispersion of toxic combustion products during fires.

The purpose is to evaluate existing methods for consequence assessment, analyze input uncertainties, and develop practical guidance for industry, authorities, and consultants. Objectives include reviewing standards and guidelines, analyzing real-world incidents, conducting parameter studies, and providing basis for generic calculation frameworks for early design stages.

The methodology comprises a five-part literature review, an industry workshop, analysis of incidents, parameter studies for explosion (NFPA 68, SS EN 14994) and toxic gas dispersion (HF, VOC, PM10).

Results indicate that deflagrations can produce pressure effects and debris zones up to 25 m, while harmful concentrations of toxins are typically confined to the immediate vicinity (<30 m). Dispersion models tend to overestimate distances under conservative assumptions, especially when thermal buoyancy and chemical reactions are ignored.

The discussion emphasizes that BESS should not be considered high-risk facilities when properly designed and operated, but documented risk analysis, vent sizing, and coordination with emergency services are essential. Recommended measures include preventive ventilation, venting per NFPA 68/SS EN 14994, adequate separation distances, and robust detection systems. Appendix A provides practical guidance for design and procurement.

Future work should focus on validating venting models for battery gas mixtures, studying dispersion during thermal runaway off-gassing events without external combustion, and developing harmonized national guidelines with clear acceptance criteria.

Innehåll

1	Introduktion	13
1.1	Bakgrund	13
1.1.1	Teknikutveckling och reglering	14
1.1.2	Vetenskapligt identifierad behovsgrund	15
1.1.3	Standardiserade metoder för konsekvensbedömning	15
1.1.4	Tvetydighet vid implementering	16
1.1.5	Problemformulering	17
1.2	Syfte och mål	17
1.3	Omfattning och avgränsningar	18
1.3.1	Systemstorlek och placering	18
1.3.2	Förlopp vid omgivningspåverkan vid spridning av toxiska förbränningsprodukter	18
1.3.3	Batteriteknik	19
2	Metod	20
2.1	Litteraturstudie	20
2.1.1	Byggregler och arbetsmiljöföreskrifter	20
2.1.2	Inhämtning av litteratur	21
2.1.3	Inträffade händelser	21
2.2	Studie av branscherfarenheter	22
2.2.1	Referensgruppsmöte	22
2.2.2	Workshop	22
2.3	Parameteranalys	24
3	Regelverk, vägledningsdokument och standarder	26
3.1	Nationella regler och riktlinjer	26
3.1.1	Boverkets byggregler (BFS 2024:7) och Lag (2003:778) om skydd mot olyckor	26
3.1.2	Riktlinjer från myndighet och räddningstjänster	28
3.1.3	Brandteknisk Vägledning för Batterienergilager med Litiumjonbatterier – RISE	29
3.1.4	Riktlinje för brandskydd av stationära batterier – Svensk Solenergi	31
3.2	Internationellt perspektiv	35
3.2.1	NFPA 855, Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems	35
3.3	Sammanfattning av regelverk, vägledningsdokument och standarder	37
4	Riskidentifiering	39
4.1	Allmänt om batterienergilager och litiumjonbatterier	39
4.2	Risker i batterienergilager och litiumjonbatterier	41
4.2.1	Skadeförlopp i battericellen, termisk rusning och teoretiskt brandförlopp	41
4.2.2	Explosionsrisk	44

4.2.3	Toxiska förbränningsprodukter	45
4.2.4	Risk för uppkomst av brand i batterienergilager	46
4.3	Sammanfattning av riskidentifiering	48
5	Inträffade händelser	50
5.1	MCMICKEN, ARIZONA, USA 2019	50
5.2	Moss Landing, Kalifornien, USA 2025	52
5.3	Carnegie Road, Liverpool, England 2020	54
5.4	Escondido, Kalifornien, USA 2024	56
5.5	Chaumont, New York, USA 2023	57
5.6	Sisjön, Göteborg, Sverige 2023	58
5.7	Sammanfattning av inträffade händelser	60
6	Branscherfarenheter	66
7	Skyddsåtgärder	68
7.1	Tryckavlastning	68
7.2	Mekanisk ventilation	70
7.3	Skyddsavstånd kopplat till explosion	71
7.3.1	Externa effekter enligt SS EN 14494	72
7.3.2	Externa effekter enligt NFPA 68	73
7.4	Sammanfattning av skyddsåtgärder	74
8	Underlag för analys av metoder för konsekvensbedömning	75
8.1	Indata för analys – explosion	75
8.1.1	Gassammansättning – rykande termisk rusning/ off-gassing	75
8.1.2	Gasproduktion - rykande termisk rusning/ off-gassing	76
8.1.3	Förbränningsegenskaper – rykande termisk rusning/ off-gassing	76
8.2	Indata för analys – spridning av toxiska förbränningsprodukter	77
8.2.1	Gassammansättning - flammande förbränning	77
8.2.2	Gasproduktion och källstyrka – flammande förbränning	79
8.2.3	Förbränningsegenskaper och omgivningsförutsättningar	82
8.3	Sammanfattning av indata för parameteranalys av konsekvensbedömning för explosion	84
8.4	Sammanfattning av indata för parameteranalys av konsekvensbedömning för spridning av toxiska förbränningsprodukter	85
8.5	Acceptans- och bedömningskriterier	86
8.5.1	Acceptanskriterier – skadeverkan på container vid dimensionering av deflagrationsskydd	86
8.5.2	Acceptanskriterier – toxisk verkan på människor och nivåer för akut systemtoxisk effekt	87
9	Utvärdering av metod för konsekvensbedömning	89
9.1	Utvärdering av metoder kopplat till explosionsrisker	89
9.1.1	Tryckavlastning enligt SS EN 14994	89
9.1.2	Tryckavlastning enligt NFPA 68	90
9.1.3	Externa effekter givet tryckavlastning	91

9.1.4	Mekanisk ventilation enligt NFPA 69	91
9.2	Utvärdering av metoder kopplat till spridning av toxiska förbränningsprodukter	94
9.2.1	Jämförelse spridningsmodeller ALOHA, Spridning Luft, ALOFT & EFFECTS	99
9.2.2	Spridningsmodellering av partiklar, PM ₁₀	102
10	Parameteranalys	103
10.1	Tryckavlastning enligt NFPA 68	103
10.1.1	Slutsats Parameteranalys tryckavlastning enligt NFPA 68	106
10.2	Spridning av toxiska förbränningsprodukter i luft	107
10.2.1	Slutsats Parameteranalys Spridning av toxiska förbränningsprodukter	109
11	Jämförelse med inträffade händelser	110
12	Diskussion	111
13	Slutsatser	116
14	Vidare arbete	118
15	Referenslista	120
Bilaga A:	Vägledning för anläggningsägare och verksamheter vid implementering av BESS	132

1 Introduktion

I takt med att förnybar, intermittent elproduktion ökar i Sverige, växer behovet av säkra och effektiva lösningar för energilagring, särskilt i form av litiumjonbaserade batterienergilagring (BESS). Samtidigt saknas tydliga regelverk och standarder för brandskydd och explosionssäkerhet vid installation av dessa system, vilket skapar osäkerhet i branschen.

I denna forskningsrapport analyseras befintliga och kostnadseffektiva metoder för konsekvensbedömning av batterigasexplosioner, respektive konsekvenser vid spridning av toxiska förbränningsprodukter till följd av brand.

Studien adresserar både tekniska och regelmässiga utmaningar, och strävar efter att skapa praktiskt användbara lösningar för industri, myndigheter och andra kravställare så som försäkringsbolag.

1.1 BAKGRUND

I dagens samhälle utvecklas ständigt nya och alltmer komplexa lösningar på hur man på ett hållbart vis kan producera och lagra energi med tillräcklig tillförlitlighet och omfattning för att möta samhällets behov. Utöver detta är belastningen på våra nationella elförsörjningssystem mycket hög genom ett kraftigt ökat effektbehov i kombination med en delvis åldrande infrastruktur, varför behovet av olika typer av tekniska lösningar för att stötta vid skillnad mellan produktion och uttag av elektrisk energi är stort. Med bakgrund i dessa faktorer kan man se en kraftig ökning i andelen förnybar intermittent elproduktion under de senaste åren, och ytterligare förskjutning mot denna produktionskategori ser ut att vara att vänta i Sverige.

De elproduktionsmetoder som i rask takt blir alltmer vanligt förekommande i den svenska och europeiska elmixen är exempelvis produktion från sol-, vind- och vågkraft. Då dessa sätt att producera elektrisk energi fluktuerar beroende på rådande förutsättningar avseende väder och klimat erfordras olika tekniska lösningar för lagring och "buffertverkan" av den producerade energin i större utsträckning än tidigare.

Detta i kombination med en stark internationell utveckling av batteriteknik och kostnadseffektivisering i produktionsleden har givit till handa att olika typer av applikationer för batterienergilagring har blivit mycket vanligt förekommande, primärt i skrivande stund i form av lagring av elektrisk energi i olika typer av litiumjonbatterier. Tillämpningsområdet för batterienergilagringssystem (BESS, *Battery Energy Storage Systems*) är redan idag brett, och kan antas utvecklas än mer under den närmast överskådliga framtiden. Installation av batterienergilagring är redan idag vanligt förekommande och betraktas som attraktiva åtgärder för säkerställande av tillgång till elenergi inom exempelvis industri, telekommunikation, signalsystem, transportsektor, sjukvårdsanläggningar etc., men används även för stödtjänster och för att jämna ut energitoppar i elnätet.

1.1.1 Teknikutveckling och reglering

Efterfrågan enligt ovan har lett till att marknaden snabbt utvecklar nya system och lösningar. Den höga utvecklingstakten skapar dock utmaningar. Dessa "nya" system för lagring av elenergi kan påverka brandsäkerheten i en anläggning eller byggnad eftersom regelverken, som ofta vid snabba och stora samhällsomställningar, inte har möjlighet att hålla jämna steg med den tekniska utvecklingen. Att regelverken är reaktiva innebär att anläggningsägare, fastighetsägare och verksamheter riskerar att installera nya system utan att brandsäkerheten beaktas i tillräcklig omfattning.

Denna problematik skapar även utmaningar i förhållande till myndigheters ansvar att bedöma remitterade ärenden samt vid utövande av tillsyn (elsäkerhet, skydd mot olyckor etc.), och att vid sådana kunna genomföra en korrekt bedömning avseende skäligen skyddsnivå. Utan en vedertagen basnivå, eller ens beprövade metoder för konsekvensbedömning är det nästintill omöjligt att göra en väl underbyggd och stringent skälighetsbedömning i förhållande till ett specifikt utförande.

Avsaknaden av styrande regelverk, tillämpbara standarder och praxis medför att branschen i dagsläget står splittrad i fråga om att kunna ställa relevanta krav avseende skydd mot konsekvenser av brand och explosion för de aktuella tillämpningarna av batterienergilager.

I nu gällande byggregler (BFS 2024:7) [1], förekommer viss reglering avseende brandskydd för energilagringssapplikationer i "energilager" inom byggnader, och för installationer med en kapacitet överstigande 20 kWh. Sådan kravställning aktualiseras rent formellt endast i lov- och anmälningspliktiga sammanhang för ändring, ombyggnation eller nybyggnation av byggnader, och omfattar således inte anläggningar som definitionsmässigt inte är att betrakta som "byggnad" enligt Plan- och bygglag (2010:900).

Viss reglering, på en mer övergripande nivå, återfinns i Plan- och byggförordning (2011:338) där det i 3 kap. 8–9 §§ anges egenskapskrav för byggnadsverks skydd och säkerhet i händelse av brand respektive med hänsyn till hygien, hälsa och miljö samt i viss mening även i Miljöbalk (1998:808) 9 kap. Anledning till kravställning avseende skydd mot konsekvenser vid brand och explosion förekommer även i Lag (2003:778) om skydd mot olyckor 2 kap. 2 §, men också här saknas direkt och tydlig reglering av anläggningars utförande.

Mot bakgrund i bristen på handfast reglering och konkretisering av nationella övergripande författningar har ett antal initiativ till regeltolkning gjorts från olika håll. Exempelvis förekommer ett flertal vägledningsdokument eller riktlinjer utgivna av räddningstjänster runt om i landet. I brist på nationell samordning har dessa goda initiativ dock resulterat i en högst fluktuerande och endast delvis underbyggd kravställning, vilket i sin tur medfört stora osäkerheter i branschen vid dimensionering, projektering, installation och uppföljning.

1.1.2 Vetenskapligt identifierad behovsgrund

Utöver nationella initiativ enligt ovan har även ett antal forskningsprojekt under de senaste åren berört de aktuella frågeställningarna samt bristen på väl underbyggd kravställning för brandskydd av batterienergilagring. Där bland återfinns exempelvis studien *Research Needs for Battery and Hydrogen Safety – A Nordic Perspective* initierad av Lunds universitet och samfinansierad av Energiforsk och Brandforsk [2], samt *Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems* framtagen av RISE [3]. Båda dessa omfattande och väl genomförda studier pekar tydligt på ett behov av konkreta riktlinjer för utförande, men landar inte i sig i några uttryckliga metoder eller verktyg för dimensionering av säkerhetssystem.

En utav de stora svårigheterna, vid dimensionering av batterienergilagring i litiumjonbatterier, är adekvat omhändertagande av risken för gasexplosion till följd av ventilering av battericeller i termisk rusning. De stora svårigheterna är särskilt kopplade till nödventilation (explosionsförebyggande ventilation) samt behov av tryckavlastning (konsekvensbegränsande) i anläggningar för batterienergilagring. Risken för explosion grundar sig, enligt ovan, i de brännbara gaser som avges då ett litiumjonbatteri tryckavlastar vid termisk rusning (s.k. "off-gassing" eller "venting").

Denna fråga bedöms, på förekommen anledning, vara högaktuell att hantera då frågeställningar kring explosionsrisker lyfts i många sammanhang vid dialog mellan kravställande myndighet, eller myndighetens remissinstans, samt installatör eller anläggningsägare. I sådan dialog är även frågor gällande förväntade konsekvensområden beroende på vidtagande av olika säkerhetshöjande åtgärder vanligt förekommande, men lämnas dessvärre ofta obesvarade eller sparsamt hanterade.

Även tidigare genomförda forskningsstudier [2, 3] har uttryckligen identifierat dessa frågeställningar som vitala att utreda och besvara för att möjliggöra bredare implementering av lokal energiproduktion och energilagring i våra hållbara städer idag, och framtiden.

1.1.3 Standardiserade metoder för konsekvensbedömning

Ett antal internationella standardiserade metoder för konsekvensberäkning/-bedömning förekommer idag kopplat till explosion, dock primärt med utgångspunkt i andra tillämpningsområden (exempelvis för hantering av risk för skada till följd av dammexplosion mm.). Här kan nämnas exempelvis NFPA 68 (explosionsförebyggande nödventilation) och NFPA 69 (tryckavlastning vid explosion, konsekvenshanterande). Båda dessa är amerikanska regelverk som nyttjas frekvent i sammanhang där batterienergilagring i litiumjonbatterier förekommer, men allt som oftast baseras indata till beräkningar på fullskaletest vilket medför utmaningar avseende tillförlitlighet i datamängder samt kostnader för insamling av erforderlig datamängd. Utöver dessa amerikanska standardiserade metoder förekommer och tillämpas även SS-EN 14994:2007 (Explosiv atmosfär - Skyddssystem för tryckavlastning vid gasexplosioner), vilket är en europaharmoniserad standard för beräkning av övertryck vid explosioner, och skyddssystem. Beräkningsförfarandet i denna standard är generellt väl

beprövat och vedertaget, men tillämpning i sammanhang rörande batterienergilagring i litiumjonbatterier är ännu inte validerat. Även i detta fall är bedömning av rimlig indata en utmaning, då det inte står helt klart hur sammansättning av beståndsdelar i batterigaser ska bedömas vid uppställning av beräkningsunderlag. För att möjliggöra framtagande av metod för dimensionering, för tillämpande av bransch och industri, behöver också dessa frågor adresseras.

Utöver explosionsrisken förekommer även frekventa utmaningar vid planering och implementering av batterienergilagring i litiumjonbatterier utifrån frågeställningar gällande spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand. Detta omfattar kartläggning av riskbild för tredje man och kringliggande verksamheter vid brand i BESS-anläggning uppbyggd av litiumjonbatterier.

Ett flertal studier har under de senaste åren studerat toxiciteten i brandgaser vid batteribränder, men allt som oftast är då fokus på intensiv och kortvarig direktexponering (primärt av vätefluorid), det vill säga vid räddningsinsats och för personer iklädda skyddsklädsel och andningsskydd. Fåtal resultat finns att tillgå gällande hur toxicitet i brandgaser från bränder i BESS-anläggningar uppbyggda av litiumjonbatterier verkar vid spridning i luft, bort från en olycksplats.

Med anledning av detta bedöms ett behov föreligga att mer ingående studera hur omfattande konsekvensområden avseende toxicitet i brandgaser kan bli, beroende på bränsleegenskaper, brandegenskaper, vindhastigheter och vidare omgivande förutsättningar i övrigt.

Även i detta fall förekommer validerade beräkningsmodeller, men återigen är dessa primärt validerade och tillämpade för andra ändamål än det aktuellt avsedda. Det kan vidare tilläggas att det bedöms råda stor diskrepans i bedömda riskområden från olika källor, där ex. amerikanska standarden NFPA 855 [4] anger ett minimimått mellan bebyggelse för stadigvarande vistelse och anläggningar för batterienergilagring om ungefär 30 meter. Motiv till detta eller förarbeten som kastar ljus över bakgrunden till denna konsekvensbedömning står dock ej att finna.

1.1.4 Tvetydighet vid implementering

Utifrån ovan görs det idag allt för ofta enskilda bedömningar i hur man ska hantera och bedöma konsekvensutfall från dessa risker. I vissa situationer förringas riskerna och bortvisas helt, och i andra föreskrivs så omfattande skyddsåtgärder att anläggningar i princip blir omöjliga att installera. Sanningen torde snarast ligga någonstans mellan dessa ytterligheter, och det ses ett trängande behov av utveckling för att överbrygga kunskapsgapet mellan industri och regelverksförfattande eller reglerande myndigheter.

För att kunna dimensionera och reglera på ett säkert och kostnadseffektivt sätt krävs mer vägledning kopplat till adekvat omhändertagande av riskerna för tredje man och kringliggande verksamheter. I en BESS kan flera olika skadescenarion behöva beaktas och ett tydligt kunskaps- och metodgap finns kring dessa. Denna studie avser att adressera dessa gap avseende konsekvenser av tryckavlastning och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand i BESS-anläggning. Satt i ett större perspektiv grundar sig detta behov vidare i en efterfrågan av en större kunskap, och möjliggörande för enklare, mer kostnadseffektiv och säkrare

uppbyggnad av energilagringstjänster till det svenska elnätet. Detta fyller även syfte att i förlängningen möjliggöra, och bidra till uppfyllande av det nationella löftet om 100 % förnybar elproduktion till 2040.

1.1.5 Problemformulering

Mot redovisad bakgrund uppstår en central fråga: Hur kan bedömning av konsekvenser till följd av batterigasexplosion respektive spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand genomföras på ett tillräckligt säkert och kostnadseffektivt vid övergripande planering för - och installation av - batterienergilagringssystem i litiumjonbatterier? Och hur tar man vid sådan konsekvensbedömning hänsyn till de stora osäkerheter i indata som normalt förekommer i tidiga projektskeden vid installation och implementering av elkraftlagring i batterienergilagring med litiumjonbatterier som energibärare?

1.2 SYFTE OCH MÅL

Syftet med föreliggande studie är enligt följande:

- Bidra till att överbrygga kunskapsglappet mellan regelverksstiftande, bedömande och tillsynsutövande myndigheter och industri, till följd av avsaknad av föreskrifter och vägledning i svenskt regelklimat. Detta för att bidra till bättre förutsättningar för kostnadseffektiv och säker implementering av batterienergilagring i litiumjonbatterier.
- Studera hur befintliga metoder för bedömning av konsekvensområden vid batterigasexplosion och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand presterar vid applicering på aktuellt område.
- Studera hur variation och osäkerhet i indata påverkar resultat och om generiska data kan nyttjas för effektivisering.

Målen med studien är följande:

- Göra en översyn och sammanställa relevanta riktlinjer, forskningsrapporter och regler, nationellt och internationellt.
- Utveckla vägledning för handhavande vid bedömning av konsekvenser och säkerhetshöjande åtgärds effektivitet avseende explosionsrisk från batterigasexplosioner vid planering för batterienergilagring i litiumjonbatterier.
- Utveckla vägledning för handhavande vid bedömning av konsekvenser och säkerhetshöjande åtgärds effektivitet avseende spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand vid planering för batterienergilagring i litiumjonbatterier.
- Presentera vägledning på ett sätt som är tillgängligt för såväl industri, konsultbransch som myndigheter.

1.3 OMFATTNING OCH AVGRÄNSNINGAR

Denna studie omfattar utvärdering av metoder för bedömning av konsekvens vid batterigasexplosion samt spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand.

1.3.1 Systemstorlek och placering

Batterienergilagrar med litiumjonbatterier som energibärare kan förekomma i många olika typer av tillämpningar. Dessa delas enligt tillämpning av exempelvis [3, 5] i Sverige ofta in enligt följande:

1. Småskaliga installationer i villor (ca 5-20 kWh)
2. Installationer i flerbostadshus och kommersiella fastigheter med annan grundläggande funktion än energiproduktion/-lagring (<600 kWh)
3. Storskaliga system inom industriella anläggningar och energiproduktion (>600 kWh).

Detta arbete avgränsas till att endast studera applikationer inom den sistnämnda kategorin, det vill säga storskaliga batterienergilagrar i litiumjonbatterier. Sådana anläggningar utgörs ofta av fristående enheter (antingen containerbaserade eller modulära BESS-enheter), vilket även är utgångspunkt för föreliggande arbete. Fokus ligger därmed på de särskilda risker, konsekvenser och skyddsbehov som är relevanta för dessa typer av installationer.

Batterienergilagrar placerade inomhus i byggnad omfattas generellt ej av aktuell studie. Detta då de metoder som avses studeras ej bedömts med en tillräckligt hög upplösning av fysikaliska förhållanden vid batterigasexplosion eller spridning av förbränningsprodukter. Bedömningar som också innefattar samspel mellan olyckshändelse i BESS-anläggning och en byggnad, inklusive dess fysiska respektive tekniska beskafterheter är mycket komplex. Utfall från sådana detaljerade bedömningar är vidare i högsta grad avhängigt ett stort antal parametrar hänförliga till exempelvis konstruktionssätt, byggnadsmaterial, placering av BESS i byggnad, ventilationsförhållanden, kanalisation etc.

1.3.2 Förlopp vid omgivningspåverkan vid spridning av toxiska förbränningsprodukter

Avseende konsekvensbedömning vid spridning av toxiska förbränningsprodukter avser studien primärt behandla risker för uppkomst av skadliga förhållanden för tredje man, och ej primärt för insatspersonal. Detta ger tillhanda att intresseområde vid sådan konsekvens är av regional skala (100-tals meter) snarare än studie av förhållanden inuti en container. Denna avgränsning medför vidare att det är spridning av förbränningsprodukter vid brand som studeras, och inte toxiska effekter av ventilerade batterigaser även om det definitionsmässigt går att betrakta även förlopp med intern upphettning och termisk rusning som förbränning. Ställningstagandet baseras på inledande observationer av händelseförlopp vid verkliga händelser, samt bedömning av relevanta tidsspann vid risk för omgivningspåverkan.

1.3.3 Batteriteknik

Energilagring i andra typer av batterier eller andra medier än litiumjonbatterier omfattas ej av denna studie.

2 Metod

Studien bygger på en stegvis arbetsgång som säkerställer en systematisk och transparent process. Projektet inleds med en litteraturstudie där vetenskapliga publikationer, forskningsrapporter, tekniska vägledningar, standarder samt dokumenterade händelser identifieras och sammanställs.

2.1 LITTERATURSTUDIE

Litteraturstudien är uppdelad i fem sektioner enligt nedan.

Litteraturstudie del 1 – Regelverk, vägledningsdokument och standarder: I denna första sektion av litteraturstudien studeras nu gällande reglering avseende installation och dimensionering av batterienergilagring i litiumjonbatterier, nationellt och internationellt. Utöver formell lagstadgad reglering studeras även olika typer av standarder och vägledningar, vilka normalt är snabbare att möta den hastiga teknikutveckling som råden inom framfarten av "ny" teknik.

Litteraturstudie del 2 – Riskidentifiering: Den andra sektionen i genomförd litteraturstudie ger en allmän orientering och övergripande översikt av batterienergilagring i litiumjonbatterier, samt de risker som är förknippade med sådan teknik för lagring av elenergi.

Litteraturstudie del 3 – Studie av inträffade händelser: I den tredje sektionen av genomförd litteraturstudie studeras ett antal historiskt inträffade händelser där antingen batterigasexplosion, brand eller en kombination av dessa har inträffat. Denna kartläggning genomförs för att utgöra referensmaterial och förankring i verkligt inträffade händelser vid senare jämförelse mot utvärdering av metoder för konsekvensbedömning.

Litteraturstudie del 4 – Skyddsmetoder: I denna fjärde sektion av litteraturstudie behandlas de skyddsmetoder som direkt är förknippade med studiens omfattning, dvs. primärt preventiva och reaktiva åtgärder för explosionskontroll.

Litteraturstudie del 5 – Underlag för analys av metoder för konsekvensbedömning: I denna femte sektion av litteraturstudie inhämtas information om det dataunderlag som utgör påverkansparametrar vid bedömning av konsekvensområde vid batterigasexplosion respektive spridning av toxiska förbränningsprodukter. Syftet med detta är att utvärdera tillgång till relevant och tillförlitliga beräknings- och bedömningsunderlag, såsom gasproduktion vid termisk rusning, batterigasers förbränningsegenskaper, explosionsförlopp och dylikt. Materialet struktureras därefter utifrån de frågeställningar som formulerats i rapportens syfte och mål, och ett urval görs av de mest relevanta källorna för vidare bearbetning givet projektets omfattning.

2.1.1 Byggregler och arbetsmiljöföreskrifter

I litteraturstudie del 1 har författning och branschvägledningar sökts med utgångspunkt i både nationell och internationell kontext.

Nu gällande- och föregående (under övergångsperiod t.o.m. juni 2026 parallellt gällande) byggregler och föreskrifter i Sverige erhålls från Boverkets hemsida. Övriga hänvisade författningar erhålls genom riksdagens hemsida, alternativt via den myndighet som är föreskrivande i det aktuella fallet.

Vägledningsdokument har sökts utifrån tidigare kännedom om utgivning, genom respektive upphavsorganisations hemsida eller allmänt tillgänglig publikationsportal (ex. DiVA – Digitala vetenskapliga arkivet).

2.1.2 Inhämtning av litteratur

Inom de olika delarna av litteraturstudien studeras tidigare utförd forskning inom det aktuella området. Studien genomförs i form av kunskapsinhämtning genom sökning efter - och genomgång av vetenskapliga rapporter, samt så kallad "grå litteratur" (exempelvis tekniska rapporter, vägledningar, policydokument, etc.). Litteraturstudie enligt denna metodik har primärt tillämpats vid genomförande av del 2, 4 och 5, dvs. inom huvudsakliga temaområden enligt följande:

- Grundläggande funktion hos litiumjonbatterier
- Studier om risker förknippade med batterienergilagring i litiumjonbatterier
- Litiumjonbatteriers beteende vid brand
- Explosionsrisker
- Möjliga och vanligt förekommande skyddsbarriärer för hantering av risk (reaktiva och preventiva, dock med tonvikt vid reaktiva säkerhetshöjande åtgärder)
- Inhämtning av data som grund för vidare parameteranalys, ex. gasproduktion och gassammansättning vid termisk rusning, halter av toxicitet i brandgaser etc.

Detta genomfördes med hjälp av sökning i vetenskapliga databaser (ex. Science Direct från Elsevier, Web of Science m.fl.) samt med hjälp av sökmotorn Google och sökning samt indexering med stöd av Microsoft Copilot. Nyckelord eller fraser som använts är främst:

- BESS + fire
- Lithium-ion battery + fire
- Thermal runaway
- Lithium-ion battery + off gassing + venting + gas production
- Lithium-ion battery + explosion + deflagration
- Safety barriers + lithium-ion battery
- Explosion control + Lithium-ion battery
- Toxicity + smoke + lithium-ion battery
- Dispersion modelling + lithium-ion battery + fire

För att bredda litteraturunderlaget tilläts även följsökningar utifrån genomgången litteraturs referenser som del av informationsinhämtningen.

2.1.3 Inträffade händelser

Kartläggningen i litteraturstudie del 3 har genomförts genom sökning i litteratur för ett antal utvalda brand- och explosionshändelser i batterienergilager mellan

åren 2019 och 2025. Urvalet har gjorts genom en semistrukturerad process där ett antal händelser med väldokumenterade och omfattande officiella utredningar valts ut och kompletterats med ett antal slumpvis utvalda nyare händelser, med stöd av händelsekatalogen i EPRI:s *Battery Energy Storage System Failure Incident Database* [6].

Flertalet händelser utöver de som redovisas i denna rapport har utvärderats på en övergripande nivå, för att sedan ha "diskvalificerats" från vidare studie till följd av brist på tillförlitliga underlag och/eller relevans för aktuell studies omfattning och inriktning. Händelser som endast redogörs för genom spridd medierapportering har ej tillåtits inkluderas i analysen.

Urval har också gjorts för att möjliggöra analys av exempel på både explosion och brand.

2.2 STUDIE AV BRANSCHERFARENHETER

Studie av branscherfarenheter och förankring genom representation från berörda intressenter genomfördes enligt nedan.

2.2.1 Referensgruppsmöte

Tidigt i projektet genomfördes ett första referensgruppsmöte. Vid detta möte presenterades information om projektet inklusive dess syfte och mål. Tonvikten vid detta referensgruppsmöte lades vid att inhämta referensgruppsdeltagarnas infallsvinklar och upplevelser av grundproblematiken. Detta för att på ett så välriktat sätt som möjligt anpassa studiens inriktning efter det upplevda behovet.

Inför avslutande av projektet genomfördes ytterligare ett referensgruppsmöte. Vid detta tillfälle hade samtliga referensgruppsdeltagare erbjudits möjlighet att granska utkast till slutrapportering. Vid tillfället diskuterades studiens resultat och synpunkter från referensgruppsdeltagarna inhämtades.

2.2.2 Workshop

Inom ramen för projektet genomfördes en workshop med ett urval av referensgruppens deltagare. Urvalet fokuserade på representanter för organisationer inom industrisegmentet, det vill säga aktörer som redan äger, eller har potential att i framtiden äga eller förvalta, batterienergilager av den typ som omfattas av studien.

Workshopens syfte och mål definierades enligt följande:

- **Syfte** – Att få en bild av vanliga utmaningar och fallgropar vid planering, upphandling, projektering, installation och drift - samt förstå vilka luckor som upplevs finnas i dagens kompetensnivå hos projektör, myndighetspersoner respektive anläggningsägare/ industri.
- **Mål** – Tydliggöra ramar för hur en slutprodukt (från aktuellt projekt) ska kunna vara något som hjälper anläggningsägare och industri vid implementering av BESS.

Inför workshoptillfället ombads deltagarna att förbereda sig genom att fundera på följande frågor som underlättade diskussionerna vid mötet, fördelat över olika fokusområden:

Diskussionspunkt 1 – Att förstå dagens svårigheter ur anläggningsägares/industrins perspektiv vid implementering av BESS.

- Vilken typ av projekt har du varit inblandad i?
- Vad har varit de största utmaningarna?
- Hur upplevs dagens kravbild (från myndigheter, försäkringsbolag, konsulter) vid projektering av BESS?
- Vilka osäkerheter uppstår kring riskbedömning och konsekvensanalyser – särskilt gällande explosioner och toxiska gaser? Hur har osäkerheter och brist på indata hanterats?
- Vad är de största praktiska hindren vid tillståndsprövning eller brandteknisk dimensionering?

Diskussionspunkt 2 – Att förstå vilka verktyg/vägledningar som saknas ur anläggningsägares/industrins perspektiv

Var i processen saknas kunskap, vägledning och verktyg?

- Planering/projektering
 - Är kravställning tillräckligt tydlig?
 - Finns kompetensen hos anläggningsägare för att förstå vilka risker som implementeras?
 - Finns möjlighet att ha generiska beräkningsunderlag och ”grövre” konsekvensbedömningar? Vilka parametrar kan vara generiska, ex. batterikemi?
 - Hur kan anläggningsägare, konsulter och myndigheter samverka bättre i tidiga skeden?
- Hur bör osäkerheter och brist på indata hanteras?
- Entreprenad
 - Vilka utmaningar har funnits under entreprenad? Hur förenklas dessa utmaningar?
 - Har åtgärder från utredningar implementerats på rätt sätt? Vad saknas för att säkerställa att entreprenad sker enligt projektering?
- Drift
 - Hur fungerar drift idag?
 - Hur sker samspelet mellan leverantör/verksamhet/anläggningsägare? Vad saknas?
 - Hur skulle du/ni vilja att driften sker?

Diskussionspunkt 3 – Övrigt

- Ser du/ni några erfarenheter från liknande områden (ex. vätgas, damm) som skulle kunna användas vid implementering av BESS? Några specifika verktyg?
- Vilka forskningsluckor eller behov av fullskaleförsök identifieras som mest kritiska kopplat till explosion och risk för spridning i luft?

Diskussionspunkt 4 – Projektets slutprodukt

Hur kan slutprodukten inom föreliggande arbete förenkla mest för dig/er?

Exempelvis:

- ”Bra att tänka på”-lista vid start av projekt/implementering.
 - Ex. ofta utmanande frågor – vad är viktigt att säkerställa i ett tidigt skede.
 - Vilka frågor behöver ställas till leverantör inför upphandling?
- Vägledning med information kring vilka parametrar som har störst inverkan på explosionsrisk och risk för spridning i luft (ex. gasvolym, tändfördröjning, ventilationsgrad, etc.).
- Metod/vägledning för grov konsekvensbedömning på ”good enough”-nivå.

2.3 PARAMETERANALYS

Utifrån de dimensionerande parametrar som framkommer av litteraturstudien, såsom gasvolym, tryckstegringshastigheter och koncentrationer av toxiska produkter, genomförs beräkningar för vanliga åtgärder kopplat till explosionsrisk och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand. Dessa beräkningar används för att utvärdera befintliga metoder och verktyg och omfattning av påverkan från variation i indata, samt för att bedöma metodernas tillämpbarhet i det aktuella sammanhanget.

Val av verktyg för konsekvensbedömning genomfördes enligt nedan.

Konsekvenser vid explosion – tryckavlastning och konsekvensområde: De metoder som erfarenhetsmässigt är mer tillämpade på den svenska marknaden är de standardiserade metoderna för dimensionering av konsekvenslindrande tryckavlastning vid deflagration samt konsekvensbedömning av utslående eldsflammar. Dessa, dvs. NFPA 68 respektive SS EN 14994, redovisas och utvärderades. Parameteranalys genomförs därefter enbart utifrån NFPA 68, vilket baserades på bedömning av internationell utbredning, modellens tillämpbarhet, samt angivna giltighetsområde.

Konsekvenser vid spridning av toxiska förbränningsprodukter: Eftersom den aktuella studien i sitt grundutförande syftar till att stärka kunskapsläget och etablera en gemensam grund för dialog mellan regelstiftande myndigheter och industrin inom svensk kontext, samt att främja en kostnadseffektiv och säker implementering av litiumjonbaserad batterienergilagring i Sverige, genomförs en kartläggning av vanligt förekommande beräkningsmodeller för spridning av toxiska gaser, partiklar och andra utsläpp på lokal till regional nivå.

Urvalet av modeller för vidare analys baserades på tre huvudsakliga kriterier: kostnadseffektivitet vid användning i tidiga projektskeden, tillgänglighet, samt etableringsgrad i relation till svenska myndigheters arbete.

Slutligen sammanförs resultaten från litteraturstudien och de beräkningsmässiga analyser där slutsatserna omsätts i förslag till vägledning för konsekvensbedömning avseende batterigasexplosion respektive spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand i batterienergilagring i litiumjonbatterier.

På detta sätt skapas en tydlig koppling mellan syfte, insamlat underlag, genomförda parameteranalyser och de rekommendationer som presenteras i rapportens senare delar.

3 Regelverk, vägledningsdokument och standarder

I följande avsnitt presenteras sammanfattning av genomförd litteraturstudie, del 1. Här sammanfattas de nationella och internationella lagar, riktlinjer och standarder som på ett eller annat vis kan anses tillämplbara vid bedömning av kravställning kring brand- och explosionssäkerhet för batterienergilagring i litiumjonbatterier.

3.1 NATIONELLA REGLER OCH RIKTLINJER

Viss reglering, på en mer övergripande nivå, återfinns i Plan- och byggförordning (2011:338) där det i 3 kap. 8–9 §§ anges egenskapskrav för byggnadsverks skydd och säkerhet i händelse av brand respektive med hänsyn till hygien, hälsa och miljö samt i viss mening även i Miljöbalk (1998:808) 2 & 9 kap. Anledning till kravställning avseende skydd mot konsekvenser vid brand och explosion förekommer även i Lag (2003:778) om skydd mot olyckor 2 kap. 2§.

3.1.1 Boverkets byggregler (BFS 2024:7) och Lag (2003:778) om skydd mot olyckor

Boverkets byggregler (BBR) [7] har historiskt inte specifikt behandlat brandrisker i batterianläggningar. Dock trädde 1 juli 2025 Boverkets föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i händelse av brand i byggnader (BFS 2024:7) [1] i kraft. I denna författning inför Boverket viss reglering avseende brandskydd för energilagringssapplikationer i "energilagring", med en kapacitet överstigande 20 kWh. Denna begränsning i kapacitet motsvarar ungefär en segmentering där "villabatterier" faller utanför ramarna för reglering och där alla energilagring med större kapacitet regleras utifrån samma principer – oaktat applikation och storlek.

Sådan kravställning aktualiseras rent formellt endast i lov- och anmälningspliktiga sammanhang, varför majoriteten av installationer kan förväntas passera mer eller mindre oreglerade genom en bygg- och installationsprocess med avseende på säkerhet vid händelse av brand. Det ska vidare poängteras att krav rörande brandskydd i Boverkets byggregler definitionsmässigt endast är tillämpliga på byggnader eller delar utav sådana.

Utifrån ovan kan det konstateras att reglering av brandsäkerhet för batterienergilagring idag är knapphändig.

Nedan redovisas de paragrafer i BFS 2024:7 som är aktuella kopplat till energilagring:

5 kap. Skydd mot utveckling och spridning av brand och brandgaser inom byggnad

26 § *Energilagring med batterier med en kapacitet större än 20 kWh, storkök med särskild brandrisk, utrymme för förvaring av sot och aska, slutna garage och andra utrymnen med förhöjd sannolikhet för uppkomst av brand och där en brand kan få ett snabbt förlopp ska vara utformade som egen brandcell.*

Trots första stycket får sådana utrymmen vara belägna i brandcell med annan användning om en brand endast kan förväntas få begränsade konsekvenser för utrymningssäkerheten.

38 § Energilager med batterier med en kapacitet större än 20 kWh, storkök med särskild brandrisk, garage och andra utrymmen med förhöjd sannolikhet för uppkomst av brand och där en brand kan få ett snabbt förlopp, som står i förbindelse med en invändig utrymningspassage som betjänar ett annat utrymme, ska vara utformade med brandsluss mot utrymningspassagen.

Trots första stycket får utformning utan brandsluss ske i följande fall:

1. Om personer inte vistas varaktigt i det anslutande utrymmet till utrymningspassagen.
2. Garage vars brandcell skyddas med automatisk vattensprinkleranläggning.
3. Storkök med särskild brandrisk om brandrisken begränsas av ett automatiskt släcksystem.

8 kap. Räddningspersonalens säkerhet vid brand

11 § Brandgasventilation ska finnas i följande utrymmen:

1. Utrymmen under mark i brandceller större än 10 m², förutom utrymningspassager, tillträdesvägar och liknande utrymmen.
2. Brandceller större än 10 m² som används som förråd eller liknande i översta planet i byggnader med fler än fyra plan ovan mark.
3. Slutna garage i brandceller större än 100 m².
4. Utrymmen innehållande energilager med batterier med en kapacitet större än 20 kWh.

Brandgasventilation ska vara utformad som öppningar och vara placerad så att utrymningspassager, tillträdesvägar eller andra verksamheter inte behöver nyttjas för ventilation av brandgaser samt så att tillräcklig genomströmning av tilluft uppnås. Geometrisk area på öppningar ska vara enligt följande:

1. Total area som motsvarar minst 0,5 procent av nettoarean i betjänade utrymmen om brandcellen inte skyddas med automatisk vattensprinkleranläggning.
 2. Total area som motsvarar minst 0,1 procent av nettoarean i betjänade utrymmen om brandcellen skyddas med automatisk vattensprinkleranläggning.
- Brandgasventilation som betjänar utrymmen under mark ska kunna manövreras utifrån eller via manöverdon vid angreppspunkt.

För nyttjanderättshavare och fastighetsägare, åligger utöver byggreglerna, även krav på brandskydd inom fastigheten enligt Lagen om skydd mot olyckor. I lagen anges följande:

”2 kap. 2 § Ägare eller nyttjanderättshavare till byggnader eller andra anläggningar skall i skälig omfattning hålla utrustning för släckning av brand och för livräddning vid brand eller annan olycka och i övrigt vidta de åtgärder som

behövs för att förebygga brand och för att hindra eller begränsa skador till följd av brand.”

Detta innebär att det föreligger krav på fastighetsägaren eller nyttjanderättshavaren att i skälig omfattning minimera brandrisker och möjliggöra för en eventuell räddningsinsats. Retroaktiva krav kan ställas utifrån detta regelverk.

3.1.2 Riktlinjer från myndighet och räddningstjänster

Mot bakgrund i avsaknad av nationell reglering genom författning har ett antal initiativ till regeltolkning gjorts från olika håll. Exempelvis förekommer ett flertal vägledningsdokument eller riktlinjer utgivna av räddningstjänster runt om i landet. I grunden är detta viktiga och bra initiativ, men svårigheter för tillämpning uppstår om dessa vägledningar inte är samstämmiga mellan kommuner och regioner, eller tar ett helhetsgrepp avseende exempelvis riskacceptans och krav på säkerhetsbevisning.

Vägledningar och branschpraxis kan vara ett gott sätt att möta upp avsaknaden av regelverk, men för att främja tydlighet och kostnadseffektivitet bör innehåll i sådan vägledning vara nationellt harmoniserad och baserad på bästa tillgängliga kunskapsläge.

