



# Høgskulen på Vestlandet

## Bacheloroppgave

## Brannteknikk

ING3037

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	31-03-2020 09:00	<b>Termin:</b>	2020 VÅR
<b>Slutt dato:</b>	07-05-2020 14:00	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F)
<b>Eksamensform:</b>	Bacheloroppgave med muntlig presentasjon/eksaminasjon		
<b>SIS-kode:</b>	203 ING3037 1 PRO-1 2020 VÅR HAUGESUND		
<b>Intern sensor:</b>	Kristian Grimstuedt		

### Deltaker

**Kandidatnr.:** 303

### Informasjon fra deltaker

**Tittel \*:** Brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig

**Engelsk tittel \*:** Fire risk by energy storage in lithium-ion batteries in residential buildings

**Navn på veileder \*:** Eirik Hugnastad

**Sett hake dersom ja** **Egenerklæring \*:** Ja  
**besvarelsen kan brukes** **Inneholder besvarelsen** Nei  
**som eksempel i** **konfedensielt**  
**undervisning?:** **materiale?:**

**Jeg bekrefter at jeg har ja**  
**registrert**  
**oppgavetittelen på**  
**norsk og engelsk i**  
**StudentWeb og vet at**  
**denne vil stå på**  
**vitnemålet mitt \*:**

### Gruppe

**Gruppenavn:** (Anonymisert)

**Gruppenummer:** 1

**Andre medlemmer i** 315  
**gruppen:**

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min \*

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? \*

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? \*

Ja, Multiconsult

# Brannrisiko ved energilagring i litium- ionbatterier i bolig



*Foto: Sigve Rasmussen*

Sigurd Brunstad Paulsen

Steffen Furevik

Kandidatnummer 315

Kandidatnummer 303

07.05.2020

# BACHELORPROSJEKT

**Studentenes navn:** Steffen Furevik  
Sigurd Brunstad Paulsen

---

**Linje & studieretning:** Bachelor i ingeniørfag, brannsikkerhet

**Oppgavens tittel:** *Brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig*

## Oppgavetekst:

I dagens samfunn er det stort fokus på miljø og bærekraftige løsninger, som skaper behov for fornybare energikilder som samtidig er kostnadseffektive. Det siste tiåret har hatt betydelige fremskritt innen litiumbatteriteknologi. Denne teknologien er i flere land blitt den foretrukne strømlagringskilden i bygg på grunn av dens høye energitetthet, lange levetid og høye driftsspenning sammenlignet med andre batterier. Litium-ionbatterier er imidlertid følsomme for overlading, dyputlading, kortslutning og fysiske påkjenninger, noe som har ført til stor oppmerksomhet de siste årene. I tillegg er batterielektrolytten i litium-ionbatterier svært flyktig og brannfarlig.

I denne oppgaven skal det sees på brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig. Oppgaven berører ikke slokking av brann i batteri.

Hovedformålet med oppgaven er å komme med anbefalinger til branntekniske tiltak for å redusere brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig. Anbefalingene skal komme på bakgrunn av studie av anerkjent litteratur, forskning og et utvalg av utenlandsk regelverk på området. Formålet med disse delene av metodikken er blant annet å kartlegge brannegenskapene for litium-ionbatteri og dens karakteristiske trekk under en brann. Utenlandske regelverk skal være et hjelpemiddel og inspirasjon for de branntekniske anbefalingene. I tillegg vil samtaler med ulike aktører og spørreundersøkelse inngå som en del av oppgavens metodikk, hvor formålet er å få en oversikt over hvilke problemer ulike aktører har og kartlegge hullene i norsk regelverk.

**Endelig oppgave gitt:** Fredag 28.februar 2020

**Innleveringsfrist:** Torsdag 7.mai 2020 kl. 12.00

**Intern veileder:** Kristian Grimstvedt

**Ekstern veileder:** Eirik Hugnastad, Multiconsult  
**Emailadresse:** [eirik.hugnastad@multiconsult.no](mailto:eirik.hugnastad@multiconsult.no)

**Godkjent av studieansvarlig:**  
**Dato:**



16.04.2020

Høgskulen på Vestlandet

Campus Haugesund

Bjørnsonsgate. 45

5528 HAUGESUND

Oppgavens tittel <b>Brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig</b>		
Utført av: <b>Sigurd Brunstad Paulsen Steffen Furevik</b>		
Linje <b>Sikkerhet, brannteknikk</b>		Studieretning <b>Ingeniør</b>
Gradering <b>Åpen</b>	Innlevert dato <b>07.05.2020</b>	Veiledere <b>Kristian Grimstvedt Eirik Hugnastad</b>

**Ekstrakt:**

Denne oppgaven tok for seg brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig. Oppgaven skulle komme med anbefalinger til branntekniske tiltak for å redusere brannrisiko ved slike installasjoner. Anbefalingene skulle komme på bakgrunn av samtaler med ulike aktører og fagpersonell, spørreundersøkelse, en studie på anerkjent litteratur og forskning på et utvalg av utenlandsk regelverk.

Litium-ionbatterier er svært følsom for høye- og lave temperaturer, fukt og støv. Ved mange tilfeller blir derfor energilagringssystemet nødt til å plasseres inne i boligen. Et regelverk som omhandler dette, er foreløpig fraværende i norsk sammenheng. Noen av tiltakene som ble anbefalt i denne oppgaven var røyk- og gassdeteksjon, ventilasjon, installering på ubrennbar flate, ikke brennbart materiale mellom system og tak, og etterlysende advarselsskilt.

## Forord

Denne oppgaven representerer avslutningen på vårt bachelorstudium i Brannsikkerhet ved Høgskulen på Vestlandet. Etter en lærerik sommer i Multiconsult AS vekket det interesse for brannsikkerhet for bærekraftige løsninger i bygg. Etter flere samtaler på høsten ble det valgt å skrive om brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatteri i bolig. Dette har vært en lærerik og interessant oppgave å skrive. Spesielt med tanke på at vi føler problemstillingen er aktuell og viktig når vi nå går inn i det «grønne skiftet».

Stor takk til internveileder ved HVL, Kristian Grimstvedt og eksterne veiledere i Multiconsult AS, Eirik Hugnastad og Aleksander Gamlemshaug for strålende veiledning, gode råd og støtte gjennom hele arbeidet.

Videre vil vi takke Bjarne Christian Hagen, Arjen Kraaijeveld og Ruben Dobler Strand ved HVL for diverse hjelp og innspill til oppgaven. Vi vil også takke Reidar Stølen i RISE med kollegaer for faglige diskusjoner og gode forskningsspørsmål.

Til slutt vil vi takke familie, venner og kjærester som har gitt oss motivasjon og vist sin støtte under krevende perioder i skrivingen.

Haugesund, 7. mai 2020.

Sigurd B. Paulsen

Sigurd Brunstad Paulsen

Steffen Furevik

Steffen Furevik

## Sammendrag

I dagens samfunn er det stort fokus på miljø og bærekraftige løsninger, noe som skaper behov for fornybare energikilder som samtidig er kostnadseffektive. Litium-ionbatterier har de siste årene blitt den mest foretrukne energilagringsskilden på grunn av dens høye energitetthet, lange levetid og høye driftsspenning. Tidligere arbeid fra RISE i rapporten «Energieffektive bygg og brannsikkerhet», viste at regelverket som omhandler bruk av energilagringssystemer i boliger bør presiseres med tanke på plassering, og hvilket sikkerhetsnivå som skal gjelde. Tekniske installasjoner i form av energilagringssystem er foreløpig ikke angitt i VTEK 17.

Opgavens problemstilling er knyttet til brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig. Hovedformålet var å komme med anbefalinger til branntekniske tiltak for å redusere brannrisiko ved slike installasjoner. Anbefalingene skulle komme på bakgrunn av samtaler med ulike aktører og fagpersonell, spørreundersøkelse, en studie på anerkjent litteratur og forskning på et utvalg av utenlandsk regelverk.

En litium-ionbattericelle oppfører seg relativt stabilt frem til den når en temperatur på 70-90 °C. Etter dette skjer en rekke reaksjoner som til slutt fører til thermal runaway, som videre kan føre til brann. Avgassene under thermal runaway er svært brannfarlig og et fulladet litium-ionbatteri skaper eksplosjonsfarlig miljø når atmosfæren i rommet består av kun 5 % avgasser. Disse avgassene kan også være livstruende for mennesker.

Opgavens spørreundersøkelse viste at det er store forskjeller i hvilke forhåndsregler som blir gjort i Norge knyttet til brannsikkerhet ved installering av energilagringssystemer inne i bolig. Et regelverk som omhandler dette, er foreløpig fraværende i norsk sammenheng. Installatørene bruker stort sett NEK 400 og installasjonsmanualer. Disse mangler spesifiserte branntekniske krav til plasseringer, innkapsling, aktive og passive tiltak, batteristørrelser og avstander til og rundt systemet. I USA og Australia er energilagring i litium-ionbatterier så utbredt at det er egne regelverk og standarder for dette. En analyse av disse viste at det er mulig å overføre enkelte krav og hente inspirasjon fra andre krav til norsk regelverk.

Det viste seg at litium-ionbatterier er svært følsom for høye- og lave temperaturer, fukt og støv. Ved mange tilfeller blir derfor energilagringssystemet nødt til å plasseres inne i boligen. Rom med sporadisk personopphold som teknisk rom, bod el. viste seg da å være naturlig plassering. Her er noen av de branntekniske anbefalingene denne oppgaven kom fram til ved plassering inne i bolig:

- Røyk- og gassdeteksjon
- Ventilasjon
- Montert på en ubrennbar flate
- Ikke brennbart materiale mellom energilagringssystemet og tak
- Etterlysende advarselsskilt på nedsiden av dør inn til rommet
- Generell rengjøring og kontroll av energilagringssystem

Det anbefales også at nasjonale retningslinjer for sertifisering, ettersyn, service, drift og vedlikehold utvikles. I tillegg må det spesifiseres hvilke teststandarder som skal følges ved sertifisering av batteri.

Denne oppgaven kan være til inspirasjon og videreføres til større bygg med større energilagringssystemer.

## Summary

Today, there is a strong focus on environmental and sustainable solutions, which creates a need for renewable energy sources that at the same time is cost-effective. Lithium-ion batteries have become the most preferred source of energy storage in recent years due to their high energy density, long service life and high operating voltage. Previous work by RISE in the report "Energieffektive bygg og brannsikkerhet" showed that the regulations governing the use of energy storage systems in residential homes should be specified in terms of location and the level of security that should apply. Technical installations in the form of energy storage system are not yet specified in VTEK 17.

The thesis problem is related to fire risk in energy storage in lithium-ion batteries for residential homes. The main purpose was to make recommendations for active and passive fire protection measures to reduce fire risk in such installations. The recommendations were to be based on discussions with various participants and professionals, a survey, a study of acknowledged literature and research on a selection of foreign regulations.

A lithium-ion battery cell behaves relatively stable until it reaches a temperature of 70-90 °C. After this, a numerous of reactions occur which eventually lead to thermal runaway, which can further lead to fire. The released gases during the thermal runaway are highly flammable and a fully charged lithium-ion battery creates an explosive environment when the atmosphere in the room consists of only 5% of the released gases. These gases can also be life-threatening to humans.

The thesis survey showed that there are major differences in the precautions that are made regarding fire safety when installing energy storage systems inside a residential home. A regulation dealing with this is currently absent in the Norwegian context. The installers generally use the Norwegian standard NEK 400 and installation manuals. These lack specific fire safety requirements for locations, encapsulation, active and passive fire protection measures, battery sizes and separation distances to and around the system. In the US and Australia, energy storage in lithium-ion batteries are widespread and there are separate regulations and standards for this type of installations. An analysis of these countries showed that it is possible to transfer certain requirements and draw inspiration from other requirements to the Norwegian regulatory framework.

It turned out that lithium-ion batteries are very sensitive to high- and low temperatures, humidity and dust. In many cases the energy storage system will have to be placed inside the residential home. Rooms like technical room, storeroom etc. turned out to be a natural location. Here are some of the fire protection measures this thesis came up with when the energy storage system is placed inside a home:

- Smoke- and gas detection
- Ventilation
- Mounted on an incombustible surface
- Non-combustible material between the energy storage system and the roof
- Photoluminescent warning sign at the bottom of the door into the room
- General cleaning and control of the energy storage system

It is also recommended that national guidelines for certification, inspection, service, operation, and maintenance are developed. In addition, it must be specified which test standards to follow for battery certification.

This thesis can be used as an inspiration to larger buildings with greater energy storage.



## Innholdsfortegnelse

Forord .....	iii
Sammendrag .....	iv
Summary .....	v
Figurfortegnelse .....	ix
Tabellfortegnelse .....	ix
1 Innledning .....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling.....	1
1.3 Formålet med oppgaven .....	2
1.4 Begrensinger .....	2
2 Batteriteori .....	3
2.1 Hvorfor litium? .....	3
2.2 Virkemåte .....	3
2.3 Batteriets oppbygning og funksjon.....	5
2.3.1 Anode og katode.....	5
2.3.2 Separator.....	5
2.3.3 Elektrolytt.....	5
2.4 Thermal runaway .....	5
2.5 Sikkerhetsmekanismer i batteriet.....	6
2.6 Forhold som kan forårsake brann– og eksplosjonsfare .....	7
2.6.1 Overlading .....	7
2.6.2 Dyputlading.....	7
2.6.3 Høye temperaturer .....	7
2.6.4 Ekstern kortslutning .....	7
2.6.5 Intern kortslutning .....	7
2.6.6 Mekanisk skade .....	7
2.7 Praktisk bruk av energilagringssystem .....	7
2.8 Energilagringssystem for privat bruk .....	8
2.9 Livsløpsanalyse .....	8
2.10 Regelverk.....	9
2.10.1 Norsk regelverk .....	9
2.10.2 Utenlandske regelverk.....	9
3 Metode .....	11
3.1 Metodekombinasjon .....	11

3.2	Forstudie .....	12
3.3	Spørreundersøkelse – kvantitativ forskning .....	13
3.4	Regelverk – kvalitativ forskning .....	13
3.5	Litteraturstudie – kvalitativ forskning .....	14
4	Resultater .....	16
4.1	Resultater fra spørreundersøkelse.....	16
4.2	Utdrag fra regelverk.....	22
4.2.1	Tabell for bolig.....	22
4.2.2	Tabell generelt.....	25
4.3	Batterikapsling.....	26
4.3.1	Batterikapsling USA .....	26
4.3.2	Batterikapsling Norge .....	27
4.4	Installasjonsmanual for xStorage Home.....	27
4.5	Installasjonmanual for Tesla Powerwall.....	28
4.6	Batteribrann .....	29
4.6.1	Batteriets brannoppførsel .....	30
4.6.2	Massetap.....	31
4.6.3	Energiproduksjon .....	31
4.6.4	Temperaturer .....	32
4.6.5	Varighet.....	32
4.7	Eksplisjonsfare.....	32
4.8	Skadelige gasser for mennesker .....	33
4.9	Erfaringer fra Sør-Korea.....	33
5	Diskusjon .....	34
5.1	Dagens situasjon i Norge.....	34
5.2	Overføring av krav og løsninger fra utenlandsk regelverk til norsk.....	35
5.2.1	Plassering .....	35
5.2.2	Batteristørrelse .....	36
5.2.3	Røyk- og gassdeteksjon.....	36
5.2.4	Ventilasjon .....	36
5.2.5	Kledning .....	36
5.2.6	Avstandskrav .....	36
5.2.7	Skilting .....	37
5.2.8	Sertifisering av batteri og personell .....	37
5.3	Batteriforskning .....	37

5.3.1	Eksplisjonsfare .....	37
5.3.2	Giftige gasser.....	37
5.3.3	Brannspredning .....	37
5.4	Plassering.....	38
5.5	Tiltak som kan redusere brannrisiko .....	39
5.5.1	Deteksjon og varslng .....	39
5.5.2	Ventilasjon .....	39
5.5.3	Sikkerhetstiltak for brannspredning .....	40
5.5.4	Merking/skilting .....	40
5.5.5	Automatisk slokkeanlegg .....	41
5.5.6	Sertifisering av batteriets sikkerhetsmekanismer .....	41
5.5.7	Innkapsling .....	41
5.5.8	Sertifisering av personell.....	42
5.5.9	Ettersyn, service og vedlikehold .....	42
5.5.10	Eierens forpliktelser .....	42
5.5.11	Søknadsplikt og register .....	43
5.5.12	Batteristørrelse .....	43
5.6	Bowtie modell.....	44
5.7	Usikkerhet og feilkilder i arbeidet .....	45
5.7.1	Spørreundersøkelsen .....	45
5.7.2	Regelverk .....	45
5.7.3	Litteraturstudie .....	45
6	Konklusjoner.....	46
6.1	Generelt .....	46
6.2	Anbefalinger til branntekniske tiltak .....	47
7	Videre arbeid.....	48
8	Bibliografi.....	49
9	Vedlegg.....	53
9.1	Vedlegg A – Spørreundersøkelse .....	53
9.2	Vedlegg B – Utsending av spørreundersøkelse.....	55
9.3	Vedlegg C – Grafer fra spørreundersøkelsen .....	56

## Figurfortegnelse

Figur 1 - En typisk litium-ionbattericelle med anode, katode og separator. I dette tilfelle er cellen tilkoblet en strømkilde hvor elektronene beveger seg fra katoden til anoden. Foto: RISE [4].	4
Figur 2 - Illustrasjon av fulladet batteri. Dette indikerer en ustabil tilstand.	4
Figur 3 - Illustrasjon av uladet batteri. Dette indikerer en stabil tilstand.	5
Figur 4 - Tesla Powerwall [25] og xStorage Home [23].	8
Figur 5 - Illustrasjon av livsløpssyklusen for et litium-ionbatteri	9
Figur 6 - Skisse av oppgavens metodekombinasjon	11
Figur 7 - Skisse av oppgavens grunnleggende metode	12
Figur 8 - Fordeling av respons utfra totalt antall besøkende.	16
Figur 9 - Spørsmål 2: Hvilke retningslinjer/regler følger dere ved installering av litium-ionbatterier?	17
Figur 10 - Spørsmål 3: Stilles det spesielle krav til den som skal installere litium-ionbatterier i bolig?	17
Figur 11 - Spørsmål 4: Installerer dere mest brukte eller nye litium-ionbatterier?	18
Figur 12 - Spørsmål 5: Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg med garasje. Installerer dere det da i garasjen?	18
Figur 13 - Spørsmål 6: Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg uten garasje. Hvor plasserer dere normalt litium-ionbatterier?	19
Figur 14 - Spørsmål 7: Stiller dere noen spesielle krav for installering av brukte litium-ionbatterier?	19
Figur 15 - Spørsmål 8: Har dere forskjellige retningslinjer/regler til forskjellige størrelser på litium-ionbatteripakkene/batterisystemet? Skriv eventuelt hvor grensen går i «annet» feltet.	20
Figur 16 - Spørsmål 9: Stiller dere krav til BMS i batteriene dere bruker?	20
Figur 17 - Spørsmål 10: Hvor ofte gjennomføres det vedlikehold og kontroll ved batterisystemer i bolig?	21
Figur 18 - Spørsmål 11: Hva kreves av eieren av batterisystemet?	21
Figur 19 - Spørsmål 13: Hvilke tiltak nytter dere ved installasjon av litium-ionbatterier inne i bolig?	22
Figur 20 - Batteripakken fra forsøk 1 før testing og etter testing [13]	29
Figur 21 - Bilde av testoppsettet av forsøk 2 [34]	29
Figur 22 - Bilde av testoppsettet for forsøk 3 [35]	30
Figur 23 - Flammehøyde ved første jetflamme under forsøk 2 [34]	30
Figur 24 - Nedre brennbarhetsgrense som funksjon av ladetilstand	32
Figur 25 - Mangler i det norske hierarkiet ved installering av energilagringssystemer i bolig etter dagens ordning. Dette er indikert med rød farge.	34
Figur 26 - Bowtie modell som oppsummerer sannsynlighets- og konsekvensreducerende tiltak	44

## Tabellfortegnelse

Tabell 1 - Spenning som må til for å oppnå oksidasjon, altså gi fra seg elektron [5]. Tabellen tar for seg grunnstoffet litium og et utvalg av andre grunnstoffer til sammenligning.	3
Tabell 2 - Beskrivelse av sikkerhetsmekanismer på cellenivå [4] [15]. Dette vil si sikkerhetsmekanismer innebygd i hver enkelt celle i hele batteriet.	6
Tabell 3 - Beskrivelse av sikkerhetsmekanismer på batterinivå [4] [15]. Det vil si sikkerhetsmekanismer utenfor cellene, altså batteriet som helhet.	6

Tabell 4 - Krav for energilagringssystemer i bolig .....	22
Tabell 5 - Oppsummering av avstandskrav fra UL 9540 [40] .....	24
Tabell 6 - Generelle krav for energilagringssystemer for USA og Australia.....	25
Tabell 7 - NEK 400 krav til batteriinstallasjoner [28].....	26
Tabell 8 - Krav til innkapsling i UL 9540 [40] .....	26
Tabell 9 - Krav til batterikapsling i NEK 400 [28] .....	27
Tabell 10 - Installasjonskrav for xStorage Home [19] .....	27
Tabell 11 - Installasjonskrav for Tesla Powerwall [20] .....	28
Tabell 12 - Massetap i forhold til ladetilstand fra forsøk 1 [13] .....	31
Tabell 13 - Energiproduksjon i forhold til ladetilstand fra forsøk 1 [13].....	31
Tabell 14 - Tid til siste observasjon av synlig flamme [13] [34] [35] .....	32
Tabell 15 - Mengde frigitt giftig gass på cellenivå. Gasser fra innkapsling inngår ikke i dette resultatet [18].....	33
Tabell 16 - Gjennomsnittlig innhold og konsentrasjon av frigitte gasser før thermal runaway. Gasser fra innkapsling inngår ikke i dette resultatet [18].....	33
Tabell 17 - Konfidensnivå og feilmargin ved spørreundersøkelsen .....	45

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Det grønne skiftet åpner en ny verden for smarthusteknologi. For å kunne nå målene for reduksjon av klimagassutslipp er en avhengig av fornybare energikilder. Det er foreløpig lite kostnadseffektivt med energilagring i batterier i bolig, men det finnes flere forhold som kan endre dette. Det vil f.eks. være mer kostnadseffektivt å lagre egenprodusert strøm lokalt enn å selge til lav pris og kjøpe til høy pris når etterspørselen er på topp. Videre vil innføring av effekttariffer også gjøre det lønnsomt med energilagring. For boliger vil det også øke strømkapasiteten til opplading av elbiler og gi en bedre utnyttelse av solceller.

Litium-ionbatterier har de siste årene blitt den mest foretrukne energilagringsskilden på grunn av dens høye energitetthet, lange levetid og høye driftsspenning sammenlignet med andre batterier. Litium-ionbatterier er imidlertid følsomme for overladning, dyputladning, kortslutning og fysiske påkjenninger, noe som har vakt stor oppmerksomhet de siste årene. I motsetning til andre batterityper er batterielektrolytten i litium-ionbatterier også svært flyktig<sup>1</sup> og brannfarlig.

Bransjen som produserer, leverer og installerer energilagringssystemer for bolig opplever i dag stor usikkerhet rundt regelverket som omhandler dette. Store aktører som Tesla og Nissan, i samarbeid med Eaton, tilbyr i dag stasjonære løsninger for energilagring i batteri. Det blir også mer og mer vanlig at lokale leverandører tilbyr gamle bilbatterier som energilagringsskilde. Dette fører til at prisene blir presset ned, noe som kan bidra til økte forskjeller på kvalitet og sikkerhetssystem internt i batteripakkene. I Sør-Korea ble det rapportert så mange uønskede hendelser i perioden 2017-2019 med denne typen lagring at produksjonen i landet ble stanset [1]. For å hindre at dette skjer i Norge trengs det et tydeligere regelverk.

I gjeldende forskrift og tekniske krav til byggverk – byggt teknisk forskrift (TEK17) § 11-10 gir funksjonskrav knyttet til brann sikkerhet i forbindelse med tekniske installasjoner:

*«Tekniske installasjoner skal prosjekteres og utføres slik at installasjonene ikke øker faren vesentlig for at brann oppstår eller at brann og røyk sprer seg.» [2]*

Etter dagens ordning blir funksjonskrav fra forskriften oppfylt ved å følge veiledning til byggt teknisk forskrift (VTEK17) eller ved analytiske metoder [3]. Ofte blir disse metodene kombinert. Det viktigste hjelpemiddelet for å oppfylle funksjonskrav er preaksepterte løsninger og ytelser. Tekniske installasjoner i form av litium-ionbatterier som energilagringssystem er foreløpig ikke angitt i VTEK17. Norge har per i dag ikke opplevd uønskede hendelser med betydelig konsekvens for menneskeliv, husdyr eller store tap av materielle verdier. Brannteknisk regelverk i Norge er i stor grad basert på empiri, altså erfaring fra tidligere branner og hendelser. Dette fører til at temaet foreløpig ikke er prioritert av myndighetene og direktoratet for byggkvalitet (DiBK), og er fraværende i dagens regelverk.

## 1.2 Problemstilling

I denne oppgaven er det valgt å se på følgende problemstilling:

*Hvilke farer knyttet til brann kan forekomme ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig og hvilke branntekniske tiltak vil kunne redusere brannrisiko?*

Der er i boliger det omkommer flest mennesker som følge av brann, og det er her potensialet er størst for å redde liv. Det er dermed viktig å gjøre forskning på brann sikkerhet i slike bygg.

---

<sup>1</sup> Stoffets evne til å gå over i dampform

Bolig i denne oppgaven vil si enebolig, to- til firemannsbolig, rekkehus, kjedehus, terrassehus til og med tre etasjer og fritidshytter.

