

Brandsäker energilagring - Sammanställning av risker och forskningsbehov

Anders Lönnermark



Brandforsk

PROJECT TECHNICAL PANEL

Anders Johansson Boverket
Viktor Wahlsten Brandskyddslaget
Håkan Pettersson LF Västerbotten
Matilda Svensson MSB
Johan Andersson SP Fire Research
Robert Jansson SP Fire Research
Daniel Brandon SP Hållbar Samhällsbyggnad
Alar Just SP Hållbar Samhällsbyggnad
Birgit Östman SP Hållbar Samhällsbyggnad

Keywords

energy storage system; fuel; energy carrier; fire safety;
biofuel; waste

RISE Rapport 2018:42

ISBN: 978-91-88695-81-9

Denna rapport utgör ett slutligt arbetsmanuskript för det
rubricerade projektet.

Den officiella projektrapporten, till vilken referens bör ske
återfinns på RISE:S hemsida:

"Brandsäker energilagring - Sammanställning av risker och
forskningsbehov"

www.ri.se

BRANDFORSK 2018:7



Abstract

Fire safety of energy storage systems - Summary of risks and research needs

There is a large interest in the possibilities in storing produced energy that is not needed at that particular moment or to store energy when the cost for production of electricity is low. For this reason, different types of energy storage systems are used. With a fast development of new technologies and new forms of application for energy storage systems, it is important to also study the existing and potential risks with these types of systems.

This prestudy describes the field, its risks and needs for research. It focuses on risks associated with fire, including explosions and when relevant the production of toxic gases. Although the main focus of the prestudy is different types of energy storage systems, the report contains information also on risks associated with storage of solid biofuels and waste. This means that the report contains information on risks and needs for research for batteries, hydrogen, biogas, liquified gases, biofuels and waste.

Key words: energy storage system; fuel; energy carrier; fire safety; biofuel; waste

RISE Research Institutes of Sweden AB

RISE Rapport 2018:42

ISBN: 978-91-88695-81-9

Borås 2018

Innehåll

Abstract.....	1
Innehåll.....	2
Förord.....	4
Sammanfattning	5
1 Introduktion	8
1.1 Kort bakgrund.....	8
1.2 Syfte	8
1.3 Struktur.....	8
1.4 Metod	8
1.5 Avgränsningar.....	9
2 Metoder för energilagring.....	10
2.1 Vanliga metoder för energilagring.....	10
2.2 Andra typer av lagrad energi	11
3 Utvalda typer av energilager och olika risker	12
3.1 Batterier	12
3.1.1 Batterier: beskrivning	12
3.1.2 Batterier: risker	16
3.1.3 Transporter av batterier	20
3.2 Vätgas, bränsleceller	21
3.2.1 Vätgas, bränsleceller: beskrivning.....	21
3.2.2 Vätgas, bränsleceller: risker	22
3.3 Biogas.....	23
3.3.1 Biogas: beskrivning	23
3.3.2 Biogas: risker	23
3.4 Kondenserade gaser.....	25
3.4.1 kondenserade gaser: beskrivning.....	25
3.4.2 Kondenserade gaser: risker	25
3.5 Fasta biobränslen.....	26
3.5.1 Fasta biobränslen: beskrivning	26
3.5.2 Fasta biobränslen: risker	26
3.6 Avfall.....	28
3.6.1 Avfall: beskrivning.....	28
3.6.2 Avfall: risker	28
3.7 Risker vid elproduktion	29

4	Kunskapsluckor och forskningsbehov	31
4.1	Batterier	31
4.2	Biogas.....	33
4.3	Vätgas.....	34
4.4	Kondenserade gaser.....	34
4.5	Flytande biobränslen	34
4.6	Fasta biobränslen.....	34
4.7	Avfall	35
4.8	Produktion av el.....	36
5	Slutsatser	37
6	Referenser	39

Förord

Detta arbete har utförts inom förstudien Brandsäker energilagring finansierat av Brandforsk (projektnummer 701-171). Projektet initierades utgående från en diskussion mellan författaren och Brandforsk där behovet av en översikt av olika typer av energilager och lagring av biobränslen och avfall identifierades för att kunna beskriva olika utmaningar och forskningsbehov.

Författaren tackar följande personer för bidrag till rapporten: Anders Hjörnhede, Jon Persson, Petra Andersson, Fredrik Larsson, Henry Persson, Patrik Ollas och Max Rosengren.

Sammanfattning

Syftet med denna förstudie är att kartlägga olika relevanta s.k. energilager, inklusive olika typer av lagrad energi i form av t.ex. biobränslen och avfallsbränslen. Förstudien fokuserar på risker knutna till brand. I detta ingår även risker för explosion, t.ex. tryckökning på grund av brandutsatt tank eller antändning av explosiv gasblandning. I samband med bränder nämns även fall där det även finns relevanta risker för emission av speciellt toxiska gaser.

Målet med förstudien var att beskriva området och dess risker och utmaningar och peka på de delområden som behöver beforskas ytterligare. Målet var emellertid inte att ge lösningar eller svar på frågor, utan snarare att beskriva kunskapsluckor.

Rapporten innehåller en sammanfattning av risker och kunskapsluckor för ett antal typer av energilagring och energibärare.

Kunskapsluckorna kring Li-jon-batterisäkerhet är bitvis stora eftersom teknikutvecklingen har gått fortare än forskningen på riskerna. Nya stora batterisystem förändrar riskbilden jämfört med små Li-jon batterier i konsumentprodukter så som t.ex. laptop och mobiltelefoner. Det sker nu en snabb utveckling av olika energibärare, t.ex. batterier, och nya typer av användningsområden för energilagring och det är viktigt att forskningen kring säkerheten hänger med och kan genomföras parallellt så det inte blir något som måste förklaras efter att en olycka inträffat.

Det finns även stora kunskapsluckor kring beteendet efter åldring och lång tids användning av batterier, men även för andra typer av energibärare.

Släckning av olika typer av bränder och rekommendationer för hur räddningstjänsten ska kunna göra säkra och effektiva insatser måste hänga med utvecklingen. Det behövs även riktlinjer för säker drift, underhåll och reparationer.

Följande kunskapsluckor och forskningsbehov kan speciellt nämnas för energilager och energibärare:

- Batterier och batterisystem:
 - Det saknas studier av totalrisker för speciellt stora batterisystem
 - Batterier behöver studeras ur ett helhetsperspektiv vad gäller risker (värme, brand, giftiga gaser, gasexplosion), inklusive typer av fel, batteristorlek och typ, applikation och omgivande miljö. För att kunna göra detta måste det finnas metoder för att bedöma de ingående riskerna för olika typer av batterier.
 - Kunskap om hur man släcker på ett säkert och effektivt sätt för olika typer av batterier och hur kan installationen underlätta släckning?
 - Kunskap om risker och riktlinjer för hur batterilager i bostäder ska installeras och designas. Detta kan inkludera speciella krav på installatörer.
 - Kunskap kring hur säkerheten och risker förändras när batterier åldras.
 - Metoder för att bestämma State of Health (SOH) och sedan korrelation mellan SOH och risker.
 - Emissioner av olika toxiska gaser är fortsatt intressant att studera, t.ex. vätefluorid (HF)

- Biogas:
 - Karaktärisering av jetflammor, både vad gäller utsträckning och värmebelastning i form av temperatur och strålning.
 - Analys av vilka säkerhetsventiler som är optimala (värmekänslig eller tryckkänslig)
 - Skapa underlag för standardisering av säkerhetssystemet, t.ex. vad gäller utblåset från säkerhetsventilsystemet.
 - Analys av befintliga standarder och provningsmetoder för att utvärdera hur representativa de är för verkliga fall och olika risker.
- Vätgas
 - Vätgasens beteende behöver karaktäriseras i samband med olika brandkällor, både i form av gastankar och i form av fri gas.
 - I övrigt gäller dessutom samma kunskapsluckor som för biogas.
- Kondenserade gaser
 - Här finns en hel del erfarenhet från industri och annan användning och det gäller främst att följa utvecklingen och anpassa riktlinjer efter användning och användare.
- Flytande biobränslen
 - Släckning av större bränder
 - Självuppvärmning av kombination av flytande bränsle och adsorberande material.

Rapporten har även diskuterat områden fasta biobränslen och avfall. De skiljer sig från de presenterade energilagringssystemen och har sina risker och behov av studier. Nya avfallsfraktioner eller nya komponenter i befintliga fraktioner kan innebära nya risker och dessa behöver utredas och kvantifieras. Detta inkluderar kunskap om självuppvärmning, men även andra risker.

Följande kunskapsluckor och forskningsbehov kan speciellt nämnas för fastbiobränslen och avfall:

- Provningsmetoder för att kunna bedöma olika materials benägenhet för t.ex. självuppvärmning. Resultaten kan sedan användas ihop med riktlinjer.
- Analyser av självuppvärmningsbenägenhet hos fler och nya biobränslen och avfallsfraktioner.
- Metoder för att överföra befintliga lagringsriktlinjer till nya material och fraktioner. Till detta behövs även verifierande försök.
- Mer kunskap kring underliggande processerna för självuppvärmning.
- Framför allt för avfall, studier kring andra potentiell tändkällor än självuppvärmning, t.ex. krossade batterier.
- Mer kunskap om gas- och dammexplosioner vid lagring och hantering av biobränslen.
- Utvecklad kunskap kring och teknik för detektion.

Något som är giltigt för de flesta områden diskuterade i rapporten är att det är viktigt att säkerhetsforskningen och utvecklade riktlinjer hänger med utvecklingen av material och olika lagrings metoder. För att detta ska ske är det också viktigt att dra lärdom av inträffade incidenter. För att göra detta måste också incidentrapporteringen ske på ett

relevant sätt och därför kan det finnas anledning att se över hur rapporteringsmallarna ska vara utformade och att de hänger med i utvecklingen.

1 Introduktion

1.1 Kort bakgrund

Energilagring brukar man tala om när man vill göra energiproduktionen mer oberoende av konsumtionen och på det viset producera användbar energi när det är möjligt och effektivt för att senare kunna utnyttja energin då behovet finns. Energilagring kan också utnyttjas vid tillfällen då kostnaden för elproduktionen är låg. Det är alltså ett sätt att balansera tillgång och efterfrågan på el och annan energi. Det kan också handla om hushåll som vill ta hand om och lagra egenproducerad el, t.ex. från solcellspaneler, men även olika fastighetsägare som t.ex. Vasakronan. Energilagring är viktigt för att kunna kapa temporära effektbehov i nätet. Vi går idag mot ett allt större behov av stora infrastruktursatsningar för utbyggnad av effekten i elnätet drivet av t.ex. behov av att ladda eldrivna fordon. Lokal energilagring skulle avsevärt kunna minska detta behov och de komponenter som kräver el såsom eldrivna fordon skulle även kunna vara ett sätt att lagra energi. Energilagring kan även användas som avbrottsfri kraft för att säkerställa drift av viss känslig verksamhet eller för att helt enkelt göra energi tillgänglig där fast eltillförsel inte finns eller för att driva mobila enheter.

1.2 Syfte

Syftet med denna förstudie är att kartlägga olika relevanta s.k. energilager, inklusive olika typer av lagrad energi i form av t.ex. biobränslen och avfallsbränslen. Förstudien fokuserar på risker knutna till brand. I detta ingår även risker för explosion, t.ex. tryckökning p.g.a. brandutsatt tank eller antändning av explosiv gasblandning. I samband med bränder nämns även fall där det även finns relevanta risker för emission av speciellt toxiska gaser.

Målet med förstudien var att beskriva området och dess risker och utmaningar och peka på de delområden som behöver beforskas ytterligare. I uppdraget låg att inte begränsa detta till risker med olika metoder för lagring av producerad elenergi (se avsnitt 1.1), utan rapporten inkluderar även andra typer av lagrad energi, t.ex. biobränslen och avfallsbränslen, och risker med dessa.

1.3 Struktur

Olika metoder för energilagring beskrivs i Kapitel 2 medan olika risker kopplade till de för förstudien mest relevanta metoderna för energilager sammanfattas i Kapitel 3. Vidare sammanfattas kunskapsluckorna i Kapitel 4.

1.4 Metod

Huvudmetoden för förstudien har varit att sammanfatta resultat från olika forskningsprojekt, kompletterat med intervjuer och en översiktlig informationssökning. Informationssökningen har inkluderat både forskningslitteratur och andra informationskällor.

1.5 Avgränsningar

Målet med uppdraget och rapporten är att beskriva området och dess utmaningar på ett sådant sätt att det går att använda som underlag för diskussion om och planer för fortsatt forskning. Rapporten har inte som mål att lägga fram lösningar på olika utmaningar vad gäller brandsäker lagring.

Eftersom utvecklingen av olika delområden, både vad gäller tekniken som sådan och kunskap om olika risker, har olika mognadsgrad finns det också olika mycket att sammanfatta, vilket innebär att olika områden är olika omfattande och innehåller varierad mängd detaljer.

Det har inte heller funnits rum i denna mindre förstudie för en fullständig litteraturstudie. Den gör därför inte anspråk på att vara fullständig i sin beskrivning. Fokus har legat på att identifiera områden och dess risker och utmaningar, för att i det fortsatta arbetet få en bild av behovet av olika insatser.

Eftersom fokus ligger på risker knutna till brand, explosion och utsläpp av toxiska gaser, fokuseras främst på de energilager där dessa risker ansett vara mest relevanta. Vissa typer av energilager nämns därför endast väldigt kortfattat.

Notera att med "risk" menas i denna förstudie möjligheten för skadliga konsekvenser. Det görs inga försök att här kvantifiera riskerna i form av sannolikhet och konsekvens.