Värt att notera är att de dokument som givits ut av räddningstjänster runtom i landet i dessa fall utgör just vägledningar framför allt med avseende på räddningspersonalens möjlighet till säker insats. Vägledningsdokumenten är således inte kravställande i någon formell mening och belyser inte heller alla risker som bör beaktas ur ett egendomsskyddsperspektiv.

Några exempel på vägledningar redovisas i nedanstående tabell.

Tabell 1. Sammanställning exempel på riktlinjer från myndighet och räddningstjänster.

Utgiven av	Daterad	Titel
Storstockholms brandförsvär [8]	Senast reviderad 2024-02-20	Solcellsinstallationer och batterilagersystem – <i>Vägledning vid utformning och installation av solcellsanläggningar och batterilagersystem</i>
Räddningstjänsten Syd [9]	2024-09-11	Råd och anvisning för solcellsanläggningar och batterilagersystem
Räddningstjänsten Storgöteborg [10]	Senast reviderad 2024-04-10	Projektering och installation av solcellsanläggningar och batterilagersystem
MSB [11]	2024-06-17	Vägledning, räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer

Stockholms brandförsvär [8] anger exempelvis att en riskbedömning bör genomföras vid projektering av batterilagersystem. Tydlig vägledning kring hur sådan ska genomföras och vilka nivåer för acceptans som gäller framgår dock inte.

Sammanfattningsvis kan det konstateras att vägledningar mycket väl kan vara ett sätt att utan formell regelverksskrivnings långa ledtider möta upp mot behovet av säkerhet vid installation av ny teknik. Dock bedöms de vägledningar som idag finns tillgängliga medföra vissa utmaningar för anläggningsägare och installatörer.

Frågor avseende bedömning och acceptans av riskpåverkan mot tredjeman ingår normalt inte per automatik, och riskerar därför att utelämnas om enbart parametrar ur en specifik vägledning nyttjas som kravställande underlag.

I många fall baseras vägledningar på upphovsorganisationens egen informationsinhämtning, uppfattning och bedömning om en "best practice", och det framgår inte tydligt i alla lägen vilket kunskapsunderlag detta baseras på. Vidare riskerar detta att resultera i "följdfel" där olika utgivare av vägledningar helt enkelt kopierar innehåll och nivåställning från varandra, utan vidare djupanalys.

3.1.3 Brandteknisk Vägledning för Batterienergilagring med Litiumjonbatterier – RISE

2023 publicerade RISE en vägledning för batterienergilagring med litiumjonbatterier [12]. Inom vägledningen delas batterienergilagring in i tre olika så kallade "applikationskategorier" (AK) vilka nyttjas för att kategorisera batterienergilagring och de föreliggande skyddsbehoven utifrån omfattning av lagring och användning. Som tidigare nämnt är särskilt AK 3 – Batterienergilagring för storskaligt bruk i större industriella anläggningar eller i anläggningar för energiproduktion fokus inom föreliggande arbete.

AK3 riktar sig till företag, kommuner eller andra aktörer som har för avsikt att nyttja batterienergilagring för storskaligt kommersiellt bruk (ej mikroproducenter). Till kategorin hör även leverantörer som förser andra aktörer med tillfällig elförsörjning genom mobila batterienergilagring. Exempel på applikationer kan vara batterienergilagringsspårer eller uthyrning av mobila containers till festivaler, byggarbetsplatser eller andra verksamheter med tillfälliga behov av mobil elförsörjning i större omfattning.

Aktuella delar från vägledningen redovisas nedan. Notera att vägledningen inte utgör kravställning utan i stället i högre utsträckning presenterar parametrar som bör beaktas vid utformning av anläggningar.

Tabell 2: Sammanfattning av relevanta delar av RISE vägledning [12].

Parameter	Generella rekommendationer
Risikanalys	En övergripande riskanalys bör alltid utföras och bör behandla nedanstående punkter: Avstånd till annan byggnad Avstånd till infrastruktur, känsliga verksamheter, gångvägar, samlingsplatser etc. Termisk propagering och interna säkerhetsdistanser inom batterienergilagret Avstånd mellan separata energilagringssenheter Explosionsrisk Yttre faktorer så som väder, vind och mekanisk påverkan (ex. påkörning, nedfallande objekt) Räddningstjänstens insatstid/ framkörningstid och förmåga Släckvattenhantering och närliggande vattenskyddsområden Hantering av batterienergilagret och eventuellt skadade battericeller efter brand

Parameter	Generella rekommendationer
Skyddsavstånd / Placering	Avstånd till byggnad bör minst uppfylla motsvarande krav som anges i BBR. Tillfredställande skydd enligt BBR 5:61 kan även erhållas om brandspridning mellan byggnader begränsas med skydd som motsvarar det högsta kravet för brandceller eller brandväggar i respektive byggnad. För batterienergilager är detta inte alltid lämpligt då hänsyn även bör tas till risken för explosion. Vid kortare avstånd än 8 meter bör en särskild bedömning göras där hänsyn tas till exempelvis närhet till fönster eller andra känsliga delar av byggnaderna. För att minska konsekvenserna av brand och brandspridning mellan separata energilagringseenheter (eller till batterienergilagret) bör externa avstånd mellan enheter avgöras som en del i riskanalysen. Här bör explosionsrisken och dess konsekvenser också tas i beaktning.
Termisk propagering	Verifiering av systemdesign gentemot termisk rusning och brand kan testas enligt till exempel IEC 62619 eller UL 9540A.
Detektion	Det rekommenderas att utrymmen för batterienergilager inom denna AK förses med branddetektion och akustiskt larmdon. Detektionen bör vara sammankopplad med någon typ av övervakningsfunktion. Det rekommenderas även att detektionen är kopplad till ett optiskt larmdon, dels för att varna personer från att öppna dörren till utrymmet, dels för att räddningstjänsten lättare ska kunna lokalisera utrymmet eller containern. På containers kan detta sitta på utsidan av containern och inom byggnader bör det finnas både i anslutning till huvudentrén samt i direkt anslutning till det detekterade utrymmet. Det är fördelaktigt om detektionssystemet inkluderar en brandlarmanläggning som är vidarekopplad till SOS Alarm eller räddningstjänsten. En brandlarmanläggning medför en betydande ökning i tillförlitligheten jämfört med andra typer av detekterande system. Gasdetektion och videoövervakning inuti batterilagret med utvändigt avläsning har i arbete förts fram som en extra riskreducerande åtgärd för att möjliggöra, förenkla och reducera risker vid insats för räddningstjänst. Då räddningstjänst genom dessa system kan få information kring vad som sker inuti utrymmet, batterienergilagret, utan att öppna upp minskar risken för tillförsel av syre som skulle kunna leda till explosion.
Explosionsförebyggande ventilation	Det rekommenderas att utrymmen för batterienergilager utformas väl ventilerade för att undvika att brännbara gaser ackumuleras inom dess brännbarhetsområde och således minska risken för explosion.
Tryckavlastning	Byggnader och containers som nyttjas för batterienergilager i AK3 kan förses med tryckavlastande konstruktion för att minska konsekvenser vid eventuell deflagration. Exempel på tryckavlastning kan vara luckor mot det fria som öppnas respektive brister vid tryckökning eller som öppnas automatiskt genom detektion av brandfarliga gaser i utrymmet. Vid deflagration kan utslående jet-flammar förväntas, vilket ger skäl för att dessa placeras i tak och inte riktas mot annan byggnad, gångväg etc. Tryckavlastande strukturer och dess funktion bör finnas beskrivna i insatskort för att räddningstjänst snabbt ska få kännedom om dessa.

Parameter	Generella rekommendationer
Brandgasventilation	Utrymmen där batterienergilagrar finns installerade bör förses med möjlighet till brandgasventilation utformad att kunna aktiveras av räddningstjänsten från en säker plats. Manöverdon för brandgasventilation som innebär att räddningstjänsten kan aktivera brandgasventilationen från säker plats medför ökad säkerhet under räddningstjänstens insats. Om möjligt kan styrning eller manuell aktivering av tryckavlastande konstruktion, så som luckor, dörrar etc., tillgodose behovet av brandgasventilation.

3.1.4 Riktlinje för brandskydd av stationära batterier – Svensk Solenergi

Svensk Solenergi har sedan 2024 publicerat vägledningar för att stödja aktörer vid installation av stationära batterienergilagrar med litiumjonteknologi. Syftet med riktlinjerna är att ge enhetliga och praktiskt tillämpbara rekommendationer för att uppnå ett skäligt brandskydd, med hänsyn till både personsäkerhet och skydd av egendom.

Vägledningsdokumentet "Riktlinje för brandskydd av stationära batterier" [5] omfattar på motsvarande vis om vägledningen från RISE olika installationstyper, från småskaliga system i byggnader till storskaliga energilagrar i fristående konstruktioner (1, 2A, 2B och 3). Nedan redovisas ett utdrag ur riktlinjen, fokuserat till Typ 2B – kommersiella batterier i fristående konstruktion utomhus respektive Typ 3 – storskaliga batterier i container eller liknande konstruktion, där riskerna för brand, explosion och spridning av brandgaser är särskilt betydande.

Rekommendationerna är inte juridiskt bindande men bör beaktas vid projektering och installation. För anläggningar med högt skyddsbehov eller komplexa förutsättningar anges det i riktlinjen att kompletterande kravställning utifrån internationella riktlinjer (t.ex. NFPA 855, FM Global) och nationella föreskrifter (BBR) kan behöva tillämpas.

Tabell 3. Utdrag ur Riktlinje för brandskydd av stationära batterier, Svensk Solenergi v. 1.2 - Typ 2B
Kommersiella batterier i fristående konstruktion utomhus [4].

Typ av brandskyddsåtgärd	
Placering	Energilagret placeras på plats där risk för skada, exempelvis påkörning eller sabotage, är låg. Placering bör inte ske i närhet till friskluftsintag.

Typ av brandskyddsåtgärd	
Skyddsavstånd	Batteri och tillhörande installationer placeras avskilt från brännbart material, minst 2 meter. Vid kortare avstånd kan batteri avskiljas med obrännbart skivmaterial. Avstånd till annan byggnad ska ske i enlighet med BBR. Det generella kravet för byggnader är 8 meter. Ett kortare avstånd kräver brandcellsgräns mot intilliggande byggnader alternativt att analytisk dimensionering genomförs, exempelvis strålningsberäkningar. Om det finns möjlighet till ventilation samt explosionsskydd i tak, kan man i många fall genom analytisk dimensionering, visa att avstånd till intilliggande byggnader kan understiga 8 meter. Det är inte helt tydligt om ett fristående batteri utgör en byggnad, enligt definition i Plan- och bygglagen. Det kan variera beroende på utformning och storlek på konstruktionen. Ett mindre rackskåp bör exempelvis inte beaktas som byggnad. Det kan dock vara lämpligt att beakta skyddsavstånd till kringliggande skyddsvärden oavsett om energilagret definitionsmässigt är att betrakta som "byggnad" eller inte. Säkerställ att omkringliggande vegetation, exempelvis större träd eller skog, inte leder till ökad risk för brandspridning, har en negativ inverkan på batteri under drift eller inverkar på räddningstjänstens insatsmöjligheter. Ett avstånd på minst 8 meter rekommenderas.
Ventilation	Separat brandgasventilation installeras och kan utgöras av lucka eller mekanisk ventilation. Styrning rekommenderas kunna ske från säker plats. (Utökat skyddsbehov).
Explosionsskydd	Skydd mot explosion installeras. Lucka ska helst placeras i tak. (Utökat skyddsbehov).
Detektion	Brandvarnare bör integreras i energilagret. Koppling bör finnas mot optiskt och akustiskt larmdon för att varna. Brandlarm kopplat till SOS/räddningstjänst är fördelaktigt. (Utökat skyddsbehov).
Släcksystem	Installation av tomrörssystem kan tas i beaktning vid dimensionering. (Utökat skyddsbehov).
Släckvatten	Vid projektering av batteri bör hantering av släckvatten beaktas. Invallning kan behövas för att säkerställa omhändertagande.

Typ av brandskyddsåtgärd	
Skyltning	Skyltning ska finnas på dörrar till batteri samt vid räddningstjänstens angreppsväg för att varna räddningstjänst/privatpersoner/personal. Anläggningen ska förses med varningsskylt om elektrisk fara (gul triangel med blix) och med tillägsskyltning som informerar om risken för kvarvarande laddning samt typ av utrustning. Likströmskomponenter som inte kan frångiljas bör vara tydligt uppmärkta med varselmärkning. Enklare insatskort tas fram och finns tillgängliga på strategiska platser (ex. brandförsvarstabla alt. angreppsväg). (Utökat skyddsbehov). Insatskortet bör också skickas till den lokala räddningstjänsten. MSB har tagit fram en vägledning för framtagande av insatskort vilken bör följas [13]. Kortet ska minst innehålla: - Övergripande bild av anläggningens område - Övergripande beskrivning av systemet, inklusive specifika risker vid insats och kopplingskomponenter som ej är möjliga att frångilja och göra spänningslösa - Kontaktuppgifter till anläggningsägare samt driftpersonal som har kunskap om anläggningen - Eventuella manuella styrningar (ventilation, tomrör för vattensprinkler etc.)
Riskbedömning	Enkel riskbedömning bör genomföras utifrån rekommendationer i denna vägledning. Skyddsvärdet i intilliggande lokaler ska beaktas.

Tabell 4. Utdrag ur Riktlinje för brandskydd av stationära batterier, Svensk Solenergi v. 1.2 - Typ 3 Storskaliga batterier i fristående container/konstruktion [4].

Typ av brandskyddsåtgärd	
Placering	Om batteriet placeras i en byggnad bör djupare riskanalys genomföras. Denna typ av riskanalys redogörs inte för i denna riktlinje.
Skyddsavstånd till byggnader	Utformning i enlighet med BBR ska alltid följas. För denna typ av batteri, generellt med hög kapacitet, kan ett längre avstånd än 8 meter behövas till intilliggande verksamheter. Detta särskilt givet risken för explosion. Analytisk dimensionering, exempelvis strålningsberäkningar, kan genomföras för att fastställa lämpligt avstånd med hänseende till risken för brandspridning. Som utgångspunkt rekommenderas 30 meter till intilliggande skyddsvärd verksamhet (bostäder, industrilokal). Vid ett så pass omfattande skyddsavstånd bedöms riskerna för påverkan på intilliggande verksamheter låga. Därmed ökar möjligheterna till ett minskat skyddsbehov för andra parametrar (ex. avstånd mellan containrar, explosionsskydd, eller liknande). (Utökat skyddsbehov). Säkerställ att omkringliggande vegetation, exempelvis större träd eller skog, inte leder till ökad risk för brandspridning, har en negativ inverkan på batteri under drift eller inverkar på räddningstjänstens insatsmöjligheter. Ett avstånd på minst 8 meter rekommenderas. Mellan containrar kan ett kortare avstånd än 8 meter vara tillräckligt om det godkänns av tillverkarens anvisning och BBR. Hänsyn ska tas till framkomlighet för räddningstjänsten. Anläggningar med ett stort antal containrar kan delas upp i sektioner som avskiljs med brandvägg (ex. betong) eller med längre avstånd emellan.

Typ av brandskyddsåtgärd	
Ventilation	Mekanisk brandgasventilation rekommenderas. Brandgasventilationen bör vara automatisk eller så ska möjlighet finnas att styra brandgasventilationen manuellt från en säker plats, för att minska riskerna för räddningstjänst vid insats.
Explosionsskydd	Explosionskontroll bör installeras. Lucka placeras i tak eller vägg. Riktning mot eventuell skyddsvärd utrustning ska beaktas. Säkerställande av explosionsskyddets funktion är avgörande, därför kan snöröjning av taket och annat underhåll krävas.
Detektion	Rökdetektorer ska sitta i respektive container. Koppling ska finnas till övervakningssystem som larmar personal. Koppling bör också finnas till optiskt och akustiskt larmdon (placerat på utsida av container/utrymme). Ytterligare rekommendation för ett bättre skydd (utökat skyddsbehov): Vätgasdetektor för att indikera explosionsrisk Kameraövervakning Automatisk larmöverföring till SOS/räddningstjänst Möjlighet att utanför utrymmet avläsa värden från gasdetektering
Släcksystem	Projektspecifik riskbedömning ska göras. Möjlighet att genomföra släckinsats utan att öppna container är önskvärt. Detta kan uppnås genom installation av tomrörssystem eller invändiga släcksystem, aerosoler. Tomrör med utvändig påkopplingsmöjlighet för räddningstjänsten kan vara fördelaktigt. Det rekommenderas att påkoppling möjliggörs från säker plats och inte i direkt anslutning till byggnad/container. Gassläcksystem kan effektivt begränsa extern flamspridning, men har liten eller ingen effekt på de exoterma reaktioner som sker inuti battericeller. Detta innebär att aktivering av ett gassläcksystem vid detekterad batteribrand i vissa fall endast tjänar till att fördröja brandförloppet.
Släckvatten	En bedömning av en anläggnings specifika behov av släckvattenhantering bör alltid genomföras. Exempelvis kan behov av invallning finnas. Även lokala bestämmelser kan förekomma. Behov av släckvattenhantering beror på placering av batteriet. Ett större behov av släckning förväntas då batteri är placerat i stadsbebyggelse. Om batteriet är placerat långt från omkringliggande bebyggelse och annan skyddsvärd verksamhet är möjligheterna att låta en batteribrand brinna ut bättre, vilket minskar behovet av att omhänderta släckvatten.

Typ av brandskyddsåtgärd	
Skyltning	Skyltning ska finnas på dörrar till batteri samt vid räddningstjänstens angreppsväg för att varna räddningstjänst/privatpersoner/personal. Anläggningen ska förses med varningsskylt om elektrisk fara (gul triangel med blix) och med tillägsskyltning som informerar om risken för kvarvarande laddning samt typ av utrustning. Likströmskomponenter som inte kan frångöras bör vara tydligt uppmärskade med varselmärkning. Insatskort bör tas fram och finnas tillgängliga på strategiska platser (ex. brandförsvartabla). Insatskortet bör också skickas till den lokala räddnings-tjänsten. MSB har tagit fram en vägledning för framtagande av insatskort vilken bör följas [13]. Kortet ska minst innehålla: - Övergripande bild av anläggningens område - Övergripande beskrivning av systemet, inklusive specifika risker vid insats och kopplingskomponenter som ej är möjliga att frångöras och göra spänningslösa - Kontaktuppgifter till anläggningsägare samt driftpersonal som har kunskap om anläggningen - Eventuella manuella styrningar (ventilation, tomrör för vattensprinkler etc.)
Riskbedömning	Eftersom kapacitet och omfattningen för denna typ av batteri kan variera stort rekommenderas att en riskanalys alltid genomförs. Internationella regler och riktlinjer, exempelvis NFPA 855 och FM Global, kan användas som stöd. Följande frågeställningar är relevanta att beakta vid utförande av riskanalys: - Finns skyddsvärda delar/verksamheter i närhet? Hur påverkas dessa avseende risk för brand/explosion i batteri? - Finns risk för brandspridning mellan flertalet enheter (containrar)? - Finns risk för påverkan på personal samt intilliggande lokaler vid explosion? - Medger utförande möjlighet till säker räddningsinsats från räddningstjänst? - Finns risk för negativ påverkan på kringliggande verksamheter, tredjeman samt naturområden från släckvatten och brandgaser? - Flera av ovanstående delar har ofta beaktats av leverantören vid framtagande av produkt. Dock bör en separat riskanalys genomföras för de lokala förhållandena. - Eventuella tillstånd från kommun (bygglov) eller länsstyrelse (samråd) kan medföra krav på brandskydd som ska beaktas i riskbedömningen.

3.2 INTERNATIONELLT PERSPEKTIV

I detta avsnitt görs en övergripande internationell kartläggning av relevant kravställning för energilagringssystem i batterier med fokus på explosionsrisken och spridning av toxiska förbränningsprodukter från BESS.

3.2.1 NFPA 855, Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems

NFPA 855, behandlar installation av energilagringssystem i olika former och på olika nivå (industri, hushåll, fristående etc.). I Tabell 4 ges en kortare sammanfattning av relevanta kravställningar ur NFPA 855 för fristående

batterienergilagrar med litiumjonbatterier. Notera att tabellen grundar sig på utgåva från år 2023 och att en ny utgåva kom ut under arbetet med denna skrift (se vidare i avsnitt 12). Inom NFPA 855 anges en skillnad på fristående installationer givet avstånd överstiger 30,5 m till byggnader, fastighetsgräns som kan byggas på, allmänna vägar, brännbara upplag, farligt gods, och andra exponeringsrisker som inte är förknippade med elnätinfrastruktur. Vad detta skyddsavstånd är baserat på, eller bedömning om vilken omfattning av konsekvensreducerande effekt det medför har dock ej kunnat härledas. Noterbart är att NFPA 855 generellt fokuserar på batterienergilagrar som har en kapacitet understigande 600 kWh per brandcell, men för fristående byggnadsverk som endast innehåller batterienergilagrar och som är placerade minst 30,5 meter från andra byggnadsverk finns ingen specifik maximalt tillåten kapacitet.

Tabell 5: Sammanfattning av relevant kravställning ur NFPA 855

NFPA 855	Generella rekommendationer
Skyddsavstånd	Inget behov av ytterligare skyddsavstånd eller avskiljning givet att avstånd till allmänna vägar, brännbara upplag, byggnader, farligt gods överstiger 30,5 m.
Vegetationskontroll	Utrymmen inom 3,05 m (10 ft.) från fristående BESS (ej i byggnad) ska hållas fria från vegetation. Enstaka träd samt gräs eller liknande kan accepteras förutsatt att vidare brandspridning inte förväntas.
Beständighet	Batterienergilagrar ska vara av obrännbart material.
Storlek och separation inom BESS	Batterier ska vara indelade i grupper om högst 50 kWh med ett avstånd om minst 0,9 m (3 ft) till andra grupper. Detta gäller om BESS placeras inom 30,5 meter från byggnader, fastighetsgräns mot andra fastigheter med byggrätt, allmän väg, upplag av brännbara material, farligt god etc. Avsteg från krav på maximal storlek och sektionering enligt ovan kan även medges av ansvarig myndighet, efter utvärdering av fullskaleprovning enligt UL9540A el. likvärdigt. Brännbart material bör undvikas att placeras i energilagret. Energilagrar bör inte placeras i samma rum som ett bostadsrum.
Detektion och ventilation	Utrymmet ska förses med rökdetektorer enligt NFPA 72.
Släcksystem	Automatiskt vattensprinklersystem (enligt NFPA 13). Krav på släcksystem kan utgå givet att detta accepteras av kravställare (AHJ).
Tillgång till vatten för brandsläckning	Tillgång till vatten för brandsläckning ska finnas. Undantag kan accepteras om BESS inte är beläget inom byggnad och minst 30,5 m från publikt tillgängliga vistelsezoner och allmänna vägar.
Skyltning	Utrymmet ska vara skyltat med vilken typ av energilagringssystem som finns i utrymmet.
Explosionskontroll	Ja, system för att förebygga explosion installeras. Vidarehänvisning till NFPA 68 gällande ventilation och NFPA 69 om deflagrationsskydd för utformning. Skydd kan dock utgå givet ett godkännande från AHJ samt tester som visar att 25% av LFL (lower flammable limit) inte nås vid termisk rusning.
Battery management system (BMS)	BESS ska vara försedd med anordning för att förhindra, upptäcka och minimera inverkan av termisk rusning.
Räddningstjänstens insats	En insatsplan ska finnas utarbetad för BESS. Skyltning ska finnas vid dörr till batterienergilagrar.

3.3 SAMMANFATTNING AV REGELVERK, VÄGLEDNINGSDOKUMENT OCH STANDARDER

Genomgången av nationella och internationella regelverk samt branschvägledningarna visar att det finns ett grundläggande ramverk för brandskydd vid utförande av batterienergilager med litiumjonbatterier som energibärare, men att kravställningen är fragmenterad och ofta otydlig i praktisk tillämpning.

Boverkets föreskrifter [1] ger vissa formella krav för energilager >20 kWh, men omfattar endast byggnader och lämnar därmed många installationer helt oreglerade avseende utföranden av brandskydd. Myndighets- och branschvägledningarna (RISE, Svensk Solenergi, MSB etc.) ger viktiga rekommendationer och belyser både behov och problemställning på tydliga sätt, men saknar harmonisering och tydliga acceptanskriterier. Internationella standarder (NFPA 855, FM Global) är mer detaljerade, särskilt kring explosionskontroll och skyddsavstånd, men är inte juridiskt bindande i Sverige.

Identifierade luckor och behov av förtydligande som kan ses utifrån denna del av genomförd litteraturstudie sammanfattas nedan.

Explosionskontroll: Inga nationella krav på tryckavlastning eller deflagrationsventilation förekommer; endast rekommendationer i vägledningarna.

Skyddsavstånd: BBR anger 8 m som generellt krav till skydd mot brandspridning mellan byggnader, men detta hanterar inte explosionsrisk. Internationella riktlinjer föreslår upp till 30 m, beroende på förutsättningar och förekomst av interna skyddssystem i batterienergilagret.

Toxisk spridning: Det saknas tydliga krav på hantering eller konsekvensbedömning av toxisk verkan från brandgaser och släckvatten med hänsyn till miljö och tredje man.

Risikanalys och dimensioneringsdata: Vägledningarna anger att risikanalys bör göras, men i många fall utan metodik, acceptansnivåer eller tydliga verifieringskrav.

Leverantörsdokumentation: Ofta hänvisar internationella leverantörer till kravuppfyllnad enligt exempelvis NFPA 855, NFPA 68, NFPA 69, UL9540A etc., men redovisning av testförfaranden och -resultat, beräkningar, nyttjade indata eller detaljerade säkerhetsprinciper som ligger till grund för produktens utformning är normalt svår att ta del av.

Nationell harmonisering: Ett antal exempel på goda branschinitiativ i form av vägledningarna från olika aktörer kan identifieras. Dessa är dock över lag inte samstämmiga och baseras ofta på "best practice", och ibland utan transparent kunskapsunderlag. Baksidan med sådana enskilt positiva initiativ är att krav- och säkerhetsnivån i rask takt blir ytterst splittrad, både geografiskt över landet och mellan olika aktörer. Parallellt med detta utvecklas batteritekniken mycket snabbt,

vilket ytterligare bidrar till svårigheter att ta fram en heltäckande, likriktad och effektiv reglering som också är hållbar över tid.

För att uppnå en robust och kostnadseffektiv säkerhetsnivå krävs harmoniserade krav och tydliga verifieringsprinciper för explosionskontroll, skyddsavstånd, hantering av toxiska produkter samt dokumentation från leverantörer. Utan detta riskerar projektering och tillsyn att bli osäker och varierande mellan olika aktörer.

4 Riskidentifiering

I följande avsnitt presenteras sammanfattning av genomförd litteraturstudie, del 2. Här sammanfattas en allmän orientering och övergripande översikt av batterienergilagring i litiumjonbatterier, samt de risker som är förknippade med sådan teknik för lagring av elenergi.

4.1 ALLMÄNT OM BATTERIENERGILAGER OCH LITIJONBATTERIER

Ett energilager är, rent förenklat, uppbyggt av en energireservoar, utrustning för omvandling av lagrad likström till brukbar växelström samt en transformator och distributionscentral. Energireservoaren kan vara uppbyggd på flera olika vis (bränsleceller med vätgas, lägesenergilagrade fluider, elektrokemisk potential (batterier av olika kemier) etc.). Utvecklingen av olika lösningar för energilagring går mycket fort, och är starkt pådriven av teknikutveckling och hållbarhetsincitament.

Den teknik som i skrivande stund är mest utbredd, till följd av kostnadseffektivitet och stabilitet är batterienergilagring i olika typer av litiumjonbatterier. Det ska dock poängteras att teknikutvecklingen går mycket fort, och att omfattande forskning och utveckling sker av andra typer av batteritekniker/-kemier och energilagringstekniker. Riskhantering och reglering av säkerhet bör dock i största möjliga mån utgå från det bästa kunskapsläge som råder i förhållande till den teknik som utgör största del av den samtida installationen. Samtidigt är det inte rimligt att avvakta nästa generations batteriteknik i hopp om att riskerna försvinner. Att ignorera dagens risker medan vi bygger in potentiella sårbarheter i samhället är inte ett alternativ, dessa måste i stället hanteras proaktivt utifrån nuvarande teknik och användning.

Utöver själva energilagringenheten eller reservoaren (battericontainer, batteriskåp osv.) ingår enligt tidigare konstaterat även ett antal ytterligare delar i systemet som krävs för att kunna lagra och distribuera elektrisk energi. Dessa systemdelar utgörs i huvudsak av omriktare/ omvandlare som omvandlar batteriernas likström till växelström (och vice versa vid eventuell laddning av batterier med nätström), samt transformatorer som matchar spänningsnivån från omriktarna till nivån på elbolagens elnät. På samma vis som för själva batterierna är samtliga systemdelar i ett energilager behäftade med viss risk för uppkomst av brand. Detta till följd av elinstallationens inneboende egenskaper och risker för felfunktion i elteknisk utrustning med exempelvis överhettning och ljusbågsfenomen som utfall [14]. Dessa systemrisker kommer dock inte att beaktas vidare i denna studie, då arbetet avgränsas till att studera konsekvenser vid exoterma reaktioner i battericeller. Det ska dock poängteras att uppkomst av brand i kopplingsutrustning mycket väl kan utgöra starthändelse ledande till exempelvis extern termisk påverkan på battericeller med termisk rusning och spridning av brand som följd.

Ett batterienergilager är generellt och mycket förenklat uppbyggt av ett antal elektrokemiska battericeller, normalt seriekopplade med varandra och ordnade i batterimoduler. Till modulerna är vidare kontroll- och styrenheter anslutna för att manövrera energilagret. Dessa enheter arbetar utifrån olika typer av givare och

mätutrustning för att under normal drift optimera systemets prestanda och för att i tidigt skede upptäcka och larma om avvikelser. Denna typ av kontrollsystem i energilager benämns BMS (Battery Management System) och övervakar allt ifrån effektuttag och batteriprestanda till temperatur i battericell och omgivning [12, 15, 14]. Modulerna är normalt i sin tur placerade i så kallade batterirack, antingen kopplade i serie eller parallell. Ett rack för batterilagring består generellt av flertalet moduler som staplas vertikalt, ofta inneslutna i någon typ av skyddande rackskåp eller kabinett. För större BESS anläggning är det vanligt att flertalet batterirack placeras inom containrar eller motsvarande inneslutning, antingen utförda med möjlighet till invändigt tillträde (s.k. "walk-in units") eller med tillgång till installationerna direkt från utsidan.

För att hantera batterisystemet är de normalt utförda med mycket sofistikerade övervaknings- och kontrollsystem bland annat genom ett BMS (Battery Management System). Detta har till uppgift att övervaka och styra så att batterierna i systemet inte opererar utanför de givna säkerhetsparametrar som systemdesignen medger. Ett BMS kontrollerar generellt parametrar enligt nedan [16]:

- Batteritemperatur och temperatur på eventuella kylmedier i kylsystem (°C)
- Spänning på cellnivå (V)
- Laddningsgrad (State of Charge, SOC %)
- Strömuttag (A)
- Kylsystemets funktion (luft eller vätskekylt)
- Beräkna tillgänglig effekt, baserat på batteriets spänning, ström och temperatur
- Laddningsdistribution över battericeller
- Batteriernas helhetstillstånd (State of Health, SOH) och prestanda i förhållande till nyskick

Genom ett sådant system kan skydd mot ett flertal riskhändelser uppnås, exempelvis mot:

- Överspänning
- Överström
- Underspänning
- Överladdning
- Djupurladdning
- Höga temperaturer
- Låga temperaturer
- Jordfel

BMS är dock primärt effektivt vid behov av reglering mot intern påverkan, och har generellt mindre verkan vid extern påverkan mot batterierna.

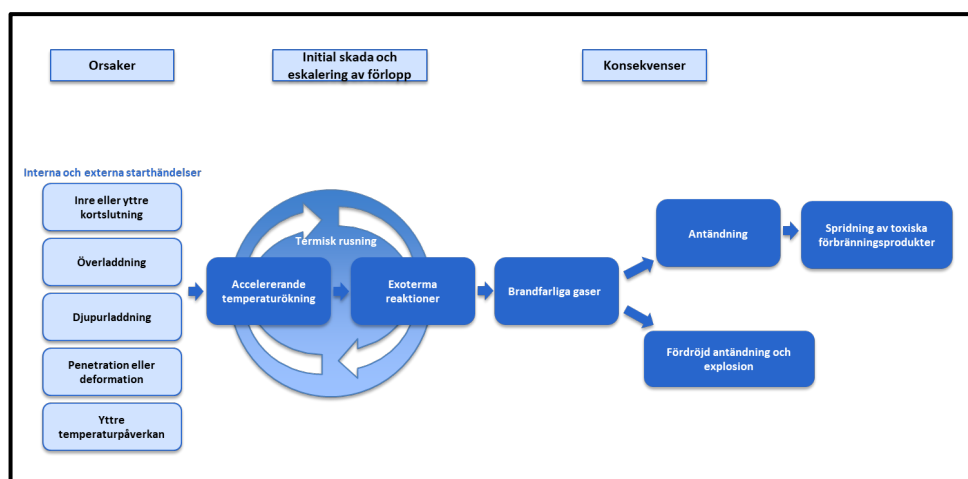
I det utförande som idag, sedan en successiv transition under ungefär 2020-2024 [17, 18], utgör den förhärskande uppbyggnaden för stationära batterienergilagrar är en typ av litiumjonbatterikemi benämnd LFP (Litium-järn-fosfat, LiFePO_4) den dominerande [12], men även andra typer av batterikemier som exempelvis NMC (Litium-nickel-mangan-koboltoxid) förekommer och har historiskt utgjort den större delen av produktionsmarknaden. Denna transition mellan batterikemier har drivits på med anledning av att LFP-batterier både är kostnadseffektiva att

producera i förhållande till flertalet andra batterikemier i litiumjonfamiljen, att de kan tillverkas med relativt hög energidensitet (dock normalt inte lika hög som exempelvis NMC-batterier) och att denna batterikemi anses vara relativt sett reaktionsstabil med hög prestanda över ett stort antal laddningscykler [18]. Utöver batterikemins prestanda innehåller LFP-batterier inte heller beståndsdelar utav konfliktmetaller likt närliggande batterikemier innehållande exempelvis kobolt.

4.2 RISKER I BATTERIENERGILAGER OCH LITIJONBATTERIER

I förhållande till andra batterityper (ex. bly-syra) är litiumjonbatterier generellt mer känsliga för mekanisk påverkan, temperatur och överladdning. Dessutom innehåller batteriet ämnen som vid uppvärmning kan generera toxiska och brännbara gaser, vilket i värsta fall kan leda till brand, kontaminering i omgivningen eller gasexplosion [19]. Detta föranleder att brandrisker och potentiella brandförlopp bör studeras mer ingående så att adekvata åtgärder för hantering av risk kan etableras.

Förståelse för brandförloppet i ett litiumjonbatteri, är av stor vikt under hela systemets livscykel, det vill säga vid utveckling, upphandling, projektering, implementering och drift av utrymmen för hantering och förvaring av batterienergisystem, samt vid design av skyddssystem. I nedan visualiseras skadeförloppet på övergripande nivå, och i följande avsitt redovisas en orienterande översikt av samma generiska skadeförlopp förknippat med energilagring i litiumjonbatterier. Detta görs på en mycket övergripande nivå, utan att djupare värdera skillnader i reaktion och beteende mellan olika typer av batterikonstruktioner eller kemisk sammansättning.



Figur 1. Generisk beskrivning av skadeförlopp.

4.2.1 Skadeförlopp i battericellen, termisk rusning och teoretiskt brandförlopp

Nedan sammanfattas ett skadeförlopp, med start i en elektrokemisk litiumjonbattericell ledande till termisk rusning och propagering till intilliggande batterier, samt någon typ av brand- eller explosionsförlopp. Det ska noteras att det faktiska skade- och brandförloppet kan variera i mycket stor utsträckning

beroende på aktuella omständigheter avseende skadekaraktär och batteribeskaftenhet.

Vid fel i en eller flera litiumjonceller kan betydande mängder energi frigöras, vilket i sig självt kan utgöra en tändkälla och initiera ett brandförlopp. Det är alltså inte tvunget så att det krävs en extern tändkälla för att starta ett brandförlopp.

Den frigjorda energin kan delas in i två huvudsakliga kategorier:

- Kemisk potentiell energi - frigörs genom någon typ av intern kortslutning i cellen. Detta leder till snabb uppvärmning och termisk nedbrytning av cellkomponenter, vilket kan resultera i termisk rusning.
- Förbränningsenergi - som frigörs vid brand eller explosion av de gaser som genereras under termisk rusning och nedbrytning av cellkomponenter.

Händelseförloppet inleds av att någon typ av starthändelse (intern eller extern påverkan på batteriet) initierar reaktionskedjan, vilket kan leda till en intern temperaturökning i battericellen. Denna temperaturökning kan, om den tillåts fortgå utan avbrott försätta cellen i s.k. termisk rusning. Den termiska rusningen kan förklaras som en exoterm feedback-loop där den genererade energin i battericellen eskalerar reaktionshastigheten allt eftersom reaktionen fortgår. Som konsekvens av frigörande av den kemiska energipotentialen i cellen stegrar den interna temperaturen och cellkomponenter sönderfaller genom exoterma reaktioner.

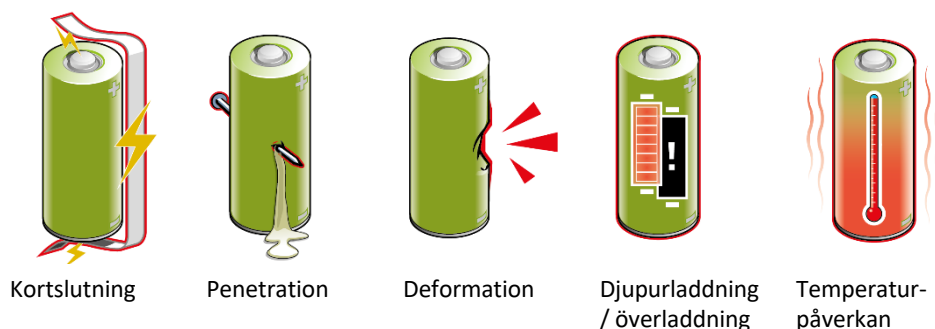
Sammansättning och fördelning mellan olika kemiska föreningar som bildas vid sådan reaktion varierar beroende på många faktorer, som exempelvis batterikemi, laddningsgrad (SoC/ "state of charge"), starthändelse samt reaktionstemperatur. Grovt kan det sägas att sönderfall i tidiga skeden och vid lägre temperaturer resulterar i en större andel komplexa kemiska föreningar, ex. karbonater, större kolväteföreningar och dylikt. Vid sönderfall under högre temperaturer fortgår de kemiska reaktionerna i mer fullständig omfattning, oxidationsprocesser sker mer fullständigt och produkterna vid sådana förlopp är normalt molekyler med lägre molekyllmassa, ex. H₂, CO etc. [20, 21].

Konsekvensen av rusningen är produktion av brännbar gas, vilket genererar ett ökat internt tryck inne i cellens inkapsling. När gastrycket blir för stort ventilerar batteriet (antingen genom säkerhetsventil om sådan förekommer, eller genom att batterikapslingen rämnar), s.k. "off-gassing" eller ventilering. Den brännbara gasen kommer därmed i kontakt med omgivningen och kan antända. Brandens karaktär beror sedan på mängd frigjord brännbar gas, potentiell ackumulering av sådan gasmassa samt tillgång till tändkälla. I vissa fall kan även fasta partiklar, så som kol, aluminium och koppar slungas ut från battericeller i samband med ventilering vilket ytterligare kan bidra till mekanisk skada på intilliggande battericeller eller utrustning [20].

Skadehändelser som normalt kan utgöra starthändelse för termisk rusning och batteribrand redovisas nedan samt i Figur 2 [2, 12, 14, 22].

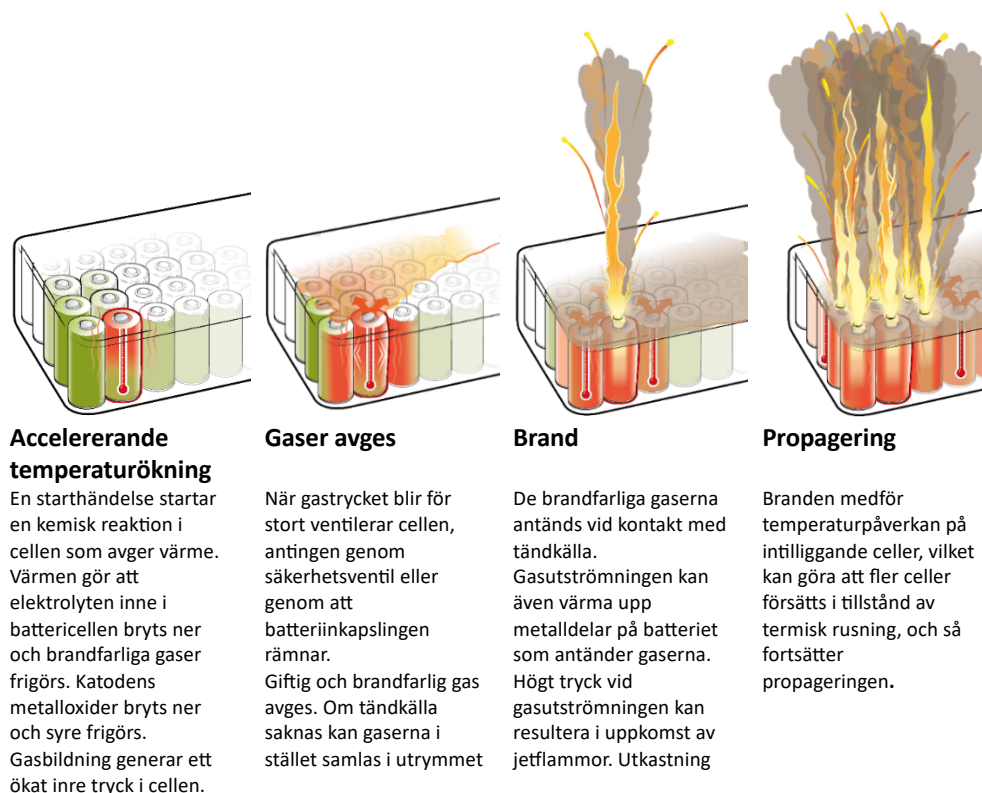
- Kortslutning, fallerande separator, okontrollerad oxidation från katod.

- Mekanisk påverkan, batteriet blir fysiskt skadat (penetration eller deformation).
- Elektrisk påverkan, överladdning (ledande till okontrollerad litiumplätning av anod, dendritisk påbyggnad och fallerande separator), häftigt effektuttag, djupurladdning etc.
- Temperaturpåverkan.