Det ble fokusert på å hente inn data for å senere diskutere følgende spørsmål:

- Hvordan er dagens situasjon i Norge? Hva blir gjort og hvilke forhåndsregler blir brukt i dag for å redusere brannrisiko?
- På hvilke måter vil det være mulig å overføre krav og løsninger fra utenlandsk regelverk til norsk regelverk?
- Hvordan vil en litium-ionbatteribrann oppføre seg og hva er dens karakteristiske trekk?
- Hvor vil det være forsvarlig og passende å plassere et litium-ionbatteri?
- Hvilke sannsynlighets- og konsekvensreduserende tiltak kan være med på å redusere brannrisikoen i bolig for slike installasjoner?

### 1.3 Formålet med oppgaven

Hovedformålet med oppgaven var å komme med anbefalinger til branntekniske tiltak for å redusere brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig. Dette kan være til inspirasjon når et nasjonalt regelverk skal utvikles. Oppgaven kan også bidra til at brannsikkerheten ved slike installasjoner blir ivarettatt i tiden før utvikling av regelverk, samt å skape mer klarhet og kunnskap til bransjen.

Metodene som ble lagt til grunn for arbeidet var; samtaler ulike aktører og fagpersonell, spørreundersøkelse, en studie på anerkjent litteratur og forskning på et utvalg av utenlandsk regelverk.

Multiconsult har et pågående samarbeid med blant annet forskningsinstituttet RISE som heter Fire Research and Innovation Center (FRIC). Hovedformålet med FRIC er å øke kunnskapen innen brannvitenskap for å støtte beslutninger og utvikle bedre løsninger som gir økt brannsikkerhet i bygninger. Dette innebærer også installasjon av litium-ionbatterier i bolig. En målsetting med denne oppgaven er å skape nytteverdi og verdiskapning for FRIC.

RISE er det instituttet i Norge som har forsket mest på litium-ionbatterier. RISE har gjort en studie på litium-ionbatterier i rapporten «Energieffektive bygg og brannsikkerhet» [4]. Denne presenterer relevante regelverk, veiledninger, standarder, batteriets oppbygning og funksjon, sikkerhetsmekanismer, potensielle feilmekanismer og innspill fra workshop og intervjuer. RISE sitt arbeid i den rapporten ga god forståelse og var til stor hjelp i startfasen av oppgaven. Denne oppgaven bygger videre på studiet til RISE, med inspirasjon fra følgende utsagn:

*«Regelverket som omhandler bruk av batteripakker i boliger bør presiseres med hensyn til plassering av batteripakke og hvilket sikkerhetsnivå som skal gjelde. Det bør utarbeides en veileder for personer som vurderer å installere batteri i hjemmet.» [4]*

Arbeidet fra denne oppgaven kan deretter videreføres til større bygg og skape gode funksjonskrav og preaksepterte løsninger til alle typer fremtidige grønne bygg.

### 1.4 Begrensinger

- Det ble kun sett på energilagring i batterier av typen litium-ion.
- Det ble ikke tatt hensyn til hvordan brann i litium-ionbatteri slukkes.
- Forskingen på utenlandske regelverk er begrenset til USA og Australia. Grunnen til dette er at disse landene har utviklet regelverk om energilagringssystemer av typen litium-ion og er engelskspråklig.
- Oppgaven tar ikke for seg byggeskikk og regler fra utenlandsk lovverk, men omfatter kun regler for energilagringssystemer i det aktuelle landet.

## 2 Batteriteori

I dette kapitlet blir det introdusert generell teori om litium-ionbatteri med fokus på oppbygning, virkemåte, sikkerhetsmekanismer og farer som kan føre til brann og eksplosjon. Det vil også bli presentert en livsløpsanalyse, samt relevante regelverk og standarder som omhandler energilagringssystemer av typen litium-ion.

### 2.1 Hvorfor litium?

Litium-ionbatterier fungerer ut ifra et konsept assosiert med metaller, kalt elektrokjemisk potensial som er metallets tendens til å miste elektroner. Litium har svært høy tendens til å miste elektroner. Grunnen til dette er at litium har tre elektroner til sammen, hvorav to i innerste skall og ett elektron i ytterste skall. Ved å gi bort det ytterste elektronet, vil litiumatomet oppfylle den såkalte «oktettregelen». Denne regelen sier at atomer reagerer ut fra et ønske om å ha åtte elektroner i ytterste skall, bortsett fra de minste atomene som kun har plass til to elektroner. Når litium atomet har gitt bort sitt ytterste elektron oppnår atomet oktettregelen. Av denne grunn er rent litium et meget reaktivt metall. Det reagerer også med vann og luft. Tabell 1 viser hvor mye spenning som må til for å oppnå oksidasjon<sup>2</sup> av grunnstoffet. Når Litiumatomet oksiderer til  $\text{Li}^+$  skapes det en spenning på -3,03 volt, noe som er mer enn alle andre grunnstoff. De andre metallene som er tatt med i utdraget fra tabellen med negativt fortegn skaper også en spenning når de oksiderer, men ikke like mye som litium. For å få fluor til å oksidere trengs det en spenning på 2,8 Volt. Minus i tabellen betyr altså at oksidasjonen skaper spenning, mens pluss betyr å anvende spenning fra en ekstern kilde på atomet for å tvinge elektron bort fra det [5].

Tabell 1 - Spenning som må til for å oppnå oksidasjon, altså gi fra seg elektron [5]. Tabellen tar for seg grunnstoffet litium og et utvalg av andre grunnstoffer til sammenligning.

Grunnstoff	Tendens til å miste elektroner [volt]
Litium	-3,03
Magnesium	-2,37
Sink	-0,76
Jern	-0,45
Hydrogen	0 (def.)
Sølv	0,80
Fluor	2,8

### 2.2 Virkemåte

Det som er så spesielt med litium er at i sin rene form vil det være et svært reaktivt metall. Likevel når litium er en del av et metalloksid, ofte referert som  $\text{LiMO}_2$ -struktur, er det ganske stabilt. Et litiumatom er skilt fra dens stabile tilstand i metalloksidet. Dette litiumatomet vil da være svært ustabil og vil umiddelbart danne et litium-ion<sup>3</sup> og et elektron. Hvis det da kan tilbys to forskjellige veier, en for elektronstrømmen gjennom en ekstern krets og en for litium-ion strømmen, vil de automatisk nå sin stabile tilstand i metalloksiddelen. I løpet av denne prosessen blir det produsert strøm fra elektronstrømmen gjennom denne eksterne kretsen. Ut ifra dette prinsippet er det klart at det kan produseres strøm hvis en først separerer litiumatomet fra metalloksidet, for så å føre elektronene gjennom en ekstern krets [6].

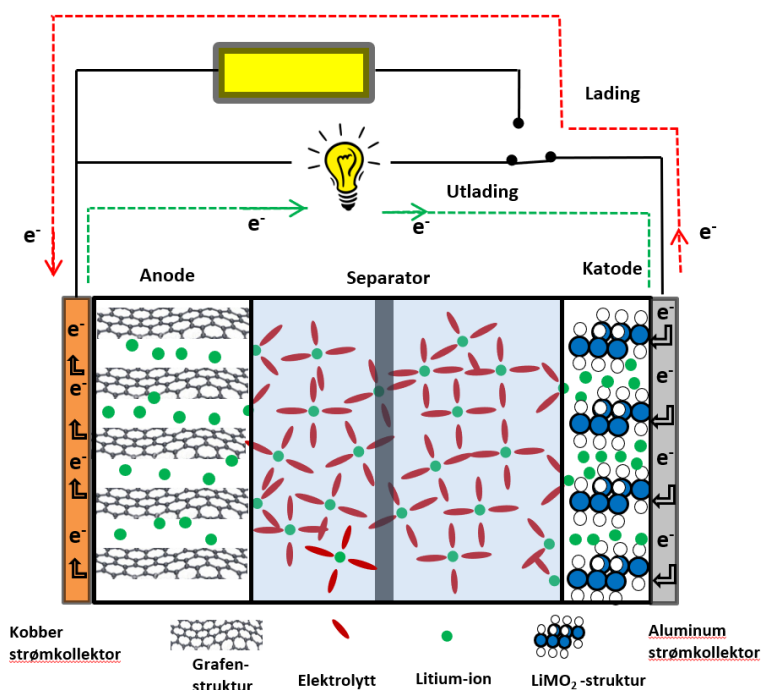
I tillegg til metalloksidet inneholder en litium-ioncelle en elektrolytt og en grafitt. Grafitten blir ofte referert som grafén eller grafén-struktur og består av en lagdelt struktur som er bundet slik at litiumionene enkelt kan lagres der. Mellom grafitten og metalloksidet er elektrolytten som

<sup>2</sup> Oksidasjon betyr å gi fra seg elektron

<sup>3</sup> Et ion er et atom som har mistet eller fått elektroner og blitt elektrisk ladd

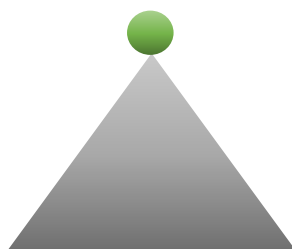


fungerer som en beskyttelse som kun tillater gjennomstrøm av litium-ioner, ikke elektroner [6]. Figur 1 viser en innvendig illustrasjon av en litium-ionbattericelle [4].



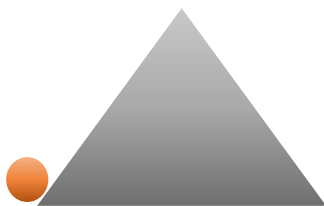
Figur 1 - En typisk litium-ionbattericelle med anode, katode og separator. I dette tilfelle er cellen tilkoblet en strømkilde hvor elektronene beveger seg fra katoden til anoden. Foto: RISE [4].

Når en strømkilde tilkobles, vil den positive siden tiltrekke og fjerne elektroner fra litiumatomene i metalloksidet slik at det blir dannet positivt ladde litium-ioner. Elektronene strømmer gjennom den eksterne kretsen da de ikke kan strømme gjennom elektrolytten for å nå grafitten. Samtidig blir de positivt ladede litium-ionene trukket mot den negative terminalen og strømmer gjennom elektrolytten. Litium-ionene når grafittlagene og blir fanget der. Når alle litium-ionene og elektronene har nådd grafittlagene er cellen fulladd. Dermed har battericellen oppnådd det første målet som er få skilt litiumionene og elektronene fra metalloksidet [6]. Dette vil være en ustabil tilstand, som om en ball ligger på toppen av en ås, som Figur 2 illustrerer.



Figur 2 - Illustrasjon av fulladet batteri. Dette indikerer en ustabil tilstand.

Så snart en belastning blir tilkoblet, eksempelvis strømmettet til en bolig, ønsker litium-ionene å gå tilbake til sin stabile tilstand som en del av metalloksidet. På grunn av litium sin høye tendens beveger litium-ionene seg gjennom elektrolytten, og elektronene gjennom belastningen. På denne måten oppnås det en elektrisk strøm gjennom belastningen, som at ballen glir nedover åsen. Når alle elektroner og litium-ioner har nådd metalloksidet er batteriet utladd og batteriet har nådd sin stabile tilstand, som Figur 3 illustrerer.



Figur 3 - Illustrasjon av uladet batteri. Dette indikerer en stabil tilstand.

## 2.3 Batteriets oppbygning og funksjon

Det finnes flere ulike typer batteri på markedet med ulike størrelser. I hovedsak er alle battericeller bygget opp av de samme komponentene. Det inneholder en anode og en katode som er atskilt av en separator, i tillegg til elektrolytten som transporterer ioner mellom anoden og katoden.

### 2.3.1 Anode og katode

Et batteri trenger to elektroder for å oppnå sin funksjon, en positiv og en negativ. Anoden er battericellens negative elektrode og er tilkoblet cellens negative pol, mens katoden er battericellens positive elektrode og er tilkoblet cellens positive pol. Ved utladning blir litiumionene fraktet fra anoden til katoden, og ved ladning er strømmen fra katoden til anoden [7] [8].

### 2.3.2 Separator

Hovedfunksjonen til separatoren er å isolere anoden fra katoden for å unngå transport av elektron mellom anoden og katoden, noe som vil forårsake intern kortslutning. Den skal samtidig tillate transport av ioner mellom anoden og katoden [8] [9].

Enkelte separatorer har en innebygd sikring som vil lukke porene til separatoren gjennom en smelteprosess. Denne sikkerhetsmekanismen vil være nyttig når det forekommer høye temperaturer, vibrasjoner, sjokk, eksterne kortslutninger og overlading [9].

### 2.3.3 Elektrolytt

Hovedfunksjonen til elektrolytten er å gjøre batteriet ledende ved å fremme bevegelsen av ioner mellom elektrodene. Elektrolytten består av litiumsalt i et organisk løsemiddel som er meget brannfarlig. Brennende elektrolytt kan antenne omliggende brennbart materiale [10] [11].

## 2.4 Thermal runaway

En battericelle vil være relativt stabil frem til den oppnår temperaturer på ca. 70-90 °C. Etter dette kan det forekomme prosesser hvor det produseres varme og brannfarlige gasser. Dersom gassene forsetter å reagere, vil temperaturen i cellen fortsette å stige til det oppstår thermal runaway. Thermal runaway er en ukontrollerbar eksoterm prosess som produserer mye varme på kort tid. Dette gjør at store mengder brennbare gasser dannes og sannsynligheten for at det oppstår en brann og eksplosjon i batteriet øker. Årsaker til dette er presentert i delkapittel 2.6.

Prosessene før thermal runaway kan beskrives slik [12] [13] [14]:

1. Ved 70-90 °C vil det forekomme reaksjoner som forårsaker korrosjon på anoden. Hvis temperaturen stiger videre, vil det beskyttende laget om anoden begynne å dekomponeres. Dette fører til at anoden reagerer med elektrolytten.
2. Videre som temperaturen øker vil det skje en eksoterm reaksjon<sup>4</sup> i katoden der den vil begynne å generere oksygen.

<sup>4</sup> Frigjørelse av energi ved å omgjøre potensiell energi til kinetisk energi

3. Etter hvert som temperaturen øker til ca. 180 °C vil katoden bli brutt ned og elektrolytten blir oksidert. Dette vil føre til en hurtig temperaturøkning, og thermal runaway er i gang.

Ingen sikkerhetsmekanismer i batteriet er i stand til å stoppe thermal runaway, med de kan være med å hindre at en battericelle kommer dit.

## 2.5 Sikkerhetsmekanismer i batteriet

Litium-ionbatterier krever høy nøyaktighet ved design for å forhindre uønskede hendelser. Dette inkluderer passive og aktive sikkerhetsmekanismer integrert i batteriet. Passive tiltak har en dimensjonert funksjon, mens aktive tiltak blir aktivert når uønskede forhold blir registrert. Disse er presentert i Tabell 2 og Tabell 3. Den viktigste oppgaven er å hindre at en battericelle når thermal runaway, og videre unngå at det sprer seg videre til andre celler.

Tabell 2 - Beskrivelse av sikkerhetsmekanismer på cellenivå [4] [15]. Dette vil si sikkerhetsmekanismer innebygd i hver enkelt celle i hele batteriet.

Sikkerhetsmekanisme	Beskrivelse
Positive temperature coefficient (PTC)	Hvis strømmen gjennom en celle overstiger en gitt grense, vil PTC-en ekspandere og begrense strømmen. Dette skjer ved temperaturer på rundt 125 °C inni cellen
Circuit interrupt device (CID)	En sikkerhetsmekanisme som bryter strømkretsen hvis gasstrykket inne i en celle overstiger en gitt grense
Termostat	Blir den interne temperaturen for høy vil termostaten kutte strømmen. Den er innstilt på en maksimaltemperatur godt under smeltepunktet og den mekaniske bruddtemperaturen til separatorene
Smeltesikring	Inne i cellen er det et stoff som smelter ved en temperatur på 30-50 °C høyere enn vanlig driftstemperatur. Dette skal beskytte mot thermal runaway
Sikkerhetsventil	Sikkerhetsventil skal sikre mot høyt trykk inne i cellen. Dersom trykket overstiger en gitt grense, vil sikkerhetsventilen åpne seg og frigjøre trykket. Dette er en sikkerhetsmekanisme for å hindre eksplosjon i en celle

Tabell 3 - Beskrivelse av sikkerhetsmekanismer på batterinivå [4] [15]. Det vil si sikkerhetsmekanismer utenfor cellene, altså batteriet som helhet.

Sikkerhetsmekanisme	Beskrivelse
Battery Management System/Batteri Ledelsessystem (BMS)	BMS-en er selve hjernen til batteriet og overvåker alt som skjer. Blant annet sørger den for at det tappes strøm jevnt over battericellene og at cellene ikke overlades. Om BMS-en registrerer tilstander utenfor dens normalområde vil den sette i gang tiltak for å prøve å normalisere situasjonen. Dette kan eksempelvis være ved at ladningen stenges av ved unormal ladning, eller ved at ekstra ventilasjon iverksettes ved høye temperaturer
Inndeling i moduler og grupper	Større batterier er delt inn i ulike grupperinger og moduler. Dette gjøres for å begrense konsekvensen ved en uønsket hendelse i større batterier. Å dele batteriet inn i moduler og grupper er en viktig barriere for å hindre spredning av thermal runaway
Kjølesystem	Kjølesystemet er ofte basert på vann eller luft og vil bidra til å holde celledemperaturene på sikkert nivå, bremse oppvarminger i battericellene og varmeoverføring til naboceller

## 2.6 Forhold som kan forårsake brann- og eksplosjonsfare

Det finnes en rekke forhold som kan forårsake brann- og eksplosjonsfare i et litium-ionbatteri. De vanligste årsakene er presentert her.

### 2.6.1 Overlading

Overlading representerer et av de scenarioene som fører til høyest risiko for uønskede hendelser. Dette forekommer når batteriet lades til et punkt der den interne spenningen i batteriet er større enn det batteriet er i stand til å håndtere. Batterier som overlades blir ustabile og begynner å produsere karbondioksid (CO<sub>2</sub>), noe som videre vil føre til at trykket og temperaturen i cellene øker. Fortsetter ladningen vil trykket øke ytterligere, noe som kan føre til utvidelse, sprekker, eksplosjon og brann. Feilmekanismer som kan føre til overlading kan være defekte ladere eller utilstrekkelig beskyttelse i batteriet, som at BMS-en ikke greier å overvåke cellespenningen i cellene [16] [17].

### 2.6.2 Dyputlading

Dyputlading eller lagring av energi i utladede batterier i lengre perioder kan føre til nedbrytning av elektrolytten. Dette kan produsere varme gasser som gjør den mer utsatt for andre typer feil. F.eks. kan den under senere ladning skade separatorene og i verste fall framprovosere en kortslutning. En typisk feil som kan forårsake dyputlading er at BMS-en ikke har kontroll over spenningene i cellene [16] [17].

### 2.6.3 Høye temperaturer

Blir batteriet eksponert for høye temperaturer, som fra en ekstern brann, kan dette framprovosere thermal runaway. Høy omgivelsestemperatur kan føre til at indre temperaturen øker utover akseptable grenser [16] [18]. Akseptabel omgivelsestemperatur varierer fra batteri til batteri, men ligger vanligvis på ca. 30-50 °C [19] [20].

### 2.6.4 Ekstern kortslutning

Ekstern kortslutning oppstår dersom det er lav elektrisk motstand mellom batteriets positive- og negative pol, og vil operere som en hurtig utladingsprosess. Dette vil føre til høy varmeproduksjon, som i verste fall kan føre til brann. Årsaker til ekstern kortslutning kan være om batteriet blir utsatt for fysiske påkjenninger eller store mengder vann. Farer som forårsaker ekstern kortslutning, kan reduseres ved å beskytte de innebygde elektroniske komponentene som kontrollerer den elektriske strømmen. Beskyttelsen bør sørge for at kretsen blir kuttet under for høye strømmer. Sikringer som PTC er den mest effektive løsningen for dette [16].

### 2.6.5 Intern kortslutning

Intern kortslutning skjer dersom det oppstår direkte kontakt mellom katoden og anoden. Nesten alle uønskede forhold fører til svikt i separatorene, noe som gir fri bane for direkte kontakt med elektrodene. Oppstår det intern kortslutning frigjøres den elektrokjemiske energien i batteriet, noe som vil føre til varmetvikling [16].

### 2.6.6 Mekanisk skade

Hvis en celle blir mekanisk skadet, utgjør det en risiko for at elektrodene kommer i kontakt og kortslutter [18]. Denne kortslutningen kommer dermed av samme feilmodusen som for oppvarming når elektrolytten fordampes. Penetrering, støt og vibrasjoner er eksempler mekaniske påkjenninger som kan føre til thermal runaway.

## 2.7 Praktisk bruk av energilagringssystem

Det finnes flere måter å produsere fornybar strøm på, som solenergi, vindkraft og bølgekraft. Ofte er det ønskelig å lagre den produserte energien, slik at den kan brukes ved en senere anledning. Solenergi fra solcelleanlegg er den vanligste måten å produsere egen fornybar energi i boliger. Den tiden på døgnet solen skinner, og energi blir generert er ofte den tiden folk flest

ikke er hjemme og trenger strøm. For å kunne utnytte egen generert energi fra solcellepanelet uten å være avhengig av det elektriske strømmettet må altså energien lagres et sted. Et energilagringssystem koblet til solcelleanlegget vil gjøre det mulig å operere uavhengig av det elektriske strømmettet. Det vil også være en barriere som sikrer strøm i tilfelle strømbrudd. Hvis batteri ikke inngår i solcelleanlegget, blir overskuddsstrømmen matet inn på strømmettet. Det er mulig å få betalt for denne strømmen gjennom en plusskundeavtale med strømleverandør [21].

## 2.8 Energilagringssystem for privat bruk

Energilagringssystemer for privat bruk kan normalt lagre 1-15 kWh energi [4]. Et eksempel på et system som kan brukes i private boliger er Tesla Powerwall, som har en kapasitet på 13,5 kWh. Dette energilagringssystemet bruker nye litium-ionbatterier til å lagre overskuddsenergien fra f.eks. solcellepanel. Den kan også kjøpe billig strøm om natten, for så å forsyne boligen med den på dagtid. Det kommer egne installasjonsmanualer til dette produktet. Prislappen for dette systemet er på ca. 100 000 NOK [22].

Et annet eksempel er Nissan i samarbeid med Eaton og deres xStorage Home. Dette produktet består av gamle Nissan Leaf elbilbatterier og fungerer etter samme prinsipp som Tesla Powerwall. xStorage Home kommer i forskjellige størrelser, fra 4,2 kWh og opp til 10,1 kWh. Dette produktet har også egne installasjonsmanualer [23]. Prisen på dette systemet varierer etter størrelse. Den minste på 4,2 kWh har en prislapp på ca. 40 000 NOK [24]. Figur 4 viser hvordan hhv. en Tesla Powerwall og xStorage Home ser ut [25] [23].



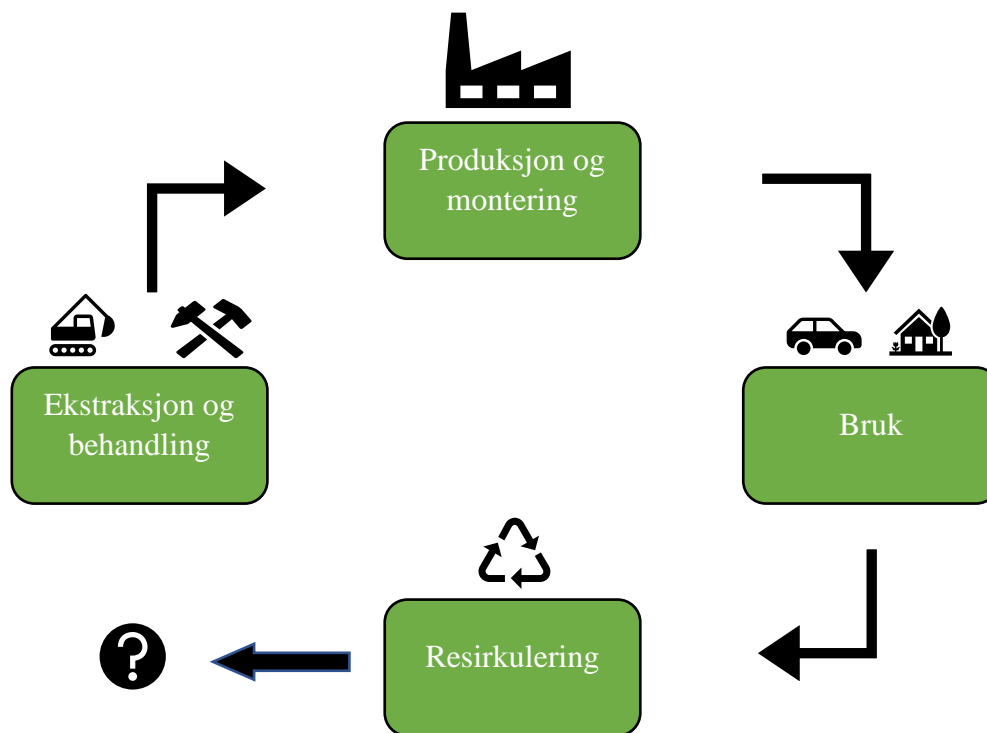
Figur 4 - Tesla Powerwall [25] og xStorage Home [23]

## 2.9 Livsløpsanalyse

Livsløpsanalyse er en analyse som evaluerer miljømessige konsekvenser knyttet til et produkt. Analysen inkluderer hele livssyklusen til produktet, noe som innebærer uttak av råmaterialer, produksjon, distribusjon, bruk, gjenbruk og resirkulering. Formålet med denne typen analyse er å ta velbegrunnede avgjørelser tilknyttet miljøbelastning.

