

Vår 2013



Brann i elektrisk bil

Hovedprosjekt utført ved

Høgskolen Stord/Haugesund- Avd. Haugesund Ingeniørfag

Studieretning- Brann

Av:
Siril Hegén Agerup
Lisa Schei Blikeng

Kandidatnr. 4
Kandidatnr. 14

HOVEDPROSJEKT

Studentenes navn: Lisa Schei Blikeng
Siril Hegén Agerup

Linje & studieretning Brann, sikkerhetsingeniør

Oppgavens tittel: *Brann i elektrisk bil*

Oppgavetekst:

Elektriske biler blir stadig mer populære. I de nyeste bilene brukes det Litium-ion batterier som har høyere energikapasitet og lavere vekt enn eldre batterityper som nikkel kadium og bly.

Sikkerheten til litium-ion batterier i elektriske bil er av noen omdiskutert med tanke på brannsikkerhet og det er derfor ønskelig å undersøke hvordan et litium-ion batteri oppfører seg under en brann. For å undersøke dette vil det bli utført et brannforsøk med en moderne elektrisk bil, der brannen starter i batteripakken som følge av ekstern varmepåkjønning.

Temperaturmålinger som gjøres under forsøket vil bli analysert og sett i sammenheng med video av brannforløpet. Det er spesielt interessant å se på temperaturmålingene i batteripakken da disse vil vise hvor fort batteriet oppnår kritisk temperatur og hvordan temperaturene i batteriet påvirker brannforløpet.

Studenten skal også undersøke sikkerheten for rednings- og sløkkemannskaper, da mange brannvesenet i Norge ikke har noen rutiner for hendelser som involverer brann i elektrisk bil. Forslag til en prosedyre for brannvesenet skal utarbeides.

Endelig oppgave gitt: 7/3 – 2013

Innleveringsfrist: Fredag 10.mai 2013 kl. 12.00

Intern veileder: Arjen Kraaijeveld

Ekstern veileder: Reidar Skrunes
Adresse ekstern veileder: Haraldsgata 94, 5528 Haugesund

**Godkjent av
studieansvarlig:
Dato:**

Brit Fuløy
24/4 - 13



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND

Høgskolen Stord/Haugesund
Studie for ingeniørfag

Bjørnsonsgt. 45

5528 HAUGESUND

Tlf. nr. 52 70 26 00

Faks nr. 52 70 26 01

Oppgavens tittel Brann i elektrisk bil		Rapportnummer
Utført av Siril Hegén Agerup Lisa Schei Blikeng		
Linje Sikkerhet, Brannteknikk		Studieretning Brann
Gradering Åpen	Innlevert dato 10. Mai 2013	Veiledere Reidar Skrunes Arjen Kraaijeveld



FORORD

Elektriske biler er i vinden som aldri før og det utvikles stadige nye modeller. Det er mange som er skeptiske til denne raske utviklingen, spesielt med tanke på sikkerhet og lite kunnskap rundt brann i elektriske biler. Vårt hovedprosjekt "Brann i elektrisk bil" tar for seg problemstillinger rundt temaet. Før vi startet prosjektet visste vi lite om fenomenet, noe som gjorde oppgaven ekstra utfordrende og interessant.

Vi hadde lite kunnskap om elbil og batterier, og derfor reiste vi på seminar i Sverige hos SP (Sveriges Tekniska Forskningsinstitut) i regi av If Skadeforsikring AS. Temaet for seminaret var "Säkre batterier" og presentasjonene var relatert til ulykker, brannrisikoer, sikker produksjon og sikkerhet i litium-ion batteripakker som finnes i elektriske biler. Seminaret gjorde oss mer bevisste på de aktuelle problemstillingene rundt brann i elektrisk bil.

Store deler av oppgaven har bestått av å innhente informasjon fra ulike instanser, blant annet brannvesen, Direktoratet for samfunnsikkerhet og beredskap (DSB) og Forsvarets Forskningsinstitut (FFI). Det har også vært nødvendig å hente resultater fra forskningsarbeid gjort i utlandet. Vi har vært i kontakt med mange engasjerte mennesker og fått oppleve at forskningsarbeid krever både tid og tålmodighet.

Forarbeidet og utførelsen av brannforsøket var svært krevende og utfordrende da vi ikke hadde erfaring med liknende forsøk fra tidligere. Mye hardt arbeid resulterte i at forsøket ble vellykket.

Prosjektet ga oss muligheten til å holde en presentasjon på Fire Safety Day 2013 i Danmark. I tillegg ble oppgaven presentert av vår eksterne veileder Reidar Skrunes på "Brannseminar til sjøs" 17. april, og det ble holdt et foredrag om brannforsøket av Torleif Lian på Batteriforum 12. mars. I tillegg har vi sendt inn en artikkel om arbeidet vårt til bladene Bevis og Brannmannen.

Gjennom oppgaven har vi tilegnet oss god kunnskap om elektriske biler og brann i litium-ion bilbatteripakker. Prosessen har vært svært krevende, men også lærerik. Rapporten er ment for brukere av elektrisk bil, bilforhandlere, slokke- og redningsmannskaper, prosjekterende av parkeringshus og ladestasjoner, samt andre som skal vurdere brann sikkerheten hos denne type kjøretøyer.



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



Vi ønsker å takke:

Reidar Skrunes, vår eksterne veileder, for god hjelp og motivasjon
Arjen Kraaijeveld, vår interne veileder, for god hjelp
Torleif Lian, Forsvarets Forskningsinstitutt, for god bistand før og etter brannforsøk
Marcus Egelhaaf, für wunderbar Hilfe in unsere Arbeiten
Jostein Grav, DSB, for nyttig informasjon og bistand
ResQ Haugesund, for lån av område til gjennomføring av brannforsøket
Primus media ved Vardafjell VGS, for godt arbeid med filming og redigering
Olas Bil, for håndtering av bilvraket

Haugesund 8.mai 2013

Siril Hegén Agerup

Lisa Schei Blikeng



Innholdsfortegnelse

FORORD	II
FIGURLISTE	VII
SAMMENDRAG	IX
1 INNLEDNING	1
1.1 BAKGRUNN	1
1.2 FORMÅL OG PROBLEMSTILLING	1
1.3 BEGRENSNINGER	2
1.4 ORDFORKLARINGER	2
2 ELEKTRISK BIL	4
2.1 GENERELT	4
2.2 ELBILSTATISTIKK	6
2.3 NISSAN LEAF	6
2.4 FORDELER OG ULEMPER	7
2.5 BRANN I ELEKTRISKE BILER	8
2.6 BRANNER I ELEKTRISKE BILER	9
2.6.1 CHEVROLET VOLT	9
2.6.2 OMBYGD ELBIL	9
2.6.3 RENAULT KANGOO	10
2.6.4 EV-ADAPT KONVERTERT FIAT 500	10
2.7 FREMTIDENS ELEKTRISKE BILER	10
3 BATTERITYPER	11
3.1 PRIMÆRBATTERI VS. SEKUNDÆRBATTERI	11
3.2 FORSKJELLEN PÅ LITIUM-ION OG LITIUM METALL BATTERIER	11
3.3 OPPBYGNING AV BILBATTERIPAKKER	11
3.3.1 CELLER	12
3.3.2 MODULER	13
3.4 LADING/UTLADING	13
3.5 TERMISK "RUNAWAY"	14
3.6 LITIUM-ION BATTERIER OG BRANN	14
4 TIDLIGERE FORSØK	16
4.1 FORSØK MED LITIUM-ION BATTERIER	16
4.1.1 FORSØK UTFØRT AV FFI	16
4.1.2 FORSØK UTFØRT AV DEKRA	17
4.1.3 FORSØK UTFØRT I JAPAN	18
4.2 FORSØK MED VANLIG BENSINBIL	18
4.2.1 FORSØK UTFØRT VED HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND	18



5	RUTINER FOR SLOKKE- OG REDNINGSMANNSKAPER I NORGE	19
5.1	RUTINER I NORGE	19
5.2	RUTINER I ANDRE LAND	20
5.3	OPPLÆRING AV SLOKKE- OG REDNINGSMANNSKAPER I NORGE	20
6	FORSLAG TIL PROSEDYRE	21
6.1	PROSEDYRE FOR SLOKKE- OG REDNINGSARBEID PÅ ELEKTRISK BIL	21
6.2	PROSEDYRE FOR Å GJØRE ULIKE ELBILER STRØMLØSE I ULYKKESITUASJON	21
7	BRANNFORSØK	22
7.1	FORBEREDELSE	22
7.1.1	UTARBEIDELSE AV DOKUMENTER	22
7.1.2	SIKKERHETSSONE	22
7.1.3	FORSØKSUTSTYR	23
7.1.4	FORSØKSBILEN	24
7.1.5	SCENARIO	29
7.2	OPPRIGGING	30
7.2.1	DEMONTERING	31
7.2.2	PLASSERING AV TERMOELEMENTENE	32
7.2.3	TEST AV TERMOELEMENTENE	34
7.3	UTFØRELSE	35
7.3.1	HENDELSESFORLØP	35
7.3.2	BESKRIVELSE AV HENDELSER	38
7.4	UNDERSØKELSE AV BILVRAKET	39
7.4.1	BILCHASSISET	39
7.4.3	BATTERIPAKKEN	40
7.4.4	RESTER AV INNHOLD I CELLE	42
8	RESULTATER FRA BRANNFORSØKET	46
8.1	RESULTATER FRA TEMPERATURMÅLINGENE	46
8.1.1	TEMPERATURMÅLINGER HØYRE SIDE	46
8.1.2	TEMPERATURMÅLINGER VENSTRE SIDE	47
8.1.4	TEMPERATURMÅLINGER MIDT I BILEN	48
8.1.6	TEMPERATURMÅLINGER I /VED BATTERIPAKKEN	49
8.1.8	TEMPERATURMÅLINGER I PANSER OG UNDER BAGASJEROM	50
8.3	BRANNTEKNISKE BEREGNINGER	51
8.3.1	MAKSIMAL EFFEKT	51
8.3.2	MAKSIMALT ENERGIINNHold	51
8.3.3	BRANNUTVIKLING	52
9	DISKUSJON	53
9.1	FORSØKSRESULTATER	53
9.2	TEMPERATURMÅLINGENES NØYAKTIGHET	56
9.3	TERMOELEMENTER PÅ BATTERIPAKKEN	56
9.4	ERFARINGER OG FORBEDRINGSPOTENSIAL	56
9.5	PROSEDYRER FOR BRANNVESENET	57
10	KONKLUSJON	I
11	REFERANSER	II



12 VEDLEGG	V
VEDLEGG 1 - UTREGNINGER ENERGITETTHET	V
VEDLEGG 2 - BILDER FRA DEKRAS FORSØK	VI
VEDLEGG 3 - PROSEDYRE UTVIKLET I USA	VII
VEDLEGG 4 - KURSOPPLEGG NORGES BRANNSKOLE	IX
VEDLEGG 5 - PROSEDYRE FOR SLOKKE- OG REDNINGSARBEID PÅ ELEKTRISKE BILER	XIII
VEDLEGG 6 - PROSEDYRE FOR Å GJØRE ULIKE ELBILER STRØMLØSE I ULYKKESSITUASJON	XV
VEDLEGG 7 - UTSTYRSLISTE	XXII
VEDLEGG 8 - MAL SJA	XXIII
VEDLEGG 9 - UTFYLT SJA	XXX
VEDLEGG 10 - Plassering av termoelementer	XXXVII
VEDLEGG 11 - FORSØKSLOGG	XXXIX
VEDLEGG 12 - TOTAL ENERGI FRA INDUSTRIBRENNER	XL
VEDLEGG 13 – BRANNTEKNISKE BEREGNINGER	XLI

**FIGURLISTE**

Figur 1 - Ulike typer elektriske biler	4
Figur 2 - Statistikk elbilsalg	6
Figur 3 - Nissan Leaf	7
Figur 4 - Brann i Chevrolet Volt	9
Figur 5 - EV-Adapt konvertert Fiat 500 etter brann	10
Figur 6 - Prismatiske celler og en modul	13
Figur 7 - Litium-ion batteri	13
Figur 8 - Termisk "runaway" hentet fra Larsson	14
Figur 9 - Industribrenneren	23
Figur 10 - Propanflaske med slange og gassmåler	23
Figur 11 - Forsøksbil, Peugeot iOn 2012 modell	24
Figur 12 - Peugeot iOn	25
Figur 13 - Batteripakken med forklaring	26
Figur 14 - Innsiden av batteripakken	27
Figur 15 - Halv modul med 4 celler	27
Figur 16 - Prismatiske celler	28
Figur 17 - Ulike batterikjemier	29
Figur 18 - Plassering av industribrenner	30
Figur 19 - Plate under bil	31
Figur 20 - Batteripakken nedenfra	31
Figur 21 - Åpning til batteripakken	32
Figur 22 - Innføringspunkt for termoelementer til batteri	32
Figur 23 - Oppsett av temperaturmålestyr i kupé	33
Figur 24 - Plassering av termoelementer	34
Figur 25 - Forsøksplassen	34
Figur 26 - Igangsetting av brannen med ekstern varmekilde	35
Figur 27 - Brannforløp uten ekstern varmekilde	36
Figur 28 - Overtenning	37
Figur 29 - Brann i bakre del av batteriet etter 90 minutter	37
Figur 30 - Ventilende celle	38
Figur 31 - Katodebrann	38
Figur 32 - Lysglimt under katodebrann	39
Figur 33 - Bilchassiset etter brannen	39
Figur 34 - Utbrent batteripakke	40
Figur 35 - Bilbatteri fra front	40
Figur 36 - Bilbatteri bakfra	41
Figur 37 - Celle	41
Figur 38 - Cellenes ventilasjonsretning	42
Figur 39 - Utplukket celle	42
Figur 40 - Motsatt side av utplukket celle	43
Figur 41 - Plassering av utplukket celle i bilbatteriet	43
Figur 42 - Delt celle	44
Figur 43 - Celleinnhold	44
Figur 44 - Delt celle med utplukket innhold	45
Figur 45 - Temperaturmålinger høyre side	46



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



Figur 46 - Temperaturmålinger venstre side	47
Figur 47 - Temperaturmålinger midt i kupé	48
Figur 48 - Temperaturmålinger i/ved batteripakke	49
Figur 49 - Temperaturmålinger i panser og under bagasjerom	50
Figur 50 - Varmeavgivelsesrate for forskjellige brannvekstkurver.....	52



Sammendrag

Elektriske biler blir sett på som en utfordring i forbindelse med brann. På grunn av økningen av elbiler på veiene vil det med tiden oppstå flere branner som involverer disse kjøretøyene. Det finnes mange ubesvarte spørsmål rundt hva som skjer dersom en elektrisk bil brenner, og spesielt brannvesenet gir uttrykk for manglende kunnskap innen dette feltet.

Som en del av prosjektet har det blitt innhentet informasjon om elektriske biler; forskjellige batterityper, tidligere branner, tidligere utførte brannforsøk, brannvesenets rutiner og diverse rapporter.

Det overordnede målet med denne oppgaven var å finne ut hvordan en brann i en elektrisk bil utvikler seg ved å utføre et fullskala brannforsøk. De nyeste elbilene har store batteripakker med litium-ion battericeller der cellekjemien varierer i forskjellige batterityper. I brannforsøket ble det benyttet en Peugeot iOn (2012 modell) med cellekjemien litium-ion magnesiumoksid. Denne cellekjemien blir sett på som en av de tryggeste brukt i moderne elbiler. Det ble valgt å teste verst tenkelig scenario under forsøket, brann i batteripakken. Dette ble gjort ved å bruke en ekstern varmekilde. Forsøksbilen fikk brenne helt ut da det var ønskelig å observere et fullstendig hendelsesforløp ved brann i en elbil.

Temperaturmålinger som ble gjort under brannforsøket viser høyere temperaturer på blant annet undersiden og den høyre siden av elbilen sammenliknet med tidligere utført forsøk med vanlig bensinbil. Dette er på grunn av varmen som utvikles fra batteripakken. Ved brann i elektrisk bil bør batteripakken brenne helt opp for å hindre re-antennelse.

Observasjoner gjort under brannforsøket ga inntrykk av at brannen ikke utgjorde noen større fare for omgivelsene enn en brann i en vanlig bensin- eller dieselbil. Det vil i alle bilbranner være en risiko for lufttrykkekspløsjoner fra airbager og dekk. I denne elbilbrannen oppstod det ingen eksplosjonsartet brann eller høye flammesøyler. Fra batteripakken ble det observert brennende elektrolytt og lysglimt fra brennende metaller i katoden. En elektrisk bil har en krets med stor spenning og strøm og er dette skiller den fra en vanlig bil. Ved en ulykke kan dette by på problemer for redningsmannskaper dersom de ikke vet hvor de forskjellige elbilenes klippesoner er lokalisert.

Det er utarbeidet forslag til prosedyrer, men det anbefales at det lages et felles system for redningstater med nødvendig informasjon om hver enkelt type elektriske bil for å effektivisere slokke- og redningsarbeidet.



1 Innledning

Hjelp en elektrisk bil brenner! Temaet kan få store deler av befolkningen til å skjelve i buksene. Er dette virkelig så farlig som mediene skal ha det til? Hva slags informasjon finnes det egentlig om elbiler og skrekkszenarioet brann, og hva skjer når en av slik bil går opp i flammer?

1.1 Bakgrunn

En stor økning i antall elektriske biler på norske veier de siste årene og fremover vil sannsynligvis medføre en økning i antall branner som involverer denne typen kjøretøy. Elektriske biler med eldre batteriteknologi har de seneste årene vært involvert i flere branner. Den raske utviklingen av nye batterityper fører til spørsmål om kapasitet og sikkerhet. Er sikkerheten ivaretatt under utviklingen av disse nye batteritypene?

Det er mye usikkerhet forbundet med slokke- og redningsarbeidet ved brann i en elektrisk bil. Det vil derfor være av stor interesse å se nærmere på tiltak og løsninger på dette området og hvordan en brann i en elektrisk bil forløper.

1.2 Formål og problemstilling

Formålet med oppgaven er å øke allmennkunnskapen om moderne bilbatteripakker og brannsikkerhet, samt klargjøre risiko knyttet til brann i elektrisk bil. Oppgaven vil gi nyttig informasjon til brukere av elektrisk bil, bilforhandlere, slokke- og redningsmannskaper, prosjekterende av parkeringshus og ladestasjoner samt andre som skal vurdere brannsikkerhet til denne typen kjøretøy.

Det er mange ubesvarte spørsmål knyttet til brann i elektrisk bil. Det vil i denne rapporten bli tatt for seg: *Hva skjer når batteripakken i en moderne elbil tar fyr? Hvordan skal slokke- og redningsmannskaper håndtere en brann i en slik bil? Hvor sikre er egentlig de nye litium-ion bilbatteripakkene?*

I tillegg vil det være interessant å se om det er store forskjeller på temperaturer og branneffekt i elektrisk bil sammenliknet med vanlig bil.

Sentralt i oppgaven er et fullskala brannforsøk med en elektrisk bil. Forsøket er dokumentert i form av video, bildemateriale og temperaturmålinger med tilhørende grafer.