Vidare utvecklas vissa delområden snabbt och en uppföljning av denna utveckling får ses som en viktig del av den fortsatta forskningen (se även kapitel 4)

2 Metoder för energilagring

Med energilagring menas ofta lagring av elektrisk energi (Electrical energy storage, EES). Detta är något som har aktualiserats vid väderberoende produktion av förnybar energi. Med detta avses elektrisk energi från ett kraftnätverk eller elproduktionsanläggning som transformeras till en energiform som går att lagra för att sedan konverteras tillbaka till elektrisk energi då den behövs [1].

Den elektriska energin kan användas och konverteras på olika sätt för att åstadkomma olika typer av lagring. Den korta beskrivningen i sektion 2.1 är baserad på fem olika tekniker att lagra energi. Presentationen är inte avsedd att vara komplett eller detaljerad utan ska utgöra just en introduktion till området för att därefter kunna beskriva både vad som kan antas vara en tänkbar utveckling och relevanta risker som behöver undersökas ytterligare.

För att kunna relatera även till andra former av energi som här kan vara säkerhetsmässigt relevanta, inkluderas i rapporten också vissa andra material, även om de inte egentligen omfattas av vad man menar med energilagring. Detta nämns ytterligare i sektion 2.2.

2.1 Vanliga metoder för energilagring

Energilagring delas vanligen in i följande tekniker:

- Termisk
 - Termisk energi kan lagras på olika sätt:
 - Sensibel lagring
 - Ett medium lagrar energi utan att genomgå en fasomvandling
 - Exempel är varmvattentank (ackumulatortank), markvärmelager, akvifärer¹ (akvifer), bassänger, borrhål, värmelagring i byggstomme
 - Ett aktuellt exempel är det solkraftverk (Aurora) som konstrueras i Australien där solens strålar fokuseras av tusentals speglar för att värma ett flytande salt till 500 °C (det är detta som är den sensibla lagringen). Anläggningen kan sedan producera el på natten genom att saltet bildar (via en värmeväxlare) ånga som sedan kan driva en turbin för elproduktion. Tekniken kallas Concentrated solar power (CSP).
 - Latent värmelagring
 - Ett medium som lagrar energi då det genomgår en fasomvandling. Den vanligast förekommande fasövergången vid latent värmelagring är fast-flytande.

¹ Ett grundvattenmagasin, som har tillräckligt stor genomsläpplighet så att vatten kan utvinnas i användbara mängder.

- Exempel är olika paraffiner, salt-metallösningar och eutektiska legeringar där fasövergångar sker
- Kemisk värmelagring
 - Den termiska energin tas upp genom endoterma reaktioner och avges igen (som värme) då reaktionerna reverseras (exoterma)
- Elektrisk
 - Detta inkluderar t.ex. kondensatorer och supraledande magneter
- Mekanisk
 - Detta inkluderar t.ex. svänghjul, tryckluft, pumpkraft i dammar (PHS) PHES.
- Elektrokemisk
 - Detta inkluderar t.ex. flödesbatteri, Li-jon-batteri, NiMH batterier, traditionella startbatterier för bilar, "bilbatterier" som är av batteritypen blysyra (PbA).
- Kemisk
 - Detta inkluderar t.ex. vätgas (se avsnitt 3.2), metan (man kan producera vätgas för vidareproduktion av metan, vilken sedan kan lagras och distribueras för användning; för biogas se avsnitt 3.3), metanol
 - Den producerade elen används, ofta med hjälp av elektrolysör, till att spjälka vatten. Den vätgas som genereras kan användas till energilagring eller som råvara i processindustri. Vätgasen kan syntetiseras till andra tyngre energigas (Power to gas) eller till flytande bränsle (Power to liquid)

Notera att ovanstående sammanställning utgörs av exempel. Några av dessa har dock ansetts vara av speciellt intresse på grund av risk för brand och/eller explosion och valts ut att presenteras mer i detalj i kapitel 3.

2.2 Andra typer av lagrad energi

Utöver det som ovan beskrivs som energilagring finns det olika typer av lager av produkter/material som används som källa för energi, som också kan innebära risker av olika slag när det hanteras och lagras. Där finns t.ex. de traditionella bränslena som kol och olja. I denna rapport kommer fokus däremot att ligga på biobränslen och avfallsbränslen.

3 Utvalda typer av energilager och olika risker

Det finns risker med alla typer av energilagring och energilager. Här fokuseras på energilagringmetoder som ökat mycket eller som förväntas öka kraftigt. Ett speciellt fokus ligger också på brand, gasutsläpp, explosion och liknande risker. Det bör emellertid poängteras att riskerna inom en och samma grupp kan variera och att utvecklingen av tekniker går snabbt, vilket kan leda till minskade eller ökade risker, eller nya typer av risker. Därför är det i framtida forskning viktig att följa även sådan utveckling.

Avsnitten är strukturerade så att de inleds med en kort beskrivning av respektive område för att följas av en sammanfattning av identifierade riskområden.

3.1 Batterier

3.1.1 Batterier: beskrivning

Batterier brukar delas in i primärbatterier och sekundärbatterier [2]. Primärbatterierna är inte laddningsbara och används i leksaker, kalkylatorer, klockor, hörselapparater, ficklampor, kommunikationsutrustning m.m. Det finns olika batterityper/batterikemier som är primära. Litium-metall-batterier som också kallas litium-batterier är en vanlig icke-uppladdningsbar (primär) batterityp. Primärbatterierna finns allt från små knappceller till stora celler som används som reservkraft. Vanliga typer av primärbatterier är typ AA och AAA. Dessa finns även som sekundärbatterier. Sekundärbatterierna är laddningsbara. Några vanliga sekundärbatterier är Bly-syra-batterier (PbA), nickel-kadmium-batterier (NiCd), litiumjonbatterier (Li-jon) och nickel-metallhybridbatterier (NiMH).

Li-jon-batterier anses idag vara de modernaste och erbjuder en hög energitäthet, hög effekttäthet och lång livslängd. Detta innebär att batterierna kan göras mindre och lättare. Jämfört med andra batterityper så är säkerheten emellertid mer utmanande [2].

Intresset för elektrifieringen av fordon och andra maskiner ökar i allt snabbare takt då det ses som en ren form av energi som också kan ge en bättre arbetsmiljö när det kommer till t.ex. emissioner och buller. Li-jon-batterier är batteritypen som är i särklass vanligaste sorten även om NiMH också fortfarande används i t.ex. hybridfordon (t.ex. Toyota Prius).

I bostäder blir batterier allt vanligare, t.ex. i bärbara datorer. Användningen av batterier för ren energilagring i bostäder är nytt och kan ha olika syften: energibackup, stöttning vid specifika toppar och att kunna köpa el när det är billigt för att utnyttja den när behovet finns. Det kan även användas för att jämna ut variationer till följd av t.ex. moln som skuggar solceller eller förändring i vindhastighet [3]. Flera länder och regioner har även gjort specifika satsningar på energilager i form av batterier. En undersökning för svenska förhållanden visar att det inte bara är möjligt att sänka kostnader för fastigheter och bostadsrättsföreningar utan det kan även frigöra kapacitet

i elnäten [3]. Ett energilager kan även bidra till att utgöra ett filter för el från vindkraft som ibland kan skapa övertoner i elnäten. Utmaningarna består t.ex. i att kunna lita på att energilagren verkligen levererar, t.ex. om batterierna tappar kapacitet i slutet av sin livslängd.

Det är även aktuellt med lagring av energi i batterier när elen produceras i byggnaden eller i området, t.ex. via solceller, och där det finns begränsningar när det gäller hur elen får matas in i elnätet. Det senare kan omfatta rena batterilösningar eller batterilösningar i kombination med energipositiva distrikt (eller Positive Energy Neighbourhoods, PEN) [4]

Byggnader blir allt intelligentare i fråga om styrning och övervakning. Energismarta byggnader behöver också kunna hantera förnybar energiproduktion inom eller i närheten av byggnaden. Detta leder till nya utmaningar, t.ex. i form av energilager. Man talar numera även om plusenergiområden (positiva energidistrikt) eller plusenergihus där man skapar förutsättningar för att uppnå s.k. positiva "footprint". Ett led i detta är att kunna ta tillvara produktion av sol och vind då den produceras, men som kanske inte just då behövs för användning. Detta är speciellt viktigt för dessa intermittenta källor. Här spelar energilagring en avgörande roll för att jämna ut denna variation och minska behovet av att sälja elen vidare direkt. Detta ökar möjligheterna att utnyttja miljömässigt bättre produktionssätt. Ett energilager kan även jämna ut effektoppar s.k. peak-shaving och bidra till att stabilisera elnätet.

Kopplat till detta finns även den lokala produktionen av el samt nya system för distribution av el i byggnader (lågspänningssystem i form av likspänningsnät) [5, 6]. Intresset för lågspänningssystem, ofta 12 V, beror delvis på att denna spänningsnivå inte är omgärdad med lika omfattande regler som växelspänningsnät med högre spänningsnivåer. En konsekvens av detta är att det inte finns krav på behörighet hos installatören vilket kan medföra större risk för till exempel på grund av felaktiga installationer. Denna form av självförsörjande distrikt förväntas bli betydligt vanligare inom en snar framtid.

Det finns även en koppling mellan byggnader och fordon och när de kopplas ihop kan fordonen både fungera som energilager och som stor förbrukare. Eftersom dessa laddningssystem kräver stora effekter krävs en betydligt högre överföringskapacitet än den som normalt finns idag. För att ladda två elbilar samtidigt behöver byggnaden säkras upp till 25 A vilket är betydligt högre än vad som är vanligt idag. Om man har elvärme är en normalvilla emellertid ofta är säkrad med 25 A och huset tar större delen av detta, vilket innebär att det då krävs ännu större kapacitet för att dessutom ladda flera bilar. Förutom större risk vid hantering av högre effekter kan denna ökade belastning också belasta det befintliga elsystemet på ett inte alltid lättförutsägbart sätt. Den belastning som uppstår vid laddning av fordon i bostäder ackumuleras i överföringsnäten och kan ge upphov till ökade risker.

Batterilösningar i byggnader är även intressant för bilindustrin. Detta nämndes av GM redan för några år sedan då de konstaterade att då batteriet inte längre ansågs användbart i deras hybridbil, återstår hela 80 % lagringskapaciteten i batteriet [7]. Dock har den senare utvecklingen varit att bilindustrin vill kunna använda batterierna längre än till de 80 %. Dessutom har just hybridbilbatterier inte tillräcklig kapacitet lämpade för byggnader. Denna andra användning kan annars förlänga livslängden för batterierna, öka de ekonomiska fördelarna och minska avfallet. Det bör dock nämnas

att huruvida detta är en realistisk väg eller ej, helt och hållet beror på vilken strategi bil- och batteriföretagen har för sina batterier, d.v.s. om man i affärsidén har en plan för att sluta använda batterierna som batterier för drift av fordon innan de är helt förbrukade för det syftet. Om man använder dem tills de inte längre är lämpade som bilbatterier beror det oftast på att det har uppstått fel, t.ex. en obalans i batterier där det uppstått fel på någon eller några av cellerna. En möjlig lösning då är att laga/bygga om batteriet för fortsatt drift för annat användningsområde, men det innebär också en kostnad. En annan möjlighet är att byta ut batteriet för fordonsdrift när det fått lägre kapacitet, men innan det uppstått fel på det, för att skapa en andrahandsmarknad, men då måste detta, som nämnts ovan, finnas med i den ekonomiska planen. Hur batterierna faktiskt används och när de byts ut kan även bero på typ av fordon och användningsområde för fordonen.

Tillverkningen av batterier innebär en stor miljömässig belastning, både i form av de material (t.ex. metaller) som behövs och i form av energi vid produktionen. Brytning av de nödvändiga metallerna medför i sig en miljömässig belastning och en ökad hälsorisk vid själva arbetet. Denna brytning görs ofta i länder där arbetarna hälsa inte har högsta prioritet. Miljöbelastningen vid användning är emellertid relativt låg, även om det finns energiförluster som behöver räknas in [8]. Därför är det intressant att titta på hur batterierna kan användas på bästa sätt, både ekonomiskt och miljömässigt.

Det finns även många olika typer av batterier, med celltyper i olika generationer (inklusive olika batterikemier), och detta medför att det är svårt att generalisera hur batterierna kan komma att användas och hur kompatibla de är för olika användningsområden. Utvecklingen går också fort, både vad gäller själva batterierna och vad gäller säkerhetslösningar.

I Japan används redan batterier för energilagring i relativt stor utsträckning. Då används ofta NaS-batterier för stationär lagring [9]. Dessa har fördelen att ha hög energidensitet och de ekonomiska fördelarna ökar med storleken. Den höga arbetstemperaturen (245-350 °C [10]) och korrosiv natur har gjort att dessa batterier främst används just för stationär lagring. Därför finns det planer på att placera dessa batterier i djupborrhål för att tillgodogöra en viss del av den värme som naturligt finns där. Det skulle också minska energibehovet för uppvärmningen och ge högre verkningsgrad. Det har emellertid varit problem med bränder. Annars är även blysyrbatterier vanliga för energilagring i Japan, framför allt då i mindre skala.

Riksbyggen driver tillsammans med Johanneberg Science Park, Chalmers, Göteborgs universitet, Göteborgs energi, Göteborgs stad och RISE projektet "Positive Footprint Housing". Inom ramen för detta projekt tittar man på energilager. Projektets mål är att utveckla ett koncept för lagring av el i flerbostadshus med begagnade elbussbatterier. De som deltar aktivt i projektet är Volvo Bussar, Göteborg Energi, Riksbyggen och Brf Viva [8]. Forskningsprojektet har för avsikt att studera och utvärdera åtminstone följande områden när det gäller begagnade bussbatterier [8]:

- Lagring av lokalproducerad solel
- Effekthantering vid laddning av elfordon
- Effekthantering av hela fastighetens elanvändning
- Effekthantering utifrån behov i elnätet, fjärrstyrning
- Inköp av el efter Nordpools spotpris
- Samverkan med styrning av växling mellan fjärrvärme och bergvärme

- Samverkan med styrning av värmelager

Man bygger upp ett energilager på ungefär 200 kWh bestående av begagnade litium-jon-batterier från elbussar. Inflyttning i detta plusenergikvarter Brf Viva sker under 2018.