Figur 2: Starthändelser som kan orsaka en termisk rusning, illustration Fredrik Saarkoppel/ Brandskyddslaget AB.

Skadeförloppets delmoment beskrivs mer ingående i Figur 3 [23]. Notera att om tändkälla saknas då gaser avges från battericeller finns en tydlig risk för uppbyggnad av brandfarliga gaser samt termisk propagering mellan battericeller och moduler utan extern flammande förbränning, vilket diskuteras djupare i kommande avsnitt.



Accelererande temperaturökning

En starthändelse startar en kemisk reaktion i cellen som avger värme. Värmen gör att elektrolyten inne i battericellen bryts ner och brandfarliga gaser frigörs. Katodens metalloxider bryts ner och syre frigörs. Gasbildning genererar ett ökat inre tryck i cellen.

Gaser avges

När gastrycket blir för stort ventilerar cellen, antingen genom säkerhetsventil eller genom att batteriinkapslingen rämnr. Giftig och brandfarlig gas avges. Om tändkälla saknas kan gaserna i stället samlas i utrymmet

Brand

De brandfarliga gaserna antänds vid kontakt med tändkälla. Gasutströmningen kan även värma upp metalldelar på batteriet som antänder gaserna. Högt tryck vid gasutströmningen kan resultera i uppkomst av jetflammar. Utkastning

Propagering

Branden medför temperaturpåverkan på intilliggande celler, vilket kan göra att fler celler försätts i tillstånd av termisk rusning, och så fortsätter propageringen.

Förloppet kan stoppa här med att cellen endast svullnar upp eller brister.	och bygga upp en explosiv atmosfär.	av brinnande celldelar kan ske.
--	--	------------------------------------

**Figur 3. Schematisk översikt över brandförlopp i litiumjonbatteri, illustration Fredrik Saarkoppel/
Brandskyddslaget AB.**

4.2.2 Explosionsrisk

Vid termisk rusning där batteriet tryckavlastas avges enligt ovan en komplext sammansatt gasblandning. Beroende på stadie av sönderfall och specifikt rådande förutsättningar varierar innehållet i gasmassan, men generellt kan konstateras att bland annat vätgas, kolmonoxid, koldioxid, metangas och etangas [24] utgör vanligt förekommande reaktionsprodukter i samband med sönderfall under termisk rusning [21, 20]. Utöver detta genererar även vissa typer av litiumjonbatteri syre vid termiskt driven nedbrytning av metalloxider, vilket i viss utsträckning kan bidra till förbränningen och förbränningshastigheten. Omfattningen av sådant bidrag är dock inte av sådan storlek att branden på något vis är självupprätthållande vid avsaknad av atmosfäriskt syre, men däremot kan omfattning av närvaro av syre påverka den resulterande gassammansättningen genom att påverka graden av oxidation i olika reaktionssteg [21, 20].

Om direkt tändkälla saknas kan gaserna i stället samlas i utrymmet och bygga upp en explosiv atmosfär. Antändning av en sådan gasansamling kan medföra kraftiga explosionsförlopp med stor påverkan på byggnaden eller utrymmet som batterienergilagret är placerat i. Även om gaserna antänds direkt är det möjligt att en del av gasmassan inte involveras i förbränningen, och "fickor" med oförbrända batterigaser kan i sådana lägen uppstå inom den berörda inneslutna volymen [25].

Brandfarliga gaser som inte förbränns kan utgöra en fara för personer i närliggande utrymmen samt räddningstjänst vid insats då de är högst toxiskt verkande, och då en risk för explosion finns. Då det är svårt att rent praktiskt stoppa en termisk rusning inom ett batteri kan toxiska och brännbara gaser fortsätta att ansamlas under en lång tid även om släckinsats genomförs. Det är vidare värt att notera att batterigaser i många avseenden uppvisar andra egenskaper i förhållande till ansamling av "normala" brandgaser under icke-fullständig förbränning. Även sådan mer konventionell gasansamling har potential att reagera med explosionsliknande brandförlopp under specifika förhållanden (jfr. "backdraft-fenomen"), den primära differensen är dock att oförbrända batterigaser normalt har ett väsentligt större brännbarhetsområde, och kräver normalt en lägre energi för att antända [11, 25].

Omfattningen av en explosion beror av gassammansättning, omblandning av de brännbara gaserna och syre samt geometriska faktorer. För att kunna förstå explosionsrisken vid en viss gassammansättning används brännbarhetsgränser, där den nedre brännbarhetsgränsen (LFL) är mest vital. LFL är den lägsta

koncentrationen (lägsta andel ämnen i luft) som behövs för att gasblandningen ska kunna antända. Den övre brännbarhetsgränsen (UFL) är den maximala koncentrationen vid vilken gasen kan antända.

Det är svårt givet dagen kunskapsläge att ha en tydlig bild av sannolikheten för explosion. Inom en rapport från UL solutions [25] studerades 141 olika händelser inom ESS (Energy Storage Systems). Händelserna inkluderade även sådana som skett inom bostäder. Det kunde i denna studie konstateras att i cirka 10% av fallen inträffade batterigasexplosion i någon omfattning. Man konstaterar i denna rapport även att antändningsenergin som fordras för att antända batterigaser från litiumjonbatterier kan anses vara mycket låg (mellan 0,03 och 0,7 mJ), vilket innebär att det endast krävs mycket små tändkällor eller förekomst av statisk elektricitet för att initiera ett explosionsartat förlopp. Det ska i dessa sammanhang noteras att den termiska rusningen som sådan i många fall är att betrakta som en tändkälla i sig.

4.2.3 Toxiska förbränningsprodukter

När litiumjonbatterier brinner med flammande förbränning produceras förbränningsprodukter eller brandrök innehållande en rad mer eller mindre toxiska eller på annat sätt skadliga kemiska föreningar. Exakt innehåll i brandgaserna beror av många faktorer, som exempelvis battericellernas fysiska och kemiska beskaffenhet, brandförlopp och -orsak, atmosfäriska förhållanden och förbränningstemperatur [20, 21, 26].

Batterikemin, det vill säga valet av katodmaterial med exempelvis NMC (nickel-mangan-kobolt) eller LFP (litiumjärnfosfat) vilka i dagsläget utgör förhärskande cellkemier i den aktuella applikationen, påverkar både mängden och typen av gaser som bildas. NMC-celler tenderar enligt den studerade litteraturen att generera större mängder gas totalt sett, medan LFP-celler genererar mindre volym men har å andra sidan påvisats avge högre halter av både brandfarliga och vissa toxiska ämnen som exempelvis vätgas och vätefluorid [20, 21]. Battericellens geometriska form (cylindrisk, pouch- eller prismatisk cell) påverkar även det rent fysikaliskt faktorer som exempelvis värmeförlust till omgivningen, och därmed också förbränningsdynamiken. Ur denna synvinkel uppvisar prismatiska celler ofta en högre gasproduktion per energienhet [21]. Laddningstillståndet eller battericellernas laddningsgrad ("state of charge", SOC) är enligt tidigare omnämnt ytterligare en avgörande parameter. Högre laddningsgrad innebär högre energiinnehåll i den elektrokemiska cellen, och därmed även generellt sett en mer omfattande kemisk nedbrytning termisk rusning och sekundär förbränning av batterigaser [20, 21].

Under flammande förbränning av litiumjonbatterier och avgivna batterigaser sker en ytterligare ombildning av de initialt bildade batterigaserna. Den initiala process som sker vid termisk rusning inuti battericellen genererar, högst förenklat vid högre celltemperaturer, gaser som exempelvis koldioxid (CO_2), vätgas (H_2), kolväten av varierande komplexitet och gasformig vätefluorid (HF). Detta genom nedbrytning och avkokning av elektrolyt (vilken i sig ofta är baserad på karbonater som DMC, EMC, EC) och litiumsalter (exempelvis LiPF_6 -salt). Vid flammande förbränning med tillgång till atmosfäriskt syre oxideras delar av dessa gaser

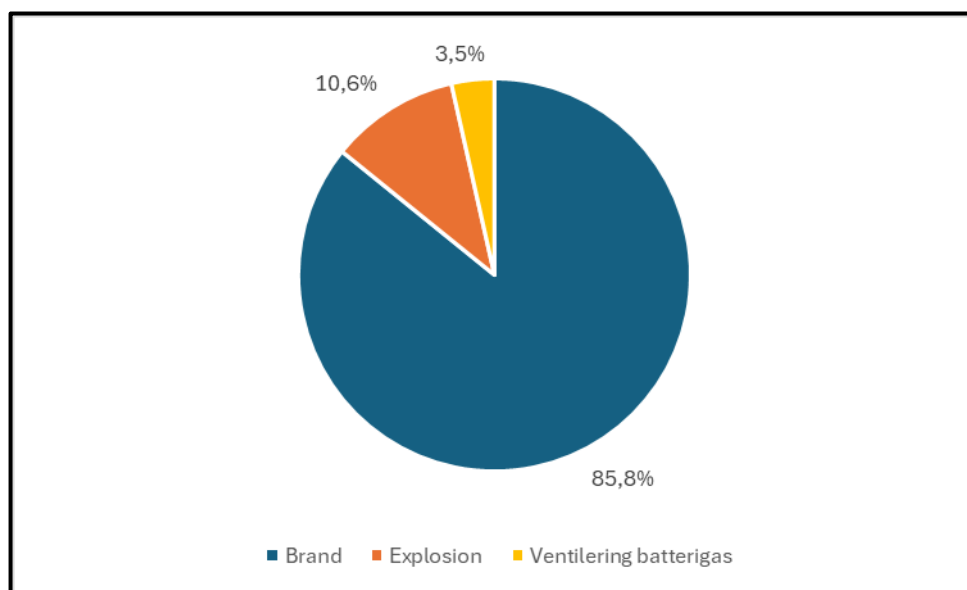
vidare, vilket kan förändra sammansättningen i de resulterande förbränningsprodukterna, och öka mängden utav mindre komplexa kemiska sammansättningar så som CO och CO₂. I slutna utrymmen, såsom containrar kan dock tillgången till fritt syre vara mer begränsat, särskilt om brand pågår i det slutna utrymmet över tid. Detta kan leda till mer ofullständig förbränning, och därigenom högre halter av kolmonoxid (CO), VOC (flyktiga kolväteföreningar) samt partiklar av varierande storlek och massa (kategoriseras normalt i PM_{xx}-kategorier) [20, 26].

Vanligt förekommande kemiska föreningar som påvisats genom vetenskapliga studier samt luftkvalitetsmätningar på varierande avstånd från skadeplats vid inträffade händelser utgörs bland många andra av HF (gasformig vätefluorid), VOC (flyktiga kolväteföreningar), PM_{xx} (partiklar av varierande storlek), HCN (vätecyanid), HCL (saltsyra), nitrösa gaser (NO_x), svaveldioxid (SO₂), CO (kolmonoxid) samt CO₂ (koldioxid) [26, 20, 21, 27, 28, 29, 30].

4.2.4 Risk för uppkomst av brand i batterienergilager

Sannolikheten för uppkomst av brand i batterienergilager med litiumjonbatterier som energibärare är förknippad med stora osäkerheter givet att sådana fortfarande utgör en relativt ny företeelse, vilken dessutom utvecklas i rask takt. Detta medför därmed att historiska data endast till viss del kan tjäna som underlag vid bedömning av felfrekvenser och olycksstatistik vid applikation på de system som installeras idag.

Vid en analys av 141 incidenter kopplade till BESS [25] påvisades att 85% av händelserna resulterade i brand, 10 % resulterade i explosion och 3,5 % av händelserna resulterade i att gaser ventilerades bort utan brand eller explosion som följd, se Figur 4. Utifrån dessa data kan det konstateras att det mest relevanta händelseförloppet att studera vidare i avseende om bedömning av konsekvensområden är just brand och resulterande spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand. Därefter följer enligt det statistiska underlaget händelser där



Figur 4. Utfall händelseförlopp av studerade incidenter enligt [25].

Data gällande sannolikhet har dock tagits fram av EPRI (Electric Power Research Institute). EPRI är ett amerikanskt forskningsinstitut inom el- och energibranschen. Det är en icke-vinstdrivande organisation som grundades 1972 och har sitt huvudkontor i Palo Alto, Kalifornien. EPRI bedriver tillämpad forskning och utveckling kring elproduktion, energilagring, elnät, säkerhet, miljö och effektivisering.

I ett "white-paper" från 2024, framtaget av EPRI, framgår hur ofta en "failure incident" sker för ett batterienergilagrar i litiumjonbatterier [31]. En "Failure incident" kan beskrivas som en händelse orsakad av ett fel i ett BESS-system eller en komponent i systemet, ledande till en ökad säkerhetsrisk. Det framgår tydligt av rapporten att felfrekvensen minskat kraftigt sedan 2018. Under åren 2020–2023 uppgick felfrekvensen till mellan cirka 0,2–0,9 händelse per GW. Detta innebär en felfrekvens för ett energilagrar på 100 MW på 0,02–0,09, vilket motsvarar en händelse varje 10–50 år.

Statistiken från EPRI tyder vidare på att de flesta händelser inträffar under montering, entreprenad eller inom en tvåårsperiod efter driftsättning. Dock visar även statistiken på att driftsättningen av batterienergilagrar har ökat avsevärt under senare år vilket lett till att relativt få äldre batterienergilagringssystem är i drift, sett som andel av den stora mängden. Det återstår således att över tid övervaka och undersöka om sannolikheten för fel är fortsatt högre under montering, entreprenad och en tvåårsperiod efter driftsättning, alternativt om åldrande system framgent kommer att bidra till det statistiska olycksunderlaget.

Denna brist på tillgängligt relevant statistiskt underlag är något som av flertalet aktörer ses som ett stort problem vid utveckling av säkerhetssystem för energilagrar i batterier. Utöver det relativt sett smala dataunderlaget (fåtal händelser och varierande rapporteringskvalitet) sker utveckling inom batteriteknik och applikationsområden i en mycket hög takt. Detta medför att den data som finns dokumenterad ofta utgår från anläggningar utförda med teknik och kemiska egenskaper som idag redan till viss del är utdaterad [32].

Det ska dock noteras att den batterikemi som vid framtagande av denna studie är förhärskande för aktuell applikation i batterienergilagring, litiumjärnfosfat, relativt sett utifrån generiska egenskaper kan sägas vara en något mer reaktionsstabil typ av batterikemi inom litiumjon-familjen, och innehar högre toleranser mot mekanisk, elektrisk och termisk påverkan än flertalet andra batterisammansättningar. Detta normalt på bekostnad av en något lägre energidensitet. Med det inte sagt att batterier av litium-järnfosfatkemi inte kan drabbas av termisk rusning eller brand, vilket i vissa sammanhang framhålls [20, 33].

För att undvika bränder ligger mycket ansvar på tillverkare, montörer och leverantörer av batterisystem. Om batterierna behandlas på fel sätt finns risken att de blir skadade, och kan på så vis utgöra en större risk för termisk rusning. På samma vis kan ett felaktigt dimensionerat batteriutrymme, med otillräcklig eller felaktig kylning eller ventilation medföra en förhöjd risk för uppkomst av brand. Dessutom bör det alltid finnas ett BMS installerat i anslutning till eller internt i batteriet (beroende på batteri- och anläggningsstorlek) för att uppnå erforderlig kontroll och styrning så att batteriet inte laddas eller nyttjas på ett för systemet skadligt sätt.

Utifrån tillgängligt studerat statistiskt underlag är det enligt ovan inte möjligt att peka på en entydigt gällande sannolikhet eller frekvens för händelse eller brand i batterienergilager utan att denna samtidigt är behäftad med mycket stora osäkerheter avseende giltighet över tid. Det som dock kan noteras är att batterienergilager i litiumjonbatterier generellt sett inte är att betrakta som anläggningar med mycket förhöjd brandrisk vid jämförelse med andra typer av byggnader eller elinstallationer – givet att de är tillverkade, installerade, och underhållna enligt rådande krav utifrån elsäkerhet och kvalitetskrav på enskilda komponenter.

Med bakgrund i detta studeras inte frekvens eller sannolikhet för uppkomst av brand eller termisk rusning vidare i denna studie. Därigenom definieras eller studeras inte heller begreppet "risk" i form av produkt av sannolikhet och konsekvens vidare i studien. I enlighet med angiven omfattning i avsnitt 1 utgår studien i stället från bedömning av konsekvens vid en skadehändelse, och hur skadans karaktär kan påverka denna. De skadehändelser som väljs vid studie av parametrisk påverkan på konsekvens är således valda med avsikt att representera dimensionerande fall utifrån en princip om värsta tänkbara trovärdiga scenario. Ingen djupare värdering läggs således i sannolikheten för uppkomst av sådant scenario i samband med studie av metoder för konsekvensbedömning. Vid genomförande av riskanalys i praktisk tillämpning bör viktning av åtgärder i förhållande till riskens storlek alltid tas i beaktande vid bedömning av skälighet i vidtagande av säkerhetshöjande åtgärder.

4.3 SAMMANFATTNING AV RISKIDENTIFIERING

Litiumjonbaserade batterienergilager är idag den mest utbredda tekniken för stationär energilagring, främst på grund av kostnadseffektivitet och stabil prestanda. Trots detta medför tekniken betydande säkerhetsutmaningar.

Den mest kritiska skadehändelsen är termisk rusning, som kan initieras av mekanisk, elektrisk eller termisk påverkan. Förloppet kan leda till snabb temperaturökning i skadade battericeller, gasbildning och ventilering av brännbar och toxisk batterigas ("off-gassing"). Detta kan vidare resultera i termisk propagering mellan celler, brand och i vissa fall explosion.

De avgivna gaserna är både brännbara och toxiska, med sammansättning som varierar beroende på batterikemi, laddningsgrad och förbränningsförhållanden. Vanliga komponenter är vätegas, kolmonoxid, vätefluorid och flyktiga organiska föreningar, vilka kan skapa explosiva atmosfärer med mycket låg antändningsenergi. Detta innebär risk för kraftiga tryckförlopp och allvarliga konsekvenser för både människor och byggnadsstruktur.

Vid flammande förbränning produceras brandgaser med toxiska beståndsdelar, exempelvis HF (gasformig vätefluorid), VOC (flyktiga kolväteföreningar), PM_{xx} (partiklar av varierande storlek, ex. tungmetaller), HCN (vätecyanid), HCl (saltsyra), nitroser (NO_x), svaveldioxid (SO₂), CO (kolmonoxid) samt CO₂ (koldioxid). Även i detta avseende varierar produktion och koncentrationer med förutsättningar så som batterikemi, laddningsgrad och förbränningsförhållanden.

Sannolikheten för brand i moderna batterienergisystem bedöms i många avseenden som relativt låg vid korrekt konstruktion och drift, men osäkerheter kvarstår på grund av begränsade data över olyckshändelser och en mycket snabb teknikutveckling. Därför bör riskhantering utgå från värsta trovärdiga scenario snarare än statistiska sannolikheter. Effektiva barriärer som Battery Management System (BMS), korrekt installation och robusta skyddsåtgärder är avgörande för att begränsa konsekvenserna.

Batterienergilagring med litiumjonbatterier som energibärare är inte att betrakta som högriskanläggningar, men de inneboende riskerna vid termisk rusning och gasbildning kräver proaktivt säkerhetsarbete, särskilt avseende explosionsskydd och hantering av toxiska förbränningsprodukter.

5 Inträffade händelser

I följande avsnitt presenteras sammanfattning av genomförd litteraturstudie, del 3. Under de senaste åren har flertalet olyckshändelser kopplat till större batterienergilagrar inträffat. I följande avsnitt redovisas ett antal av dessa händelser för att skapa en ökad förståelse kring händelseförlopp och konsekvenser i faktiska fall.

Kartläggningen har genomförts genom sökning i litteratur för ett antal utvalda brand- och explosionshändelser i batterienergilagrar mellan åren 2019 och 2025. Urvalet har gjorts genom en semistrukturerad process där ett par händelser med väldokumenterade och omfattande officiella utredningar valts ut och kompletterats med ett antal slumpvis utvalda nyare händelser, med stöd av olyckskatalogen i EPRI:s Battery Energy Storage System Failure Incident Database [6].

Med anledning av att utvecklingen av teknik och systemlösningar för batterienergilagring i litiumjonbatterier går mycket fort framåt ska det noteras att ett antal av de äldre studerade anläggningarna har utförts i ett läge innan det att dagens mer omfattande reglering trätt i kraft (ex. NFPA 855, UL 9540 etc.). Ett flertal utav dessa anläggningar saknar exempelvis helt system för konsekvensminimering genom deflagrationsskydd. Det ska dock vidare noteras att reglering av utförande samt tekniska egenskaper på nationell nivå i Sverige idag fortsatt inte ställer några direkta krav på utförande av BESS-enheter eller dess skyddssystem. Detta medför att utföranden i enlighet med de äldre systemen som beskrivs nedan även idag teoretiskt kan vara relevanta.

Sammanställningarna nedan utgår från tillgängligt referensmaterial i form av officiella olycksrapporter, rotorsaksanalyser, rapportering från media, offentliga myndigheter och dylikt. Sanningshalten i refererade påståenden och konstateranden har kontrollerats i största möjliga omfattning, men det ska poängteras att underlag i form av nyhetsrapporter alltid är behäftade med viss osäkerhet. I takt med vidare utredningar av inträffade händelser, samt publikation av sådant material kan fakta i detta avsnitt komma att bli inaktuell eller behöva kompletteras inför vidare återopande.

5.1 MCMICKEN, ARIZONA, USA 2019

Denna händelse som inträffade den 19:e april 2019 är en av de händelser som bedöms ha haft tydligast inverkan på de riktlinjer och regelverk som utarbetats kring batterienergilagring.

Händelsen inträffade 2019 i Arizona, USA. McMicken Battery Energy Storage System (BESS) var en containeriserad anläggning med en installerad kapacitet på 2 MW / 2,16 MWh. Systemet bestod av litiumjonceller av NMC-kemi (Nickel-Mangan-Kobolt) i modulkonfiguration (14 moduler per rack, 27 rack i drift) [1], [2]. Anläggningen togs i drift i mars 2017 och användes för nätstabilisering, solintegration och spänningsreglering [2]. Vid händelsen var batterierna laddade till cirka 90 % SOC [28].

Den bakomliggande orsaken till olyckan var en defekt battericell som gick in i termisk rusning. Det gassläcksystem som fanns installerat aktiverades men var inte designat för att stoppa den termiska rusningen, vilket gassläcksystem generellt inte är. Givet den "off-gassing" som skedde då battericeller gått in i termisk rusning byggdes en brännbar atmosfär upp inom containern. Denna gasuppbbyggnad ventilerades inte ut då ventilationssystemet var dimensionerat att stoppa vid detekterad brand. Cirka tre timmar efter den initiala termiska rusningen öppnades dörren till systemet av räddningstjänsten, vilket ledde till att gaserna antände och orsakade en kraftig explosion. Flera brandmän skadades i explosionen men ingen omkom.

Säkerhetssystem	
Detektion	<i>Aspirerande rökdetektion [28] Ingen gasdetektering [27]</i>
Släcksystem	<i>Aerosol, Novec 1230 designad för 10 % koncentration [27]</i>
HVAC/ Nödventilation	<i>Avstängd vid utlöst släcksystem [28]</i>
Tryckavlastning/ deflagrationsskydd	<i>Ej installerat [27]</i>

Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
19:e april 16:54	<i>Spänningsfall i cellpar 7, modul 2, rack 15 vilket indikerade internt cellfel [27]</i>
16:55	<i>Rökdetektering utlöstes, vilket stängde DC-brytare och AC-kontaktorer [27]</i>
16:55	<i>Novec 1230-släcksystem utlöstes [28]</i>
17:44	<i>Kommunikation med BESS förlorades [28]</i>
17:48	<i>Räddningstjänst anlände, observerade vit gas och HAZMAT-enhet uppmätte höga halter av HCN (>50 ppm) och CO (>500 ppm) i s.k. "hot zone" som ansattes till ca 10 meter runt container [28]</i>
20:01	<i>HAZMAT-enhet öppnade dörren till containern efter att gasnivåerna utanför bedömts som säkra [28]</i>
20:04	<i>En kraftig deflagration inträffade, med en flamma som enligt visuell bedömning sträckte sig minst 23 m horisontellt och 6 m vertikalt. Fyra brandmän skadades allvarligt och den brandman som stod i dörröppningen vid deflagrationen slungades bakåt ca 25 meter [28]</i>

Slutsatser från utredning

Följande fem faktorer beskrivs som bidragande till händelseutvecklingen [27, 28]:

- Internt cellfel som utlöste termisk rusning i battericell.
- Det brandskydd som fanns installerat var ineffektivt för denna typ av händelse.
- Brist på termiska barriärer mellan battericeller och -moduler medförde att termisk rusning kunde propagera genom hela rack 15, dock ej till intilliggande rack 13 resp. 17. Skadeutseende tyder på att förbränning med öppen låga sannolikt ej skett.

- Ingen fungerande nödventilation fanns installerad vilket gjorde att brandfarliga gaser kunde samlas.
- Inom insatsplanen fanns ingen specifik information om specifikt förfarande gällande hantering av gaser, kylning och bekämpningsmetodik.

Battericontainern totalförstördes vid explosionen. Väggar buktade ut och dörrar slets loss. Det bör även nämnas att explosionen inträffade cirka 2 minuter efter att räddningstjänsten öppnat dörren till containern. Detta visar på svårigheterna kring insatsmetodiken vid denna typ av händelser.

Beräkningar som genomförts i efterhand uppskattar att cirka 14% av volymen i containern var en brandfarlig blandning av gaser (H_2 , CO , CH_4 , C_2H_4 , CO_2 - OBS – baserat på senare genomförda beräkningar och antaganden) [27].

Konsekvenser

- **Explosion:** Tryckvågen kastade dörrar och utrustning samt två brandmän ca 6–25 m från dörren [28].
- **Skadezon brand:** Enligt visuell bedömning minst 23 m horisontellt, 6 m vertikalt (baserat på flammans utbredning). Inga övriga brandskador på intilliggande installation eller anläggning har noterats [28].
- **Toxiska förbränningsprodukter:**
 - **Lokalt:** HCN och CO uppmättes i farliga nivåer (>50 ppm HCN , >500 ppm CO) i "hot zone" ca 10 meter runt om container före inträde [28].
 - **Regionalt:** Inga mätningar avseende större spridning av toxiska förbränningsprodukter under eller efter händelsen har påträffats.

Ingen kvantitativ spridningsmodell för HF , VoC , CO , CO_2 eller andra förbränningsprodukter har påträffats.

- **Personskador:** Fyra brandmän fick allvarliga skador, ytterligare fem personer observerades för HCN -exponering [28].
- **Materiella skador:** Containern totalförstörd, omfattande strukturella deformationer [27].

5.2 MOSS LANDING, KALIFORNIEN, USA 2025

OBS - Denna händelse inträffade under 2025, dvs. i relativt närtid till framtagandet av denna rapport. Med anledning av detta finns inte omfattande och tydliga utredningar eller "root cause analysis"-rapporter att tillgå. Information nedan baseras på allmänt tillgänglig information från anläggningsägare, myndigheter och media. I takt med vidare utredning och publikation av sådant material kan fakta nedan komma att bli inaktuell.

Moss Landing Energy Storage Facility belägen i Monterey County, Kalifornien, är en av världens största BESS-anläggningar. Den aktuella delen av området drivs av Vistra Corp och består av tre faser: ML300 (300 MW), ML100 (100 MW) och ML350 (350 MW). Anläggningen är uppbyggd av containerbaserade BESS-system placerade inuti en stor äldre turbinhallsbyggnad. Händelsen inträffade den 16 januari 2025 i ML300-byggnaden som innehöll ca 99 858 litiumjonmoduler med celler av batterikemin NMC (nickel-mangan-kobolt) och med kapacitet om 1200 MWh. Anläggningen togs i drift 2020 för att lagra överskottsel solesproduktion

och som stödtjänst till från Kaliforniens elnät [34, 35]. Även om branden var omfattande (ca 55-80% av batterierna i ML300 skadades) spred den sig inte till närliggande byggnader [36, 35, 37].

Säkerhetssystem	
Detektion	<i>Ingen information om brand- eller gasdetektering har påträffats.</i>
Släcksystem	<i>Någon typ av internt släcksystem var enligt studerade dokument integrerat i systemet. Det framgår dock ej vilken typ och i vilken omfattning eller vad detta dimensionerats efter. [38]</i>
HVAC/ Nödventilation	<i>Ingen information om HVAC eller nödventilation av varken containrar eller byggnad har påträffats.</i>
Tryckavlastning/ deflagrationsskydd	<i>Ingen information om tryckavlastning eller deflagrationsskydd av varken containrar eller byggnad har påträffats.</i>
Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
16 januari 15:00	<i>Brand upptäcks i byggnad ML300 [38, 34]</i>
16 januari 17:00	<i>North County Fire utfärdar varning för närliggande delar av kringliggande bebyggelse [38]</i>
16 januari 19:10	<i>Myndigheter utfärdar evakueringsorder för sju "zoner" av kringliggande bebyggelse (ca 1200 personer berörs). Full avstängning av väg Highway 1 och Dolan Rd. [34, 38]</i>
17 januari 18:00	<i>Evakuering hävs, branden anges vara under kontroll [38]</i>
18 januari	<i>Branden uppges vara helt släckt [38]</i>
18 februari	<i>Mindre återantändning "flare-up" sker och ny insats pågår i ca 10 timmar innan branden återigen anses vara släckt. [34]</i>

Slutsatser från utredning

Enligt EPRI och EPA startade branden i en batterimodul på "övre våningen" inom anläggningen [34, 35]. Exakt rotorsak är ännu inte offentliggjord, men termisk rusning i en litiumjoncell med efterföljande termisk propagering är den primära hypotesen [35]. Faktorer som kan ha bidragit inkluderar möjlig intern kortslutning eller defekt cell samt otillräcklig brandsläckningskapacitet [34, 35].

Konsekvenser

- **Explosion:** Ingen gasexplosion har rapporterats. Kvantitativa data för konsekvensområde saknas därför, men skadeområdet bedöms kvalitativt som begränsat till anläggningen och närmaste zoner.
- **Skadezon brand:** Ingen tydlig omfattning från enskild flamma har rapporterats, hela ML300-byggnaden erhöll dock totalskada och ca 55-80 % av batterierna däri skadades [35, 34, 37].
- **Toxiska förbränningsprodukter:**
 - **Lokalt:** Inga momentant uppmätta data från insats har påträffats.
 - **Regionalt:** Giftiga gaser (HF, VOC) befarades initialt ha potentiell spridning inom 1–2 km, men uppmätta nivåer visade att samtliga toxiska förbränningsprodukter bibehölls under hälsoriskgränser [29]. Med anledning av denna inledande bedömning evakuerades ca 1 200 personer inom denna radie (ca 1–2 km) från anläggningen och full avstängning av väg Highway 1

och Dolan Rd. effektuerades [34, 38]. Dessa åtgärder genomfördes i tidigt skede av insatsen, som en försiktighetsåtgärd i brist på fakta och grunder för konsekvensbedömning [38, 34].

Perimetermätningar av toxiska förbränningsprodukter i luft och mark pågår fortsatt ända sedan händelsens inträffande. Inga skadliga nivåer av vätefluorid eller partiklar eller flyktiga organiska ämnen (PM2.5 eller VOC) har uppmätts [39]. EPA:s mätningar visade inga HF-nivåer över gränsvärden för skadlig påverkan om 300 ppb [29]. PM2.5 höll sig under hela händelsen inom "måttliga" nivåer [29, 39]. Regionala myndigheter fann inga metallhalter över hälsobaserade screeningvärden; vissa lokala variationer av kobolt och mangan noterades men bedömdes ej brandrelaterade eller direkt skadliga för personers hälsa [40, 41].

- **Personskador:** Inga uppgifter om direkta personskador har påträffats.
- **Materiella skador:** Ingen explosion inträffade, men branden förstörde hela ML300-byggnaden inklusive ca 80% av de installerade batterierna [34, 35].

5.3 CARNEGIE ROAD, LIVERPOOL, ENGLAND 2020

Carnegie Road Battery Energy Storage System (BESS) är beläget i Liverpool, Storbritannien, och togs i drift i maj 2019. Anläggningen har en kapacitet på 20 MW/11,25 MWh och nyttjades för stödtjänster (frekvensreglering) till det nationella elnätet [42]. Systemet består av tre containeriserade enheter med totalt ca 2 142 litiumjonceller av batterikemi NMC (nickel-mangan-kobolt), fördelade på 126 rack [42, 43]. Den container (*container 1*) som var involverad i händelsen den 15:e september 2020 inrymde 45 batterirack och laddningsgrad (SoC) uppgick till ca 87 % [43, 44]. Varje container var utrustad med HVAC-system för temperaturkontroll och ett automatiskt brandsläcksystem (NOVEC 1230) [45, 44].

Säkerhetssystem	
Detektion	Rökdetektion och värmekabel (88 °C) [45, 44]
Släcksystem	NOVEC 1230, aktiverades troligen först efter explosionen och eventuellt till följd av detektionsfel, sannolikt skedde utlösning via tryckutlöst manuell brytpunkt [44].
HVAC/ Nödventilation	HVAC-system för temperaturkontroll, men ingen dedikerad tryckavlastning eller gasventilation [43, 44].
Tryckavlastning/ deflagrationsskydd	Ingen information om tryckavlastning eller deflagrationsskydd har påträffats.
Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
15:e september 00:29	Systemets BMS registrerar temperaturavvikelse i "Battery Zone 3", Rack 7, Modul 6 (BZ3-R7M6). Temperaturökning på 40 °C inom två minuter [44, 43].
00:31	Rökdetektor aktiveras, brandvarning utlöses, berört rack stängs av. Kort därefter förloras all kommunikation med den drabbade systemzonen [44].

Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
00:39	Övervakningskameror registrerar en deflagration i Container 1. Containerdörrar samt HVAC-enhet monterad på tak lossnar och slungas bort från container. Systemdelar återfinns på avstånd mellan ca 6-23 meter från ursprunglig plats [45, 44].
00:50	Första larmsamtalet når Meyerside Fire & Rescue Service [45].
00:57	Första styrkan från räddningstjänst anländer. Det är vid detta tillfälle ej tydligt att det rör sig om brand i BESS-container. Container 1 misstas i stället initialt för en "stor kylcontainer" [45].
01:18	Ytterligare signal från brandvarningssystem ("Battery Zone 6-10") i container 2, ingen utlösning av släcksystem i denna container sker [44].
01:55	Insatsen klassas som "HAZMAT"-insats på grund av att containern innehåller litiumjonbatterier och specialstyrka kallas in [45].
02:46	Miljömyndighet informeras om risk för spridning av vätefluorid (HF) i släckvatten [45, 44]
17:e september 10:44	Insatsen avslutas efter 59 timmars kylning och övervakning [45].

Slutsatser från utredning

Rotorsaken till olyckan kunde inte fastställas med säkerhet. Utredningen indikerar att intern celldefekt i modul BZ3-R7M6 sannolikt initierade en termisk rusning, vilket ledde till gasutveckling och deflagration [44]. Andra potentiella orsaker (termisk, elektrisk eller mekanisk åverkan) kunde inte bekräftas [44]. Konsekvenser av händelsen bedöms ha förvärrats av:

- Avsaknad av tryckavlastning i containerdesignen [44, 43].
- Begränsad information om installation och risker till lokal räddningstjänst, vilket försvårade insatsförfarandet [43, 44].

Konsekvenser

- **Explosion:** Dörrar och HVAC-enheter kastades upp till 23 meter från containern [45]. Detta indikerar ett betydande övertryck, men ingen exakt övertrycksnivå återfinns i tillgänglig rapportering. Det ska vidare noteras att containern i fråga saknade deflagrationsskydd.
- **Skadestånd brand:** Fullständig förlust av en container (45 rack), men spridning till övriga två containrar (ca 5 meters avstånd) förhindrades genom kylning [43, 44]. Inga uppgifter om utslående flammor eller liknande förekommer.
- **Toxiska förbränningsprodukter:** Risk för HF och HCl i rökgaser identifierades av Bureau Veritas. Koncentrationer i luften bedömdes som låga, men inga direkta mätdata för HF i brandplymen finns i studerat material [45]. HF påvisades i släckvatten, pH uppmättes dock till mellan 8–9 tack vare neutralisering i grusbaserat kalkrikt dräneringssystem i mark runtom containrar [45].
 - **Lokalt:** Inga momentant uppmätta data från insats har påträffats.

- **Regionalt:** Ingen kvantitativ modellering eller mätdata finns rapporterad i studerade underlag. Kvalitativt bedöms påverkan ha varit begränsad till det direkta närområdet, dock utfärdades varning till allmänheten att hålla fönster stängda [45].
- **Personskador:** Inga uppgifter om direkta personskador har påträffats.
- **Materiella skador:** Containern totalförstörd, omfattande strukturella deformationer [45, 44]

5.4 ESCONDIDO, KALIFORNIEN, USA 2024

Denna händelse inträffade den 5:e september 2024 i en anläggning i Escondido, Kalifornien, ägd av San Diego Gas & Electric (SDG&E). Anläggningen som togs i drift 2017 och hade vid uppförandet en kapacitet på 30 MW / 120 MWh [46, 47]. Batterikemi i anläggningen framgår inte tydligt av publicerat underlag, men beaktat att anläggningsinstallatör nyttjat batteriteknik från Samsung SDI är det givet åtalet för uppförande (2016/2017) rimligt att anta att batterikemin utgörs av NMC-celler (Nickel-Mangan-Cobalt). Detta då denna cellkemi var leverantörens förhärskande typ av litiumjonbatteri vid det aktuella tillfället [48, 49, 50]. Anläggningen användes primärt för stödtjänster (frekvensreglering) till det nationella elnätet [51, 52, 30].

Säkerhetssystem	
Detektion	<i>Ingen information om detektion har påträffats.</i>
Släcksystem	<i>Ingen information om släcksystem har påträffats.</i>
HVAC/ Nödventilation	<i>Ingen information om HVAC/Nödventilation har påträffats.</i>
Tryckavlastning/ deflagrationsskydd	<i>Ingen information om tryckavlastning eller deflagrationsskydd har påträffats.</i>
Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
5:e september 12:10	<i>Brand upptäcks och räddningstjänst larmas till olycksplatsen [30]</i>
13:00	<i>Evakuering av närliggande verksamheter och bostadsområden (ca 500 företag och 1 500 hushåll inom ca 400 m (0,25 miles)), samt skolverksamhet på ett avstånd om ca 5 km (3 miles) från olycksplatsen [51, 52].</i>
14:30-18:30	<i>San Diego HAZMAT initierar löpande luftkvalitetsmätningar. Inga skadliga nivåer av HF, HCN eller VOC noteras. Vidare luftkvalitetsmätningar pågår av flera parter t.o.m. 7:e september, utan att skadliga koncentrationer registreras. [30]</i>
6:e september 01:10	<i>Branden rapporteras som släckt [30].</i>
7:e september	<i>Samtliga order om evakuering hävs [53, 52, 51]</i>

Slutsatser från utredning

Branden startade i en enskild container, sannolikt på grund av fallerande battericell och efterföljande termisk rusning, men i brist på officiellt publicerad rotorsaksanalys eller händelserapportering kan inga entydiga slutsatser dras. Höga omgivningstemperaturer ($\approx 39,5^\circ\text{C}$) kan enligt nyhetsrapporteringar ha bidragit till

överhettning, men detta är inte bekräftade fakta. Ingen indikation på externa faktorer som sabotage eller elfel i nätanslutning återfinns i studerad nyhetsrapportering. SDG&E och Escondido Fire Department genomför fortsatt rotorsaksanalys, vilken ännu ej är publicerad vid framtagande av denna rapport [52, 51].

Konsekvenser

- **Explosion:** Ingen gasexplosion har rapporterats. Kvantitativa data för konsekvensområde saknas därför, men skadeområdet bedöms kvalitativt som begränsat till anläggningen och närmaste zoner.
- **Skadezon brand:** Branden begränsades till en container. Ingen brandpåverkan har rapporterats mot intilliggande battericontainrar (ca 6-8 meter) [51].
- **Toxiska förbränningsprodukter:**
 - **Lokalt:** Luftmätningar visade inga farliga nivåer av HF, HCN eller VOC. CO-nivåer var låga (max 18 ppm vid 80 m från branden). Spridning av giftiga gaser bedöms därmed som minimal [30].
 - **Regionalt:** Inga toxiska halter av förbränningsprodukter uppmättes i samband med olyckan, eller dagarna därefter. Evakuering av boende och företag inom ett avstånd om ca 400 meter, respektive nedstängning av skolverksamhet i närområde (inom ca 5 km) genomfördes som en försiktighetsåtgärd [51, 52, 30].
- **Personskador:** Inga personskador rapporterades [51, 52]
- **Materiella skador:** Containern totalförstörd. Övriga containrar inom anläggningen var oskadda tack vare räddningstjänstens vattenpåföring (kylning) [51, 52].

5.5 CHAUMONT, NEW YORK, USA 2023

Denna händelse inträffade den 27:e juli 2023 i en anläggning belägen i Jefferson County, nära byn Chaumont, New York. Anläggningen är en solcellspark med integrerat batterilagringssystem (BESS), ägd och förvaltd genom Convergent Energy and Power. Den installerade kapaciteten för energilagring vid tillfället var 5 MW / 15 MWh [54]. Batterikemin anges i publicerade underlag endast som "litiumjon". Baserat på att anläggningen byggdes och togs i drift 2022, och att batteriteknik vid uppförandet levererades av GE Renewable Energy är det inte fullt ut möjligt att fastslå om den aktuella cellkemin utgjordes av NMC eller LFP, men det bedöms som rimligt att anta att batterikemin utgörs av NMC-celler (Nickel-Mangan-Cobalt). Detta då denna cellkemi var leverantörens förhärskande typ av litiumjonbatteri vid det aktuella tillfället och att skifte till cellkemi baserat på LFP-teknik skedde först ett par år senare [55, 56, 57]. Syftet med anläggningen var att lagra energi från solcellsanläggningen för nyttjande som nätstabilisering och reduktion av nätbelastning under topplasttimmar [54].

Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser

27 juli 2023 13:00	Brandstart, personer i närliggande samhällen inom 1,6 km (1 mile) från skadeplatsen instrueras att söka skydd där de befinner sig ("shelter in place") som förebyggande åtgärd med anledning av oro för spridning av toxiska förbränningsprodukter [58, 59]
--------------------	---

Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
19:00	Lokala myndigheter utökar resurser för uppföljning och mätning av spridning av toxiska förbränningsprodukter samt uppmuntrar allmänheten att undvika exponering för brandrök [58]
28 juli	Luftmätningar konstateras inte ge indikation på toxiska halter av förbränningsprodukter [60]
31 juli – 1 augusti	Offentlig kommunikation anger att branden bedöms vara under kontroll och släckande/kylande insatser avslutas. Räddningstjänst fortsätter bevaka skadeplatsen och luftmätningar fortgår [60].
Säkerhetssystem	
Detektion	Ingen information om detektion har påträffats.
Släcksystem	Ingen information om släcksystem har påträffats.
HVAC/ Nödventilation	Ingen information om HVAC/Nödventilation har påträffats.
Tryckavlastning/ deflagrationsskydd	Ingen information om tryckavlastning eller deflagrationsskydd har påträffats.