Litium utvinnes for det meste i Sør-Amerika fra saltsjøer [26]. Litiumet blir så sendt videre til forskjellige produksjonsanlegg rundt omkring i verden. Her blir det produsert enkle celler før de blir satt sammen til et batteri. Batteriene blir så sendt videre til en produsent som leverer energilagringssystemer, elektrisk kjøretøy el. Her blir batteriet satt sammen til et større system før det blir sendt videre til et varehus og derfra blir solgt videre til en kunde [27]. Figur 5 viser en overordnet oversikt over livsløpszyklusen for et litium-ionbatteri. Det som skjer etter endt

levetid, finnes det ikke en fasit på. Ofte blir batteriet transportert til et avfallssted eller til et gjenvinningsanlegg. For å gjøre det mulig å resirkulere batteriene må de først deaktiveres, dvs. utlades. Deretter må batteriet skrus opp slik at de forskjellige delene kan sorteres.



Figur 5 - Illustrasjon av livsløpssyklusen for et litium-ionbatteri

## 2.10 Regelverk

Dette delkapittelet omhandler relevante regelverk og standarder som finnes i Norge og andre land i dag.

### 2.10.1 Norsk regelverk

TEK17 §11-10 gir et funksjonskrav knyttet til brannsikkerhet i forbindelse med tekniske installasjoner, men regelverket mangler videre detaljer for hvordan dette funksjonskravet skal ivaretas for batterisystemer. De mest konkrete kravene finnes i Norsk Elektronisk Komite (NEK) sin standard NEK 400:2018 Elektriske lavspenningsinstallasjoner (NEK 400) [28]. Standarden oppgir hvilke krav som gjelder for batteriinstallasjoner, men ikke hva som skal til for å tilfredsstille de. En tilleggsstandard til denne er NEK TS 400 Bolig:2019 (NEK TS 400 Bolig), som kun tar for seg tekniske installasjoner i bolig [29].

### 2.10.2 Utenlandske regelverk

USA, Australia og Sør-Korea er ofte de landene som blir nevnt når det er snakk om litium-ionbatteri teknologi. Disse landene har også etablerte regelverk for slike batteriinstallasjoner. Europeiske land som Frankrike, England, Tyskland, Sverige og Danmark, har på lik linje med Norge, svært begrenset med krav til litium-ionbatterier som energilagringssystem. Nederland holder i disse dager på å utvikle et regelverk, som forventes å komme i løpet av de neste årene.

Det amerikanske regelverket som omhandler brannsikkerhet varierer fra stat til stat, by til by og kommune til kommune. Det finnes to organisasjoner som gir ut «fire codes» og standarder; National Fire Protection Association (NFPA) og International Code Council (ICC) [30] [31]. En «fire code» kan tolkes som regler og forteller hva som skal gjøres, mens standardene forteller

hvordan det skal gjøres [30]. Standardene angir konkrete løsninger, men gir også rom for alternative løsninger. USA har også utviklet teststandarder som det er referert til i regelverket.

I Australia har organisasjonen «Standards Australia» utviklet en standard for energilagringssystemer. Denne gjelder også for New-Zealand. Lovverket i Australia referer ofte til denne standarden i lovgivningen.

I Sør-Korea har nylig regelverket blitt strammet inn etter at produksjonen av energilagringssystemer med litium-ionbatterier måtte stanses i nesten 6 måneder grunnet for mange rapporterte uønskede hendelser [32]. En organisasjon kalt Korean Standards Association har utviklet flere standarder for energilagringssystemer i dette landet. Disse er ikke oversatt til andre språk.

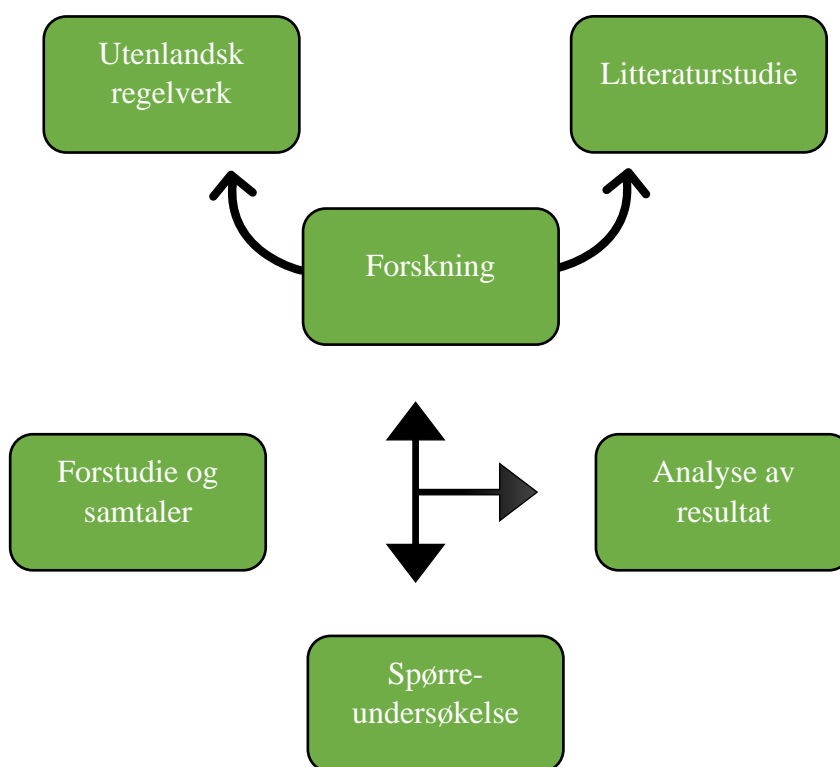


### 3 Metode

Dette kapitlet omhandler hvilke metoder som ble lagt til grunn for å svare på problemstillingen. Oppgaven startet med kvalitativ informasjonsinnhenting for å få en forståelse av batteriets oppbygning og virkemåte, samt en oversikt over relevante regelverk som omhandler energilagringssystemer. Videre ble det gjennomført en kvantitativ tilnærming i form av samtaler med ulike aktører og fagpersonell for å få et bilde av dagens situasjon. Selve datainnsamlingen startet med kvalitativ forskning på utenlandske regelverk og en litteraturstudie på brann og thermal runaway i litium-ionbatterier. Parallelt med dette ble det utviklet en kvantitativ tilnærming i form av spørreundersøkelse for å kartlegge hullene i norsk regelverk og hvilke problemer norske aktører har i dag med energilagringssystemer for bolig.

#### 3.1 Metodekombinasjon

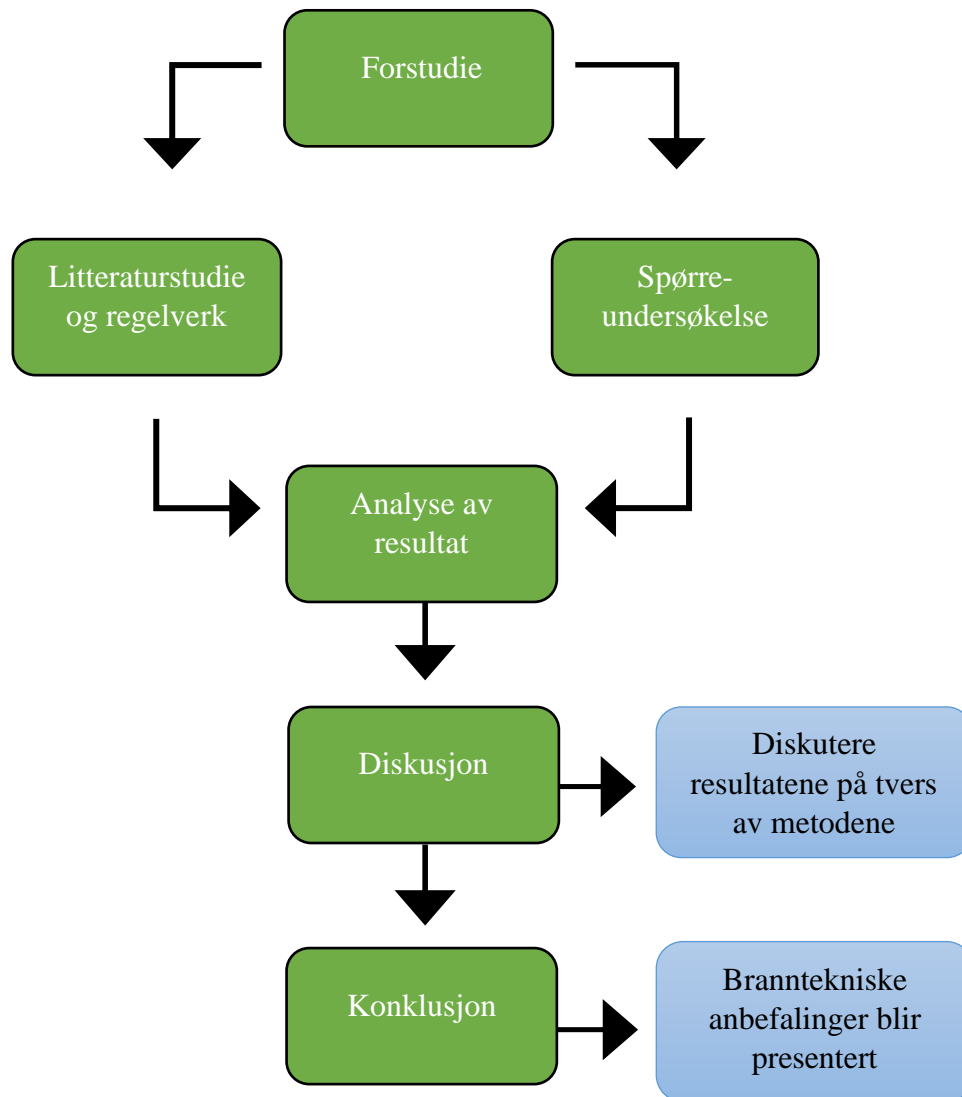
En metodekombinasjon gjennomføres ved hjelp av ulike metodiske innfallsvinkler som tar for seg den samme problemstillingen. For å få gyldige resultater trengs det flere metoder som gir en sammenfallende konklusjon. Dette vil være med å øke oppgavens integritet og validitet. Figur 6 viser hvordan metodekombinasjon ble brukt i denne oppgaven.



Figur 6 - Skisse av oppgavens metodekombinasjon

Forstudie og samtaler med aktører og fagpersoner var nødvendig for å tilegne seg tilstrekkelig bakgrunnsforståelse for å gjennomføre utvikling av spørreundersøkelse, videre forskning på utenlandsk regelverk og litteraturstudie. Resultatene fra metodene ble deretter analysert for å vurdere dens kvalitet og validitet. Videre ble resultatene fra metodene satt opp mot hverandre. På denne måten ble kvalitativ og kvantitativ forskning kombinert, noe som resulterte i en sammenfallende diskusjon og konklusjon. Figur 7 viser den grunnleggende metoden gjennom hele oppgaven.





Figur 7 - Skisse av oppgavens grunnleggende metode

### 3.2 Forstudie

Hensikten med å gjøre en forstudie var å tilegne seg tilstrekkelig kunnskap for å gjennomføre de ulike metodene, og for å kartlegge hvilke problemer ulike aktører har. Informasjonsinnhenting kom hovedsakelig fra RISE sin rapport om «Energieffektive bygg og brannsikkerhet» [4], samt fra samtaler med ulike aktører og fagpersoner.

RISE rapporten ga god forståelse for litium-ionbatteriets oppbygning, funksjon, sikkerhetsmekanismer og potensielle feilmekanismer. Rapporten til RISE presenterte også relevante regelverk, veiledninger og standarder. Dette var med på å legge grunnlaget for videre litteraturstudie og forskning på regelverk.

Det ble gjennomført telefonsamtaler med energiselskaper, installatører, leverandører og grossister. Dette var nødvendig for å kunne forstå dagens situasjon i Norge. Samtalene ga inspirasjon til flere av spørsmålene i spørreundersøkelsen. Det ble også gjennomført samtaler med forsikringsselskaper, men siden temaet for denne oppgaven er nytt i Norge var det ikke noe informasjon å hente derfra. Videre ble det også gjennomført samtaler med fagpersonell i Multiconsult og RISE for å få innspill til forskningsspørsmål i oppgaven.

### 3.3 Spørreundersøkelse – kvantitativ forskning

Det ble brukt en kvantitativ tilnærming i form av spørreundersøkelse for å kartlegge hullene i norsk regelverk og for å finne ut hva som blir gjort i Norge i dag. Det ble brukt nettsiden [www.survio.com](http://www.survio.com). Spørreundersøkelsen var viktig for å kunne forstå hvilke usikkerheter og problemer den norske bransjen står ovenfor, noe som var til inspirasjon videre i denne oppgavens arbeid. Målgruppen for spørreundersøkelsen var bedrifter og installatører som installerer litium-ionbatterier som energilagringssystem i bolig. For å kontrollere at respondentene var innenfor målgruppen ble det laget et spørsmål om deres rolle i bedriften de jobbet i. Det krevdes også en del kunnskap for å besvare spørsmålene, noe som gjorde det mulig å skille ut ugyldige resultater når de ble analysert. Spørreundersøkelsen hadde totalt 15 spørsmål, se Vedlegg A – Spørreundersøkelse.

Respondentene til spørreundersøkelsen ble funnet gjennom [Finnsolenergi.no](http://Finnsolenergi.no), som er et bransjeregister utviklet av Norsk solenergiforening. Registeret gir en oversikt over norske aktører som leverer tjenester og produkter innen solenergi. Spørreundersøkelsen ble sendt via mail, se Vedlegg B – Utsending av spørreundersøkelse. Hadde bedriften informasjon om enkeltpersoner i målgruppen ble spørreundersøkelsen sendt direkte til dem. I de tilfellene dette ikke var mulig ble undersøkelsen sendt til sentralbord, med beskrivelse om å sende den videre til personell i bedriften som var innenfor målgruppen. Spørreundersøkelsen ble også publisert på Facebook siden til Solenergiklyngen, Norsk Solenergiforening Trøndelag og Norsk Solenergiforening Bergen.

Det ble hovedsakelig brukt lukkede spørsmål med valgalternativer. Slike spørsmål hindrer feiltolkninger og gjør det enklere samt mer tidseffektivt for respondenten å svare. Dette gjør det også enkelt å kode svarene og sammenligne respondentene. For å ta hensyn til eventuelle mangler i valgalternativer ble det laget en skriveboks til hvert spørsmål hvor respondenten kunne svare noe annet enn valgalternativene. Flere valgte å ta i bruk dette, og disse svarene ble så lagt inn som egne svar i resultatdelen.

Installasjon av litium-ionbatterier i bolig er et fremadstormende marked og det finnes kun et begrenset antall bedrifter i Norge som hadde kunnskap og erfaring nok til å svare på spørreundersøkelsen. Dette fører til en noe lav pålitelighet og konfidensnivå i svarene. Svarene fra spørreundersøkelsen er derfor kun en indikasjon, ikke en fasit. Svarene fra spørreundersøkelsen ble ikke brukt som inspirasjon til branntekniske anbefalinger siden Norge ligger langt bak blant annet USA og Australia på dette temaet.

I forbindelse med kartleggingen av dagens situasjon i Norge var bedriftsbesøk en metode som ble vurdert. Etter samtaler med ulike aktører og spørreundersøkelsen ble det tatt en beslutning om å forkaste denne metoden. Beslutningen ble tatt etter en vurdering på at daværende informasjonsinnhenting var nok til å forstå dagens situasjon i Norge.

Oppfølgingsspørsmål og intervjuer etter spørreundersøkelsen var også en metode som ble vurdert for å kartlegge uønskede hendelser i Norge. På bakgrunn av at ingen respondenter svarte at de hadde opplevd dette, ble også denne metoden forkastet.

### 3.4 Regelverk – kvalitativ forskning

Det eksisterer minimalt med norsk regelverk for installasjon av litium-ionbatterier som energilagringssystem i bolig. På bakgrunn av dette ble det brukt en kvalitativ tilnærming som innebar lesing og tolkning av et utvalg utenlandske regelverk. Dette var viktig for å tilegne informasjon fra land som er ledende innen litium-ionbatteri teknologi. Dette skal være et hjelpemiddel og inspirasjon for de branntekniske anbefalingene.

Utvalget består av regelverk og standarder fra USA og Australia. Disse landene ble valgt på bakgrunn av at de har utviklet relevante regelverk, som også er engelskspråklig. Regelverk fra Sør-Korea og flere europeiske land ble også vurdert. Sør-Korea har, på lik linje med USA og Australia, utviklet relevant regelverk, men på grunn av språk ble regelverk fra dette landet utelatt. Europeiske land som Frankrike, England, Tyskland, Sverige og Danmark har svært begrenset med relevant regelverk, og ble dermed også utelatt fra denne delen.

I USA er det flere standarder og regelverk som omhandler energilagringssystemer. Denne oppgaven vil se på tre av disse, NFPA 1 Fire Code (NFPA 1), NFPA 855 Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems (NFPA 855) og International Residential Code (IRC). De to førstnevnte er utviklet av organisasjonen NFPA. De baserer sine standarder og regelverk på over 250 tekniske komiteer fordelt på over 9 000 mennesker som bidrar til kontinuerlig revisjon og oppdateringer [30]. IRC er utviklet av ICC, og tar for seg noen punkter med energilagring for bolig. Disse ble valgt på bakgrunn av anbefalinger fra fagpersonell, tilgjengelighet og innhold. Det ble også vurdert å se på ICC sin «fire code» International Fire Code (IFC) [33]. Denne angir forskrifter for brannforebygging og brannsikringssystemer og brukes i 42 stater i USA [31]. Det er store likheter mellom denne og NFPA 1, og etter anbefalinger fra fagpersonell ble det valgt å se bort fra IFC, og heller fokusere på NFPA 1. Denne oppgaven tar også for seg krav fra en amerikansk teststandard som heter UL 9540 Standard for Energy Storage Systems and Equipment (UL 9540). Amerikansk regelverk henviser ofte til denne. UL er en organisasjon som lager standarder for både USA og Canada. Denne omhandler testing og innkapsling av batterier.

Fra Australia ble standarden «AS/NZS 5139:2019: Electrical installations - Safety of battery systems for use with power conversion equipment» (AS/NZS 5139) brukt [34]. Denne er utviklet av organisasjonen «Standards Australia».

Det knyttes en del usikkerheter rundt denne metoden når det kommer til forskjeller i generell byggeskikk og krav i regelverk fra USA og Australia, sammenlignet med Norge. I tillegg er også kultur- og klimaforskjeller faktorer som kan påvirke krav i regelverk. Kravene og løsningene fra utenlandske regelverk må derfor analyseres for å kunne vurdere overførbarheten til norsk regelverk. Det er kun NFPA 855 som er direkte knyttet opp mot energilagringssystemer i bolig. NFPA 1 tar for seg generelle krav til energilagring og IRC er i hovedsak en boligstandard med noen krav til energilagring. AS/NZS 5139 tar også for seg energilagring generelt, men har også noen spesifikke krav for bolig.

### 3.5 Litteraturstudie – kvalitativ forskning

Formålet med å gjøre en litteraturstudie var å kartlegge brannegenskapene for litium-ionbatteri og dens karakteristiske trekk i perioden før og under en brann. Det ble brukt en kvalitativ tilnærming i form av studie på tidligere forskning om brann og thermal runaway i litium-ionbatterier. Det foreligger også en del tilgjengelig forskningsarbeid på brannutvikling i litium-ionbatterier. På bakgrunn av dette ble det gjort en vurdering på å ikke gjøre egne praktiske forsøk, for å unngå å gjøre andres arbeid på nytt.

Det finnes derimot begrenset med publisert forskningsarbeid på brann i litium-ionbatterier for privat bruk. Dette gjorde vurderingen av resultatets overførbarhet ekstra utfordrende. Informasjonen ble hentet fra flere forsøk for så å sammenligne resultater. Her er en oversikt over forsøkene denne oppgaven har studert for å kartlegge litium-ionbatteriets karakteristiske trekk under brann:

1. Et lite litium-ion batterier med en kapasitet på ca. 0,6 kWh. Det ble gjort tre forsøk med forskjellig ladetilstand, 100 %, 50 % og 0 %. Forsøkene ble utført innendørs i et forskningssenter i Kina av forskere tilknyttet forskjellige universiteter i landet [13].

2. Et stort energilagringssystem fra Tesla bestående av 16 fulladede litium-ionbatterier med en total kapasitet på 100 kWh. Forsøket ble utført utendørs på vegne av Fire Protection Research Foundation som er en del NFPA i USA [35].
3. Et fulladet elbilbatteri med en kapasitet på 16 kWh. Dette forsøket var også utført utendørs på vegne av Fire Protection Research Foundation [36].

Disse tre forsøkene ble valgt på bakgrunn av at det var litium-ionbatterier som ble testet, og forsøkene presenterte data. Disse forsøkene tok ikke for seg slukking av brann i litium-ionbatterier og omhandler heller ikke brann- og røykspredning fra litium-ionbatterier. Det ble likevel, ut ifra informasjonen fra forsøkene, gjort en vurdering på brannspredningen fra en brann i litium-ionbatteri. Røykspredning fra slike batterier trengs det mer forskning på for å vurdere.

Det er viktig å understreke at en brann er et uforutsigbart fenomen og vil alltid oppføre seg forskjellig fra situasjon til situasjon. Parametere som påvirker en brann, er mange. Blant annet er omgivelsestemperatur, vind og hvilke metoder som blir brukt til å fremprovosere brannen er viktige parametere. I tillegg vil batteriets oppbygning, størrelse, innkapsling og sikkerhetsmekanismer påvirke brannen.

Videre ble det brukt et studium fra Nanjing Tech University i Kina for å kartlegge brennbarhetsgrensene og eksplosjonsfaren ved thermal runaway [37]. Det ble også gjort en litteraturstudie på en rapport fra Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (DNV GL Group AS) for å kartlegge avgassene under thermal runaway [18]. Disse studiene ble gjort for å skape bredere diskusjonsgrunnlag for plassering, ventilasjon og deteksjon.

Det ble det også gjennomført en litteraturstudie på uønskede hendelser fra Sør-Korea. Formålet med dette var å analysere og kartlegge hva som førte til hendelsene og deretter hente lærdom fra det. På bakgrunn av de nevnte uønskede hendelsene i Sør-Korea ble dette landet valgt.

Litteraturstudie var viktig for å kartlegge hvilke tiltak som kan redusere risikoen for farlig miljø, antennelse og brannspredning fra batteriet. Disse aspektene vil være et viktig supplement for de branntekniske anbefalingene.

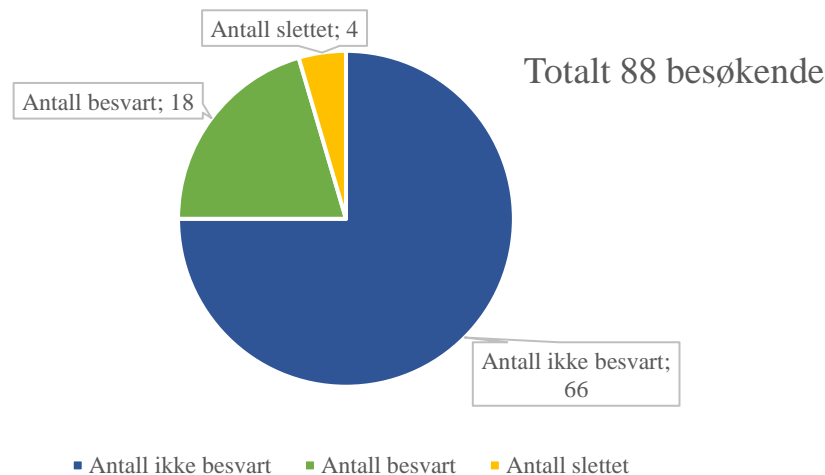
## 4 Resultater

I dette kapitlet presenteres forskningsresultater fra spørreundersøkelsen og utenlandsk regelverk. Videre fremstilles resultater fra litteraturstudiet på eksisterende brannforsøk på litium-ionbatteri. I tillegg presenteres erfaringer fra uønskede hendelser i Sør-Korea.

### 4.1 Resultater fra spørreundersøkelse

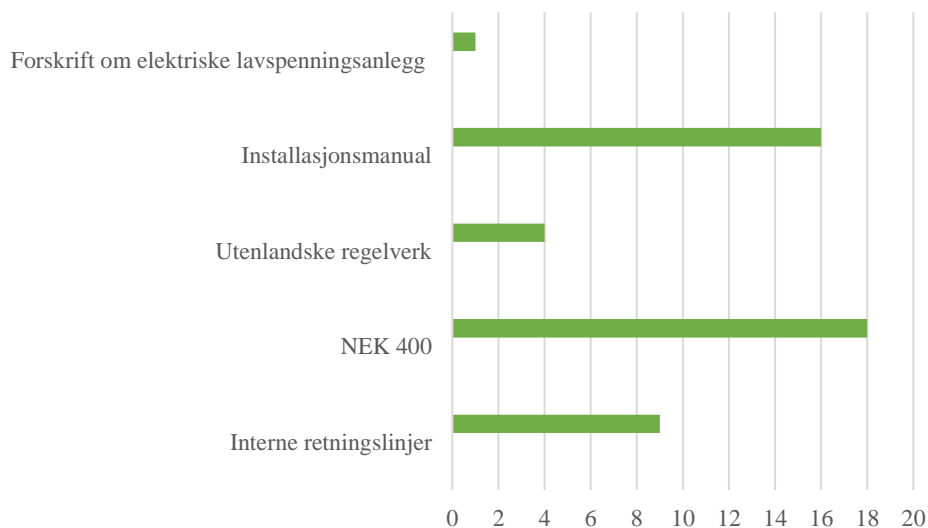
Dette delkapittelet presenterer de viktigste resultatene fra spørreundersøkelsen i form av grafer med beskrivende tekst. Se Vedlegg C – Grafer fra spørreundersøkelsen for resultatet av hele spørreundersøkelsen. Resultatene baseres på 18 besvarelser. Respondentene var daglige ledere, prosjektledere, leverandører, installatører, montører, ingeniører og teknisk ledere. Ingen respondenter har hatt uønskede hendelser tilknyttet brann i batterisystemene.