Ett annat exempel på energilager, som redan är igång, är byn Simris i Skåne där man byggt upp Sveriges första lokala energisystem som är baserat på sole, vindel och batteri. Ansvariga är E.ON som en del i EU-projektet InterFlex ("Interactions between automated energy systems and flexibilities brought by energy market players"). Projektet ska pågå fram till 2019 [11]. Det kommer att köras i form av s.k. "ödrift" (då man är bortkopplad från det allmänna elnätet) i en eller två veckor i taget. Det görs med hjälp av batterier med kapaciteten 330 kWh. Om det inte finns något tillskott från sol- eller vindkraft så räcker det till någon eller några timmars konsumtion av el för hela byn [11].

Falbygds Energi gjorde den första installationen av batterilager kopplat till elproduktion från vindkraftverk 2011. Även om batterilagret finns kvar har tekniken utvecklats och lagret är något utdaterat tekniskt sett.

Det finns även flera andra förstudier, projekt eller samarbeten på gång, t.ex.: Ferroamp Elektronik AB och Vasakronans samarbete kring installation av sole/DC-nät i Uppsala. Likströmsnätet är tänkt att kompletteras med ett energilager med Li-jon-batterier. Enligt Ferroamp är detta det första projektet där flera byggnader binds ihop i ett eget likströmsnät [12].

Ett annat exempel på samarbete är mellan Box of Energy, Eksta Bostads AB och Vasakronan där man studerat sol, biobränsle, fjärrvärme, passivhus med ny teknik.

Solkompaniet m.fl. har avslutat projektet "Solceller i flerbostadshus" 2017 [13], som studerat möjliga vägar runt de nuvarande reglerna kring skattereduktion för överskottsproduktion från solceller, som hittills begränsat utbyggnaden av solceller på många flerbostadshus. En sådan möjlighet är att installera batterilager i byggnaden för att minska mängden överskottsel som matas ut på elnätet. Det handlar då om att lagra överskottsel från dag till kväll och dessutom om att kunna kapa effektoppar vid andra tidpunkter.

Liknande frågeställningar studeras i projektet "Möjligheter och begränsningar för egenanvänd sole i Västra Gårdsten" som drivs av Chalmers, där man bl.a. tittar på hur mikronät på fastighetsnivå eller stadsdelsnivå kan fungera som ett sätt att komma runt de allmänna reglerna. Bland annat dras slutsatsen att det kan vara värdefullt att under vissa förhållanden kunna flytta sole till närliggande byggnad [14]

IRIS² (Integrated and Replicable Solutions for Co-Creation in Sustainable Cities) är ett femårigt EU-projekt, som pågår 2017-2022 där man studerar bl.a. energipositiva områden.

"Från sole till användare" är ett projekt som leds av RISE³. I projektet ska ett komplett system med sole, batterilager, laststyrning, likströmsnät och likströmlaster

² <https://www.johannebergsciencepark.com/en/node/17299>

³ <http://solartestbed.se/om-projekten/fran-solel-till-anvandare/>

demonstreras i Forskningsvillan hos RISE i Borås. Solceller levererar sin elproduktion i form av likström (DC). Allt fler produkter drivs idag primärt av DC och de flesta produkter kan drivas av DC. Vidare lagras även el i lokala batterilager i form av DC. Genom att gå över till ett likströmsnät kan många omvandlingsförluster undvikas. Kombinationen med interna batterilager och laststyrning gör det även möjligt att öka egenanvändningen av den genererade solel.

3.1.2 Batterier: risker

När det gäller batterier finns det ett antal områden och faser som kan innebära olika risker. Lager och transport av nya batterier innebär att ett stort antal batterier finns på samma plats, vilket kan innebära en risk, t.ex. vid en extern brand.

Extern påverkan eller interna fel på batteriet kan uppstå vilket kan leda till utsläpp av giftiga gaser, bränder eller explosioner.

Använda batterier behöver också kunna hanteras. Dessa batterier har oftast fortfarande elektrisk kraft i sig vilket dels betyder att högkapacitetsbatterier skulle kunna ha en andrahandsmarknad, s.k. second-life, dels att det fortfarande finns risker efter användning. Även i detta fall ska batterierna transporteras och mellanlagras. Li-jon-batterier säkerhetstestas endast som nya/fräscha batterier, d.v.s. med ingen eller liten åldring. Vid användning sker en åldring som kan medföra att batteriet ändras såväl kemiskt som fysiskt, vilket kan innebära att säkerhetsaspekterna ändras. Idag finns det högst begränsade studier på hur säkerheten påverkas under åldring [15]. Åldringen i sig är även komplex och det finns en mängd parametrar, t.ex. olika batterier, elektrisk användningscykel, temperatur, vibrationer etc. Det är viktigt att säkerheten studeras för åldrade batterier, för att undersöka potentiellt ändrade risker.

Slutligen ska batterierna tas om hand (EOL, end-of-life). Då finns det också olika fall. Batterier samlas in för att omhändertas, återvinnas, återanvändas eller liknande. Dessutom hamnar en del batterier felaktigt i andra avfallsfraktioner och utgör där en specifik risk eftersom det avfallet hanteras och behandlas utan hänsyn till risken att t.ex. krossa ett batteri [16]. Det är speciellt intressant att återvinna vissa mer värdefulla råvaror, dels för ett minskat råvaruutnyttjande, dels av strategiska skäl (försörjningssäkerhet). En metall som är kritisk för batterierna är kobolt. Mer än 50 % av världens försörjning av kobolt kommer från Demokratiska republiken Kongo (DRC, ofta kallad Kongo-Kinshasa) [17]. Det uppskattas att 20 % av den kobolt som exporteras från DRC kommer från arbete för hand med enkla verktyg ("artisanal mining"), ofta under mycket dåliga arbetsförhållanden och förekomst av barnarbete [17]. Denna typ av frågor är kopplade till politiska beslut, som kan påverka både användning och hantering. Detta kan i sin tur ha stor inverkan på vilka risker som uppstår.

Under hela kedjan (från nya batterier, via ursprunglig användning, till eventuella nya användningsområden, till omhändertagande av uttjänta batterier) finns det flera olika risker som åtminstone behöver utredas. Det är ett nytt område med nya användare. Om uttjänta elfordonsbatterier ska användas i nya applikationer behöver man på något vis ha några State of Health (SOH)-krav på batterierna för att de ska kunna komma ifråga för användning. Det finns i dagsläget ytterst begränsad forskning om SOH, framförallt i

relation till krav att ställa på hela system. Den batteriforskning som bedrivs handlar i regel om nya celler.

Installation i byggnader kommer att ställa krav både på installatörer och ägare/användare så att eventuella risker minimeras. Det kommer att behövas utbildning och installationsregler och eventuellt särskild behörighet för att göra installationen. Huruvida dagens byggregler täcker de installationer som kan bli aktuella är oklart. Boverket följer utvecklingen, men har i dagsläget inga konkreta planer på ändring av reglerna [18]. Enligt Johansson skulle detta kunna falla in under det allmänna avsnittet om brandceller. Det kräver emellertid att man läser in detta i beskrivningen.

NFPA (National Fire Protection Association) och dess affilierade Fire Protection Research Foundation har genomfört ett projekt med syfte att undersöka faror med energilagersystem med litiumjonbatterier [19]. Projektet innehöll dels en litteraturstudie och gapanalys, dels brand- och överhettningförsök med 100 kWh-batterier. Baserat på litteraturstudien fann de följande luckor och brister:

- inga publika brandförsöksdata som beskriver brandbeteendet hos ELS.
- Begränsat med publika brandförsöksdata relaterade till stora batteripack med cylindrisk utformning, för användning antingen i fordon eller fasta lagersystem.
- Inga brandförsöksdata eller publik information från verkliga brandincidenter som involverar bostad- eller kommersiella Li-jon-ELS och som illustrerar olika typer av faror för räddningstjänsten och/eller riktlinjer för brand- och räddningsinsatser.
- Begränsat med verkliga brandincidenter som involverar riktigt stora ELS.
- Begränsat med, avsaknad av, förvirrande eller motsägelsefulla riktlinjer i olika dokument (t.ex. elektriska, brand- och byggregler) om man ska använda det på Li-jonbatterier.
- Avsaknad av procedurer efter en brand.

Brandförsöken som genomfördes gav vid den externa branden inte upphov till några observerade projektiler eller explosioner och försöket med intern tändning (forcerad thermal runaway) ledde till slutsatsen att risken för brandspridning var minimal om angivna säkerhetsavstånd (brännbart material minst 6 fot (1,83 m) från fronten, 6 tum (0,152 m) från sidorna och baksidan, samt 5 fot (0,127 m) från toppen) följdes.

Utgående från projektet rekommenderade man följande fortsatta studier [19]:

- Forskning om insatstaktik mot och släckning av Li-jon-ELS bränder.
- Forskning om lämpliga procedurer och tillvägagångssätt efter en brand.
- Värmeutvecklingsmätningar från ELS
- Studier av vilken inverkan vind kan ha på spridning av brand från ett ELS till ett annat, eller till annat brännbart material.
- Studie av brandspridningsrisken inom matriser med ELSer nära varandra, d.v.s. från ett ELS till ett annat, eller till annat brännbart material.
- Försök med ELS i ett rum för att studera rummets effekt på brandbeteendet och på risken för emission av toxiska gaser.

- Studier av olika typer av ELS: olika tillverkare, olika batterikemier, olika storlekar m.m. för att analysera och utvärdera beteendet under brandförhållanden.
- Utveckla riktlinjer anpassade till ELSer, som sedan kan föras in i olika koder.

För amerikanska förhållanden har Office of Electrical Delivery and Energy Reliability (OE1) gett ut en rapport som beskriver dels vilka olika standarder som kan vara relevanta för olika typer av energilagringssystem (ELS), dels en procedur för hur man kan visa att ett visst ELS uppfyller lagar och bestämmelser innan det har hunnit utvecklas en standard som täcker det aktuella systemet [20]. Anledningen till detta är att kunna hantera den snabba utvecklingen av nya produkter, där det tar tid för standarder att utvecklas och där man ändå behöver procedurer för att visa att visst system uppfyller lagar och bestämmelser vad t.ex. gäller säkerhet.

Att släcka en brand i ett Li-jon-batteripack är en utmaning beroende på att det krävs avsevärd kylning och det är i många fall svårt att komma åt cellerna. Förberedda anslutningar för släckmedel skulle göra det betydligt enklare att släcka i händelse av brand. Men hur man ska angripa en brand i olika situationer är något som behöver studeras. Räddningstjänsten i New York har t.ex. rest en del frågor som Det Norske Veritas försöker svara på i en rapport [21]. Rapporten innehåller kommentarer och rekommendationer vad gäller t.ex. släckning och ventilation. Författarna rekommenderar bland annat ytterligare studier av hur mycket vatten som krävs för släckning.

FFI-projektet Räddningskedjan hade som mål att öka kunskapen kring potentiella haverikonsekvenser hos e-fordon. Detta resulterade i flera rapporter, bl.a. en rapport om tekniken, säkerhetsfunktioner och potentiella risker [22], och en webb-baserad kunskapssammanställning hos MSB⁴.

Exempel på andra amerikanska och internationella standarder, riktlinjer m.m. när det gäller ELS är:

- FM Global DS 5-33: "Electrical Energy Storage Systems" [23]
- UL 1973, Batteries for use in Light Electric Rail (LER) and Stationary Applications
- UL 1974, Standard for Evaluation for Repurposing Batteries
- UL 3001, Distributed Energy Generation and Storage systems
- UL 9540, Standard for Energy Storage Systems and Equipment
- NFPA 855, Standard on the Installation of Stationary Energy Storage Systems
- UN 38.3, Lithium metal and lithium ion batteries [24]

Placering av batterierna är en sak som antagligen kommer att behöva regleras på något sätt. Kanske bör man märka ut var batterilager finns på samma sätt som man gör för gasflaskor, eller så kanske det inte ska vara tillåtet att ha lagret i källaren. Detta är frågor som man bör ta ställning till i olika forskningsprojekt, vad blir konsekvenserna i de olika fallen. I Australien är industrin rädd för att marknaden för energilager "dödas" om inte ett förslag från Standards Australia ändras [25, 26]. I nuvarande förslag

⁴ <http://cursnet.srv.se/fortb/e-fordon/>

klassificeras samtliga litiumbatterier som "Fire Hazard Class 1" och för denna grupp gäller att [25]:

- a. Shall not be installed inside a domestic dwelling.
- b. Shall not be installed within 1 m of any access/egress area.
- c. Shall not be installed under any part of a domestic dwelling.

I Sverige är det för närvarande upp till räddningstjänsten att besluta om större lager, men räddningstjänsten saknar kunskapen och det finns osäkerheter kring hur detta ska hanteras.

En risk med litiumjonbatterier är den intensiva värmeutvecklingen i samband med brand. En ännu större risk kan emellertid produktionen av rök och olika ämnen vara [15, 27]. Elektrolyten i litiumjonbatterier är brännbar och innehåller litiumsalter (t.ex. litiumhexafluorofosfat, LiPF_6), som innehåller fluor. Fluor innebär specifika risker då det kan bilda vätefluorid (HF), se nedan. Alla kommersiella Li-jon-battericeller innehåller idag LiPF_6 -saltet. Det finns även andra potentiella fluorkällor inne i Li-jon battericellen, t.ex. PVdF som bindemedel i elektrodmaterialiet, eller fluorofosfater i elektroderna, fluorinnehållande flamskyddsmedel i elektrolyten.