Slutsatser från utredning

Preliminär bedömning från lokala myndigheter anger ”mekaniskt utrustningsfel” som trolig orsak för uppkomst av brand [59].

Ingen officiell händelserapport eller rotorsaksanalys finns tillgänglig vid framtagande av denna rapport.

Konsekvenser

- **Explosion:** Ingen gasexplosion har rapporterats. Kvantitativa data för konsekvensområde saknas därför, men skadeområdet bedöms kvalitativt som begränsat till anläggningen och närmaste zoner.
- **Skadezon brand:** Ingen skada utöver den branddrabbade enheten rapporteras av myndigheter eller i media.
- **Toxiska förbränningsprodukter:**
 - **Lokalt:** Inga momentant uppmätta data från insats har påträffats.
 - **Regionalt:** Inga toxiska halter av förbränningsprodukter uppmättes i samband med olyckan, eller dagarna därefter. Order om att söka skydd (”shelter in place”) och att undvika exponering för brandgaser utfärdades som en försiktighetsåtgärd till samhälle inom ca 1,6 km från olycksplatsen [58, 60, 61].
- **Personskador:** Inga rapporter om personskador förekommer.
- **Materiella skador:** Branden omfattade fyra BESS-enheter och två transformatorer [62]. Inga rapporter om vidare spridning utanför anläggning förekommer.

5.6 SISJÖN, GÖTEBORG, SVERIGE 2023

Denna händelse inträffade den 26 april 2023 i Sisjöns industriområde, Göteborg. Batterienergilagret, vilket var underuppbyggnad, var placerat i en 20-fots oisolerad stålcontainer inomhus i en lagerbyggnad. Systemet bestod av litiumjonbatterier med en total energikapacitet på 875 kWh och en vikt på cirka 9 ton. Tillgängligt

underlag tydliggör ej vilken cellkemi som var förekommande i det aktuella fallet. Anläggningen var vid tillfället för olyckshändelsen under uppbyggnad och ej driftsatt. Batterierna var laddade till leveransspänning men inte fulladdade. En luft/vätskekyllning var installerad men inte inkopplad. På ena långsidan av containern fanns även möjlighet till vatteninföring med koppling som passade räddningstjänstens utrustning [63].

Containern stod, vid starten av den inträffade termiska rusningen, precis innanför en av portarna till lokalen. Den aktuella verksamhetens personal upptäckte vit rök och valde då att larma räddningstjänsten, samt att flytta ut containern utanför lokalen. Vid räddningstjänstens ankomst var större delen av containern utomhus.

Containern hade till en början ena sidans gaveldörrar öppna, men dessa stänges under händelseförloppet och räddningstjänsten genomförde kylning/inertering av brandgaserna med hjälp av skärsläckare. Cirka 4-5 minuter efter att kylning med skärsläckare påbörjats inträffade en kraftig explosion som deformerade containern och där dörrarna på ena kortsidan på containern flög upp. Inga personer skadades vid explosionen. Efter explosionen tilltog branden med öppna lågor, och hela batterienheten förstördes. Ingen tryckavlastning eller mekanisk ventilation fanns installerad i containern [63].

Händelseförlopp, ungefärliga tidsangivelser	
26 april 11:30	Personal upptäcker tunn vit rök från containerns batteridel. Intern larmning sker och man försöker flytta ut containern ur byggnaden med truck. Under flytten kalvar hjulen, vilket försvårar evakueringen [63].
11:44	Räddningstjänsten anländer. Containern är delvis ute och flyttas helt ut kort därefter. Containerdörrar stängs och kylning/inertering påbörjas med skärsläckare, med angreppspunkt högt upp på containerns ena långsida för att undvika batteripenetration [63].
11:50	Cirka 4–5 minuter efter start av skärsläckning inträffar en kraftig explosion som deformerar containern och sliter upp gaveldörrarna. Ingen person skadas, men personal beordras omedelbart att backa och arbeta under skydd [63]. Efter explosionen ökar rökutvecklingen kraftigt och öppna lågor siktades från batterierna inuti containern [63].
13:15	VMA (Viktigt Meddelande till Allmänheten) utfärdas på grund av misstänkt giftig brandrök. Polis och lokala myndigheter uppmanar personer i närområdet att stanna inomhus [64, 65].
16:00	VMA återkallas och faran bedöms som över [66, 65]. Under eftermiddag/kväll sjunker temperaturen i batterierna och stabiliserar runt 14-15 °C [63].
27 april 09:00	Räddningsinsats avslutas [63].
11:00	Ny rökutveckling uppstår och ny insats initieras. Batterienheten lyfts senare ned i en vattenfylld container för slutlig kylning [63].
14:40	Räddningsinsats avslutas återigen [63].
Säkerhetssystem	
Detektion	Ingen information om detektion har påträffats.

Säkerhetssystem	
Släcksystem	<i>Container var förberedd för manuell vattenfyllning genom intag med koppling för brandslang. Detta nyttjades aldrig under insatsen [63, 66].</i>
HVAC/ Nödventilation	<i>Ingen HVAC/Nödventilation förekom [63].</i>
Tryckavlastning/ deflagrationsskydd	<i>Ingen tryckavlastning eller deflagrationsskydd förekom [63]</i>

Slutsatser från utredning

De två utredningar som genomförts efter den inträffade händelsen (utförda av den aktuella verksamheten samt batterileverantören) antyder att orsaken till initiering av termisk rusning i batterierna var ett läckage vid provtryckning av batterienheternas kylsystem. Detta ledde sannolikt till kortslutning i battericell med termisk rusning som följeffekt. Detta är den första dokumenterade händelsen med termisk rusning i ett MWh-klassat system i Sverige [63, 65].

Konsekvenser

- **Explosion:** Vid inträffad explosion slogs containerdörrar upp och container deformerades [63]. Inga kvantitativa data om skadezon återges i publicerade rapporter, men inga rapporter om skador på intilliggande byggnader (ca 30 meters avstånd från container till byggnad på annan fastighet) till följd av explosion eller övertryck förekommer.
- **Skadezon brand:** Ingen skada utöver den branddrabbade enheten rapporteras av myndigheter eller i media.
- **Toxiska förbränningsprodukter:**
 - **Lokalt:** Inga momentant uppmätta data från insats har påträffats.
 - **Regionalt:** Inga mätningar av luftkvalitet under eller i anslutning till händelsen har påträffats, varför inga kvantifierade data avseende spridning av toxiska förbränningsprodukter förekommer. Utifrån räddningstjänstens olycksutredning [63] kan det konstateras att exponering för brandrök betraktades som en av de större riskerna till följd av olyckan. Ett VMA med instruktion till allmänheten att hålla sig inomhus och att undvika exponering för brandrök utfärdades som försiktighetsåtgärd [63, 64, 65]. Beslut fattades även om att utrymma fastigheter närliggande mot olycksplatsen, samt om avstängning av trafik på närliggande trafikled (ca 250-300 meter från olycksplatsen).
- **Personskador:** Flera personer från den aktuella verksamheten andades in brandrök i varierande omfattning under det inledande brandförloppet. Ingen person behövde dock uppsöka sjukvård akut [63].
- **Materiella skador:** Aktuell BESS-enhet blev totalskadad. Intilliggande byggnad inom den aktuella fastigheten/verksamheten fick lättare rökskador [63].

5.7 SAMMANFATTNING AV INTRÄFFADE HÄNDELSER

Genomförd studie av aktuella inträffade händelser mellan 2019 och 2025 medger att ett antal generella slutsatser kan dras. Även om myndigheternas hantering

skiljer sig mellan olika fall och varje explosion eller brandförlopp är unikt, går det att dra generella slutsatser om konsekvensernas omfattning. Dessa slutsatser kan ge en indikation om effekter av explosion, brandpåverkan, spridning av toxiska förbränningsprodukter samt risker för personskador och materiella skador.

Det ska vidare noteras att det förekommer vissa osäkerheter i den studerade grunddaten. Detta till följd av att detaljrikedom och tillgänglighet i händelserapportering varierar stort mellan olika händelser. Omfattningen av utförda mätningar och kontroller av luftkvalitet varierar också i hög grad, från kvalitativa bedömningar till kvantitativa långtidsmätningar med noggrant analyserade resultat.

Gällande tydlig analys av orsakssamband och rotorsaksanalys kan det konstateras att det i många fall råder stora svårigheter att analysera ett inträffat händelseförlopp i sådan utsträckning som krävs för att erhålla otvetydiga slutsatser. Detta har olika orsaker, bland annat det faktum att evidens för brandorsak och faktiskt skick på systemet vid inträffande av olyckshändelse i många fall ej går att säkerställa till följd av den omfattande skada som brand eller explosion orsakat på den drabbade anläggningen [62]. Till detta står även det faktum att detaljerade beskrivningar av systemkomponenter, driftlägen, funktioner och dimensionering av installerade säkerhetssystem etc. i många fall ej lämnas ut för allmänt beskådande då sådan information ofta betraktas som företagshemligheter.

I de fall utdata avseende konsekvenser från inträffade händelser baseras på kvalitativa uppskattningar ska det vidare noteras att sådana alltid utgår från subjektiva tolkningar och från en viss perception av händelsen. Detta gör inte resultaten mindre intressanta, men sådana slutsatser är att betrakta som gällande av mer indikativ art än som entydig fakta.

Slutsatser från de studerade händelserna sammanställs under respektive underrubrik nedan. I Tabell 6 nedan sammanställs spann av iakttagna konsekvensområden i de fall sådan kvantitativa eller semikvantitativa data gått att utläsa ur källmaterialet.

Explosion

Explosionsförlopp i form av deflagrationer har inträffat i tre av de studerade händelserna (McMicken 2019, Carnegie Rd. 2020, Sisjön 2023), och har i samtliga dessa fall orsakat omfattande strukturella skador på de containerbaserade enheter i vilka batterienergilagren varit installerade. Avsaknad av tryckavlastningspaneler eller annan typ av deflagrationsskydd är en återkommande faktor, och har sannolikt en inverkan på de resulterande uppmätta eller estimerade konsekvensområden som framgår av referensmaterialet. Gemensamt för dessa analyserade händelser är vidare att utrustning för detektion och mätning av gassignaturer, sammansättning av gasblandning samt skattning/mätning av förhållande till brännbarhetsområde saknats.

Brandpåverkan

I majoriteten av de studerade händelserna har brandpåverkan och brandskada begränsats till enskilda BESS-enheter eller containrar. Inga fall av brandspridning från containerbaserat BESS till intilliggande byggnader har iakttagits. Detta sannolikt till följd av att separation mellan enheter förekommit, samt eventuellt i viss utsträckning med understöd av kylning från räddningstjänstens insats. Den händelse som sticker ut från övriga studerade fall är branden vid Moss Landing 2025, där en hel hallbyggnad inrymmande separata batterienheter med total kapacitet om 300 MW led svåra brandskador. Särskiljande i detta fall är att BESS-enheterna var placerade inuti en byggnad, vilket möjligtvis utgjort en bidragande faktor till den mycket omfattande spridningen av brand.

Toxiska förbränningsprodukter

Variation i faktiskt genomförda mätningar samt tillgängliga data från händelser utgör en svårighet i bedömning av halter av toxiska substanser lokalt i anslutning till en branddrabbad BESS-enhet. I de fall mätningar genomförts som del av insatsplaneringen (McMicken 2019, Escondido 2024) har det konstaterats att halter av toxiska förbränningsprodukter endast nått skadliga nivåer i direkt anslutning till branden (ca 10 meter) och att dessa halter hastigt avtar med avstånd från skadeplatsen. I dessa fall genomfördes mätningar av varierande omfattning avseende HCN, HF, VOC och CO, dataunderlag för andra förbränningsprodukter saknas.

Regional spridning av toxiska förbränningsprodukter har i samtliga studerade fall uppmätts till, eller bedömts som begränsad. Inga skadliga halter av HF, HCN, CO₂, CO, VOC eller PM_{2.5} finns noterade i dataunderlaget från någon av de inträffade händelserna mer än i brandens närhet. I samband med händelsen vid Escondido 2024 uppmättes CO-nivåer på ett avstånd om 80 meter från branden till 18 ppm (gränsvärde för toxisk verkan enl. NGV motsvarar 20 ppm under en 8-timmarsperiod [67]), vilket vidare talar för att konsekvensområde inom vilket toxisk verkan kan ha uppstått i praktiken är väsentligt mycket mindre.

Det har dock i flertalet inträffade händelser, av försiktighetsskäl, utfärdats "viktigt meddelande till allmänheten", evakueringsorder eller instruktioner om att ta skydd inomhus. Omfattning av sådana är enligt tillgänglig rapportering ej i något fall sanktionerat genom mätdata för spridning av toxiska förbränningsprodukter, utan snarare baserade på kvalitativa bedömningar och försiktighetsprincip. Order om någon form av samhällsskyddande åtgärd i förhållande till tredje mans hälsa varierar i utbredning mellan händelserna, från ca 300 meter till 2 km från olycksplatsen.

Personskada

Inga dödsfall har inträffat i de studerade händelserna. Allvarliga personskador rapporteras enbart i händelse vid McMicken 2019. Det har dock i flera fall förekommit att personer, och då i första hand insatspersonal eller verksamhetspersonal som deltagit vid insatsen, varit i behov av sjukhusvård.

Det ska dock noteras att det förekommer fall utöver de studerade där personer omkommit till följd av händelse och explosion orsakad av BESS-anläggningar, ex. explosionsolycka vid Dahongmen i Peking, Kina 2021 [68, 69]. Omständigheterna

kring denna händelse är dock i hög grad speciella på ett vis som särskiljer händelseförloppet från en mer "generisk" BESS-händelse. Detta då oförbränd batterigas leddes från batterienergilagret, via ledningskulvert, till intilliggande byggnad i vilken gasansamling och efterföljande explosion skedde. Rapporter om dödsfall eller allvarliga personskador i samband med händelser i BESS-anläggningar bedöms dock vara relativt sällsynta.

Materiella skador

Total förlust av BESS-enheter i form av exempelvis enskilda containrar är vanligt förekommande. Materiella skador utöver de branddrabbade enheterna eller i form av omfattande brandspridning har enbart iakttagits vid händelsen i Moss Landing 2025, och i viss utsträckning även vid händelsen vid Chaumont 2023 där fyra BESS-enheter skadades. Inga uppgifter om separationsavstånd mellan BESS-enheter har påträffats i dessa fall. Däremot förekommer det i rapportering från branden vid Escondido 2024 att separationsavstånd mellan BESS-enheter uppgick till ca 6-8 meter, vilket i viss kombination med ingripande från räddningstjänsten var tillräckligt för att förhindra vidare brandspridning från den branddrabbade enheten.

Tabell 6. Slutsatser från inträffade händelser - konsekvensområden.

	Explosion	Skadezon brand	Toxiska förbränningsprodukter	Personskador	Materiella skador
Konsekvensområde utifrån analys av händelse	Konsekvensområde i form av tryckpåverkan och kastzon för komponenter /konstruktion sdelar uppgår i inträffade händelser till ca 20-25 meter . Skyddssystem i form deflagrations-skydd saknades enligt underlag i samtliga studerade fall.	Konsekvensområde i form av brandpåverkan uppgår i inträffade händelser maximalt till 23 meter horisontellt (utslående flamma vid deflagration). I majoriteten av studerade fall är brandskada dock begränsad till enhet där brand startat (dvs. representativa konsekvensområden < ca 6 meter) Händelse vid Moss Landing, med totalskada av hallbyggnad, betraktas som ett särfall utifrån enheternas placering inuti byggnad.	Lokalt, inom ca 10-20 meter från branddrabbad enhet har skadliga halter av toxiska förbränningsprodukter uppmätts. Inga fall förekommer där skadliga halter av toxiska förbränningsprodukter uppmätts utanför brandens närområde.	Inga rapporter om dödsfall har påträffats i studerade händelser. I händelse vid McMicken 2019 skadades fyra brandmän allvarligt.	Materiella skador är utifrån studerade händelser normalt begränsade till den eller de drabbade BESS-enheterna . Händelse vid Moss Landing, med totalskada av hallbyggnad, betraktas som ett särfall utifrån enheternas placering inuti byggnad.

I [62] har en liknande analys av sju historiskt inträffade brandhändelser i BESS-anläggningar genomförts, dock med tydligare fokus på konsekvenser i form av föroreningar och spridning av toxiska förbränningsprodukter med potentiell påverkan på ekosystem och långsiktig skadeverkan. Analysen har omfattat studie av insamlade data för spridning av förbränningsprodukter och kontaminering i luft, vatten och mark. Slutsatser från denna studie kan sammanfattas övergripande enligt nedan:

- Spridning av toxiska förbränningsprodukter i luft med halter över skadliga gränsvärden är i stort begränsat till brandens direkta närhet. Detta till följd av snabb utspädning i omgivningens luftvolym vilket kraftigt reducerar den

skadliga gasblandningens koncentration. Luftburna utsläpp konstateras vara kortlivade och begränsade till lokal omfattning.

- Förbränningsprodukter utgörande brandgaser från bränder i BESS-anläggningar är normalt av liknande sammansättning som de som produceras vid mer konventionella bränder. Särskilt jämförbart är det med förbränningsprodukter från bränder i plastmaterial. Detta som ett resultat av att material ingående i sammansättningen av ett litiumjonbatteri, så som polymerbaserade separatorer, elektrolyter och kapslingar, till stor del utgörs av kolväten och andra organiska föreningar, vilka vid förbränning under höga temperaturer genererar förbränningsprodukter med likartad emissionsprofil.
- Toxiska förbränningsprodukter vid brand i BESS-anläggningar (dvs. under hög temperaturpåverkan mot batterierna) omfattar i stor utsträckning CO, CO₂, och VOC. Andra toxiska förbränningsprodukter i form av exempelvis HF, HCN och liknande genereras också i varierande omfattning beroende på förbränt material samt förbränningsförutsättningar.

6 Bransch erfarenheter

Studie av bransch erfarenheter i form av en workshop hölls med personer ur referensgruppen företrädande organisationer som representerar "industri"-segment i förhållande till implementering av batterienergilagring. Detta genomfördes i form av ett digitalt möte, 2025-11-05 där frågeställningar som redovisats i avsnitt 2 diskuterades vidare.

Workshopens syfte och mål definierades enligt följande:

- **Syfte** – Att få en bild av vanliga utmaningar och fallgropar vid planering, upphandling, projektering, installation och drift - samt förstå vilka luckor som upplevs finnas i dagens kompetensnivå hos projektör, myndighetspersoner respektive anläggningsägare/ industri.
- **Mål** – Tydliggöra ramar för hur en slutprodukt (från aktuellt projekt) ska kunna vara något som hjälper anläggningsägare och industri vid implementering av BESS.

Diskussionerna visade att området präglas av en upplevd snabb teknikutveckling och att ett betydande kunskapsglapp bedöms förekomma mellan nationella regelverk, praktiska erfarenheter och den kunskap som de facto krävs för att fatta välgrundade beslut vid implementering av batterienergilager med litiumjonbatterier som energibärare.

Utformning och omfattning av riskanalys i samband med planering och implementering konstaterades som en stor utmaning, samt osäkerhet i vilka kriterier som bör ligga till grund för konsekvensbedömningar i sådan kontext. Deltagarna beskrev stora variationer i kravbilderna mellan olika projekt, bedömare och andra involverade aktörer. Försäkringsbolag tenderar att driva fram höga säkerhetsmarginaler, medan nationella myndighetskrav generellt upplevs som otydliga, ofullständiga eller oförutsägbara. Detta leder i sin tur till osäkerhet kring acceptansnivåer, viktning mellan sannolikhet och konsekvens samt den övergripande omfattningen av riskutredningar.

Svårigheter att tillgodogöra sig och tolka indata samt att hantera osäkerheter i denna datamängd framhölls under diskussionerna som en återkommande utmaning, särskilt när information om batterikemi, ventilationslösningar och skyddssystem är begränsad eller svåråtkomlig från systemleverantörer.

Praktiska erfarenheter från genomförda projekt pekade på att tidig involvering av brand- och riskkompetens bedöms vara avgörande för att undvika kostsamma och praktiskt utmanande efterhandslösningar. När expertfunktioner kommer in sent i processen ökar behovet av ad hoc-lösningar, vilket försvårar standardisering i implementeringsprojekten och försvårar vid kvalitetssäkring.

Utmaningar kopplade till dialog och kravställning gentemot internationella systemleverantörer identifierades också som problematisk. Diskussionerna lyfte problematiken kring leverantörers begränsade anpassning till svenska krav, vägledning och regelverk. Internationella aktörer levererar ofta standardiserade lösningar, vilka inte är direkt anpassade så att dessa harmoniserar tydligt med

nationella krav, riktlinjer och rekommendationer. Detta i sin tur upplevs skapa svårigheter i dialog mellan parter vid upphandling och bygglovsprövning. Här lyftes vidare behovet av vägledning som kan fungera som stöd för både beställare och myndigheter vid bedömning av systemsäkerhet i tidiga planeringsskeden.

Diskussionerna refererade till befintliga regelverk såsom NFPA 855 (Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems), International Fire Code (IFC) och FM Global Guidelines med flera, vilka ofta används som referens i brist på nationella standarder eller reglering. Samtidigt konstaterades att dessa inte alltid är direkt tillämpliga i svenska förhållanden och förutsättningar. Byggregler enligt Boverkets föreskrifter (BFS 2024:7) och den tillkommande reglering som införts vid ikraftträdande av dessa nämndes som ett steg mot tydligare kravnivå och reglering, men deltagarna uttryckte att kravnivå och praktisk vägledning fortfarande är otillräcklig för större energilager.

En central slutsats är att det saknas tydliga och generella riktlinjer som kan fungera som stöd för både beställare och myndigheter. Behovet av en generisk "good enough"-nivå för konsekvensbedömningar framhölls som särskilt viktigt, eftersom detaljerade analyser ofta är resurskrävande och svåra att genomföra i tidiga skeden utav ett projekt. Samtidigt måste dessa riktlinjer dock vara tillräckligt robusta för att hantera variationer i batterikemi och teknikutveckling över rimlig tid. Deltagarna efterfrågade även verktyg för att formulera och efterfråga säkerhetskoncept från leverantörer, samt en tydlig struktur för vilka parametrar som har störst inverkan på explosionsrisk och spridning av toxiska förbränningsprodukter samt hur man utifrån dessa kan verifiera att erhållen lösning möter ställda funktionskrav.

Sammanfattningsvis konstaterades att standardisering, tydliga kravbilder och en gemensam struktur för riskbedömning önskas för att minska kunskapsgapet och underlätta implementeringen av säkra och effektiva energilagerlösningar. Sammanhållen och definierad funktion samt omfattning för utförandekontroll av brandskyddsfunktioner innan idrifttagning av batterienergilagrar efterfrågades även till syfte att säkerställa att erhållna installationer uppfyller grundläggande funktionskravställning enligt genomförd riskanalys eller annan projektspecifik vägledning.

För fortsatt arbete rekommenderades projektet fokusera på att utveckla:

- Praktisk vägledning som inkluderar upphandlingsstöd och metoder för grov konsekvensbedömning.
- Identifiera hur olika systemparametrar påverkar den övergripande systemsäkerheten och ge stöd för att verifiera att den valda lösningen uppfyller de ställda funktionskraven
- Underlag för att underlätta dialog mellan myndighetsrepresentanter (ex. bygglovshandläggare eller räddningstjänst) och beställare eller anläggningsägare, vilket förenklar säkerhetsbedömning samt grunder för kravställning och säkerställer en mer enhetlig nationell nivå.

Ovanstående rekommendationer beaktades därmed vid utformning av studien.

7 Skyddsåtgärder

I följande avsnitt presenteras sammanfattning av genomförd litteraturstudie, del 4. I denna fjärde sektion av litteraturstudie behandlas de skyddsmetoder som direkt är förknippade med studiens omfattning, dvs. primärt preventiva och reaktiva åtgärder för explosionskontroll.

En blandning av passiva och aktiva åtgärder kan vidtas för att minska riskerna kopplat till brand och explosion inom batterienergilager. I följande avsnitt redovisas kortfattat de åtgärder som bedöms mest relevanta kopplat till syftet med detta arbete. Endast åtgärder kopplat till konsekvenser av batterigasexplosion presenteras i detalj.

Inga direkt konsekvensavvärjande skyddsmetoder för spridning av toxiska förbränningsprodukter har identifierats genom aktuell studie, utöver val av placering och skyddsavstånd till kringliggande skyddsvärden. För att hantera den totala risken relaterat till sådan olyckshändelse är det primärt åtgärder som minskar sannolikhet till att toxiska förbränningsprodukter bildas och sprids utanför anläggningen som kan vidtas. Det kan dock konstateras att ett flertal olika faktorer utifrån angreppssätt och metodval vid räddningsinsats kan inverka på mängden producerad toxiska förbränningsprodukter, där vattenbegjutning under vissa omständigheter kan fungera för att delvis tvätta ur partiklar och reaktiva föreningar ur brandgaser. Å andra sidan har det i vissa studier iakttagits en ökning av vissa toxiska förbränningsprodukter vid närvaro av vatten i samband med oxidationsreaktioner under brand [20].

Det ska också nämnas att fler åtgärder kopplat till att minska risker för uppkomst och spridning av brand utöver de som omnämns häri bör beaktas vid projektering och analys av batterienergilager. Exempel på sådana är utförande av BMS, möjligheter till släckinsats, inertering, fasta släcksystem och brandcellsgränser eller -avskiljningar. Noterbart är även att en kombination av flertalet skyddsåtgärder verkar till en ökad robusthet i systemet som helhet.

7.1 TRYCKAVLASTNING

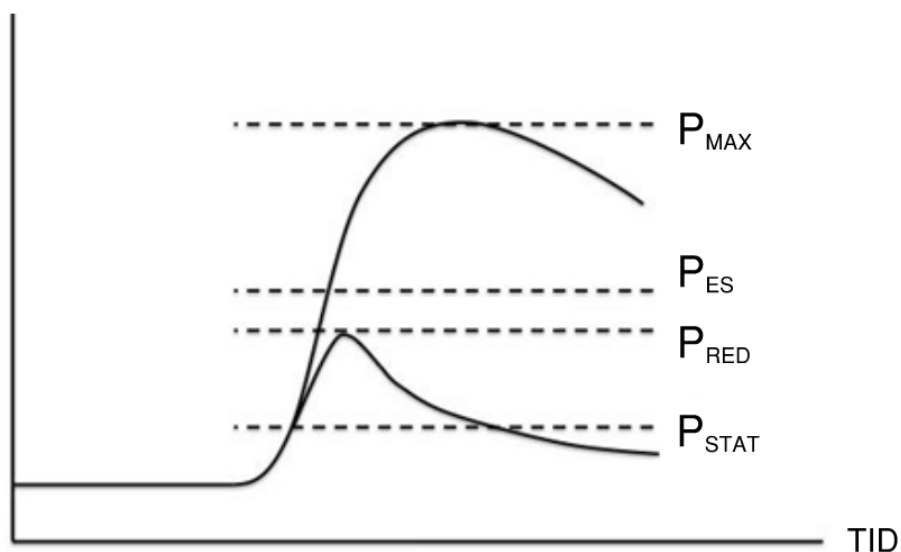
Tryckavlastning används för att begränsa konsekvenserna av en explosion. Avlastningarna syftar till att en inneslutning (utrustning, lokal, byggnad) inte ska rämna okontrollerat på grund av explosionstrycket och att de externa effekterna (tryck och flamma) kan riktas åt ett ofarligt håll. I stället avlastas tryck genom att luckor eller membran som öppnas och släpper ut flammor och heta gaser, till ett säkert område innan inneslutningen rämnar. Det är därför viktigt att placeringen av tryckavlastning är sådan att den inte riktas mot områden där människor vanligtvis vistas eller passerar eller där földeffekter kan skada omgivningen. Av denna anledning är det vanligt att tryckavlastningar riktas uppåt eftersom en flamma och tryckvåg i den riktningen inte påverkar så mycket annat och en horisontell avlastning kan medföra att en annan container/behållare finns placerad i tryckavlastningszonen. En vertikal avlastning kommer dock medföra att underhåll i form av snöröjning är en mycket viktig säkerhetsbarriär eftersom en tryckavlastning inte kommer fungera som avsett om snö/is finns ovanpå den.

Snöröjning måste genomföras på ett säkert sätt så att personal som snöröjer inte riskerar att skadas.

En tryckavlastning kan dimensioneras enligt standarder (NFPA 68, SS EN 14994 osv.) eller så kan mer avancerade metoder användas som exempelvis CFD-beräkningar. Beräkningarna görs då för att säkerställa att behållaren/container som innehåller BESS ska klara belastningarna som uppstår vid en invändig explosion.

Figur 5 nedan visar tryckförhållandet i en behållare/container under ponerade explosionsförlopp. De två heldragna linjerna i figuren avser att redovisa trycket under olika förlopp. Den övre linjen redovisar förloppet där ingen avlastning sker och där det maximala övertrycket (P_{MAX}) uppnås. Den nedre linjen redovisar motsvarande förlopp men då en tryckavlastning öppnas vid ett givet övertryck (P_{STAT}) och som då får till följd att det maximala övertrycket i behållaren/container som uppnås är reducerat (P_{RED} kallas ibland $P_{RED, MAX}$). Dimensioneringen av avlastningen siktar mot att P_{RED} ska vara lägre än det trycket som behållaren/container klarar av (P_{ES}). Ofta väljs P_{RED} som ett lägre värde än P_{ES} för att en säkerhetsmarginal ska finnas.

TRYCK



Figur 5: Tryckförhållandet i en behållare/container under ett explosionsförlopp

Genom att följa standarderna för tryckavlastning (NFPA 68 och SS EN 14994) är avsikten att trycket i behållaren/container hålls under vad den fysiskt klarar av ($P_{RED} < P_{ES}$) vilket minskar risken för att kaststycken sprids i omgivningen samtidigt som tryck och flamma riktas åt ett (eller flera) förutbestämda håll. I NFPA 68 anges att en säkerhetsfaktor på 2/3 ska användas mellan P_{RED} och P_{ES} . Det är viktigt att beakta att standarderna inte är framtagna för att specifikt användas för tryckavlastning av BESS utan för generell dimensionering av tryckavlastningar för gasexplosioner.

Externa effekter kommer uppstå eftersom tryck och flamma släpps ut genom tryckavlastningen. De externa effekterna kan beräknas enligt standarderna som

nämns ovan som ett avstånd för "tryckavlastningszonen" där ex människor inte bör finnas eller där konstruktioner dimensioneras för att klara belastningen som trycket kan medföra.

Standarderna beaktar deflagrationer och är inte applicerbara för detonationer¹. Risken för DDT (deflagration detonation transition) och en detonation hanteras då begränsningar finns för utformning av behållarna/containrarna (ex. finns begränsningar för längd/omkrets förhållande) och en kontroll kring turbulens kan göras enligt bilaga A i SS EN 14494. Om kontrollen inte resulterar i att standarden är applicerbar behöver mer avancerade metoder användas så som exempelvis CFD-beräkningar. På motsvarande sätt kan enligt NFPA 68 hänsyn tas till att den volymen gas som avges från en rusning endast delvis fyller behållaren/containern (partial volume effects).

För dimensionering av arean på tryckavlastningen så är användningen av SS EN 14494 för BESS relativt begränsad då den endast kan användas till så kallade "compact enclosure" där förhållandet mellan längden och diametern är mindre än 2. Detta uppfylls exempelvis för en 10 fots container men inte för en större container eftersom den blir för långsmal. De större containrarna klassas som så kallade "elongated enclosures" där förhållandet mellan längden och diametern är mellan 2 och 10. Är förhållandet större än 10 klassas enheten som en rörledning. För elongated enclosures finns ekvationer för beräkning av tryckavlastningsarean, men bara under förutsättning att aktuella gasblandning har med förbränningshastigheter liknande metan eller propan. Enligt avsnitt 8 kan förbränningshastigheter för gasblandning från termisk rusning troligtvis vara större än de för metan och propan varför standarden inte är applicerbar för "elongated" containrar.

7.2 MEKANISK VENTILATION

Mekanisk ventilation kan användas för att minska koncentrationer av brännbara gaser vid off-gassing där syftet är att hålla koncentrationen brännbar gas under LFL, den undre brännbarhetsgränsen och på så vis undvika antändning och efterföljande konsekvenser. Denna metod är högst beroende av ett väl fungerande detektionssystem eftersom systemen bygger på att speciell ventilation startar eller varvas upp, då normalventilation generellt inte är tillräcklig för att hålla gaskoncentrationerna under brännbarhetsområdet.

Mekanisk ventilation kan dimensioneras enligt NFPA 69.

¹ Förenklat är en deflagration en förbränning som sker i hastigheter som är långsammare än ljudets hastighet och en detonation en förbränning som sker snabbare än ljudets hastighet. I flamhastigheter nära ljudets hastighet blir gasströmmen instabil och accelererar ojämnt i utbredningsriktningen (snabbare i mitten) och en antändning av tryckvågen kan ske genom övertrycket, fenomenet kallas DDT (deflagration detonation transition). Detonationer beaktas inte vidare då ett av syftena med tryckavlastningen är att en detonation inte ska möjliggöras.

7.3 SKYDDSAVSTÅND KOPPLAT TILL EXPLOSION

De externa effekter som kan väntas vid en explosion som tryckavlastas enligt avsnitt 7.1 är att tryck, flamma och oförbrända gaser strömmar ut i avlastningens riktning. Standarderna (NFPA 68, SS EN 14994) innehåller beräkningar för hur de externa effekterna kan uppskattas givet en tryckavlastning av deflagrationen.

Viktigt att beakta är att formlerna nedan ger uppskattningar och att omgivningsfaktorer så som vindhastighet, riktning, hinder/byggnader i närheten, avlastningarnas form och vikt etc. kan påverka utbredningen.

För en uppställning av BESS utan (eller med otillräcklig) tryckavlastning tillkommer förhållanden som bör beaktas, exempelvis:

- Om trycket i behållaren/containeren överskrider hållbarhetstrycket kan enheten rämna okontrollerat.
- Tryck och flammor styrs inte på samma sätt utan kanske kan förväntas "i alla riktningar"
- Kaststycken kan spridas i omgivningen.
- Större intern skada (fler celler som inkluderas)

Hur splitter och kaststycken sprids i omgivningen är mycket komplicerat. Hur långt dessa sprids är beroende av kraften de slungas i väg med samt både form och vikt på stycket och utkastvinkeln som de slungas i väg med.

Konsekvensbedömningar från kaststycken måste nästan uteslutande baseras på erfarenheter där avsnitt 5 kan användas då det ger bra underlag. Det ska dock poängteras att en tryckavlastning som inte är tillräcklig för att ge ett fullgott skydd (ex om luckor är för små eller öppnar för sent) så kan tryckavlastningen dock minska effekterna om enheten rämnar med mindre kraft eller om enheten bara deformeras utan att kaststycken sprids i omgivningen.

För att bedöma konsekvenserna på människor och konstruktioner av det trycket som sprids externt vid en tryckavlastning kan följande skrifter från MSB användas:

- Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning: En introduktion (MSB481) [70]
- Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning: Delrapport 1: Last av luftstöt våg (MSB449) [71]
- Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning: Delrapport 2. Explosion i gatukorsning (MSB450) [72]
- Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning: Delrapport 3 : Kapacitet hos byggnader (MSB142) [73]

En översiktlig exemplifierande bedömning av vilka skador som kan uppstå i omgivningen avseende tryck sammanfattas även i tabellen nedan [74]. Då konstruktioner och fönster skadas kan även sekundärskador uppstå på grund av splitter.

Tabell 7. Översikt och exempel på konsekvenser vid tryckstöt.

Tryck (kPa)	Tryck (bar)	Konsekvens (generell beskrivning)
3,5 - 7	0,35 – 0,7	Små och stora fönster krossas vanligtvis
7 - 15	0,7 - 0,15	Fästelement i trä- och aluminiumpaneler går sönder; paneler bucklas eller ger vika
15 - 20	0,15 – 0,2	Oarmerad betong och väggar av cementblock krossas
20-28	0,2 – 0,28	Cisterner spricker.
35-50	0,35 – 0,5	Nästan fullständig förstörelse av konstruktioner

Parallellt med detta projekt pågår även ytterligare ett projekt, *Insatsstöd för räddningstjänst – bränder i batterier*, genomfört av Chalmers Industriteknik, RISE och Räddningstjänsten Storgöteborg, finansierat genom Brandforsk. Detta har inriktning mot bedömning av insatsförutsättningar för kommunal räddningstjänst vid brand eller rykande termisk rusning i batterienergilagrar. Möjlig skadeverkan från explosionsövertryck mot personer i samband med insats studeras djupare i slutrapport från detta projekt [75].

7.3.1 Externa effekter enligt SS EN 14494

I standarden delas de externa effekterna upp utifrån om det är flammen eller tryckvågen som ska beaktas.

Effekterna från flammen ges utifrån volymen på den behållaren/containeren som skyddas utifrån sambandet

$$L_F = 5V^{1/3}$$

Där V är behållaren/containerens volym och L_F är flamlängden. Flammor som kommer ut från en avlastning kommer spridas i alla riktningar men speciellt i sidled på grund av trögheten i expansionen. Flammor kommer endast medföra en mindre risk avseende strålning från flammen. Beräkningen ovan är endast giltig under flera förutsättningar såsom (se standarden för hela listan);

- Behållar-/containervolymen är minst 0,1 m³ och max 50 m³
- Att gasexplosions konstanten K_G är under 100 bar m/s
- Att det maximala övertrycket P_{MAX} är maximalt 9 bar.

För att beräkna **effekterna utifrån tryck** som funktion av avståndet från tryckavlastningen kan uppskattning erhållas från följande formel:

$$p_{ext} = \left[1,25 p_{red} \left(\sqrt{A/R} \right)^{1,35} \right] / \left[1 + \left(\alpha/56 \right)^2 \right]$$

Där:

p_{ext} är det maximala externa övertrycket, bar

p_{red} är det maximala reducerade övertrycket, bar

A är tryckavlastningsarean, m^2

R är avståndet till tryckavlastningen, m

α är vinkeln ifrån tryckavlastningen (0° är rakt framför och 90° är rakt i sidled).

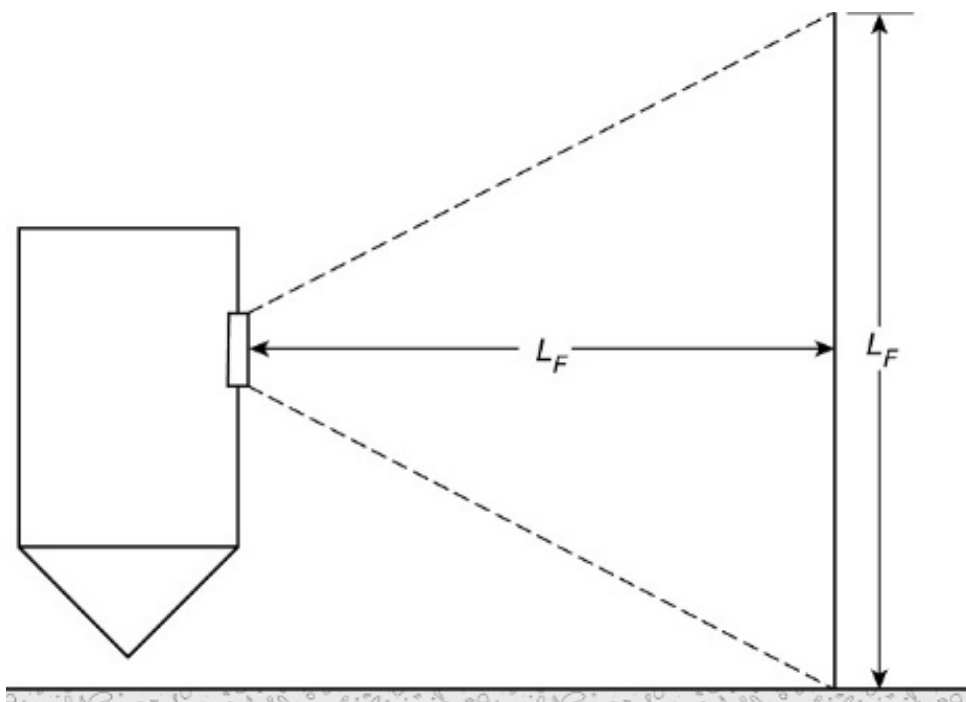
7.3.2 Externa effekter enligt NFPA 68

I NFPA beaktas **det eldklot** som uppkommer vid en tryckavlastad gasexplosion och den beräknas enligt följande:

$$L_F = 3,1 * \left(\frac{V}{n}\right)^{0,402}$$

Där L_F är längden från tryckavlastningen, V är volymen på den tryckavlastade behållaren/containeren och n är antal tryckavlastningsöppningar (som förutsätts vara jämt placerade, inte överlappande).

I NFPA 68 finns en illustration över dimensionerna på det eldklot som uppkommer utanför behållaren/containeren vid avlastning enligt Figur 6.



Figur 6: Illustration av dimensioner på eldklot (från NFPA 68)

Om ventilationsöppningen är horisontell (som i figuren), förväntas den horisontella längden på eldklotet eller flammans utsträckning enligt ovan. Det är oerhört viktigt att notera att eldklotet faktiskt kan sträcka sig både nedåt och uppåt och att formen enligt Figur 6 inte förväntas utan effekten kommer bli som ett eldklot som sträcker sig i utblåsriktningen. Vid vissa deflagrationer kan effekter göra att eldklotet stiger till höjder långt över de angivna avstånden. Ekvationen beräknar eldklotets dimension, men det är inte den enda faktorn att beakta vid bedömningen av risken från en ventilerad deflagration. Andra faktorer att beakta inkluderar, men är inte begränsade till, rådande vindhastighet och -riktning, externa närliggande strukturer, ventilationsöppningens konfiguration och vikt

samt närliggande verksamheter. En säkerhetsfaktor bör beaktas baserat på en bedömning av de riskelement som finns i eller nära den förväntade färdvägen för den framväxande lågan och oförbränd gas.

För att beräkna **effekterna utifrån tryck** ges i NFPA guidning för hur det externa trycket på ett visst avstånd och med viss vinkel från öppningen kan beräknas.

$$P_{max,a} = 0,2 * P_{red} * A_v^{0,1} * V^{0,18}$$

Där A_v är storleken på tryckavlastning. Se NFPA 68 för vidare instruktioner för bedömning.