1.3 Begrensninger

Begrensninger ble satt for å kunne gå mer spesifikt inn på de områdene som er mest relevante i forhold til oppgavens problemstillinger.

I brannforsøket testes kun én type bilbatteri. Det finnes mange forskjellige batterikjemier som brukes i dagens elbiler. Resultatene fra brannforsøkene i denne rapporten kan derfor ikke overføres fullstendig til alle elektriske biler. Batterikjemien i forsøksbilen Peugeot iOn blir sett på som en av de tryggeste. Resultatene fra brannforsøket vurderes imidlertid likevel å ha stor verdi for den generelle vurdering av brannforløp i elektriske biler.

Det testes også kun ett scenario der en ekstern varmekilde varmer opp batteripakken. Det finnes flere problemområder som bør utforskes.

1.4 Ordforklaringer

Brann:

Overtenning er et stadium i et brannforløp da alle brennbare materialer og gasser i et rom er antent og temperatur opp mot 500-600 °C er oppnådd.

Varmeavgivelsesrate, eller "heat release rate" (HRR) er varmemengde som frigis fra et brennende materiale per tidsenhet.

Varmefluks er mengde varmeenergi som overføres gjennom en gitt flate.

Flammespredning er utbredelsen av en flammefront.

Batterier:

Overlading er opplading av et batteri der det tilføres mer kapasitet enn det batteriet kan levere.

Nominell spenning er spenningen i et batteri ved normalt ladet tilstand.

Ioner er elektrisk ladede atomer.

Svingbatteri er et batteri der ionene kan bevege seg fram og tilbake mellom katode og anode i elektrolytten.

Eksoterm reaksjon er produksjon av varmeenergi som fører til temperaturøkning.

Kortslutning kan oppstå i en elektrisk krets dersom en forbindelse mellom to eller flere ledere i anlegget inntreffer.



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



Forsøksutstyr:

Termoelement består av seriekoblede ledningstråder av ulike metaller som danner en strømkrets og brukes for å gjøre temperaturmålinger.

K type element er en type termoelement som benyttes ved målinger av høye temperatur.

2 Elektrisk bil

Elektriske kjøretøyer har vært populære i Norge i mange år. Allerede i 2002 var det over 1000 registrerte elbiler her i landet.

I dag, 11 år senere, viser tall for veitrafikken at det kjører over 10 000 elektriske kjøretøyer på norske veier (Opplysningsrådet for veitrafikken AS, 2012). Tall viser at ingen andre land har hatt like kraftig økning av elektriske biler per innbygger som Norge (NTB, 2013). Det jobbes for at det innen 2020 skal være 200 000 elbiler her i landet (Grønnbil, 2013) (Nissan Norge, 2013).

2.1 Generelt

En elektrisk bil er et kjøretøy som kun drives av én eller flere elektriske motorer der energien lagres i batterier som lades fra et strømnnett (Norsk elbil forening, u.å).

Det er utviklet mange ulike elektriske biler opp igjennom tidene. Tidligere ble det brukt bilbatteripakker med nikkell kadmium, nikkell metal hybrid eller bly, mens det nå er litium-ion batteripakker som er mest attraktive. Disse batteriene har både større kapasitet og lavere vekt enn de eldre typene (Norsk elbil forening, u.å). Elbilene kommer i mange forskjellige versjoner, som for eksempel Tesla modell S og Buddy BAES, se Figur 1.



Figur 1 - Ulike typer elektriske biler
Til venstre Tesla som er en av markedets nyeste elektriske biler. Til høyre en Buddy.



Tabell 1 viser en oversikt over elektriske kjøretøyer som er tilgjengelige på det norske markedet i dag, samt batteritypen som benyttes i de ulike modellene. Forkortelsene benyttet i tabellen klassifiserer de ulike elektriske kjøretøyene¹.

I dag er det kun Buddy som benytter ”gammeldagse” batterier med bly og nikkel metal. (Norsk elbil forening, u.å)

Tabell 1 - Elektriske biler på markedet

Leverandør	Modell	Kjøretøy- klasse	Batteritype
Peugeot Norge	iOn	M1	Litium-ion
Citroën Norge	C-ZERO	M1	Litium-ion
MMC Norge	Mitsubishi i-MiEV	M1	Litium-ion
Nissan Nordic	Nissan Leaf	M1	Litium-ion
Buddy Electric	Buddy ALB	L7e	Bly
	Buddy BAES	L7e	NiMh ²
Tesla Motors Norway	Model S 60 kWh	M1	Litium-ion
	Model S 85 kWh		
	Model S 85 kWh Performance		
	Tesla Roadster		
Tazzari Norway	Tazzari Zero	L7e	Litium-ion
Renault Norge	Kangoo ZE	N1	Litium-ion
	Kangoo Maxi ZE		
Ford/Azure	Transit Connect Electric Trend	N1 og M1	Litium-ion
Enviro Bil	MIA electric varebil	N1	Litium-ion
	MIA electric personbil	M1	
Classic Electrics	Ecar 500 ev	M1	Litium-ion
Volkswagen	E-UP	M1	Litium-ion

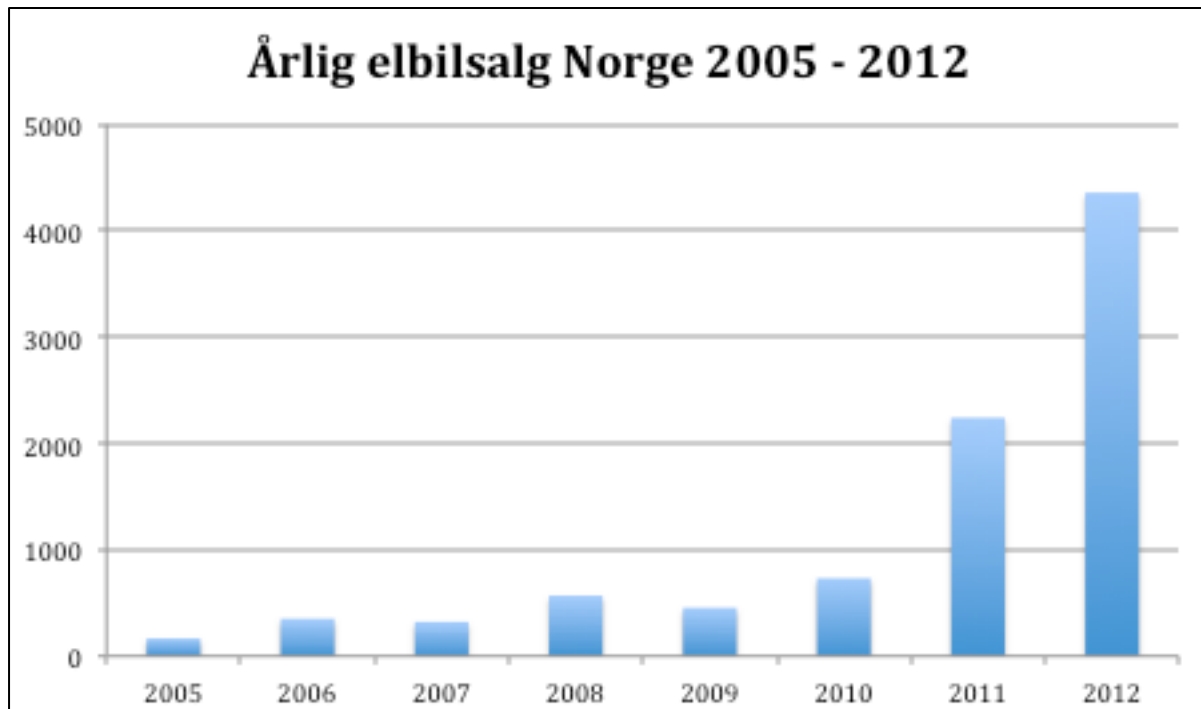
¹ Klassifiseringer:

- M1: Personbil
- N1: Varebil
- L7e: Firehjuls elektrisk motorsykkel

² Nikkel metal hybrid

2.2 Elbilstatistikk

2011 var året da salget av elektriske biler virkelig skjøt i været her til lands, og i 2012 ble det solgt 4358 elektriske biler. Det var 2116 flere biler enn i 2011 og en økning på 48 %, se Figur 2 (Norsk elbil forening, u.å).



Figur 2 - Statistikk elbilsalg
Søylene viser antall solgte elektriske biler fra 2005 til 2012.

Den mest solgte elbilmodellen i 2012 var Nissan Leaf med 2500 solgte biler og en markedsandel på 57 %. Nissan Leaf er i tillegg den første elektriske bilen som har vunnet tittelen "World Car of the Year" 2011 (World car awards, u.å).

2.3 Nissan Leaf

Nissan Leaf er en enkel bil å kjøre, den er stillegående og ser ut som en vanlig bil, se Figur 3. Den har flere moderne egenskaper som for eksempel muligheten til å styre aircondition og lading fra mobiltelefon, samt planlegge kjøreturen via internett.

Bilen er fullstendig elektrisk og slipper ikke ut CO₂. Bilen markedsføres som en miljøbil da den er designet slik at 95 % av den skal kunne resirkuleres. En Leaf har følgende egenskaper:

- Toppfart på 145 km/t
- Kjørelengde på 160 km
- Sitteplass til 5 personer
- Batteripakken er plassert under gulvet og det gir god plass til bagasje

Batteripakken er designet av Nissan i samarbeid med NEC og er av typen litium-ion. Cellene er flate, laminerte og produserer lite varme. Det er ikke fare for overlading av batteriet da dette reguleres og ladingen avsluttes når batteriet er fulladet. Ved temperaturer ned mot -25° kan batteriet fryse, noe som gjør lading umulig.



Figur 3 - Nissan Leaf

2.4 Fordeler og ulemper

Å velge en elektrisk bil påstås å ha økonomiske, praktiske og miljømessige fordeler. Elektriske biler bruker kun strøm som energikilde, noe som betyr at de i seg selv ikke slipper ut klimagasser som CO_2 . De økonomiske fordelene er mange; lav årsavgift (mindre enn 500 kr), gratis passering i bomstasjoner, gratis reise på bilferger og gratis lading på de fleste ladestasjoner. I tillegg har elbiler rett til fri bruk av kollektivfelter noe som er svært praktisk i kø og rushtrafikk. Sistnevnte er trolig grunnen til at de fleste eiere av elbiler holder til i Oslo/Akershus-området (Norsk elbil forening, u.å).

En annen fordel med elektrisk bil er en mye lavere energitetthet³ i batteripakken sammenliknet med energitettheten i en bensintank. Energitettheten i 40-60 liters bensintanker (12,1 kWh/kg) er 121-201 ganger større enn energitettheten til en litium-ion bilbatteripakke. Energitettheten i en bilbatteripakken kan variere mellom 0,06-0,1 kWh/kg avhengig av vekt og energiinnhold i batteriet, se Vedlegg 1 - Utrengninger energitetthet. I en bilbatteripakke er energien fordelt i mange celler i motsetning til en bensintank der all energien er samlet på ett sted. Ved en eventuell brann i en bensinbil vil all energien slippes ut samtidig.

På en annen siden finnes det også ulemper med elektriske kjøretøy. Elbiler har kortere rekkevidde enn en vanlig drivstoffbil som følge av den lave energitettheten. I tillegg er de dårlig rustet for ekstremkulde. Det finnes heller ingen garanti for hvor lenge det kommer til å være økonomiske goder for elbiler, eller hvor lenge det vil finnes gratis ladestasjoner (Norsk elbil forening, u.å).

³ Energitetthet: Energiinnhold per kg



2.5 Brann i elektriske biler

Brann i elektriske biler har gjennom årene oppstått på grunn av ulike årsaker og i forskjellige situasjoner. Brann har oppstått i parkerte biler, i biler som har stått til lading og i biler under kjøring. Undersøkelser viser at typiske brannårsaker er:

1. Skade på batteripakken
2. Overlading av batteripakken
3. Oppvarming av batteripakken

Punkt 2 og 3 forekommer som oftest i eldre elbiler med gammel teknologi eller vanlige biler som er bygd om til elbiler. De mest moderne elbilene har sikkerhetsventiler i batteripakkene, sikkerhetssystemer som sier fra ved farlig oppvarming og systemer som hindrer overlading. (Andersson, 2013)

Det finnes flere utfordringer knyttet til lading av elektriske biler, der problemområder kan være:

- Lading i parkeringshus
- Ladeplasser med flere elbiler
- Plassering av ladestasjoner

Hva er risikoen for brann i en elbil som står til lading i et parkeringshus? Hvordan vil brannforløpet se ut? Hvis slokking ikke er mulig; hvordan kan man utføre redningsarbeid? Hvis flere elbiler står til lading på en ladeplass og én bil antenner, hvor stor er faren for spredning? Hvor kan ladestasjoner plasseres trygt? Er det trygt å plassere disse inne i parkeringshus? Hvor langt fra nødutganger bør slike stasjoner plasseres?

Ønsket om å øke antall elektriske biler i landet fører til at problemområder som beskrevet over må bli sett nærmere på. Dette må gjøres for å øke kunnskapen rundt farer forbundet med lading av elektriske kjøretøy. Denne kunnskapen vil være nyttig for både slokke- og redningsmannskaper samt rådgivende branningeniører. Ved prosjektering av nye bygg vil behovet for ladestasjoner i eller ved bygget øke med årene som kommer. Konsulenter bør derfor ha kunnskap om tilhørende problemområder og farer forbundet med dette.

Det er av interesse å finne elbilers maksimale effekt under brann, se kapittel 8.3 for beregninger av denne. For vanlige bensinbiler ligger denne effekten på ca. 8 MW. Den maksimale effekten kan variere etter bilens alder og størrelse, der de nye bilene har den høyeste effekten (Jones, Noonan, & Riordan, 2007).

2.6 Branner i elektriske biler

Det har de siste årene vært en økning i antall branner i elektriske biler. Med forbehold om usikkerheter er det opplyst i e-post fra elbilforeningen v/ Snorre Sletvold⁴ at det siden 2010 har blitt rapportert brann i 7- 8 elektriske biler. Ikke alle brannårsaker blir oppklart og det er ofte kun antagelser.

I kommende kapitler vil tidligere branner i forskjellige elektriske biler presenteres.

2.6.1 Chevrolet Volt

3/6 2011: National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) utførte en test på en Chevrolet Volt der de penetrerte batteripakken med en stang. Tre uker etter penetreringen tok bilen fyr, se Figur 4.

Ved penetreringen oppstod det en mekanisk skade på batteriets væskekjølesystem, og kjølevæsken ble frigjort. Et par dager etter hadde kjølevæsken tørket og krystallisert seg. Dette førte til en strømkrets med god elektrisk ledeevne. En lysbue mellom to ikke-berørende poler var det som skulle til for å starte brannen.

(National Highway Traffic Safety Administration, 2012)



Figur 4 - Brann i Chevrolet Volt

2.6.2 Ombygd elbil

17/11 2010: En uautorisert ombygd Nissan Qashqai, bygd om fra diesel til elektrisk, brant på fergen mellom Oslo og København. Bilen hadde litium-ion batterier på trolig 34 kWh og stod til lading på fergen. Brannårsaken er ikke kjent men det er tenkelig at brannen startet i batteriet eller en kabelsnelle (Danish Maritime Accident Investigation Boards, 2011).

⁴ Snorre Sletvold, Elbilforeningen
E-post 08.03.2013

2.6.3 Renault Kangoo

26/6 2012: En Renault Kangoo tok fyr på E18 utenfor Høvik. Bilen var trolig ti-tolv år gammel med eldre batteriteknologi, nikkelladmium. Ved denne alderen nærmer batteriet seg forventet levetid, og dårlig vedlikehold av batteriet kan ha forårsaket brannen (Frydenlund, 2012). Tre av brannene i 2012 var i eldre Renault Kangoo med nikkelladmium batterier opplyser Snorre Sletvold⁵ i e-post.

2.6.4 EV-Adapt konvertert Fiat 500

11/8 2012: Den ombygde elektriske bilen tok fyr da den stod til lading, se Figur 5. Bilen hadde sannsynligvis stått til lading i 25 timer i strekk. Brannen startet trolig under motorrommet etter at bilens varmesystem hadde tørrkokt. I rapporten fra SP⁶ kommer det i tillegg frem at brannvesenet var usikre på hvordan de skulle håndtere brannen i den elektriske bilen. (Hoffmann & Söderholm, 2013)



Figur 5 - EV-Adapt konvertert Fiat 500 etter brann

2.7 Fremtidens elektriske biler

I fremtiden vil produsenter jobbe for å utvikle elbiler som kan kjøre enda lengre strekninger uten lading. En slik utvikling er nødvendig for å kunne konkurrere med bensin- og dieseldrevne biler. For at en elbil skal ha kapasitet til dette må energimengden i bilenes bilbatteripakker økes. I en artikkel fra teknisk ukeblad blir det foreslått å fremstille en bedre anode, og da det ikke er mer å hente i grafittanoden (som benyttes i dagens litium-ion batterier) er man avhengig av å benytte et annet materiale (Dalløkken, 2013). Bruk av for eksempel silisium i anodematerialet vil føre til en høyere energitetthet i bilbatteripakkene. Samtidig er det usikkerheter rundt hvor stor energitettheten kan være for at sikkerheten i bilbatteripakkene blir ivaretatt (Kvisle, 2013).

⁵ Snorre Sletvold, Elbilforeningen

E-post 08.03.2013

⁶ SP - Sveriges Tekniska Forskningsinstitut



3 Batterityper

Batteripakkene som brukes i elektriske biler er under stadig utvikling. Mens de tidligere elektriske bilene benyttet nikkelladmium, nikkelmetalhydrid og blybatterier, er det nå litium-ion batteriene med sin høyere effekt og lavere vekt som er mest brukt i bilbatteripakker. Litium-ion batterier er i dag de mest brukte batteriene i utstyr og innretninger som krever oppladbare batterier. De benyttes på svært mange områder, blant annet i elektroniske produkter på transportområdet og i industrien.

3.1 Primær batteri vs. sekundær batteri

Det skilles mellom to forskjellige batterityper; primær- og sekundær batterier.

- *Primær batterier* er engangsbatterier. Disse kan altså ikke lades opp og det foregår en ”omforming av kjemisk energi til elektrisk energi ved en ikke reversibel prosess” (Gunvaldsen, 2008).
- *Sekundær batterier* er oppladbare batterier. ”Den kjemisk elektriske energiomformingen er reversibel og batteriet kan lades opp gjentatte ganger etter utlading” (Gunvaldsen, 2008).

Litium-ion batterier er sekundær batterier.

3.2 Forskjellen på litium-ion og litium metall batterier

En vanlig misoppfattelse er at litium-ion batteriene er like farlige som litium batterier. Batterier med litium-ion er forskjellige fra litium batterier da disse ikke inneholder metallisk litium. Batterier som inneholder metallisk litium er ekstremt brennbare, og kan blant annet brenne under vann.

Litium-ion batterier har en batterikjemi som skaper et svært effektivt batteri. Dette skiller litium-ion batteriene fra tidligere anvendte batteriteknologier og den høye energikapasiteten gjør batteriet attraktivt. (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011)

3.3 Oppbygning av bilbatteripakker

Et litium-ion bilbatteri består av battericeller som er seriekoblet eller parallellkoblet i moduler. En batteripakke kan for eksempel ha 88 celler fordelt i 12 moduler som i Peugeot iOn, eller 192 celler fordelt i 48 moduler som i Nissan Leaf.