Vid förhöjda temperaturer förgasas elektrolyten. Det gör att det interna trycket ökar, vilket kan leda till att cellen sväller. För att undvika alltför högt tryck designas cellerna så att gasen ventileras ut [2]. Ytterligare förhöjd temperatur kan leda till s.k. termisk rusning (thermal runaway), vilket kan resultera i ett mycket stort utsläpp av gaser, att cellen sprängs (visserligen inte troligt) och att en gasexplosion och/eller brand uppstår.

Det kan bildas ett stort antal komplexa giftiga gaser, både innehållande fluor och utan fluor. I en studie från 2016 identifierades över 100 olika gassubstanser [28]. Ett ämne som i många fall hittas i signifikanta mängder i samband med bränder (brandförsök) är HF. I några fall fanns även fosforylfluorid (POF_3). HF är mycket toxisk. POF_3 reagerar tillsammans med organiskt material eller vatten vidare till HF. Toxiciteten hos POF_3 är okänd, men genom att göra en kloranalogi anses den kunna vara mer toxisk än HF [27, 29]. En risk med vätefluorid är att den kan ta sig igenom huden och kan förstöra celler [30]. Om vätefluoriden istället andas in kan det ge upphov till skador på lungorna i form av lungödem och blödningar [30, 31]. Vätefluorid är också mycket irriterande för ögon, hud och luftvägar.

Idag finns enbart begränsade studier på gasutsläpp från Li-jon-batterier. Fokuset har varit på "traditionella brandgaser" så som CO och CO_2 samt på HF. Vidare så har dessa gaser uppmätts oftast vid brandtester och det är idag få eller inga studier på andra felfall, t.ex. gasutsläpp från överladdning eller mekanisk yttre påverkan.

Ett danskt examensarbete i form av en riskanalys, baserad på scenarier, visade att vid en redan befintlig brand (som startar i det ventilerade garage där batterierna antogs vara installerade) bidrar inte batterierna nämnvärt till själva branden. Däremot angavs brand i batterier kunna utgöra livsfara just p.g.a. de bildade gaserna [32].

I utvecklingen av Li-jon-battericeller har det gjorts olika insatser (t.ex. olika elektrodkemier och tillsatsämnen) för att minska förekomsten av brand från battericellen. Detta innebär att det vid en termisk rusning blir mindre vanligt med direkt brand/antändning av de enskilda battericellerna. Denna utveckling har troligen, även om det inte finns någon forskning på det, varit gynnsamt för mindre batterier, där

en cellbrand blir en tändkälla för större brandspridning. För stora batterisystem blir det dock mer komplicerat.

När det inte brinner så blir de utsläppta gaserna kvar istället. Dessa batterigaser är brännbara och om dessa samlas i ett inestängt eller delvis inestängt utrymme så finns det risk för antändning av dessa gaser, om det finns en tändkälla, och då kan en gasexplosion ske. En gasexplosion av en stor mängd gas kan bli kraftfull och orsaka stor fysisk skada. En mindre brand i begagnade Li-jon-celler kan därför leda till för en gasexplosion. Det bör emellertid nämnas att dessa gaser inte alltid är lättantändliga och det kan krävas speciella förutsättningar för att de faktiskt ska antändas. Risken är också störst för större batterier, t.ex. i rena elbilar jämfört med hybridbilar. I fallet direkt cellbrand så är risken för ansamling av gaser närmast att betrakta som obefintlig och således kan ej gasexplosion ske av dessa gaser.

För fallet med stora batterisystem så kan det utifrån ett helhetsperspektiv med hänsyn till omgivningsfaktorer vara en fördel att battericellen brinner för att bli av med energin, samt troligen brinner renare, vilken då måste hanteras genom t.ex. släckning.

.

3.1.3 Transporter av batterier

En viktig del av hanteringen av batterier, speciellt vad gäller begagnade batterier, är transporter. Begagnade batterier kommer att behöva transporteras, separat och i större antal på samma gång. Det handlar både om transporter av batterier för omhändertagande efter användning och för sekundär användning i form av stationärt energilager. Detta innebär också att det kan komma att byggas upp stora mellanlager, både inför fortsatt transport och före omhändertagande, olika återvinning-/återanvändningsprocesser etc.

Batterier räknas som farligt gods och för väg beskrivs hantering av detta i ADR-S (krav finns även för andra transportsätt) [33]. Värt att notera är att när batteriet sitter i elfordon så anses de ej som farligt gods. Det finns även en så kallad särbestämmelse 188, vilken innebär lättnader från reglerna för transport av farligt gods. Detta gäller för icke laddningsbara litiumbatterier med högst 2 g litium och laddningsbart litiumjonbatteri med en nominell energi om högst 100 Wh.

För skadade eller defekta batterier gäller särbestämmelse 376 i ADR när något av följande råder (inte begränsat till) [33]:

- celler eller batterier som konstaterats som felaktiga av säkerhetsskäl,
- celler eller batterier som har läckt vätska eller gas,
- celler eller batterier som inte kan undersökas före transport, eller
- celler eller batterier som har bestående fysiska och mekaniska skador.

För transport enligt särbestämmelse 376 med avsändare i Sverige kräver godkännande av MSB [34].

Begagnade batterier, utan felkoder, betraktas transportmässigt som nya batterier. Detta gäller dock inte om batterierna ska skrotas för då gäller speciella bestämmelser för transporten.

3.2 Vätgas, bränsleceller

3.2.1 Vätgas, bränsleceller: beskrivning

Forskningen på vätgas och bränsleceller har i Sverige de senaste åren halkat efter många andra länder då svenska forskningsfinansiärer valt att satsa på andra energibärare. Trots detta har en utveckling skett både utomlands och i Sverige och det kommer allt fler exempel på tekniker som fungerar och lanserade produkter. Det är därför viktigt att både se potentialen hos vätgas och bränsleceller och de risker som kan finnas med denna energibärare och teknik

Vätgas finns inte i rent tillstånd i naturen och är därför ingen primär energikälla. Vätgas kallas därför i stället för energibärare och har visat sig intressant just för energilagring.

Vätgas utgörs av en väldigt liten molekyl med hög diffusionsbenägenhet. Därför fungerar vanligt kolstål dåligt som material i tankarna; istället används vanligtvis rostfritt stål [35].

Vanligen hanteras vätgasen i komprimerad form, inom industrin ofta med trycket 200 bar. För fordon komprimeras gasen ytterligare, till 350 bar eller 700 bar. Det går att förvätska/kondensera vätgasen för att hantera och transportera den flytande. Det innebär att det går att transportera mer energi per volymenhet. Det krävs dock energi för att kyla gasen till $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$ och det är relativt kostsamt. Det kräver också att gasen lagras i speciella kryotankar, vilket innebär att transport framför allt på tåg och i tankbilar kan vara aktuellt. Vätgas kan användas i förbränningsmotorer, men nu för tiden talar man huvudsakligen om bränsleceller i samband med vätgas.

Bränsleceller är ingen ny uppfinning utan principen demonstrerades av Humphry Davy redan i början på 1800-talet. I en bränslecell sker en kemisk reaktion mellan ett bränsle (här vätgas) och syre, och konverterar kemisk energi till elektrisk energi. Bränslecellen är därför i princip ett batteri, men där det behövs tillförsel av ett bränsle. Protonerna får vandra genom en elektrolyt medan elektronerna leds genom en elektrisk ledare. Detta skapar en ström. Vid katoden möts protonerna och elektronerna och det bildas vatten vid reaktion med syre. Det finns olika tekniker för bränsleceller, men en vanlig teknik inom fordonsindustrin är med ett s.k. PEM-membran (proton-exchange membrane).

Även för andra användningsområden än för fordon utvecklas bränsleceller. Så kallade micro-CHP (combined heat and power) med bränsleceller blev kommersiellt tillgängliga i Japan 2009.

Till fördelarna med bränsleceller nämns att de inte behöver laddas, hög effektivitet, inte ger upphov till buller, inte släpper ut några giftiga gaser, kan användas för kontinuerlig drift. Det finns emellertid också vissa nackdelar. De är fortfarande relativt dyra och det finns en osäkerhet kring livslängden. För att upprätthålla det senare krävs också en avancerad styrning av t.ex. temperaturen. Att bränslecellen just kräver ett bränsle är en nackdel jämfört med ett batteri. Andra nackdelar är att infrastrukturen ännu inte är utbyggd och vätgasen därför inte är lättillgänglig. Vätgas har också en låg energidensitet. Att den dessutom är dyr att komprimera gör lagringen och hanteringen

omständlig. Det finns också säkerhetsrisker med vätgas (se avsnitt 3.2.2). Antalet vätgasfordon är också än så länge begränsat.

Förnybar vätgas kan förvisso användas som energilager och/eller som bränsle i exempelvis bränslecellsfordon, men har troligtvis sin största potential i processer som ersätter fossila råmaterial och/eller energibärare inom olika industriella sektorer inom t.ex. stål-, kemi- och biobränsleproduktion. Vidare kan elektro-vätgas användas för att binda större koldioxidutsläpp från t.ex. biogasanläggningar, stål- eller cementindustrin och via så kallade elektrobränsleprocesser (power-to-gas eller power-to-bränsle) generera värdefulla produkter som metan och metanol i en cirkulär ekonomi.

Man ska dock vara medveten om att producera vätgas genom elektrolys är en dyr process.

3.2.2 Vätgas, bränsleceller: risker

Vätgas är en färglös, luktlös och icke-toxisk gas, men som med alla gaser finns en kvävningsrisk vid läckage. Ämnen med viss lukt tillsätts därför till vätgas för att underlätta upptäckt av läckage, men man kan inte göra det till vätgas som ska användas i bränsleceller då denna applikation kräver hög renhetsgrad [36].

Något som är speciellt med vätgas i jämförelse med andra gaser (t.ex. metan (biogas)) är dess stora brännbarhetsområde (4 – 75 vol-%) och låga antändningsenergi (0,015 mJ). Även de höga trycken i förvaringstankarna utgör en kraftig explosionsrisk. Vätgastankarna är utrustade med s.k. TPRD (temperature pressure relief device), vilket är en tryckavlastningsventil som löser ut på förhöjd temperatur (vid 110 °C). När ventilen väl öppnar töms tankens hela innehåll. Precis som för biogas kan det uppstå olika scenarier om säkerhetsventilen löser ut (antingen som följd av en brand eller felaktigt). För vätgastankar har TPRD ofta en diameter på 5 mm för att vara dimensionerad att tömma tanken på ca 30 s [37].

Vätgasmolekylen är en liten molekyl. Det innebär att den kan diffundera genom material som normalt är täta för andra gaser. Detta kan utgöra en signifikant explosionsrisk. Å andra sidan blandar sig vätgasmolekylen snabbt i luft och faran för explosion är därför snabbt övergående. Gasen kan emellertid ansamlas under tak och därmed utgöra en risk för explosion.

Eftersom vätgas kan lagras vid mycket låga temperaturer finns det risk för kryogeniska skador.

Ett av de mer säkra sätten att lagra vätgas är i porösa metallhydrider. Dock så blir en sådan lagringslösning orimligt tung, en faktor närmare 100 visavi den lagrade massan av vätgasen.

Används bränsleceller i fordon (tillverkade av ledande material) bör man vara medveten om att det finns risk för kortslutning och en kraftig ljusbåge.

3.3 Biogas

3.3.1 Biogas: beskrivning

Eftersom både biogas och naturgas till största delen består av metan så görs det i texten referenser också till naturgas. Huvudanledningen till detta är att de säkerhetsmässigt är likartade, men det finns fortfarande mest statistik kring naturgas (om det över huvud taget ifrån källorna går att läsa ut vilken av gaserna det är). Det finns därför intressanta erfarenheter att dra från användningen av naturgas, även om fokus här är på användningen av biogas.

Det finns olika metoder för att framställa biogas (biometan). Den vanligaste processen är rötning där mikroorganismer bryter ner avfall och annat organiskt material i en syrefri miljö. Det finns 279 anläggningar som producerar biogas i Sverige. Dessa producerade under 2016 biogas motsvarande 2018 GWh⁵. Under 2016 uppgraderades 64 % av biogasen för att kunna användas som fordonsgas eller tillföras naturgasnätet.

3.3.2 Biogas: risker

Biogas som produceras genom anaerob förgasning består av metan och koldioxid, med mindre mängder vätesulfid, ammoniak och andra gaser. Var och en av dessa gaser utgör säkerhetsproblem. Metan, vätesulfid och ammoniak utgör explosionsrisker, och då även biogasen. Risk för kvävning kan också förekomma eftersom flera gaser är tyngre än luft. Risk för kvävning kan alltid förekomma i icke-ventilerade utrymmen. Man bör dessutom särskilt uppmärksamma vätesulfidförgiftning eftersom vätesulfid är synnerligen giftigt. Koncentrationer så låga som på ppm-nivåer utgör signifikanta hälsorisker. Vätessulfiden reagerar dessutom med eventuellt Pb i ventiler och kopplingar av mässing. Rötkammaren måste vara luftfri, bland annat på grund av explosionsrisk vid blandning av biogas med luft. Eftersom biogas framställs genom rötning finns också risk för sjukdomsspridning genom bakterier.

Det finns ett antal sammanställningar gjorda av risker med bio-/naturgas (metan) [36, 38], men det finns fortfarande en hel del kunskap som behövs för att kunna kvantifiera olika egenskaper och beteenden.

Biogas och naturgas lagras i gastankar med tryck upp till 260 bar. Dock är 230 bar det högsta tankningstryck som används i Sverige enligt MSB [39].