7.4 SAMMANFATTNING AV SKYDDSÅTGÄRDER

Den genomförda litteraturstudien visar att riskreducering avseende spridning av toxiska förbränningsprodukter främst förekommer i form av åtgärder vid planering, dvs. säkerställande av korrekt placering av anläggningen och tillräckliga skyddsavstånd. Utöver detta bedöms ytterligare riskreducering främst kunna ske genom sannolikhetsminskande åtgärder, dvs. förhindrande av uppkomst av brand genom styr- och övervakningssystem och automatisk fränkoppling via BMS. Räddningsinsatser och fasta släcksystem kan i viss utsträckning även anses påverka mängden toxisk gas, där vattenbegjutning i vissa fall reducerar partiklar men även riskerar att öka vissa reaktiva föreningar.

För explosionskontroll framstår tryckavlastning som en central metod för att undvika okontrollerad rämning av inneslutningar. Dimensionering enligt NFPA 68 och SS EN 14994 syftar till att hålla reducerat övertryck (P_{RED}) under konstruktionens hållfasthetsstryck (P_{ES}), vilket minskar risk för kaststycken och styr externa effekter mot säkra zoner. Mekanisk ventilation enligt NFPA 69 är ett viktigt komplement för att hålla gaskoncentrationer under LFL, men kräver effektiv detektion.

Standarderna ger vägledning för deflagrationer, men vid risk för DDT eller avvikande gasblandningar krävs avancerade beräkningar (t.ex. CFD). Externa effekter från tryck och flamma måste alltid beaktas vid projektering, med hänsyn till omgivande miljö och säkerhetsavstånd.

8 Underlag för analys av metoder för konsekvensbedömning

I följande avsnitt presenteras sammanfattning av genomförd litteraturstudie, del 5. Denna sektion av litteraturstudie inhämtas information om det dataunderlag som utgör påverkansparametrar vid bedömning av konsekvensområde vid batterigasexplosion respektive spridning av toxiska förbränningsprodukter.

Aktuellt arbete syftar bland annat till att utvärdera hur befintligt förekommande metoder kan appliceras och eventuella brister ska belysas. Med denna bakgrund görs inom följande kapitel en genomlysning av parametrar som kan påvisas vara viktiga att beakta vid analys, samt en kartläggning av vilka värden som bedöms relevanta och representativa vid användning för vidare analys.

8.1 INDATA FÖR ANALYS – EXPLOSION

Nedan redovisas indata kring explosionsegenskaper från en termisk rusning med gasavgång mot omgivningen, s.k. "off-gassing" eller rykande termisk rusning.

8.1.1 Gassammansättning – rykande termisk rusning/ off-gassing

När ett batteri tryckavlastar till följd av termisk rusning som tillåtit fortsätta till högre temperaturer är de vanligaste gaserna CO_2 , CO , H_2 och ett antal olika kolväteföreningar av mindre och medelstor massa. Dessa gaser utgör generellt >90% av gasproduktionen. Förekomst av en större andel CO , H_2 och kolväten leder till en sammanvägt lägre LFL för gasblandningen som bildas, medan en högre koncentration av CO_2 i den totala gasmassan normalt leder till en ökad LFL [15].

I [15] refereras till källor som visar på att förbränningshastigheten generellt är högre för gaser från LFP-celler i förhållande till batterigaser från NMC-celler. Detta givet den högre andel vätgas som bildas vid "off-gassing" i denna batterikemi (median LFP=30% och median NMC=20%). Tester visar att gaser från LFP-celler generellt har en lägre LFL i förhållande till NMC-celler. Om en lägre LFL bidrar till en högre risk för explosion är dock inte helt tydligt då en ökad LFL på annat vis kan medföra till en större konsekvens vilket ger en ökad risk. Detta eftersom en större volym gas då teoretiskt kan ackumuleras inom en volym innan antändning kan ske, och den gasvolym som därmed blir tillgänglig för flampropagering och förbränning blir då således större vilket i sin tur ökar mängden frigjord energi.

Över lag görs bedömningen i rapporten [15] att det är svårt att entydigt säga vilken av de olika batterikemier som i dagsläget kan anses vara dominerande i batterienergilagring, dvs. LFP och NMC, som är säkrast ur ett riskperspektiv kopplat till explosion.

För att möjliggöra studie av parametern "gassammansättning" och dess inverkan på bedömning av konsekvensområde genom beräkning utifrån standardiserad metodik i SS-EN 14994 respektive NFPA 68 behöver återigen ett generellt och schablonartat punktvärde ansättas som utgångspunkt. För de grundläggande scenarierna i denna studie bedöms därför den gassammansättning som använts

inom [76] vara skälig att använda då den grundar sig på en bred analys av en större datamängd. Gassammansättningen i studiens grundfall ansätts således enligt följande: 18% CO, 36% CO₂, 32% H₂ samt 14% icke fullständigt förbrända kolväten (delmängd av producerade VOC).

8.1.2 Gasproduktion - rykande termisk rusning/ off-gassing

En slutsats inom [15] är att NMC batterier generellt genererar större volymer gaser vid "off-gassing" i jämförelse med LFP. Dock innehåller gaserna från LFP generellt högre koncentrationer av väte och kolväten vilket leder till en ökad sannolikhet för antändning (lägre LFL). Likt tidigare nämnt skulle dock en högre LFL kunna utgöra en större risk då det tillåter mer gas att ackumuleras och risken (sammanvägning av sannolikhet och konsekvens) blir större.

Det tydliggörs i [15] att för de flesta batterikemier är normal gasproduktion vid termisk rusning 1-3 L/Ah (eller 300-900 L/kWh). Medianen för gasvolym som enligt studien bildas för olika utföranden av NMC-battericeller uppgår till 519 L/kWh, och medianen som på motsvarande vis bildas för LFP-battericeller uppgår till 126 L/kWh vid 100% SoC. Ett värde för gasproduktion vid rusning på cirka 1,2 L/Ah redovisas dock inom [76]. I dagsläget finns ingen specifik och generell dimensionerande volymproduktion av batterigas att använda. Noterbart är således att den sammantagna gasproduktionen i ett faktiskt fall kommer bero av flera parametrar som exempelvis systemuppbyggnad, fysisk och kemisk beskaffenhet hos involverade battericeller, laddningsgrad (SoC) och antal celler som inkluderas i en termisk rusning.

För att möjliggöra studie av parametrarnas inverkan på bedömning av behov av tryckavlastning samt eventuellt konsekvensområde genom beräkning utifrån standardiserad metodik i SS-EN 14994 respektive NFPA 68 behöver ett generellt och schablonartat punktvärde ansättas som utgångspunkt. För de grundläggande scenarierna i denna studie används därför en gasproduktion om 126 L/kWh som utgångspunkt i enlighet med [15]. Denna parameter varierar i parameteranalysen för att säkerställa inverkan av valet på slutresultatet.

8.1.3 Förbränningsegenskaper – rykande termisk rusning/ off-gassing

För att genomföra beräkningar avseende tryckavlastning behöver gasernas förbränningsegenskaper uppskattas. Om uppskattningarna görs för konservativt kommer även utfallet från beräkningar av konsekvensområde bli konservativt (exempelvis att hela takarean, eller mer, behöver tas i anspråk för tryckavlastning). Även det motsatta gäller om för icke-konservativa värden antas, vilket riskerar medföra att de faktiska explosionsförloppen blir värre i praktiken än i teorin. Detta leder till att den beräknade tryckavlastningsarean inte räcker till för att tryckavlasta den aktuella volymen, vilket i sin tur kan få till följd att volymen eller containern brister. Vid sådan situation ökar risken för förekomst av kaststycken mot omgivningen, samt den potentiella konsekvensradien av sådan händelse markant.

En viktig förutsättning vid uppskattning av förbränningsegenskaperna är att gaserna som kommer ut från en termisk rusning är varma. Hur varma gaserna är

beror på i vilket skede av rusningen som ventilerings sker. I remissen till SS EN 1127-1:2025 [77] har termisk rusning redovisats som ett exempel under tändkällan *Exoterma reaktioner*. I skrivningarna anges att temperaturen typiskt kan uppgå till 800-1000°C när den termiska rusningen avklingar. De frigjorda gaserna innehåller brandfarliga komponenter bestående av kolväten, kolmonoxid och väte vars blandning kan antändas av heta ytor under det temperaturspannet som anges ovan.

I den studerade litteraturen [78] återfinns olika värden att hämta för förbränningshastighet (S_u), maximalt övertryck (P_{MAX}) och gasexplosionskonstanten (K_G). Dessa parametrar är de mest centrala för hur gaserna kommer reagera vid antändning. Betydelsen av de olika parametrarna varierar beroende på vilken standard som används för beräkning och dimensionering av deflagrationsskydd genom tryckavlastning. Storlek för dessa parametrar varierar beroende på ett antal omgivande faktorer, exempelvis gastemperatur och gassammansättning.

Tester [78] visar att gaser från termisk rusning kan ge $S_u = 30$ cm/s (men upptill 110 cm/s vid höga temperaturer) och $K_G = 84$ bar m/s.

För att möjliggöra studie av parametern "förbränningshastighet" och dess inverkan på bedömning av konsekvensområde genom beräkning utifrån standardiserad metodik i SS-EN 14994 respektive NFPA 68 behöver återigen ett generellt och schablonartat punktvärde ansättas som utgångspunkt. För de grundläggande scenarierna i denna studie bedöms därför den förbränningshastighet som använts inom [76] vara skälig att använda då den grundar sig på en bred analys av en större datamängd. Förbränningshastigheten i studiens grundfall ansätts således till $S_u = 0,613$ m/s och varierar sedan i en känslighetsanalys där det högsta värdet som hittats (1,1 m/s) studeras.

Gällande maximalt övertryck P_{MAX} görs antagande att parametern P_{MAX} kan tillåtas vara 8 bar-g. Detta är ett relativt vanligt värde som används vid beräkningar kopplat till tryckavlastning [77] och ett högre värde än testerna som nämns ovan [78] visat. Det högre värdet användas i en känslighetsanalys i parameteranalysen.

8.2 INDATA FÖR ANALYS – SPRIDNING AV TOXISKA FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER

8.2.1 Gassammansättning - flammande förbränning

Enligt konstaterat i tidigare avsnitt 3 producerar flammande förbränning av litiumjonbatterier och batterigaser förbränningsprodukter eller brandrök innehållande en rad mer eller mindre toxiska eller på annat sätt skadliga kemiska föreningar. Exakt innehåll i brandgaserna beror av många faktorer, som exempelvis battericellernas fysiska och kemiska beskaffenhet, brandförlopp och -orsak, atmosfäriska förhållanden och förbränningstemperatur [21, 26, 20].

Utifrån den studerade litteraturen har det kunnat konstateras att det, genom grov generalisering, kan vara möjligt att anta förekomst av ett visst antal vanligt förekommande kemiska föreningar som del av de förbränningsprodukter som

bildas vid flammande förbränning av litiumjonbatterier eller batterigaser. Konstaterat vanligt förekommande kemiska föreningar som påvisats genom vetenskapliga studier samt luftkvalitetsmätningar vid inträffade händelser utgörs bland många andra av HF (gasformig vätefluorid), VOC (flyktiga kolväteföreningar), PM_{xx} (partiklar av varierande storlek), HCN (vätecyanid), HCl (saltsyra), nitrosa gaser (NO_x), svaveldioxid (SO₂), CO (kolmonoxid) samt CO₂ (koldioxid) [26, 20, 21, 27, 28, 29, 30, 79]. Halterna av dessa förbränningsprodukter varierar dock stort beroende på rådande omständigheter, batterikemin och förutsättningar för förbränning.

För att bedöma möjlighet att på generellt plan representera en övergripande konsekvens avseende toxicitet behöver således dessa produkters beskaffenhet avseende potential för spridning samt toxisk verkan studeras något mer ingående. Vid atmosfärisk spridningsmodellering av toxiska förbränningsprodukter från brand i litiumjonbatterier påverkar ännas molmassa både val av modellregim och beräkning av koncentrationer och konsekvensavstånd. HCN ($\approx 27,0$ g/mol), HF ($\approx 20,0$ g/mol) och HCl ($\approx 36,46$ g/mol), CO ($\approx 28,01$ g/mol), NO ($\approx 30,00$ g/mol) är exempel på förbränningsprodukter som har en molmassa som placerar dem i intervallet kring luftens effektiva molmassa (≈ 29 g/mol), dvs. dessa produkter är alltså att betrakta som lätta eller neutrala [80, 81, 82, 83, 84]. Andra kemiska produkter som exempelvis HCl och SO₂ är i grunden tyngre ($\approx 36,46$ g/mol resp. $\approx 64,06$ g/mol) men kan agera mer likt neutrala föreningar vid normala brandgastemperaturer och väderförhållanden [85, 86].

De flesta enklare spridningsmodellerna för beräkning av konsekvensavstånd beaktar primärt molmassa vid avgörande av modellregim och beräkningsmetodik på så vis att tunga utsläpp beräknas enligt en metodik och lätta eller neutrala enligt en annan. Vidare detaljerad hänsyn till gravitationsstyrd inverkan på spridningsförlopp tas i regel inte om utsläppet ej är att betrakta som tungt [87]. Indata av större betydelse är snarare meteorologiska parametrar (vind, stabilitetsklass etc.), utsläppsegenskaper (varaktighet, källstyrka etc.) samt toxiska nivåer så som AEGL eller IDLH-värden [87].

För att vidare kunna ansätta representativa förbränningsprodukter i denna studie avseende de produkter som är att betrakta som lätta eller neutrala görs en övergripande jämförelse av toxisk verkan och exponeringsriktvärden. I detta kan det konstateras att de akuta exponeringsriktvärdena (AEGL-3) för 30 min uppvisar tydliga skillnader mellan studerade ämnen, där HCN AEGL-3 = 21 ppm, HF AEGL-3 = 62 ppm, och HCl AEGL-3 = 210 ppm [88, 89, 90]. På motsvarande vis gäller för gränsvärden enligt IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health), där HCN = 50 ppm, HF = 30 ppm, samt HCl = 45 ppm [91, 92, 93].

Baserat på ovan bedöms HCN och HF båda som lämpliga förbränningsprodukter för nyttjande vid generisk representation av konsekvensområden avseende lätta eller neutrala utsläpp. För att underlätta genomförande av parameterstudie avseende spridningsberäkningar väljs därmed den kemiska förening där störst mängd vetenskapliga data finns tillgängliga avseende produktion av utsläpp vid brand i litiumjonbatterier, detta vill säga gasformig vätefluorid, HF. Det ska dock understrykas att detta är en grov generalisering som ändå kan anses fylla

studiens syfte, dvs. att studera metodik för indikativ konsekvensbedömning i tidiga planeringsskeden.

För att studera effekter från tyngre utsläpp väljs VOC som en relevant gruppering att undersöka vidare, och för att studera konsekvensavstånd för partiklar eller vid förbränningen utslungade tungmetaller studeras även partikelfraktionen PM10.

I vidare studie väljs därmed följande kemiska föreningar och förbränningsprodukter ut för parameteranalys; HF, VOC, PM10. Detta urval baseras på ovan fört resonemang samt på tillgänglighet i dataunderlag och litteratur, samt en bedömning avseende rimligt dimensionerande förbränningsprodukter för att på ett adekvat vis kunna genomföra parameterstudie för konsekvensbedömning. Dessa förbränningsprodukter bedöms utgöra ett någorlunda representativt urval vid studie av spridning i luft.

Gällande vilken utav de förbränningsprodukter med toxisk verkan som i praktiken har störst potential att spridas i luft från en brandplym kan diskuteras, och är ett ämne som med stor sannolikhet kan utforskas vidare. Förutsättningar för spridning är avhängigt ett flertal faktorer – exempelvis densitet och molmassa (stigkraft), reaktivitet, adsorptionsförmåga, samt brännbarhet. Utifrån ovan redovisade teoretiskt möjliga och påvisat frekvent förekommande förbränningsprodukter har det kunnat konstateras att vätefluorid är den gas som generellt bildas i högst koncentration i samband med brand i litiumjonbatterier [94, 95]. Detta är också den gas som under de senaste åren bevakats, studerats och debatterats mest frekvent varför dataunderlag för produktion av vätefluorid vid förbränning av litiumjonbatterier är tillgängligt i större omfattning än för övriga. I vidare studie av konsekvensområden för toxisk påverkan från förbränningsprodukter vid flammmande brand, genom spridningsberäkningar nyttjas gasformig vätefluorid som referens. Detta dock utan att ta hänsyn till gasens mycket höga reaktivitet och adsorptionsförmåga, vilket bedöms vara ett ytterst konservativt angreppssätt. På detta vis bedöms vätefluorid kunna tjäna som representativt för studiens ändamål, men det ska understrykas att beräknade värden avseende konsekvensområden bör vara att betrakta som schablonartade och endast generellt representativa för spridning av toxiska förbränningsprodukter från brand i litiumjonbatterier. Beräkningar syftar alltså inte till att sanningsenligt återge korrekta avstånd och koncentrationer av gasformig vätefluorid, utan häri söks snarare möjlighet att genom generiska antaganden identifiera schablonartade konsekvensavstånd till syfte att underlätta i tidiga planeringsskeden och i dialog mellan parter vid planering för uppförande av batterienergilager med litiumjonbatterier som energibärare.

8.2.2 Gasproduktion och källstyrka – flammmande förbränning

Gasformig vätefluorid, HF

När litiumjonbatterier brinner bildas den giftiga gasen fluorväte, eller gasformig vätefluorid (HF). HF kan tas upp av kroppen via andning samt genom kontakt med ögon, hud och slemhinnor, vilket rent teoretiskt kan leda till allvarliga förgiftningssymptom.

Mängden vätefluorid som bildas vid flammande brand i litiumjonbatterier kan teoretiskt kopplas till storleken på batteriet, och bedöms enligt studerad litteratur vara i storleksordningen 20-200 mg/Wh [94]. Det ska nämnas att andra forskningsrapporter visar på alstrande av betydligt lägre nivåer, vilka i princip bedöms kunna jämföras med en brand i plastmaterial eller mer konventionella bränder i elektrisk utrustning [96]. I studier genomförda av Truchot m.fl. [97] respektive Larsson m.fl. [94] har koncentrationer av gasformig vätefluorid uppmätts i brandgasplymer från brinnande litiumjonbatterier. I dessa studier konstateras kortvariga toppvärden i brandens direkta närhet runt ungefär 150-450 ppm respektive medelnivåer under brandförloppet runt 50 ppm.

Då vätefluorid och reaktionsprodukten fluorvätesyra som bildas vid reaktion med vatten är en kemisk förening med hudskadande, frätande och potentiellt systemtoxiska egenskaper har exponering och penetrationsförmåga för förbränningsprodukter från brand i litiumjonbatterier studerats brett under den senaste femårsperioden, både nationellt och internationellt. I dessa studier har det kunnat konstateras att riskerna för toxisk verkan via hudpenetration från brandgasexponering vid litiumjonbatteribrand mot personer med normalt täckande klädsel kan bedömas som mycket liten [98, 99]. Detta till följd av relativt låga resulterande koncentrationer av gasformig vätefluorid i brandgaserna tillsammans med föreningens påvisat låga hudpenetrerande förmåga.

Ytterligare studier och kunskapsöversikter indikerar att den faktiska koncentrationen av gasformig vätefluorid i brandgaser sannolikt begränsas till nivåer som inte är direkt skadliga för människor, annat än i brandens direkta närhet eller eventuellt i trånga inneslutna utrymmen. Detta potentiellt till följd av gasens höga reaktivitet och benägenhet att snabbt binda sig till olika ytor, vattendroppar och partiklar som den exponeras för, vilket i sin tur medför att den atmosfäriska koncentrationen snabbt sjunker [100, 99]. Kvarvarande koncentration vätefluorid i gasfas kan utifrån detta i praktiken antas bli begränsad och väsentligt lägre än de som indikeras av teoretiska beräkningar och laboratorieförsök [101, 94]. Sådant fenomen har vidare genom empiriska studier påvisats i [102], där nivåer av gasformig vätefluorid från förbränning av litiumjonbatterier kunde konstateras sjunka från de initialt uppmätta 100 ppm till 5 ppm inom loppet av 20 minuter.

Det finns alltså ingen tydlig bild av denna risk och det faktum att inga rapporterade fall av svår toxisk verkan eller akut systemtoxicitet inrapporterats i något fall relaterat till exponering för gasformig vätefluorid vid brand i litiumjonbatterier talar för att gaskoncentrationens spridning i luft i praktiken är begränsad.

För att möjliggöra studie av parametern gasutsläppets källstyrka, och därmed initial koncentration, och dess påverkan på bedömning av konsekvensområde genom spridningsberäkningar behöver schablonartade punktvärden ansättas som utgångspunkt. För de grundläggande scenarierna i denna studie bedöms därför en källstyrka om 20, 100 respektive 200 mg/Wh vara skäligt att nyttja som utgångspunkt. Ingen modell för gasens reaktivitet och adsorptionsförmåga beaktas, vilket enligt ovan bedöms som mycket konservativt.

VOC, Flyktiga kolväteföreningar

Vid flammande förbränning av litiumjonbatterier frigörs normalt en komplex blandning av flyktiga organiska föreningar (VOC), huvudsakligen som produkter vid avkokning och förbränning av elektrolytens lösningsmedel och dess nedbrytningsprodukter, men även från diverse plastmaterial och systemkomponenter utöver själva batterierna. Sammansättning och omfattning av sådana förbränningsprodukter från batteribränder varierar beroende på en rad faktorer, så som batteriets fysiska och kemiska sammansättning, laddningsgrad, förbränningstemperatur etc. [97, 20]. Dessa föreningar inkluderar karbonater av olika slag (t.ex. dimetylkarbonat, etylmetylkarbonat), alkoholer, estrar samt lätta kolväten och olefiner såsom metan, eten och propen. Aromatiska föreningar som bensen och toluen har också påvisats i vissa studier, vilket är särskilt relevant ur toxikologisk synvinkel då dessa ämnen potentiellt kan ha systemtoxisk verkan och är cancerogena vid långvarig exponering [103, 104, 105, 20].

VOC tas primärt upp via inandning och kan ge irritation i luftvägar, ögon och slemhinnor. Vid höga koncentrationer finns enligt ovan konstaterat risk för systempåverkan. Tillgänglig studerad litteratur indikerar dock att emitterade nivåer vid flammande förbränning av litiumjonbatterier i praktiken är begränsade, och ofta jämförbara med konventionella plast- eller elektronikbränder [106, 20, 105, 104].

Den totala mängden VOC som bildas är enligt ovan beroende av flertalet olika faktorer och det är mycket svårt att ange några tillförlitliga och generiska intervall för sådana förbränningsprodukter som en sammanhängande grupp. Publicerade emissionsfaktorer varierar kraftigt, men omfattning i storleksordningen "tiotals till hundratals" mg/Wh vid flammande förbränning förekommer i studerad litteratur [106, 20, 105, 104]. Det ska vidare noteras att dessa värden är baserade på laboratorieförsök genomförda under kontrollerade förhållanden, varför dessa sannolikt överskattar de faktiska nivåerna i en verklig brand, där snabb oxidation och utspädning i omgivande atmosfär normalt sker i en högre omfattning.

För att möjliggöra studie av parametern gasutsläppets källstyrka för VOC, och därmed initial koncentration, och dess påverkan på bedömning av konsekvensområde genom spridningsberäkningar behöver schablonartade punktvärden ansättas som utgångspunkt. För de grundläggande scenarierna i denna studie bedöms därför en källstyrka i liknande storleksordning som normalt förekommande för el- och konstruktionsbränder kunna nyttjas som utgångspunkt. 10 respektive 20 g/kg [107]. Ingen modell för de kemiska föreningarnas reaktivitet och adsorptionsförmåga beaktas, vilket enligt ovan bedöms som konservativt.

Partiklar, PM_{10/2.5}

Vid flammande förbränning av litiumjonbatterier genereras i enlighet med studerad litteratur betydande mängder partiklar i olika storleksfraktioner, där de av störst relevans i förhållande till hälsorisker är PM_{2.5} ($\leq 2,5 \mu\text{m}$) och PM₁₀ ($\leq 10 \mu\text{m}$). Dessa partiklar bildas främst genom pyrolys och oxidation av elektrolyt och separator, samt genom metallfragment från katod- och anodmaterial (tungmetaller). Partiklarna består av en komplex blandning av organiskt kol (OC), elementärt kol (EC), metalloxider etc. [20, 104, 105, 108].

De hälsovådliga effekterna från partiklar varierar beroende på ett flertal faktorer, så som material/ kemisk struktur, fysisk struktur samt partikelstorlek. Mindre partiklar har potential att tränga djupare ned i kroppens respiratoriska system och kan då orsaka bland annat inflammation, syreupptagningsförmåga etc. Partiklar av större storlek deponeras i stället framför allt i de övre luftvägarna, och kan orsaka irritation, inflammation och respiratoriska symptom [103].

Då exponering för förbränningsprodukter i form av mycket små partiklar utifrån genomförd litteraturstudie inte tydligt har kunnat förknippas med någon akut toxikologisk effekt på människor studeras sådan spridning endast övergripande. Det ska dock tilläggas att det föreligger en teoretisk möjlighet att partiklar kan vara bärare för kemiska föreningar med högre toxisk påverkan på människor, genom adsorption till partiklarnas yta. Omfattning av sådan indirekt bidragande påverkan på spridning av toxiska förbränningsprodukter är dock ej klarlagd genom litteraturen [20]. Konsekvensbedömning och spridningsavstånd för partiklar emitterade från flammande förbränning av litiumjonbatterier kan även vara relevant att beakta vid riskbedömningar ur andra perspektiv, exempelvis långvariga hälsoeffekter, ekosystempåverkan, samt skada på teknisk utrustning eller infrastruktur till följd av potentiella korrosiva eller elektriskt ledande egenskaper hos partikelavsättningar.

Orienterande spridningsberäkningar genomförs därför i denna studie för partikelstorleken PM10. Denna storlek väljs dels av beräkningstekniska skäl, dels då storleken bedöms som representativ för den partikulära produktion som med stöd i litteratur kan förväntas förekomma [105, 104, 20, 108].

8.2.3 Förbränningsegenskaper och omgivningsförutsättningar

För att genomföra beräkningar avseende spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand behöver brandegenskaper och omgivningsförutsättningar uppskattas. Indata som ligger till grund för beräkningar och parameteranalys anges tillsammans med bakomliggande motiv enligt nedan.

Energimängd per container

I en container antas mellan 2 och 5 MWh batterier finnas installerade. För att studera hur detta påverkar resultatet utförs beräkningar för 2 respektive 5 MWh.

Källstyrka HF, VOC & PM10

I Larsson m.fl. [94] framställs intervall för bildande av gasformig vätefluorid mellan 20 och 200 mg vätefluorid per Wh. Beräkningar utförs därmed för 20, 100 respektive 200 mgHF per Wh.

Enligt data för emissioner från bränder varierar VOC produktion mellan 0-20 g/kg [109]. Rumsbrandtester visar på produktion av mellan 0,82 och 8,5 VOC g/kg [110]. I dessa tester var bensen det mest frekvent förekommande ämnet i gruppen, varför detta används som dimensionerande i aktuell studie. Mot bakgrund av ovan studeras produktion av 10 g/kg respektive 20 g/kg VOC per förbränt ämne.

För PM₁₀ ansätts ett punktvärde för produktion av partiklar med 0,1 kg/kg förbränt ämne vid beräkningar, dvs. för varje kg som brinner bildas 100 g partiklar. Detta enligt försök utförda av SP (numera RISE) 1995, i vilka en sotproduktion mellan 0,02 och 0,17 kg/kg anges [111].

Varaktighet brand

Brands varaktighet antas till 12 timmar. Värde bedöms konservativt antaget baserat på studerade händelserapporter i avsnitt 5. Bränder i batterienergilager kan enligt händelserapporter från inträffade händelser pågå i många timmar, och inte sällan flera dygn. Varaktigheten av branden är relevant att beakta i samband med utvärdering av konsekvenserna för händelsen, eftersom tiden personer utsätts för farliga ämnen påverkar skadeutfall. Rent beräkningstekniskt medför ett kortare utsläppsförlopp mer konservativa förutsättningar.

Väderförhållanden

Väderförhållandens som studeras väljs till normalt och stabilt väder med låg vindhastighet. Studerade väderförhållanden är 5 m/s, stabilitetsklass D och temperatur 15 °C samt 2 m/s, stabilitetsklass F, temperatur 5 °C i enlighet med förfarande enligt riktvärden från MSB [112].

Ytråhet

Ytråhet väljs till plan mark. Detta ger normalt de längsta spridningsområdena till följd av att obstruktioner i markytan inte bidrar med turbulens. Denna parameter varierar inte trots att den har en tydlig inverkan på resultatet. Vid beräkningar där behov för mer högupplösta resultat föreligger bör parametern dock anpassas för att återspegla verkliga förhållanden på platsen.

Effektutveckling

Effektutveckling för batteribrand beräknas enligt Willstrand m.fl. [101, 113]. Total effektutveckling för batteribrand har i dessa studier genom förenklad modell visats kunna ansättas som proportionell mot batteriets energimängd, $Q_{all} = 48,5 \times E$.

Där E = Elektrisk energi

Q_{all} = Total energiutveckling

Vid brand som pågår i 12 timmar innebär det för batterienergilager med en storlek om 2 MWh en effektutveckling 2,2 MW, och motsvarande 5,6 MW brandeffekt vid batterienergilager av storleken 5 MWh. Effektutvecklingen antas inom beräkningar vara konstant, vilket är en uppenbar förenkling i förhållande till ett verkligt förlopp.

$2\,000\,000\text{ Wh} \times 48,5 = 97\,000\,000\text{ kJ}$, vilket ger $97\,000\,000 / (12 \times 3600) = 2\,245\text{ kW}$.

$5\,000\,000\text{ Wh} \times 48,5 = 242\,500\,000\text{ kJ}$, vilket ger $242\,500\,000 / (12 \times 3600) = 5\,613\text{ kW}$.

8.3 SAMMANFATTNING AV INDATA FÖR PARAMETERANALYS AV KONSEKVENSBEDÖMNING FÖR EXPLOSION

Kopplat till explosionsrisken bedöms det vara av signifikans att djupare studera vilka parametrar som har störst inverkan på behov av tryckavlastning. I Tabell 8 sammanfattas de indataparametrar som diskuterats i föregående avsnitt.

Tabell 8: Dimensionerande parametrar för beräkning av tryckavlastningspaneler

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Volymflöde utsläpp vid off-gassing	126	L/kWh	Baseras på LFP batterier [15].
Energimängd (batteri) involverad i termisk rusning	1	kWh	Denna energimängd motsvarar en eller ett fåtal battericeller.
Gassammansättning	18% CO, 36% CO ₂ , 32% H ₂ samt 14% icke fullständigt förbrända kolväten (delmängd av producerade VOC)	%	[76]
P_{max}	8	Bar-g	Maximalt övertryck
S_u	0,613	m/s	Förbränningshastighet
P_{red}	0,2	Bar	Övertryck som behållaren/container tål
Ventilation	-	m ³ /s	Då fokus för de grundläggande scenarierna är att studera storlek på tryckavlastningslucka förutses container i grunden vara utförd utan mekanisk ventilation. Inom branschen används ofta 6 luftomsättningar som grund vid dimensionering av ventilationssystem. Således genomförs även analys med denna ventilationsomsättning.

8.4 SAMMANFATTNING AV INDATA FÖR PARAMETERANALYS AV KONSEKVENSBEDÖMNING FÖR SPRIDNING AV TOXISKA FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER

På motsvarande vis som för parameteranalysen avseende effekter av indata på utfall från konsekvensbedömningar för explosionsförlopp studeras även variation i indata och indataparametrarnas signifikans. I Tabell 9 sammanfattas de indataparametrar som diskuterats i föregående avsnitt.

Tabell 9. Dimensionerande parametrar för beräkning av konsekvensområden för spridning av toxiska förbränningsprodukter i luft.

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Produktion HF	20, 100 respektive 200	mg/Wh	I Larsson m.fl. [94] framställs intervall för bildande av gasformig vätefluorid mellan 20 och 200 mg vätefluorid per Wh.
Produktion partiklar PM10	0,1	kg/kg	
Produktion VOC	10 respektive 20	g/kg	[110]
Energimängd per container	2 respektive 5	MWh	Typiska containerstorlekar antas innebära maximal energimängd motsvarande mellan 2 och 5 MWh per enhet.
Varaktighet brand	12	h	Värde konservativt antaget baserat på studerade händelserapporter i avsnitt 5. Bränder i batterienergilager kan enligt händelserapporter från inträffade händelser pågå i många timmar, och inte sällan flera dygn.
Väderförhållanden	Normalt väder med vindhastighet 5 m/s och stabilitetsklass D Stabilt väder: Vindhastighet 2 m/s och stabilitetsklass F	m/s	Historiskt nyttjade av MSB vid utvärdering av spridningsmodeller och framtagande av konsekvensområden för toxiska gasutsläpp [112]
Ytråhet	Plan mark		Plan mark väljs generellt i beräkningarna utifrån konservativa principer.
Effektutveckling	2,2 respektive 5,6	MW	Beräkning enligt Willstrand m.fl. [101, 113]

I beräkningar fordras generellt att klimatförhållanden ansätts i form av antaganden om rådande stabilitetsklass. Detta är ett sätt att beskriva turbulensförhållanden i luftmassan närmas jordens yta, vilket i sin tur har en inverkan på förutsättningar för omblandning, utspädning och skiktningssfenomen [114]. Beräkningar utgår därför från antaganden om stabilitet enligt Pasquills stabilitetsklasser, se Tabell 10 nedan.

Tabell 10. Beskrivning av Pasquilles stabilitetsklasser [114].

Turbulens	Väderförhållande	Stabilitetsklass	Intervall vindhastigheter [m/s]
Instabil	Måttlig till hög solinstrålning, molnfritt med högt solstånd, måttliga till svaga vindar.	A: Extremt instabilt	<2,5
		B: Måttligt instabilt	2,5-4
		C: Svagt instabilt	>4
Neutral	Måttlig solinstrålning, molnig eller halvklar väderlek alt. klar väderlek med lågt solstånd, låga till relativt starka vindar.	D: Neutral	0-15
Stabil	Låg eller ingen solinstrålning, svaga vindar. Primärt nattetid.	E: Svagt stabilt	>2,5
		F: Måttligt till extremt stabilt	<2,5

Beräkningar utgår vidare från ett grundfall med neutral turbulens, **stabilitetsklass D** och vindhastighet om 5 m/s.

Känslighetsanalys genomförs även för extremscenario med stabilt väder, **stabilitetsklass F** och vindhastighet om 2 m/s.

8.5 ACCEPTANS- OCH BEDÖMNINGSKRITERIER

Nedan redovisas aktuella kriterier för acceptans och bedömning

8.5.1 Acceptanskriterier – skadeverkan på container vid dimensionering av deflagrationsskydd

Maximalt accepterat övertryck gällande för ISO-containerar, vilket normalt är det som containerbaserade batterienergilagrar baseras på, är inte entydigt fastslaget i någon standard. Ett maximalt övertryck om 0,2 bar-g används dock inom studerad referenslitteratur [76]. Andra källor pekar dock på att 0,5 bar-g är maximalt tryck som väggar och tak på en container klarar av innan de rämner, deformeras omfattande eller slits loss [93].

För de grundläggande scenarierna i denna studie bedöms därför ett maximalt övertryck (Pred) om 0,2 bar-g kunna användas som acceptanskriterium vid beräkningar avseende deflagrationsskydd.

De externa effekterna kring tryckavlastning bedöms enligt 6 i enskilda fall med de förutsättningar som råder på platsen/i utformningen.

8.5.2 Acceptanskriterier – toxisk verkan på människor och nivåer för akut systemtoxisk effekt

Gränsvärden för toxisk påverkan från kemiska föreningar i luft förekommer i en mängd olika former och skepnader. Variationen i måtetal och acceptansnivåer beror både av mättekniska förutsättningar samt av historiska och geografiska skillnader i tolkning av- och förhållande till accepterade nivåer av exponering.

En av de skalor som nyttjas frekvent i de inträffade händelser som studerats inom ramarna för detta arbete är den amerikanska gränsvärdesmodellen PEL (*Permissible Exposure Limit*), etablerad av amerikanska Occupational Safety and Health Administration (OSHA). Denna skala anger gränsvärden för exponering över längre tid (dimensionerande för arbetstagare under åtta timmars arbetsdag). Som referens anges gränsvärde för kolmonoxidexponering utifrån OSHA PEL till maximalt 50 ppm, vilket få kan jämföras med de maximalt 18 ppm som uppmättes på ett avstånd om 80 meter från skadeplatsen i händelsen i Escondido, Kalifornien, USA 2024.

I Sverige används primär gränsvärden utifrån det etablerade AEGL-systemet, i vilket både akuta effekter vid kort exponering samt värden för långtidsexponering återfinns. Gränsvärden ansatta i form av AEGL-nivåer (Acute Exposure Guideline Levels) nyttjas ofta för att mäta toxisk verkan av luftburna ämnen. Detta mätsystem är utformat för att ta hänsyn till känsliga individer som exempelvis äldre, sjuka individer samt barn och gränsvärden för maximalt tolerabel exponering redovisas utifrån en kombinerad effekt av exponeringens storlek (gaskoncentration i luft) tillsammans med exponeringens varaktighet. Genom detta sätt att mäta hälsopåverkan erhålls gränsvärden utifrån dos, dvs. koncentration i det luftburna utsläppet som individer utsätts för över tid.

I AEGL-systemet tillämpas tre gränsvärden enligt nedan:

- **AEGL-1** – vid koncentrationer över detta gränsvärde kan en population uppleva obehag och irritation som effekt av exponeringen. Effekterna är kortvariga och övergående, inga permanenta skador erhålls vid exponering på denna nivå.
- **AEGL-2** – vid koncentrationer över detta gränsvärde kan en population erhålla permanenta skador. Exponeringen orsakar långsiktiga, svåra hälsoeffekter. Individers förmåga att på egen hand fly undan utsläppet är reducerad.
- **AEGL-3** – vid koncentrationer över detta gränsvärde erhålls livshotande effekter.

Utöver gränsvärden utifrån AEGL-nivåerna förekommer, och nyttjas vid vissa tillfällen även gränsvärden bland annat utifrån skalorna LC₅₀/LD₅₀ och IDLH. IDLH (Immediately Dangerous to Life or Health) definierar på motsvarande sätt den koncentration som är omedelbart farlig för liv eller hälsa vid kortvarig exponering, och kan i många avseenden jämföras med AEGL-3 värden.

LC₅₀ anger den koncentration av ett ämne vid vilken 50% av en testpopulation väntas omkomma, medan LD₅₀ beskriver motsvarande utfall utifrån ett dosförhållande. Dessa gränsvärden är således experimentella gränsvärden

baserade på kontrollerade toxikologiska provningar, vilka ofta nyttjas som vetenskapligt underlag för riskbaserade gränsvärden så som AEGL och IDLH.

I nedanstående tabell redovisas gränsvärden för AEGL-1, respektive AEGL-3 samt IDLH för studerade exponeringsintervall och aktuella förbränningsprodukter vid inhalering.

Tabell 11. Gränsvärden (i ppm) för exponering av vätefluorid och Bensen, AEGL-1, AEGL-3 (Acute Exposure Guideline Levels) & IDLH [ppm] [115, 116, 117]. Fetmarkerade värden ansätts som dimensionerande gränsvärden vid bedömning av konsekvensområden i aktuell studie.

	10 min	30 min	60 min	4 tim	8 tim
Gasformig vätefluorid [ppm]					
AEGL-1	1	1	1	1	1
AEGL-3	170	62	44	22	22
IDLH	n/a	30	n/a	n/a	n/a
VOC (Bensen)					
AEGL-1	130	73	52	18	9
AEGL-3	9700	5600	4000	2000	990
IDLH	n/a	500	n/a	n/a	n/a

För partiklar finns inga specifika IDLH- eller AEGL-värden. Detta då dessa skalor är utformade för gradering av toxisk verkan vid akut exponering för kemiska föreningar i luft eller ångor, inte för partikulära luftföroreningar. Partiklar är i den meningen inte direkt toxiskt verkande, även om de kan ha skaliga hälsoeffekter i andra avseenden och utifrån andra tidsskalor. Bedömning avseende gränsvärden för partiklar av olika storlek sker normalt i stället utifrån luftkvalitetsnormer och hälsobaserade riktvärden, anpassade för både kort- och långtidsexponering.

Vid bedömning av konsekvensområden i denna rapport begränsas studien till partiklar med storlek ≤ 10 mikrometer, PM₁₀ av beräkningstekniska skäl. Studie av mindre eller större partiklar kan komma att medföra andra konsekvensområden då både hälsoeffekter samt suspension i luft påverkas av partiklarnas storlek.

I Sverige tillämpar Arbetsmiljöverket nivågränsvärde vid **koncentrationen 5 mg/m³**. NGV är ett hygieniskt gränsvärde för exponering under en arbetsdag, normalt 8 timmar [118].

För de grundläggande scenarierna i denna studie bedöms gränsvärden utifrån Tabell 11, samt värden markerade i fetstil ovan kunna användas som acceptanskriterium vid beräkningar avseende konsekvensområden för påverkan vid spridning av toxiska förbränningsprodukter.

9 Utvärdering av metod för konsekvensbedömning

9.1 UTVÄRDERING AV METODER KOPPLAT TILL EXPLOSIONSRISKER

I detta avsnitt redovisas en genomgång av de metoder som redovisats övergripande i avsnitt 7. Metoderna för tryckavlastning som är en konsekvensreducerande åtgärd och mot mekanisk ventilation som är en frekvensreducerande åtgärd. Det är viktigt att en utformning av en BESS ser till helheten så att båda frekvensreducerande och konsekvensreducerande åtgärder vidtas i sådan utsträckning att den totala riskbilden hanteras. Metoderna nedan ska således inte ses som en fullständig inventering av alla skyddssystem som finns.