3.3.1 Celler

Battericeller inneholder mange ulike komponenter, og blir laget i forskjellige geometrier.

3.3.1.1 Cellekomponenter

De viktigste komponentene i en litium-ion battericelle er anoden, katoden, elektrolytten og separatoren:

- Anoden i en litium-ion celle er den negative elektroden og er laget av karbon.
- Katoden i en litium-ion celle er den positive elektroden og består av en type metalloksid.
- Elektrolytten består av litium salt i et organisk løsemiddel, inneholder ioner og er elektrisk ledende.
- Separatoren er plassert mellom anoden og katoden, se Figur 7. Den består av et tynt lag med mikro-perforeert plast og har som funksjon å separere de positive og negative elektrodene fra hverandre og samtidig slippe gjennom ioner.

(Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011)

3.3.1.2 Cellegeometrier

Det finnes tre ulike litium-ion cellegeometrier:

- Sylindrisk
- Prismatisk
- Pose

Sylindriske celler, prismatiske celler og poseceller har ulike egenskaper. De benyttes i elbiler samt ulike typer tekniske apparater som pc og mobiltelefoner.

(Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011)

Tabell 2 viser en oversikt over de tre cellegeometrienes egenskaper vurdert opp mot hverandre etter hva som er ønskelig, akseptabelt og uønsket.

Tabell 2 - Cellegenskaper

	Sylindrisk	Prismatisk	Pose
Energitetthet	Medium	Høy	Høyest
Mekanisk stabilitet	Høy	Medium	Lav
Termisk ytelse	Høy	Høyest	Medium
Arealutnyttelse	Lav	Høy	Høyest
Produksjonskostnad	Høy	Medium	Lav
Trykkpåkjenning	Høy	Medium	Lav

Fargeforklaring: Ønskelig Akseptabelt Uønsket

(Hoffman, 2013)

3.3.2 Moduler

Det finnes gjerne flere moduler i en batteripakke, der hver modul består av et antall celler, se Figur 6. I modulene kan cellene være enten serie- eller parallellkoblet.

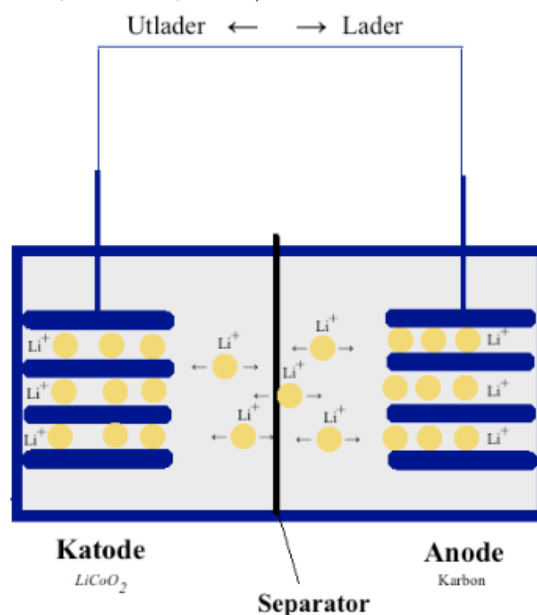


Figur 6 - Prismatiske celler og en modul

3.4 Lading/utlading

Ved lading av et litium-ion batteri beveger litium-ioner seg fra katoden til anoden, og elektroner flytter seg gjennom den ytre elektriske kretsen, se Figur 7. Når batteriet lades ut vil kretsen gå motsatt vei av det som er beskrevet for lading.

Ofte sammenliknes et litium-ion batteri med et svingbatteri grunnet litium-ionenes evne til å bevege seg fram og tilbake mellom katode og anode i elektrolytten. Desto mer litium-ioner elektrodene kan ta inn, jo mer total energi kan lagres i batteriet og levetiden øker. (Wang, Ping, Zhao, Chu, Sun, & Chen, 2012)



Figur 7 - Litium-ion batteri

3.5 Termisk "runaway"

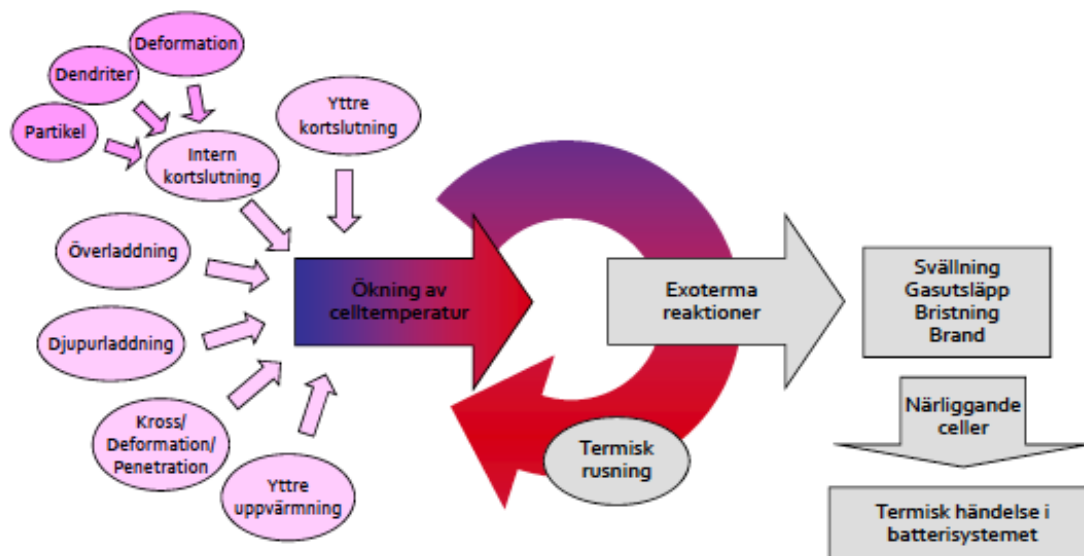
Termisk "runaway" beskriver en økning i temperaturen som kan føre til endringer i forholdene i cellene, noe som igjen fører til en ytterligere økning i celletemperaturen. Dette kan være ødeleggende.

Enkelte hevder at termisk "runaway" kan oppstå ved temperaturer over 80 °C og kan resultere i brann eller eksplosjon. Grunnen til termisk "runaway" i litium-ion batterier er en eksoterm reaksjon som oppstår mellom elektrolytt, anode og katode. Økning av temperatur og trykk i batteriet kan føre til at cellen revner eller sikkerhetsventilen åpnes.

(Wang, Ping, Zhao, Chu, Sun, & Chen, 2012)

Figur 8 viser hendelsesforløpet i et litium-ion batteri der termisk "runaway" er resultatet. En celletemperaturøkning kan skje som følge av ulike hendelsesforløp: ytre kortslutning, indre kortslutning, overlading, dypurlading, knusing, deformasjon, penetrering eller en ytre oppvarming. Når celletemperaturen har nådd separatorens smeltepunkt skjer det en eksoterm reaksjon mellom anoden, katoden og elektrolytten. Dette fører til svelling, brist, gassutslipp eller brann. I et bilbatteri vil varmen som avgis fra en battericelle fungere som en ytre oppvarming av nærliggende celler.

(Larsson, 2013)



Figur 8 - Termisk "runaway" hentet fra Larsson

3.6 Litium-ion batterier og brann

Sammen med økningen i forbruk av litium-ion batterier, følger en naturlig økning i antall branner der denne typen batteri er involvert eller en årsak. Mellom 1 av 1 million og 1 av 10 millioner branner og eksplosjoner involverer litium-ion batterier (Wang, Ping, Zhao, Chu, Sun, & Chen, 2012).



For at det skal kunne oppstå brann i en batteripakke er det nødvendig med en temperaturøkning i battericellene. Se delkapittel termisk ”runaway” for beskrivelse av årsaker som kan føre til denne temperaturøkningen.

Battericellene vil avgi svært giftig røyk som er skadelig for mennesker ved brann. Røyken er farlig da den blant annet kan inneholde hydrogencyanid, hydrogenklorid, hydrogenfluorid, karbonmonoksid og karbondioksid. Giftigheten til røykgassene avgjøres av cellens kjemiske sammensetning (Mikolajczak, Kahn, White, & Long, 2011).

Det kreves store mengder med vann for å slokke brann i et litium-ion batteri. Små mengder vann bør unngås da dette kan føre til re-antennelse. Det er ønskelig å bruke mest mulig vann for å kjøle ned området rundt brannen. Ved brann i en bilbatteripakke der det er tilgang til nok vann, bør vann benyttes for å kjøle ned nærliggende celler/moduler for å hindre videre spredning (Grav, 2012).



4 Tidligere forsøk

Det er innhentet informasjon om tidligere brannforsøk utført på litium-ion batterier, elektriske biler og vanlig bensinbil.

4.1 Forsøk med litium-ion batterier

Noen av rapportene fra disse forsøkene har vært til svært god hjelp i planleggingen av eget brannforsøk med tanke på sikkerhet, utførelse og vurdering av eventuell slokking. Det gis her en beskrivelse av forsøk som er relatert til temaet i denne rapporten.

4.1.1 Forsøk utført av FFI

Forsvarets Forskningsinstitutt (FFI) har gjort en rekke forsøk og utarbeidet rapporter om litium og litium-ion batterier. Rapportene som er lest og benyttet i forarbeidet til forsøket er:

- ”Sikker anvendelse av Litiumbatterier” Øistein Hasvold, 2010
- ”Safety aspects of large lithium batteries” Øistein Hasvold, Sissel Forseth, Tom Cato Johannesen, Torleif Lian, 2007
- ”Oppvarming av Litium- og Litiumionceller” Øistein Hasvold, Sissel Forseth, Tom Cato Johannesen, 2006

I rapporten ”*Oppvarming av Litium- og Litiumionceller*” beskrives utførte forsøk med oppvarming av celler og batteriklosser. Hensikten var å bestemme ved hvilken tid sikkerhetsventiler åpner/ikke åpner, om cellen har en ”shut down” separator og hvor brennbare/eksplosive de er.

Noen av litium-ion cellene som ble testet var:

- D Li-ion, ICR34600, AGM
- D Li/MnO₂
- Li-ion polymer kloss, laget på FFI

D Li-ion, ICR34600, AGM ventilerte ved 150 ° C og begynte å brenne ved ca. 175 °C.

D Li/MnO₂ cellen ventilerte ved temperatur over 150 °C og ved 201 °C brant den voldsomt.

Li-ion polymer klossen som ble testet ventilerte selv om den ikke var utstyrt med sikkerhetsventil.

I rapporten konkluderes det med at celler med sikkerhetsventiler er å foretrekke. (Forseth, Hasvold, & Johannesen, 2006)



4.1.2 Forsøk utført av DEKRA

DEKRA⁷ har gjennomført forskning på litium-ion batterier som brukes i biler. Dokumenter er mottatt fra Markus Egelhaaf⁸.

Et av forsøkene gikk ut på å utføre forsøk med tre forskjellige slökkemidler på litium-ion batterier i brann. Batteriene veide 175 kg, hadde en kapasitet på 17 kWh og bestod av poseceller. Testbatteriene var laget av Deutsche ACCUotive.

De forskjellige slökkemidlene som ble brukt var:

- *Vann*
- *F-500* et slökkemiddel av vann med et tilsetningsstoff (1%)
- *Firesorb* en flytende polymer. Danner et klebemiddel og varmhindrende gel som består av jevnt fortykket vann (1,8%)

Resultatet fra forsøkene vises i Tabell 3:

Tabell 3 - Testresultater sløkking

	Test 1, Vann	Test 2, F-500	Test 3, Firesorb
Mengde vann	400 l	80 l	120 l
Tilsetning	-	F-500	Firesorb
Mengde	-	1 %	1,8 %
<i>Slokketid</i>			
Ingen flammer	40 s	7 s	6 s
Re-antennelse	Ja	Nei	Nei
Avsluttet sløkking	1050 s	689 s	456 s
Tid med rennende vann	447 s	100 s	91 s
<i>Temperaturer</i>			
Maks. temperatur oppå batteriet	460 °C	577 °C	409 °C
Maks. temperatur under batteriet	823 °C	711 °C	751 °C
Maks. temperatur på siden av batteriet	780 °C	1294 °C	934 °C

Testene viser at Firesorb gir den mest effektive sløkkingen og at sløkkingen med vann kan føre til re-antennelse i batteriet, se Vedlegg 2 - Bilder fra DEKRAs forsøk.

⁷ DEKRA Automobil GmbH—Technology Center

⁸ Markus Egelhaaf, DEKRA

E-post 14.01.2013/15.01.2013



4.1.3 Forsøk utført i Japan

Under et seminar i Chicago 2012 ble det presentert et forsøk utført i Japan. Formålet med forsøket var å undersøke om batteridrevne kjøretøy utgjør en uakseptabel brannrisiko samt elbilens reaksjon i brann sammenliknet med en vanlig bil. I forsøkene ble det målt varmeavgivelsesrate, varmefluks og flammespredning.

Det er gjort fullskala brannforsøk med de to bilene, en elektrisk og en bensindrevet, for deretter å sammenlikne resultatene:

1. Nissan Leaf, elektrisk (100 % oppladet)
2. Honda Fit, bensindreven (10 liter bensin)

Bilenes like utseende og vekt gjorde sammenlikningen troverdig.

Det ble benyttet 80 g ”alcohol gel fuel” for å antenne den bakre delen av begge bilene.

Resultatet fra testen viste at den målte varmeavgivelsesraten og varmefluksen var høyest for Nissan Leaf. Den maksimale varmeavgivelsesraten var i forsøket mellom 1,8 og 6,3 MW. Dette er allikevel ikke høyere enn for en bensindrevet Luxury Sedan funnet ved et tidligere forsøk. Det ble ikke registrert noen form for eksplosiv brann i batteripakken under forsøket. (Watanabe, et al., 2012)

4.2 Forsøk med vanlig bensinbil

Det er av interesse å sammenlikne brannforløp og temperaturer fra brannforsøket og i vanlig bil.

4.2.1 Forsøk utført ved Høgskolen Stord/Haugesund

Forsøk utført i forbindelse med bacheloroppgaven ”Brann i bil” fra 2011 ved Høgskolen Stord/Haugesund viser brannforløp i tre forskjellige biler og scenarioer. Forsøk nummer 3 på en Opel Astra Sedan er mest relevant for denne oppgaven fordi bilen ble antent med en fakkelboks under passasjer sete foran og at det ikke ble benyttet brennbare væsker i kupéen.

Resultater fra dette forsøket viser følgende temperaturer:

- Midt i kupéen: Høyeste temperaturer 1000-1100 °C
- Venstre side av bilen: Høyest temperatur 500 °C
- Høyre side av bilen: Høyeste temperatur 430 °C
- Under bilen: Høyeste temperaturer 500 °C

Den teoretisk maksimale effekten beregnet for ”Brann i bil” var 3,8 MW. (Nordvik & Valen, 2011)



5 Rutiner for slokke- og redningsmannskaper i Norge

Det er fortsatt stor mangel på kunnskap om elektriske biler og ikke alle er oppdatert på hvordan slike kjøretøy skal håndteres med tanke på redning og slokking. I Norge er det tydelig at mer informasjon rundt dette er ettertraktet hos brannvesenet.

5.1 Rutiner i Norge

Det har i media de siste årene vært et stort fokus på ulykker og branner i elektriske biler på norske veier. Brannvesen rundt om i landet gir uttrykk for mangelfull informasjon om elektriske biler og hvordan de skal håndtere en ulykke der én eller flere slike biler er involvert.

Flere brannvesen er kontaktet for å innhente informasjon om deres rutiner ved slokke- og redningsarbeid ved brann i en elektrisk bil.

Oslo brannvesen skriver i e-post⁹ “For å slokke brann i elbiler benytter vi de samme prosedyrer/retningslinjer/strategier som vi benytter ved slokkeinnsats i bensin- og dieselkjøretøyer. Det vil si; vernebekledning inklusive full åndedrettsbeskyttelse og slökkemiddelet som benyttes er i all hovedsak vann, men også skum, alternativt pulver”.

Haugesund brannvesen hadde liknende uttalelse i e-post¹⁰ “Når det gjelder brann i elektriske biler så er prosedyrer de samme som alle andre biler”.

Drammensregionens Brannvesen IKS skriver i e-post¹¹ ”Brannvesenet har ingen fast prosedyre på brann- frigjøring i elbil. Brann i litium batterier er vanskelig å slokke. Batteriene må håndteres forsiktig. Ved brann i batteriene finnes det ikke effektive slökkemidler. Det beste er spredt vannstråle med innblanding av skum til å kjøle ned. Fare for små eksplosjoner under slokking. Normalt er det sikkert å klippe i kanal og a-stolpe/ b-stolpe /c-stolpe. (Ved fjerning av deksler kan vi være sikre). Hovedbryteres plassering kan være merket eller så må det letes i nærheten av batteripakker. Brannvesenet har hatt opplæring på hybridbiler fra Toyota. Høyspentkabler er normalt skjult under bilen. Brannvesenet har tilgang på spesielle vernehansker som tåler høy spenning (volt)”.

I ett intervju med NRK sa beredskapsleder i Fredrikstad brann og redningskorps følgende: “Hvis vi kommer ut for en brann, er det så godt som null informasjon om hvordan vi skal forholde oss og dette er informasjon vi gjerne skulle hatt mer av” (Torjusen, 2013).

De forskjellige uttalelsene viser at norske brannvesen ikke har egne strategier for innsats ved brann i elektriske biler. Generelt benyttes samme prosedyrer som ved slokkeinnsats i bensin- og dieselkjøretøy.

⁹ Oslo brannvesen, e-post 14.01.2013

¹⁰ Haugesund brannvesen, e-post 15.02.2013

¹¹ Drammensregionens Brannvesen IKS, e-post 18.03.2013



5.2 Rutiner i andre land

I andre land finnes det også få prosedyrer som beskriver rutine rundt slukke- og redningsarbeid på elbiler. NHSTA¹² i USA har utviklet ulike guider for hvordan publikum og slukke- og redningsmannskaper bør gå fram ved innsats i ulykker som involverer elektriske biler, se Vedlegg 3 - Prosedyre utviklet i USA. Dette ble vurdert nødvendig etter resultatet fra krasjtest gjort på en Chevrolet Volt, se kapittel 2.6.1.

Hovedpunktene i prosedyren fra USA:

Proseduren tar først for seg tre steg for å deaktivere kjøretøyets høyrstrømsystem:

1. Identifisere kjøretøy
2. Immobilisere kjøretøy
3. Deaktivere kjøretøy

Det forklares hvordan både brannmannskaper og helsepersonell bør gå fram ved brann i eller ved batteripakken og ved en krasj/ulykke som har skadet batteripakken. Det er også beskrevet hva som bør gjøres etter brannen/ulykken.