Det finns fyra olika typer av tankar [40]:

1. Metallbehållare (Typ 1)
2. Metallbehållare som är täckt med kompositmaterial, utom i ändarna (Typ 2)
3. Metallbehållare helt täckt med kompositmaterial (Typ 3)
4. Plastbehållare (icke-metall) helt täckt med kompositmaterial (Typ 4)

Typ 1 och Typ 4 är de vanligaste.

⁵ Källa: <http://www.energigas.se/fakta-om-gas/biogas/statistik-om-biogas/>.

Tankarna ska ha säkerhetsventiler som löser ut vid en bestämd temperatur (110 °C). Vissa har dessutom en säkerhetsventil som löser ut vid ett bestämt tryck.

En amerikansk studie från 2013 visade att explosion av tankar är den vanligaste gastanksincidenten (naturgas, CNG) med 50 fall under perioden 1976-2010 [41]. Detta kan delvis bero på att mindre farliga incidenter inte rapporteras i samma omfattning. Explosioner av fordonstankar har inträffat dels i samband med tankning, dels i samband med bränder, där tanken hettas upp snabbt eller lokalt så att säkerhetsventilen inte hinner lösa ut eller om säkerhetsventilen av någon anledning inte fungerar. Exempel på olyckor är Indianapolis 2015 (sopbil där 5 tankar på toppen av sopbilen exploderade och skickade iväg tankarna 400 m); Göteborg 2016 (två brandmän skadades när en tank exploderade under släckningsarbetet); Sverige 2016 (en av fyra tankar exploderade under en brand där säkerhetsventilerna på två tankar löste ut och en tank saknades). Dessutom kan en gasexplosion inträffa om läckande gas samlas upp och skapar ett gasmoln med en koncentration inom explosionsgränserna och sedan utsätts för en tändkälla. Metan är lättare än luft (relativ densitet på 0,6) och stiger därför och ansamlas under taket ut stängda utrymmen. Dödsfall p.g.a. den direkta tryckvågen vid en explosion är ovanliga [36, 42]. Istället handlar det ofta om indirekta orsaker p.g.a. brand, flygande objekt eller byggnadsdelar som kollapsar.

Om säkerhetsventilerna på tankarna fungerar som det är tänkt under en brand kommer de att lösa ut och släppa ut gas för att minska risken för en explosion. Om gas strömmar ut, från en riktigt eller felaktigt utlöst ventil, kan olika scenarier uppstå: 1) gasen kan snabbt spädas ut till icke-explosiv blandning, 2) gasen ansamlas i någon punkt eller utrymme med risk att antändas senare, eller 3) antänds omedelbart vid utströmning.

En jetflamma från ett läckande rör eller från säkerhetsventilen kan (om olyckligt riktad) påverka andra trycksatta gastankar. Enligt UNECE R.110 ska ventilen vara riktad så att vidare exponering av tanken för brand inte sker [40], men ofta kan det ändå ske att delar av det aktuella fordonet eller andra fordon exponeras [36]. Dessutom kan de långa flammorna utgöra ett hot både mot personer (t.ex. räddningstjänsten) och för brandspridning till andra fordon, byggnader eller vegetation [38, 43].

Ett fel som kan inträffa, och som har inträffat (se ovan), är att säkerhetsventilen inte löser ut trots att tanken utsätts för intensiv värme, t.ex. från en brand. Om värmepåverkan t.ex. är lokal kan tanken värmas upp till en kritisk nivå innan temperatursärkring värms upp och löser ut.

Som i andra fall, är det viktigt att gassystem och säkerhetssystem verkligen fungerar, även efter lång tids användning och efter olika incidenter. Olyckor och incidenter kan utgöra en risk även om inget upptäcks i direkt efter incidenten. Det finns flera exempel på olyckor som kan härledas till tidigare olyckor eller verkstadsbesök. För verkstäder är det också viktigt att ha riktlinjer för att på ett säkert sätt hantera de risker som finns med olika energibärare. När det gäller riktlinjer för gasdrivna fordon så har MSB publicerat en handbok för räddningsinsatser med gasdrivna personbilar där de samlat information dels om konstruktionen av dessa fordon och vilka risker som finns, dels vad man bör tänka på vid räddningsinsatser [44]. Exempel på risker som nämns, utöver vad som diskuterats ovan, är:

- Om tankarna sitter inne i fordonet och fordonet deformeras efter kollision bakifrån kan ett läckage uppstå inne i kupén.

- Det är osäkert hur de falsventiler och smältsäkringar, som är placerade i en gastät kapsling (vilken ventileras till det fria), beter sig vid kollision och det kan inte uteslutas att gas efter kollision läcker in i kupén i stället för ut i det fria.

MSB har, som nämndes ovan, gjort en sammanställning av statistik, olika incidenter och standarder för gasdrivna fordon [38]. Några av de generella slutsatserna från det arbetet var att man bör:

- analysera de olika riskerna för denna typ av fordon och försöka optimera insatsmetodiken, t.ex. huruvida tuber ska kylas eller ej.
- införa obligatorisk besiktning av gassystem och gastankar
- initiera en utveckling för en svensk/europeisk standard på fordons gassystem, t.ex. vad gäller dragning av högtrycksledningar, riktning för utblåset från säkerhetsventilsystem samt typ av säkerhetsventil (temperatur eller tryck)
- införa obligatorisk och tydlig märkning av gasfordon
- stimulera utveckling av släcksystem i fordonen
- initiera utbildningsinsatser, t.ex. av bussoperatörer.

3.4 Kondenserade gaser

3.4.1 kondenserade gaser: beskrivning

Tryckkondenserade gas som gasol och DME (dimetyleter) innebär att de kondenseras vid förhöjt tryck. DME är ett relativt nytt bibränsle med liknande egenskaper som gasol. Även om fokus i denna rapport är på nya energibärare och bibränslen nämns gasol här eftersom det finns mycket mer erfarenhet av användning av gasol i fordon än t.ex. DME.

Gasol som bränsle för fordon kallas för motorgas. Det är ett förhållandevis dyrt bränsle och klassas inte som miljöbränsle. Motorgasbilar går att tanka på 35 platser i Sverige [44]. Motorgasen lagras tryckkondenserad i tanken vid ett driftryck på ungefär 10 bar.

3.4.2 Kondenserade gaser: risker

Om det blir en läcka eller ett brandscenario beter sig gasol och DME på likartat sätt [36]. Om läckan sker över vätskelinjen kommer ett gasmoln att bildas. Flödet avtar allteftersom trycket faller. Om läckan sker under vätskelinjen så kommer vätska att rinna ut som sedan snabbt förgasas. Om läckan är stor kan emellertid en vätskepöl bildas, vilken sedan mer långsamt förgasas, eftersom den utströmmande vätskan också kyler ner marken.

Vid en brand ökar förgasningen i tanken, vilket leder till att trycket ökar. Tankarna är utrustade med tryckavlastningsventil, vilken ska lösa ut vid ett visst övertryck. Hög termisk belastning kan innebära risk för att tryckavlastningsventilerna inte har kapacitet att hantera all gas som förgasas [36]. Detta kan leda till att tanken slutligen rämnar och att en BLEVE uppstår.

3.5 Fasta biobränslen

3.5.1 Fasta biobränslen: beskrivning

Fasta biobränslen (liksom avfall som beskrivs i avsnitt 3.6) skiljer sig naturligtvis väsentligt från de typer av energilager och energibärare som beskrivits ovan. Anledningen till att dessa avsnitt finns med är att trots att det forskats kring säkerhet inom dessa områden saknas det fortfarande en hel del kunskap, t.ex. kring bakomliggande processer. Dessutom varierar tillgänglig kunskap mycket mellan olika typer av material inom materialgrupperna. Det inträffar också relativt ofta incidenter i form av bränder och explosioner. Därför fanns det önskemål om att inkludera även dessa bränslen i denna förstudie.

Det har forskats en hel del genom åren för att ta fram nya fasta biobränslen, t.ex. i form av energigrödor, men det mesta av bioenergin som tillförs energisystemet kommer från skogen [45]. Om man bortser från de restprodukter från massaindustrin som till stor del används av industrin själv, så utgörs en stor del av den tillförda bioenergi av sönderdelade trädbränslen i form av ved, flis och pellets.

3.5.2 Fasta biobränslen: risker

Kunskaperna om säkerhet och risker i samband med lagring och hantering av olika (fasta) biobränslen är ganska skev och inom vissa områden finns det relativt mycket gjort. Under 2008 genomfördes en förstudie på uppdrag av Brandforsk angående trender och kunskapsläget inom området biobränslen och avfall och för att skapa underlag för ett större forskningsprogram [46]. Rapporten sammanfattar aktuell produktion, hantering och lagring av fasta, gasformiga och vätskeformiga biobränslen samt avfall. Dessutom ges exempel på inträffade bränder och presenteras existerande riktlinjer. En summering av olika problemställningar leder fram till ett förslag på forskningsprogram. Forskningsprogrammet [47] var senare på god väg att startas som ett samarbete mellan Brandforsk och Värmeforsk, men satsningen fick avbrytas på grund av bristande finansiering. Vissa delar av det föreslagna forskningsprogrammet har därefter trots allt genomförts som separata forskningsprojekt. Det gäller framför allt statistik och erfarenhetssammanställningar.

Förstudien identifierade några existerande riktlinjer. Några exempel är riktlinjer för lagring av olika typer av sönderdelat trädbränsle [48], baserade på försök genomförda av Thörnqvist på 1980-talet [49]. Dessa riktlinjer har sedan legat till grund för många efterföljande riktlinjer. Det är emellertid önskvärt att studera detta område ytterligare, dels för att få ett större underlag, dels för att öka möjligheterna att skapa riktlinjer för andra och nya biobränslen.

Ett annat exempel i förstudien är Trygg-Hansas riktlinjer [50] för träpellets, både vad gäller planlager och silor. Under tiden för förstudien pågick ett nordiskt samarbete för riktlinjer för hantering och lagring av fasta biobränslen. De publicerade strax efter förstudiens färdigställande [51].

RISE har genomfört ett flertal forskningsprojekt om självuppvärmning av fasta biobränslen och kring släckning av eventuella bränder. Det har varit ett speciellt fokus på biomassapellets. Forskning på pellets var från början fokuserad på dels

självuppvärmning i olika skalor och släckning av bränder i silor. Detta har t.ex. inkluderat två internationella projekt: det danska projektet LUBA och EU-projektet SafePellets. Sammantaget har detta resulterat i flera publikationer [52-56]. Arbetet har även legat till grund till pågående arbete med att utveckla internationella standarder inom ISO/TC238/WG7 (Safety of solid biofuels). Arbetet och diskussioner inom den arbetsgruppen har ökat och spridit kunskap specifik om säkerhet när det gäller hantering och lagring av biomassapellets.

Även i Kanada har det genomförts en hel del forskning kring avgasning från respektive självuppvärmning av pellets. Ett sådant exempel är doktorsavhandlingen av Guo från 2013 [57].

Trots den omfattande forskningen om pellets finns det fortfarande frågor att besvara. Exempel på frågor är:

- Vilka är de underliggande processerna?
- Hur förändras processerna vid olika temperaturer?
- Vilka parametrar (t.ex. råmaterial, historik, produktionsparametrar) inverkar mest? Här finns redan en hel del gjort, men resultaten är inte helt entydiga och det behövs mer studier nu när grunden är lagd.
- Vilken inverkan har nya råmaterial och blandningar på benägenheten för självuppvärmning?

Andra risker med lagring och transport av pellets är emissioner (avgasning). Flera studier av avgasning och försök till att förklara dess orsaker finns tillgängliga i litteraturen [58, 59]. Detta är fenomen som orsakat ett flertal dödsolyckor, både i Sverige och utomlands, och som måste tas på största allvar [60, 61]. Ovan nämnda SafePellets-studie kring träpellets visar också att förutom brandincidenter så upplever pelletsindustrin problem med avgasning, d.v.s. bildning av kolmonoxid inne i pelletslager.

Som en fortsättning på ovan nämnda förstudie och en av studierna inom SafePellets, genomfördes inom ramen för ett Brandforsk-projekt en sammanställning av statistik för hur bibränslen och avfall lagras samt statistik för inträffade bränder [62]. I projektet analyserades data från MSBs databas över inrapporterade insatser från landets räddningstjänster. Det visade att antalet bränder som kan anses relevanta för industriell hantering och lagring av bibränsle och avfall under 2005-2013 i genomsnitt uppgått till ca 200 st per år. Av dessa bränder utgjorde ungefär 25 % brand i byggnader och resterande 75 % brand i utomhuslager. Det vanligaste brandobjektet i byggnader var kraft-/värmeverk medan brand i stackar/högar av lagrat material var vanligast utomhus. Självantändning var i båda fallen den vanligaste angivna brandorsaken. Brand i processmaskiner och transportörer är också relativt vanligt. Det material som tycks vara mest återkommande i bränderna utomhus är flis, bark, sågspån, torv samt GROT.

Vid hantering av fasta bibränslen finns också stor risk för dammexplosioner om man inte hanterar materialet och processerna på rätt sätt, genom att minimera produktion av damm, se till att damm inte ansamlas, samt undvika tändkällor.

Emissioner (avgasning), självuppvärmning, brandspridning, dammexplosioner och liknande frågor vid hantering och lagring av träpellets diskuteras även inom

arbetsgruppen ISO/TC238/WG7 och några vägledande standarder förväntas inom 1-2 år.

3.6 Avfall

3.6.1 Avfall: beskrivning

Avfall har vissa likheter med fasta biobränslen, t.ex. i det sätt det lagras. Det finns emellertid också stora skillnader. Avfall är betydligt mer heterogent än fasta biobränsle. Avfallskedjan innehåller också vissa andra steg i form av hantering och förbehandling. Likheter när det gäller vissa risker, t.ex. självuppvärmning, gör dock att områdena kan dra lärdom av varandra och precis som för fasta biobränslen fanns det ett önskemål om att ta med även avfall i denna förstudie.