9.1.1 Tryckavlastning enligt SS EN 14994

För att kunna dimensionera enligt standarden ska containerns form indelas antingen som compact eller elonged. Detta görs genom att längden ställs mot en ekvivalent diameter som beräknas. Är ration under 2 är containern att betrakta som compact och beräkningarna följer en viss metodik och är containern elonged följs en annan metodik. Följande gäller för tomma containrar (invändiga mått) för kontroll av compact vs. elongated container:

Container	Längd	Bredd	Höjd	"Diameter"	L/D	
10 fot	2,83	2,34	2,39	2,7	1,0	Compact
20 fot	5,9	2,34	2,39	2,7	2,2	Elonged
40 fot	12,03	2,34	2,39	2,7	4,5	Elonged

Utifrån sammanställningen ses att det bara är för mindre containrar som "Compact" där beräkningar kan göras enligt följande formel:

$$A = \{[(0,1265 \lg(K_G) - 0,0567)p_{red})^{-0,5817}] + [0,1754p_{red}^{-0,5722}(p_{stat} - 0,1bar)]\}V^{2/3}$$

Där,

A är geometriska öppningsarean av tryckavlastningen, m²

K_G är gas explosionskonstanten, bar m/s

p_{red} är det reducerade övertrycket, bar

p_{stat} är öppningstrycket, bar

V är behållaren/containerns volym

Givet en 10 fotscontainer, p_{red} på 0,2 och p_{stat} på 0,1 erhålls att tryckavlastningsarean behöver vara 3,4 m² om gasens explosionskonstant sätts till 84 bar m/s.

Det är viktigt att en kontroll av acceptabel turbulens görs enligt standardens bilaga A. I det aktuella fallet med en 10 fots container kan beräkningarna enligt bilaga A i standarden visa att formeln ovan är applicerbar.

Utifrån formeln ovan ses att gasens explosionskonstanten K_G är den viktigaste parametern för beräkningen. Tryck för när en tryckavlastning ska öppna och det övertryck som en behållare/container klarar av är värden som sätts av den som utformar skyddet eftersom det är kopplat till containers hållfasthet och vilken tillverkare och modell som väljs för tryckavlastning.

För containrarna större än 10 fotscontainer är standarden inte lämplig att använda efter som beräkningsgången bara är giltig för gaser/gassammansättningar som har förbränningshastigheter nära metan eller propan (0,43 m/s). I föregående avsnitt redovisas att förbränningshastigheter för gaser vid BESS markant kan avvika från detta, upp till 1,1 m/s. För andra typer av behållare/containers är det då lämpligt att använda andra metoder för att dimensionera tryckavlastningar.

9.1.2 Tryckavlastning enligt NFPA 68

NFPA 68 har två alternativ för dimensionering av tryckavlastning som är relevanta att lyfta i detta sammanhang, antingen kan dimensionering göras enligt given beräkningsgång under förutsättning att behållaren/containers utformning ger att L/D är maximalt 5. NFPA 68 ger också möjlighet till att designa en tryckavlastning genom s.k. *Performance-based design*. Det senare kan användas om designen bestäms enligt följande:

- Görs mot ett uppsatt och dokumenterat scenario (hazard scenario)
- Designen påvisar att det reducerade övertrycket (P_{RED}) överensstämmer med att:
 - Tryckavlastningen skall (om platsen är bemannad) förhindra att konstruktionen rämnar och/eller minimera skador på personer utanför behållaren/containern.
 - Tryckavlastningen skall (om platsen är obemannad) förhindra att behållaren/containern rämnar.
- Tryckavlastningszonen ska ordnas så att:
 - brännbart material inte kan antändas,
 - konstruktioner ska inte riskera att skadas,
 - tillträde ska vara begränsat för personer så de inte riskerar att skadas från flamma, varma gaser eller partiklar eller projektiler.

Om designen av tryckavlastningen görs med s.k. *Performance-based design* ska metod och indata dokumenteras. Eventuella förändringar av förutsättningarna för designen ska analyseras innan de genomförs. Uppdatering av dokumentationen ska löpande göras vid exempelvis förändringar.

Om design av tryckavlastning sker enligt de beräkningsgångar som redovisas i NFPA 68 görs först en indelning utifrån om behållaren/containern har hög hållfasthet (+ 0,5 bar) eller låg hållfasthet ($\leq 0,5$ bar). Där efter finns beräkningsgångar redovisade och en erforderlig avlastningsarea erhålls beroende på vilken indata som väljs. De olika indata som kan väljas har olika mycket inverkan på den resulterande avlastningsarean. I avsnitt 10 genomförs därför en

parameteranalys som visar vilken inverkan de olika parametrarna har på resultatet.

9.1.3 Externa effekter givet tryckavlastning

Givet att en tryckavlastning fungerar på avsett sätt kan de externa konsekvenserna uppskattas enligt avsnitt 7. Bedömning av konsekvenser kopplat till kaststycken görs utifrån erfarenheter där de redovisade inträffade händelserna i avsnitt 5 fungerar som ett gott underlag. Externa konsekvenser avseende tryck är beroende av många faktorer kopplat till exakt utförande varför typberäkningar inte redovisas. Konsekvenser avseende extern flamma beräknas dock utan så många antaganden kring utförandet av batterienergilagret varför typberäkningar redovisas nedan.

Givet antagande om att olika containrar huserar BESS-enheterna kan längden på den externa flaman beräknas enligt nedan (se avsnitt 7). För beräkningar enligt NFPA kan de externa effekterna minskas om tryckavlastningsarean delas upp på flera icke överlappande tryckavlastningar. I beräkningarna nedan antas 1 lucka.

	10 fots container	20 fots container	40 fots container
Extern flamma enligt SS EN 14494	13 meter	17 meter	22 meter
Extern flamma enligt NFPA 68	10 meter	13 meter	18 meter

De båda standarderna ger lite olika resultat. I studier [101] där man jämfört bland annat NFPA 68 mot CFD-simuleringar med FLACS för vertikal avlastning har ett av resultaten varit att den externa flaman från en 10 fotscontainer som simulerades ger en kortare utsträckning än tabellen ovan. I jämförelse med CFD-beräkningarna är avlastningszonen enligt SS EN 14494 fortfarande konservativt även om den föreslagna säkerhetsfaktorn på 1,5 tillämpas.

Givet tryckavlastning enligt standarderna kan de högre värdena i tabellen ovan ses som vägledande i tidiga skeden av ett projekt innan detaljerad utformning är känd. Utöver flaman kommer även en tryckvåg spridas när avlastningen fungerar som tänkt, denna effekt är dock av sekundär betydelse då skyddsmetoden avser att avlasta en deflagration innan övergång till detonation kan ske. Delar av anläggningen eller omgivningen inom de avstånden bör utformas så att brandspridning dit inte kan ske.

9.1.4 Mekanisk ventilation enligt NFPA 69

Mekaniska ventilation avser att ventileras bort de brännbara gaserna som den termiska rusningen sprider i omgivningen vid off-gassing. Svårigheter kring dimensionering finns särskilt när stora delar av ett batterisystem simultant går in i termisk rusning och mängden brännbar gas som produceras blir omfattande.

NFPA 69 specificerar en maximal gaskoncentration som motsvarar 25% av LFL när ventilationen fungerar som tänkt. I [76] redovisas exempelberäkningar med målsättning att förstå inverkan av viktiga indataparametrar vid beräkningar

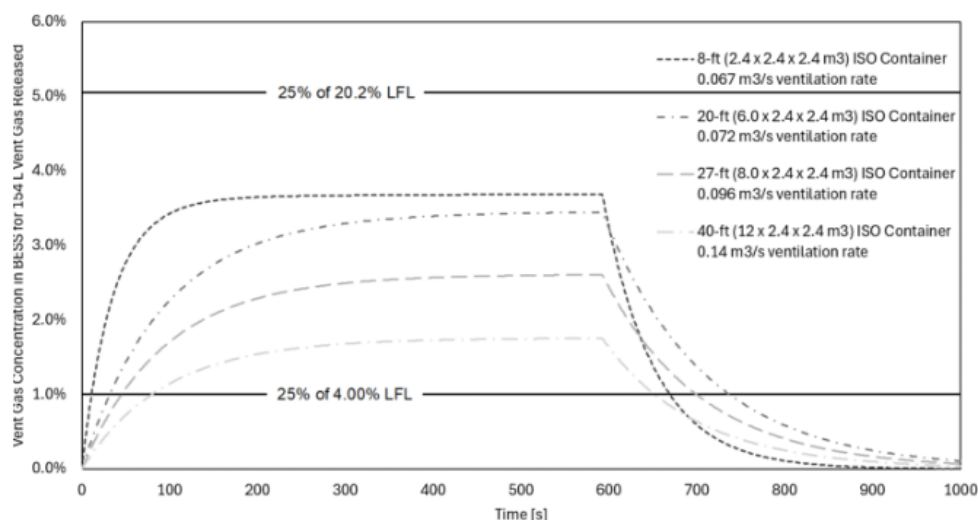
kopplat till dimensionering enligt NFPA 69. Resultatet från exempelberäkningarna redovisas nedan där ett ventilationsflöde på $0,3 \text{ m}^3/\text{min}/\text{m}^2$ använts. Off-gassing från cellerna sker simultant i räkneexemplet. Tabellen nedan redogör för antal celler som kan gå in i termisk rusning, och bidra till uppbyggnad av brännbar blandning, för att 25% av LFL inte ska överskridas. Två olika LFL tas i beaktning givet att blandningen kan variera.

Assumed LFL	Vent Gas and Ventilation Variables	ISO Container Dimensions			
		8-ft Container 2.4 x 2.4 x 2.4 m ³	20-ft Container 6.0 x 2.4 x 2.4 m ³	27-ft Container 8.0 x 2.4 x 2.4 m ³	40-ft Container 12 x 2.4 x 2.4 m ³
-	NFPA 69 Minimum Required Ventilation Rate	0.067 m ³ /s	0.072 m ³ /s	0.096 m ³ /s	0.14 m ³ /s
4.00%	Maximum Cell Vent Gas Volume Handled by Minimum NFPA 69 Ventilation Requirements	25 L	71 L	94 L	143 L
	# Cells Required to Produce Vent Gas Released (154 L Released per 130 Ah Cell)	0.16 Cells	0.46 Cells	0.61 Cells	0.93 Cells
	# Cells Required to Produce Vent Gas Released (645 L Released per 280 Ah Cell)	0.039 Cells	0.11 Cells	0.15 Cells	0.22 Cells
20.2%	Maximum Cell Vent Gas Volume Handled by Minimum NFPA 69 Ventilation Requirements	137 L	381 L	513 L	794 L
	# Cells Required to Produce Vent Gas Released (154 L Released per 130 Ah Cell)	0.89 Cells	2.5 Cells	3.3 Cells	5.2 Cells
	# Cells Required to Produce Vent Gas Released (645 L Released per 280 Ah Cell)	0.21 Cells	0.59 Cells	0.80 Cells	1.2 Cells

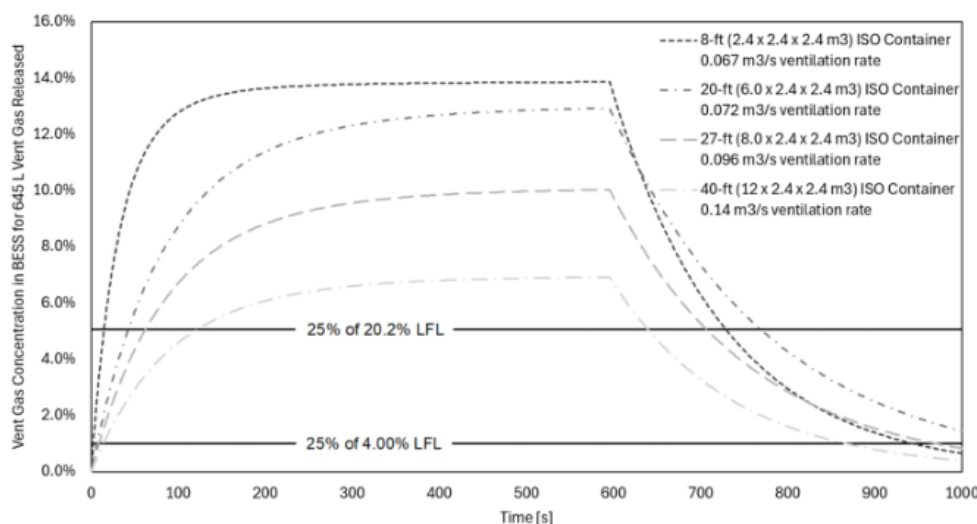
Figur 7: Maximal ventilationsgasvolym som frigörs från celler under termisk rusning som kan hanteras av olika ISO-behållare med 20 % fri luftvolym medan gaskoncentrationen i inneslutningen hålls under 25 % LFL enligt NFPA 69 minimiventilationskrav [62].

Det är tydligt från ovanstående tabell att även om endast ett fåtal celler går in i termisk rusning och bidrar till "off-gassing" förväntas inte systemet klara av att hålla koncentrationer <25% av LFL.

Räkneexempel visas även där ett kontinuerligt utsläpp studeras på $2,6 \text{ l/s}$ (motsvarande 154 l/min) respektive $10,8 \text{ l/s}$ (motsvarande 645 l/min). Det är tydligt att ett mer kontinuerligt utsläpp leder till lägre koncentrationer och utgör ett mindre utmanande fall rent dimensioneringsmässigt. Dock överstigs 25% av LFL motsvarande 4% (LFL vätgas) i samtliga fall under en viss tid. Detta ger en indikation på att det behövs omfattande ventilationsflöden för att säkerställa att 25% av LFL inte uppnås. Resultat indikerar exempelvis att en 20-fot ISO-container kan behöva ha 34 gånger högre ventilationsflöde jämfört med minimikraven i NFPA 69 för att kunna säkerställa <25% av LFL på 4% vid ett gasutsläpp på 154 l/min . Detta motsvarar ett ventilationsflöde på cirka $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, vilket motsvarar 255 luftomsättningar per timme.



Figur 8: Ventilationsgaskoncentrationer över tid för 154 l gas frigjord per cell för 8-cells TR-händelse i olika BESS ISO-behållare med 20 % antagen fri luftvolym för NFPA 69 minsta erforderliga ventilationshastighet och 2,6 l/s gasutsläppshastighet (ungefär 1 cell/minut TR-utbredningshastighet). [62]



Figur 9: Ventilationsgaskoncentrationer över tid för 154 l gas frigjord per cell för 8-cells TR-händelse i olika BESS ISO-behållare med 20 % antagen fri luftvolym för NFPA 69 minsta erforderliga ventilationshastighet och 10,8 l/s gasutsläppshastighet (ungefär 1 cell/minut TR-utbredningshastighet). [62]

Ovanstående grafer ger en indikation på att det kan vara problematiskt att dimensionera för att koncentrationen hela tiden ska understiga 25% av LFL, trots att detta vore att föredra. Graferna indikerar att ett kontinuerligt ventilationsflöde har en tydlig positiv inverkan. Detta gäller särskilt om möjlighet finns att avläsa gaskoncentrationer inne i containern från utsidan, vid exempelvis en insats. En termisk rusning som endast sker mellan ett fåtal celler ger då möjligheter att med hjälp av mekanisk ventilation kunna ha en mer defensiv insatsmetodik och invänta lägre gaskoncentrationer.

Likt beskrivit i avsnitt 3 finns inom BFS 2024:7 krav på brandgasventilation för energilager som överstiger 20 kWh. Dock beror omfattningen på ventilationen inte av storleken på energilagret, i stället beror det av storleken på den brandcell energilagret är placerat i. Vidare bedöms det krav som anges i byggreglerna primärt syfta till att möjliggöra att vädra ut brandgaser ur ett utrymme under eller

efter en släckinsats. Således bedöms BFS 2024:7 inte applicerbart för större energilager, exempelvis container som innehåller flera MWh.

9.2 UTVÄRDERING AV METODER KOPPLAT TILL SPRIDNING AV TOXISKA FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER

Utöver explosionsrisk har det i förarbete till denna studie identifierats ytterligare problematisering gällande risk för påverkan på tredje man och kringliggande verksamheter till följd av rökutveckling och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand i batterienergilagrar med litiumjonbatterier.

Ett flertal studier har under de senaste åren studerat toxiciteten i brandgaser vid batteribränder, men allt som oftast är då fokus på intensiv och kortvarig direktexponering i brandens direkta närhet (primärt utifrån påverkan från vätefluorid), dvs. vid räddningsinsats och för personer iklädda skyddsklädsel och andningsskydd. Fåtal resultat finns att tillgå gällande hur toxicitet i brandgaser från bränder i batterienergilagrar uppbyggda av litiumjonbatterier verkar vid spridning i luft, bort från en olycksplats.

Även i detta fall förekommer validerade beräkningsmodeller genom vilka spridning av kemiska föreningar i luft kan studeras. Återigen är dessa dock primärt validerade och tillämpade för andra ändamål än det avsedda (brand i batterienergilagrar), exempelvis för långvariga utsläpp från trafikleder och industri, påverkan på miljö och ekosystem eller långvarig exponering som underlag för samhällsplanering i större skala.

Vid bedömning av resulterande koncentration på ett givet avstånd från en utsläppskälla, vid framtagande av randzoner eller som planeringsverktyg vid insatser nyttjas ofta olika typer av spridningsmodeller. Dessa modeller utgör i många applikationer centrala verktyg för att förutsäga hur gaser, partiklar och andra föroreningar sprids i atmosfären från en utsläppskälla. De används exempelvis frekvent inom miljöanalys, riskbedömning, räddningstjänst och industriell säkerhet. Vid applicering av befintliga beräkningsmodeller på scenarion baserade på brand i batterienergilagrar är situationen särskilt utmanande till följd av att utsläppen kan innehålla en stor mängd giftiga gaser av både varierande sammansättning, källstyrka och initial koncentration. Dessa utsläpp är även normalt transienta, och utsläppets karaktär kan skifta på flera olika sätt under händelseförloppets gång, beroende av faktorer som exempelvis brandeffekt och förbränningstemperatur, atmosfäriska förutsättningar och rådande klimatologiska förutsättningar samt bränsleegenskaper. Ofta sker detta i kombination med termiska drivkrafter vilka påverkar stigkraft i emitterade brandgaser, plymhöjd och turbulens.

Utifrån den aktuella studiens inriktning strävas det efter att identifiera och utvärdera modeller för konsekvensbedömning i form av spridning av toxiska förbränningsprodukter i luft. Enligt ovan förekommer det en stor mängd sådana modeller, vilka nyttjas i väldigt varierande tillämpningsområden. Olika appliceringar medför olika behov i förhållande till modellens prestanda, resultatens noggrannhet och upplösning. Det finns alltså ingen universell modell som passar alla scenarier. I stället återfinns vid studie av tillgängliga verktyg en

bred palett av modeller som skiljer sig fundamentalt i hur de beskriver atmosfärens dynamik, turbulens och transport av föroreningar. Dessa modeller kan grupperas utifrån den matematiska och fysikaliska metod som ligger till grund för beräkningarna

Generellt kan program för spridningsmodellering delas upp i två huvudsakliga grupper. Den ena gruppen omfattar beräkningsmodeller och simuleringsverktyg för 3D-modellering, i vilka väldigt avancerade beräkningsdomäner omfattande verklighetstrogen topografi, bebyggelse, andra fysiska hinder etc. kan skapas. Den andra gruppen omfattar egentligen ett flertal ytterliga olika modelleringsstrategier men kan sammanfattas som 2D-modeller, eller integralverktyg [119].

I tillämpningsområden där hög noggrannhet och detaljrikedom är av stor vikt nyttjas ofta 3D-modellerna i form av mycket avancerade modelleringsverktyg, normalt olika typer av CFD-modeller (Computational Fluid Dynamics). I denna kategori återfinns program som exempelvis MISAKM, OpenFOAM, KFX och FDS. Olika modellverktyg i denna kategori är framtagna och utvecklade med olika grundläggande applikationsområden som huvudsyfte och inget utav dessa är i egentlig mening i detalj specialiserat på konsekvensberäkningar i form av spridning av toxiska förbränningsprodukter från flammande brand i batterienergilager med litiumjonbatterier. Däremot har det genom ett flertal projekt påvisats att det går att bygga modeller och ange indata som återger realistiska resultat vid jämförelse med faktiska händelser genom case studies [120, 121]. Baksidan med sådana sofistikerade verktyg är att de kräver mycket datorkraft och långa beräkningstider, samt att analys av utdata i normala fall kan kräva stort arbete. Vid nyttjande av sådana modelleringsverktyg är det därför av mycket stor vikt att den indata som anges är tillförlitlig och korrekt i förhållande till den aktuella applikationen, systemet och de omgivningsförutsättningar som kan väntas råda. Då dessa spridningsmodeller inte bedöms uppfylla den aktuella studiens syfte i fråga om tillgänglighet och effektivitet för beslutsfattande i planerings- och dialogskeden studeras de ej vidare. Det ska dock tilläggas att sådan detaljerad simulering kan utgöra ett mycket värdefullt och kraftfullt verktyg för detaljstudier i fråga om specifik applikation eller vid avgörande vägval avseende systemutförande eller -placering i ett skede då indata är tillgänglig och tillförlitlig.

I andra änden av spektret återfinns 2D-modellerna eller integralverktygen som de benämns i IPS QRA-vägledning [119]. Denna grupp av modelleringsverktyg innefattar enligt tidigare konstaterat ett flertal olika underkategorier, och olika enskilda modeller kan också utgöra hybrider mellan olika sådana. Fördelen med dessa, något enklare modeller för konsekvensbedömning är att det på relativt kort tid går att utvärdera en situation och bedöma konsekvensområden utifrån en given händelse, men modellerna saknar generellt den detaljrikedom och höga upplösning som återfinns i mer sofistikerade beräkningar.

Nedan redogörs för ett antal vanligt förekommande underkategorier och exempel på modeller inom dessa. Då denna studie är inriktad mot att identifiera möjliga metoder för konsekvensbedömning ur ett perspektiv där enkelhet, tillgänglighet och kostnad/nytta betraktas som starka ledord har studien primärt fokuserat på tillgängliga modeller som tjänar ett sådant syfte.

- Gaussisk spridningsmodellering

Gaussiska spridningsmodeller är bland de mest använda metoderna för att beräkna koncentrationsfält eller randzoner från punktkällor under stationära förhållanden. Modellerna bygger på antagandet att plymen har en normalfördelad koncentrationsprofil i både horisontell och vertikal riktning och förutsätter vidare konstant utsläppshastighet, och homogena meteorologiska förhållanden. Gaussisk spridningsmodellering tar normalt inte hänsyn till kemiska reaktioners påverkan på resulterande koncentrationer. Koncentrationen beräknas som en funktion av avstånd nedströms, sidled och höjd, där spridningsparametrar bestäms av atmosfärisk stabilitet och terräng. Gaussiska modeller är enkla och beräkningsmässigt effektiva, vilket gör de lämpliga för tillämpningar där grövre bedömningsunderlag är fullgott, men modellerna är samtidigt normalt begränsade vid förekomst av komplex terräng, tidsvariabla utsläpp och reaktiva ämnen [122, 123].

I Sverige används gaussiska modeller som exempelvis NG2M främst för luftkvalitetsberäkningar och miljöprovningar, där de bygger på antaganden om stationära förhållanden och kontinuerliga utsläpp. Dessa antaganden bedöms göra dem mindre lämpade för konsekvensbedömning av toxisk spridning vid brand i batterienergilager [124].

- Plymmodeller

Plymmodeller används för att simulera spridning av utsläpp från heta ursprungskällor, där termisk stigitkraft utgör en avgörande del för transporten. Till skillnad från gaussiska modeller tar plymmmodellerna hänsyn till termisk stigitkraft, temperaturgradienter och turbulens i plymen, vilket gör dem lämpliga för användning vid scenarier som bränder och explosionsliknande utsläpp. Plymmmodellerna använder empiriska korrelationer mellan värmefflöde och atmosfäriska stabilitetsparametrar för att kombinera effekterna av stigitkraft och atmosfärisk spridning. Dessa spridningsmodeller saknar generellt dock detaljnivå för spridning av tung gas eller marknära spridning [125].

Ett exempel på sådant verktyg är ALOFT, som utvecklats av NIST för att beräkna spridning av rök och giftiga gaser från stora bränder, där modellen kopplar termodynamik till atmosfärisk transport för att ge mer realistiska konsekvensbedömningar [126].

- Lagrangiska spridningsmodeller

Lagrangiska spridningsmodeller beskriver transport och dispersion genom att följa "luftpaket" eller partiklar som rör sig med ett lokalt definierat vindfält och sprids beroende på turbulens och meteorologiska förhållanden. Spridningen beräknas utifrån statistiska parametrar för horisontell och vertikal turbulens, samtidigt som kemiska reaktioner och deposition i vissa modeller kan inkluderas för att beskriva hur sådana fysikaliska och kemiska processer under transporten påverkar

spridningen. Koncentrationer erhålls genom att summera bidrag från passerande puffar eller partiklar. Spridningsmodellering med lagrangiska modeller är särskilt effektiv vid komplexa vindfält och varierande terräng, men kräver detaljerade meteorologiska data och kan bli beräkningsintensiv vid stora och komplexa utsläpp [123, 127, 128].

SCICHEM är ett exempel på verktyg som baseras på denna metodik, och som även framgångsrikt har nyttjats för modellering av konsekvensområden från brand i batterienergilagrar [129].

- Kemiska transportmodeller

Kemiska transportmodeller (CTM) är numeriska modeller som simulerar hur luftföroreningar transporteras, omvandlas och avlägsnas i atmosfären. De löser kontinuitetsekvationer för kemiska ämnen i ett rutnät ("grid") och inkluderar flera avancerade processer som exempelvis emission, advektion (horisontell luftförflyttning), turbulens, kemiska reaktioner samt torr- och våtdeposition. CTM används normalt för att analysera luftkvalitet, långväga transport av kemiska föreningar och utsläpp samt för studier av klimatpåverkan. Modellerna kan beroende på verktyg och applikation köras på lokala, regionala eller globala skalor [130, 123].

Ett exempel på kemisk transportmodell är MATCH, en Eulerisk CTM utvecklad av SMHI. Detta verktyg används i Sverige för miljöövervakning, luftkvalitetsbedömningar och beräkningar av deposition av svavel- och kväveföreningar samt fotokemiska processer. MATCH bedöms dock vara begränsad för applikation på modellering av spridning av toxiska förbränningsprodukter från bränder i batterienergilagrar med litiumjonbatterier eftersom modellen är optimerad för regionala och långsiktiga luftföroreningsstudier snarare än kortvariga, högtempererade utsläpp med komplex kemisk dynamik [131].

- Beslutsstödsmodeller

Beslutsstödsmodeller är förenklade verktyg som används för snabba bedömningar av spridning vid kemikalieolyckor och brandscenarier. De bygger ofta på analytiska lösningar eller empiriska antaganden och är utformade för att ge praktiskt stöd snarare än högupplösta beräkningar.

Ett exempel är ALOHA, utvecklat av NOAA och EPA, som används internationellt för att uppskatta spridning av giftiga gaser vid olyckor. ALOHA är i grunden uppbyggd av ett flertal olika beräkningsmoduler baserade på olika förutsättningar beroende på applikation. Vid modellering av spridning av toxiska utsläpp i atmosfäriska förhållanden nyttjar beräkningsmodellen en modifierad kombination av gaussisk och lagrangisk spridningsmodellering med komplettering från fysikaliska korrelationer [132, 133].

I Sverige används modellen Spridning Luft, som ger översiktliga konsekvensbedömningar vid utsläpp av farliga ämnen [134].

Dessa verktyg bedöms vara användbara för initial konsekvensbedömning, men har mer begränsad precision i fråga om detaljerad bedömning av utfall från komplexa scenarier, där dynamiska och kemiska processer är avgörande.

Ytterligare ett, något mer avancerat alternativ inom denna kategori är Gexcons program EFFECTS, vilket är uppbyggt av en mängd integrerade modeller för konsekvensberäkningar och som normalt används inom processindustrin för detaljerade konsekvensanalyser av brand-, explosion- och giftgasscenarier. Bland annat har Gexcon nyligen lanserat en integrerad modell till EFFECTS som ska hantera simulering av bränder i batterienergilagrar [135, 136].

- Specialiserade spridningsmodeller

Specialiserade spridningsmodeller är utvecklade för att hantera specifika scenarier där generella modeller är otillräckliga, exempelvis olyckor med farliga ämnen av en viss karaktär eller komplexa industriella processer. Dessa modeller använder ofta avancerade fysikaliska och kemiska beräkningar för att simulera spridning under specifika förhållanden.

PUMA (Plume Model for Accidental Releases) är en modell som används för att beräkna spridning av giftiga gaser vid kemikalieolyckor, med fokus på kortdistans och höga koncentrationer. LPELLO är en modell för lågtrycksutsläpp av LNG och andra kryogena vätskor, där termodynamiska effekter och marknära spridning är kritiska. Båda modellerna är exempel på verktyg som ger högre noggrannhet än generella beslutsstödsmodeller, men är begränsade till sina specifika tillämpningsområden.

I Sverige används de specialiserade spridningsmodellerna PUMA och LPELLO, utvecklade av FOI, främst inom forskning och beredskapsplanering för olyckor med giftiga gaser och kryogena vätskor. PUMA är en modell för spridning av giftiga gasmoln vid kemikalieolyckor, medan LPELLO är inriktad på lågtrycksutsläpp av LNG och andra tunga gaser. Båda har validerats mot internationella fältförsök och används för att förbättra nationell krisberedskap och riskanalys. Deras användning är dock begränsad till specifika nischade scenarier och kräver expertkompetens, vilket gör dem mindre lämpade som generella beslutsstödsverktyg [137].

Spridningsmodeller är alltså centrala verktyg för att förutsäga hur gaser, partiklar och andra föroreningar sprids i atmosfären från en utsläppskälla. De används i olika applikationer inom exempelvis miljöanalys, riskbedömning, räddningstjänst och industriell säkerhet. Vid brand i batterienergilagrar är situationen särskilt utmanande eftersom utsläppen är komplexa och transienta och kan innehålla giftiga komponenter, som exempelvis vätefluorid (HF) och organiska föreningar - ofta i kombination med värmeeffekter som påverkar plymhöjd och turbulens.

För konsekvensbedömning vid brand i litiumjonbatterier rekommenderas utifrån denna litteraturstudie en tvåstegsstrategi. Snabb initial bedömning kan med fördel göras med beslutsstödsmodeller som ALOHA eller Spridning Luft för att ge en grov konsekvensbedömning och ett fullgott planeringsunderlag i tidiga skeden eller vid situationer där detaljerad konsekvenskartläggning ej är nödvändig. För detaljerad analys av toxisk spridning och termiska effekter bedöms det fördelaktigt att nyttja mer sofistikerade CFD-modeller.

Vid analys av scenarier där endast rykande termisk rusning beaktas bör modellering ta hänsyn till densitetsförhållande mellan batterigaser och omgivning på så vis att fysikaliska förutsättningar utifrån tunggasutsläpp tas i beaktande.

Inom ramarna för denna studie lämpar sig beslutsstödsmodeller och plymmodeller väl i egenskap av generiskt applicerbara och användbara för konsekvensbedömning på en högre skala, som underlag för planering och dialog vid implementering av lösningar för batterienergilagring. I studiens parameteranalys studeras därför primärt **ALOHA**, **Spridning Luft** samt **ALOFT**. Jämförelse görs även mot ett beräkningsfall för **EFFECTS** till syfte att studera samstämmighet med övriga, något enklare, modeller.

9.2.1 Jämförelse spridningsmodeller ALOHA, Spridning Luft, ALOFT & EFFECTS

Utifrån en bedömning av enkelhet i handhavande och tillgänglighet väljs tre program ut för att undersöka hur val av programvara för spridningsmodellering påverkar resultatet – ALOHA, Spridning Luft samt ALOFT.

Källstyrka HF beräknas, utifrån grunddata redovisad i Tabell 9, till värden mellan 0,00093 och 0,023 kg/s. I Spridning Luft föreligger dock en begränsning som innebär att källstyrka måste vara minst 0,1 kg/s. Beräkningar utförs därför för källstyrka 0,1 kg/s i jämförelsen mellan programmen. Genom detta tillvägagångssätt möjliggörs jämförelse mellan spridningsmodellerna, men erhållna resultat som sådana bedöms vara att betrakta som mycket konservativa.

Övriga förutsättningar för beräkningarna väljs i enlighet med Tabell 9 och sammanfattas enligt följande:

- Väder: normalt väder, vindhastighet 5 m/s, stabilitetsklass D, temperatur 15 °C,
- Omgivning: öppet landskap.

Utfall vid andra väderförhållanden studeras även genom att beräkningar utförs för väder som teoretiskt ger längre spridning av gaser: vindhastighet 2 m/s, stabilitetsklass F, temperatur 5 °C.

Jämförelse: ALOHA och spridning i luft

Tabell 12. Jämförelse av modellering av konsekvensområden för gasformig vätefluorid i ALOHA och Spridning Luft.

Beräkningsprogram	Vind (m/s)	Stabilitetsklass	Källstyrka HF (kg/s)	Avstånd i meter till studerad koncentration av vätefluorid		
				AEGL 3, 30 min, 62 ppm	34 ppm, AEGL-2 30 min	IDLH, 30 ppm
ALOHA	5	D	0,1	191	263	282
Spridning Luft	5	D	0,1	137	207	219
ALOHA	2	F	0,1	1000	1400	1600
Spridning Luft	2	F	0,1	909	1370	1485

Beräkningsprogrammen ger vid normala väderförhållanden skillnader på mellan 27 och 39 % i avstånd där spridningsmodell Spridning Luft konsekvent ger lägre konsekvensavstånd.

Vid låg vindhastighet är skillnaden i programmen betydligt lägre, då är det endast är 2-10 % skillnad.

Jämförelse: ALOHA och EFFECTS

Det har även utförts kontrollberäkningar där resultat från modellering i ALOHA jämförs med det scenario som är redovisat för batteribrand på Gexcons hemsida, som demonstration av deras spridningsmodell EFFECTS². Indata för detta scenario har hämtats från de förutsättningar som råder vid demonstrationsexemplet.

Med motsvarande indata ger det resultatet att konsekvensavstånd erhållna från de båda modelleringsverktygen stämmer mycket väl överens med varandra. Observera att det i detta fall är urban/forest omgivning, det vill säga ej öppen mark, vilket används i övriga beräkningar.

Jämförelsen här gäller enbart normalt väder eftersom det är de förhållanden som nyttjas i den beräkning som finns redovisad på Gexcons hemsida.

Tabell 13. Jämförelse av modellering i ALOHA och EFFECTS.

Beräkningsprogram	Källstyrka HF (kg/s)	Avstånd i meter till studerad koncentration av vätefluorid			
		62 ppm, AEGL-3, 30 min	34 ppm AEGL-2 30 min	30 ppm IDLH	2 ppm ERPG-1
ALOHA	0,018	58	79		83 333
EFFECTS	0,018	50	75		80 424

De jämförande beräkningarna visar att beräkningsprogrammen ger resultat som är väldigt samstämmiga.

Jämförelse: ALOHA och ALOFT

² <https://knowledge.gexcon.com/docs/simulating-battery-fires>, nyttjad 2025-11-10.

Då ALOFT är den enda av studerade spridningsmodeller som aktivt beaktar den termiska stigningen i brandplymen ges resultat från sådan modellering i form av en plym där koncentrationen kan avläsas på olika höjder från marknivå. Modellering i ALOHA ger endast resultat i form av koncentration i marknivå. I tabellen redovisas koncentration i närheten av marknivå (cirka 5 meter höjd) samt även i centrum på brandgasplymen, d.v.s. där koncentrationen är som högst.

Tabell 14. Jämförelse av modellering i ALOHA och ALOFT (n/a redovisar när gränsvärdet inte uppnås).

Beräkningsprogram	Vind (m/s)	Stabilitetsklass	Källstyrka HF (kg/s)	Avstånd i meter till studerad koncentration av vätefluorid		
				62 ppm AEGL-3, 30 min	30 ppm IDLH	1 ppm AEGL-1, 8 timmar*
ALOHA	5	D	0,023	88	129	844
ALOFT	5	D	0,023	n/a	n/a	Höjd 50 m: 450 m Höjd 5 m: 150 m
ALOHA	2	F	0,023	445	661	6200
ALOFT	2	F	0,023	n/a	Höjd 40 m: 50 m Höjd 5 m: 30 m	Höjd 120 m: 280 m Höjd 5 m: 30 m

* AEGL-1-värde för HF är samma för alla tider från 10 minuter till 8 timmar.

Jämförande beräkningar visar att spridningsmodellering med ALOHA under normala väderförhållanden resulterar i betydligt längre avstånd än modellering med ALOFT.

Även på höjd som motsvarar centrum på brandgasplymen, i detta fall cirka 50 meters höjd vid normalt väder, är avstånd till studerad koncentration betydligt kortare än vad som ges som resultat i ALOHA-beräkningen. Avståndet är ungefär 50 % kortare i ALOFT i förhållande till ALOHA. Närmare marken, på cirka 5 meters höjd, är konsekvensavståndet cirka 1/6 enligt ALOFT i förhållande till erhållna resultat från modellering med ALOHA.

Vid väderförhållanden med låg vindhastighet blir konsekvensområdet betydligt kortare i ALOFT. I marknivå är avståndet cirka 1/20 (30 ppm) respektive 1/200 (1 ppm) i jämförelse med ALOHA. På högre höjd är förhållande mellan erhållna resultat enligt ovan 1/12 (30 ppm) respektive 1/20 (1 ppm).

Det kan misstänkas att spridningsberäkning med gaussisk spridningsmodellering, vilket till viss del ligger till grund för ALOHA:s modelleringsgrund, som inte tar hänsyn till den termiska stigningen inte är relevant när det gäller stabilt väder med låg turbulens. Vid normala eller höga vindhastigheter kan det antas att brandgaserna kommer att spädas ut till följd av turbulenseffekter på så vis att konsekvensavstånden i praktiken inte blir så långa som beräkningsprogrammet ALOHA visar.

Vid låg vindhastighet kommer den termiska stigningen i förbränningsprodukterna att medföra att brandgaserna i större utsträckning sprids vertikalt än horisontellt. Beräkningar med låg vindhastighet riskerar därmed att visa på omotiverat konservativa spridningsavstånd. Det är därför viktigt att bedöma om de långa avstånd som erhålls vid låg vindhastighet är relevanta i det aktuella fallet, eller om avståndet är för teoretiskt för att vara relevant att dimensionera utifrån.

9.2.2 Spridningsmodellering av partiklar, PM₁₀

Vid alla bränder bildas utöver farliga brandgaser också fasta partiklar (sot) som sprids med brandröken. I enlighet med resonemang i avsnitt 8 finns det ännu inget litterärt stöd för att sådana partiklar från brand i litiumjonbatterier innehar direkta och akut toxiska effekter, dock genomförs spridningsberäkningar även för denna fraktion av förbränningsprodukter som ett orienterande referensfall.

Spridning av partiklar går att modellera med beräkningsprogrammet ALOFT. Beräkningar är utförda för produktion av partiklar med 0,1 kg/kg förbränt ämne, dvs. för varje kg som brinner bildas 100 g partiklar. Beräkning utförs för effektutveckling 2,2 MW och 5,6 MW, enligt avsnitt 8.2.3.

Avstånd till koncentrationen 5 mg/m³ studeras. Detta är koncentration som motsvarar nivågränsvärde (NGV) enligt AFS 2023:14. NGV är ett hygieniskt gränsvärde för exponering under en arbetsdag, normalt 8 timmar.

Tabell 15. Spridningsberäkning genom ALOFT för konsekvensområden med hänsyn till PM₁₀.

Scenario	Vindhastighet (m/s)	Stabilitetsklass	Produktion partiklar (kg/kg)	Effektutveckling MW	Partiklar (PM ₁₀) 5 mg/m ³
1	5	D	0,1	2,2	Uppnås ej.
2	2	F	0,1	2,2	80 m höjd: 130 m 5 m höjd: 20 m
3	5	D	0,1	5,6	30 m höjd: 180 m 5 m höjd: 50 m
4	2	F	0,1	5,6	80 m höjd: 150 m 5 m höjd: 30 m

Resultat av spridningsberäkningar för partiklar visar att det vid längre tids vistelse (8 timmar) är olämpligt att vara inom cirka 50 meter från branden.

10 Parameteranalys

10.1 TRYCKAVLASTNING ENLIGT NFPA 68

Givet den indata som presenterats i avsnitt 8 genomförs inom följande avsnitt genomförs parameteranalys enligt tillvägagångssättet i NFPA 68 för att förstå inverkan av olika parametrar och få en ökad förståelse för vilka parametrar som förväntas få störst inverkan på behovet av luckor. För flera av de ingående parametrarna i beräkningarna kan standardvärden användas under givna förutsättningar.

Analysen genomförs systematiskt med användning av en standardiserad ISO 20 fot container där P_{red} ansätts till 0,2 bar-g. Grundparametrar som används i analysen är enligt tabellen nedan och baseras på det underlag som arbetats fram inom avsnitt 8.

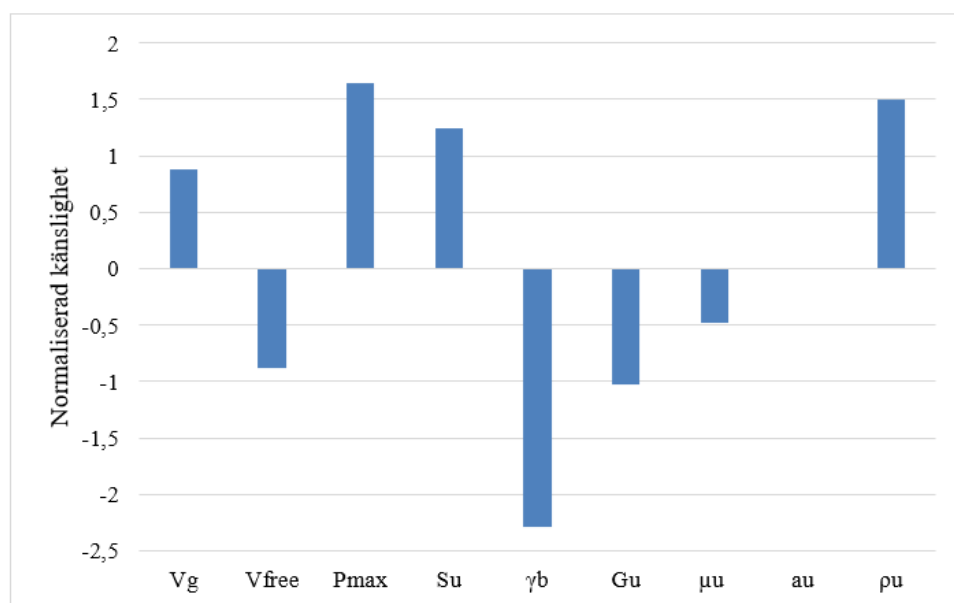
Tabell 16: Parameter som används vid analys (parametrar i fet stil utgör parametrar som varierar i parameteranalysen)

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
Volymflöde utsläpp vid off-gassing	126	L/kWh	Baseras på LFP batterier [15].
Energimängd (batteri) involverad i termisk rusning	1	kWh	Denna energimängd motsvarar en eller ett fåtal battericeller. I räkneexemplet görs förenklingen att 1 cell motsvarar 1 kWh.
Gassammansättning	18% CO, 36% CO ₂ , 32% H ₂ samt 14% icke fullständigt förbrända kolväten (delmängd av producerade VOC)	%	[76] Noterbart är att den stökiometriska koncentrationen hos denna gasblandning överstiger de 5 volym % som är en förutsättning för att kunna använda de standardvärden på p_u , y_b , μ_u , och a_u som anges i NFPA 68. För den parameteranalys som genomförs bedöms dock standardvärdena fortsatt vara användbara.
P_{red}	0,2	Bar	Övertryck som behållaren/container tål
Volym container	34,5	m ³	Standardvärde för en ISO 20 ft container. Endast 30% av volymen i container antas dock utgöra luft (V_{free}).
V_{free}, fri volym invändigt i container	30	%	Volymprocent som upptas av gas/luft blandning.
L/D	1,75	-	
D_{he}	3,4	m	
A_s	69	m ³	
S_w, förbränningshastighet	0,613	m/s	[76] Detta värde varierar även till 1,1 m/s då detta anges i tester [78].
P_{max}, maximalt övertryck	8	Bar-g	[138] Detta värde varierar även till 6.93 bar-g då detta anges inom [15].