(National Highway Traffic Safety Administration, 2012)

5.3 Opplæring av slukke- og redningsmannskaper i Norge

Etter å ha vært i kontakt med Jostein Ween Grav¹³ kom det fram at slukke- og redningsarbeid ved brann i elektrisk bil er en del av grunnopplæringen på Norges brannskole. Skolen er underlagt Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap (DSB). Opplæringen blir kun gitt til nyutdannede. Brannmenn i jobb som er utstasjonert rundt om i landet har kanskje ikke fått like god informasjon om hvilke prosedyrer som bør følges, da lokale brannvesen selv må vurdere utfordringer i eget område. Se også Vedlegg 4 - Kursopplegg Norges brannskole.

Elbildelen fra kursopplegget på Norges brannskole inneholder:

- Generell informasjon om elektriske biler
- Typer elektriske biler på markedet
- Hvordan identifisere ulike typer elektriske kjøretøy
- Nye og gamle elektriske biler
- Litium-ion batteri og hvordan disse bør håndteres ved en hendelse/brann
- Hva som bør observeres og håndtering av ulike farer
- Hvordan forholde seg til en elektrisk bil etter redning og slokking

¹² National Highway Safety Traffic Administration

¹³ Jostein Grav, sjefsingeniør DSB, elektriske anlegg
E-post 14.02.2013



6 Forslag til prosedyre

Økningen av antall elbiler gjør det nødvendig med informasjon til forbrukere og slukke- og redningsmannskaper om hvordan man skal opptre i en brannsituasjon. Informasjon kan gis i form av publikasjoner (rapporter, artikler osv.), anbefalinger eller dataverktøy. Eksempel på et dataverktøy kan være et program som inneholder detaljert informasjon om de ulike elektriske bilene og hvordan redningsmannskaper bør opptre.

6.1 Prosedyre for slukke- og redningsarbeid på elektrisk bil

Foruten informasjonen som gis ved Norges brannskole er det tydelig at brannvesenet ønsker en spesifikk prosedyre for håndtering av brann i elektriske biler. Det er i denne rapporten valgt å utarbeide et forslag på en slik prosedyre, se Vedlegg 5 - Prosedyre for slukke- og redningsarbeid på elektriske bil.

6.2 Prosedyre for å gjøre ulike elbiler strømløse i ulykkessituasjon

Det er i tillegg utarbeidet et utkast på en oversikt over viktige opplysninger om forskjellige elbiler. Oversikten tar for seg hvordan identifisere, stabilisere og gjøre elbiler strømløse. I tillegg vises kutte- og klippesoner, og områder der dette er mindre aktuelt. Fire av de nyeste elbilene er tatt med i oversikten:

- Nissan Leaf
- Tesla Model S
- Peugeot iOn
- Citroën C-ZERO

Se Vedlegg 6 - Prosedyre for å gjøre ulike elbiler strømløse i ulykkessituasjon.



7 Brannforsøk

En viktig del av oppgaven var å utføre et fullskala brannforsøk med en elektrisk bil.

7.1 Forberedelser

I forkant av brannforsøket ble det gjort forberedelser med den hensikt å øke studentenes generelle tekniske kunnskap om elektriske biler og litium-ion bilbatterier. I tillegg måtte sikkerhetsrutiner for forsøket utarbeides for at forsøket kunne gjennomføres på en trygg måte.

Innhenting av informasjon fra organisasjoner og personer som jobber eller forsker på området har vært nødvendig. Ulike brannvesen, DSB, DEKRA v/Marcus Egelhaaf og Forsvarets Forskningsinstitutt har blitt kontaktet for å innhente mest mulig informasjon om brann i elektrisk biler og batterier. Dette har vært viktig for å kunne ivareta sikkerheten og for å få en forståelse av hva som kunne forventes under forsøket, herunder verst tenkelige scenarier.

7.1.1 Utarbeidelse av dokumenter

Til forsøksdagen ble følgende dokumenter utarbeidet:

- Utstyrliste
- Sikker jobbanalyse (SJA)
- Oversikt over plassering av termoelementer

Utsyrslisten er en oversikt over nødvendige instrumenter, materialer og verktøy samt ansvar for anskaffelse av dette, se Vedlegg 7 - Utstyrliste.

SJA er et verktøy som kartlegger og identifiserer risikoer og konsekvenser ved utførelse av en bestemt oppgave eller aktivitet. Det er svært viktig at jobbanalysen er utarbeidet på forhånd slik at mulige risikoområder er kartlagt før forsøket starter og dermed ville gjøre forsøket sikrere. Det ble i dette prosjektet utarbeidet en skjematisk SJA som inneholder deltakerliste, sjekkliste og en analyse av deloppgaver med risikomomenter, mulige konsekvenser og tiltak, se Vedlegg 8 - Mal SJA og Vedlegg 9 - Utfylt SJA.

En oversikt over plassering av termoelementene ble utarbeidet, se Figur 24. Den er delvis basert på tidligere forsøk gjort i bensinbiler (Nordvik & Valen, 2011).

7.1.2 Sikkerhetssone

Sikkerhetssone for forsøket var vanskelig å beregne på grunn av mangel på god informasjon. En vurdering ble gjort ved å se på den aktuelle batteritypen og forventede faremomenter under brannforløp. De største farene under et brannforløp ble vurdert til å være:

- Utskyting av brennende metall og elektrolytt fra batteriet i en radius på 2-4 meter
- Flygende gjenstander fra blant annet utblåsing av bilruter, lufttrykkekspløsjoner i dekk og airbager
- Giftig røyk

Peugeot benytter i sin elektriske bil et batteri med en batterikjemi som vurderes å være relativt trygg. Dette tatt i betraktning og etter samtaler med Marcus Egelhaaf og Torleif Lian, som begge har lang erfaring i gjennomføring av tester/forsøk på biler og batterier, ble det bestemt å ha en sikkerhetssone på 20-25 meter.

7.1.3 Forsøksutstyr

Det ble benyttet følgende utstyr ved gjennomføringen av brannforsøket:

1. Industribrenner

- Titan Sievert Pro (Tools), se Figur 9



Figur 9 - Industribrenneren

2. Gassmåler

- Merican meter Company DTM-200A, se Figur 10



Figur 10 - Propanflaske med slange og gassmåler

Industribrenneren var koblet til to propanbeholdere á 19,4 kg. Det ble festet en kjetting i håndtaket, slik at den kunne fjernes når batteriet var tilstrekkelig oppvarmet.

3. Termoelementer, til måling av temperatur
 - 13 stk. K type termoelementer
 - 2 stk. ”engangs”-termoelementer
4. Utstyr til registrering og lagring av temperaturmålingene:
 - Dell Latitude D630 (Bærbar PC)
 - Agilent 34970A Data Acquisition/Switch unit (Logger)
5. Utstyr benyttet til videodokumentasjon:
 - Kamera 1: JVC HD GY100
 - Kamera 2: Panasonic
 - Kamera 3: Canon Legria HF G10
 - Webkamera: Logitech
 - Lydkanon: Korg MR1000

7.1.4 Forsøksbilen

Brannforsøket ble utført med en kondemnert Peugeot iOn, anskaffet av If Skadeforsikring AS. Bilen var en 2012 modell og en av de mest moderne elektriske bilene på markedet. Foruten en skade i frontpartiet var bilen uskadd og i kjørbar stand, noe som gjorde forsøket troverdig, se Figur 11.



Figur 11 - Forsøksbil, Peugeot iOn 2012 modell

Modellen kom først på markedet i 2011, og er et resultat av et samarbeid mellom Peugeot, Citroën og Mitsubishi. Den finnes i utgavene Peugeot iOn, Citroën C-ZERO og Mitsubishi i-MiEV. Kun overfladiske detaljer skiller de tre bilene fra hverandre, se Figur 12 (PSA Peugeot Citroën).



Figur 12 - Peugeot iOn
I brannforsøket ble en elektrisk bil av typen Peugeot iOn benyttet.

Peugeot iOn spesifikasjoner:

- Antall sitteplasser: 4
- Toppfart: 130 km/t
- Rekkevidde: 120-130 km
- Ytelse (0-100 km/t): 15,9 sekunder
- Batteritype: Litium-ion
- Ladetid: 6 timer (0 % til 100 %)
- Vekt: 1120 kg
- Gir: Automat

(Steinsvåg, 2011)

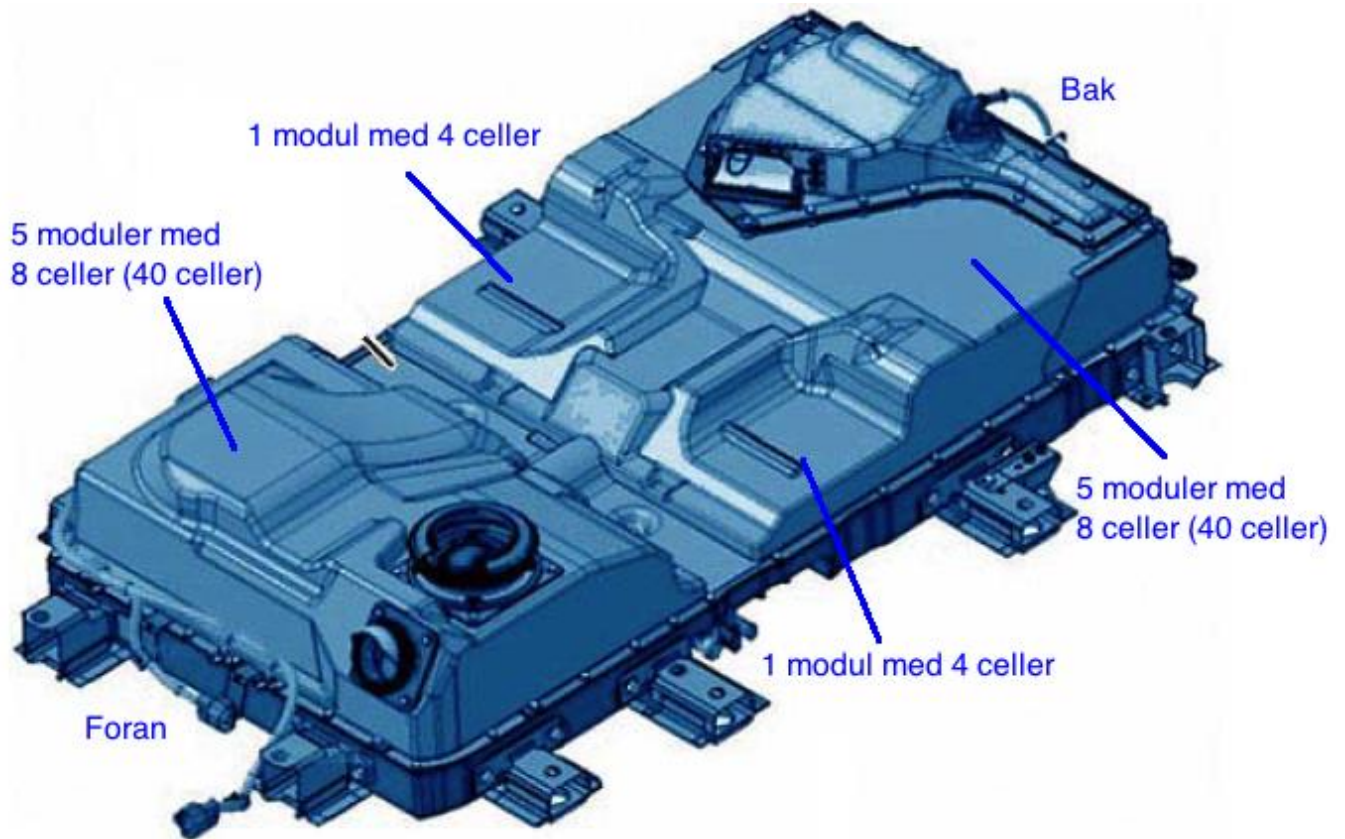
Batteripakken

Batteripakken i Peugeot iOn er av typen litium-ion. Den har følgende spesifikasjoner:

- Nominell spenning: 330 V
- Kapasitet: 16 kWh
- Vekt: 240 kg

Batteriet er produsert av LEJ¹⁴. Batteripakken er plassert nederst under bilen og består av 88 celler, se Figur 13 og Figur 14. Cellene er seriekoblet og fordelt på 12 moduler. Av disse 12 er det 10 moduler med 8 celler, og 2 moduler med 4 celler, se Figur 15. Cellene er prismatiske og har en nominell spenning på 3,75 V, se Figur 16.

¹⁴ Lithium Energy Japan



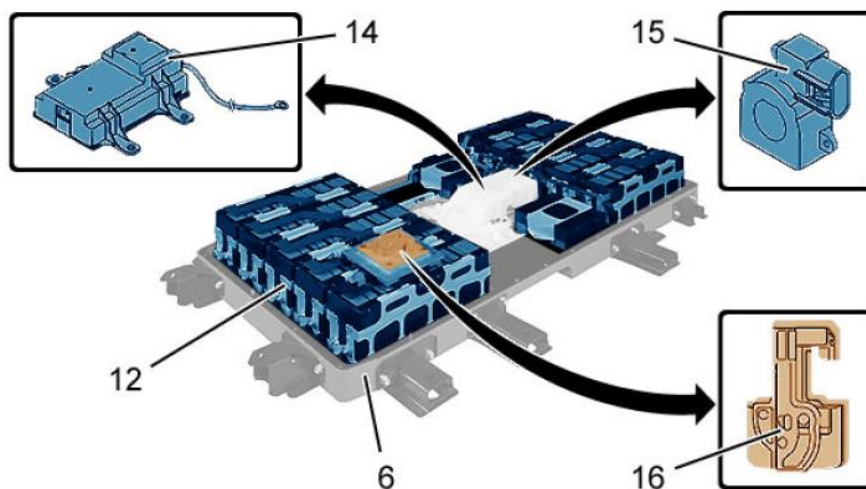
Figur 13 - Batteripakken med forklaring

Hver modul har en ECU¹⁵ som måler både spenning og temperatur i hver celle for å kunne kontrollere både opp- og utlading av modulene. I tillegg til modulene danner følgende komponenter deler av batteriet:

- Elektronisk lekkasjestrømdetektor: Likner en jordfeilbryter og kontrollerer at det ikke er lekkasje av strøm
- Elektronisk strømsensor: Måler hvor mye strøm som går gjennom batteriet
- Effektbryter/hovedstrømbryter: Isolerer bilen fra batteriet. Effektbryteren eller ”service plug” er plassert under bilens førersete

(Peugeot) (PSA Peugeot Citroën)

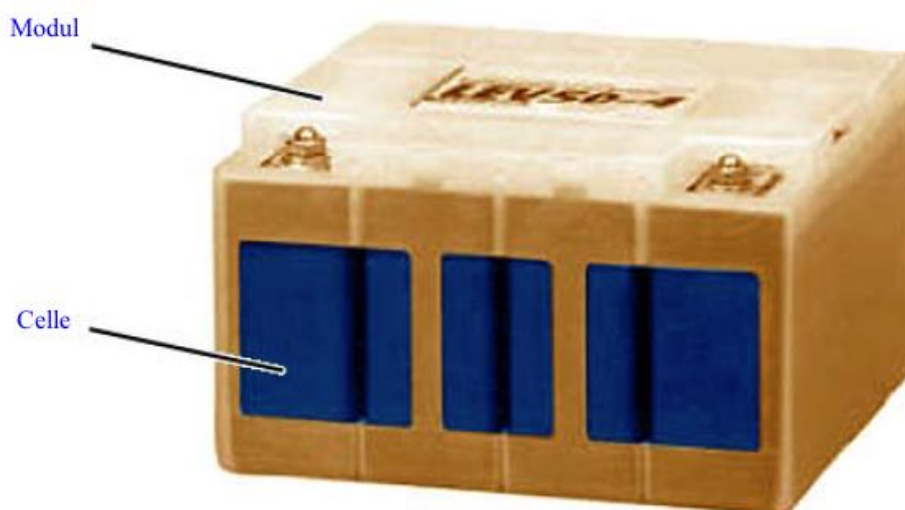
¹⁵ Engine Control Unit



Figur 14 - Innsiden av batteripakken

- (6) Batteripakke
- (12) Modul
- (14) Elektrisk lekkasjedetektor
- (15) Elektrisk strømsensor
- (16) Hovedstrømbryter

Figur 15 og Figur 16 viser oppbyggingen av modulene i batteriet og hvordan cellene ser ut.



Figur 15 - Halv modul med 4 celler



Figur 16 - Prismatiske celler

Batteriet i forsøksbilen er et såkalt ”litium-ion magnesiumoksid batteri”. Tabell 4 viser hvilke materialer som finnes i batteriets prismatiske celler (Lithium Energy Japan, 2008).

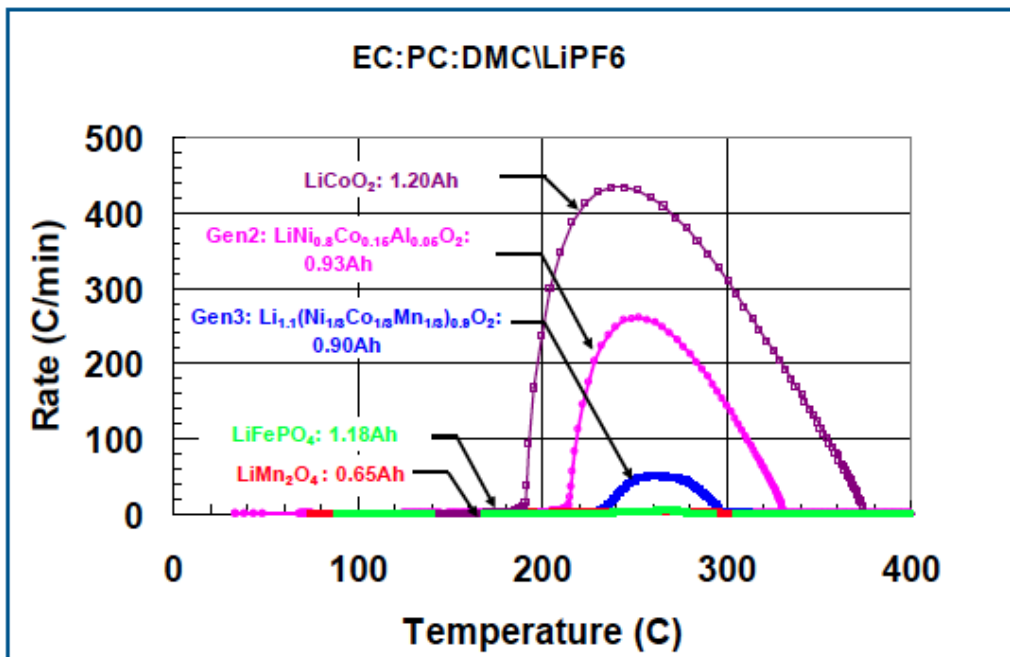
Tabell 4 - Batterikjemi

Komponent	Kjemi
Katode	<ul style="list-style-type: none"> • Litium-magnesiumoksid • Polyvinyldien-Fluoride (binder) • Grafitt
Anode	<ul style="list-style-type: none"> • Karbon • Polyvinyldien Fluor (binder)
Elektrolytt	<ul style="list-style-type: none"> • Organisk løsemiddel • Litiumsalt
Separator	<ul style="list-style-type: none"> • PVC, Polyvinylklorid

Tungmetaller som kvikksølv, bly og krom er ikke brukt i cellene. Metallisk litium finnes heller ikke i batteripakken.