Totalt var det 88 besøkende på nettsiden til spørreundersøkelsen hvorav 22 av disse besvarte den. Besøktallet i forhold til antall besvarelser sier at flere personer som mottok spørreundersøkelsen ikke var i målgruppen. Fire besvarelser ble slettet, dette skyldtes at personene ble vurdert til å ikke ha nok kompetanse. Figur 8 viser fordelingen av personer som har trykket seg inn på spørreundersøkelsen. Dette inkluderer de som besvarte, ikke besvarte og de som ble slettet.



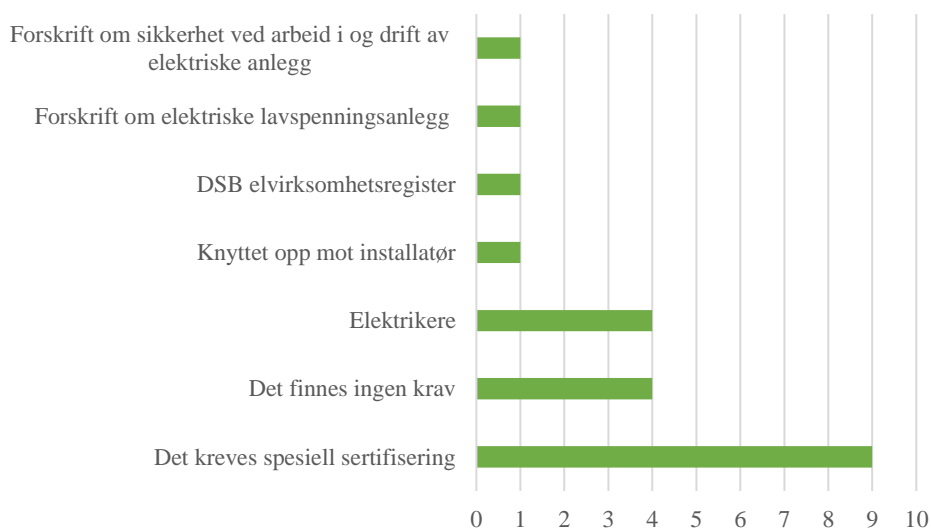
Figur 8 - Fordeling av respons utfra totalt antall besøkende

Figur 9 viser resultatene fra spørsmål 2. Her ble respondentene spurt om hvilke retningslinjer/regler som følges ved installering av litium-ionbatteri. Alle respondenter svarer at de følger NEK 400, og de fleste følger også en installasjonsmanual. Et fåtall bruker utenlandske regelverk, men det er ikke oppgitt hvilket regelverk disse følger.



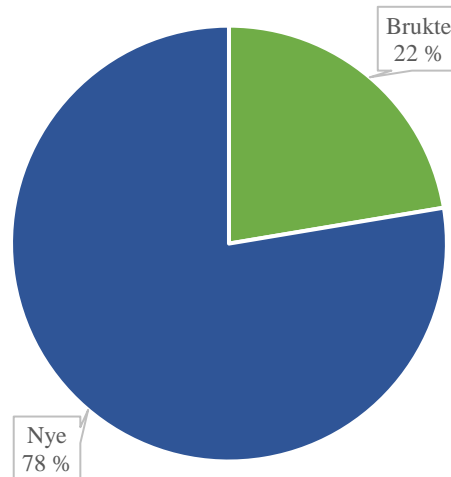
Figur 9 - Spørsmål 2: Hvilke retningslinjer/regler følger dere ved installering av litium-ionbatterier?

Figur 10 viser resultatene fra spørsmål 3. Her ble respondentene spurt om det stilles spesielle krav til personellet som installerer litium-ionbatteri i bolig. Halvparten svarte at det krevdes.



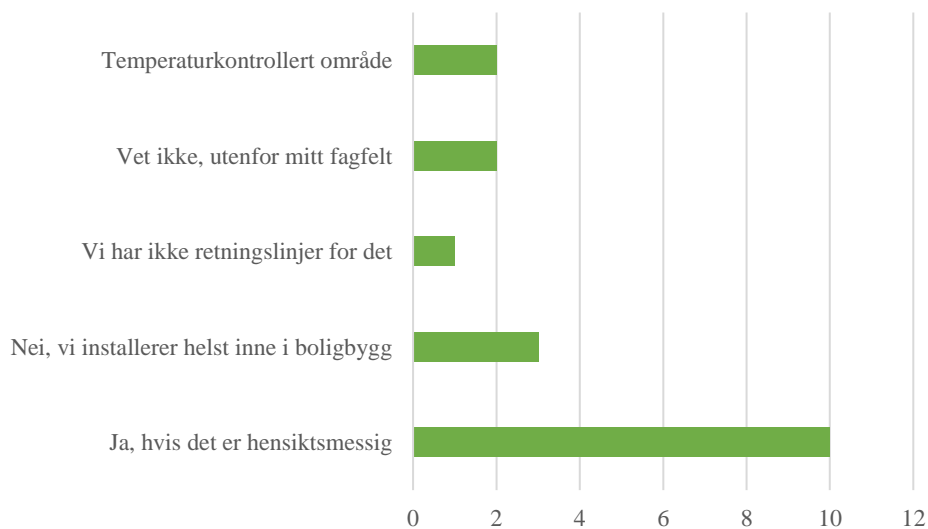
Figur 10 - Spørsmål 3: Stilles det spesielle krav til den som skal installere litium-ionbatterier i bolig?

Figur 11 viser resultatene fra spørsmål 4. Her ble respondentene spurt om de installerer flest brukte eller nye batterier. Fire respondenter svarte ikke på dette spørsmålet. Resultatene fra dette spørsmålet viste at 78 % av installerte batterier nye, og 22 % brukte.



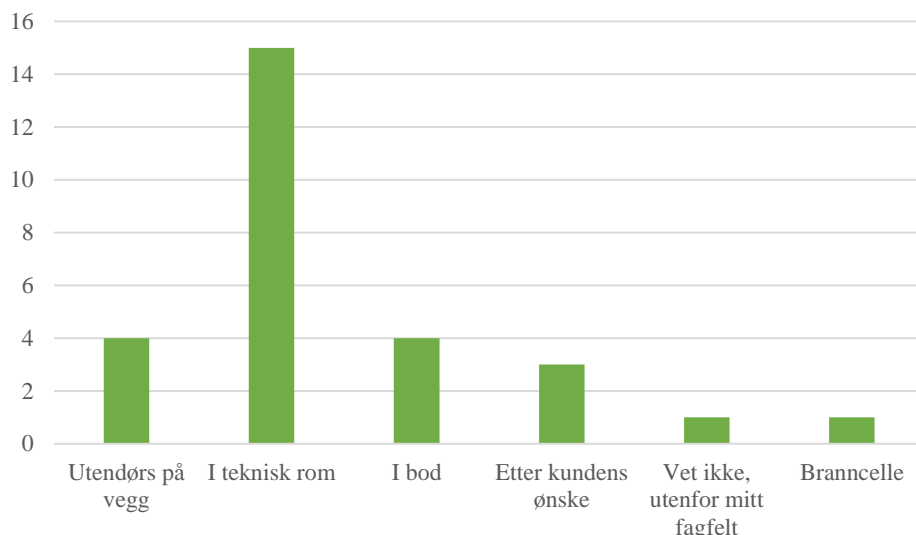
Figur 11 - Spørsmål 4: Installerer dere mest brukte eller nye litium-ionbatterier?

Figur 12 viser resultatene fra spørsmål 5. Her ble respondentene spurt om de installerte litium-ionbatteri i garasje, hvis dette er mulig. To svarte at det ikke var deres fagfelt, dette skyldtes at begge kun installerer i næringsbygg. Flertallet svarte at de installerer i garasjen om det er hensiktsmessig. Tre sier de kun installerer inne i boligen og en respondent hadde ikke retningslinjer for det.



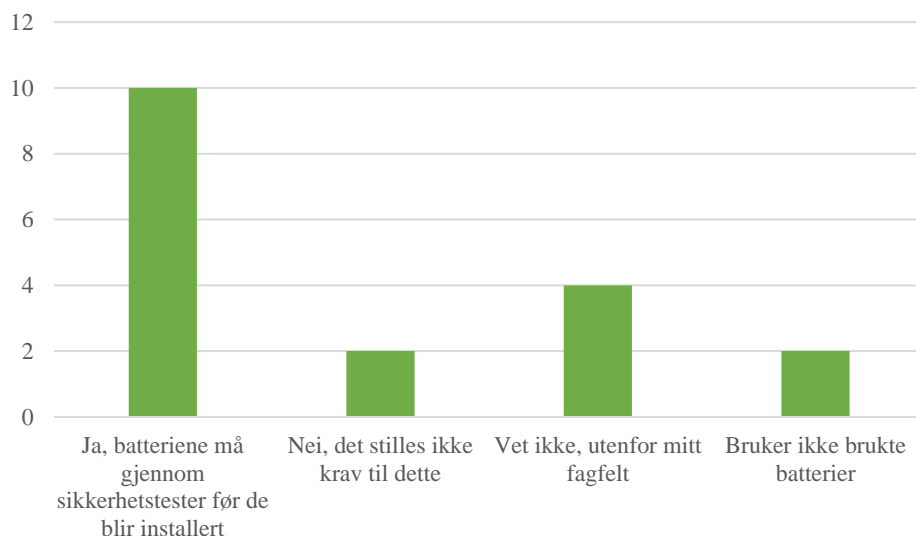
Figur 12 - Spørsmål 5: Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg med garasje. Installerer det da i garasjen?

Figur 13 viser resultatene fra spørsmål 6. Her ble respondentene spurt om hvor de installerte batteriene uten en garasje, for bolig. Det var mulig å svare på flere alternativer. Gitt at det skal installeres energilagringssystemet inne i bolig, svarte 15 respondenter at de hadde plassert det i teknisk rom.



Figur 13 - Spørsmål 6: Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg uten garasje. Hvor plasserer dere normalt litium-ionbatterier?

Figur 14 viser resultatene fra spørsmål 7. Her ble respondentene spurt om det stilles spesielle krav for installering av brukte batterier. Ti respondenter sa at brukte batterier må gjennom sikkerhetstester. To av de ti respondentene svarte at batteriene må testes for kapasitet, resistans og temperatur. En av de ti respondentene svarte at batteriene må gjennom en rekke tester, som røntgen. To svarte at det ikke stilles krav for installering av brukte litium-ionbatterier.



Figur 14 - Spørsmål 7: Stiller dere noen spesielle krav for installering av brukte litium-ionbatterier?

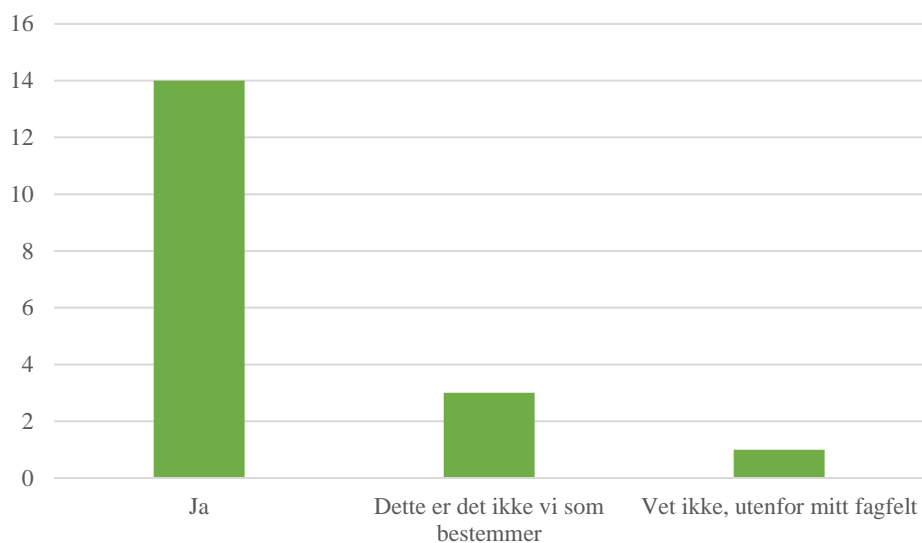
Figur 15 viser resultatene fra spørsmål 8. Her ble respondentene spurt om det er forskjellige retningslinjer/krav til størrelser av batteripakkene. Det var delt om det kreves strengere krav til større pakker. Det var fire som svarte hvor grensen gikk. Den første svarte at det varierte fra prosjekt til prosjekt hvilke retningslinjer som ble fulgt, men at størrelsen ikke var den avgjørende faktoren. Den andre svarte at batterier over 48v har andre krav. Den tredje svarte at de fulgte retningslinjene iht. selv/pelv < 60v. Den siste svarte at det skiller mellom høy- og lavspenningsbatteri hvor det var små forskjeller. Et svar som pekte seg ut, var at de samme retningslinjene alltid gjaldt fordi hver enkelt celle i batteriet er individuelt kapslet og i samsvar med «NEK EN 62619:2017».





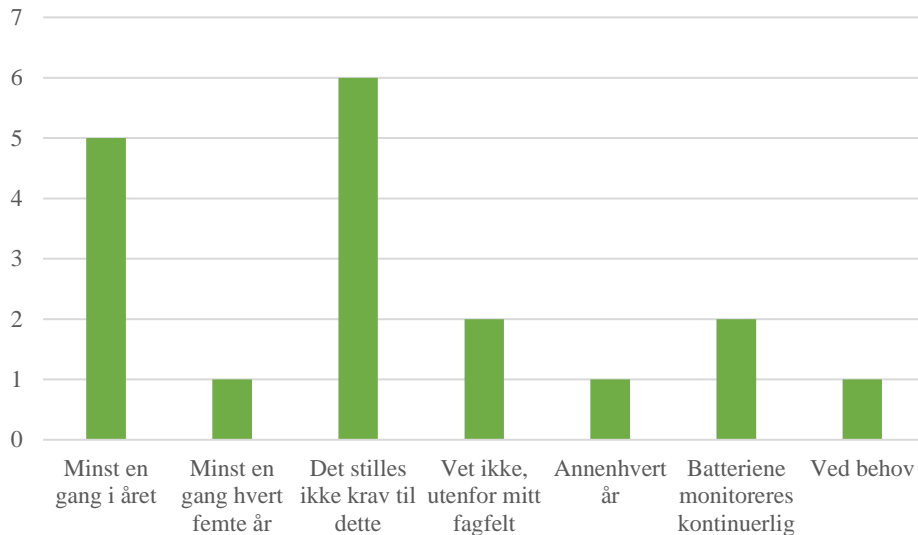
Figur 15 - Spørsmål 8: Har dere forskjellige retningslinjer/regler til forskjellige størrelser på litiumbatteripakkene/batterisystemet? Skriv eventuelt hvor grensen går i «annet» feltet.

Figur 16 viser resultatene fra spørsmål 9. Her svarte respondentene på om det kreves BMS i batteriene og resultatet viser at flertallet krever dette.



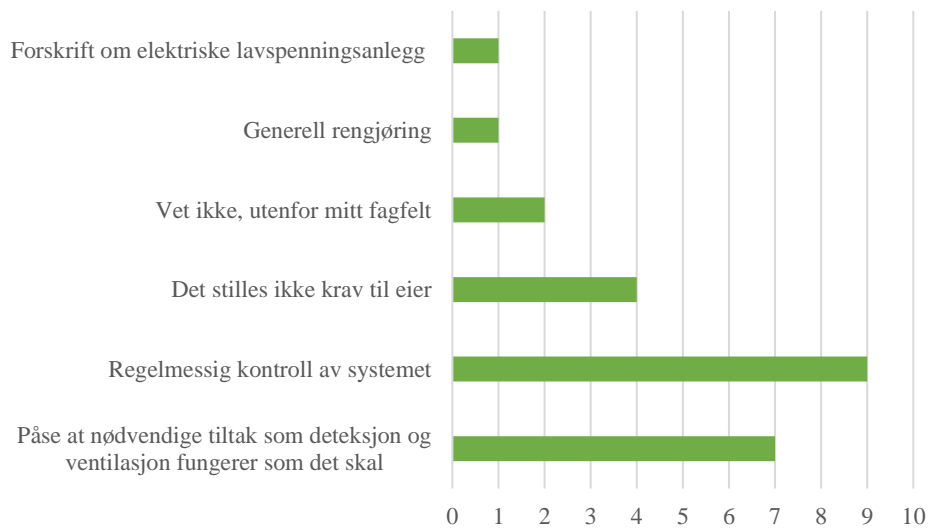
Figur 16 - Spørsmål 9: Stiller dere krav til BMS i batteriene dere bruker?

Figur 17 viser resultatene fra spørsmål 10. Her ble respondentene spurt om vedlikehold og hvor ofte det gjennomføres. Her er svarene veldig varierende for hvor ofte det må utføres vedlikehold. Flestparten svarte at det ikke stilles krav til dette og to sier at batteriene monitorers kontinuerlig.



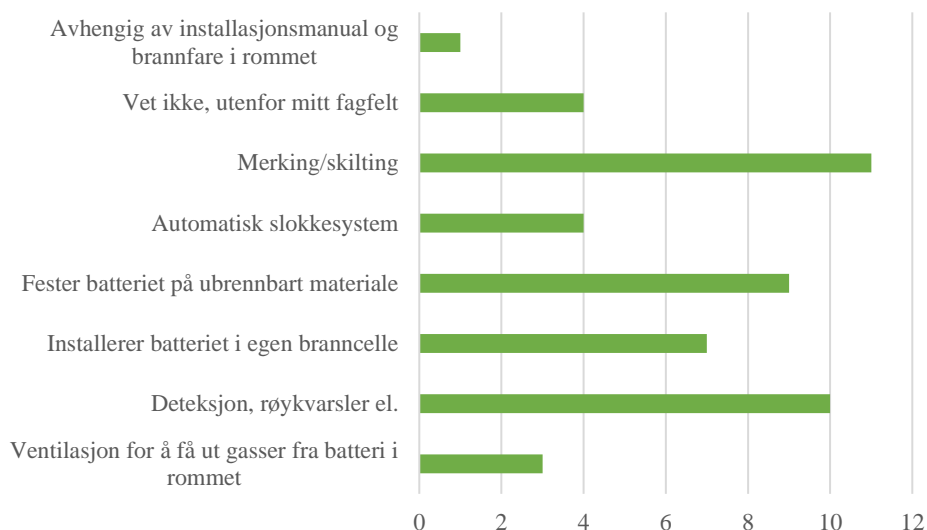
Figur 17 - Spørsmål 10: Hvor ofte gjennomføres det vedlikehold og kontroll ved batterisystemer i bolig?

Figur 18 viser resultatene fra spørsmål 11. Her ble respondentene spurt om hva som kreves av eieren til systemet. Her var det mulighet til å svare flere alternativer. Flertallet svarte regelmessig kontroll av systemet og påse at nødvendige tiltak skal fungere.



Figur 18 - Spørsmål 11: Hva kreves av eieren av batterisystemet?

Figur 19 viser resultatene fra spørsmål 13. Her ble respondentene spurt om hvilke tiltak som nyttes ved installasjon av systemet i bolig. Her var det også mulig å svare flere alternativer. Det er variert hva som kreves av tiltak. Skilting, deteksjon og at systemet er festet på ubrennbart materiale utpeker seg som de mest brukte tiltakene. Et av svarene fra «annet punkt» sa det var avhengig av installasjonsmanual og hvilken brannfare det er i rommet. Kun tre bruker ventilasjon.



Figur 19 - Spørsmål 13: Hvilke tiltak nytter dere ved installasjon av litium-ionbatterier inne i bolig?

## 4.2 Utdrag fra regelverk

Dette delkapittelet gir en oppsummering av relevante krav og løsninger fra regelverk. Kravene er hovedsakelig hentet fra regelverk i USA og Australia, men angir også krav fra Norge.

### 4.2.1 Tabell for bolig

Tabell 4 tar kun for seg de kravene som fremkommer spesifikt for boligbygg og energilagringssystemer i NFPA 855, IRC, AS/NZS 5139 og NEK TS 400 Bolig. Batterikapasiteten i tabellene er maksverdier.

Tabell 4 - Krav for energilagringssystemer i bolig

Krav til	NFPA 855 [38]	IRC [39]	Australia(AS/NZS 5139) [34]	NEK TS 400 Bolig [29]
Batterikapasitet enkelt energilagringssystem	1 - 20 kWh	1 - 20 kWh	Ingen krav spesifisert bolig	Ingen krav spesifisert for bolig
Samlet batterikapasitet for en bolig	40 kWh for boder eller teknisk rom  80 kWh for garasje, yttervegg og utendørs installasjoner	40 kWh for boder, teknisk rom og på yttervegg  80 kWh for garasje og utendørs installasjoner	Ingen krav spesifisert for bolig	Ingen krav spesifisert for bolig
Plassering utendørs	Garasje uten tilknytning til boligen iht. lokal byggeskikk. På yttervegg eller bakken minimum 0,914m fra dører og vinduer	Skal følge avstandene fra Tabell 5	Utendørs i garasje, bod el. uten tilknytning til beboelige områder	Ingen krav spesifisert for bolig

Plassering innendørs	Omsluttete boder, lager eller teknisk rom  Ikke i et beboelig område	Skal følge avstandene fra Tabell 5	Et dedikert batterirom, ikke inne i eller under et beboelig bygg	Ingen krav spesifisert for bolig
Aktive tiltak	Røykdeteksjon  Varmedeteksjon tilkoblet alarm systemet i garasjer der røykdeteksjon ikke er tilstrekkelig	Ingen krav spesifisert for bolig	Røykdeteksjon  Ventilasjon som skal være dimensjonert etter produsentens instruksjoner	Ingen krav spesifisert for bolig
Passive tiltak	Beskyttelsesbarrierer for systemet mot kollisjon fra bil	Beskyttelsesbarrierer for systemet mot kollisjon fra bil	Fareskilting, alarmsystem, i et temperatur-regulert område etter produsentens spesifikasjoner, kapslingen skal tåle vann, fukt, støv og sollys.  Informasjon om hvor systemet er plassert	Ingen krav spesifisert for bolig
Batteritiltak	Ingen krav spesifisert for bolig	Ingen krav spesifisert for bolig	Battery management system (BMS)	Batteri-systemet anbefales å ivareta den spesielle beskyttelse-n selv
Avstand til brennbart materiale	Ingen krav spesifisert for bolig	Ingen krav spesifisert for bolig	Ikke i nærheten av brennbart materiale	Ingen krav spesifisert for bolig
Andre avstander	Avstand mellom energilagringssystemer minimum 0,914 m	Ingen krav spesifisert for bolig	Ikke installeres innen 0,6 m fra * og Minimum 0,9 m fra** Minimum 1 meter fra flukt- og rømningsvei	Ingen krav spesifisert for bolig
Vedlikehold	Produsent lager krav	Ingen krav spesifisert for bolig	Periodisk inspeksjon og vedlikehold etter produsents krav	Ingen krav spesifisert for bolig

* <ul style="list-style-type: none"> <li>- Utgang</li> <li>- Vertikalt fra vindu</li> <li>- Ventilasjon til oppholdsrom</li> <li>- Varmtvannstank</li> <li>- Air-condition</li> </ul>	** <ul style="list-style-type: none"> <li>- Himlinger</li> <li>- Vegghulrom</li> <li>- På tak</li> <li>- Under trapper</li> <li>- Under gangveier</li> </ul>
---	--

Tabell 5 er hentet fra UL 9540 og er basert på modellbrann testing og installasjonskoder i USA og er kun ment for veiledning [40]. Den viser krav for boligbygg. Tabellen er ment som en oppsummering av avstander som kreves utfra ulike situasjoner.

Tabell 5 - Oppsummering av avstandskrav fra UL 9540 [40]

Installasjons plassering	Energikapasitet [kWh]		Seperasjon fra eksponering*	
	Enkeltsystem	Totalt	Avstand[m]	Type eksponering
Utendørs	20	80	0,914	Dører, vinduer og andre energilagringssystemer
Utendørs på vegg	20	40	0,914	Dører, vinduer og andre energilagringssystemer
Innendørs (Skap, garasje, teknisk rom)	20	40	0,914	Dører, vinduer og andre energilagringssystemer
Innendørs (Frittliggende garasje og lagringsbod)	20	80	0,914	Dører, vinduer og andre energilagringssystemer
*Seperasjon kan bli redusert basert på stor-skala brann forsøk				

I tillegg skal produsenten ha opplysninger om krav til systemet sitt. Krav som sier noe om blant annet omgivelsestemperatur, spesielle miljøvurderinger og begrensinger som f.eks. at systemet kun kan stå innendørs/utendørs, vekt, dimensjoner på systemet og om det kan brukes i bolig [40].

#### 4.2.2 Tabell generelt

Tabell 1 viser krav for energilagringssystemer generelt i USA og Australia. Denne tabellen tar kun for seg krav som kan være relevant å se i sammenheng med mindre installasjoner som gjelder for bolig. Batterikapasitetene som er oppgitt er minimum- og makskapasitet. For den australske standarden gjelder kravene for et innkapslet batterisystem der alle komponenter inngår. Det vil si at selve kapslingen har sine beskyttelse- og isolasjonsutstyr som standarden ikke tar for seg.