3.6.2 Avfall: risker

Den ovan nämnda förstudien från 2008 åt Brandforsk inkluderade även området lagring och hantering av avfall [46]. Även i detta fall ledde det arbetet till en beskrivning av forskningsbehovet och det ovan nämnda forskningsprogrammet [47]. Ett begränsat antal rekommendationer/riktlinjer identifierades i förstudien. Ett sådant exempel är när RVF (numera Avfall Sverige) 2003 gav ut vissa råd för deponier och förbränningsanläggningar [63]. Olika aspekter på brandrisker vid avfallsanläggningar hanterades även i Ibrahims doktorsavhandling [64].

Den ovan nämnda MSB-statistiken tillsammans med enkätsvar inom samma projekt visar att brand i utomhuslager är förhållandevis frekvent och att bränder vid avfallsanläggningar därför heller inte är ovanliga. En orsak är att avfallet kan variera avsevärt då man har begränsad möjlighet att styra sammansättningen och detta gäller speciellt inkommande industriavfall och motsvarande, innan detta sorterats ute på anläggningen. Behovet av en väl fungerade mottagningskontroll har även identifierats i ett nyss avslutat Avfall Sverige-projekt med syftet att sammanställa den erfarenhet som finns ute på avfallsanläggningar angående inträffande bränder och utfört förebyggande och säkerhetsarbete [65]. Rapporten innehåller bl.a. drygt 30 rekommendationer kring lagring och hantering av avfall på avfallsanläggningar och olika säkerhetshöjande åtgärder.

Statistikprojektet [62] visar att omkring 70 % av bränderna upptäcks visuellt genom observation av rök, synliga flammor och lukt. Användning av videoövervakning och IR-kameror kan dock förväntas öka i framtiden. Det har emellertid visat sig att detektion hör till ett av de områden där det efterfrågas mer kunskap och utveckling.

Avfall Sverige har givit ut riktlinjer för brandriskanalys [66], vilka har givit en struktur för arbetet och dessa riktlinjer används ofta inom branschen. Det är dock tydligt att det i många fall saknas relevant information att använda som indata för analyserna; här behövs bättre kunskap.

Ett annat pågående Avfall Sverige-projekt syftar till att ta fram en provningsmetod för avfall för att kunna bestämma självuppvärmningsegenskaperna hos olika avfallsfraktioner eller blandningar av olika material. Detta är viktigt dels för att förstå

vilka parametrar som är centrala vid självuppvärmning, dels för att på ett relevant sätt kunna karaktärisera olika materialfraktioner och deras benägenhet för självuppvärmning.

Waste Industry Safety and Health Forum (WISH) i England har publicerat riktlinjer för att reducera risker i samband med avfallshantering [67]. Rapporten innehåller mycket användbar information, men behöver analyseras i relation till svenska förhållanden. Rekommendationerna bygger på ett stort antal genomförda brandförsök. Försöksresultaten är emellertid inte publicerade ännu och tolkningen och utvärdering av riktlinjerna kommer att bli lättare när försöksresultaten finns tillgängliga.

Även för säkerhet vid hantering av avfall finns det en arbetsgrupp inom ISO: ISO/TC300/WG6. Det arbetet har emellertid visat att trots att det finns både forskningsresultat och erfarenhet från inträffade bränder så ligger standardiseringsarbetet efter arbetet med t.ex. träpellets. Till stor del beror detta på att avfall som material är mycket mer heterogent än träpellets, även om det finns stora variationer även mellan olika typer av träpellets. Ett exempel på viss typ av avfall som internationellt ställt till med mycket besvär är avfall i Japan efter jordbävnings- och tsunamiolyckan i Fukushima där flera bränder startat i avfall/rester p.g.a. självuppvärmning.

Bränder i avfallslager har uppmärksammats under hösten 2017 och den uttryckta känslan av att antalet bränder ökar kan till viss del styrkas av statistik från de senare åren.

Ett problem med avfallsbränslen är att de produceras relativt jämnt över året medan efterfrågan på denna typ av bränslen är störst på vinterhalvåret. Detta kan leda till relativt stora lager, vilket utgör olika risker. Ett stort lager (med stora högar) ökar risken för självuppvärmning med självantändning som följd. Stora högar, kanske i kombination med begränsat med utrymme mellan högarna, ökar också risken för brandspridning samtidigt som det försvårar släckningsarbetet för räddningstjänsten vid en eventuell brand.

Med anknytning till innehållet i denna rapport har det föreslagits att värmelager skulle kunna vara en lösning på problemet, d.v.s. att låta värmepannorna vara igång under hela året och sedan under sommarhalvåret lagra värmen till dess att den behövs.

3.7 Risker vid elproduktion

Denna förstudie har fokus på lagring av energi och hanteringen kring detta, men eftersom vissa osäkerheter eller risker har identifierats även vid produktion av el, t.ex. vindel och solel, kan man tänka sig ett behov av att studera det också.

Sveriges solelmarknad växer allt fortare och varje år driftsätts både fler och allt större system. Under 2016 installerades nästan 80 MWp (peak) solel, av ett ökande antal aktiva projektörer och installatörer. Utvecklingen har medfört ett bredare produktsortiment, nya systemlösningar, tuffare konkurrens och mindre marginaler för involverade aktörer.

Elsäkerhetsverket har konstaterat ett behov av tydligare ansvarsfördelning och stor brist på målgruppsanpassad information till involverade aktörer för att system skall installeras, driftsättas och underhållas på ett säkert sätt [68]. Likaså påtalar marknadens aktörer ofta brister inom området brandskydd och elsäkerhet vad gäller rekommendationer, vilket leder till otydliga upphandlingsunderlag. Följden blir osund priskonkurrens och avsevärda variationer vad gäller installationernas utförande och därmed stor risk för anläggningar som inte motsvarar de krav som önskas på den svenska marknaden.

IEA (International Energy Agency) gav 2017 ut en sammanställning av riktlinjer från några utvalda länder (Japan, USA och Tyskland) angående räddningstjänstinsatser mot bränder som involverar solceller [69]. Rapporten innehåller även riktlinjer för installationen med tanke på räddningstjänstinsats. De identifierade följande risker för räddningspersonal nära solceller (som installerats på tak):

- Elektrisk stöt eller brännskada (vid kontakt eller vid användning av vatten)
- Halk- och fallolyckor
- Kollaps av tak (med den större belastning (dödvikt) som
- Ljusbåge och jordfel
- Förbränning och utsläpp av farliga gaser (som med andra byggnadsmaterial)

En fara som påpekades i flera länder är att solcellssystemen är elektriskt aktiva så fort de är belysta av sol. Därför nämns även uppmärkning av systemen på ett tydligt sätt som väldigt viktig, inklusive placering av säkerhetsbrytare (DC-brytare).

4 Kunskapsluckor och forskningsbehov

Ett generellt forsknings-/utredningsbehov är vilken typ av energilagring som är bäst lämpad i olika situationer och att då se till att säkerhetsaspekter utgör en del av underlaget för sådana beslut. Då är det naturligtvis viktigt att det finns tillgänglig kunskap om sådana säkerhetsaspekter och att olika rekommendationer är relevanta och uppdaterade. Nedan ges exempel på var det har identifierats behov för ytterligare undersökning, utveckling och forskning, men det kan naturligtvis finnas flera andra områden som behöver beforskas. Utvecklingen av energibärare och energilagring går även väldigt snabbt och det är då viktigt att säkerhetsforskningen följer med och att det utvecklas metoder för att säkerställa säkerhetsrelaterade funktioner.

4.1 Batterier

Blybatterier är en mogen teknik som funnits i ca 150 år och säkerhetsriskerna är välkända och relativt låga. Senare batterityper så som NiCd och NiMH har också relativt kända såväl som relativt låga risker. Li-jon-batterier är den senaste batteriteknologin som även har ökade inbyggda risker i sin konstruktion. Vidare har dessa risker visat sig komplexa och incidenter händer regelbundet trots att Li-jon-batterierna har passerat alla internationella tester. Det finns därför kunskapsluckor och ett forskningsbehov för Li-jon-batterier.

Det mesta av kunskapen och erfarenheten idag gällande risker och skyddsåtgärder inom batterisäkerhet kommer från små Li-jon batterier i mindre konsumentprodukter, t.ex. mobiltelefoner. Vi är fortfarande i ett inlärningskede. Det är viktigt att ha ett helhetsperspektiv (t.ex. värme, brand, giftiga gaser, gasexplosion), inklusive typer av fel, batteristorlek och typ, applikation och omgivande miljöer [2]. För stora batterier är det extra viktigt att titta på helheten.

Det saknas idag studier, kunskaper och därmed bedömning av de komplicerade totalrisker för speciellt stora batterisystem. Mer forskning behövs som täcker in hela kedjan, från battericell till applikation.

Utifrån ovanstående så bör man vara medveten om att de risker som finns med batterilager och om dessa risker ej hanteras (tas om hand) gör att de inte alltid är lämpade för bostäder. Batterilager innehåller höga elektriska effekter, är tunga och kan vid laddning avge giftiga, brandfarliga gaser och kan leda till gasexplosioner. Idag saknas kunskaper om risker och riktlinjer för hur batterilager i bostäder ska installeras och designs för att hanteras riskerna.

Den batterityp som är högst på agendan just nu är Li-jon-batterier. Utvecklingen inom batterier går emellertid fort och det kommer hela tiden nya batterier som kan innebära andra faror. Redan idag finns det en stor risk att förväxla Litiumjon- och Litiummetallbatterier, mycket beroende på att de går under samma benämning Litiumbatterier i transportkrav m.m. Deras egenskaper är dock mycket olika. T.ex. är vatten det bästa

släckmedlet för Li-jon men är inte lämpligt för Litiummetall. Vartefter som batterier utvecklas finns det ytterligare risker för förväxlingar, batterityper som nämns som framtiden av somliga är flödesbatterier men även natrium/magnesium nämns samt fortsatt utveckling av batterier med litium; det kan även bli Lijon-batterier med Litiummetall vilket öppnar upp för ännu mer förväxlingar och svårigheter vid brand. Detta gör att säkerhetskrav och riktlinjer utvecklas kontinuerligt för att kunna adressera de nya faror som kan uppstå. Att utveckla regelverk som tar höjd för alla framtida eventuella faror blir svårt.

Enligt Larsson [2] behöver vissa områden extra forskningsinsatser:

- Skalningseffekter för stora batterisystem av olika typer och i olika miljöer
- Hur kan man förhindra spridning (propagering)
- Utsläpp av gifta gaser och ämnen
- Gasexplosion (fördröjd antändning av utsläppta batterigaser)
- Brandsläckning
- Hur påverkas säkerheten vid olika åldring? (se diskussionen om State of Health nedan)
- Ta fram åtgärder för att minska/hantera risker, speciellt från gaser och stora batterisystem.

Batteriutvecklingen har gått mot allt högre energitätheter och lång livslängd vilket möjliggjort t.ex. attraktiva elfordon och stationära energilager för elnät. Utveckling och marknadskrafterna går mot allt högre energitätheter och därmed inbyggda ökade risker. Det är därför viktigt att kontinuerligt forska på batterisäkerhet.

Forskning för att ta bort eller minska mängden fluorämnen i Li-jon-batterier.

Det är viktigt att studera framtida olyckor för att öka kunskapen om hur dessa kan minskas.

Det finns idag högst begränsad kunskap om hur säkerheten påverkas av åldring. Det finns ett fåtal forskningsartiklar, högst begränsade studier, men som dock bl.a. visar på resultat att säkerheten kan tänkas bli väsentligt försämrad vid end-of-life for elfordon och andrahandsanvändning som stationära energilager [15]. Dock går det ej att dra några slutsatser eftersom det finns så många parametrar, annat än slutsatsen att det behövs mer forskning på säkerhet och åldring.

Om uttjänta elfordonsbatterier ska användas behöver man på något vis ha några State of Health (SOH)-krav på batterierna för att de ska kunna komma ifråga för användning. Det behövs då även överenskomna sätt att mäta denna SOH. Det finns i dagsläget ytterst begränsad forskning om SOH, framförallt i relation till krav att ställa på hela system. Den batteriforskning som bedrivs handlar i regel om nya celler.

Installation i byggnader kommer att ställa krav på installatörerna. Kanske behövs särskild behörighet för att göra installationen? I vilket fall kommer det att behövas utbildning och installationsregler.

Att släcka en brand i ett Li-jon batteripack är en utmaning beroende på att det krävs avsevärd kylning och det är i många fall svårt att komma åt cellerna. Förberedda anslutningar för släckmedel skulle göra det betydligt enklare att släcka i händelse av brand. Men hur man ska angripa en brand i olika situationer är något som behöver studeras även om det pågår sådant arbete. Placering av batterierna är en sak som antagligen kommer att behöva regleras på något sätt. Kanske bör man märka ut var batterilager finns på samma sätt som man gör för gasflaskor, eller så kanske man inte ska vara tillåten att ha lagret i källaren. Detta är frågor som man bör ta ställning till i olika forskningsprojekt; vad blir konsekvenserna i de olika fallen?

Utöver detta tillkommer frågan kring hur olika typer av batterier (nya, begagnade, skadade, etc.) ska transporteras och lagras. Även hur hanteringen av batterier som avfall är en viktig fråga.

Eftersom utvecklingen går snabbt kan LCA (livscykelanalys) där både avfallshanteringen och eventuella bränder inkluderas.

De bränder som har inträffat i olika konsumentprodukter skapar också frågan om det går att avgöra om ett batteri är säkert. Går det att ta fram någon riskvärderingsmetod?