Batterikjemien som benyttes i batteriet, litium-ion magnesiumoksid (LiMn_2O_4), sees på som en av de sikreste i dag på grunn av sin lave energi.

Figur 17 viser varmeutviklingen for ulike katodematerialer i litium-ion batterier ved reaksjon med elektrolytten. I utviklingen av sikrere cellekjemier blir det lagt vekt på å øke termisk ”runaway” temperatur og redusere ”peak heating rate” (kurvetopp).



Figur 17 - Ulike batterikjemier

Figuren viser varmeutviklingen for ulike katodematerialer ved reaksjon med elektrolytten, der LiCoO₂ er celletypen med mest ustabil batterikjemi. LiMn₂O₄ viser en mer stabil utvikling.

Ut ifra grafene i Figur 17 er det mulig å se at litium-ion koboltoksid er celletypen med laveste termiske "runaway" temperatur (utbruddstemperatur) og høyeste kurvetopp. I motsetning til litium-ion magnesiumoksid som har en høyere termisk "runaway" temperatur og lav kurvetopp.

(Doughty & Roth, 2012)

7.1.5 Scenario

Det ble valgt et scenario der brannen startet i batteripakken i den elektriske bilen. Dette blir sett på som verst tenkelig scenario og noe som kun kan skje med denne typen kjøretøy.

For å få batteriet til å brenne var det ønskelig å skape en kortslutning. Det ble antatt at ved å benytte en ekstern varmekilde og varme batteriet opp til 150-200 °C, ville separatoren i cellene smelte og føre til kortslutning og termisk "runaway".

Det ble vurdert forskjellige antennesemetoder. Valget falt på en industribrenner med propangass, da denne gir høy effekt og samtidig er enkel å fjerne når batteriet har antent, se Figur 18.

Det ble valgt å la bilen brenne ut. Det ble også besluttet at det ikke skulle gjøres testing av slokkemiddel, da dette ikke var forenlig med forsøkets formål. Dersom slokking skulle bli påkrevet av sikkerhetshensyn skulle vann benyttes.



Figur 18 - Plassering av industribrenner

7.2 Opprigging

Det ble satt av to dager til forøket på ResQ Haugesund. Den første dagen ble det gjort nødvendig opprigging av bilen og plassering av termoelementene. Selve forsøksdagen ble brukt til å gjøre siste forberedelser og testing før brannforsøket.

Dag 1, 6. februar 2013: Opprigging

- Legge ut gipsplater
- Kjøre bilen på platene
- Heve bilen opp på blokker
- Demontere bilen innvendig (for adkomst til plassering av termoelementer)
- Skru av plater under bilen
- Montere termoelementer
- Sette bilen til lading

Dag 2, 7. februar 2013: Testing før brannforsøk

- Koble termoelementer til loggeren
- Teste at alle termoelementer fungerer
- Industribrenneren plasseres

Under oppriggingen bistod Torleif Lian fra FFI¹⁶ med sin gode kompetanse innen utførelse av brannforsøk med litium-ion batterier.

¹⁶ Forsvarets Forskningsinstitutt

7.2.1 Demontering

Underlaget av betong ble dekket til med gipsplater for å hindre oppsprekking under brannforløpet. Bilen ble heist opp på blokker ved hjelp av en jekk, for å få plass til brenneren og hindre bilen i å trille. Inventaret ble skrudd ut for å lokalisere åpninger ned til batteripakken der termoelementer kunne føres inn. To beskyttende plater av plast ble skrudd løs under bilen for å forbedre tilkomst til batteripakken fra undersiden, se Figur 19 og Figur 20.



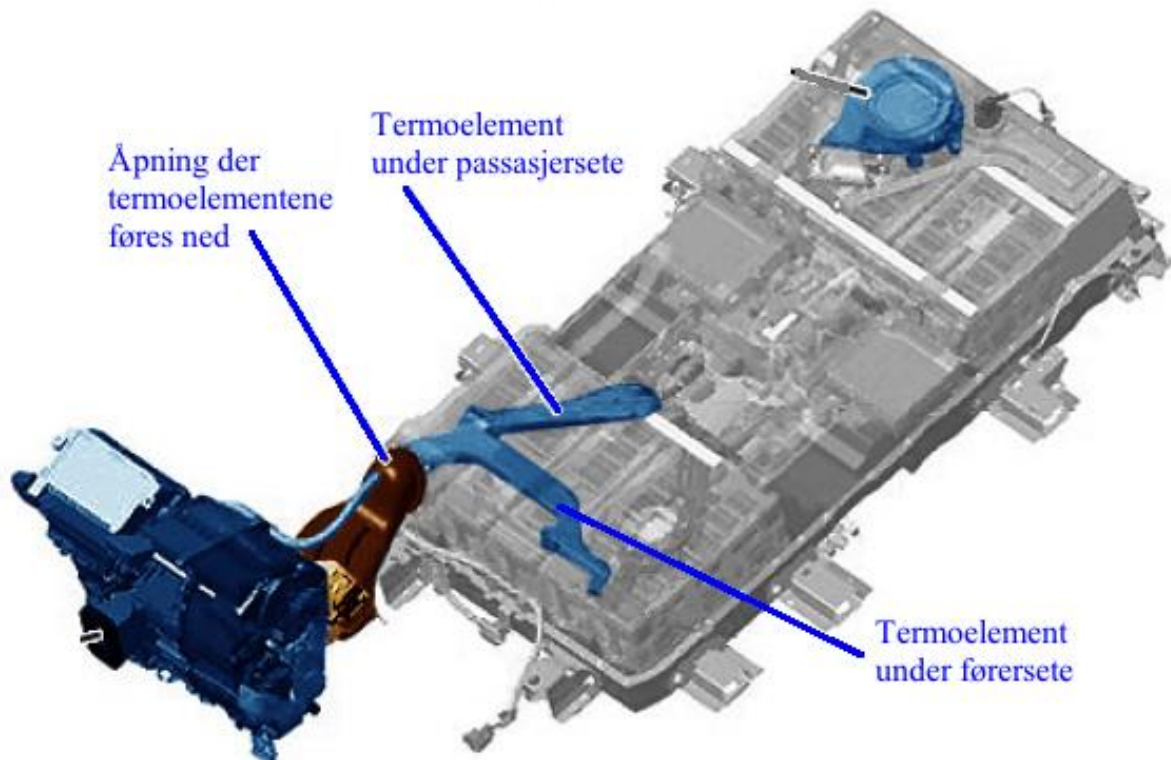
Figur 19 - Plate under bil



Figur 20 - Batteripakken nedenfra

7.2.2 Plassering av termoelementene

Det var ønskelig å måle temperaturen i batteripakken under forsøket. For å lokalisere eventuelle åpninger ned til batteripakken, ble bilens seter skrudd ut og gulvteppe fjernet. Det ble funnet én åpning under passasjerstet. Åpningen er en del av ventilasjonsanlegget som har som funksjon å kjøle ned batteripakken. Luftkanalen gjorde det mulig å føre ned to ”engangs”- termoelementer for å måle temperaturen på toppen av batteripakken under førersete og passasjersele, se Figur 21 og Figur 22. Da termoelementene var plassert på batteripakken, ble inventaret skrudd på plass.

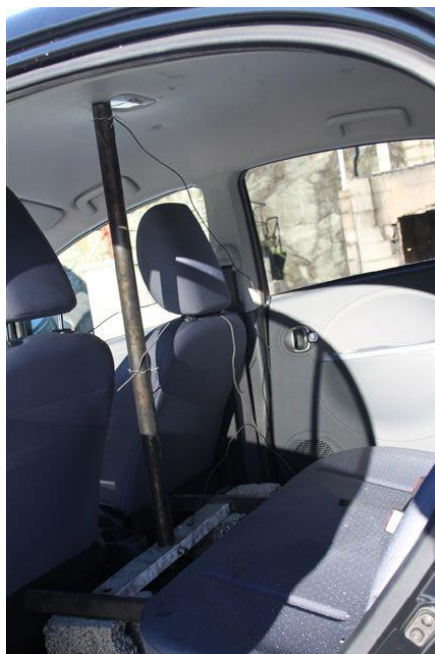


Figur 21 - Åpning til batteripakken



Figur 22 - Innføringspunkt for termoelementer til batteri

Plassering av resterende termoelementer ble bestemt ut ifra områder der det var nødvendig med målinger for å kunne overvåke brannutviklingen og brannforløpet, se Figur 24. Termoelementene ble festet med ståltråd for å forhindre forflytning, og ble kun festet i deler som ikke ville smelte vekk. For å måle temperaturer midt i kupéen ble det satt inn en jernstang som termoelementene ble montert på, se Figur 23.

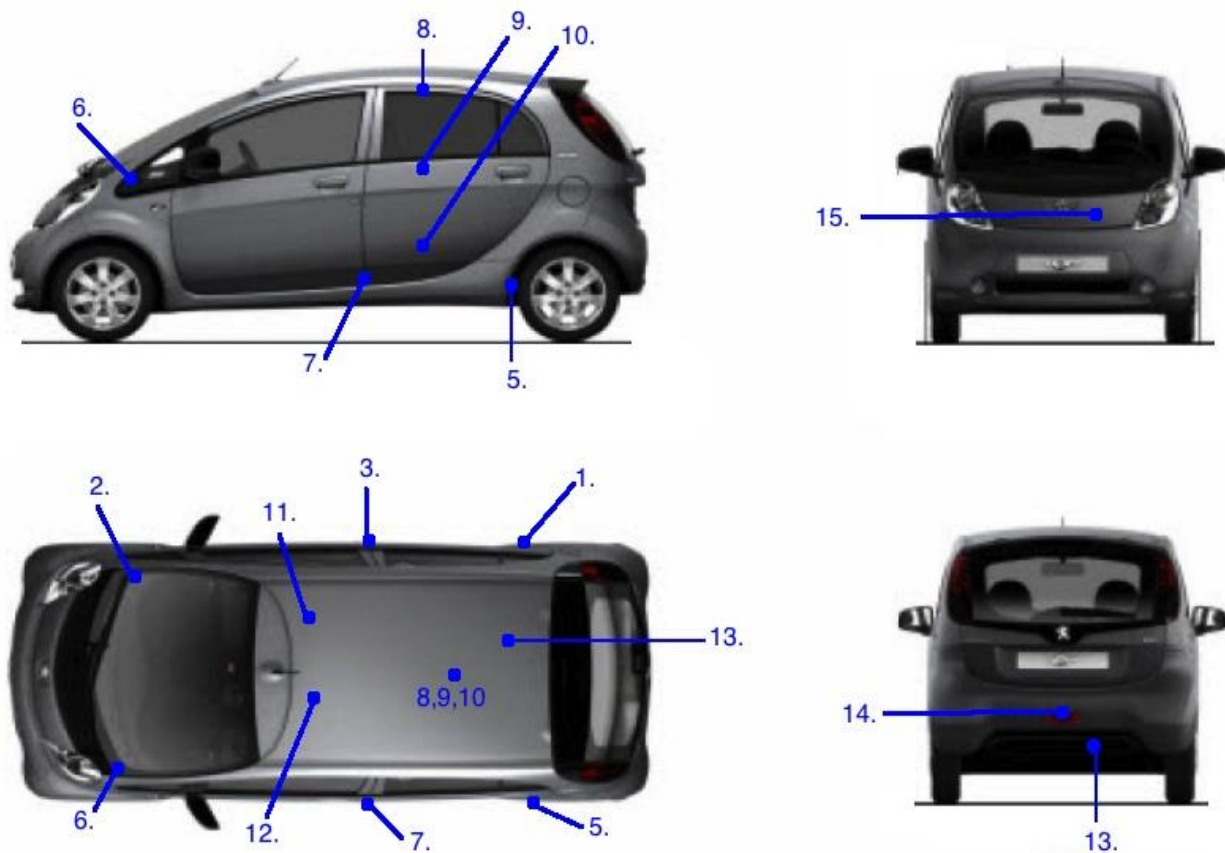


Figur 23 - Oppsett av temperaturmåleutstyr i kupé

Tabell 5 viser en detaljert oversikt over termoelementenes plassering.

Tabell 5 - Plassering av termoelementer

Termoelement	Plassering
1	Høyre bakhjul
2	Frontrute høyre (inne)
3	Under høyre førersete
4	Under høyre førersete
5	Venstre bakhjul
6	Frontrute venstre (inne)
7	Under venstre førersete
8	Midt i kupé, øverst
9	Midt i kupé, midten
10	Midt i kupé, nederst
11	Batteri, under passasjerse
12	Batteri, mot førersete
13	Mellom batteripakke og skrog
14	Under bagasjerom
15	Under panser



Figur 24 - Plassering av termoelementer

7.2.3 Test av termoelementene

Termoelementene ble koblet sammen ved hjelp av skjøteledninger til loggeren, og testet på forsøksdagen. Noen koblinger og termoelementer måtte byttes ut før alle 15 fungerte som normalt. Termoelementer og ledninger ble så dekket til med plater av isolasjon for å beskytte mot varmen fra brannen. Skjøteledningene ble dekket til med betongblokker, se Figur 25.



Figur 25 – Forsøksplassen

7.3 Utførelse

Værforholdene på forsøksdagen var optimale med sol og blå himmel samt svak vind. Før start ble det gjort en nødvendig gjennomgang av SJA og sikkerhetsrutinene med deltakerne.

Arjen Kraaijeveld¹⁷ var sikkerhetsansvarlig, han var iført røykdykkerutstyr og ansvarlig for å utføre eventuell slukking.

7.3.1 Hendelsesforløp

Tilskuerne plasserte seg i trygg avstand for observasjon før logger og kameraer ble slått på. Brenneren ble skrudd på da loggeren hadde gått i ett minutt, se Figur 26. Stoppeklokker ble startet for å kunne notere ned tidspunkt for hendelser under brannen. Se Vedlegg 11 - Forsøkslogg for en detaljert loggføring av observasjonene.



Figur 26 - Igangsetting av brannen med ekstern varmekilde

¹⁷ Intern veileder og brannmann



Figur 27 - Brannforløp uten ekstern varmekilde

Etter 11 minutter ble brenneren skrudd av og fjernet, se Figur 27. På dette tidspunktet var det tydelig brann i selve batteriet, og termoelementene på batteripakken viste målinger over 200 °C.

Den totale energien som ble tilført fra industribrenneren er beregnet til å være 30,3 kW. Se utregning i Vedlegg 12 - Total energi fra industribrenner.

Etter hvert som cellene ga etter kunne man høre små ”smell”, se korte og lange flammefronter og lysglimt fra batteripakken under bilen. Dette er beskrevet nærmere i kapittel 7.3.2.

Flammer inne i bilen ble først observert etter 9 minutter og 28 sekunder. Store mengder med plastikk falt av bilen og fortsatte å brenne som et ”bål” på gipsplatene. Ved 25 minutter var røyksøylen stor og svart som følge av brann i inventar og dekk. Brannen spredte seg etter hvert til hele bilen, og overtenning var et faktum etter ca. 30 minutter, se Figur 28. Ved denne tiden viste de fleste termoelementene målinger over 800 °C og 1000 °C inne i kupéen.

I løpet av brannforløpet kom det luftexplosjoner fra airbager og dekk og rutene knuste eller smeltet.



Figur 28 - Overtenning

Etter 90 minutter brant det kun med en liten flamme i den bakre delen av batteriet, se Figur 29. Loggeren ble slått av ettersom forsøket ansett som ferdig. På dette tidspunktet var det fortsatt 200 °C i batteripakken.



Figur 29 - Brann i bakre del av batteriet etter 90 minutter

Det var nødvendig å la bilen stå i minst 24 timer før den kunne fraktes bort grunnet fare for lekkasje og re-antennelse i bilbatteriet, da vi ikke visste om batteripakken var helt utbrent.

7.3.2 Beskrivelse av hendelser

Som tidligere nevnt ble det observert lysglimt og utskytende flammer fra batteriet. Torleif Lian¹⁸ har forklart at dette er typiske hendelser som forekommer ved brann i et litium-ion batteri og at en slik brann kan deles inn i to faser:

- I den første fasen vil cellen sprekke eller overtrykksventilen åpne. Da vil varm elektrolytt slippe ut og flammekastereffekt kan oppstå grunnet overtrykk, se Figur 30. Med dette menes en brann der elektrolytten antenner idet den slipper ut av cellen. Uten en nærliggende tennkilde vil ikke elektrolytten antenne, men blande seg med luft. Dette gir en blanding som kan antennes i røyksøylen og store flammesøyler på 4-5 meter kan oppstå. Dette var ikke tilfelle i forsøket, da den ventilerende elektrolytten øyeblikkelig antente.



Figur 30 - Ventilierende celle

- Elektrolyttbrannen kan varme opp katodematerialet og føre til en ekstra reaksjon. Dette er den andre fasen. Denne type brann skiller seg fra en elektrolyttbrann da katoden inneholder oksygen. Ved oppvarming av katoden vil oksygen skilles ut og opprettholde en brann i cella over lengre tid. Dette kan føre til antennelse av metaller i plusspolen og vil observeres som korte eller langvarige lysglimt med forskjellige farger, se Figur 31 og Figur 32. I teorien skal en katode som inneholder magnesium kunne gi en gulgrønn flamme når den brenner.



Figur 31 - Katodebrann

¹⁸ Torleif Lian, sjefsingeniør, Forsvarets Forskningsinstitutt
E-post 25.02.13



Figur 32 - Lysglimt under katodebrann

7.4 Undersøkelse av bilvraket

Én uke etter brannforsøket ble bilvraket og batteripakken nærmere studert. Det var ønskelig å undersøke om brannen hadde brent gjennom bilchassiset fra undersiden. I tillegg var det interessant å finne ut hvordan cellene var plassert og hvor mye som var igjen av selve batteripakken, modulene og cellene.

7.4.1 Bilchassiset



Figur 33 - Bilchassiset etter brannen

Det var tydelig at det ikke hadde brent gjennom bilchassiset fra undersiden av bilen, ettersom det ikke var tegn til hull/åpninger, se Figur 33.

7.4.3 Batteripakken

Alle de 88 cellene hadde tydelig brent helt ut, se Figur 34, Figur 35 og Figur 36. Det var ingen forekomst av ”utkast fra cellene” under forsøket, noe som indikerte at celleinnholdet fortsatt befant seg inne i cellene. Dette er et tegn på god design og høy sikkerhet i batteripakken.



Figur 34 - Utbrent batteripakke
1. Foran i bilen, 2. Bak i bilen



Figur 35 - Bilbatteri fra front
1. Foran i bilen, 2. Bak i bilen



Figur 36 - Bilbatteri bakfra
1. Foran i bilen, 2. Bak i bilen



Figur 37 - Celle
Cellenes ventiler pekete mot høyre side av bilen

Det ble under forsøket observert at brannen var mye kraftigere på bilens høyre side. Dette kan skyldes at det var liggende battericeller med overtrykksventiler pekende mot høyre. Celler har som regel et svakt punkt/eller en overtrykksventil der den slipper ut svært brannfarlig elektrolytt ved høy temperatur, se Figur 37. Celleraden til høyre i batteripakken har uhindrede ventilasjonsåpninger. Dette gjør at flammene fra den antente elektrolytten har fri passasje ut til høyre, og kan forklare at brannen var kraftigere på denne siden av bilen. Resterende celler, der ventilasjonsåpningen peker mot nærliggende celler, ventilerer ned under bilen, se Figur 38.