Parameter	Värde	Enhet	Kommentar
ρ_u , densitet oförbränd gas	1,2	Kg/m ³	Standard NFPA 68
G_u , soniskt massflöde oförbränd gas	230,1	Kg/m ² -s	Standard NFPA 68
γ_b , förhållande specifik värme	1,15	-	Standard NFPA 68
μ_u , dynamisk viskositet	1.8e-5	Kg/m-s	Standard NFPA 68
a_u , ljudhastighet för aktuell gasmix	343	m/s	Standard NFPA 68
C_d , koefficient	0,7		Standard NFPA 68
V_g , volym gas som avges	0,126	m ³	

Känsligheten uttrycks för varje parameter som varierar i form av normaliserade känslighetskoefficienter. Inom den inledande delen av parameteranalysen varierades varje parameter med +1% i förhållande till de basvärden som visas i Tabell 16. Primärt var målet att studera påverkan från parametrarna V_g , S_u , $P_{\max}$ och V_{free} . Detta då en förutsättning för att kunna använda de standardiserade värdena för γ_b , G_u , μ_u , a_u och q_u enligt NFPA 68 är att den stökiometriska koncentrationen hos gasblandningen understiger 5 volym %. Det är dock långt ifrån självskrivet att gasblandningar inom ett batterienergilagrar där termisk rusning har skett alltid kommer att ha en stökiometrisk koncentration som understiger 5 volym %. Detsamma gäller den gasblandning som studeras i aktuell parameteranalys. Med denna bakgrund inkluderades även parameteranalys av standardparametrarna γ_b , G_u , μ_u , a_u och q_u .

Känsligheten hos respektive parameter redovisas nedan i Figur 10.



Figur 10: Relativ känslighet för parametrar

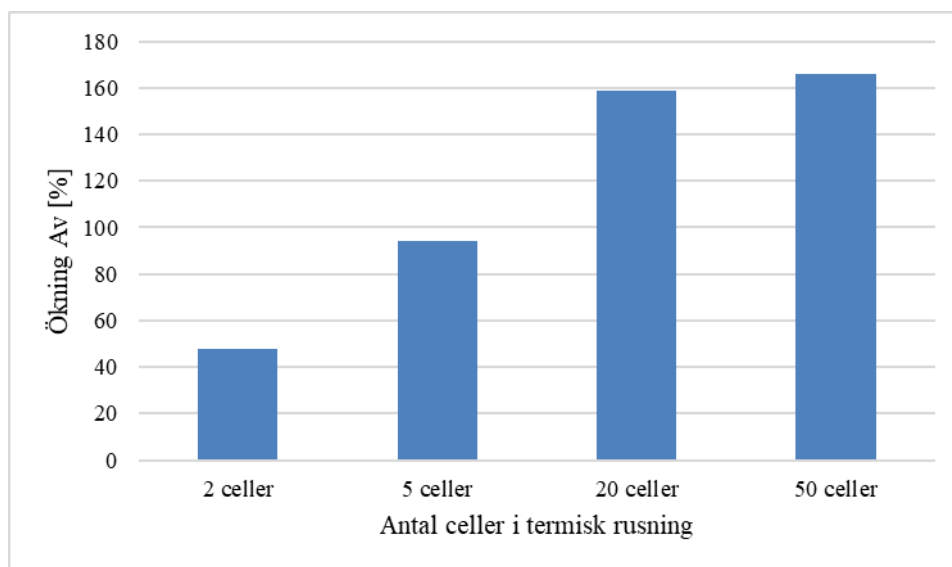
Ovanstående resultat visar att parametern γ_b har störst inverkan på resultaten. Denna parameter utgör som tidigare nämnt ett standardvärde. Litteratur tyder på att en användning av standardvärdena enligt NFPA 68 leder till en konservativ dimensionering och kan ge en initial uppfattning av behov av tryckavlastning även om den stökiometrisk koncentrationen överstiger 5 volym % [138]. För en slutlig dimensionering bör dock beräknade blandningsegenskaper beaktas för att säkerställa att standarden uppfylls. Dessa värden är dock ofta svåra att nå vilket belyser en viss del av den problematiken som finns när det gäller att dimensionera batterienergilagrar enligt NFPA 68.

Resultaten i figuren ovan visar att V_g och V_{free} har ungefär lika stor inverkan.

V_g beror dels av volymflödet av gas från respektive cell vid termisk rusning, dels av hur många celler som involveras i termisk rusning. Nedan görs en mer praktisk redovisning av inverkan på storlek på lucka givet att V_g ökas till 200%, 500% samt 2000%. Dessa ökningarna kan tyckas omfattande men motsvarar exempelvis att antal celler som involveras i termisk rusning går från en till två, fem samt tjugo.

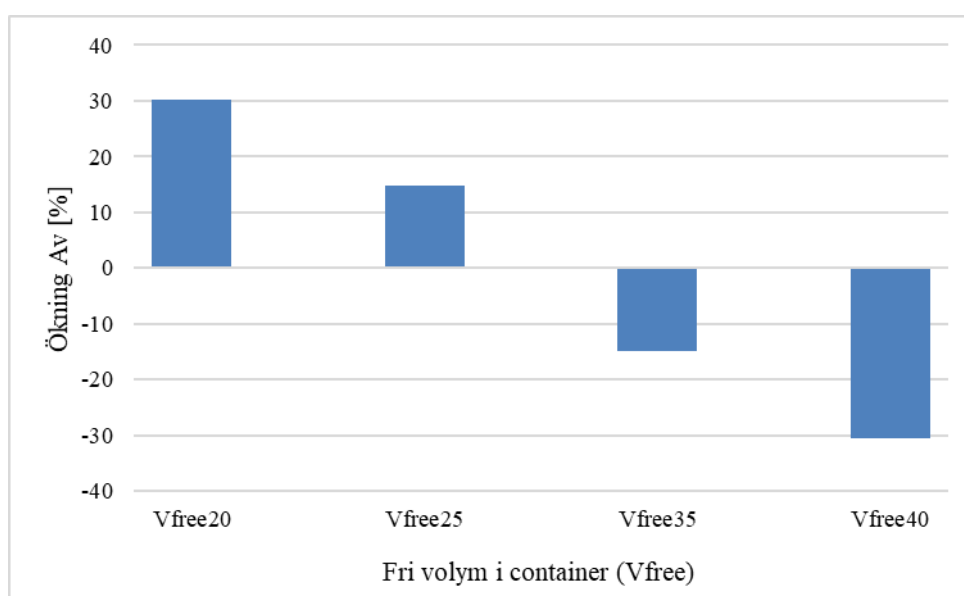
Figur 11 nedan visar procentuell ökning av tryckavlastande ventilationsarea, A_v , givet antal celler som går in i termisk rusning. Det är tydligt att ökning av A_v inte sker linjärt. Den procentuella ökningen av storlek på lucka minskar när fler celler går in i termisk rusning. Detta ger en indikation på att parametrar som volymflöde vid utsläpp av gas samt hur många celler som går in i termisk rusning kan ha en tydlig inverkan på storleken på lucka men att det automatisk inte behöver vara så, utan att detta varierar utifrån definierat scenario.

För att ha en förståelse för robustheten i systemen är det av stor vikt att indata kopplat till hur många celler som går in i termisk rusning framgår samt volymflödet som förutsätts ske från respektive cell. Baserat på erfarenhet samt konstaterande utifrån genomförd workshop (avsnitt 6) är det ofta svårt att få fram tydliga indata gällande denna parameter. Som visas i Figur 11 kan exempelvis behovet av storlek på lucka öka nästan 100% givet att 5 celler i stället för 2 celler går in i termisk rusning.



Figur 11: Ökning A_v (storlek lucka) i förhållande till om endast en cell involveras i termisk rusning.

Parametern V_{free} beror av hur stor del av inkapsling som utgörs av gas och luftblandning (fri volym). I Figur 12 varierar den fria volymen (V_{free}). Procentuell skillnad av storlek på lucka i förhållande till grundfallet, som utgörs av en container med 30 % fri volym, studeras. Den fria volymen antingen ökas eller minskar med 5 alternativt 10 procentenheter. Resultaten visar att en minskning av den fria volymen motsvarande 10 procentenheter leder till ett behov av 30 % större lucka. Likväl som för V_g är det således av stor vikt att antagandet under dimensioneringen gällande fri volym framgår. Detta för att anläggningsägare och verksamheter ska ha en förståelse för robustheten i de system som installeras. Det är även viktigt att denna parameter ej ändras till följd av tillkommande installationer över tid.



Figur 12: Ökning Av (storlek lucka) i förhållande till fri volym inom container.

Vissa data pekar på en betydligt högre förbränningshastighet (S_u) vid förhöjda temperaturer [78]. Med denna bakgrund genomfördes beräkningar av den procentuella inverkan en ökad S_u från grundvärdet 0,613 m/s och det högre värdet på 1,1 m/s. Givet grundvärden ger en ökad S_u att A_v ökar med nästan 110%.

Vissa data pekar även på en lägre P_{max} . Med denna bakgrund genomfördes även beräkningar av den procentuella inverkan från ett minskat värde för P_{max} från grundvärdet 8 bar-g och det lägre värde 6.93 bar-g. Givet grundvärden ger en minskad P_{max} att A_v minskar med cirka 22%.

10.1.1 Slutsats Parameteranalys tryckavlastning enligt NFPA 68

Analysen visar att parametrarna har olika mycket inverkan på slutresultatet och att parametern γ_b är den med störst inverkan i grundfallet. γ_b kan väljas som en standardparameter i NFPA under vissa förutsättningar och det är därför viktigt att det finns transparens i redovisningen av dimensioneringen, detta gäller oavsett om dimensioneringen sker enligt föreslagna beräkningsgångar eller om det sker enligt s.k. *Performance-based design*. Dimensioneringen behöver också utgå från den senaste tillgängliga data gällande explosionsegenskaper eftersom utformningen av batterienergianläggningar och batterierna däri är under stark utveckling.

10.2 SPRIDNING AV TOXISKA FÖRBRÄNNINGSPRODUKTER I LUFT

Utifrån de indata som definierats i avsnitt 8 genomförs nedan en jämförelse av hur olika indataparametrar påverkar resultatet i form av konsekvensavstånd för gasformig vätefluorid respektive VOC. Beräkningarna är i dessa fall utförda med spridningsmodellen ALOHA.

Vätefluorid

Beräkningar är utförda med olika källstyrka av vätefluorid och varierande väderförhållanden.

Tabell 17. Parameteranalys för konsekvensberäkningar för HF, modellerat med spridningsmodell ALOHA.

Scenario	Källstyrka HF (kg/s)	Vind [m/s]	Stabilitetsklass	System- kapacitet [MWh]	HF mg/Wh	Avstånd i meter till respektive koncentration av vätefluorid.		
						62 ppm, AEGL- 3, 30 min	30 ppm IDLH	1 ppm AEGL- 1, 8 tim
1	0,00093	5	D	2	20	17	25	143
2	0,00463	5	D	2	100	39	56	338
3	0,0093	5	D	2	200	56	81	499
4	0,0023	5	D	5	20	27	39	231
5	0,012	5	D	5	100	63	92	577
6	0,023	5	D	5	200	88	129	844
7	0,00093	2	F	2	20	85	122	736
8	0,00463	2	F	2	100	192	279	1900
9	0,0093	2	F	2	200	276	404	3100
10	0,0023	2	F	5	20	134	194	1200
11	0,012	2	F	5	100	315	464	3700
12	0,023	2	F	5	200	445	661	6200

Källstyrka HF: Scenario 1, 2 och 3 baseras på samma systemkapacitet för batterienergilager (2 MWh). Varierad parameter mellan dessa scenarion är därmed hur mycket HF som bildas per Wh.

Konsekvensområdet varierar utifrån detta ungefär med en faktor 3 mellan lägsta och högsta resulterande avstånd. Denna parameter bedöms därmed ha en avgörande påverkan på konsekvensavståndet som erhålls i beräkningen.

I scenario 4, 5 och 6 är det en högre total energimängd (5 MWh). Avstånden varierar med cirka faktor 3 även för dessa tre scenarier.

Källstyrkan är således en viktig parameter för att erhålla ett bra resultat i beräkningarna och därmed i förlängningen även analysen.

Vid motsvarande kontroll för väder som ger längre gasspridning, dvs. scenario 7-12, är det också där cirka faktor 3 som skiljer.

Vindhastighet/stabilitetsklass: Scenario 1 och 7 har samma förhållanden, förutom vädret. Samma jämförelse görs för övriga scenarier som har samma förhållanden, utöver väder. Skillnaden i avstånd är cirka faktor 5.

Detta innebär att väderförhållanden är mycket viktiga att beakta i beräkningarna. Det är dock mer komplext att beakta väderförhållanden vid beräkningar för spridning av farliga ämnen som rör sig med brandgaser. Normalt i samband med utsläpp av giftiga ämnen i gasform blir det längre konsekvensavstånd vid lägre vindhastigheter än vid högre vindhastigheter. Detta beror på att den låga turbulensen i luften medför att gaserna sprids i sidled i större utsträckning och blandas med luft i mindre utsträckning. Då de farliga ämnena sprids med de varma brandgaserna kommer den låga vindhastigheten snarare bidra till att ämnena sprids med brandgaserna uppåt i stället för främst i sidled. Detta resulterar i mindre påverkan på personer i marknivå ju lägre vindhastighet som råder. Beräkningar i beräkningsprogram som inte tar hänsyn till brandgasernas termiska stigmat ger därmed i många fall långa konsekvensavstånd.

VOC

VOC (Volatile Organic Compounds) representeras i beräkningarna av bensen.

Tabell 18. Parameteranalys för konsekvensberäkningar för VOC (representerat av bensen), modellerat med spridningsmodell ALOHA.

Scenario	Källstyrka VOC (g/s)	Effektutveckling (MW)	Produktion bensen (g/kg)	Avstånd i meter till respektive koncentration av VOC (bensen).		
				5600 ppm AEGL-3, 30 min*	500 ppm IDLH *	9 ppm AEGL-1
1 (5 m/s)	0,71	2	10	11	11	32
2 (5 m/s)	1,42	2	20	11	11	45
3 (5 m/s)	1,79	5	10	11	11	52
4 (5 m/s)	3,58	5	20	11	11	73
5 (2 m/s)	0,71	2	10	11	11	82
6 (2 m/s)	1,42	2	20	11	11	117
7 (2 m/s)	1,79	5	10	11	11	133
8 (2 m/s)	3,58	5	20	11	18	193

*Beräkningsmässiga begränsningar medför att erhållna resultat för koncentration på mycket korta avstånd från utsläppskällan ej är tillförlitliga, spridningsmodellen ALOHA nyttjar därför ett "default" minsta avstånd vid redovisning av resultat nära denna gräns.

Beräkningarna visar att konsekvensområden för VOC är betydligt kortare än konsekvensområden för vätefluorid när motsvarande gränsvärden används.

Slutsatser som kan dras av analysen där olika parametrars påverkan på konsekvensområdets utbredning studerats är att det är betydelsefullt att få en bättre säkerhet i indataparametern källstyrka HF.

Brandens varaktighet har koppling till HF-produktionen per tidsenhet, under förutsättning att ingen släckinsats antas ske.

En brand som är mindre intensiv och därmed pågår under en längre tid kommer att ha en lägre källstyrka av HF. Detta innebär kortare konsekvensområde. Personer inom ett mindre område påverkas därmed, men under en längre tid vilket innebär att gränsvärden som ger skada vid längre tids exponering, d.v.s. lägre koncentrationer, är mer relevanta att beakta.

På motsvarande sätt blir en brand som pågår under en kortare tid mer intensiv och har en högre källstyrka och därmed ett större konsekvensområde. Tiden personer utsätts för brandgaserna blir därmed kortare och gränsvärden som baseras på lång exponeringstid blir mindre relevanta att ge för stor betydelse.

Det bör därför sällan vara relevant att beakta de längsta konsekvensavstånden och samtidigt fokusera på låga gränsvärden.

Väderförhållandets påverkan är också viktigt att beakta, men är också en fråga avseende beräkningsprogrammets relevans vid brand, dvs. när plymlyft måste beaktas för att inte erhålla alltför konservativa resultat. Beräkningar genomförda av EPRI i spridningsmodellen SCICHEM [129] visar på betydligt kortare konsekvensavstånd med ungefär motsvarande indata som de som nyttjats i denna parameteranalys. I beräkningsprogrammet SCICHEM beaktas dock brandgasernas termiska stigkraft. Det syns motsvarande avsevärda skillnad vid användning av ALOFT vilket är redovisat i avsnitt 9.2 ovan. Med hänsyn till de varierande resultaten som erhålls beroende på beräkningsprogram är det lämpligt att fokusera framtida forskning på hur hantering av den termiska stigkraften beaktas på mest relevanta sätt. Känslighetsanalysen visar vidare att val av parametrar och indata ger betydande utfall på resultatet.

10.2.1 Slutsats Parameteranalys Spridning av toxiska förbränningsprodukter

Analys genom spridningsberäkningar visar på väldigt varierande konsekvensavstånd beroende på valda indata, beräkningsprogram och spridningsmodell. Källstyrka, väderförhållanden samt beaktande av plymlyft påverkar alla i stor utsträckning erhållna resultat. Generellt ger beräkningar betydligt längre riskavstånd än vad som observerats vid verkliga händelser. Detta indikerar att det finns risk att orimligt stora riskområden antas kunna uppstå vid en brand. Kombination av konservativa antaganden i indata, konservativa beräkningsmodeller, grova förenklande antagande vid återgivning av verkliga förhållanden och antagande om begränsad eller ingen skadebegränsande barriär (exempelvis släckinsats) riskerar att skyddsavstånd kring batterienergilagrar blir längre än nödvändigt.

11 Jämförelse med inträffade händelser

Tabell 6I avsnitt 5, Tabell 6 visas att direkta konsekvenser av explosion är att förvänta i den direkta närheten av en händelse, även om skyddssystem som tryckavlastning eller nödventilation inte funnits närvarande. Det kan vara så att svagheter i containrar har fungerat som tryckavlastningar och på så sätt gett samma effekt som om de hade varit försedda med faktiska öppningar för tryckavlastning. Vid flera händelser har det även skett ingrepp vid räddningsinsats som påverkat containerns täthet och gasomblandning inuti volymen, ex. genom öppning av containerdörrar. Sådana omständigheter kan även de ha resulterat i fysiska förhållanden där erhållen öppenhet haft motsvarande funktion som en tryckavlastning. Konsekvenserna vid dessa inträffade händelser stämmer överens med konsekvenser som kan beräknas enligt tillgängliga och studerade standarder (avsnitt 6) när en tryckavlastning finns och är korrekt dimensionerad. Att detta stämmer överens kan därför tänkas vara en följd av tillfälligheter som gjorde att de aktuella volymerna faktiskt tryckavlastades, och att denna tryckavlastning skedde riktat i en specifik riktning.

På motsvarande vis kan det konstateras att konsekvensområden för spridning av toxiska förbränningsprodukter utifrån studerade händelser i avsnitt 5 sällan sträcker sig längre än till brandens direkta närhet (10-20 meter). Inget fall har kunnat identifieras där toxiska halter av förbränningsprodukter påverkat eller riskerat att påverka omgivningen negativt. Erhållna resultat från spridningsmodellering tyder på att sådana verktyg för konsekvensbedömning tenderar att generera mycket konservativa resultat i de fall termisk stigkraft inte beaktas. Detta kan bero på en rad olika faktorer, både relaterat till nyttjade indata och till de grova förenklingar av verklighet som studerade spridningsmodeller baseras på. I avsnitt 10 kan det tydligt ses att parametrar i form av källstyrka, total omfattning av involverade batterier samt väderförhållanden ger stora utslag på erhållet konsekvensavstånd.

Studerade spridningsmodeller baseras på relativt grova förenklingar av verkliga fysiska och kemiska förutsättningar. En sådan förutsättning som tidigare berörts är avsaknaden av hänsyn till termisk stigkraft i modeller likt ALOHA. En annan förenkling är avsaknad av hänsyn till kemiska följdreaktioner samt adsorption hos förbränningsprodukter. Dessa tillkortakommanden i verklighetsåtergivning kan utgöra en del i förklaringen till varför sådana enklare beslutsstödsmodeller tenderar att generera mycket konservativa resultat. Förenklingarna är dock i många situationer en förutsättning för nyttjande i indikativt syfte. Vid nyttjande av sådana enklare fysikaliska spridningsmodeller ska erhållna konsekvensavstånd därmed endast tas som indikativa riktvärden, och antaganden om indataparametrar bör ej göras med alltför hög konservativ hållning då det riskerar att resultera i "kaka på kaka" effekter.

12 Diskussion

Det är tydligt från resultaten i avsnitt 10 att flera parametrar kan ha stor inverkan på behov av luckor för tryckavlastning. V_g och V_{free} har visat sig vara två värden som har låg inverkan i förhållande till andra parametrar. Trots det är det tydligt att även V_g och V_{free} kan ha en stor inverkan på storlek på luckor, givet de antagna grundvärdena. Det är således av stor vikt att antaganden under dimensioneringen gällande fri volym, antal celler som går in i termisk rusning samt volymflöde vid "off-gassing" framgår. Detta för att anläggningsägare eller verksamhet ska ha en möjlighet att få en förståelse för robustheten i de system som installeras. Baserat på erfarenhet är dessa typer av värden, och indata för beräkningar enligt NFPA 68 och NFPA 69, ofta svåra att få fram. Detta leder till att det som tredje part är problematiskt att utvärdera robustheten i de system som installeras.

Givet de osäkerheter, ex. indata vid dimensionering enligt NFPA 68, som har tydliggjorts inom ramarna för detta arbete är det viktigt att ett holistiskt synsätt används vid implementering av batterienergilagring och att det senaste underlaget som finns används. Exempelvis har NFPA 855 kommit ut som en nyutgåva under arbetets gång (edition 2026) där tidigare version har angett att ett batterienergilagring antingen behöver en tryckavlastning enligt NFPA 68 eller ventilation enligt NFPA 69. I nyutgåvan anges att BESS enheter ska förses med nödventilation enligt NFPA 69 och att en utvärdering ska ske enligt NFPA 68 för att säkerställa om tryckavlastning behövs i det fallet en antändning sker av gaser som inte ventileras ut (*partial volume*). I tidigare utgåvan från 2023 fanns i stället möjligheten att välja mellan tryckavlastning och nödventilation. Den proaktiva nödventilationen har nu fått en större betydelse för skyddsprincipen. Det är dock viktigt att skyddet inte baseras på enstaka barriärer eller skyddsmetoder utan det finns en vinning i att använda kombinationer av skydd så som tryckavlastning som redovisas grundligt i denna rapport men även nödventilation och skyddsavstånd är relevanta åtgärder som kan fungera som redundans och komplettera varandra för att ett fullgott skydd ska erhållas. Även andra skyddsformer kan vara aktuella.

En frågeställning som kan vara värd att beakta är huruvida batterienergilagring bör utformas att helt uppfylla NFPA eller SS-EN standard avseende tryckavlastning. Givet de många osäkerheter som finns i dimensionering av tryckavlastning (vilket är tydliggjort i resultaten i denna rapport) är det trots allt en ökad säkerhet att installera luckor och/eller mekanisk ventilation även om krav enligt standarder inte förväntas kunna uppfyllas under hela förloppet. För att trots allt möjliggöra en implementering av batterienergilagring kan en kombination av aktiva system (tryckavlastning och/eller mekanisk ventilation) i kombination med skyddsavstånd vara aktuellt, just så som det pekas på i 2026-utgåvan av NFPA 855. Omfattning av installerade skyddssystem och deras syfte behöver dock tydliggöras beroende på rådande förutsättningar i enskilda fall. Beroende på avstånd till, och omfattning av, intilliggande skyddsvärden och möjlighet till räddningsinsats kan i många fall skyddsavstånd vara en åtgärd som på ett kostnadseffektivt sätt medger acceptabla säkerhetsnivåer.

En annan svårighet är även antagande kring när deflagration sker. I många fall vid termisk rusning kan antändning komma att ske relativt tidigt då termisk rusning i sig utgör en möjlig tändkälla. Då många batterienergilagrar har integrerade släcksystem (ex. aerosol) installerade förväntas således den initiala tändkällan släckas om denna är extern i förhållande till batterierna. Gassläcksystem eller aerosoler verkar dock inte för att stoppa termisk rusning, och således kan termisk rusning fortsätta och även sprida sig till närliggande flera celler. Givet den ”off-gassing” som sker fortsätter således brännbara gaser att samlas inom containern. Att endast ha tryckavlastning installerat vid denna typ av händelse är problematiskt. Det är svårt att från utsidan få information kring om explosionsrisk finns. Risken finns därför att dörrar öppnas manuellt och värdet av den tryckavlastning som finns i tak försvinner. Liknande händelseutveckling, där räddningstjänst öppnar dörrar, och det leder till explosion, skedde exempelvis vid McMicken olyckan.

Att kunna avläsa situationen på insidan av en container under (eller efter) rusning kan vara mycket användbart för att bedöma när en insats kan genomföras på ett säkert sätt.

Gällande genomförda analyser för konsekvensområden erhållna genom modellering för spridning av toxiska förbränningsprodukter kan det konstateras att parametrar innefattande källstyrka, väderförhållanden och beaktande av plymverkan har stor påverkan på erhållna resultat. Även brandförloppet som sådant, avseende effektutveckling och varaktighet har påvisats ha påverkan på utfallet, och kan så också tänkas styra agerande och skadebedömning vid inträffande av olyckshändelse. En mer intensiv brand med hög effektutveckling kommer naturligt innebära större plymlyft till följd av ökad termik, och det är därför mindre sannolikhet för direkt toxisk påverkan på personer i marknivå.

En mer lågintensiv brand som inte har så hög effektutveckling kan på motsatt sätt ge ett mindre plymlyft och en större påverkan på personer på marken. Brand kan därmed orsaka större problem för omgivningen vid lägre intensitet, åtminstone om man bortser från i brandens direkta närhet. Det är å andra sidan inte säkert att den lågintensiva branden ger en värre risksituation för omgivningen eftersom den utifrån den mindre omfattningen bör vara lättare att hantera (begränsa eller släcka) och därmed begränsas även omgivningspåverkan till följd av det. Sett till dessa perspektiv kan det konstateras att det är många faktorer som är nödvändiga att beakta vid studie av lämplig placering och skydd för batterienergilagring, vilket gör det svårt att ansätta generella rekommendationer.

Baserat på genomförd studie av inträffade händelser och resulterande konsekvenser avseende spridning av toxiska förbränningsprodukter kan det konstateras att risken för skadeverkan på tredje man från toxiska förbränningsprodukter till synes inte är större än för andra bränder. Detta talar i sin tur vidare för att vidtagande av långtgående eller fördyrande åtgärder till skydd mot sådan spridning ej kan anses motiverat utifrån ett kostnads-nyttoperspektiv. Däremot bedöms kännedom om konsekvensen som väsentlig vid dialog mellan anläggningsägare och reglerande eller tillsynande myndighet.

Inverkan av plymlyft och termisk stigmat i genererade förbränningsprodukter samverkar även med rådande väderförhållanden. Detta återspeglas tydligt som en svaghet i flera av de studerade spridningsmodellerna. Vid utsläpp av giftiga gaser ger beräkningsmodeller ofta längre konsekvensavstånd vid låg vindhastighet, eftersom begränsad turbulens minskar luftinblandning och spridning i horisontalled. När utsläppet sker tillsammans med varma brandgaser förändras dock spridningsmönstret. Den termiska stigkraften hos brandgaserna medför att ämnena i större utsträckning transporteras uppåt snarare än horisontellt, vilket i praktiken reducerar exponeringen för personer på marknivå vid svaga vindar. Beräkningsprogram som inte beaktar denna vertikala transport riskerar därför att överskatta konsekvensavståndet, något som syns tydligt vid jämförelse av spridningsmodellerna ALOHA och ALOFT.

Ytterligare en faktor som begränsar de enklare fysikaliska, gaussiska eller lagrangiska modellerna är avsaknaden av hänsyn till kemiska reaktioner i förbränningsprodukterna, samt mellan förbränningsprodukterna och omgivande atmosfär. Dessa fenomen bedöms med stor sannolikhet vara en avgörande faktor till varför uppmätta luftkvalitetsdata vid inträffade händelser inte i något fall indikerar toxiska nivåer mer än i brands omedelbara närhet. Problematiken åskådliggörs tydligt vid studie genom spridningsmodellering som ej tar dessa reaktioner i beaktande. Vid konsekvensbedömning med hjälp av sådana indikeras väsentligt större konsekvensområden, om än mycket varierande beroende på vald modell och indata. Benägenhet för kemisk reaktivitet bedöms vidare vara särskilt relevant att beakta vid studie av spridning av högreaktiva föreningar så som gasformig vätefluorid, då denna kemiska förening i enlighet med tidigare konstaterat är mycket reaktiv och med lätthet både reagerar kemiskt samt adsorberas till kringliggande partiklar och ytor. Detsamma gäller flertalet av de toxiska förbränningsprodukter som tidigare redogjorts för i avsnitt 8 där exempelvis HCl, NO_x, SO₂, och även VOC, HCN och CO i varierande omfattning kan anses vara reaktiva eller mycket reaktiva i förhållande till omgivning, och då särskilt i situationer då dessa produkter frigörs vid förbränning under höga temperaturer. Med anledning av detta bedöms det som högst relevant att söka modeller för konsekvensbedömning som både hanterar inverkan av plymlyft och termisk stigmat och frigjorda förbränningsprodukters reaktivitet.

Utöver ovan kan det även tilläggas att värdering av konsekvensområden för förhållanden med lägre gränsvärden och längre exponeringstider, ex. AEGL-1 8 tim, bör ske med försiktighet om dessa inte beaktar förbränningsprodukternas reaktivitet och benägenhet till adsorption på partiklar och ytor. Vid spridning och dispersion över så stora avstånd som erhålls vid studie av koncentrationer för långtidsverkande effekt bedöms det som sannolikt att en större del av de toxiska förbränningsprodukterna under transport och dispersion hunnit reagera till mindre toxiska kemiska föreningar. Vid konsekvensbedömning bedöms därmed toxiska nivåer utifrån AEGL-3, 30 min eller IDLH vara rimliga att nyttja som gränsvärden.

Ytterligare en aspekt som bör belysas är möjligheten till påverkan på erhållet resultat om endast gasproduktion från "off-gassing" hade studerats. Detta scenario inkluderades ej i den genomförda studien, men det kan tänkas att

spridningsmönster för sådant utsläpp skulle kunna generera andra resultat än de erhållna. En rykande termisk rusning kan generera batterigaser, med flera toxiska beståndsdelar, vid en väsentligt lägre temperatur än en flammande brand. Detta medför då i sin tur att de termiska krafterna är väsentligt lägre. Vid låga reaktionstemperaturer bildas även en större andel tyngre molekyler (exempelvis genom nedbrytning och avkokning av elektrolyt), vilka normalt i större utsträckning kan ha densitet högre än omgivande luft. Ett sådant utsläpp kan därmed tänkas bete sig väsentligt annorlunda vid jämförelse med produkter från flammande förbränning.

Utifrån EPRI:s kunskapssammanställning i *Lessons Learned from Past Failures Around the World* [42] konstateras det dock att en högre laddningsgrad i litiumjonbatterier normalt medför en större sannolikhet för transition från rykande termisk rusning till flammande förbränning. Detta till följd av den större energimängd som frigörs vid reaktion, och då även en kraftigare uppvärmning vilket i sig kan tjäna som tändkälla för producerade batterigaser. I ett större kommersiellt batterienergilager kan det normalt antas att driftfönster för laddningsgrad styrs till någonstans mellan 65-85 % för att erhålla god lagringskapacitet i kombination med gynnsamma driftförhållanden för batterierna. Vid sådana nivåer av laddning kan det antas vara högst sannolikt att en initialt rykande termisk rusning eskalerar till flammande förbränning, även utan förekomst av externa tändkällor.

Genomförd studie har utförts utifrån antaganden baserade på grova förenklingar av verkliga omständigheter. Detaljer så som variation i grunddata beroende på förekommande batterityp, batterikemi, laddningsgrad och omgivande förhållanden i övrigt har inte studerats i detalj. Detta är ett medvetet val, till syfte att utvärdera tillgängliga metoder för konsekvensbedömning utifrån mer generiska principer. Sådant angreppssätt har nyttjats för att visa på vilka parametrar som har störst inverkan på erhållen konsekvensbedömning samt hur studerade metoder för bedömning hanterar de osäkerheter som normalt förekommer i tidiga skeden av planering och projektering för installation av batterienergilager med litiumjonbatterier som energibärare. Genom att i sådana skeden utgå från dataunderlag av mer generisk karaktär kan en indikativ bedömning av potentiella konsekvensområden erhållas som underlag för val av placering, planering och i dialog med intressenter. Detta förhållningssätt bedöms uppmuntra till en nyanserad dialog kring risker för omgivning och bedöms även kunna tjäna ett syfte som kostnadseffektivt sätt att utvärdera specifika applikationer. Det ska dock tilläggas att indikationer både utifrån studerade olyckshändelser, samt utfall från teoretiska förenklade beräkningsförfaranden redovisade i denna rapport tyder på att konsekvensområden avseende batterigasexplosion och spridning av toxiska förbränningsprodukter är relativt små. Baserat på detta konstaterande bedöms det i normalfallet inte erfordras några omfattande utredningar eller fördjupade studier avseende risk för påverkan på omgivningen, om inte specifika omständigheter råder (ex. avseende närliggande infrastruktur, känsliga individer, placering mycket nära eller inom bebyggelse för stadigvarande vistelse etc.).

Metoder för konsekvensbedömning samt information om normalt dimensionerande påverkansparametrar kan även tänkas vara till nytta under en anläggnings driftsfas, i samband med exploatering av omgivande fastigheter eller vid tillsynsärenden från myndigheter.

13 Slutsatser

Studien visar att konsekvensbedömning avseende explosion och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand i batterienergilagrar med litiumjonbatterier präglas av betydande osäkerheter, både avseende indata och metodval. Trots detta kan ett antal centrala slutsatser dras.

Begränsning av konsekvensområde kan erhållas genom deflagrationsskydd.

Deflagrationer har förekommit i flera inträffade händelser och har då orsakat omfattande skador på den eller de containrar som varit direkt involverade i olyckan. Kastzoner upp till 25 meter har konstaterats i ett antal fall. Avsaknad av korrekt dimensionerad tryckavlastning är en återkommande faktor vid dessa olyckor.

Konsekvensområden från såväl studerade händelser och beräkningar för utslående flammor vid deflagration tyder på relativt begränsat skadeområde, <30 meter.

Utifrån genomförd studie bör tryckavlastning dimensionerad baserat på bästa tillgängliga dataunderlag samt enligt standardiserat tillvägagångssätt, exempelvis NFPA 68 eller SS EN 14994 betraktas som en grundläggande säkerhetsbarriär för storskaliga batterienergilagrar. Notera dock att behov och utförande av tryckavlastning bör utgå från specifika förutsättningar.

Arbetet har visat att parametrar kopplade till gasernas förbränningsegenskaper har störst inverkan för åtgärder kopplat till risk för deflagration samt hur stor gasproduktionen är. Osäkerheterna kring dessa parametrar är signifikanta och bör hanteras genom en transparens kring valda värden presenteras av den som designat skyddssystemet/-en och att valet av värden utgår från det senaste som sker inom forskning på området och faktiska tester.

Spridning av toxiska förbränningsprodukter är i praktiken lokalt begränsad

Erfarenheter från studerade händelser visar att skadliga halter i form av toxiska förbränningsprodukter normalt endast uppstår inom ungefär 10–20 meter från brandkällan. Samtidigt kan konservativa spridningsmodeller ge teoretiska konsekvensavstånd på hundratals meter. Detta understryker behovet av att kombinera modellerade resultat med lärdomar från inträffade händelser för att undvika överdrivna skyddsåtgärder och att vid nyttjande av spridningsmodellering använda modeller som beaktar fysikaliska fenomen (ex. termisk stigning) i så hög utsträckning som möjligt.

Den stora skillnaden i återgivning av verkliga förhållanden innebär att enklare fysikaliska beslutsstödsmodeller ofta ger konservativa resultat. Dessa förenklingar är dock i många fall en nödvändighet för att möjliggöra indikativt nyttjande och kostnadseffektiva beslutsprocesser i tidiga skeden av planering och vid dialog mellan anläggningsägare och reglerande eller tillsynande myndighet i de fall sådan utredning krävs. Konsekvensavstånd som erhålls från sådana fysikaliska spridningsmodeller bör därför betraktas som riktvärden snarare än exakta prognoser.

Risken för att toxiska förbränningsprodukter skadar tredje man bedöms dock utifrån studiens resultat inte vara väsentligt större än vid andra bränder, vilket gör kostsamma extra skyddsåtgärder omotiverade. Kunskap om konsekvenserna bedöms dock ändå viktig i dialogen med myndigheter.

Kombination av skyddsåtgärder för att möta upp mot osäkerhet i dimensionerande grunddata

För att erhålla ett bättre skydd mot oacceptabla konsekvenser nyttjas med fördel kombinationer av skyddsåtgärder med verkan både som sannolikhetsreducerande och konsekvensbegränsande. För skydd mot explosion kan därför standardiserade konsekvensreducerande metoder i form av tryckavlastning eller deflagrationsskydd med fördel nyttjas vid dimensionering, i kombination med sannolikhetsreducerande åtgärder som mekanisk ventilation.

För risker förknippade med spridning av toxiska förbränningsprodukter kan dessa med fördel hanteras genom att kombinera sannolikhetsreducerande åtgärder (BMS, drift och underhåll etc.) med en planering av anläggning som i sig verkar konsekvensbegränsande genom skyddsavstånd till kringliggande skyddsvärden. Baserat på studerade utfall från inträffade händelser, samt spridningsberäkningar vid hänsyn taget till termisk stigkraft kan det konstateras att nödvändiga skyddsavstånd normalt är begränsade till anläggningens närområde, ca <30 meter.

Nyttjande av generiska beräkningsunderlag är nödvändigt och kostnadseffektivt i tidiga skeden

Schablonvärden behöver kunna ansättas för sådan grunddata som vid tidiga skeden av planering och bedömning normalt är mycket osäkra. Detta omfattar exempelvis producerad gasvolym vid termisk rusning eller brand och gassammansättning vid sådana händelser. Nyttjande av sådana generiska antaganden möjliggör kostnadseffektiva indikativa analyser, men måste vid behov kompletteras med känslighetsanalyser och tydlig dokumentation av antaganden. Förekommer god marginal i form av exempelvis skyddsavstånd till kringliggande skyddsvärden bör omfattning och behov av känslighetsanalys och mer detaljerad eller avancerad analys kunna minska. Punktvärden enligt tabellerat i kapitel 8 bedöms kunna utgöra grund för bedömning av konsekvens innan detaljutformning är känd.

14 Vidare arbete

Genomförd studie har begränsats till att undersöka metoder för konsekvensbedömning vid explosion respektive spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand för storskaliga energilagringssystem med litiumjonbatterier som energibärare, och utförda som fristående enheter utomhus. För att möta den växande efterfrågan på lösningar för lagring av elektrisk energi behövs fortsatt arbete inom flera områden och applikationer. Detta för att skapa ett bättre underlag för välgrundade beslut om risker för både allmänheten och insatspersonal vid installation av olika omfattning och karaktär.

Storleken hos de studerade systemen relaterar till typisk användning av batterienergilagring i form av stödtjänster till elnät och eldistributionsinfrastruktur, kommersiella elproduktionsanläggningar och storskalig industriell tillämpning. Dock finns många andra tillämpningsområden för energilagringsteknik i litiumjonbatterier, exempelvis i form av mindre installationer, så kallade "villabatterier", V2X-system eller mellanstora installationer i form av exempelvis gemensamhetsanläggningar tillhörande flerbostadshus, eller nödkraftsinstallationer (UPS:er). Alla dessa olika applikationer och skalor medför en variation i energilagrets användning, förutsättningar för driftförhållanden samt placering i förhållande till skyddsvärden. Utmaningarna kan därmed tänkas vara lika många som applikationerna.

I den genomförda studien har huvudsakligt fokus dessutom legat på fristående system och effekter från placering inom byggnad har ej studerats. Vid invändig placering förändras den potentiella skadesituationen drastiskt och utfall som exempelvis påverkan på byggnadselement och -stomme behöver beaktas i större utsträckning. Även risk för spridning av toxiska och brandfarliga batterigaser eller förbränningsprodukter inom byggnad bör studeras mer ingående.

Då den genomförda studien utförts baserat på grunddata extraherade ur en omfattande litteraturstudie har enskilda installationer och dimensionering av skyddssystem inte studerats i ett validerande syfte. Sådana studier hade dock varit av värde, för att ta ytterligare ett steg mot att ensa teoretiska standardiserade modeller för konsekvensbedömning med empiriska studier. Detta är även i linje med den riktning som pekas ut genom tillämpning av amerikansk standard, i och med uppdatering av NFPA 855 till edition 2026, i vilken man lägger allt större tonvikt vid behovet av fullskaliga provningsdata snarare än småskalig och indikativ provning.

Det har i denna studie även konstaterats att robusta system lämpligen baseras på kombinationen av flertalet skyddssystem, både sannolikhets- och konsekvensbegränsande. Baserat på detta, och strömningarna i de amerikanska regelverksuppdateringarna, bedöms det som mycket relevant att dels genomföra parameteranalys för dimensionering av skyddssystem i form av mekanisk ventilation enligt NFPA 69, dels att studera hur samverkan mellan sannolikhetsbegränsande och konsekvensbegränsande system kan påverka riskbilden som helhet.