Tabell 6 - Generelle krav for energilagringssystemer for USA og Australia

Krav til	USA (NFPA 1) [41]	Australia (AS/NZS 5139:2019) [34]
Batterikapasitet	20 kWh – 600 kWh.	1 kWh – 200 kWh ved 0,1 C <sup>5</sup> for Litium
Aktive tiltak	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Automatisk sprinkleranlegg</li> <li>- Røykdeteksjon</li> <li>- Gassdeteksjon som skal aktivere ventilasjonen når nivået på brennbare gasser overstiger 25% av nedre brennbarhetsgrense</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Røykdeteksjon</li> <li>- Ventilasjon som skal være dimensjonert etter produsentens instruksjoner</li> </ul>
Passive tiltak	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ubrennbare rom</li> <li>- Hindre uautorisert personell tilgang</li> <li>- Informasjon om og hvor systemet er plassert</li> <li>- Fareskilting</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- I et temperaturregulert område etter produsenten instruksjoner</li> <li>- Kapslingen skal tåle vann, fukt, støv og sollys</li> <li>- Informasjon om og hvor systemet er plassert</li> <li>- Fareskilting</li> </ul>
Batteritiltak	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Forhindre, detekttere og kontrollere thermal runaway</li> <li>- Battery management system (BMS)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Kun godkjente batterityper</li> <li>- Battery management system (BMS)</li> </ul>

<sup>5</sup> 0,1 Coulomb tilsvarer en utladningstid på 10 timer ved batterier på 1Ah [47]

Tabell 7 viser de relevante kravene for batteriinstallasjoner i NEK 400 [28].

Tabell 7 - NEK 400 krav til batteriinstallasjoner [28]

Krav til	Norsk (NEK 400) [28]
Batterikapasitet	Ingen spesifiserte krav
Plassering utendørs	Kapsling utenfor bygget
Plassering innendørs	Kapsling inne i bygget, separat batterirom
Aktive tiltak	Ventilasjon
Passive tiltak	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Montert på eller i materialer som tåler temperaturer som kan forårsake og spre en brann</li> <li>- Skjermet fra bygningskonstruksjoner slik at en brann ikke kan spre seg dit</li> <li>- Adgangsbegrensede områder</li> <li>- Krav til skilting i batterirom</li> </ul>
Batteritiltak	Beskyttelse mot farer generert av batteriet og hindre produksjon av utilsiktet gass
Andre avstander	Ingen spesifiserte krav
Vedlikehold	Det skal utarbeides instruksjoner for vedlikehold som sier noe om egnede arbeidsprosesser og beskyttelsesutstyr som skal anvendes ved arbeidet

### 4.3 Batterikapsling

Dette delkapittelet presenterer hvordan batterikapslingen bestemmes for USA og Norge. For Australia er det ikke nevnt konkrete krav til kapslingen i standarden med unntak av at den skal minimere faren for brannspredning med valg av materialer [34].

#### 4.3.1 Batterikapsling USA

For USA finnes det teststandarder som både kapsling og batteri skal være godkjent etter. Tabell 8 viser ulike krav for innkapsling som kommer frem i UL 9540 [40].

Tabell 8 - Krav til innkapsling i UL 9540 [40]

Krav til batterikapsling i UL 9540 [40]
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ubrennbart materiale</li> <li>- Ventilert dersom batteriet produserer brennbare gasser under vanlige forhold</li> <li>- Bestå flere branntester etter standardene UL 746C Standard for Polymeric Materials - Use in Electrical Equipment Evaluations (UL 746C) og UL 9540A Test Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems (UL 9540A)</li> </ul>

#### 4.3.2 Batterikapsling Norge

Fra NEK 400 kommer det overordnede krav til installasjon av batterier og batterisystemer som er oppsummert i Tabell 9 [28].

Tabell 9 - Krav til batterikapsling i NEK 400 [28]

Krav til batterikapsling i NEK 400 [28]	
-	Hindre uautorisert personell tilgang til batteriet og dets farlige deler
-	Beskytte mot farene batteriet generer og andre eksterne miljømessige påvirkninger
-	Forhindre dannelse av en eksplosiv blanding av gass, både ved feilsituasjoner og normal drift ved å ta i bruk ventilasjon
-	Ta hensyn til økningen av temperatur og redusert ventilasjon i kapslingen til hva de interne fysiske skillene kan medføre
-	Sikre tilstrekkelig kjøling mellom celler og encellede batterier ved å ha avstand mellom de
-	Kapslingens innside skal ha en tilstrekkelig kjemisk motstand som hindrer elektrolytten i å skape korrosive virkninger
-	Forhindre at lekkasje av elektrolytten fører til jordfeil

#### 4.4 Installasjonsmanual for xStorage Home

Nissan og Eaton samarbeider om å lage energilagringssystemer. Eaton er ledende innen lagring av elektrisk energi i bygg og Nissan innen elektriske kjøretøy. Sammen har de kommet med en løsning for energilagring med å ta i bruk både nye og brukte Nissan Leaf batterier [23]. Tabell 10 viser i korte trekk krav for en installasjon av et energilagringssystem i Norge har.

Tabell 10 - Installasjonskrav for xStorage Home [19]

xStorage Home [19]		
	Krav	Spesifikasjoner
Batterikapasitet	Like krav for alle størrelser	Mellom 4,2-10,06 kWh
Installasjons plassering	Temperatur- og fuktighetsregulert innemiljø som ikke er lufttett eller i nærheten av brannfarlige gasser	
Seperasjon fra omgivelsene	0,15 m	
Størrelse på veggflaten	Minimums veggflate på 1530 mm x 1190 mm	1230 mm x 890 mm x 220 mm (H x B x Diameter)
Veggen	Bør være montert på en tykk murvegg som tåler belastningen og er fri for elektriske ledninger, røropplegg og andre hindringer	
Omgivelses-temperatur	0°C - 30°C	
Ventilasjon	Ja	Egen ventilasjonskilde
Vedlikehold	Rent og støvfritt rundt systemet. Alt vedlikehold skal utføres av Eaton sertifiserte installatører	
Total vekt	Tåle belastningen av pakken	135 kg



#### 4.5 Installasjonmanual for Tesla Powerwall

I USA er Tesla en stor aktør innen energilagring for hjemmet. Tesla Powerwall er deres svar på energilagring i hjemmet. Installasjonsmanualen til Powerwall for USA er oppsummert i Tabell 11 [20].

Tabell 11 - Installasjonskrav for Tesla Powerwall [20]

Tesla Powerwall [20]		
	Krav	Spesifikasjoner
Batterikapasitet	Kun en størrelse så kravene er lik, men kan ha opptil ti Powerwalls i en bolig	13,5 kWh
Installasjons plassering	Gulv- eller veggmontert enten utendørs eller innendørs. Dersom i en garasje, unna en høyde som bilen kan treffe. Ikke i nærheten av varmeutstyr eller varme kilder. Ikke høyere enn 3000 moh	Vanntett og støvtett for innendørs eller utendørs installasjon
Seperasjon fra omgivelsene	Ingen vannkilder over eller nært systemet inkludert vanningsanlegg, takrennesystem eller kraner. Snø skal ikke samles oppå eller rundt systemet. Det er ingen krav til skjerming i manualen. Minimumsklaring på 0,3 m over og under systemet, 0,1 m fra sidene og en minimumstakhøyde på 2 m	
Skapet på veggflaten	Minimums veggflate 1750 mm x 953 mm	1150 mm x 753 mm x 147 mm (L x B x Diameter)
Veggen	Ingen spesifiserte krav	
Omgivelses-temperatur	-20°C til 50°C, men det anbefales fra 0°C til 30°C	
Ventilasjon	Ingen spesifiserte krav	
Vedlikehold	Pass på at ingenting samler seg rundt eller på systemet og hold luftstrømmen fri. For rengjøring, bruk en myk, lofri klut. Duken kan kun fuktes med vann	
Total vekt	Tåle belastningen av pakken	114 kg

#### 4.6 Batteribrann

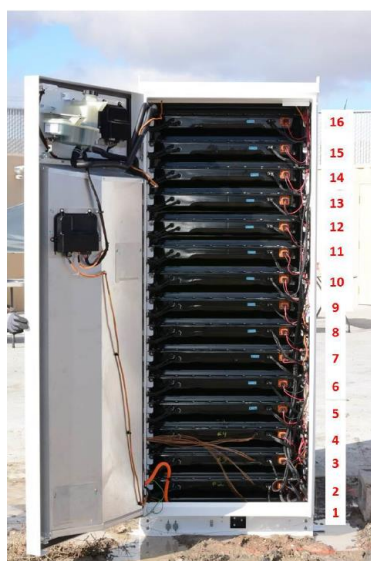
Denne delen av resultatet tar for seg tre forskningsrapporter med brann i litium-ionbatteri pakker med ulike størrelser. I dette delkapittelet vil rapportene bli omtalt som forsøk 1, forsøk 2 og forsøk 3. Her er en beskrivelse på testbatteriene fra de ulike forskningsrapportene:

1. Et lite litium-ion batteri med en kapasitet på ca. 0,6 kWh. Det ble gjort tre forsøk med forskjellig ladetilstand, 100 %, 50 % og 0 %. Batteriet besto av fem battericeller uten innkapsling og ble varmet opp av en varmestråling på 3 kW uten gnister. Battericellene var innpakket i plastikk og hadde målene 91 x 66 x 140 mm. Forsøkene ble utført innendørs i et forskningssenter i Kina, av forskere tilknyttet forskjellige universiteter i landet [13]. Figur 20 viser batteripakken fra forsøk 1 hvor «a» er før testing, og «b-d» er ladetilstand fra 100 %, 50 % og 0 %.



Figur 20 - Batteripakken fra forsøk 1 før testing og etter testing [13]

2. Et stort energilagringsystem bestående av 16 fulladede litium-ionbatterier med total kapasitet på 100 kWh. Batteripakkene var plassert i et stålkabinett med målene 1320 x 965 x 2184 mm og innkapslet etter blant annet teststandarden UL 9540. Forsøket foregikk ved at en propanbrenner varmet opp skapet med en effekt på 400 kW for å simulere en ekstern brannpåkjenning. Forsøket ble utført utendørs på vegne av Fire Protection Research Foundation som er en del av NFPA [35]. Figur 21 viser hvordan stålkabinettet og de 16 batteripakkene var satt opp i forsøk 2.



Figur 21 - Bilde av testoppsettet av forsøk 2 [35]

3. Et fulladet elbilbatteri med en kapasitet på 16 kWh. Batteriet er innkapslet i glassfiber og ingen teststandarder blir nevnt i forbindelse med innkapslingen. I dette forsøket ble det hovedsakelig sett på energiproduksjon. Batteripakken ble varmet opp fra undersiden av batteriet, av fire propanbrennere som tilsvarte en effekt på 400 kW. I likhet med forsøk 2 var også dette forsøket utført på vegne av Fire Protection Research Foundation [36]. Figur 22 viser hvordan batteripakken var innkapslet i forsøk 3.



Figur 22 - Bilde av testoppsettet for forsøk 3 [36]

#### 4.6.1 Batteriets brannoppførsel

Det er forskjeller ved batteriets brannoppførsel ved ladetilstand og om batteriet er innkapslet. Under er det presentert en overordnet oversikt over visuelle observasjoner fra forsøk 1 og 2. Rapporten for forsøk 3 beskrev ikke visuelle observasjoner.

- I. Utvidelse, røykproduksjon, spontanantennelse og flammehøyde.
 

For både forsøk 1 og 2 ekspanderte batteriet som følge av temperaturøkning. Hvit/grå røyk kom ut fra batteriene som en ulmebrann før det forekom en spontanantennelse. I forsøk 2 ble det kun observert flammer fra toppen av batteriet, ut av innkapslingen. Innkapslingen hindret altså flammer å komme ut fra de vertikale veggene. Forsøk 2 har kun visuelle målinger av flammehøyden som Figur 23 viser. I forsøk 1 hvor det ikke var innkapsling oppstod det flammer spredd rundt på hele batteriet. Disse flammene var også mer intense. Flammehøyden i forsøk 1 med batteriet ved full ladetilstand var på 963 mm. Det er ingen gode visuelle bilder fra forsøk 1.



Figur 23 - Flammehøyde ved første jetflamme under forsøk 2 [35]

## II. Jetflammer.

I disse forsøkene oppstod det inntil tre jetflammer i batteriene i løpet av brannforløpet [35] [13]. Forsøk 1 viste at høy ladetilstand gir økt sannsynlighet for flere jetflammer. Batteriet som var utladet oppstod det to jetflammer, mens batteriene som var halvveis- og fulladet oppstod det tre. Fra forsøk 2 ble det også observert tre jetflammer. De brennbare gassene fra jetflammene antas å komme fra elektrolytten, gasser som er generert av termiske reaksjoner i batteriet, eller begge deler. Mellom jetflammene foregikk det stabil forbrenning.

## III. Utbrenningsfasen

Når den siste jetflammen var over gikk batteriene over til en stabil forbrenning som gradvis gikk ned.

### 4.6.2 Massetap

Massetap varierer med størrelsen på batteriet og type innkapsling. Det er store forskjeller på batteripakker som er innkapslet og ikke. Det er kun forsøk 1 og 2 som måler massetap. Massetapet kan i all hovedsak deles inn i tre faser:

#### I. Termisk nedbrytning av emballasje.

Ved den eksterne varmekilden som forsøk 1 og 2 blir utsatt for vil det første massetapet ofte komme av termisk nedbrytning av emballasjen. Dette er temperaturer opp mot 200 °C.

#### II. Forbrenning av gasser inni batteriet.

Etter hvert som brannen sprer seg inn til batteriene, vil nedbrytning av elektrolytt og andre gasser generert av termiske reaksjoner i batteriet føre til et nytt massetap. Massetapsending under jetflammene vil være stor da det frigjør betydelige mengder gass.

#### III. Utbrenningsfasen.

Den siste fasen starter med at batteriet går fra et markant fall i massetap fra jetflammene, til en relativt rolig og stabil nedgang.

Det totale masstapet varierer med ladetilstand. Grunnen til dette er den elektriske energien som er lagret i batteriet. Tabell 12 viser en oversikt over massetapet fra forsøk 1 da samme type batteri ble testet med forskjellige ladetilstandene. Batteriet hadde en masse på 1675 gram.

Tabell 12 - Massetap i forhold til ladetilstand fra forsøk 1 [13]

Ladetilstand	Totalt massetap [g]	Massetap [%]
100 %	405,8	24
50 %	342,1	20
0 %	294,7	18

### 4.6.3 Energiproduksjon

Denne delen tar kun for seg forsøk 1 og 3 ettersom energiproduksjon ikke ble målt for forsøk 2. Forsøk 1 hadde en økning i energiproduksjon ved økende ladetilstand som Tabell 13 viser.

Tabell 13 - Energiproduksjon i forhold til ladetilstand fra forsøk 1 [13]

Ladetilstand	Høyest målte energiproduksjon (kW)
100 %	49,4
50 %	30,1
0 %	12,9

Forsøk 3 målte i løpet av brannforløpet en maksimal energiproduksjon på 300 kW, som tilsvarer en brann i en søppelsekk [42]. Energiproduksjonen er forholdsvis lav, men langvarig.

#### 4.6.4 Temperaturer

Det kan forventes temperaturer på mellom 900-1500 °C, avhengig av hvor i flammen temperaturen måles. Under er det presentert interessante observasjoner:

- I forsøk 1 ble de høyeste temperaturene målt hele 10 cm fra batteriets overflate.
- For forsøk 2 ble det målte betydelig temperaturforskjeller inni og utenpå innkapslingen. Inne i batteriet ble det målt temperaturer opp mot 1100 °C, mens på de vertikale veggene som var godt innkapsle ble det målt overflatetemperaturer på ca. 250 °C.

#### 4.6.5 Varighet

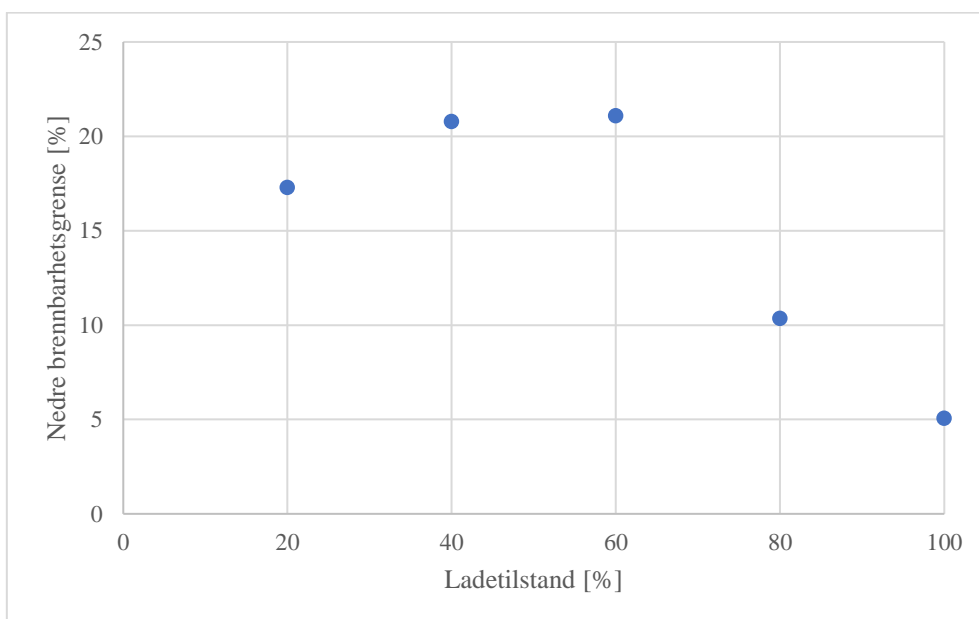
Tabell 14 viser tidspunktet for siste observasjon av synlig flamme i alle forsøkene. Batteriene brant fritt uten noe form for slukking. For de innkapslede batteriene kan det forekomme thermal runaway og flammer inne i batteriet etter de gitte tidene under.

Tabell 14 - Tid til siste observasjon av synlig flamme [13] [35] [36]

Forsøk	Sist observasjon av synlig flamme
1	30-35 minutter
2	3 timer og 41 minutter
3	1 time og 34 minutter

### 4.7 Eksplosjonsfare

Hver gass har ulik brennbarhetsgrense i en spesifikk oksiderende atmosfære og under spesifikk betingelse for temperatur og gass. Disse grensene styres av gassens spesifikke forbrenningskjemi og varmeoverføringsegenskaper i den omgivende atmosfæren. Forbrenningskjemi er svært kompleks, derfor blir brennbarhetsgrenser bestemt empirisk med standardiserte tester, noe som også ble gjort under dette forsøket. Figur 24 viser nedre brennbarhetsgrenser for litium-ionbatteri ved forskjellige ladetilstander [37]. Verdiene gjelder ved thermal runaway.



Figur 24 - Nedre brennbarhetsgrense som funksjon av ladetilstand



#### 4.8 Skadelige gasser for mennesker

Tabell 15 viser mengden av de mest giftigste gassene som forventes å være til stede ved en litium-ionbatteri brann og tettheten i forhold til luft [18].

Tabell 15 - Mengde frigitt giftig gass på cellenivå. Gasser fra innkapsling inngår ikke i dette resultatet [18].

Gasstype	Observert mengde på cellenivå [%]	Tetthet i forhold til luft (luft=1)
CO	38,1	0,97
NO <sub>2</sub>	9,7	2,62
HCL	9,7	1,3
HF	3,7	0,92
HCN	0,7	0,94
Benzen	13,6	2,7
Toluen	4,1	3,1

Gassenes tetthet i forhold til luft gir indikasjon på om gassene vil synke ned eller stige i rommet. Er tettheten i forhold til luft under 1 vil gassene stige mot taket; er tettheten i forhold til luft over 1 vil gassene synke mot gulvet.

Tabell 16 gir en indikasjon på gjennomsnittlig innhold og konsentrasjoner av gasser som frigjøres før thermal runaway starter [18]. Det ble brukt en overopphetningstest og en overladningstest.

Tabell 16 - Gjennomsnittlig innhold og konsentrasjon av frigitte gasser før thermal runaway. Gasser fra innkapsling inngår ikke i dette resultatet [18].

Gasstype	Overopphetningstest (ladetilstand 50 %) [%]	Overladingstest (ladetilstand>100%) [%]
CO	32,1	47,9
Etan	24,1	13,1
Metan	16,1	7,2
Benzen	11,3	24,0
Etylen	9,6	4,8
Toluen	5,5	3,0

#### 4.9 Erfaringer fra Sør-Korea

Sør-Korea er det landet som har installert og produsert flest energilagringssystemer med litium-ionbatterier i verden. I perioden august 2017 til tidlig 2019 ble det registrert 23 uønskede hendelser i slike systemer, noe som førte til stopp i produksjonen i nesten et halvt år. Myndighetene og landets eksperter startet en omfattende etterforskning. Under er det presentert interessante funn i etterforskningen [32]:

- Batterisikringssystemet fungerte ikke under elektriske overspenninger, noe som førte til at enkelte komponenter eksploderte.
- Flere energilagringssystemer var installert på fjell eller i nærheten av strender, noe som gjorde de utsatt for kondens og støv. På grunn av dårlig kontroll og administrasjon av systemet var disse spesielt utsatt.
- Feilinstallasjonen av systemene var en medvirkende årsak til flere av hendelsene.
- Det var mangel på et overordnet kontrollsystem som koblet komponentene til energilagringssystemet.

Det hele endte opp med at landet lagde spesialiserte sikkerhetsstandarder for litium-ionbatterier.

## 5 Diskusjon

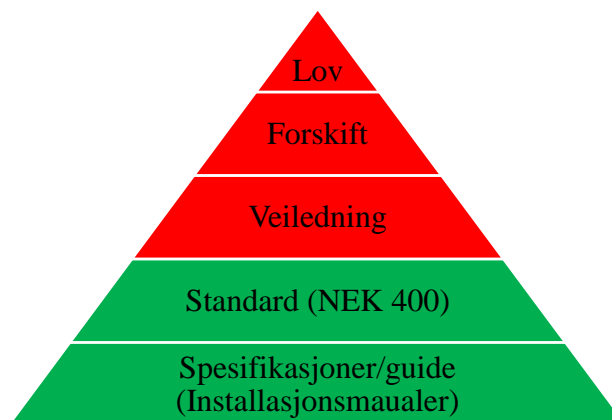
Dette kapitlet presenterer drøfting av resultater fra forstudiet, spørreundersøkelse, regelverk og litteraturstudiet. Hvordan er dagens situasjon i Norge og vil det være mulig å overføre deler av utenlandsk regelverk? Hvor vil det være fornuftig å plassere disse batteriene? Og hvilke branntekniske tiltak kan redusere brannrisikoen?

### 5.1 Dagens situasjon i Norge

I dette delkapitlet blir det lagt frem hvordan dagens situasjon er i Norge. Dette blir gjort for å tydeliggjøre hvor problemene ligger, og hvilke utfordringer Norge står overfor ved energilagringssystemer i bolig.

Energilagring i litium-ionbatteri for bolig er nytt i Norge, og aktører som forsikringselskap har enda ikke gjort seg opp tanker rundt denne tematikken. Spørreundersøkelsen viste at det er forskjeller og usikkerheter rundt hvilke tiltak som skal brukes for å redusere brannrisiko. TEK17 gir et overordnet funksjonskrav knyttet til brannsikkerhet i forbindelse med teknisk installasjoner i §11-10, men regelverket mangler videre detaljer for hvordan dette funksjonskravet skal ivaretas for energilagringssystemer. Det branntekniske regelverket i Norge er i stor grad basert på empiri, som vil si erfaringer fra tidligere branner. Norge har enda ikke dokumentert uønskede hendelser tilknyttet slike systemer. Dette kan være grunnen til at videre detaljer rundt funksjonskravet foreløpig ikke er prioritert, og derfor uteblitt i VTEK17. Brann i et litium-ionbatteri avgir dødelige avgasser og er svært krevende å slukke, og myndighetene bør derfor definere sikkerhetstiltak i forkant av en ulykke, før det er for sent.

For større bygg hvor det utarbeides brannkonsept må brannteknisk rådgiver dokumentere at funksjonskrav knyttet til brannsikkerhet i forbindelse med tekniske installasjoner i TEK17 §11-10 er oppfylt. For boligbygg derimot har branntekniske rådgivere liten påvirkningskraft. Blir det installert et energilagringssystem i eksisterende bolig blir ikke brannteknisk rådgiver involvert. Da er det produsent av system og installatør som har det fulle ansvaret knyttet til brannsikkerhet. Ofte følges NEK 400 og installasjonsmanualer. Disse mangler spesifiserte branntekniske krav til plasseringer, innkapsling, aktive og passive tiltak, samt batteristørrelser og avstander til og rundt systemet. Dagens ordning kan føre til at brannsikkerhet ikke er i fokus og blir kanskje nedprioritert for å presse prisene ned. Et eksempel på dette er at standarden NEK 400 stiller krav til ventilasjon for batterirom, men spørreundersøkelse ga svar på at dette ikke er vanlig praksis å gjøre for boliginstallasjoner. Figur 25 illustrerer mangler i det norske hierarkiet ved installering av energilagringssystemer i bolig.



Figur 25 - Mangler i det norske hierarkiet ved installering av energilagringssystemer i bolig etter dagens ordning. Dette er indikert med rød farge.

Utvikling av krav og veiledninger til branntekniske tiltak i VTEK17 for å kunne dokumentere at funksjonskravet i TEK17 §11-10 blir oppfylt, vil føre til større inkludering av brannteknisk rådgiver ved energilagringssystemer for bolig.

Det må tas hensyn til brannvesen i forhold til beredskap og tilrettelegging for innsats. Det kan være fornuftig å etablere et register av alle energilagringssystemer av typen litium-ion som brannvesenet får tilgang til. Dette vil føre til at brann- og redningspersonell er forberedt på utfordringene ved brann i et slikt system. Et annet tiltak er å kreve merking for alle rom som inneholder litium-ionbatterier slik at brannvesen fort finner ut hvor batteriet er plassert ved en eventuell brann.