Figur 38 - Cellenes ventilasjonsretning

7.4.4 Rester av innhold i celle

Én celle ble plukket ut av batteriet og studert nærmere for å vurdere hvordan brannen hadde påvirket cellene, se Figur 39, Figur 40 og Figur 41.



Figur 39 - Utplukket celle

Det ytre skallet av cellen var intakt men tydelig preget av brannen. Dette viser at materialet som brukes rundt cellene er varmebestandig, men at det ved brann vil forekomme skader, se Figur 39 og Figur 40.



Figur 40 - Motsatt side av utplukket celle



Figur 41 - Plassering av utplukket celle i bilbatteriet

Den utplukkede cellen ble klippet i to for å undersøke gjenværende innhold, se Figur 42. Celleinnholdet ble gravd ut og var formet som tynne lange flak. Etter rådføring med Torleif Lian¹⁹ kan det med sikkerhet sies at det utgravde materialet er rester av kobberledere der lederne er limt fast til cellens pluss- og minuspol. se Figur 43 og Figur 44. En slik celle består av like mange aluminiumsledere, men disse har grunnet temperaturer over smeltepunktet (660 °C) brent opp. I et høystrøms-batteri av denne typen er det mye kobber for å sikre lav motstand (ohm) i batteriet.

¹⁹ Torleif Lian, sjefsingeniør, Forsvarets Forskningsinstitutt
E-post 18.02.2013



Figur 42 - Delt celle



Figur 43 - Celleinnhold



Figur 44 - Delt celle med utplukket innhold

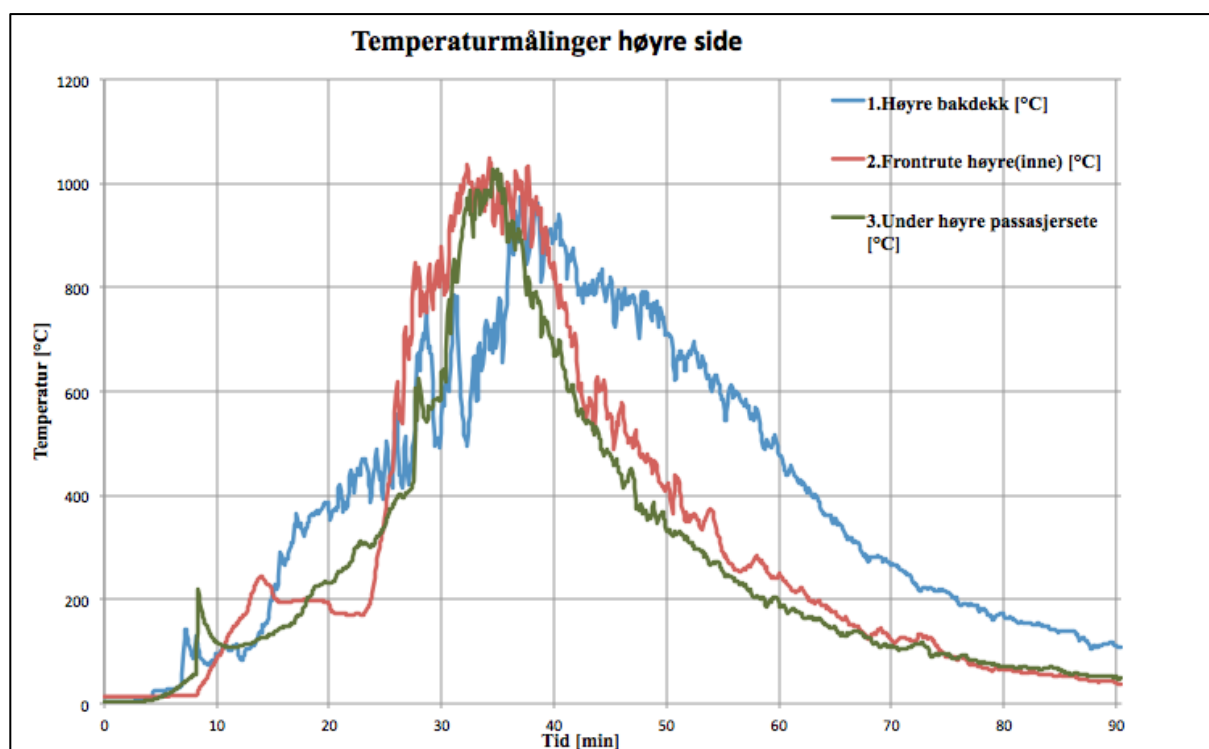
8 Resultater fra brannforsøket

Under brannforsøket ble det målt temperaturer ved bruk av termoelementer. Utregninger av teoretisk maksimal effekt og maksimalt energiinnhold er gjort for å få et inntrykk av brannen, og brannutviklingshastigheten er bestemt.

8.1 Resultater fra temperaturmålingene

Det ble benyttet 15 termoelementer for gjennomføring av temperaturmålinger i bilen. Resultatene fra målingene er presentert i kommende delkapitler samt i videoen som viser bilbrannen med temperaturer.

8.1.1 Temperaturmålinger høyre side



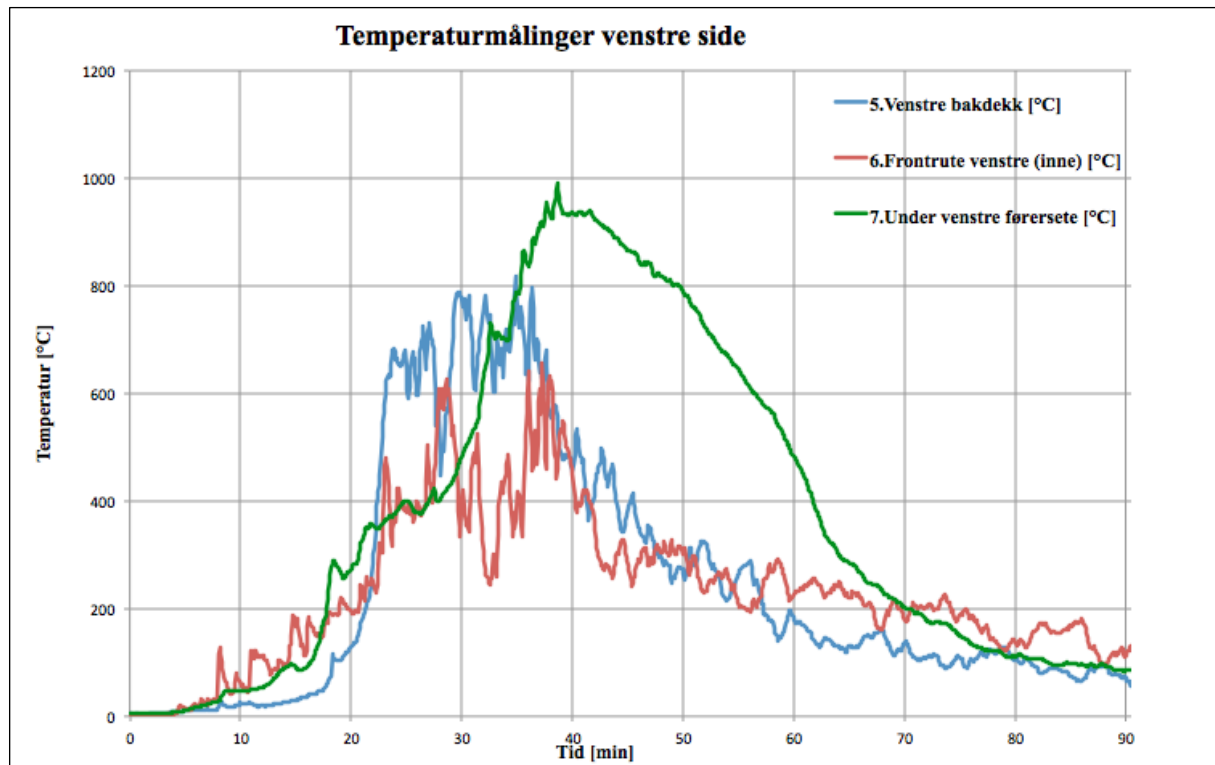
Figur 45 - Temperaturmålinger høyre side

Figur 45 viser temperaturmålingene gjort på høyre side ved bakhjul, i frontrute og under førersetet.

De høyeste temperaturene inne i bilen ble målt i elementene 2 og 3 og var henholdsvis 1049 °C og 1026 °C. Overtenning inntraff etter ca. 30 minutter da temperaturene overstiger 500-600 °C.

Under utbrenningsfasen var det høyest temperatur ved bakhjulet.

8.1.2 Temperaturmålinger venstre side

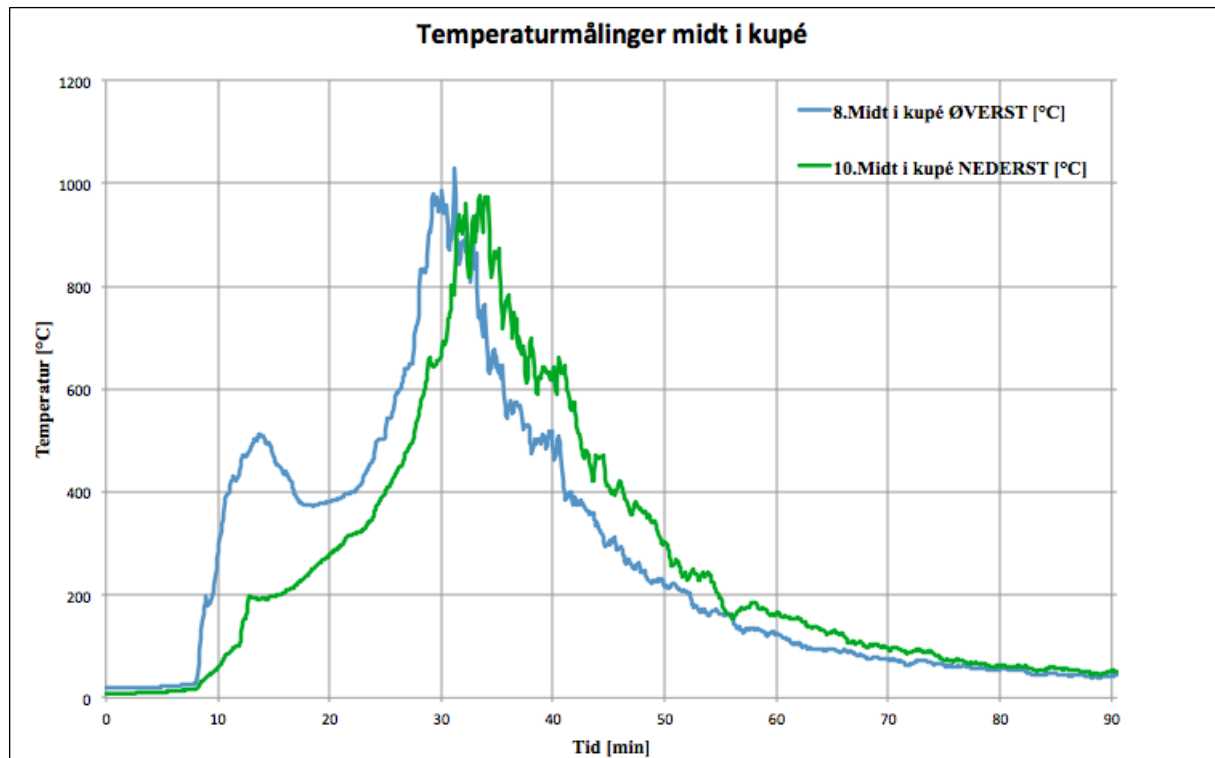


Figur 46 - Temperaturmålinger venstre side

I Figur 46 vises temperaturmålingene gjort på venstre side ved bakhjul, i frontrute og under førersete.

Den høyeste målingen på 939 °C ble gjort i termoelement 7, under førersete, som av de tre målerne oppnådde den største temperaturøkningen. Målerne 5 og 6 viser temperaturer under 800 °C og indikerer lavere temperaturer på den venstre siden av bilen enn høyre. Det er av disse grafene også mulig å se at overtenning skjedde etter ca. 30 minutter.

8.1.4 Temperaturmålinger midt i bilen

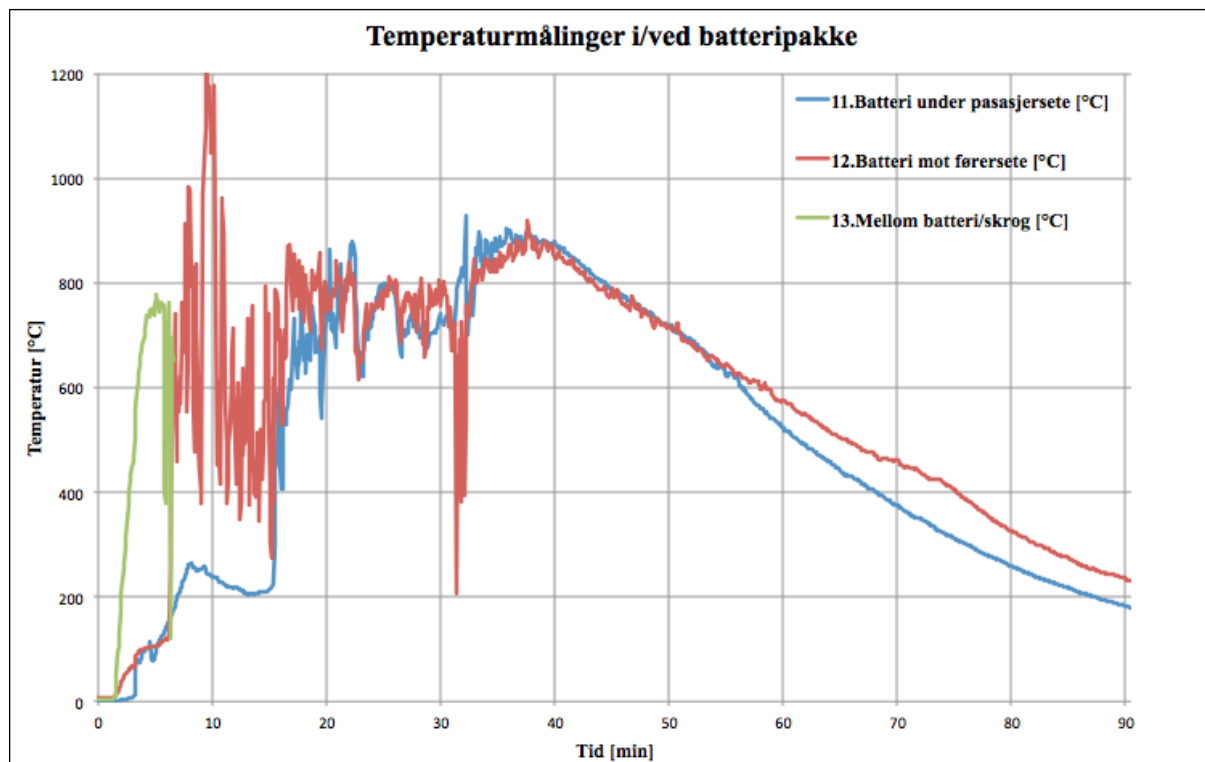


Figur 47 - Temperaturmålinger midt i kupé

Figur 47 viser målinger gjort midt i bilens kupé. I Vedlegg 10 - Plassering av termoelementer, er det vist hvordan målerne i dette punktet var satt opp og festet. Det ble montert termoelementer i tre forskjellige høyder for å dekke alle områder inne i bilen.

Grunnet feil på termoelementet plassert i midten er ikke disse målingene tatt med i resultatene. Den høyeste temperaturmålingen på 1029 °C ble gjort i element 8 plassert øverst. Figuren viser en svært jevn økning i temperaturene, og etter 20 minutter er de ganske like.

8.1.6 Temperaturmålinger i /ved batteripakken

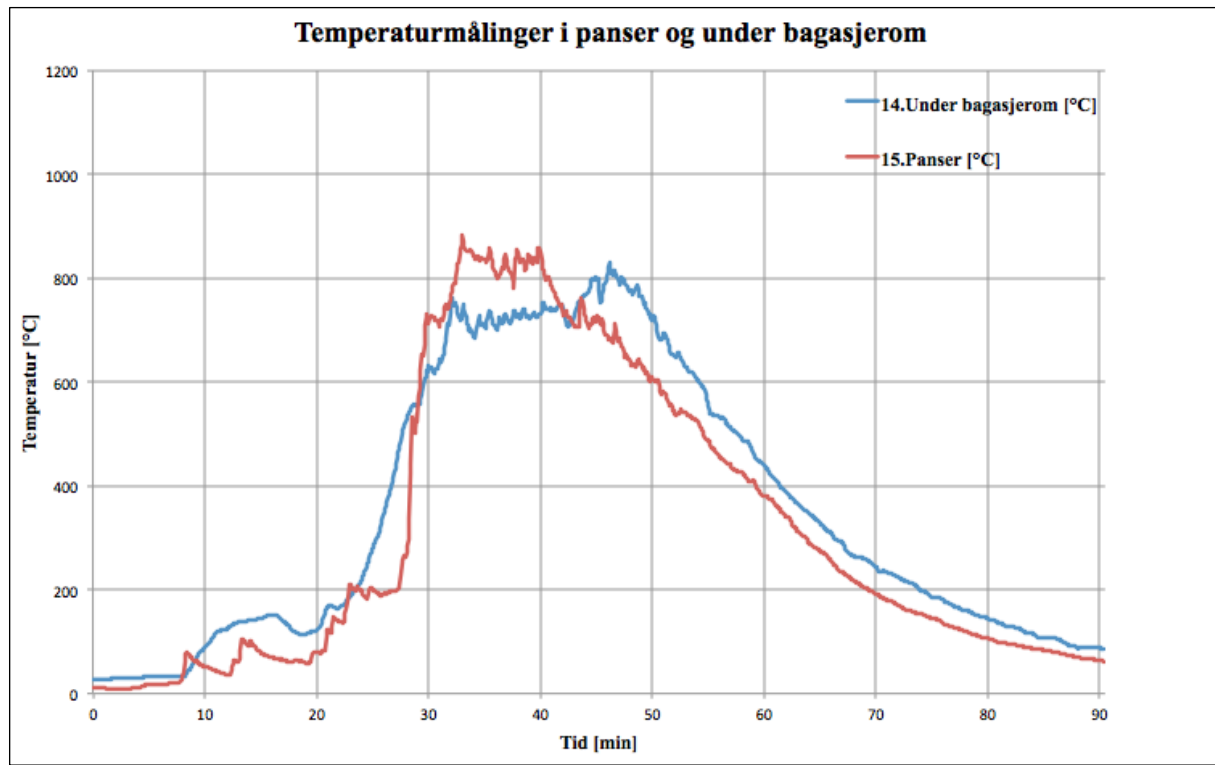


Figur 48 - Temperaturmålinger i/ved batteripakke

I Figur 48 vises målingene gjort mellom batteri og skrog samt på toppen av batteripakken under førersete og mot passasjersete. Termoelement 11 og 12 var plassert ned mot batteripakken og oppnådde allerede etter 8 minutter en temperatur på ca. 200 °C. Dette skyldes industribrenneren som var plassert under bilen for å få temperaturen i batteripakken opp mot 150-200 °C. Etter 11 minutter ble industribrenneren fjernet.