I samband med avfallshanteringen är en viktig fråga hur batterier beter sig i kontakt med andra material eller när de råkar hamna i fel flöden eller processer. Kan de utgöra brandkällor eller vara orsak till självuppvärmning? Går det att hitta specifika grundorsaker till olika problem? Under 2017 inträffade ett antal bränder på avfallsanläggningar i Sverige och vid flera tillfällen angavs batterier som en möjlig tändkälla och som ett ökande problem. Det finns dock ingen statistik för detta ännu och det behöver studeras vidare.

4.2 Biogas

Det har inträffat ett antal brandincidenter med gasfordon som har lett till både långa jetflammar efter utlösta säkerhetsventiler, och till tankexplosioner. Mycket av erfarenheten kommer just från inträffade incidenter och det behövs ytterligare forskning i form av försök för att kunna karaktärisera och kvantifiera beteende och händelseförlopp under olika exponeringar och scenarier. Detta behövs för att på ett mer relevant sätt kunna skapa underlag för riskanalyser, säkerhetsåtgärder, dimensioneringar och riktlinjer. Några av de punkter som bör studeras och kvantifieras är:

- Karaktärisering av jetflammar, både vad gäller utsträckning och värmebelastning i form av temperatur och strålning.
- analys av vilka säkerhetsventiler som är optimala (värmekänslig eller tryckkänslig)
- skapa underlag för standardisering av säkerhetssystemet, t.ex. vad gäll utblåset från säkerhetsventilsystemet.
- analys av befintliga standarder och provningsmetoder för att utvärdera hur representativa de är för verkliga fall och olika risker.

4.3 Vätgas

Även om det finns vissa försök utförda behövs ytterligare försök för att karaktärisera vätgasens beteende i samband med brandkällor, både i form av gastankar och i form av fri gas. Detta behövs dels för att öka förståelsen för energibärarens beteende i olika situationer, dels för att kunna validera de modeller som används. För vätgas är detta extra viktigt då det fortfarande finns en utbredd rädsla och skepsis för vätgas, som i många fall kan härledas tillbaka till Hindenburgolyckan 1937. Alla energibärare har sina risker och det är viktigt att ha ett så bra och relevant underlag som möjligt för att kunna beskriva dessa på ett sakligt sätt. Det är också viktigt att öka förståelsen för likheter och skillnader mellan olika gaser och hur de hanteras.

I övrigt finns samma utmaningar som för biogas, d.v.s. räddningstjänsten måste kännas sig trygg i att de riktlinjer som tas fram tar hänsyn till de olika existerande riskerna och beteendet hos tankar, ventiler och gassystemet i övrigt vid kollision, brand och liknande scenarier. Detta kräver även för vätgas verifiering och kvantifiering t.ex. vad gäller gastankars beteende vid brand. Detta behövs både som indata till riskanalyser och som grund till riktlinjer. Riktlinjer behövs även för verkstäder, bilbesiktning och skrotning.

4.4 Kondenserade gaser

Här finns en hel del erfarenhet både från industrin och annan användning så här handlar det främst om att följa utvecklingen och se till att relevanta riktlinjer följer med utvecklingen och är utformade så att de passar aktuella användare. Utvecklingen av området får visa om det behövs vidareutveckling av t.ex. standarder och rekommendationer.

4.5 Flytande biobränslen

För flytande biobränslen finns det mycket kunskap. Där det framför allt finns kunskapsluckor är kring hur man ska släcka större bränder. Det blir extra viktigt nu när det utvecklas nya, fluorfria skum.

De flesta vet att trassel/trasa plus linolja utgör en risk för självuppvärmning. Vad många kanske inte vet att det även finns andra kombinationer av till synes "ofarliga" oljor och olika absorberande material också kan utgöra risk för självuppvärmning och självantändning. Detta är ett område som borde utredas ytterligare, för att minimera risken för incidenter.

4.6 Fasta biobränslen

Som nämnts tidigare skiljer sig fasta biobränslen och avfall (avsnitt 4.7) från de ovan beskrivna metoderna för energilagring, både vad gäller material och mognadsgrad.

Biobränslen har använts länge och har därför en hög ”mognadsgrad”. Samtidigt saknar för fasta biobränslen typiska parametrar (som finns t.ex. för vätskebränslen). Det existerar också stora skillnaderna inom materialgruppen som inte alltid är lätta att förutse och därför finns behov av relevanta provningsmetoder, som kan användas tillsammans med riktlinjer.

Det finns rekommendationer och råd från 1980-talet om lagringsförhållanden och stackhöjder för sönderdelat trädbränsle för att undvika självantändning [48]. Dessa är användbara även idag, men dessa riktlinjer borde verifieras med ytterligare forskning. Dessutom behöver riktlinjer tas fram för andra material., t.ex. andra typer av flis. En metod för att överföra befintliga rekommendationer till nya material vore också mycket användbart.

Även om det finns en hel del forskning på självuppvärmning finns det fortfarande stora luckor kring exakt vilka processer som sker under självuppvärmningen och därmed också exakt hur olika parametrar påverkar benägenheten för självuppvärmning. Detta behöver beforskas ytterligare. Detsamma gäller processerna vid avgasning.

Explosioner inträffar då och då i samband med hantering av biobränslen. Detta inkluderar både gasexplosioner och dammexplosioner. Det behövs ytterligare forskning kring hur dessa explosioner uppstår och hur olika parametrar varierar och inverkar. Ett viktigt område att studera är hur bränder ger upphov till explosioner och tvärtom. Framför allt det första, d.v.s. hur mindre bränder ger upphov till dammexplosioner, även en bit bort från uppkomsten av glödhärden, är något som ofta ses i olika incidenter [70].

4.7 Avfall

För avfall är kunskapsluckorna ännu större än för biobränslen. Det finns visserligen lång erfarenhet kring hantering av avfall, men de stora variationerna i avfallsfraktioner och blandningar och utvecklingen i hanteringen av olika flöden gör att kunskapen om inverkan av olika parametrar på risken för självuppvärmning och brandspridning måste öka. Skillnaden mellan produktion och användning av avfall (för energiproduktion) ger också upphov till speciella problem och risker.

Det är också viktigt att ha med avfallshanteringen och dess brandrisker i olika livscykelanalyser och inkludera detta i värdering av användning av olika typer av energibärare. Detta inkluderar även själva infrastrukturen för hanteringen av avfallet.

Arbetsmiljön vid hanteringen av bränder i avfall är också en mycket viktig fråga. Här görs det redan en hel del på olika anläggningar, men det finns behov av riktlinjer.

Sammanställningar av erfarenheter från branschen visar på vikten av en bra mottagningskontroll. Det följer ofta med material som inte ska finnas i aktuell avfallsfraktion. I detta sammanhang har batterier speciellt lyfts fram som en potentiell tändkälla och som orsak till flera bränder och det finns en oro att detta är ett ökande problem. Detta behöver utredas vidare, både vad gäller förekomsten och vad gäller potentiella effekter av en sådan utveckling. Detsamma gäller naturligtvis andra

"föroreningar" i olika avfallsfraktioner, eller uppkomst av helt nya fraktioner och eventuella risker med dessa.

Det finns ett antal riktlinjer av olika slag inom området, men det är tydligt att det behövs kunskap om beteendet hos olika fraktioner och blandningar för att kunna utnyttja dessa fullt ut.

4.8 Produktion av el

Som nämnades i avsnitt 3.7 har ett antal risker med solcellsanläggningar identifierats och det finns i olika länder riktlinjer både för vad räddningstjänsten bör tänka på vid insats och hur man vid installationen av anläggningen kan öka säkerheten för räddningstjänsten. Det bör emellertid studeras hur det ser ut i Sverige och vad som krävs i form av riktlinjer och utbildning, både för installatörer och för räddningstjänst. Även behovet (nyttan) av säkerhetsbrytare ("brandkårsbrytare") kan behöva utredas.

Det är populärt att integrera nya solceller i olika byggnadskomponenter. Innebär detta ökade eller andra typer av risker? Hanteras detta av befintliga regler och riktlinjer? Det är några frågor som kan behöva besvaras.

Det har inträffat ett antal bränder i vindkraftverk. man kan behöva analysera hur stort det problemet är och vilka risker det kan innebära.

5 Slutsatser

Rapporten innehåller en sammanfattning av risker och kunskapsluckor för ett antal typer av energilagring och energibärare.

Kunskapsluckorna kring Li-jon-batterisäkerhet är bitvis stora eftersom teknikutvecklingen har gått fortare än forskningen på riskerna. Nya stora batterisystem förändrar riskbilden jämfört med små Li-jon batterier i konsumentprodukter så som t.ex. laptop och mobiltelefoner. Det sker nu en snabb utveckling av olika energibärare, t.ex. batterier, och nya typer av användningsområden för energilagring och det är viktigt att forskningen kring säkerheten hänger med och kan genomföras parallellt så det inte blir något som måste förklaras efter att en olycka inträffat.

Det finns även stora kunskapsluckor kring beteendet efter åldring och lång tids användning av batterier, men även för andra typer av energibärare.

Släckning av olika typer av bränder och rekommendationer för hur räddningstjänsten ska kunna göra säkra och effektiva insatser måste hänga med utvecklingen. Det behövs även riktlinjer för säker drift, underhåll och reparationer.

Följande kunskapsluckor och forskningsbehov kan speciellt nämnas för energilager och energibärare:

- Batterier och batterisystem:
 - Det saknas studier av totalrisker för speciellt stora batterisystem
 - Batterier behöver studeras ur ett helhetsperspektiv vad gäller risker (värme, brand, giftiga gaser, gasexplosion), inklusive typer av fel, batteristorlek och typ, applikation och omgivande miljö. För att kunna göra detta måste det finnas metoder för att bedöma de ingående riskerna för olika typer av batterier.
 - Kunskap om hur man släcker på ett säkert och effektivt sätt för olika typer av batterier och hur kan installationen underlätta släckning?
 - Kunskap om risker och riktlinjer för hur batterilager i bostäder ska installeras och designas. Detta kan inkludera speciella krav på installatörer.
 - Kunskap kring hur säkerheten och risker förändras när batterier åldras.
 - Metoder för att bestämma State of Health (SOH) och sedan korrelation mellan SOH och risker.
 - Emissioner av olika toxiska gaser är fortsatt intressant att studera, t.ex. vätefluorid (HF)
- Biogas:
 - Karaktärisering av jetflammar, både vad gäller utsträckning och värmebelastning i form av temperatur och strålning.
 - Analys av vilka säkerhetsventiler som är optimala (värmekänslig eller tryckkänslig)
 - Skapa underlag för standardisering av säkerhetssystemet, t.ex. vad gäller utblåset från säkerhetsventilsystemet.
 - Analys av befintliga standarder och provningsmetoder för att utvärdera hur representativa de är för verkliga fall och olika risker.

- Vätgas
 - Vätgasens beteende behöver karaktäriseras i samband med olika brandkällor, både i form av gastankar och i form av fri gas.
 - I övrigt gäller dessutom samma kunskapsluckor som för biogas.
- Kondenserade gaser
 - Här finns en hel del erfarenhet från industri och annan användning och det gäller främst att följa utvecklingen och anpassa riktlinjer efter användning och användare.
- Flytande biobränslen
 - Släckning av större bränder
 - Självuppvärmning av kombination av flytande bränsle och adsorberande material.

Rapporten har även diskuterat områden fasta biobränslen och avfall. De skiljer sig från de presenterade energilagringsslag metoderna och har sina risker och behov av studier. Nya avfallsfraktioner eller nya komponenter i befintliga fraktioner kan innebära nya risker och dessa behöver utredas och kvantifieras. Detta inkluderar kunskap om självuppvärmning, men även andra risker.

Följande kunskapsluckor och forskningsbehov kan speciellt nämnas för fastbiobränslen och avfall:

- Provningsmetoder för att kunna bedöma olika materials benägenhet för t.ex. självuppvärmning. Resultaten kan sedan användas ihop med riktlinjer.
- Analyser av självuppvärmningsbenägenhet hos fler och nya biobränslen och avfallsfraktioner.
- Metoder för att överföra befintliga lagringsriktlinjer till nya material och fraktioner. Till detta behövs även verifierande försök.
- Mer kunskap kring underliggande processerna för självuppvärmning.
- Framför allt för avfall, studier kring andra potentiell tändkällor än självuppvärmning, t.ex. krossade batterier.
- Mer kunskap om gas- och dammexplosioner vid lagring och hantering av biobränslen.
- Utvecklad kunskap kring och teknik för detektion.

Något som är giltigt för de flesta områden diskuterade i rapporten är att det är viktigt att säkerhetsforskningen och utvecklade riktlinjer hänger med utvecklingen av material och olika lagrings metoder. För att detta ska ske är det också viktigt att dra lärdom av inträffade incidenter. För att göra detta måste också incidentrapporteringen ske på ett relevant sätt och därför kan det finnas anledning att se över hur rapporteringsmallarna ska vara utformade och att de hänger med i utvecklingen.