Selv om de fleste batterier som blir installert i Norge i dag er nye, kan det gå mot en tid hvor resirkulerte bilbatterier i større grad blir brukt som energilagringssystem slik. Disse kan ha større risiko for thermal runaway, sammenlignet med nye batterier grunnet slitasjeskader. Spørreundersøkelsen viste at det knyttes usikkerhet til hva som kreves av sikkerhetstester i form av sertifisering av brukte batterier. Profesjonelle aktører som Tesla og Eaton har strenge krav til dette for sine energilagringssystemer. Men det er ingen krav som sier dette i norsk regelverk. Med andre ord kan uprofesjonelle aktører installere litium-ionbatterier uten innkapsling med manglende sikkerhetsmekanismer som energilagringssystem i bolig. Det finnes en rekke teststadarder. Norge må se til USA og utvikle klare retningslinjer om hvilke av disse batterier må gjennom for å bli godkjent til privat bruk. Dette er spesielt viktig når resirkulerte batterier i større grad kommer inn på markedet.

## 5.2 Overføring av krav og løsninger fra utenlandsk regelverk til norsk

Et regelverk som omhandler brann sikkerhet ved installering av energilagringssystemer i bolig, er foreløpig fraværende i norsk sammenheng. Litium-ionbatterier har andre farekilder sammenlignet med andre batterityper, og i USA og Australia er det derfor spesifiserte krav i regelverkene som kun omhandler denne batteritypen. Vil det være mulig å overføre enkelte krav og løsninger fra utenlandsk regelverk til det norske? Eller må det startes på nytt for å tilpasse regelverket opp mot norsk klima, sikkerhetskultur og generell byggeskikk?

Når regelverk fra forskjellige land skal sammenlignes er det viktig å ta hensyn til landenes generelle byggeskikk. Det kan eksempelvis være ulike krav til overflatekledning, branncelleinndeling samt aktive og passive tiltak i USA, Australia og Norge. Dette betyr at overføring av krav og løsninger fra et regelverk til et annet nødvendigvis ikke gir samme sikkerhetsnivå. Det er derfor viktig å være kritisk og se hele bildet til løsningene og kravene som gjelder i disse landene. Andre faktorer som påvirker landenes regelverk, er klima og sikkerhetskultur. Det er f.eks. kaldere og mer nedbør i Norge, sammenlignet med USA og Australia. Dette kan påvirke plasseringen av et energilagringssystem.

### 5.2.1 Plassering

Plassering styres ofte av installasjonsmanualen til energilagringssystemet. Grunnen til dette er at kravene for temperaturer, fukt og støv varierer fra system til system. Utendørs plassering må derfor ses i sammenheng med klimaet og miljøet der energilagringssystemet blir installert. Eatons xStorage Home tåler f.eks. ikke minusgrader og kan derfor ikke plasseres utendørs i Norge.

I USA og Australia er anbefalt plassering i garasje, bod el. uten tilknytning til beboelige områder. Dette vil også være mulig i Norge, så lenge krav i installasjonsmanual blir tilfredsstillt.

I mange tilfeller er en nødt til å plassere energilagringssystemet inne i bolig. Da kreves det i USA og Australia at de plasseres i rom med sporadisk personopphold som teknisk rom,



omsluttede boder el. Det vurderes at dette kravet kan overføres til norsk regelverk, så lenge egnede branntekniske tiltak tilpasset norsk byggeskikk blir fulgt.

### 5.2.2 Batteristørrelse

I Norge er det ingen krav om batteristørrelse i bolig. I USA er maksimumsgrensen på batterikapasitet 20 kWh per batteri i bolig, iht. NFPA 855 og IRC. Det kan være mulig å hente inspirasjon fra amerikansk regelverk når det kommer til batteristørrelser, men først må det komme nasjonale krav til innkapsling og sertifisering av batteri.

### 5.2.3 Røyk- og gassdeteksjon

Det stilles krav til røykdeteksjon i USA og Australia. Dette er et tiltak som ikke blir påvirket av byggeskikk. Automatisk slokkeanlegg kan påvirke røykdeteksjon, men det er ikke krav til dette i boliger som denne oppgaven tar for seg. Tiltaket røykdeteksjon blir derfor vurdert som overførbart til norsk regelverk.

I USA kreves også gassdeteksjon ved energilagringssystemer med høyere kapasitet enn 20 kWh. Dette tiltaket setter også i gang ventilasjonen i rommet ved gasskonsentrasjon på 25 % av den nedre brennbarhetsgrensen. Dette tiltaket blir på lik linje med røykdeteksjon vurdert som overførbart til norsk regelverk.

### 5.2.4 Ventilasjon

Australia krever ventilasjon uansett størrelse på energilagringssystem og type bygg. Ventilasjonen skal være dimensjonert etter produsentenes instruksjoner. NEK 400 stiller også krav om ventilasjon, men spørreundersøkelsen viste at det er svært få som følger dette kravet i bolig. USA stiller krav til ventilasjon av alle rom som har litium-ionbatterier med høyere kapasitet enn 20 kWh. Likevel kan den generelle byggeskikken i USA si noe om ventilasjon generelt i bolig eller andre tiltak som kompenserer for dette. For å kunne vurdere ventilasjon som tiltak må det også ses på krav om tetthet av rommet. I Norge stilles det ikke spesielt strenge krav til dette innad i bolig, og uten ventilasjon kan en risikere at avgassene fra thermal runaway eller brann sprer seg rundt i boligen. Denne faren kan få spesielt store konsekvenser dersom beboerne utsettes for avgassene når de sover.

Ventilasjon i rom med litium-ionbatterier vurderes ikke som et direkte overførbart tiltak siden det må ses i sammenheng med generell byggeskikk. Det vil være mulig å hente inspirasjon fra utenlandsk regelverk rundt dette tiltaket.

### 5.2.5 Kledning

USA og Australia stiller ikke krav om kledningen på veggen energilagringssystemet er festet på. Her er det også nødvendig å se på hele bilde rundt byggeskikken i landene. USA og Australia kan f.eks. stille strengere krav enn Norge på kledning og branncelleinndeling i bolig utenom de spesifikke kravene for energilagringssystemer. I Norge er de aller fleste boliger bygget i treverk, som er et brennbart materiale. En brann i batteri vil derfor kunne spre seg til omliggende rom hvis det ikke er en barriere mellom. Det blir på bakgrunn av dette vurdert at Norge ikke kan overføre kravet om å unngå kledning på veggen energilagringssystemet er festet på.

### 5.2.6 Avstandskrav

Regelverkene fra USA og Australia oppgir en del ytelser i form av avstander til og rundt energilagringssystemet. Dette inkluderer avstander til ubrennbart materiale, diverse omgivelser og til andre energilagringssystemer. Det er en del faktorer som spiller inn ved disse avstandene, som hvordan batteriet er innkapslet. Før det kan gis avstandskrav i Norge må det avklares minstekrav til innkapslingen. Hvis de samme kravene for innkapsling gjelder for de ulike landene kan dette gi en indikasjon på avstandskrav, men det må også sees i sammenheng med byggeskikken i Norge og hvilke branntekniske tiltak som bestemmes. På bakgrunn av dette blir

det vurdert at ytelser gitt i form av avstander ikke kan overføres direkte fra utenlandsk regelverk.

### 5.2.7 Skilting

Krav om skilting kan overføres uten særlige vurderinger. Dette er et krav både USA og Australia har. Skilting vil i svært liten grad bli påvirket av forskjeller i byggeskikk.

### 5.2.8 Sertifisering av batteri og personell

Det er utydelig hvilke krav til sertifisering av batteri og personell som gjelder i Norge. Sertifisering kan bli påvirket av sikkerhetskulturen i landet. Ofte vil også sertifisering være krav forsikringsselskaper stiller, og kan dermed bli påvirket av forskjellige forsikringsordninger landene imellom. Som produsent i USA er en pliktig til å følge teststandardene ettersom at regelverket henviser til flere av disse. I Australia skal det kun brukes godkjente og sertifiserte batterityper. Norge kan hente inspirasjon om sertifiseringskrav fra USA og Australia, men det er grunn for å tro at det ikke blir helt likt grunnet ulik sikkerhetskultur og forsikringsordninger.

## 5.3 Batteriforskning

Dette delkapittelet omhandler drøfting av resultater som ble funnet etter litteraturstudie på et utvalg forskningsrapporter.

### 5.3.1 Eksplosjonsfare

Ladetilstanden ved litium-ionbatteri har mye å si for nedre brennbarhetsgrense. Den er høyere under lav ladetilstand, og blir lavere når ladetilstanden er høy. Grunnen til dette kan være at ved lav ladetilstand får elektrolytten tilstrekkelig med oksygen å reagere med, og danner mye CO<sub>2</sub>. Ved høyere ladetilstand er thermal runaway mer intens. Dette vil gjøre at materialene i batteriet ikke reagerer tilstrekkelig med oksygen, og produserer mye karbonmonoksid (CO). For et fulladd litium-ionbatteri vil nedre brennbarhetsgrense være 5 % [37], altså en gasskonsentrasjon på 5 % i rommet vil forårsake en brann- og eksplosjonsfarlig atmosfære.

Det er viktig å ha tiltak hvis thermal runaway oppstår slik at gassene som blir produsert, detekteres og ventileres ut til det fri. Siden thermal runaway oppstår ved relativt lave temperaturer kan tetthetsforskjeller gjøre at gassene samler seg på gulvnivå i starten [18]. Det er derfor mulig at gassdeteksjon som måler konsentrasjon av gass, kan detektere thermal runaway raskere enn en røykdetektor.

### 5.3.2 Giftige gasser

Ved thermal runaway vil hvit/grå røyk sige ut av batteriene som en ulmebrann før batteriet eventuelt spontanantenner. Forsøk viser at en kan forvente en andel på hhv. 38 % og 3,7 % av CO og flussyre (HF) fra avgassene i battericellene [18]. Disse gassene er svært giftige og kan være livstruende for mennesker. I rundt 50 % av dødsfallene som er forbundet med brann har CO vist seg å være en medvirkende årsak [43].

Både CO og HF har lavere tetthet enn luft, noe som kan være en medvirkende årsak til at gassene spres rundt i boligen. De giftige gassene må derfor føres ut til det fri ved bruk av ventilasjon for å opprettholde personsikkerheten i boligen.

### 5.3.3 Brannspredning

Ved brann i litium-ionbatterier er energiproduksjonen relativ lav, men langvarig. Data fra forsøket gjort på et elbilbatteri med en kapasitet på 16 kWh viste en maksimal energiproduksjon på 300 kW [36], noe som tilsvarer en brann i en søppelsekk [42]. Det blir derfor vurdert at faren for brannspredning i form av stråling fra batteriet er liten. Flammentemperaturene fra brann i litium-ionbatterier vil ligge på 900-1500 °C, som er typisk for en diffusjonsflamme [43]. Den elektriske energien i batteriet forårsaker jetflammer, noe som øker faren for brannspredning til

nærliggende materialer. Det er derfor viktig å ha god avstand til brennbart material for å hindre eller redusere brannspredning.

Profesjonelle aktører har strenge krav til at innkapsling skal være i henhold til en rekke teststandarder. Likevel viste forsøk gjort på et batteri fra Tesla at flammer og jetflammer kan komme ut fra toppen av kapslingen [35]. Det er derfor viktig at det er fritt for brennbart materiale over batteriet for å hindre brannspredning. Data fra samme forsøk viste også at innkapslingsveggene kan få overflatetemperaturer opp mot 250 °C. Dersom batteriet er festet på et trepanel kan en slik temperatur føre til brannspredning som følge av varmeledning til veggen. Batteriet bør derfor plasseres på en ubrennbar vegg eller plate.

I forsøket gjort på 5 battericeller innpakket i plast ble de høyeste temperaturer målt hele 10 cm fra batteriets overflate [13]. Dette betyr at hvis et batteri eller batterimodul brenner, vil potensialet for antennelse av nærliggende batterier og moduler være svært høy hvis innkapslingen ikke er god nok.

#### 5.4 Plassering

Når plassering av energilagringssystemer skal bestemmes er det viktig å sette personsikkerhet i første rekke. I Norge er det vanlig å plassere energilagringssystemet i garasje eller annet eksternt bygg, hvis dette er hensiktsmessig. En slik plassering vil hindre at giftige gasser spres rundt i boligen ved thermal runaway, og kanskje hindre at en eventuell brann sprer seg til boligen. Men det kommer en del problemstillinger med slike plasseringer. Litium-ionbatterier er svært sensitiv mot høye- og lave temperaturer, fukt og støv. Tesla og Eaton stiller krav til omgivelsestemperatur på henholdsvis -20 °C til 50 °C og 0 °C til 30 °C for sine energilagringssystemer. Eaton sin xStorage Home må også være plassert i fuktregulert innemiljø. Eitforskningen i Sør-Korea viste også at de litium-ionbatteriene som ble eksponert for kondens og støv var spesielt utsatt for uønskede hendelser. I USA og Australia er anbefalt plassering i garasje, bod el. uten tilknytning til beboelige områder, så lenge produsentens krav og spesifikasjoner i installasjonsmanual overholdes.

På bakgrunn av personsikkerhet og materielle verdier anbefales det, ut ifra arbeidet i denne oppgaven, å plassere litium-ionbatteri som energilagringssystem i et eksternt bygg som garasje eller bod, om dette er mulig. Det eksterne bygget må oppfylle produsentens krav og spesifikasjoner for det enkelte systemet.

Klimaet her til lands kan gjøre det problematisk å overholde produsentens krav og spesifikasjoner, og i mange tilfeller blir en derfor nødt til å plassere energilagringssystemet i boligen. I disse tilfellene er plassering i teknisk rom den vanligste løsningen i Norge. Ved en slik plassering er det spesielt tre hendelser en er redd for, spredning av farlige gasser, eksplosjon og brann.

Ved innendørs plassering i USA og Australia kreves det som nevnt tidligere at energilagringssystemet plasseres i rom med sporadisk personopphold, som et teknisk rom, omsluttete boder el. Begge landene har lagt strenge branntekniske anbefalinger til grunn for å holde brannrisikoen ved en slik plassering på et akseptabelt nivå. Dette må også gjøres i Norge. Krav og tiltak må være tilpasset norsk byggeskikk og sikkerhetskultur.

## 5.5 Tiltak som kan redusere brannrisiko

Dette delkapittelet omhandler drøfting av tiltak som kan bidra til å redusere brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i bolig.

### 5.5.1 Deteksjon og varsling

Deteksjon og varsling er et godt tiltak for å redusere den nødvendige rømningstiden. Etter norsk regelverk stilles det ikke krav til dette i rom med energilagringssystem, men det er krav til minst en detektor per etasje i bolig [3]. 10 av 18 respondenter svarte på spørreundersøkelsen at de bruker deteksjon som tiltak for å redusere brannrisiko.

Røykdeteksjon er krav i både USA og Australia og som nevnt tidligere er dette et tiltak som kan overføres til norsk regelverk. Sannsynlighetene for og konsekvensene av en uønsket hendelse kan reduseres ved at thermal runaway eller brann tidlig blir detektert og varslet. Dette gjelder spesielt for boligbygg, hvor det forekommer overnatting. Det er derfor avgjørende med god og egnet deteksjon som gir tidlig varsling.

På bakgrunn av krav fra utenlandske regelverk og data fra litteraturstudiet anbefales røykdeteksjon i rommet hvor energilagringssystemet er plassert. Røykvarsleren må være av optisk type og tilfredsstillende kravene i VTEK17. Dette inkluderer blant annet at alarmstyrken må være minst 60 desibel i oppholds- og soverom når mellomliggende dører er lukket.

I tillegg til røykdeteksjon anbefales også gassdeteksjon i alle rom med energilagringssystem for å styrke personsikkerheten. Thermal runaway skjer ved relativt lave temperaturer, og det kan risikeres at avgassene synker i tidlig fase. På bakgrunn av dette vurderes det at gassdeteksjon kan bidra til tidligere deteksjon av thermal runaway.

Etter inspirasjon fra kravet i NFPA 1 skal gassdeteksjonen aktiveres og gi alarm når rommet måler en konsentrasjon på 25 % av nedre brennbarhetsgrense [41]. Ettersom den nedre brennbarhetsgrensen er målt til 5 % ved full ladetilstand [37], vil dette si at grensen ligger på 1,25 % gasskonsentrasjon i rommet. Det anbefales at det forskes mer på brennbarhetsgrenser ved fulladde litium-ionbatterier. Grensen på 1,25 % vurderes som et foreløpig estimat.

### 5.5.2 Ventilasjon

Gassdetektoren skal være koblet opp mot ventilasjonsanlegg som blir aktivert for å hindre at en eksplosiv atmosfære oppstår og spredning av farlig gasser. Ventilasjonen skal også aktiveres ved 1,25 % gasskonsentrasjon i rommet. Australia stiller som sagt krav til ventilasjon uansett størrelse på batteripakke og type bygg. Ved installering av xStorage home kreves en egen ventilasjonskilde i rommet.

Det skilles ofte mellom to typer ventilasjonsprinsipper, mekanisk ventilasjon og naturlig ventilasjon. Sistnevnte kan være en mulighet dersom en av veggene i rommet er lokalisert ut mot det fri. Dette gir mulighet for to avtrekk, et i det høyeste og et i det laveste punktet i rommet på veggen som er plassert mot det fri [44].

Naturlig ventilasjon er basert på oppdriftskrefter og er avhengig av stor temperatur- eller tetthetsforskjell mellom avgasser og luft for å fungere. For litium-ionbatterier vil det ta lang tid før slike forskjeller oppnås, grunnet thermal runaway skjer ved relativt lave temperaturer. Med mindre rommet ikke har en vegg ut mot det fri, trengs det derfor mekanisk ventilasjon. Dette vil føre tillufts- og avtrekkskanaler separat ut til det fri. Det må være en avtrekksventil oppe ved taket og en nede ved gulvet, samt en ventil som gir tilførsel av friskluft i takhøyden [44]. For å få mest mulig potensiale ved mekanisk ventilasjon har et høyt uttrekkspunkt vist seg å være en nøkkelfaktor. Dette sikrer at de nødvendige luftutskiftningene holdes lave, mens de fortsatt gir en nødvendig fortykning av eksplosive gasser i rommet.

På bakgrunn av inspirasjon fra australsk regelverk, installasjonsmanualen for xStorage Home og litteraturstudie på avgassene fra thermal runaway anbefales det ventilasjon i rom med energilagringssystem. Dette vil øke personsikkerheten ved å hindre spredning av giftige- og brannfarlige gasser samt redusere sannsynligheten for eksplosiv atmosfære. Det anbefales å bruke mekanisk ventilasjon hvor gassdetektoren skal kobles opp mot en avtrekksvifte. For rom med en vegg som er mot det fri kan det nyttes naturlig ventilasjon med avtrekkspunkt i nedre og øvre del av veggen. Mekanisk ventilasjonen skal tilfredsstillere krav i VTEK17, dette inkluderer sikker driftstid på 30 minutter. Kapasiteten på viften må være dimensjonert for å opprettholde en atmosfære i rommet på mindre enn 1,25 % gasskonsentrasjon.

### 5.5.3 Sikkerhetstiltak for brannspredning

Sikkerhetstiltak mot brannspredning er viktig for å redusere konsekvensen av brann. I en batteribrann er det varmespredning via varmeledning som utgjør størst risiko. Et godt tiltak for å unngå dette er å plassere batteriet på en ubrennbar flate. Spørreundersøkelsen viser at dette blir gjort ved ca. halvparten av tilfellene i Norge i dag.

Det er ingen spesifiserte boligkrav i regelverkene i USA eller Australia som forteller om veggen batteriet skal festes på. De kommer derimot med avstandskrav til brennbart materiale og mellom batterier. Som nevnt tidligere vurderes disse avstandskravene som ikke direkte overførbare. Installasjonsmanualene til xStorage home sier at installasjonen bør plasseres på en tykk murvegg.

På bakgrunn av data fra litteraturstudiet og krav fra xStorage Home sin installasjonsmanual anbefales det å installere alle energilagringssystem på en ubrennbar flate eller vegg. Dette for å forhindre eller forsinke brannspredning til naborom. Det anbefales også å ikke ha noe form for brennbart material mellom systemet og taket for å hindre brannspredning fra eventuelle flammer og jetflammer. For å oppfylle funksjonskravet i TEK17 § 11-10 første ledd, må også batteriet være plassert med god avstand fra annet brennbart materiale for å hindre at brannen sprer seg. Det trengs mer forskning for å kunne gi ytelseskrav om avstander til omgivelser, samt størrelse og euroklasse på den ubrennbare flaten.

### 5.5.4 Merking/skilting

Spørreundersøkelsen viste at merking/skilting er et vanlig tiltak ved installasjon inne i bolig. Avgasser fra litium-ionbatterier er både brennbare og giftige, og det vil være viktig å informere brann- og redningspersonell om dette før de går inn i rommet. NEK 400 har krav til advarselsskilt til batterirom, men dette gjelder ikke for energilagringssystem i en bolig. DSB har gitt ut en veiledning til «forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen» [45]. Forskriften sier at der farlig stoff håndteres skal det settes opp skilt, lett synlig på passende steder og i tilstrekkelig antall, som opplyser om faren for brann, eksplosjon eller annen ulykke.

Som nevnt tidligere stiller USA og Australia krav om at alle rom med litium-ionbatterier merket med fareskilt for boliginstallasjoner. Et energilagringssystem for personlig bruk kan utvikle farlige gasser som også skaper fare for brann og eksplosjon. Det blir på bakgrunn av dette anbefalt å skilte døren inn til rommet der batteriet er plassert. Skiltet kan plasseres lavt på dør for å ivareta estetikken i bolig. En slik plassering vil også være godt egnet for at brannvesen kan oppdage det under røyklag ved brann. Skiltet må være etterlysende eller ha refleks for å øke synligheten. Dette er et kostnadseffektivt tiltak som ikke krever noe form for vedlikehold eller tilsyn, med unntak av generell rengjøring. Advarselsskiltet må opplyse om brann- og eksplosjonsfare og forbud mot røyking og åpen ild.



### 5.5.5 Automatisk slokkeanlegg

Iht. regelverk fra USA er det krav til automatisk sprinkleranlegg hvor det er installert litium-ionbatterier ved større installasjoner, dette gjelder ikke for bolig. Det vil være utenfor en praktisk og økonomisk forsvarlig ramme å kreve omprosjektering for å få automatisk slokkeanlegg i norske boliger. Dette tiltaket vurderes derfor ikke som et krav.

### 5.5.6 Sertifisering av batteriets sikkerhetsmekanismer

Spørreundersøkelsen viste at det er usikkerhet i Norge rundt hvilke regler som gjelder for sertifisering av brukte batterier. Den viste også at BMS er et krav de aller fleste produsenter har til litium-ionbatterier i Norge. Fra etterforskningen i Sør-Korea viste det seg at flere av de uønskede hendelsene skjedde grunnet mangel på overordnet kontrollsystem som koblet komponentene til energilagringssystemet, altså BMS-en [32]. BMS-en er batteriets viktigste sikkerhetsmekanisme og fungerer som batteriets hjerne. Et velfungerende BMS registrerer alle tilstander utenfor dens normalområde og setter, om nødvendig, i gang tiltak for å normalisere situasjoner. Andre sikkerhetsmekanismer som bør fungere er smeltesikring, termostat, PTC og kjølesystem. Disse skal hindre at battericeller når thermal runaway. Oppnår en likevel thermal runaway er det viktig at batteriet er inndelt i moduler og grupper for å hindre videre spredning. CID og sikkerhetsventil er også viktig sikkerhetsmekanismer for å hindre eksplosjon i batteriet.

Som nevnt tidligere er produsent pliktig i USA til å følge teststandardene ettersom at regelverket henviser til flere av disse. NEK 400 står det at batteriet skal beskytte mot farer generert av batteriet og hindre produksjon av utilsiktet gass [34]. Det er ikke henvist til teststandarder som sier hvordan.

Det er viktig å ha klare retningslinjer for hva som kreves av sikkerhetsmekanismer i batteriet. Dette vil også tydeliggjøre hva som kreves av produsent. Slike retningslinjer vil også hindre privatpersoner i å ta i bruk brukte batterier uten noe form for sertifisering.

Det anbefales at det norske regelverk, på lik linje med USA, omhandler hvilke teststandarder som skal følges ved sertifisering av batteri. Testene må verifisere at:

- Batteriet er i stand til å detektere og kontrollere spredning av thermal runaway
- BMS-en og andre sikkerhetsmekanismer fungerer slik de skal
- BMS-en detekterer og gir alarm ved unormale forhold
- Feilmeldinger blir synliggjort for forbrukeren

### 5.5.7 Innkapsling

Innkapsling av batteri er viktig for å hindre spredning av brann ut fra batteriet, og inn til batteriet. Det er også viktig for å hindre spredning av thermal runaway inne i batteriet. Et batteri består ofte av hundrevis av battericeller. Disse må innkapsles i grupper og moduler for å begrense konsekvensen av thermal runaway. Forsøk viser at en battericelle har en forbrenningstid på ca. 30-35 minutter [13], og uten innvendig innkapsling kan dette føre til at thermal runaway eller brann kontinuerlig sprer seg fra celle til celle. God innkapsling kan også hindre brannspredning som følge av varmeledning til veggen batteriet henger på.

I USA er det som sagt en rekke teststandarder for batterier, og på lik linje med sikkerhetsmekanismer, må også innkapslingen være godkjent for å kunne brukes. NEK 400 gir også overordnede krav til hva kapslingen skal tåle, men det henvises ikke til teststandarder batteriet eller innkapslingen må godkjennes etter. Det knyttes derfor usikkerhet rundt hva som egentlig er kravene for innkapsling i Norge.

Det anbefales å utvikle nasjonale retningslinjer som tar for seg innkapsling. Innkapslingen må være dimensjonert slik at dette ikke forårsaker unødvendig røyk- og energiproduksjon ved

brann. Batteriet må også være innkapslet i moduler og grupper for å hindre eller begrense spredning av thermal runaway og brann inne i, og ut av, batteriet.