Som redovisats i Figur 4 är det tydligt att det i den förhärskande mängden av utfall vid skadehändelser relaterat till termisk rusning i litiumjonbatterier inträffar brand i första hand. I en mindre andel av de fall som studien [25] omfattat inträffade explosion. Endast i en mycket liten andel av de studerade händelserna skedde ventilerings av batterigaser utan att dessa förbrändes. Det framgår dock inte om viss andel oförbrända batterigaser kan ha spridits innan det att antändning skett. Effekter avseende konsekvensbedömning för spridning och toxisk verkan av sådana oförbrända batterigaser bedöms därför intressant att studera. Många av de komponenter som kan bildas vid rykande termisk rusning har högt systemtoxiska egenskaper, och sprids i regel liknande tunga utsläpp längs mark. Om framtida batterienergilagringssystem dessutom, i linje med indikation i det uppdaterade amerikanska regelverket NFPA 855, kan komma att utformas med större vikt vid säkerhetssystem i form av aktiv mekanisk explosionsförebyggande ventilation föreligger även en ökad möjlighet för spridning av sådana oförbrända batterigaser. Det bedöms därmed finnas behov av tydligare kunskap om risker vid exponering samt underlag för bedömning av konsekvenser vid sådana utsläpp.

För att vidare sätta en upplevda riskbilden från brand i batterienergilagring med litiumjonbatterier som energibärare i en bredare samhällelig kontext hade det varit av intresse att genomföra en komparativ studie för att undersöka om förbränningsprodukter från brand i sådana de facto innehåller mer eller mindre toxisk potential vid jämförelse från andra, mer konventionella brandutsläpp – ex. bostadsbränder, industribränder, elbränder, fordonsbränder osv. Denna jämförelse bedöms vara värdefull för att i förlängningen möjliggöra för en mer underbyggd och nyanserad samhällsdebatt avseende kostnad och nytta med olika riskminimerande åtgärder vid uppförande av anläggningar.

I enlighet med tidigare konstaterat går utvecklingen inom energilagring enormt fort framåt. Redan i skrivande stund utvärderas och produceras nya typer av energibärare, exempelvis i form av batterier med andra fysikaliska och kemiska förutsättningar. Exempelvis litium-svavel (Li-S) batterier, natriumjonbatterier, solid-statebatterier och så vidare. Alla dessa olika typer av batterier möjliga för mer omfattande energilagring har sannolikt sina för- och nackdelar i säkerhetsrelaterade avseenden. För att bidra till säker implementering och användande av sådan ny teknik bedöms det värdefullt att risker relaterat till brand, toxicitet och explosion utvärderas vidare i takt med produktutvecklingens och marknadsimplementeringens framskridande.

15 Referenslista

- [1] Boverket, "Boverkets föreskrifter och allmänna råd om säkerhet i händelse av brand i byggnader, BFS 2024:7," Boverket, 2024.
- [2] M. Runefors, "Perceived Research Needs for Battery and Hydrogen Safety – A Nordic Perspective, Report 7057," Division of Fire Safety Engineering - Lund University, Lund, 2024.
- [3] O. Grönlund, M. Quant, M. Rasmussen, O. Willstrand och J. Hynynen, "Guidelines for the fire protection of battery energy storage systems," RISE Research Institutes of Sweden, Borås, 2023.
- [4] NFPA - National Fire Protection Association, "NFPA 855 - Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems," NFPA - National Fire Protection Association, 2026.
- [5] Svensk Solenergi, "Riktlinje för brandskydd av stationära batterier," Svensk Solenergi, Stockholm, 2024.
- [6] Electric Power Research Institute, EPRI, "BESS Failure Incident Database," Electric Power Research Institute, EPRI, 17 Mars 2025. [Online]. Available:
https://storagewiki.epri.com/index.php/BESS_Failure_Incident_Database#Root_Cause_Categorization. [Använd 28 Oktober 2025].
- [7] Boverket, "Boverkets byggregler (föreskrifter och allmänna råd), BBR 29," Boverket, Karlskrona, BFS 2011:6 med ändringar t.o.m. BFS 2020:4.
- [8] Storstockholms brandförsvär, "Solcellsanläggningar och batterilagersystem," Storstockholms brandförsvär, Stockholm, 2024-02-20.
- [9] Räddningstjänsten Syd, "Råd och anvisning för solcellsanläggningar och batterilagersystem," Räddningstjänsten Syd, Malmö, 2024-09-11.
- [10] Räddningstjänsten Storgöteborg, "Projektering och installation av solcellsanläggningar och," Räddningstjänsten Storgöteborg, Göteborg, 2019.
- [11] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Vägledning, räddningsinsats där litiumjonbatterier förekommer," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Enheten för brand och räddning, Karlstad, 2020.
- [12] Research Institutes of Sweden (RISE), "Brandteknisk vägledning för batterienergilagrar med litiumjonbatterier, RISE Report 2023:117," RISE, Borås, 2023.
- [13] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Insatskort för energilagring och solcellsanläggning," MSB, Karlstad, 2023.
- [14] P. Andersson, A. Byström, R. Fjellgaard Mikalsen, M. Försth, P. Van Hees, P. Kovács och M. Runefors, "Innovativa elsystem i byggnader -

- konsekvenser för brandsäkerhet," Research Institutes of Sweden, RISE, Borås, 2019.
- [15] RISE, "Compartment Explosions Induced by Batteries, RISE Report:2025:64," 2025.
 - [16] Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap, "Risikovurdering og håndtering av brann i Litium-ion batterier," Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB), Tønsberg, 2021.
 - [17] N. Bergqvist och B. Talakoob, "Comparative Life Cycle Assessment of Second Life NMC Batteries," Department of Technology Management and Economics, Division of Environmental Systems Analysis, Chalmers University of Technology, Göteborg, 2022.
 - [18] S. Evro, A. Ajumobi, D. Mayon och O. Stanley Tomomewo, "Navigating battery choices: A comparative study of lithium iron phosphate and nickel manganese cobalt battery technologies," *Future Batteries*, vol. 4, nr 100007, 2024.
 - [19] DNV GL, "Considerations for ESS Fire Safety," DNV GL, Dublin, OH, 2017.
 - [20] E. J. K. Nilsson, A.-L. Sahlberg, s. F.-B. K. Wilke och M. Runefors, "Flammable and Toxic Gases from Batteries in Thermal Runaway: Consequences and mitigation," Division of Combustion Physics, Division of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, 2025.
 - [21] P. J. Bugryniec, E. G. Resendiz, S. M. Nwophoke, S. Khanna, C. James och S. F. Brown, "Review of gas emissions from lithium-ion battery thermal runaway failure - Considering toxic and flammable compounds," *Journal of Energy Storage*, vol. 87, nr 111288, 2024.
 - [22] S. Einar och V. Engvall, "En studie kring vilka brandtekniska krav som bör ställas på framtida energilager innehållandes litium-jonbatterier," Avdelningen för Brandteknik, Lunds Tekniska Högskola, Lunds Universitet, Lund, 2020.
 - [23] P. Ping, Q. Wang, P. Huang, K. K. D. Sun och C. Chen, "Study of the fire behaviour of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test," *Journal of Power Sources*, vol. 285, pp. pp. 80-90, 2015.
 - [24] Francine Amon, Petra Andersson, Ingvar Karlson & Eskil Sahlin, 2012, Fire risks associated with batteries. SP Technical Research Institute of Sweden, SP Report 2012:66..
 - [25] A. Schraiber, A. Barowy, B. Gaudet och V. Kimmerly, "Considerations for Fire Service Response to Residential Battery Energy Storage System Incidents," UL Solutions, International Association of Fire Fighters , 2023.
 - [26] U. Björnstig och E. Lindeman, "Rökgasexponering vid Li-jonbatteribrand, MSB1960," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Karlstad, 2022.
 - [27] DNV GL, "McMicken Battery Energy Storage System Event - Technical analysis and recommendations," DNV GL, PA, USA, 2020.

- [28] Underwriters Laboratories, UL Firefighter Safety Research Institute, "Four Firefighters Injured In Lithium-Ion Battery Energy Storage System Explosion - Arizona," Underwriters Laboratories Inc., Columbia, MD, USA, 2020.
- [29] Monterey Bay Air Resources District, MBARD, "Moss Landing Battery Facility Fire Update January 22, 2025 - Monterey, California," Monterey Bay Air Resources District, MBARD, Kalifornien, USA, 2025.
- [30] San Diego County HAZMAT, San Diego City Fire Department HAZMAT, San Diego Gas & Electric/ HAley & Aldrich INC, "Air Quality Report," Escondido Government, Kalifornien, USA, 2024.
- [31] EPRI (Electric Power Research Institute), "Insights from EPRI's Battery Energy Storage Systems (BESS) Failure Incident Database," 2024.
- [32] Baker Engineering and Risk Consultants, Inc., "BESS Suite, Part 1-6," Baker Engineering and Risk Consultants, Inc., Huston, 2021.
- [33] J. Duan, X. Tang, H. Dai, Y. Yang, W. Wu, X. Wei och Y. Huang, "Building Safe Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles: A Review," *Electrochemical Energy Reviews*, vol. 2020, 2019.
- [34] United States Environmental Protection Agency, EPA Emergency Response, "Moss Landing Battery Fire Response," United States Environmental Protection Agency, Kalifornien, USA, 2025.
- [35] Electric Power Research Institute, EPRI, "Failure Event - US, CA, Moss Landing - 16 Jan 2025," Electric Power Research Institute, EPRI, 13 Oktober 2025. [Online]. Available: https://storagewiki.epri.com/index.php/Failure_Event_-_US,_CA,_Moss_Landing_-_16_Jan_2025. [Använd 22 Oktober 2025].
- [36] Vistra, "VISTRA - OVERVIEW," mars 2025. [Online]. Available: <https://www.mosslandingresponse.com/#:~:text=On%20Thursday%2C%20Jan.,was%20dispatched%20to%20the%20scene..> [Använd 11 juni 2025].
- [37] United States Environmental Protection Agency, EPA, "Moss Landing Battery Fire - Community Involvement Plan," United States Environmental Protection Agency, EPA, Kalifornien, USA, 2025.
- [38] Bay Area News Group, "Residents near Moss Landing fire return home after officials lift evacuation order," *The Mercury News*, 20 Januari 2025.
- [39] County of Monterey Health Department Environmental Health Bureau, "Moss Landing Vistra Battery Fire Response – Update September 2025," County of Monterey Health Department Environmental Health Bureau, Kalifornien, USA, 2025.
- [40] Health and Human Services Agency California Department of Public Health, "RE: CDPH assessment of Santa Cruz County agricultural soil sampling in response to," Health and Human Services

- Agency California Department of Public Health, Kalifornien, USA, 2025.
- [41] Office of Environmental Health Hazard Assessment, "Screening Level Human Health Risk Assessment for a Residential Exposure Scenario Based on Data from the Moss Landing Battery Fire: An Analysis of the Department of Toxic Substances Control (DTSC) Soil and Surface Water Data," Office of Environmental Health Hazard Assessment, Kalifornien, USA, 2025.
 - [42] Electric Power Research Institute, EPRI, "Lessons Learned from Past Failures Around the World," Electric Power Research Institute, EPRI, Storbritannien, 2023.
 - [43] Electric Power Research Institute, EPRI, "CARNEGIE ROAD ENERGY STORAGE SYSTEM FAILURE RESPONSE, RECOVERY, AND REBUILD LESSONS LEARNED," Electric Power Research Institute, EPRI, Storbritannien, 2023.
 - [44] Meyerside Fire & Rescue Service Incident Investigation Team, "Fire Investigation Report 132-20," Meyerside Fire & Rescue Service, Liverpool, Storbritannien, 2022.
 - [45] Meyerside Fire & Rescue Service Operational Assurance Team, "Significant Incident Report," Meyerside Fire & Rescue Service, Storbritannien, 2022.
 - [46] Energy Storage News, "AES to install largest battery-based energy storage project in US for SDG&E," Energy Storage News, 19 Augusti 2016. [Online]. Available: https://www.energy-storage.news/aes-to-install-largest-battery-based-energy-storage-project-in-us-for-sdge/?utm_source=chatgpt.com. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [47] Power Technology, "SDG&E Escondido Substation – BESS, US," Power Technology, 28 Augusti 2021. [Online]. Available: https://www.power-technology.com/marketdata/sdge-escondido-substation-bess-us/?utm_source=chatgpt.com&cf-view. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [48] Watt4ever - batteries for life, "SAMSUNG ESS 22S1P 7.61kWh," Watt4ever - batteries for life, [Online]. Available: <https://watt4ever.be/shop/samsung-ess-7-61kwh-22s1p-1-2c-m2-m076/>. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [49] Samsung SDI, "ESS Batteries by Samsung SDI," Samsung SDI, Gongse-dong, Korea, 2017.
 - [50] Samsung SDI, "ESS Batteries by Samsung SDI," Samsung SDI, Gongse-ro, Korea, 2018.
 - [51] NBC Universal Media, "Evacuation orders lifted in Escondido after lithium-ion battery fire at SDG&E facility that also prompted school closures," NBC 7 San Diego, 7 September 2024. [Online]. Available: <https://www.nbcsandiego.com/news/local/lithium-ion-battery-fire-in-escondido-prompts-large-response/3615328/#:~:text=The%20City%20of%20Escondido%20on>

- %20Saturday%20lifted%20all,when%20they%20were%20cleared%20to%20repopulate%20the%20area.. [Använd 27 Oktober 2025].
- [52] KPBS Public Media, "Escondido lithium battery fire out, evacuation orders lifted as county mulls over moratorium," KPBS Public Media, 10 September 2024. [Online]. Available: <https://www.kpbs.org/news/public-safety/2024/09/06/escondido-lithium-battery-fire-continues-to-burn-as-county-mulls-over-moratorium>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [53] San Diego Gas & Electric, Escondido Fire Department, "Update on Escondido Battery Storage Incident - Sept. 7," San Diego Gas & Electric, 7 September 2024. [Online]. Available: <https://www.sdgetoday.com/news/update-escondido-battery-storage-incident-sept-7>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [54] Convergent Energy and Power, "Village of Chaumont, New York," Convergent Energy and Power, New York, 2025.
- [55] Energy Storage News, "GE to provide DC-coupled solution to 123MWh solar-plus-storage project in New York," Energy Storage News, 17 Mars 2021. [Online]. Available: <https://www.energy-storage.news/ge-to-provide-dc-coupled-solution-to-123mwh-solar-plus-storage-project-in-new-york/>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [56] GE Vernova, "Press Release - GE Vernova and Our Next Energy sign term sheet to drive U.S. battery technology for energy storage," GE Vernova, 16 November 2023. [Online]. Available: <https://www.gevernova.com/news/press-releases/ge-vernova-and-our-next-energy-sign-term-sheet-to-drive-us-battery-technology-for-energy-storage>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [57] GE Vernova, "GE Vernova launches advanced containerized solution for Battery Enabled Energy Storage (BESS)," GE Vernova, 10 September 2024. [Online]. Available: <https://www.gevernova.com/news/press-releases/ge-vernova-launches-advanced-containerized-solution-battery-enabled-energy-storage>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [58] WWNY, "Residents told to shelter in place due to potentially toxic smoke from solar farm fire," WWNY, 27 Juli 2023. [Online]. Available: <https://www.wnnytv.com/2023/07/27/residents-told-shelter-place-due-potentially-toxic-smoke-solar-farm-fire/>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [59] AP News, "Officials say there's no sign of health risks from solar farm battery blaze in northern New York," AP News, 28 Juli 2023. [Online]. Available: <https://apnews.com/article/solar-farm-batteries-fire-new-york-smoke-warning-5ae63360b5349d2bc11876d44f798a97>. [Använd 27 Oktober 2025].
- [60] FireRescue1, "4-day-long N.Y. solar farm fire contained," Lexipol Media Group, 1 Augusti 2023. [Online]. Available: <https://www.firerescue1.com/fireground-operations/articles/4->

- day-long-ny-solar-farm-fire-contained-ofZ6q5dJEXT6odLd/.
[Använd 27 Oktober 2025].
- [61] Spectrum News, "Questions remain after Jefferson Co. solar farm battery fire," Spectrum News, 1 Augusti 2023. [Online]. Available: <https://spectrumlocalnews.com/nys/central-ny/public-safety/2023/08/01/jefferson-county-solar-farm-battery-fire>. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [62] Fire & Risk Alliance, LLC, "Assessment of Potential Impacts of Fires at BESS Facilities," The American Clean Power Association, ACP, 2025.
 - [63] Räddningstjänsten Storgöteborg, "Olycksutredning - Brand i container för batterienergilagring, Göteborg 2023-04-26," Räddningstjänsten Storgöteborg, Göteborg, 2023.
 - [64] Sveriges Television, "Giftig rök efter brand i container i Sisjön," Sveriges Television, 27 April 2023. [Online]. Available: <https://www.svt.se/nyheter/lokalt/vast/gifitig-rok-efter-brand-i-container-i-sisjon>. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [65] Göteborgsposten, "Batteribranden i Sisjön är släckt," Göteborgsposten, 27 April 2023. [Online]. Available: <https://www.gp.se/nyheter/goteborg/batteribranden-i-sisjon-ar-slackt.fbca654-0236-48cd-9db7-680e1de65477>. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [66] Tidningen Brandsäkert, "Släckmetod risk vid containerbrand," Tidningen Brandsäkert, 22 Januari 2025. [Online]. Available: <https://brandsakert.se/2025/01/06/slackmetod-risk-vid-containerbrand/>. [Använd 27 Oktober 2025].
 - [67] Naturvårdsverket, "Luftguiden - Handbok om miljökvalitetsnormer för utomhusluft, Version 4," Naturvårdsverket, Stockholm, 2019.
 - [68] Institute of energy storage and novel electric technology, China Electric Power Technology Co., Ltd., Institute of energy storage and novel electric technology, China Electric Power Technology Co., Ltd., 2021.
 - [69] X. Shen, Q. Hu, Q. Zhang, D. Wang, S. Yuan, J. Jiang, X. Qian och M. Yuan, "An analysis of li-ion induced potential incidents in battery electrical energy storage system by use of computational fluid dynamics modeling and simulations: The Beijing April 2021 case study," *Engineering Failure Analysis*, vol. Volume 151, 2023.
 - [70] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning - En introduktion," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Karlstad, 2012.
 - [71] Myndighetens för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning - Del 2: Explosion i gatukorsning," Myndighetens för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Karlstad, 2012.

- [72] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning - Del 2: Explosion i gatukorsning," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Karlstad, 2012.
- [73] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Bebyggelsens motståndsförmåga mot extrem dynamisk belastning - Del 3: Kapacitet hos byggnader," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Karlstad, 2012.
- [74] Clancey, "Damage Estimates for Common Structures Based on Overpressure," 1972.
- [75] J. Hynynen, L. Vylund, K. Gottlieb och M. Quant, "Insatsstöd för räddningstjänst - bränder i batterier," Chalmers Industriteknik, Räddningstjänsten Storgöteborg, RISE - Research Institutes of Sweden, Brandforsk, Göteborg, 2025.
- [76] "Explosion Control Guidance for Battery Energy Storage Systems, Overview of Current Standards and Additional Recommendations," Fire & Risk Alliance, oktober 2024.
- [77] Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Part 1: Basic concepts, "prEN 1127-1:2025. Explosive atmospheres - Explosion prevention and protection - Part 1: Basic concepts," EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2025.
- [78] J. Barowy, "Explosibility Properties of gases from Lithium-Ion Energy Storage Battery Thermal Runways," 2020.
- [79] Electric Power Research Institute, EPRI, "Approaches for Evaluating Potential Human Health Consequences of Utility-Scale Lithium-ion Battery Failures," Electric Power Research Institute, EPRI, Palo Alto, Kalifornien, USA, 2021.
- [80] National Institute of Standards and Technology, NIST, "Hydrogen cyanide," US Department of Commerce, 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C74908&Mask=200>. [Använd 22 12 2025].
- [81] National Institute of Standards and Technology, NIST, "Hydrogen fluoride," US. Department of Commerce , 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7664393&Units=SI>. [Använd 22 12 2025].
- [82] National Institute of Standards and Technology, NIST , "Hydrogen chloride," US. Department of Commerce, 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7647010&Mask=1&Type=JANAFG&Table=on>. [Använd 22 12 2025].
- [83] National Institute of Standards and Technology, NIST, "Carbon monoxide," US. Department of Commerce, 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Name=carbonmonoxide&Units=SI>. [Använd 22 12 2025].

- [84] National Institute of Standards and Technology, NIST, "Nitrogen oxide," US. Department of Commerce, 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?Formula=NO&NoIon=on&Units=SI>. [Använd 22 12 2025].
- [85] National Institute of Standards and Technology, NIST, "Hydrogen chloride," US. Department of Commerce, 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7647010&Mask=1&Type=JANAFG&Table=on>. [Använd 22 12 2025].
- [86] National Institute of Standards and Technology, NIST, "Sulfur dioxide," US. Department of Commerce, 2025. [Online]. Available: <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7446095&Units=SI>. [Använd 22 12 2025].
- [87] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), "ALOHA, (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4 - Technical documentation," US. Department of Commerce, 2013.
- [88] United Nations Environmental Protection Agency, EPA, "Hydrogen cyanide Results - AEGL Program," United Nations Environmental Protection Agency, EPA, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/aegl/hydrogen-cyanide-results-aegl-program>. [Använd 22 12 2025].
- [89] United Nations Environmental Protection Agency, EPA, "Hydrogen fluoride Results - AEGL Program," United Nations Environmental Protection Agency, EPA, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/aegl/hydrogen-fluoride-results-aegl-program>. [Använd 22 12 2025].
- [90] United Nations Environmental Protection Agency, EPA, "Hydrogen chloride Results - AEGL Program," United Nations Environmental Protection Agency, EPA, 2025. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/aegl/hydrogen-chloride-results-aegl-program>. [Använd 22 12 2025].
- [91] National Institute for Occupational Safety and Health, NOISH, "Hydrogen cyanide," National Institute for Occupational Safety and Health, NOISH, 2014. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/74908.html>. [Använd 22 12 2025].
- [92] National Institute for Occupational Safety and Health, "Hydrogen fluoride," National Institute for Occupational Safety and Health, 2014. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664393.html>. [Använd 22 12 2025].
- [93] National Institute for Occupational Safety and Health, NOISH, "Hydrogen chloride," National Institute for Occupational Safety and Health, NOISH, 2014. [Online]. Available: <https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7647010.html>. [Använd 22 12 2025].

- [94] Fredrik Larsson, Petra Andersson, Per Blomqvist & Bengt-Erik Mellander, 2017, Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires. Scientific Reports..
- [95] Hynynen, J.; Willstrand, O.; Blomqvist, P.; Andersson, P., "Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests," *Fire Safety Journal*, vol. 139, 2023.
- [96] DNV GL, Considerations for ESS Fire Safety, 2017..
- [97] B. Truchot, F. Fouillen och S. Collet, "An experimental evaluation of toxic gas emissions from vehicle fires," *Fire Safety Journal*, vol. 97, 2018.
- [98] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap. MSB & Totalförsvarets forskningsinstitut, "Gasformig HF vid brand i trånga utrymmen – risker för hudupptag vid insatser," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, Karlstad, 2021.
- [99] Kunskaps- och kliniskt träningscenter (KTC) i Region Stockholm & Giftinformationscentralen, GIC, "Prehospital förmåga vid insatser med bränder i litiumjonbatterier," AISAB Ambulanssjukvården i Storstockholm AB, 2022. [Online]. Available: <https://rib.msb.se/bib/Search/Document?id=30654&search=1>.
- [100] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "Rökgasexponering vid Li-jonbatteribrand," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, Karlstad, 2022.
- [101] O. Willstrand, R. Bisschop, P. Blomqvist, A. Temple och J. Anderson, "Toxic Gases from Electric Vehicle Fires," RISE, Research Institutes of Sweden, Division Safety & Transport, Borås, 2020.
- [102] N. van Veen och A. Koppen, "Emergency responses in smoke from li-ion batteries," i *FIVE, Fire In Vehicles Conference*, 2020.
- [103] Kim, Y. H.; Horn, G.; Kesler, R.; Barowy, A.; Schraiber, A.; Gaudet, B.; Mayer, A.; Fent, K.; Nored, A.; Schladweiler, M. C.; Williams, W.; Grindstaff, R.; Kovalcik, K.; Pancras, J.; Johnstone, A.; Gavett, S.; Gilmour, I., "Pulmonary Toxicity of Combustion Byproducts from Lithium-Ion Battery Fires," United States Environmental Protection Agency, EPA, 16 mars 2025. [Online]. Available: <https://assessments.epa.gov/risk/document/&deid=366324#overview>. [Använd 11 november 2025].
- [104] M. Claassen, B. Bingham, J. Chow, J. Watson, P. Chu, Y. Wang och X. Wang, "Characterization of Lithium-Ion Battery Fire Emissions—Part 2: Particle Size Distributions and Emission Factors," *Batteries*, vol. 10, 2024.
- [105] M. Claassen, B. Bingham, J. Chow, J. Watson, P. Chu, Y. Wang och X. Wang, "Characterization of Lithium-Ion Battery Fire Emissions—Part 1: Chemical Composition of Fine Particles (PM2.5)," *Batteries*, vol. 10, 2024.
- [106] Texas A&M Engineering, "Lithium-Ion Battery Fires and Emissions Characterization," Texas A&M Engineering, 2024.

- [107] P. Blomqvist, "Emissions from Fires Consequences for Human Safety and the Environment," Department of Fire Safety Engineering, Lund Institute of Technology, Lund University, Lund, 2005.
- [108] T. L. Barone, T. H. Dubaniewicz, S. A. Friend, I. A. Zlochower, A. D. Bugarski och N. S. Rayyan, "Lithium-ion Battery Explosion Aerosols: Morphology and Elemental composition," *Aerosol Science and Technology*, vol. 55, nr 10, pp. 1183-1201, 2021.
- [109] A. Lönnermark, H. Strippel och P. Blomqvist, "Modellering av emissioner från bränder, SP Rapport 2006:53," SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, 2007.
- [110] P. Blomqvist, "Emissions from Fires Consequences for Human Safety and the Environment," Lund University, Lund, 2005.
- [111] B. Person, M. Simonson och M. Månsson, "Utsläpp från bränder till atmosfären, SP Rapport 1995:70," Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Borås, 1995.
- [112] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB & Socialstyrelsen, "Nya bedömningar av riskområden vid utsläpp av ammoniak, klor och svaveldioxid," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, Karlstad, 2016.
- [113] J. Hynynen, O. Willstrand, P. Blomqvist och P. Andersson, "Analysis of combustion gases from large-scale electric vehicle fire tests," *Fire Safety Journal*, vol. 139, nr 103829, 2023.
- [114] J. Burman, N. Brännström, O. Björnham, P. Lindgren, L. Persson, P. Schoenberg och L. Thaning, "Osäkerheter i observationer och beräkningar," Totalförsvarets Forskningsinstitut, FOI, 2013.
- [115] National Research Council, *Acute Exposure Guideline Levels for Selected Airborne Chemicals: Volume 4*, Washington, DC: The National Academies Press, 2004.
- [116] NAS/COT Subcommittee for AEGLs, "INTERIM ACUTE EXPOSURE GUIDELINE LEVELS (AEGLs) - Benzene," NAC/AEGL Committee, 2009.
- [117] National Research Council, "Acute Exposure Guideline Levels - Volume 4," National Academies Press, Washington, D.C., USA, 2024.
- [118] Arbetsmiljöverket, Arbetsmiljöverket, Solna, 2023.
- [119] Intresseföreningen för Processsäkerhet, IPS, "QRA Handledning," Intresseföreningen för Processsäkerhet, IPS, 2022.
- [120] DNV, "Technical Memo - Review of Battery Fire and Plume Analyses," DNV Services UK Limited, 2024.
- [121] DNV, "Technical Memo - East Claydon BESS Fire and Plume Study," DNV Services UK Limited, London, 2023.
- [122] H. Snoun, M. Krichen och H. Chérif, "A comprehensive review of Gaussian atmospheric dispersion models: current usage and future perspectives," *Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration*, vol. 8, 2023.

- [123] P. Zannetti, *Air Pollution Modeling: Theories, Computational Methods and Available Software*, Springer, 1990.
- [124] F. Windmark, M. Grundström, M. Jakobsson, C. Asker och J. Arvelius, "High resolution air quality modelling of NO₂, PM₁₀ and PM_{2.5} for Sweden," Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut, SMHI, 2023.
- [125] D. Evans, G. Mulholland, H. Baum, W. Walton och K. McGrattan, "In Situ Burning of Oil Spills," *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*, vol. 106, p. 231–278, 2001.
- [126] K. McGrattan, "Smoke Plume Trajectory Modeling," *Spill Science & Technology Bulletin*, vol. 8, nr 4, pp. 367–372, 2003.
- [127] S. T. Castelli, "The Lagrangian Approach to Dispersion Modeling: Why We Like It (and What We Did with It)," *Air Pollution Modeling and its Application*, vol. XXVII, p. 217–228, 2021.
- [128] A. Nanni, G. Tinarelli, C. Solisio och C. Pozzi, "Comparison between Puff and Lagrangian Particle Dispersion Models at a Complex and Coastal Site," *Atmosphere*, vol. 13, nr 4, 2022.
- [129] Electric Power Research Institute, EPRI, "Air Modeling Simulations of Battery Energy Storage System Fires," Electric Power Research Institute, EPRI, 2022.
- [130] C. Persson, J. Langner och L. Robertson, "Air Pollution Assessment Studies for Sweden Based on the Match Model and Air Pollution Measurements," i *Air Pollution Modeling and Its Application XI*, Boston, USA, Springer, 1996, p. 127–134.
- [131] C. Persson, E. Rensner och T. Klein, "Nationell miljöövervakning – MATCH-Sverige modellen," Statens Meteorologiska och Hydrologiska Institut, SMHI, Norrköping, 2004.
- [132] R. W. Jones, D. Lehr, R. Simecek-Beatty och M. Reynolds, "Aloha - Areal Locations of Hazardous Atmospheres - 5.4.4 Technical Documentation," National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, U. S. Dept. of Commerce, Seattle, USA.
- [133] National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA, "ALOHA Fact Sheet," U.S. Department of Commerce, Seattle, USA, 2020.
- [134] Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, "RIB Spridning Luft," Myndigheten för Samhällsskydd och Beredskap, MSB, 3 September 2025. [Online]. Available: <https://www.msb.se/sv/verktyg--tjanster/spridning-luft/>. [Använd 14 11 2025].
- [135] Gexcon, "Simulating battery fires," Gexcon, 25 Februari 2025. [Online]. Available: <https://knowledge.gexcon.com/docs/simulating-battery-fires>. [Använd 14 November 2025].
- [136] Gexcon, "EFFECTS and RISKCURVES for new energy carriers," Gexcon, [Online]. Available: <https://www.gexcon.com/wp-content/uploads/2025/07/Brochure-EFFECTS-and-RISKCURVES-for-new-energy-carriers.pdf>. [Använd 14 November 2025].

- [137] O. Björnham, H. Grahm och J. Burman, "Comparison of the predictive results from the two dispersion models PUMA and LPELLO with the JR II field data," *Atmospheric Environment*, vol. 233, 2020.
- [138] Chemical engineering transactions, "Deflagration Pressure Prediction using the NFPA 68 Engineering Model: Sensitivity of Fuel-Air Gas Properties," AIDIC (The Italian Association of Chemical Engineering), 2025.

Bilaga A: Vägledning för anläggningsägare och verksamheter vid implementering av BESS

Nedan presenteras kortare vägledning/checklista att använda vid implementering av BESS. Vägledningen/checklistan består bland annat av viktiga frågor att besvara och är särskilt riktad mot anläggningsägare och de som utför riskanalys. Materialet bör inte användas som specifika projekteringsanvisningar utan är snarare något som kan användas för att öka förståelse kring vad som installeras och säkerställa att de osäkerheter som finns kopplat till batterienergilagring i litiumjonbatterier tas i beaktning vid implementering.

En bra utgångspunkt för indata till analyser kring BESS bör finnas i de tester som görs enligt UL 9540A. Testet görs för att bedöma brand- och explosionsrisk vid termisk rusning i batterilagringssystem. Test enligt standarden är grundläggande för att uppfylla exempelvis NFPA 855 och utförs på olika nivåer:

- Cellnivå
- Modulnivå
- Enhetsnivå
- Installationsnivå

Uppfyller BESS någon specifik standard? Om ja, vilken?

Om NFPA 855 används, har man utgått ifrån den senaste versionen? Den tekniska utvecklingen går fort fram och så även vad som betraktas som "best practice" både gällande skydd och skyddssystem, men även kring de egenskaper som kan förväntas på gaser som kommer från en termisk rusning. För närvarande gäller: NFPA 855 Edition 2026.

Om tryckavlastning används, uppfylls NFPA 68/ SS EN 14994?

Analysen i den genomförda studien visar att parametrar som fri volym inom container, antal celler som går in i termisk rusning, samt gasblandning generellt har stor inverkan på behov av tryckavlastning.

Dokumentation som visar vilken indata som varit grund för dimensioneringar behöver redovisas av den som genomfört dimensioneringen. Exempel på värden för gassammansättning etc. utifrån denna studie har presenterats i avsnitt 8. Dessa kan vara vägledande i brist på exakta värden från tester, med reservation för begränsningarna kopplat till den stökiometrisk koncentrationen. Vidare det bör alltid säkerställas att värden som används är "best practice" eftersom utvecklingen och forskningen inom området går snabbt fram. Dokumentation för dimensionering som behöver redovisas är exempelvis:

- Om dimensioneringen följer beräkningsgångar i standarder,
- Om de standardvärden som finns för parametrar använts. Detta inkluderar exempelvis de standardvärden på Q_u och γ_b som redovisas i NFPA 68 och som analysen visat har stor inverkan på behov av tryckavlastning,
- Antal celler som går in i termisk rusning,
- Volymflöde från de celler som når "off-gassing" samt när detta sker,

- Vilka delar av inkapsling som utgjort fri volym,
- P_{max} , S_u och K_G för den gasblandning som förutsätts samt,
- Om någon mekanisk ventilation tagits i beaktning vid dimensionering.

Om Performace based design använts ska ovanstående redovisas tillsammans med punkter i avsnitt 9.1.2 vilka även visas nedan:

- Analys görs mot ett uppsatt och dokumenterat scenario (hazard scenario),
- Designen påvisar att det reducerade övertrycket (PRED) överensstämmer med att:
 - Tryckavlastningen skall (om platsen är bemannad) förhindra att konstruktionen rämna eller och minimera skador på personer utanför behållaren/containeren.
 - Tryckavlastningen skall (om platsen är obemannad) förhindra att behållaren/containeren rämna.
- Tryckavlastningszonen ska ordnas så att:
 - brännbart material inte kan antändas,
 - konstruktioner inte riskerar att skadas,
 - tillträde ska vara begränsat för personer så de inte riskerar att skadas från flamma, varma gaser, partiklar eller projektiler.

Den som utför dimensioneringen bör även kunna redovisa osäkerheterna i beräkningar samt om någon känslighetsanalys gjorts. Beställare bör efterfråga beräkningar samt samråda kring dessa med sakkunnig för att säkerställa ett robust utförande. Värden i avsnitt 8 kan då vara vägledande för sådan diskussion, men de bör inte ges som ingångsvärden för en dimensionering av en leverantör eftersom leverantören bör vara mest uppdaterad gällande den senaste forskningen och den aktuella applikationen.

Utöver att tryckavlastningen har dimensionerats *ska* leverantören även redovisa de externa konsekvenser som förväntas givet en explosion. Avstånd ska beaktas vid uppställning av batterienergilagrar i förhållande till omgivningen.

Givet tryckavlastning enligt standarderna kan värdena i tabellen avseende konsekvensavstånd ses som vägledande i tidiga skeden av ett projekt innan en detaljerad utformning är känd:

	10 fots container	20 fots container	40 fots container
Extern flamma	13 meter	17 meter	22 meter

Om mekanisk ventilation används, uppfylls NFPA 69?

Material som visar vilken indata som varit grund för dimensioneringar behöver redovisas av den som genomfört dimensioneringen. Detta bör exempelvis inkludera:

- Om dimensioneringen följer beräkningsgångar i standarden,
- Om de standardvärden som finns för parametrar använts,
- Antal celler som går in i termisk rusning,
- Volymflöde från de celler som når "off-gassing" samt när detta sker,

- Vilka delar av inkapsling som utgjort fri volym samt,
- Vilken LFL som studerats och varför.

Samverkan mellan olika skyddssystem

Det finns många olika skyddssystem som kan tillämpas inom ett batterienergilager i litiumjonbatterier. Nedan ges en sammanfattande lista över system som kan vara aktuella. Om flera system används är det viktigt att de inte motverkar varandra, utan i bästa fall kan de samverka för att den önskade effekten ska erhållas.

1. Släcksystem. Verkar för att minska risken för brandspridning inom container. Vid aktivering av exempelvis gassläcksystem/aerosol kommer eventuell mekanisk ventilation att stoppa. Detta gör att en tydlig risk för uppbyggnad av en brandfarlig atmosfär finns då termisk rusning skett. Även om regelverk och vägledning pekar på att vattensprinklersystem är effektivare är det baserat på erfarenhet dock få BESS som utförs med vattensprinklersystem.
2. Detektering / gasmätning. En mätning av gaskoncentrationer ger insatspersonal möjligheten att förstå om termisk rusning skett inom container och om en risk för explosion finns.
3. Mekanisk ventilation. Vid uppbyggnad av brännbar gas kan mekanisk ventilation används för att ventilerar ut brännbara gaser.
4. Möjlighet till säker påfyllnad av inertgas. Vid risk för explosion och ventilering av brännbara gaser genom mekanisk ventilation kan ersättning av ventilerad volym ske med hjälp av exempelvis inertgas för att minska risken för att explosion ska inträffa.
5. Tryckavlastning. Tryckavlastningen kan installeras som redundans. Exempelvis om någonting går fel vid ventilering av gaser och påfyllnad av inertgas verkar tryckavlastningen till att rikta deflagration i önskad riktning. Det finns även ett värde av att kunna öppna tryckavlastning från säker plats vid insats och kunna använda denna som naturlig ventilation.
6. Skyddsavstånd. För att säkerställa en säker insats är skyddsavstånd viktigt. Insatspersonal bör få möjlighet att kunna styra system från säker plats.
7. Omfattande naturlig ventilation. I stället för att använda fläktar bör möjligheter finnas att kunna öppna automatiska paneler eller dörrar och på detta sätt kunna släppa ut de brännbara gaserna, detta skulle exempelvis kunna utgöras av tryckavlastningsluckor.

Sammanfattningsvis bör en kombination av flera skyddsåtgärder – tryckavlastning, ventilation, brandcellsindelning, släcksystem och BMS beaktas för att uppnå robusthet.

Dialog med lokal räddningstjänst

Detta är en viktig del i insatsplaneringen. Det är av största vikt att ta fram insatskort som beskriver system, redovisa vad som kan hända och varför. Vilken är den lämpligaste insatsmetodiken? Gäller den alltid eller kan den vara olika beroende på exempelvis vindriktning? Om släckning bedöms lämplig/nödvändig, hur hanteras släckvatten?

Toxicitet i förbränningsprodukter

För att bedöma konsekvenserna för omgivningen vid en brand i en BESS kan beräkningar och slutsatser i denna handling användas i indikativt syfte.

I samtliga utav de inträffade fall som studerats inom ramen för framtagande av denna rapport har konsekvensavstånd avseende toxisk verkan från förbränningsprodukter varit begränsad till brandens direkta närområde (<30 meter). Detta kan antas som vägledande vid planering och placering av batterienergilagrar i förhållande till skyddsvärda objekt, allmänna vistelseytor eller byggnader.

Det står dock inte entydigt klarlagt att förbränningsprodukter från brand i litiumjonbatterier är av mer toxisk karaktär än produkter från annan typ av brand, vilket bör vägas in i bedömningen.

I de fall konsekvensbedömning genom spridningsmodellering genomförs är det av stor vikt att antagna spridningsmönster i form av termisk stigningskraft i brandplymen beaktas. Spridningsberäkningar som ej beaktar detta tenderar att resultera i orimligt konservativa konsekvensområden.

Spridningsmodellering kan, om det utförs, genomföras för förbränningsprodukter i form av partiklar och tungmetaller (representeras ex. genom PM₁₀), VOC samt HF eller HCN. Notera dock att erhållna värden avseende konsekvensområden enbart ska betraktas som indikativa i de fall enklare spridningsmodeller nyttjas. Om situationen kräver en högre detaljeringsgrad i riskanalys avseende spridning av toxiska förbränningsprodukter bör en mer avancerad spridningsmodell, som tar hänsyn till såväl fysikaliska som kemiska betingelser, nyttjas.

BATTERIENERGILAGRING I LITIUMJONBATTERIER

Utbyggnaden av förnybar energi i Sverige ökar behovet av storskalig energilagring, ofta i form av litiumjonbaserade batterienergilagrar (BESS). Samtidigt saknas tydliga svenska regelverk för brandskydd och explosionssäkerhet, vilket skapar osäkerhet vid projektering och tillsyn. Denna rapport analyserar befintliga metoder för bedömning av konsekvenser vid batterigasexplosioner och spridning av toxiska förbränningsprodukter vid brand, med fokus på kostnadseffektiva lösningar för bedömning i tidiga skeden.

Studien omfattar litteraturgenomgång, händelseanalys, studie av branschfarenheter och parameteranalyser avseende explosion baserade på NFPA 68 och SS EN 14994 respektive avseende modellverktyg för simulering av spridning av toxiska förbränningsprodukter i luft.

Resultaten visar att korrekt dimensionerad tryckavlastning och ventilationsstrategi är avgörande för att begränsa explosionsrisk. Konsekvensområden från såväl explosionsförlopp som toxisk spridning vid flammmande brand konstateras normalt ej vara mer än lokala (10–20 m). Konservativa modeller och indata tenderar dock att överskatta riskområden.

Rapporten rekommenderar tydligare och nationellt harmoniserade riktlinjer, i vissa fall möjligt nyttjande av generiska referensdata och tydlig metodik för känslighetsanalys. Slutsatsen är att BESS inte är högriskanläggningar vid rätt konstruktion och drift, men kräver proaktivt säkerhetsarbete och tidig riskkompetens för att undvika kostsamma efterhandslösningar.

Ett nytt steg i energiforskningen

Forskningsföretaget Energiforsk initierar, samordnar och bedriver forskning och analys inom energiområdet samt sprider kunskap för att bidra till ett robust och hållbart energisystem. Energiforsk är ett politiskt neutralt och icke vinstutdelande aktiebolag som ägs av branschorganisationerna Energiföretagen Sverige och Energigas Sverige, det statliga affärsverket Svenska kraftnät, samt gas- och energiföretaget Nordion Energi. Läs mer på energiforsk.se.