Termoelement 13 ble tidlig i brannforløpet ødelagt, og målingene etter dette er fjernet fra loggen.

8.1.8 Temperaturmålinger i panser og under bagasjerom



Figur 49 - Temperaturmålinger i panser og under bagasjerom

Figur 49 viser målinger gjort i panser og under bagasjerom. Høyeste temperatur på 857 °C ble oppnådd under panseret. Grafene har svært lik temperaturøkning og form i disse områdene. Overtening inntraff etter ca. 30 minutter da temperaturene oversteg 600 °C.



8.3 Branntekniske beregninger

Det har blitt gjort beregninger på brannens maksimale effekt og bilens maksimale energiinnhold, og i tillegg er brannutviklingshastigheten bestemt.

8.3.1 Maksimal effekt

Maksimal effekt av brannen er beregnet ved bruk av følgende formel fra Enclosure Fire Dynamics s. 130:

$$\dot{Q} = 0,09 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0} \cdot \Delta H_{eff}$$

Som forbrenningsvarmen ΔH_c er det valgt å bruke 62,02 MJ/kg som ble benyttet i bacheloroppgaven ”Brann i bil” til å regne ut ΔH_{eff} (Nordvik & Valen, 2011):

$$\Delta H_c = 62,02 \text{ MJ/kg}$$

$$\Delta H_{eff} = \chi \cdot \Delta H_c = 0,7 \cdot 62,02 \text{ MJ/kg} = 43,4 \text{ MJ/kg}$$

Det er blitt regnet med at vinduet foran på venstre side er halvåpent gjennom forsøket. I tillegg er det valgt å regne med at begge vinduene på høyre side er åpne, da disse smeltet bort tidlig under forsøket.

Den teoretiske maksimale effekten under brannforsøket er beregnet til følgende:

$$\dot{Q} = 0,09 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0} \cdot \Delta H_{eff} = 0,09 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{0,66} \cdot 43,4 \text{ MJ/kg} = \mathbf{2,5 \text{ MW}}$$

Se Vedlegg 13 – Branntekniske beregninger for fullstendig utregning og fremgangsmåte. (Karlsson & Quintiere)

8.3.2 Maksimalt energiinnhold

Elbilens maksimale energiinnhold er det teoretisk beregnede energiinnholdet i bilen. Dette er regnet ut med følgende formel:

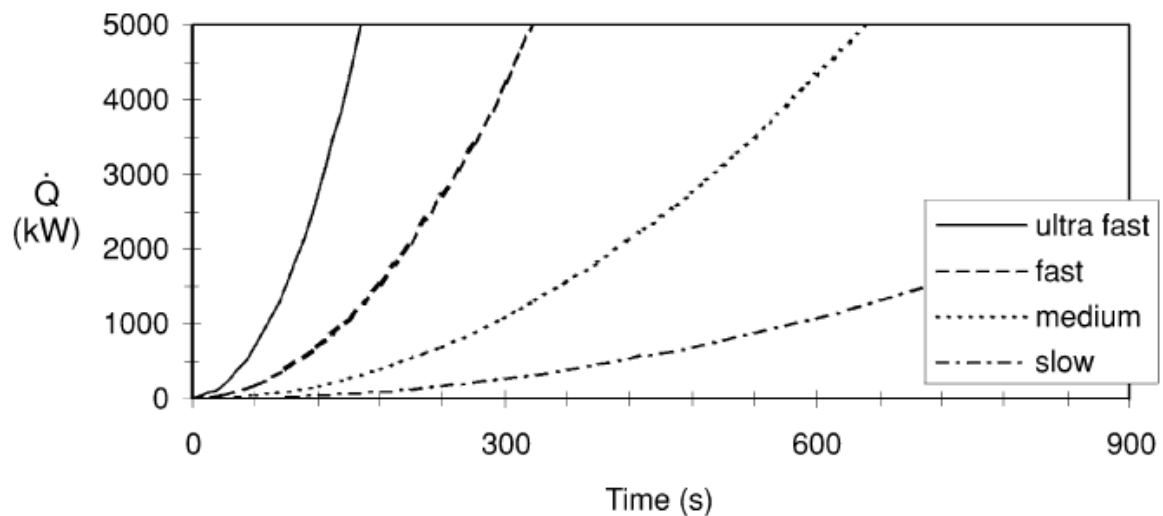
$$Q = \dot{Q} \cdot t$$

\dot{Q} er teoretisk maksimal effekt og tiden bilen brant er 90 minutter.

$$Q = 2,5 \text{ MW} \cdot 5400\text{s} = \mathbf{13500 \text{ MJ}}$$

8.3.3 Brannutvikling

Hvor hurtig utviklet brannen seg? Videopptakene fra brannforsøket viser at elbilen brant i 90 minutter og at det ble overtenning etter 30 minutter. Ut i fra videoen er det også fastslått at brannen når maksimal effekt etter ca. 40 minutter. Ved å se på den teoretisk maksimale effekten på 2,5 MW og at det tar ca. 40 minutter (2400 sekunder) før denne effekten oppnås, kan det antas at brannen er en αt^2 brann som utvikles sakte ("slow"), se Figur 50. (Karlsson & Quintiere)



Figur 50 - Varmeavgivelsesrate for forskjellige brannvekstkurver

Hentet fra "Enclosure fire Dynamics" av Björn Karlsson & James G. Quintiere, s.41, Copyright 2000 by CRC Press LLC



9 Diskusjon

9.1 Forsøksresultater

Valg av scenario

Det ideelle ville vært å utføre flere forsøk med ulike scenarier for å analysere brannstart og brannutvikling, men da det kun var én elektrisk bil til disposisjon ble det valgt å starte brannen i batteripakken. Årsaken er at dette blir sett på som et av de verst tenkelige scenarioene, og er unikt for elektriske biler. Brannscenarioer som antennelse i inventar og motorrom blir sett på som mindre interessant da dette også gjelder for vanlige biler og har kjent brannforløp. Det finnes lite tilgjengelig informasjon om brann i litium-ion bilbatteripakker, og å undersøke dette nærmere vil være med på å øke kunnskapen rundt temaet.

Antennelsesmetode

Det ble diskutert hvilke metoder som kunne benyttes for å antenne selve batteriet. For å få brann i batteripakken var det ønskelig å fremprovosere en kortslutning ved å benytte en ekstern varmekilde til å varme opp battericellene til 150-200 °C. Grunnen til dette var at det kunne forventes kortslutning ved 150 °C ifølge tidligere forsøk utført av FFI (Forseth, Hasvold, & Johannessen, 2006).

Som ekstern varmekilde ble det vurdert å benytte en ”bed burner”, men valget falt på en industribrenner. En ”bed burner” vil tilføre varme på et større areal, men for å sikre hurtigere temperaturøkning i cellene ble det bestemt å tilføre varme på et mindre område.

Det var på forhånd usikkert hvor lenge brenneren måtte varme opp batteriet før antennelse inntraff. Usikkerheten skyldtes lite informasjon om materialet til beskyttelsesdekselet rundt batteriet, om det fantes flere lag på innsiden og nøyaktig plassering av batterimodulene.

Plastikkplatene under bilen bestående av brennbart materiale ble skrudd vekk, for å hindre at disse under brannforløpet ville kunne forstyrre eller flytte på brennerens plassering. Det å fjerne disse platene ble vurdert å ikke påvirke brannforløpet i stor grad da de i et virkelig brannforløp kunne antent og bidratt til brannen.

Målemetoder

Under et slik forsøk er det mulig å gjøre flere ulike typer målinger. I dette forsøket ble det valgt å kun utføre temperaturmålinger med K type termoelementer. Det ble vurdert å gjennomføre måling av spenningen i batteripakken, men dette ble sett på som unødvendig og en fare for sikkerheten. Det var ingen instrumenter tilgjengelig for å kunne gjennomføre målinger av røykgass og varmestråling. Det finnes muligheter for å gjennomføre målinger av varmekraft, varmeavgivelsesrate og flammepropagering som gjort i forsøk fra Japan, men dette ble utelukket da slike målinger krever utstyr som ikke var tilgjengelige for dette



forsøket. Spesielt røykgass kunne vært interessant å måle, med tanke på mange nye materialer som brukes i moderne batteripakker.

Beskrivelse av hendelser sammenliknet med resultater fra grafer

Høyre side

Det ble under forsøket observert en kraftigere brannutvikling på bilens høyre side. Forskjellen kan sees i grafene for høyre og venstre side av bilen, se Figur 45 og Figur 46.

Grunner til dette vurderes å være:

- Brennerens plassering
- Vindretning
- Åpent vindu
- Celleventileringens retning

Industriebrenneren ble plassert med propanflammen rettet mot midten av den høyre delen av batteripakken, se Figur 18. Varmen fra brenneren bidro sannsynligvis til en hurtigere økning i temperaturer på den høyre siden av batteripakken.

Vinden blåste fra venstre til høyre side av bilen. Vindretningen har derfor også en innvirkning på røykretning og brannspredning i og utenpå bilen.

Vinduet som ble stående halvveis åpent på venstre side av bilen sørget for tilgang av frisk luft i kupéen. Dette kan ha vært med på holde den venstre siden kjøligere.

Som beskrevet i kapittel 7.4.2 lå cellene plassert med ventilasjonsåpninger mot høyre. Dette er vurdert å være hovedfaktoren for den kraftigere brannen på denne siden av bilen. Energien som ble frigitt fra den brennende elektrolytten som strømmet ut av de ventilerende cellene kan ha ført til høyere temperaturer og kraftigere brannforløp.

I tillegg viser grafene at det under utbrenningsfasen var høyest temperatur ved bakhjulet. Dette kan skyldes den pågående brannen i den bakre delen av batteripakken.

Batteripakken

Temperaturer opp mot 1200 °C som ble målt på batteripakken kan skyldes den ekstra varmpåkjenning fra industriebrenneren, se Figur 48. Etter 11 minutter oversteg ikke temperaturmålingene 900 °C og stabiliserte seg. De tidligste målingene kan være påvirket av brenneren og det er derfor resultatene etter 11 minutter som bør tas i betraktning.

Reaksjoner i batteripakken

Det finnes lite informasjon om hva som skjer ved brann i bilbatteripakker. Det finnes ulike batterityper, og kjemien som ble benyttet i dette forsøket, litium-ion magnesiumoksid, blir vurdert å være den sikreste batteritypen. Andre batterikjemier som litium-ion koboltoksid og litium-ion jernsulfat benytter en kjemi som er dårligere rustet mot termisk oppvarming. Magnesiumoksid tåler høyere temperaturer før det vil skje en termisk oppvarming i cellen. Dette viser rapporter utarbeidet av FFI og resultatene fra Doughty & Roth, presentert i Figur



17. Dette stemmer også overens med brannforsøket utført i dette prosjektet da det måtte oppnås temperaturer opp mot 200 °C for å få termisk oppvarming av battericellene. Under forsøket ble hendelser som lysglimt, ventilasjonsflammer og smell fra cellene observert. Det var ingen tegn til høye flammesøyler eller eksplosjoner. Observasjoner fra forsøket stemmer godt med det man vet om at litium-ion magnesiumoksid batteri har en lavere energitetthet enn andre litium-ion batterier, der det er mulighet for et kraftigere brannforløp.

Selv om det under brannforløpet oppstod lysglimt, gnister, ventilasjonsflammer og smell, var det ingen forhold som skulle tilsi at denne brannen var farligere for omgivelsene enn en brann i en bensin- eller dieselbil. Likevel er det viktig å ta i betraktning at avgasser ikke er målt og at disse kan utgjøre en potensiell fare ved brann i elektrisk bil.

Videodokumentasjon av brannen

Det er utarbeidet en video på ca. 5 minutter der klipp fra de viktigste hendelsene fra det 90 minutter lange brannforløpet er samlet. Videoen kan brukes i presentasjoner for å oppnå en større forståelse av hendelsesforløpet ved brann i elektrisk bil med litium-ion batteri. Videoen vil også være nyttig i forbindelse med opplæring av innsatsmannskaper. Det anbefales at leser av denne rapporten ser videoen, da store deler av oppgaven bygger på denne.

Sammenlikning av brann i elektrisk bil og bensinbil

Det er viktig å påpeke at de fleste branner i elektriske biler de siste årene har involvert eldre eller ombygde elbiler. Den største forskjellen mellom brann i bensin- og elbil er at det ved brann i en bensinbil vil være mye energi som frigis på en gang dersom tanken revner, motsetning til brann i batteripakken i elbil der én og én celle vil ventilere og antenne.

Ved sammenlikning av temperaturer fra dette forsøket og tidligere utført forsøk på bensinbil, se kapittel 4.2, er det tydelig at batteripakken i den elektriske bilen bidrar til høyere temperaturer ved brann.

Den høyeste temperaturen som ble målt på høyre side av elbilen var på 1050 °C og i bensinbilen oversteg ingen temperaturer 430 °C. Dette kan skyldes cellenes ventilasjonsretning.

Ingen temperaturer på undersiden av bensinbilen oversteg 500 °C. I elbilen var det temperaturer opp mot 900 °C i dette området. Dette kan skyldes batteripakkens plassering.

Teoretisk maksimal effekt

Tidlig i brannforløpet smeltet vinduene på den høyre siden av bilen. I tillegg var vindu på venstre side halvveis åpnet. Det derfor valgt å benytte disse som ventilasjonsåpninger ved utregning av den teoretisk maksimale branneffekten. En maksimal effekt på 2,5 MW er relativt liten, da 8 MW er normalt for vanlige biler. I forsøket fra Japan lå den maksimale effekten mellom 1,8 og 6,3 MW. Elbilen i dette forsøket, en Nissan Leaf, er en større bil enn Peugeot iOn og dermed er høyere effekt logisk.



Fremtidens elektriske biler

Om fremtidens bilbatteripakker blir bygget opp som dagens batteripakker vil brannutviklingen være den samme. En enda høyere energitetthet kan føre til et voldsommere brannforløp, men hvor mye kraftigere er vanskelig å anslå. Likevel er det viktig å ta i betraktning at en firedobling i energitettheten til en batteripakke på langt nær vil være like høy som energitettheten i en bensintank.

9.2 Temperaturmålingenes nøyaktighet

De fleste termoelementene som ble anvendt var blitt brukt før. Det må regnes med at slitte termoelementer kan gi litt unøyaktige målinger. Alle termoelementene ble testet før forsøket for å sjekke at alle fungerte slik de skulle. Det viste seg å være to ikke-fungerende termoelementer der målingene måtte forkastes. Det bør tas hensyn til forekomst av avvik i målingene. Disse avvikene kan skyldes:

- Destruksjon av termoelementer gjennom brannforløpet der elementet slutter å virke
- Destruksjon av den ytterste delen til termoelementet som kan føre til at målingen skjer lengre inn på elementet
- Bevegelse av termoelement gjennom brannforløpet som fører til måling et annet sted enn først planlagt

Det er vurdert at eventuelle unøyaktigheter i de fungerende termoelementene ikke har vært spesielt store og derfor ikke i noen vesentlig grad har hatt betydning for dokumentasjonen av brannforløpet under forsøket.

9.3 Termoelementer på batteripakken

Det kunne vært av interesse å hatt flere termoelementer plassert på/i batteripakken. Det var imidlertid kun én åpning inn til batteripakken. Det ble valgt kun å benytte denne åpningen til plassering av termoelementer, da det ikke var mulig å få plassert flere termoelementer uten å risikere å skade batteriet. Hensikten med forsøket var å se brannutviklingen i en intakt elbil. Dersom batteriet hadde blitt påført skade ville dette kunne påvirket brannforløpet.

9.4 Erfaringer og forbedringspotensial

Det gjennomførte forsøket gir svært nyttig informasjon om brannforløp i en elbil. Forsøket var vellykket og ble gjennomført uten komplikasjoner. Ytterligere kunnskap på området vil imidlertid være av interesse. Forslag til typer scenarioer som kan testes i forsøk for å øke kunnskap om brann i elbil er:

- Skade på batteripakken i form av penetrering
- Brann inne i bilen og hvordan den vil påvirke batteripakken
- Overlading



- Væskebrann, for eksempel bensin ved krasj
- Spredning av brann mellom elbiler koblet til ladestasjoner
- Bruk av ulike typer slökkemiddel
- Måling av avgasser fra batteripakken

Tap av målinger fra to termoelementer burde vært unngått. For å hindre dette i et annet forsøk bør en være sikker på at termoelementene fungerer før de plasseres.

Det hadde vært av interesse å finne bilens vekt før og etter brannforsøk, for å bruke dette i beregninger.

Det kunne vært ønskelig å utføre et mindre forsøk før brannforsøket, der utstyr og rutiner hadde blitt testet. Her kunne det for eksempel vært utført et brannforsøk på kun en batteripakke.

9.5 Prosedyrer for brannvesenet

Brannvesenets slukke- og redningsarbeid kan være utfordrende ved brann i elektriske biler. Mange elbiler er i dag vanskelige å skille fra vanlige bensin- og dieselmotorer i utseende, men kan gjenkjennes gjennom merking eller registreringsskilt. Følgende punkter omhandler noen aktuelle utfordringer og forslag til tiltak:

- Det finnes flere ulike elbiler og alle har forskjellige løsninger for plassering av sikkerhetsbrytere og soner for klipping. Dette skaper utfordringer for brannvesenet når de skal redde personer ut av elbiler. Det er vanlig å benytte hurtig frigjøringsteknikk²⁰ men denne metoden kan ikke brukes i elbiler da batteripakken ikke kan deles i to. Det bør vurderes om det skal utarbeides et lett tilgjengelig dataverktøy for brannvesenet, som inneholder informasjon om de enkelte elektriske bilene. Her kan det gis en oversikt over de forskjellige batteritypene, plassering av sikkerhetsbrytere og andre detaljer som er viktig for brannvesenets innsats. Det er i denne rapporten blitt utarbeidet et eksempel på en oversikt over prosedyrer for fire forskjellige elbiler. Flere av prosedyrene for å gjøre elbilene strømløse forutsetter ventetid i opp til 10 minutter. Ved en ulykke vil det ikke være aktuelt for redningsmannskaper å vente, og hurtigere teknikker/prosedyrer bør utarbeides. Elbilene som har blitt sett på har ulike prosedyrer (enkelte er svært kompliserte) for å bli gjort strømløse.
- Det kan være vanskelig å bedømme hvor mye av en elektrisk bil som faktisk brenner. Selv om bilen brenner betyr ikke dette at batteriet har antent. Batteriet må varmes opp over en lengre periode for at det skal oppstå kortslutning og brann. En brann som er slukket i kupéen kan imidlertid ha ført til oppvarming av batteriet som på et senere tidspunkt gjøre at det antenner som følge av oppvarmingen. Ett infrarødt kamera kan benyttes for å detektere en slik varmeutvikling i et tidlig stadium. Forsøket viste at brannen ikke brant gjennom bilens chassis, og dette er med på å øke sikkerheten for eventuelle personer som oppholder seg i bilen ved brann i batteripakken.