#### 5.5.8 Sertifisering av personell

Spørreundersøkelsen viste at det ofte stilles krav til de som skal utføre installasjonen av energilagringssystemet. Dette tyder på at de fleste produsenter krever en eller annen form for sertifisering, men hvilken var forskjellig. Sertifiseringen skal sørge for at jobben blir utført på riktig måte i henhold til standarder, regelverk og installasjonsmanual.

Feilinstallasjon av batterier var også en faktor som viste seg å medvirkende til brann ved flere av tilfellene i Sør-Korea. Eaton bruker kun installatører med godkjent kurs for xStorage home. I NEK 400 nevnes det en ny standard som vil gi retningslinjer for montering av batterier og batterisystemer. Denne er under utarbeidelse og ikke tilgjengelig.

På bakgrunn av erfaringer fra Sør-Korea anbefales det at produsent oppretter et sertifiseringsprogram for det enkelte batterisystemet. Batteriene på markedet er forskjellige, og krav og spesifikasjoner er annerledes fra produkt til produkt. I tillegg må programmet omhandle hvordan systemet skal vedlikeholdes.

#### 5.5.9 Ettersyn, service og vedlikehold

Resultatene fra spørreundersøkelsen var delt på om det gjennomføres vedlikehold og kontroll ved energilagringssystemer i bolig. Seks respondenter svarte at de ikke stiller krav til dette og ti ga varierende krav til hvor hyppig det skal utføres.

Hvor ofte det blir gjennomført ettersyn, service og vedlikehold i USA og Australia varierer fra produsent til produsent og produkt til produkt, slik også regelverket åpner opp for. NEK 400 gir krav til plan om vedlikehold, men ikke om hvor ofte det skal gjennomføres. Det vil da være opp til produsent å lage en vedlikeholdsplan etter sitt produkt.

Det bør gjennomføres regelmessig ettersyn for å sikre at utstyr med slitasjeskader blir byttet ut. Dette inkluderer utskiftninger av hele batteripakken når dette er nødvendig. Det er også viktig å kontrollere at sikkerhetsmekanismene er kapable til å opprettholde sin funksjon. Ettersyn, service og vedlikehold må bli utført av sertifisert personell som har sertifisering på det enkelte systemet. Det anbefales at det opprettes retningslinjer som stiller minimumskrav til produsenter for ettersyn service og vedlikehold slik at en kan kontrollere hva som skal sjekkes og hvor ofte.

#### 5.5.10 Eierens forpliktelser

Det er i dag krav til forebyggende plikter en eier av et byggverk har. I forskrift om brannforebygging § 7, står det at eier skal påse at røykdetektorer og manuelt slokkeutstyr blir kontrollert og vedlikeholdt etter leverandørens anvisninger [46]. Dette gjelder imidlertid ikke for gassdeteksjon og ventilasjon. Regelverkene i USA og Australia sier ikke noen om krav til eier, men at produsenten skal lage vedlikeholdsinstruksjoner.

Litium-ionbatterier er følsomme mot støv og fukt. Erfaringer fra Sør-Korea viste at energilagringssystemer som var installert i nærheten av strender var spesielt utsatt som følge av dette. Eaton skriver også i sin installasjonsmanual at for mye støv i driftsmiljøet til xStorage home kan forårsake skade eller føre til feilfunksjon.

Det anbefales derfor at eier gjennomfører generell kontroll og rengjøring av systemet. Eier må også kontrollere at temperaturer og fukt i rommet tilfredsstiller produsentens krav. Videre er det viktig å påse at tiltak som røykvarsler, gassdeteksjon og ventilasjon fungerer som det skal. Eier må også kunne tyde feilmeldinger eller lignende fra batterisystemet. Disse enkle forpliktelsene vil være med å redusere sannsynligheten for og konsekvensen av en uønsket hendelse. Hvor ofte forpliktelsene må gjøres må avklares med sertifisert personell.

### 5.5.11 Søknadsplikt og register

Ved installasjoner av energilagringssystemer for bolig inngår også problemstillingen om søknadsplikt. Etter PBL § 20 skal oppføring av byggetekniske installasjoner søkes om. Dersom det er mindre tiltak som skal gjøres på bebygd eiendom kan eier selv søke. Likevel er det også tiltak som det ikke trenger å søke om, som f.eks. mindre tiltak i eksisterende byggverk eller andre tiltak kommunen finner grunn til å frita søknadsplikten fra. Om et energilagringssystem er et mindre tiltak må vurderes av kommunen. Det anbefales også at Kommunen lager et register som har kontroll på hvem som har installert energilagringssystem i bolig. Dette vil gjøre at brann- og redningspersonell er forberedt på utfordringene en slik brann kan forårsake.

### 5.5.12 Batteristørrelse

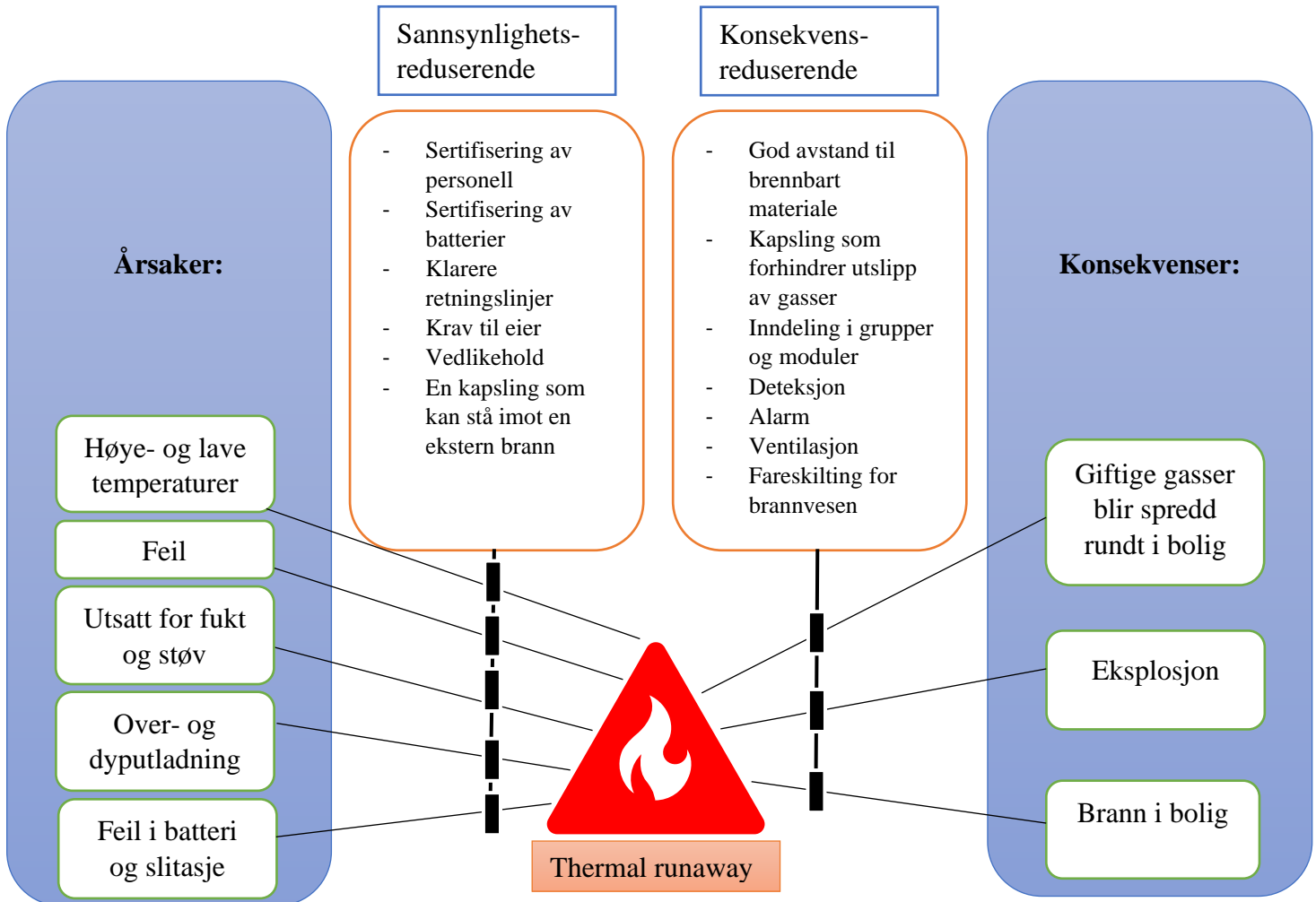
I Norge er det ingen krav om batteristørrelse i bolig, som betyr i praksis at det ikke er noen grense på hvor store batteriene kan være. I store bygg som leilighetskomplekser og næringsbygg trengs det naturligvis større batterier, sammenlignet med en enkel bolig. I større bygg er det ofte strengere krav til brannsikkerhet. F.eks. vil energilagringssystemer gjerne være plassert i egen branncelle, og kanskje under et slokkeanlegg iht. krav i VTEK17.

Høyere batterikapasitet kan bety større konsekvenser ved en uønsket hendelse. I USA er maksgrensen på 20 kWh per batteri i bolig, iht. NFPA 855 og IRC. Batteriene profesjonelle aktører leverer i dag for privat bruk har normalt en kapasitet på 1 – 15 kWh. Det bør likevel settes en maksgrense i Norge. Maksgrensen fra USA kan foreløpig være retningsførende før det kommer spesifikke krav til innkapsling og sertifisering av batterier. Det anbefales altså at batterikapasitet ikke overskrider 20 kWh, gitt at de branntekniske anbefalingene denne oppgaven kommer med blir brukt.



### 5.6 Bowtie modell

Figur 26 viser en oppsummering av ulike tiltak denne oppgaven anbefaler i form av en bowtie modell. Modellen viser også hvilke årsaker som kan føre til uønskede hendelser og hvilke konsekvenser dette kan føre til.



Figur 26 - Bowtie modell som oppsummerer sannsynlighets- og konsekvensreducerende tiltak

## 5.7 Usikkerhet og feilkilder i arbeidet

Det vil alltid være usikkerhet og feilkilder under arbeidet med oppgaveskriving. Under er det presentert feilkilder og usikkerheter ved de forskjellige metodene.

### 5.7.1 Spørreundersøkelsen

Det er vanskelig å kontrollere alle respondentene på en digital spørreundersøkelse. Det kan f.eks. være at folk uten tilstrekkelig kompetanse har svart på spørsmål de egentlig ikke har kunnskap om. Når det kommer til antall besøkende opp mot besvarelser er det usikkerhet rundt om samme person har vært innom flere ganger. Det kan være noen har åpnet undersøkelsen for så å lukke den for å se på den ved en senere anledning. Disse aspektene tar ikke nettsiden undersøkelsen ble laget på hensyn til. Den hindrer derimot at det ikke kan svares flere ganger fra samme enhet.

En kalkulator utviklet av [www.spørreundersøkelser.no](http://www.spørreundersøkelser.no) gir svar på konfidensnivået og feilmarginen ved spørreundersøkelsen. Tabell 17 viser at oppgavens spørreundersøkelse med 84 besøkende og 18 besvarelser gir følgende feilmargin med forskjellig konfidensnivå:

Tabell 17 - Konfidensnivå og feilmargin ved spørreundersøkelsen

Konfidensnivå* [%]	Feilmargin [%]
90	+/- 17,2
95	+/- 20,5
99	+/- 26,9

\*Konfidensnivå: Graden av sikkerhet som kan si at feilmarginen stemmer. Det kan f.eks. sies med 95 % sannsynlighet at feilmarginen i svarene i spørreundersøkelsen ligger i intervallet +/- 20,5 %.

I utgangspunktet var det 88 besøkende og 22 svar, men siden 4 av svarene ble slettet er disse uteblitt fra denne kalkulasjonen.

### 5.7.2 Regelverk

Det vil alltid være usikkerheter knyttet opp mot andre lands regelverk da de er bygget opp på andre måter enn i Norge. Når det gjelder generelle krav i regelverk kan det være vanskelig å bedømme hva som er relevant for bolig. Oppgaven tok ikke for seg byggeskikk og regler fra utenlandsk lovverk. Det knyttes derfor usikkerhet opp mot relevante krav for energilagringssystemer, uten å ha en full forståelse av den generelle byggeskikken i det aktuelle landet.

Videre ligger det usikkerheter rundt om en har klart å finne og tolke alle relevant krav og løsninger inn mot problemstillingen. Ord som er oversatt fra engelsk til norsk kan mistolkes og dermed få en annen betydning enn hva som er ment. Samtaler med fagpersonell er gjort for å minske denne usikkerheten.

### 5.7.3 Litteraturstudie

Det vil alltid forekomme en del usikkerheter ved branntester. En brann vil oppføre seg forskjellige fra situasjon til situasjon. Parametere som påvirker en brann er mange og batteriets oppbygning og sikkerhetsmekanismer vil være med å påvirke brannatferden. Det ligger også usikkerheter i hvorvidt dataene som er presentert i oppgaven er overførbar til batterisystemer av relevant størrelse og innkapsling. Ingen av forskningsrapporten som ble sett på omhandlet batterier som typisk blir brukt i bolig.

## 6 Konklusjoner

Målsettingen med prosjektet har vært å se på brannrisiko knyttet til energilagringssystem av typen litium-ionbatteri i boligbygg. Dette kapitlet gir en oppsummering av læringspunkt fra prosjektet, samt anbefalinger til branntekniske tiltak for å redusere brannrisiko.

### 6.1 Generelt

En litium-ionbattericelle oppfører seg relativt stabilt frem til den når en temperatur på 70-90 °C. Etter dette skjer en rekke reaksjoner som til slutt fører til thermal runaway, og hvit/grå røyk kan komme ut av batteriet som en ulmebrann. Avgassene er svært brennbare og et fulladet litium-ionbatteri skaper eksplosjonsfarlig miljø når atmosfæren i rommet kun består av 5 % avgasser. Etter hvert som thermal runaway utvikler seg kan batteriet spontant antenne. Den elektriske energien forårsaker jetflammer, noe som øker faren for brannspredning. Avgassene er også svært farlig for mennesker og en kan risikere spredning av CO og HF rundt i boligen. Det er derfor viktig at gassene blir detektert og ventilert ut av boligen så fort som mulig.

Et regelverk knyttet opp mot brann sikkerhet ved energilagringssystemer i bolig er foreløpig fraværende i norsk sammenheng. Dette skaper usikkerhet i bransjen og det er store forskjeller i hvilke forhåndsregler som blir gjort knyttet til brann sikkerhet. Norske installatører bruker i dag NEK 400 og installasjonsmanualer. Disse mangler spesifiserte branntekniske krav til plassering, innkapsling, aktive og passive tiltak, batteristørrelser og avstander til og rundt systemet. Etter dagens ordning er branntekniske rådgivere lite involvert, og det er produsenten og installatøren som har det fulle ansvaret for brann sikkerhet ved boliginstallasjoner. Dette kan føre til at prisene blir presset ned på bekostning av brann sikkerheten.

I USA, Australia og Sør-Korea er energilagring i litium-ionbatterier så utbredt at det er egne regelverk og standarder som omhandler dette. Krav om deteksjon og skilting er tiltak som blir vurdert som overførbare til norsk regelverk. Andre krav kan være til inspirasjon, men må sees i sammenheng med norsk byggeskikk, sikkerhetskultur og klima.

Norsk klima gjør det ofte problematisk med utendørs plassering. Litium-ionbatterier er svært sensitiv mot høye- og lave temperaturer, fukt og støv. Produsenter stiller derfor strenge krav om dette i sine installasjonsmanualer. Denne oppgaven anbefaler plassering i eksternt bygg som garasje eller bod, så lenge produsentens krav og spesifikasjoner er tilfredsstillt. I mange tilfeller vil ikke dette være mulig, og energilagringssystemet må da installeres inne i bolig.

## 6.2 Anbefalinger til branntekniske tiltak

Anbefalingene er basert på forskningsarbeid på anerkjent litteratur og utenlandsk regelverk, samt egne vurderinger. Det er også hentet inspirasjon fra samtaler med ulike aktører og egenprodusert spørreundersøkelse.

### **Branntekniske anbefalinger for Litium-ionbatteri som energilagringssystem plassert inne i bolig med størrelse < 20 kWh.**

#### **Energilagringssystem (Litium-ion)**

1. Installerer i rom med sporadiske personopphold som teknisk rom, bod el. Rommet må ha et klima som tilfredsstillende produsentens krav til energilagringssystemet.
2. Rommet skal ha optisk røykvarsler og egnet gassdeteksjon for varsling av en gasskonsentrasjon av brennbare og giftige gasser på 1,25 %. Ved deteksjon må alarmstyrken minst være 60 desibel i oppholdsrom og soverom når mellomliggende dører er lukket.
3. Rommet skal ha egnet ventilasjon som ikke berører boligens øvrige ventilasjon som aktiveres ved en gasskonsentrasjon på 1,25 % i rommet. Ved mekanisk ventilasjon skal gassdetektoren kobles opp mot en avtrekksvifte og ha en sikker driftstid på 30 minutter. Kapasiteten på viften må være dimensjonert for å opprettholde en atmosfære i rommet på mindre enn 1,25 % gasskonsentrasjon.
4. Energilagringssystemet skal plasseres på en ubrennbar flate for å hindre eller forsinke brannspredning til nærliggende rom.\*
5. Det må ikke være brennbart materiale mellom energilagringssystemet og tak for å begrense en eventuell brannspredning.
6. Etterlysende advarselsskilt el. skal festes på nedsiden av døren inn til rommet for å gi brann- og redningspersonell nødvendig informasjon for å løse sine oppgaver. Skiltet må opplyse om brann- og eksplosjonsfare, og forbud mot røyking og åpen ild.

\* Størrelse og euroklasse på flaten må bestemmes etter det er gjennomført fullskala brannforsøk på energilagringssystemer for norske boliger.

#### **Generelle anbefalinger**

1. Det må utvikles nasjonale retningslinjer for sertifisering, ettersyn, service, drift og vedlikehold av energilagringssystemer. Retningslinjene må omhandle hvilke teststandarder som skal følges ved sertifisering av batteri.
2. Installasjoner må utføres og brukes i henhold til produsentens krav.
3. Eierne må gjennomføre generell kontroll og rengjøring på systemet etter produsentens krav. Eierne må også ha kontroll på temperaturer og fukt i rommet, sørge for at manuelt slukkeutstyr og deteksjon blir vedlikeholdt og være i stand til å lese og tyde feilmeldinger på batteri.
4. Det må utvikles et register som har oversikt over energilagringssystemer i norske boliger slik at brann- og redningspersonell er forberedt på utfordringene ved en brann i et slikt system.

## 7 Videre arbeid

Denne oppgaven kartlegger hvilke mangler det norske regelverket har i forhold til andre land, og hvilke problemer norske aktører har i dag ved energilagringssystemer for bolig. Oppgaven kommer med anbefalinger for å redusere brannrisikoen ved energilagringssystemer for bolig. Mangel på forskning på tematikken og oppgavens begrensninger hindrer oppgaven i å komme med flere anbefalinger enn de som blir gitt i konklusjon. Som en del av det videre arbeidet er det områder det anbefales å se mer på for å kunne gi flere anbefalinger enn hva denne oppgaven konkluderer med. Dette vil bedre dagens situasjon i Norge for bransjen som produserer og installerer energilagringssystemer for bolig.

Røykproduksjon er noe oppgaven ikke har diskutert. Dette skyldes mangel på forskning rundt dette temaet. Det anbefales derfor at det forskes på hvor mye røyk som produseres for energilagringssystemer av typen litium-ion. Målinger med blant annet temperatur og mengde giftig gass kan bidra til bedre anbefalinger for deteksjon og ventilasjon av røyk og giftig gass. Dette kan også gi svar på dimensjoneringen av viften og hvilken kapasitet som kreves for å holde rommets atmosfære under nedre brennbarhetsgrense. I tillegg må det forskes på røykproduksjon ved thermal runaway. Dette innebærer blant annet at det forskes på om gassene stiger eller synker ved tidlig fase av thermal runaway. Det hadde også vært interessant og kvantifisert risikobilde ved spredning av CO og HF i boligen ved thermal runaway.

For å kunne estimere varigheten til en brann i batterier for privat bruk må det utføres forsøk på dette. Disse forsøkene kan ta for seg røyk- og energiproduksjon for energilagringssystemer for privat bruk. Dette kan være med å avdekke farer slik at en kan redusere brannrisikoen. For større bygg vil varighet være viktig for å dimensjonere brannceller og branddører.

I denne oppgaven ble det anbefalt å henge energilagringssystemet på en ubrennbar vegg eller plate for å hindre eller forsinke brannspredning. For å kunne bestemme størrelsen på den ubrennbare flaten energilagringssystemet må det utføres forsøk med energilagringssystemer for privat bruk. Forsøk vil kunne gi svar på hvordan en brannspredning kan forekomme og dette kan videre bruke dataen til å bestemme flatens størrelse og euroklasse. I tillegg vil forsøkene kunne gi svar på hvilke avstander det kreves til omgivelser.

Det bør vurderes om et energilagringssystem skal skilles ut som et særskilt brannobjekt og dermed også følge forskrift om brannforebyggende tiltak og tilsyn. Dette innebærer at brannvesen kan gjøre risikobasert tilsyn ved boliger som har energilagringssystemer. En utfordring med dette kan være at brannvesenet ikke har kompetanse til å gjøre slike tilsyn. Det kan derfor tenkes at en bedre løsning vil være å heller stille strengere krav til service og vedlikehold som utføres av kompetente installatører. Dette er noe som kommune, brannvesen og sertifisert personell må se nærmere på.

Det anbefales at det gjøres en større studie i regelverkene for å kunne se kravene for energilagring i sammenheng med den generelle byggeskikken i landene. Dette gjør det mulig å overføre større deler av regelverkene til det norske. Det anbefales også å se på flere utenlandske regelverk. Det kunne f.eks. vært lærerikt å se på regelverk fra Sør-Korea, som er det landet med flest energilagringssystemer.

Denne oppgaven kan også brukes til inspirasjon for brannrisiko ved energilagring i litium-ionbatterier i større bygg med større installasjoner.

## 8 Bibliografi

- [1] G. Hering, «S&P Global,» 14 Juni 2019. [Internett]. Available: <https://www.spglobal.com/marketintelligence/en/news-insights/trending/bVy2KGU3Opsle5Vv8QG0-Q2>. [Funnet 9 Mars 2020].
- [2] «Byggteknisk forskrift,» 2017.
- [3] «Veiledning til byggteknisk forskrift,» 2017.
- [4] R. F. Mikalsen, A. S. Bøe, K. Glansberg, C. Sesseng, K. Storesund, R. Stølen og A. W. Brandt, «Energieffektive bygg og brannsikkerhet,» RISE Research Institutes of Sweden, Trondheim, 2019.
- [5] B. Rystad og O. Lauritzen, Kjemi og miljøkunnskap, 4 red., 1357 Bekkestua: NKI, 2012.
- [6] K. Kempaiah, «Lithium-ion battery, How does it work?,» Learn engineering, 12 04 2019. [Internett]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=VxMM4g2Sk8U>. [Funnet 19 02 2020].
- [7] Battery University, «BU-205: Types of Lithium-ion,» 10 July 2019. [Internett]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion). [Funnet 22 Januar 2020].
- [8] Ø. Hasvold, «Sikker anvendelse av litiumbatterier,» FFI, 2010.
- [9] Battery University, «BU-306: What is the Function of the Separator?,» 8 Januar 2019. [Internett]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_306\\_battery\\_separators](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_306_battery_separators). [Funnet 22 Januar 2020].
- [10] Battery University, «BU-307: How does Electrolyte Work?,» 6 Oktober 2017. [Internett]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/bu\\_307\\_electrolyte](https://batteryuniversity.com/learn/article/bu_307_electrolyte). [Funnet 23 Januar 2020].
- [11] Battery University, «BU-304a: Safety Concerns with Li-ion,» 23 April 2019. [Internett]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/safety\\_concerns\\_with\\_li\\_ion](https://batteryuniversity.com/learn/article/safety_concerns_with_li_ion). [Funnet 23 Januar 2020].
- [12] D.P. Abraham, E.P. Roth, R. Kosteki, K. McCarthy, S. MacLaren og D.H. Doughty, «Diagnostic examination of thermally abused high-power lithium-ion cellsD.,» i *Journal of Power Sources*, Elsevier, 2006, p. 648–657.
- [13] P. Ping, Q. S. Wang, P. F Huang, K. Li, J. H Sun, D. P. Kong og C. H. Chen, «Study of the fire behavior of high-energy lithium-ion batteries with full-scale burning test,» i *Journal of Power Sources*, Elsevier, 2015, pp. 80-89.