6 Referenser

- [1] Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., and Ding, Y., "Progress in electrical energy storage system: A critical review", *Progress in Natural Science*, **19**, pp 291-312, 2009.
- [2] Larsson, F., "Lithium-ion battery safety - Assessment by abuse testing, fluoride gas emissions and fire propagation", Doctoral Thesis, Department of Physics, Chalmers University of Technology, 2017.
- [3] Hansson, M., "Slutrapport - Potentialen för lokala energilager i distributionsnäten", Power Circle, 2016.
- [4] Velik, R., "Battery storage versus neighbourhood energy exchange to maximize local photovoltaics energy consumption in grid-connected residential neighbourhoods", *International Journal of Advanced Renewable Energy Research*, **2**, 6, 2013.
- [5] Soeprapto, Taufik, Sidopekso, S., and Taufik, M., "The DC house project for sustainable rural electrification", Proceeding of International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application, pp. 97-101, Inna Garuda Hotel, Yogyakarta, Indonesia, 2012.
- [6] Taufik, T., "The DC House project: An alternate solution for rural electrification", Global Humanitarian Technology Conference (GHTC), San Jose, CA, USA, 10-13 oct. 2014, 2014.
- [7] Gardner, G., "GM gets life out of old electric car batteries", In *Detroit Free Press*, 2015.
- [8] Riksbyggen, "Lagring av el i begagnade bussbatterier i Riksbyggen BRf Viva - Miljömässiga fördelar och nackdelar", 2016.
- [9] Koseki, H., Personlig kommunikation, 2018.
- [10] "BU-210a: Why does Sodium-sulfur need to be heated", Battery University, 2017.
- [11] Henckel, S., "Skånsk by testar ödrift", In *Ingenjören*, <http://www.ingenjoren.se/2017/02/08/skansk-by-testar-odrift/>, 2017.
- [12] Nohrstedt, L., "Likström växlar upp ett steg till", In *Ny Teknik*, 2017.
- [13] Larsson, D., Wennerberg Fåhraeus, M., and Paradis, J., "Solceller i flerbostadshus: Hur hanteras överskottsel på bästa sätt?", Energiforsk, Rapport 2017:384, 2017.
- [14] Haegermark, M., and Dalenbäck, J.-O., "Möjligheter och begränsningar för egenanvänd solel i Västra Gårdsten", Installationsteknik, Chalmers, Presentation vid Solel 2017, 2017.
- [15] Larsson, F., Bertilsson, S., Furlani, M., Albinsson, I., and B.-E., M., "Gas explosions and thermal runaways during external heating abuse of commercial lithium-ion graphite-LiCoO₂ cells at different levels of ageing", *Journal of Power Sources*, **373**, pp 220-231, 2018.
- [16] Amon, F., Andersson, P., Karlsson, I., and Sahlin, E., "Fire risks associated with batteries", SP Report 2012:66, 2012.
- [17] Amnesty International, "Time to recharge - Corporate action and inaction to tackle abuses in the cobalt supply chain", AFR 62/7395/2017, 2017.
- [18] Johansson, A., "Personlig kommunikation om byggregler för energilager", Boverket, 2018.
- [19] Blum, A. F., and Long, R. T., "Hazard Assessment of Lithium Ion battery Energy Storage Systems: Final report", Fire Protection Research Foundation, National Fire Protection Association (NFPA), 2016.
- [20] Cole, P. C., and Conover, D. R., "Energy Storage System Guide for Compliance with Safety Codes and Standards", U.S. Department of Energy, PNNL-SA-118870/SAND2016-5977R, 2016.

- [21] DNV, "Consolidated Edison BESS Program - In Reference To: Report No. OAPUS301WIKO(PP151894), Rev. 4", 2017.
- [22] Sturk, D., and Hoffmann, L., "e-fordons potentiella riskfaktorer vid trafikskadehändelse", SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Rapport 2013:58, 2013.
- [23] FM Global, "Electrical Energy Storage Systems", Property Loss Prevention Data Sheets, FM Global, 2017.
- [24] UN, "Recommendations on the Transport of dangerous goods", United Nations, 2015.
- [25] Parkinson, G., "The new standard that could kill the home battery storage market", In *RenewEconomy*, 2017.
- [26] Vorrath, S., "Standards Australia renews threat of home battery storage ban", In *RenewEconomy*, 2017.
- [27] Larsson, F., Andersson, P., Blomqvist, P., and Mellander, B.-E., "Toxic fluoride gas emissions from lithium-ion battery fires", *Scientific Reports*, **7**, 10018, 1-13, 2017.
- [28] Sun, J., Li, J., Zhou, T., Yang, K., Wei, S., Tang, N., Dang, N., Li, H., Qiu, X., and Chen, L. C., "Toxicity, a serious concern of thermal runaway from commercial Li-ion battery", *Nano Energy*, **27**, pp 313-319, 2016.
- [29] Andersson, P., Blomqvist, P., Lorén, A., and Larsson, F., "Using Fourier transform infrared spectroscopy to determine toxic gases in fires with lithium-ion batteries", *Fire and Materials*, **40**, 8, pp 999-1015, 2016.
- [30] CDC, "Emergency preparedness and response: Hydrofluoric acid (hydrogen fluoride)", Centers for disease control and prevention, 2013.
- [31] Hull, T. R., and Stec, A. A., "Introduction to fire toxicity". In *Fire toxicity* (A. Stec and R. Hull, Eds.), CRC Press, 3-24, 2010.
- [32] Andersen, T., "Brandrisiko for batterier opladet af solceller installeret i beboelsesejendomme", Danmarks Tekniske Universitet, 2017.
- [33] MSB, "ADR-S 2017: Myndigheten för samhällsskydd och beredskaps föreskrifter om transport av farligt gods på väg och i terräng", MSB, 2017.
- [34] Oscarsson, C., "Riktlinjer för transport av "allvarligt" skadade litumbatterier enligt SP 376", MSB, 2016.
- [35] Coen, D., "Nya energibärare i fordon - deras påverkan på tunnlar och undermarksanläggningar vid brand", MSc, Luleå tekniska universitet, 2010.
- [36] Gehandler, J., Kearnsson, P., and Vylund, L., "Risks associated with alternative fuels in road tunnels and underground garages", SP Report 2017:14, 2017.
- [37] Bøe, A. S., and Drangsholt, G., "Brannsikkerhet og alternative energibærere: Hydrogenkjøretøy i parkeringskjellere", RISE Fire Research, RISE-rapport A18 20319:1, 2018.
- [38] MSB, "Gasdrivna fordon - händelser och standarder: En nationell och internationell utblick", Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB 1011, 2016.
- [39] MSB, "Tankstationer för metangasdrivna fordon - Vägledning vid tillståndsprövning", Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, MSB277, 2011.
- [40] UNECE, "Concerning the Adoption of Uniform Technical Prescriptions for Wheeled Vehicles, Equipment and Parts which can be Fitted and/or be Used on Wheeled Vehicles and the Conditions for Reciprocal Recognition of Approvals Granted on the Basis of these Prescriptions - Addendum 109: Regulation No. 110 - Revision 3", 2014.
- [41] Lowell, D., "Natural gas systems: Suggested changes to truck and motorcoach regulations and inspection procedures", U.S. Department of Transportation, 2013.
- [42] Bjerketvedt, D., Bakke, J. R., and Van Wingerden, K., "Gas explosion handbook", *Journal of Hazardous Materials*, **52**, 1, pp 1-150, 1997.
- [43] "Fire in a CNG bus", Dutch Safety Board, 2013.

- [44] MSB, "Räddningsinsatser med gasdrivna personbilar", Myndigheten för samhällsskydd och beredskap, 2016.
- [45] Rudberg, J., Carlsson, A., Blume, E., Petersson, E., Rydlund, M., Lundquist, S., Ölund, M., and Einarsson, P., "Biobränslen för en hållbar framtid - Utmaningar för ett 100% förnybart energisystem i Sverige", 2014.
- [46] Lönnermark, A., Persson, H., Blomqvist, P., and Hogland, W., "Biobränslen och avfall - Brandsäkerhet i samband med lagring", SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Rapport 2008:51, Borås, Sweden (in Swedish), 2008.
- [47] "Inbjudan till Brandforsks och Värmeforsks forskningsprogram om Brandsäker lagring av bio- och avfallsbränslen", 2009.
- [48] Thörnqvist, T., "Bränder i stackar med sönderdelat trädbränsle", Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för virkeslära, SLU:s Uppsats nr 163, Uppsala, 1987.
- [49] Thörnqvist, T., "Projektet storskalig säsongslagring av trädbränsle - en sammanfattning av etapp 1", Sveriges Lantbruksuniversitet, Institutionen för bränslelära, 188, Uppsala, 1986.
- [50] Beisland, L., and Tingvall, K., "Lagring av träpellets", Trygg-Hansa, R2007.12.1, 2007.
- [51] NICE, "Guidelines for storing and handling of solid biofuels", Nordic Innovation Centre, NT ENVIR 010, Oslo, Norway, 2008.
- [52] Persson, H., *Brand i silo, Brandsläckning samt förebyggande och förberedande åtgärder*, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB); MSB386-oktober 2012, 2012.
- [53] Lönnermark, A., Persson, H., Blomqvist, P., Larsson, I., Rahm, M., Dahl, J., Lindholm, S., and Hansen, P. L., "Self-heating and Off-gassing from Biomass Pellets during Storage", *World Bioenergy 2012*, p.9-16, The Swedish Bioenergy Association, Jönköping, Sweden, 29-31 May, 2012.
- [54] Larsson, I., Lönnermark, A., Blomqvist, P., Persson, H., and Bohlén, H., "Development of a screening test procedure based on isothermal calorimetry for determination of self-heating potential of biomass pellets", *Fire and Materials*, <https://doi.org/10.1002/fam.2427>, **41**, 8, pp. 940-952, 2017.
- [55] Larsson, I., Lönnermark, A., Blomqvist, P., and Persson, H., "Measurement of self-heating potential of biomass pellets with isothermal calorimetry", *Fire and Materials*, <https://doi.org/10.1002/fam.2441>, **41**, 8, pp. 1007-1015, 2017.
- [56] Larsson, I., "Measurement of Self-Heating of Biomass Pellets using Isothermal Calorimetry", Licentiate Thesis, Karlstads Universitet, 2017.
- [57] Guo, W., "Self-heating and spontaneous combustion of wood pellets during storage", In *Chemical and Biological Engineering*, The University of British Columbia, Vancouver, 2013.
- [58] DEPV, "Umweltgerechte Herstellung und Lagerung von Holzpellets", Deutscher Energieholz- und Pellet-Verband e.V. (DEPV), FKZ: 22021708, 2012.
- [59] Arshadi, M., and Gref, R., "Emissions of volatile organic compounds from softwood pellets during storage", *Forest Products Journal*, **55**, 12, 132-135, 2005.
- [60] Svedberg, U., "Undersökning av syrgashalter och farliga gaser i trapphus till lastrum med timmer, träflis och övrigt organiskt material.", Länssjukhuset Sundsvall-Härnösand, 2009.
- [61] Svedberg, U., Samuelsson, J., and Melin, S., "Hazardous Off-Gassing of Carbon Monoxide and Oxygen Depletion during Ocean Transportation of Wood Pellets", *Ann. occup. Hyg.*, **52**, 4, p.259-266, 2008.
- [62] Persson, H., Leandersson, A., Amen, M., and Lönnermark, A., "Lagring av biobränsle och avfall - Statistik och erfarenheter från incidenter och bränder", SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, SP Rapport 2014:55, Borås, Sweden (in Swedish), 2014.
- [63] RVF, "Bränder i avfall vid deponier och förbränningsanläggningar", Svenska Renhållningsverksföreningen, RVF rapport 2003:11, Malmö, Sweden, 2003.

- [64] Ibrahim, M. A., "Risk of spontaneous fires at temporary storage sites for organic material, waste fuels and recyclables-Quantification and mitigation", In *Department of Biology and Environmental Science*, Linnaeus University, Växjö, 2014.
- [65] Lönnermark, A., Persson, H., Trella, F., Blomqvist, P., Boström, S., and Bergérus Rensvik, Å., "Brandsäkerhet i samband med lagring av avfallsbränslen", Avfall Sverige, 2018.
- [66] Avfall Sverige, "Att minska risken för brand på deponier - Förslag till brandriskanalys", Avfall Sverige - utveckling, Rapport D2007:05, Malmö, 2007 (rev 2009).
- [67] WISH, "Reducing fire risk at waste management sites", Waste Industry Safety and Health Forum, Waste 28, 2017.
- [68] Elsäkerhetsverket, "Informationsbehov och elsäkerhetskrav rörande solcellsanläggningar", Dnr:15EV519, 2015.
- [69] Namikawa, S., Kinsey, G., Heath, G., Wade, A., Sinha, P., and Komoto, K., "Photovoltaics and Firefighters' Operations: Best Practices in Selected Countries", Report IEA-PVPS T12-09:2017, 2017.
- [70] Pethullis, J., "Feedback from some biomass incidents", In *Fire Prevention for Biomass Storage Systems*, Muntlig presentation, 2018-06-12, University of Greenwich, England, 2018.

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

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



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

Safety
RISE Rapport 2018:42
ISBN:978-91-88695-81-9



RISE Research Institutes of Sweden
P.O. Box 857, 501 15 BORÅS, SWEDEN
PHONE: 0046-10-516 50 00
E-post: info@ri.se,
Internet: www.ri.se

OUR SPONSORS & PARTNERS:



Brandforsk

RAPPORTER UTGIVNA AV BRANDFORSK 2018

- 2018:1 Fire and explosion hazard of alternative fuel vehicles in tunnels
- 2018:2 Engineering methods for structural fire design of wood buildings– structural integrity during a full natural fire
- 2018:3 Kvantifiering av variationer vid beräkning av strukturers respons vid brandexponering
- 2018:4 Risk-Informed Fire Safety Design of Structures
- 2018:5 Visualizaton of fires in VR
- 2018:6 Fire behaviour and occurrence of Fire in enclosures protected by oxygen reduction systems
- 2018:7 Brandsäker energilagring - Sammanställning av risker och forskningsbehov

1979 bildades Brandforsk som svar på behovet av ett gemensamt organ för att initiera och finansiera forskning och utveckling inom brandsäkerhetsområdet.

Brandforsk är statens, försäkringsbranschens och industrins gemensamma organ för att initiera, bekosta och följa upp olika slag av brandforskning.

Huvudman för Brandforsk är Brandskyddsföreningen och verksamheten leds av en styrelse och bedrivs i form av projekt vid universitet och högskolor, forskningsinstitut, myndigheter och företag.



Brandforsk

Årstaängsvägen 21 c
Box 472 44, 100 74 Stockholm
Tel: 08-588 474 14
brandforsk@brandskyddsforeningen.se