- [14] D. Lisbona og T. Snee, «A review of hazards associated with primary lithium and lithium-ion batteries,» i *Process Safety and Environmental Protection*, Elsevier, 2011, p. 434–442.
- [15] P.G. Balakrishnan, R. Ramesh og T. P. Kumar, «Safety mechanisms in lithium-ion batteries,» i *Journal of Power Sources*, Tamil Nadu, Elsevier, 2006, p. 401–414.
- [16] X. Feng, M. Ouyang, X. Liu, L. Lu, Y. Xia, og X. He, ««Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review,» i *Energy Storage Materials*, Elsevier, 2018, p. 246–267.
- [17] K. J. Kutchek, «Battery Fires and Explosions – Expert Article on Lithium Battery Cell Protections,» Forensic, Robson, 16 Juni 2017. [Internett]. Available: <https://www.robsonforensic.com/articles/battery-explosion-fire-expert-witness/>. [Funnet 31 Januar 2020].
- [18] DNV GL AS Maritime, «Technical Reference for Li-ion Battery Explosion Risk and Fire Suppression,» Partner Group, Høvik, 2019.
- [19] Eaton og Nissan, «Installasjonsmanual for xStorage Home - For systemkapasitet 4,2 kWh, 6 kWh og 10 kWh,» 2019.
- [20] Tesla, «Powerwall Installation Manual,» 2016.
- [21] Eaton, «Eaton Powering Business Worldwide,» [Internett]. Available: <https://www.eaton.com/no/no-no/products/energy-storage/xstorage-home-makes-a-house-more-energy-efficient-in-norway.html?fbclid=IwAR0BcdkoIo-G3B8WCcSPjC271mzLCvLCv2oXpqyYYhhTWoy1PyHCz0v3pWo>. [Funnet 5 Mai 2020].
- [22] Tesla, «Tesla,» [Internett]. Available: [https://www.tesla.com/no\\_NO/powerwall](https://www.tesla.com/no_NO/powerwall). [Funnet 19 Mars 2020].
- [23] Eaton, «Eaton Powering Business Worldwide,» [Internett]. Available: <https://www.eaton.com/no/no-no/products/energy-storage.html>. [Funnet 10 Mars 2020].
- [24] Eaton, «Eaton Powering Business Worldwide,» 23 11 2016. [Internett]. Available: [http://www.eaton.no/EN/EatonNO/OurCompany/NewsEvents/NewsReleases/PCT\\_2976767\\_EN](http://www.eaton.no/EN/EatonNO/OurCompany/NewsEvents/NewsReleases/PCT_2976767_EN). [Funnet 02 Mai 2020].
- [25] G. E. Futures, Artist, *Battery storage changes everything*. [Art]. 2015.
- [26] L. T. Peiró, G. V. Méndez og R. U. Ayres, «Lithium: Sources, Production, Uses, and Recovery Outlook,» i *JOM: the journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, TMS, 2013, pp. 986-996.
- [27] C. Mikolajczak, M. Kahn, K. White og R. T. Long, «Lithium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment,» The Fire Protection Research Foundation, 2011.



- [28] NEK 400:2018 , «Elektriske lavspenningsinstallasjoner,» Norsk Elektroteknisk Komite, 2018.
- [29] NEK TS 400 Bolig , «Planlegging, installasjon, verifikasjon og dokumentasjon av elektriske installasjoner i boliger,» Norsk Elektronisk Komite, 2019.
- [30] National Fire Protection Association, «The National Fire Protection Association,» 2019. [Internett]. Available: <https://www.nfpa.org/overview>. [Funnet 18 Februar 2020].
- [31] ICC, «International Code Council,» 2020. [Internett]. Available: <https://www.iccsafe.org/products-and-services/i-codes/2018-i-codes/ifc/>. [Funnet 2 Februar 2020].
- [32] C. Yun-Hwan, «Korea JoongAng Daily,» 12 Juni 2019. [Internett]. Available: <http://koreajoongangdaily.joins.com/news/article/article.aspx?aid=3064174>. [Funnet 9 Mars 2020].
- [33] International Code Council, International Fire Code, 2018.
- [34] AS/NZS 5139:2019, «Electrical installations - Safety of battery systems for use with power conversion equipment,» 2019.
- [35] A. F. Blum og R. T. Long Jr, «Fire Hazard Assessment of Lithium Ion Battery Energy Storage Systems,» Fire Protection Research Foundation, 2016.
- [36] R. T. Long Jr, A. F. Blum, T J. Bress og B. R. T. Cotts, «Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards.,» Fire Protection Research Foundation, 2013.
- [37] S. Chen, Z. Wang, J. Wang, X. Tong og W. Yan, «Lower explosion limit of the vented gases from Li-ion batteries thermal runaway in high temperature condition,» i *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, Elsevier, 2019.
- [38] NFPA 855, Installation of stationary energy storage systems, National Fire Protection Association, 2020.
- [39] International Code Council, International Residential Code, 2018.
- [40] UL 9540, «Standard for Energy Storage Systems and Equipment,» Standards Council of Canada, 2020.
- [41] NFPA 1, Fire Code, National Fire Protection Association, 2018.
- [42] B. Karlsson og J. G. Quintiere, «Enclosure Fire Dynamics,» CRC Press, 2000.
- [43] B. C. Hagen, Grunnleggende brannteknikk, 2014.
- [44] M. Haugerud, «Ventøk 9.10 - Rom for oppbevaring av brannfarlig stoff,» i *Håndbok i ventilasjon*, Oslo, Skarland Press A/S, U.Å.



- [45] DSB, «Veiledning til forskrift om håndtering av brannfarlig, reaksjonsfarlig og trykksatt stoff samt utstyr og anlegg som benyttes ved håndteringen,» Tønsberg, 2017.
- [46] “Forskrift om brannforebygging,” 2020.
- [47] Battery university, «BU-402: What Is C-rate?,» 3 September 2017. [Internett]. Available: [https://batteryuniversity.com/learn/article/what\\_is\\_the\\_c\\_rate](https://batteryuniversity.com/learn/article/what_is_the_c_rate). [Funnet 17 April 2020].

## 9 Vedlegg

### 9.1 Vedlegg A – Spørreundersøkelse

Spørreundersøkelsen ble laget via [www.survio.com](http://www.survio.com).

#### Bachelorprosjekt - Spørreundersøkelse for energilagring i litium-ionbatterier for bolig

Hei!

Vi er to branningeniørstudenter fra Høgskulen på Vestlandet Campus Haugesund som skriver bachelor oppgave om brannsikkerhet. Problemstillingen vi har valgt er å se på er brannrisiko i forbindelse med energilagring i litium-ionbatterier i bolig.

Denne undersøkelsen er ment for å få en bedre forståelse av hvordan disse batteriene blir installert i dag.

Svarene vil bli behandlet anonymt i oppgaven. Hvis det er greit for dere, kan dere bli kontaktet i ettertid for oppfølgingsspørsmål.

Takk for at du svarer på undersøkelsen!

<b>1. I hvilke typer bygg installerer dere litium-ionbatterier? (Mulig å velge flere svar)</b>
Enebolig, hytte eller lignende
Leilighetskompleks
Næringsbygg
Annet (skriv her)
<b>2. Hvilke retningslinjer/regler følger dere ved installering av litium-ionbatterier? (Mulig å velge flere svar)</b>
Interne retningslinjer
NEK 400
Utenlandske regelverk
Installasjonsmanual
Annet (skriv her)
<b>3. Stilles det spesielle krav til den som skal installere litium-ionbatterier i bolig? (Mulig å velge flere svar)</b>
Det kreves spesiell sertifisering
Det finnes ingen krav
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
<b>4. Installerer dere mest brukte eller nye litium-ionbatterier? Ranger mellom 0-100 til sammen for hvert av alternativene.</b>
Brukte
Nye
<b>5. Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg med garasje. Installerer det da i garasjen?</b>
Ja, hvis det er hensiktsmessig
Nei, vi installerer helst inne i boligbygg
Vi har ikke retningslinjer for det
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)

6. Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg uten garasje. Hvor plasserer dere normalt litium-ionbatterier? (Mulig å velge flere svar)
Utendørs på vegg
I teknisk rom
I bod
Etter kundens ønske
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
7. Stiller dere noen spesielle krav for installering av brukte litium-ionbatterier?
Ja, batteriene må gjennom sikkerhetstester før de blir installert
Nei, det stilles ikke krav til dette
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
8. Har dere forskjellige retningslinjer/regler til forskjellige størrelser på litium-ionbatteripakkene/batterisystemet? Skriv eventuelt hvor grensen går i «annet» feltet. (Mulig å velge flere svar)
Ja, det stilles strengere krav til større pakker
Nei, de samme retningslinjer/regler gjelder alltid
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
9. Stiller dere krav til BMS i batteriene dere bruker?
Ja
Nei
Dette er det ikke vi som bestemmer
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
10. Hvor ofte gjennomføres det vedlikehold og kontroll ved batterisystemer i bolig?
Minst en gang i året
Minst en gang hvert femte år
Det stilles ikke krav til dette
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
11. Hva kreves av eieren av batterisystemet? (Mulig å velge flere svar)
Påse at nødvendige tiltak som deteksjon og ventilasjon fungerer som det skal
Regelmessig kontroll av systemet
Det stilles ikke krav til eier
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
12. Har dere opplevd uønskede hendelser tilknyttet brann i eller ved batterisystemet?
Ja
Nei
Annet (skriv her)

13. Hvilke tiltak nytter dere ved installasjon av litium-ionbatterier inne i bolig? (Mulig å velge flere svar)
Ventilasjon for å få ut gasser fra batteri i rommet
Deteksjon, røykvarsler el.
Installerer batteriet i egen branncelle
Fester batteriet på ubrennbart materiale
Automatisk slokkesystem
Merking/skilting
Ingen av de som er nevnt over
Vet ikke, utenfor mitt fagfelt
Annet (skriv her)
14. Hvilken rolle har du i bedriften du jobber for?
Montør
Installatør
Leverandør
Lærling
Prosjektleder
Daglig leder, styreleder eller lignende
Annet (skriv her)
15. Kan vi ta kontakt med din bedrift i forbindelse med oppfølgingsspørsmål? Legg ved din eller bedriftens kontaktinfo. (Frivillig)
Skriv her

## 9.2 Vedlegg B – Utsending av spørreundersøkelse

### Mail til privatperson i bedriften

Hei!

*Driver du med installasjon eller leveranse av litium-ionbatterier i bygg i forbindelse med energilagring? Vi er to studenter som i forbindelse med et bachelor-prosjekt har laget en spørreundersøkelse som omhandler dette temaet. Spørreundersøkelsen tar kun 5 minutter og vil være til stor hjelp for oppgaven. Målet med oppgaven er å komme med branntekniske anbefalinger i forbindelse med litium-ionbatterier i boligbygg.*

*Takk på forhånd!*

*Mvh*

*Steffen Furevik og Sigurd Brunstad Paulsen*

## Mail til bedriftens sentralbord

Hei!

*Driver deres bedrift med installasjon eller leveranse av litium-ionbatterier i bygg i forbindelse med energilagring? Kunne det vært mulig for deres bedrift å besvare en spørreundersøkelse som omhandler dette temaet? Spørreundersøkelsen tar kun 5 minutter og vil være til stor hjelp for oppgaven. Målet med oppgaven er å komme med branntekniske anbefalinger i forbindelse med litium-ionbatterier i boligbygg.*

*Send gjerne kontaktinfo til personer som kan være aktuell for spørreundersøkelsen.*

*Takk på forhånd!*

*Hvis det er ønskelig, kan dere bli tilsendt ferdig rapport i mai.*

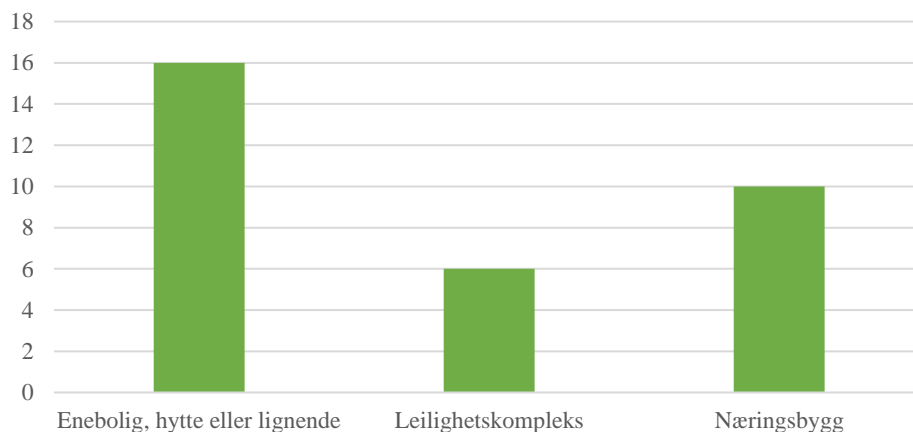
*Mvh*

*Steffen Furevik og Sigurd Brunstad Paulsen*

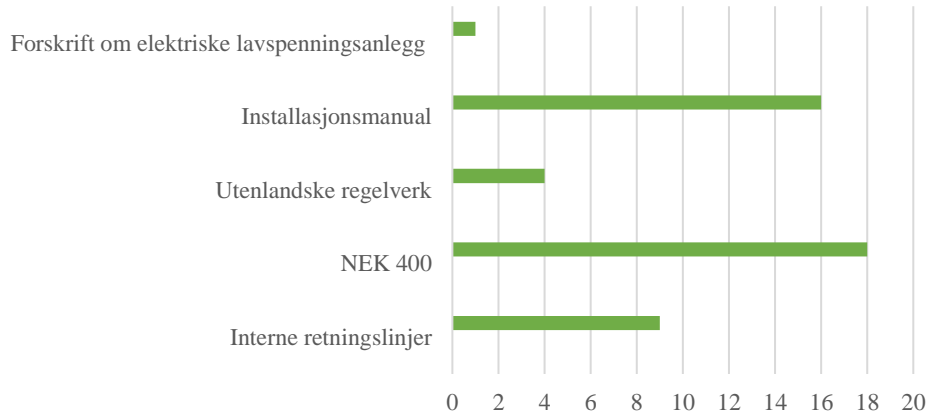
### 9.3 Vedlegg C – Grafer fra spørreundersøkelsen

Under er alle grafene representert fra spørreundersøkelsen. Spørsmål 15 som var bedriftens kontaktinfo er ikke tatt med.

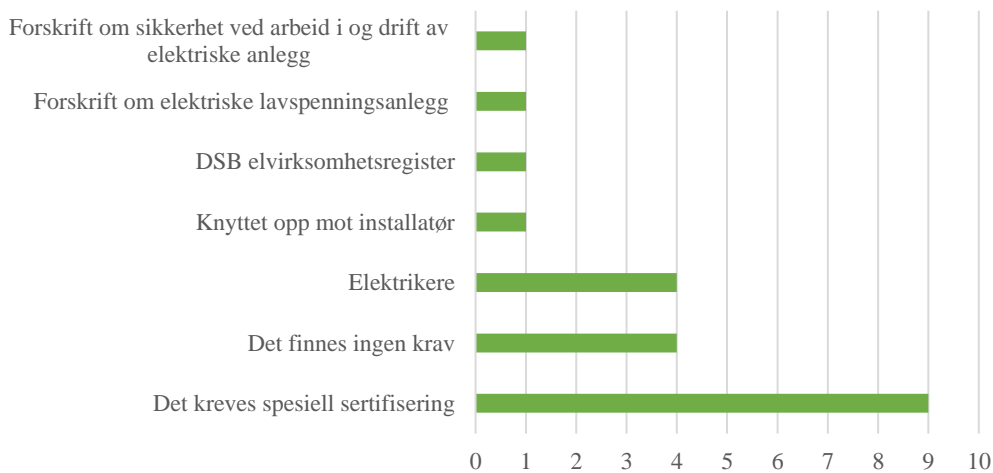
#### 1. I hvilke typer bygg installerer dere litium-ionbatterier?



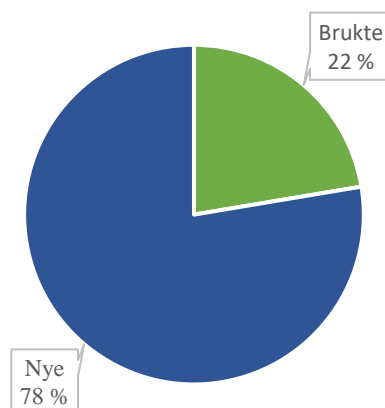
## 2. Hvilke retningslinjer/regler følger dere ved installering av litium-ionbatterier?



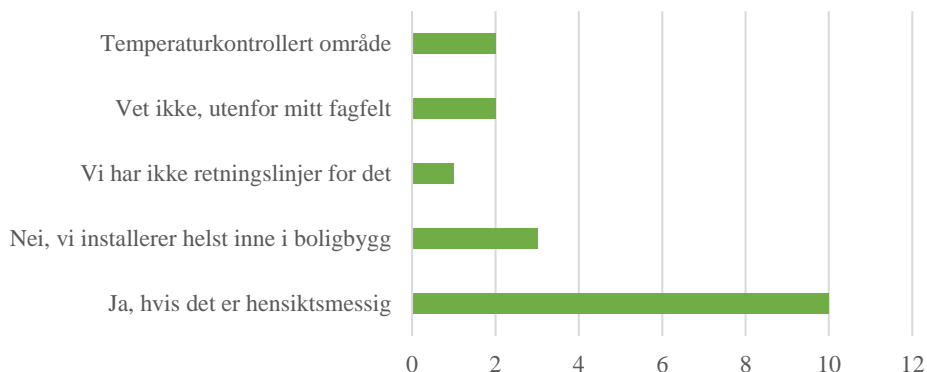
## 3. Stilles det spesielle krav til den som skal installere litium-ionbatterier i bolig?



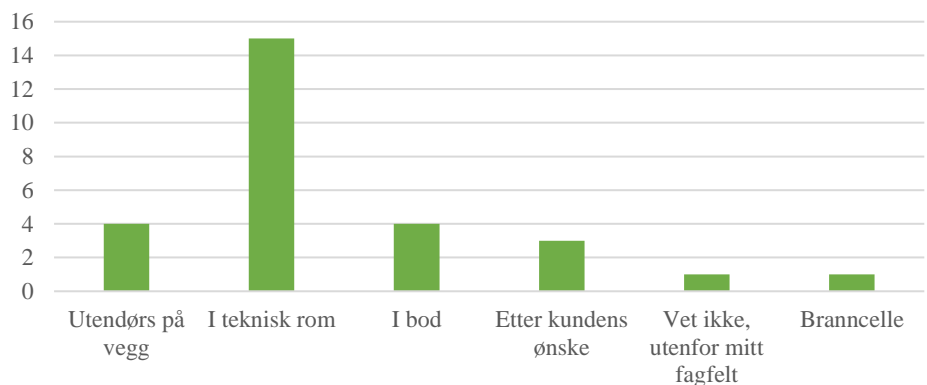
## 4. Installerer dere mest brukte eller nye litium-ionbatterier?



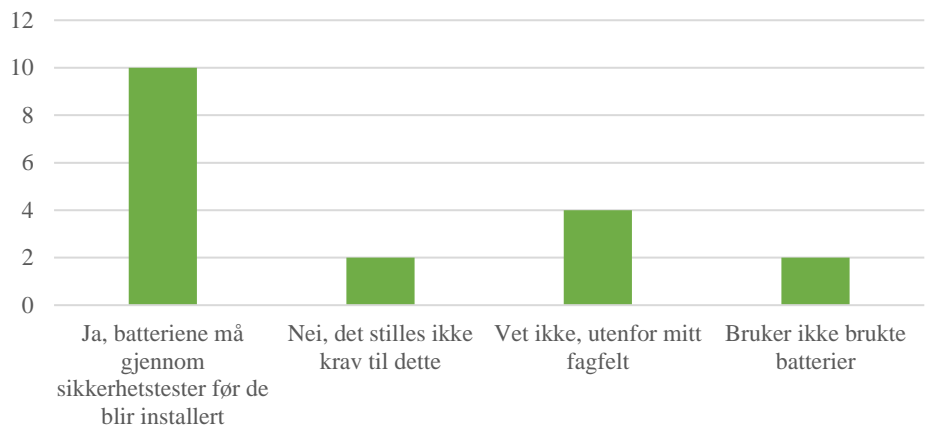
5. Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg med garasje. Installerer det da i garasjen?



6. Gitt at dere skal installere litium-ionbatterier for et boligbygg uten garasje. Hvor plasserer dere normalt litium-ionbatterier?

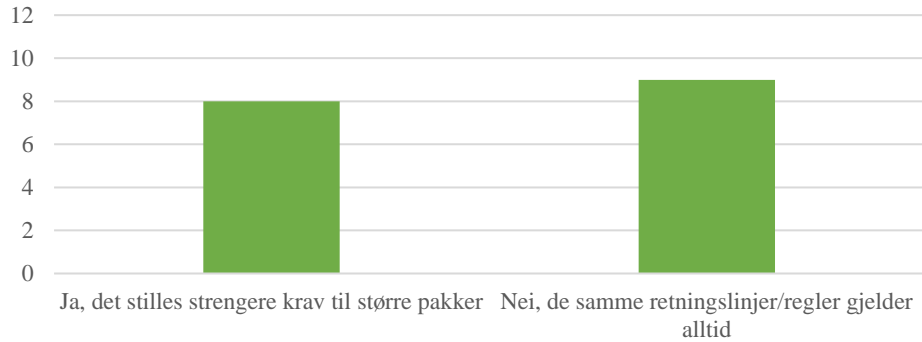


7. Stiller dere noen spesielle krav for installering av brukte litium-ionbatterier?





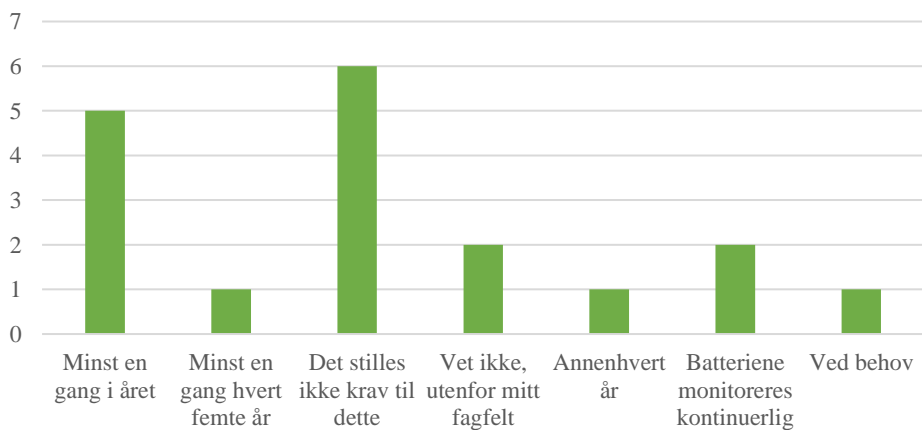
8. Har dere forskjellige retningslinjer/regler til forskjellige størrelser på litium-ionbatteripakkene/batterisystemet? Skriv eventuelt hvor grensen går i «annet» feltet.



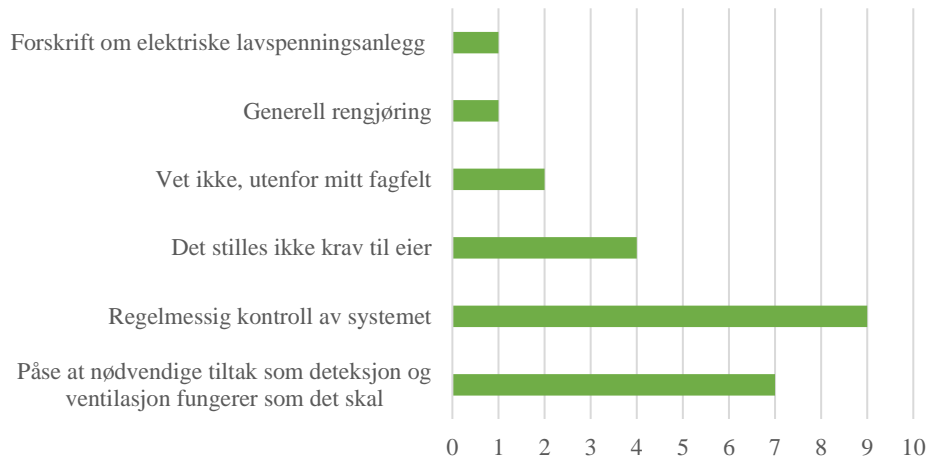
9. Stiller dere krav til BMS i batteriene dere bruker?



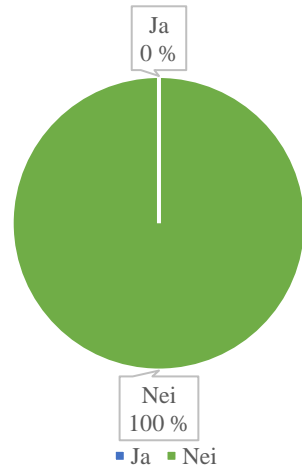
10. Hvor ofte gjennomføres det vedlikehold og kontroll ved batterisystemer i bolig?



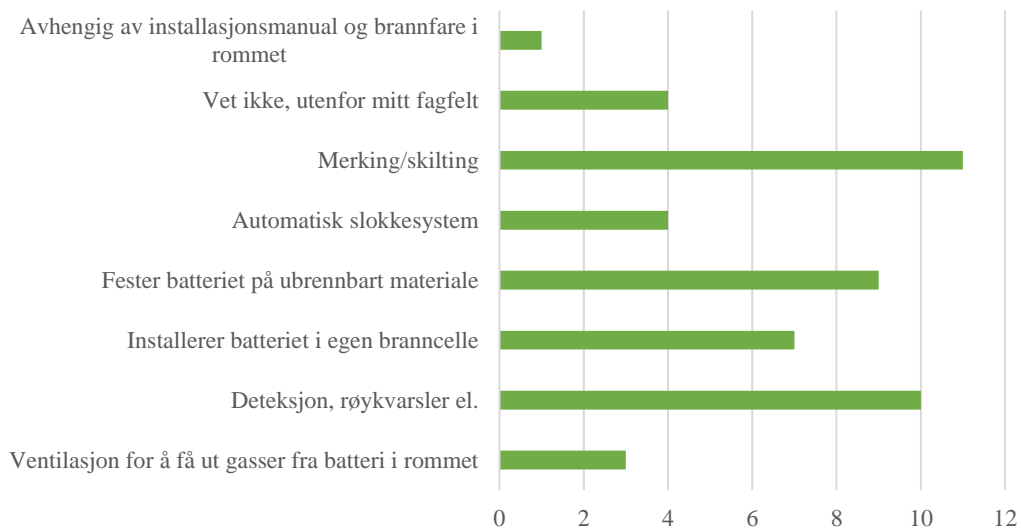
### 11. Hva kreves av eieren av batterisystemet?



### 12. Har dere opplevd uønskede hendelser tilknyttet brann i eller ved batterisystemet?



### 13. Hvilke tiltak nytter dere ved installasjon av litium-ionbatterier inne i bolig?



### 14. Hvilken rolle har du i bedriften du jobber for?