²⁰ Teknikk som brukes av redningsmannskap ved frigjøring av personer i bilulykker



- Anbefalinger som å la bilen brenne ut kan i noen situasjoner være vanskelig av ulike grunner. For eksempel vil det være ugunstig å la en bil stå å brenne i lang tid på en trafikkert vei eller inne i et parkeringshus.
- Dersom vann skal benyttes som slökkemiddel må det brukes i store mengder for å hindre re-antennelse. Resultater av tester utført hos DEKRA viser at skum er det mest effektive slökkemiddelet.

Etter å ha hatt kontakt med flere brannvesen for å undersøke deres prosedyrer ved brann i elektrisk bil kom det frem at det ikke finnes egne prosedyrer for dette. Mange brannvesen føler at det er mangelfull informasjon om hvordan en skal utføre slukke- og redningsarbeid på elektrisk bil.

På bakgrunn av dette er det valgt å utarbeide et forslag til en slik prosedyre. Forslaget til prosedyren er basert på resultater fra forsøket og innhentet informasjon om eksisterende prosedyrer og opplæring. Forslaget kan brukes som et midlertidig hjelpemiddel for brannvesenet frem til det utvikles nasjonale retningslinjer.



10 Konklusjon

Et kontrollert fullskala brannforsøk med elektrisk bil har ikke tidligere blitt gjennomført i Norge. Forsøket gir således ny kunnskap om hvordan en slik brann forløper og den risiko man står overfor når en elektrisk bil begynner å brenne. Ved å starte brannen i batteripakken viste forsøket hvordan det verste brannscenarioet i en elektrisk bil artet seg.

Forsøksbilens batteri blir sett på som et av de tryggeste i markedet. Når en bilbatteripakke med litium-ion magnesiumoksid blir varmet opp til temperaturer opp mot 200 °C, vil det skje en intern kortslutning som fører til termisk ”runaway” med etterfølgende brann i batteripakkens celler. Under en slik brann kan brennende elektrolytt og metaller fra katoden i cellene observeres som ventilasjonsflammer og lysglimt.

Det måtte under forsøket tilføres mye varme fra en ekstern varmekilde for å oppnå kortslutning i battericeller. Mengde av varme som må tilføres avhenger av batteriets egenskaper og cellekjemi. Celleinnholdet, bortsett fra den utbrente elektrolytten, befant seg fortsatt i de utbrente cellene noe som er et tegn på god design og høy sikkerhet i denne batteripakken.

Temperaturmålingene gjort under forsøket viser høye temperaturer, inne og ute, på høyre side og i nedre del av bilen sammenliknet med brann i bensinbil. Cellens ventilasjonsretning har en vesentlig betydning for brannens utvikling, da brennbar elektrolytt som ventileres ut av cellene ved oppvarming gir det største bidraget til brannintensiteten. Cellene i batteripakken til bilen i dette forsøket har ventilasjonsåpningen mot bilens høyre side. Andre bilmerker kan ha celler i batteripakken som ventilerer i en annen retning og derved kan gi et annet brannforløp.

Batteriet i en elektrisk bil bør aller helst brenne helt ut for hindre re-antennelse. Det er avdekket usikkerheter hos innsatspersonell ved enkelte brannvesen når det gjelder risiko ved- og slokking av brann i elektrisk bil. Det er utarbeidet et forslag til prosedyre for slokking og redning, men det anbefales at det lages et databasert informasjonssystem for alle brann- og redningsetater med nødvendig informasjon om den enkelte type elektriske bil. Dette vil effektivisere slokke- og redningsarbeidet.

Det finnes fortsatt flere ubesvarte spørsmål rundt brann i elektrisk bil og det anbefales at det utføres flere forsøk med ulike scenarioer for å øke kunnskapen på dette området.



11 Referanser

Andersson, P. (2013). Brandrisiker.

Dalløkken, P. E. (2013, Mars 3). *Teknisk ukeblad*. Hentet April 12, 2013 fra <http://www.tu.no/industri/2013/03/03/slik-skal-elbilbatteri-ene-bli-bedre>

Danish Maritime Accident Investigation Boards. (2011). *Søfartsstyrelsen*. Hentet Mars 9, 2013 fra <http://www.soefartsstyrelsen.dk/SiteCollectionDocuments/Publikationer/Ulykker%20til%20søs/OKE%20Rapporter/Handelsskib/Brand-eksplosjon/2010/Final%20report%20-%20PEARL%20OF%20SCANDINAVIA.pdf>

Doughty, D., & Roth, E. (2012). *A general discussion of li ion battery safety*. Hentet Mars 03, 2013 fra The electrochemical Society: http://www.electrochem.org/dl/interface/sum/sum12/sum12_p037_044.pdf

EnergiLink. (u.d.). *EnergiLink*. Hentet April 10, 2013 fra <http://energilink.tu.no/no/energikalkulator.aspx>

Forseth, S., Hasvold, Ø., & Johannessen, T. (2006). *Forsvarets forskningsinstitutt*. Hentet Desember 12, 2012 fra <http://rapporter.ffi.no/rapporter/2006/02358.pdf>

Frydenlund, S. (2012, Juni 26). *Aftenposten*. Hentet Mars 5, 2013 fra <http://bil.aftenposten.no/bil/Nok-en-elbil-tok-fyr-22367.html#.URyjXqWBXdk>

Grønnbil. (2013). *Grønnbil*. Hentet Februar 7, 2013 fra <http://www.grønnbil.no>

Grav, J. W. (2012, Oktober 17). Elektriske kjøretøy - innsats og redning. DSB.

Gunvaldsen, I. (2008, Oktober 30). *Store Norske Leksikon*. Hentet Februar 18, 2013 fra <http://snl.no/batteri/fysikk>

Hoffman, L. (2013, Januar 24). Energilager, ulike varianter.

Hoffmann, L., & Söderholm, T. (2013). *SP Technical Research Institute of Sweden*. Hentet Februar 02, 2013 fra <http://www-v2.sp.se/publ/ViewDocument.aspx?RapportId=14429>

Jones, J., Noonan, T., & Riordan, M. (2007). Hentet 04 29, 2013 fra http://www.bse.polyu.edu.hk/researchCentre/Fire_Engineering/summary_of_output/journal/IJEPBFC/V9/p111-117.pdf

Karlsson, B., & Quintiere, J. *Enclosure Fire Dynamics*.

Kvisle, H. H. (2013, Februar 18). *Norsk elbilforening*. Hentet April 12, 2013 fra <http://www.elbil.no/mennesker/924-norsk-innsats-for-et-batteriloft>

Larsson, F. (2013, Januar 24). Olika celledesign för säkrare litiumjonbatterier.



Lithium Energy Japan. (2008, Juni 26). Hentet Januar 2013 fra <http://www.ens.dk/da-DK/KlimaOgCO2/Transport/elbiler/forsoegsordningforelbiler/elbilmodeller/Documents/Batteri%20-%20trillingbiler.pdf>

Mikolajczak, C., Kahn, M., White, K., & Long, R. T. (2011). *Litium-Ion Batteries Hazard and Use Assessment*. Fire Protection Research Foundation.

National Highway Traffic Safety Administration. (2012, Januar 20). *NHTSA*. Hentet Januar 25, 2013 fra <http://www.nhtsa.gov/About+NHTSA/Press+Releases/NHTSA+Statement+on+Conclusion+of+Chevy+Volt+Investigation>

Nissan Norge. (2013). Nissan Norge.

Nissan North America Inc. (2012). *Boron Extrication*. Hentet fra Emergency Response Guides:
http://boronextrication.com/files/2010/11/2012_Nissan_LEAF_First_Responders_Guide-ERG_version-12_Extrication.pdf

Nordvik, J.-I., & Valen, C. D. (2011). *Brann i bil*. Høgskolen Stord/Haugesund brannsikkerhet.

Norsk elbil forening. (u.å). *Norsk elbil forening*. Hentet Januar 29, 2013 fra <http://elbil.no>

NTB. (2013, Februar 3). *Teknisk ukeblad*. Hentet Februar 15, 2013 fra <http://www.tu.no/industri/2013/02/03/over-10000-elbiler-i-norge>

Opplysningsrådet for veitrafikken AS. (2012). *Opplysningsrådet for veitrafikken AS*. Hentet 2013 fra <http://ofvas.no>

Peugeot. (u.d.). Mechanical presentation: Electric vehicles Ion/C-Zero.

PSA Peugeot Citroën. (u.d.). *Ion_C_Zero_Rescue_Manual*.

Steinsvåg, C. (2011, Mai 26). *DinSide*. Hentet Februar 6, 2013 fra <http://www.dinside.no/870324/test-elbil-som-duger>

Tesla Motors Inc. (2013). *Boron Extrication*. Hentet April 28, 2013 fra Emergency Response Guides:
http://boronextrication.com/files/2010/11/Tesla_ModelS_ERG_Emergency_Response_Guidebook.pdf

Tools. (u.d.). Hentet fra <http://www.tools.no/?aid=9082020>

Torjusen, A. (2013, Februar 6). *NRK*. Hentet Februar 7, 2013 fra <http://www.nrk.no/nyheter/distrikt/ostfold/1.10899886>



HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND



Wang, Q., Ping, P., Zhao, X., Chu, G., Sun, J., & Chen, C. (2012). *Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery.*

Watanabe, N., Sugawa, O., Suwa, T., Ogawa, Y., Hiramatsu, M., Tomonori, H., et al. (2012, September). FIVE2012: Comparison of fire behaviors of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in a real-scale fire test.

World car awards. (u.å). WCA. Hentet Februar 16, 2013 fra <http://www.wcoty.com>



12 Vedlegg

Vedlegg 1 - Utrekninger energitetthet

Litium-ion bilbatteri

16 kWh til 24 kWh er vanlig i litium-ion batterier

Vekt: 240 kg (Peugeot iOn bilbatteripakke)

Energitetthet 16 kWh:

$$\frac{16 \text{ kWh}}{240 \text{ kg}} = 0,06 \text{ kWh/kg}$$

Energitetthet 24kWh:

$$\frac{24 \text{ kWh}}{240 \text{ kg}} = 0,1 \text{ kWh/kg}$$

Bensin

Bensin: 9,1 kWh per liter

Vekt bensin: 0,74 kg/l

(EnergiLink)

40 liter bensintank:

Energitetthet:

$$9,1 \text{ kWh/l} \cdot 40 \text{ l} = 364 \text{ kWh}$$

$$40 \text{ l} \cdot 0,75 \text{ kg/l} = 30 \text{ kg}$$

$$\frac{364 \text{ kWh}}{30 \text{ kg}} = 12,1 \text{ kWh/kg}$$

60 liter bensintank:

Energitetthet:

$$9,1 \text{ kWh/l} \cdot 60 \text{ l} = 546 \text{ kWh}$$

$$60 \text{ l} \cdot 0,75 \text{ kg/l} = 45 \text{ kg}$$

$$\frac{546 \text{ kWh}}{45 \text{ kg}} = 12,1 \text{ kWh/kg}$$

Vedlegg 2 - Bilder fra DEKRAs forsøk



Figure 18. Course of test 1
 Short circuit in minute 8, self-contained LiB burning in minute 12, continuous self-contained burning, beginning of fire fighting in minute 21, no more fire 40 s later, beginning of heavy white smoke emission, cooling of the LiB in minute 22 and reigniting in minute 23; little smoke emission in minute 45.



Vedlegg 3 - Prosedyre utviklet i USA

Interim Guidance for Electric and Hybrid-Electric Vehicles Equipped With High Voltage Batteries (Law Enforcement/Emergency Medical Services/Fire Department)

Electric and Hybrid-Electric Vehicle Considerations

In the event of damage to or fire involving an electric vehicle (EV) or hybrid-electric vehicle (HEV):

- Always assume the high voltage (HV) battery and associated components are energized and fully charged.
- Exposed electrical components, wires, and HV batteries present potential HV shock hazards.
- Venting/off-gassing HV battery vapors are potentially toxic and flammable.
- Physical damage to the vehicle or HV battery may result in immediate or delayed release of toxic and/or flammable gases and fire.

Vehicle Shutdown and High Voltage System Disabling

IDENTIFY VEHICLE

- Determine if the vehicle is an electric or hybrid-electric vehicle, and if it is, advise Dispatch and all responders that an electric or hybrid-electric vehicle is involved.

IMMOBILIZE VEHICLE

- Always approach vehicle from the sides to stay out of potential travel path. It may be difficult to determine if the vehicle is running due to lack of engine noise.
- If possible, chock the tires, place the vehicle into Park, and set the parking brake.

DISABLE VEHICLE

- Turn off the vehicle, activate hazard lights, and move vehicle keys at least 16 feet away from the vehicle.
- If your local standard operating procedures (SOPs) allow it and you are properly trained and equipped, disconnect the vehicle's 12-volt battery.
CAUTION: Safety restraints, air bags and other safety systems may be active for up to five minutes after disconnecting the 12-volt battery.

Law Enforcement and Emergency Medical Services	Fire Department
CRASHES DAMAGING THE AREA OF THE HV BATTERY	
<p>NOTE: Follow local standard operating procedures (SOPs) for personal protection and safety.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If you detect leaking fluids, sparks, smoke, flames, increased temperature, gurgling, popping or hissing noises from the HV battery compartment, ventilate passenger area (i.e., roll down windows or open doors) and request fire department response. • If you detect any unusual odors or experience eye, nose, or throat irritation, move away from the vehicle and evacuate others from the immediate area. Rapid extrication may be needed for injured or trapped occupants. • Remain a safe distance upwind and uphill from the vehicle and out of the way of oncoming traffic until other appropriately equipped emergency responders arrive. • Avoid contact with orange high voltage cabling and areas identified as high voltage risk by warning labels • Be alert. There is a potential for delayed fire with damaged lithium ion batteries. 	<p>NOTE: Follow local standard operating procedures (SOPs) for personal protection and safety.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If you detect leaking fluids, sparks, smoke, flames, increased temperature, gurgling or bubbling sounds from the HV battery compartment, assume there is a battery fire and ventilate the passenger area (i.e., roll down windows or open doors). • Move away from the vehicle and evacuate others from the immediate area if you detect any unusual odors or experience eye, nose, or throat irritation. Wear full Personal Protective Equipment (PPE) and Self-Contained Breathing Apparatus (SCBA). • Be alert. There is a potential for delayed fire with damaged lithium-ion batteries.
FIRES INVOLVING OR EXPOSING THE HV BATTERY	
<ul style="list-style-type: none"> • If you are unable to quickly remove the occupants, use a fire extinguisher to protect them from the flames. • As with any vehicle fire, the byproducts of combustion can be toxic and all individuals should be directed to move to a safe distance upwind and uphill from the vehicle fire and out of the way of oncoming traffic. 	<p>NOTE: If the fire involves a lithium-ion battery, it will require large, sustained volumes of water for extinguishment. Consider defensive tactics and allow fire to burn out.</p> <ul style="list-style-type: none"> • If there is active fire, follow local standard operating procedures (SOPs) for vehicle fires. Wear appropriate Personal Protective Equipment (PPE) and Self Contained Breathing Apparatus (SCBA). • If occupants are still inside the vehicle or trapped, a fire extinguisher may be used to protect the occupants until a hose line is available or the occupants are removed. Consider establishing a water supply to support long-term operation. • Use a hose line to apply water to extinguish the fire while continuing to cool the HV battery and its casing. Never attempt to penetrate the HV battery or its casing to apply water. • Avoid contact with orange high voltage cabling and areas identified as high voltage risk by warning labels. • Be alert. There is a potential for delayed ignition or re-ignition of a lithium-ion battery fire even after it is believed to be extinguished. This may remain an issue until the lithium-ion battery is properly discharged. • As with any vehicle fire, the byproducts of combustion can be toxic and all individuals should be directed to move to a safe distance upwind and uphill from the vehicle fire and out of the way of oncoming traffic.



Post-Incident

- Always assume the HV battery and associated components are energized and fully charged.
- Ensure that passenger and cargo compartments remain ventilated (i.e., open window, door, or trunk)
- Notify an authorized service center or vehicle manufacturer representative as soon as possible as there may be other steps they can take to secure and discharge the HV battery.
- Do not store a severely damaged vehicle with a lithium-ion battery inside a structure or within 50 feet of any structure or vehicle.
- Request fire department (if appropriate) if you observe leaking fluids, sparks, smoke, flames, or hear gurgling or bubbling from the HV battery.





Vedlegg 4 - Kursopplegg Norges brannskole



Direktoratet for
samfunnssikkerhet og beredskap

Utarbeidet av
Jostein Ween Grav, tlf. 33412500

Notat

Dokument dato
17.10.2012
Deres dato

1 av 4

Vår referanse
12/ /GRJO
Deres referanse

Til
Brannskolen

Artiklkode

Elektriske kjøretøy – innsats og redning

1. Bakgrunn

Det er i dag over 8.000 rene elektriske biler på veiene i Norge. I tillegg kommer like mange hybridbiler. Målet er 200.000 elektriske biler inne 2020 og redningsetatene vil derfor raskt komme i kontakt med denne typen kjøretøy ved innsats på veier og ved brann. Da er det svært viktig å kjenne farer og utfordringer slik at man er godt forberedt. Det er nemlig andre utfordringer enn de man normalt har erfaring med.

2. Kjøretøy med elektrisk fremdrift

2.1 Typer

I prinsippet finnes det fire forskjellige typer kjøretøy med elektrisk fremdrift. De har til felles at en elektrisk motor driver hjulene og motoren får energi fra et stort batteri.

1. **Rene elektriske kjøretøy:** Har elektrisk motor og batteri som lades fra en vanlig kontakt – eventuelt hurtiglades fra en spesiell hurtigladestasjon langs veien.
2. **Hybrid biler:** Har både forbrenningsmotor og elektrisk motor.
3. **Ladbare hybridbiler – "plugin hybrid":** Hybrid bil som også kan lades.
4. **Brenselcelle biler – "fuelcell":** Elektrisk bil der batteriet lades med brenselceller dvs. flytende hydrogen og oksygen.

2.2 Identifisere:

Rene elektriske kjøretøy har kjennemerke som starter med bokstavene **EL** xxxxxx. I tillegg er de gjerne merket med Electric, All Electric, Full Electric, I-ON, EDrive, Zero Emission.

- Eksempler: Think, Nissan Leaf, Tesla, Mitsubishi i-MiEV = Citroen C-Zero = Peugeot iOn, Renault Fluence, Volvo C30 electric, Smart, Buddy, Reva, og endel ombygde Citroen og Renault av eldre årgang. Listen utvides stadig.

Hybrid kan identifiseres med merking **Hybrid** eller varianter av ordet.

- Eksempler er Toyota Prius (plugin), Toyota Auris, Honda Insight og Opel Ampera = Chevrolet Volt. Listen utvides stadig.

Brenselcelle biler er merket med **Fuel Cell, Hydrogen Zero Emission**. Dette er i øyeblikket bare biler for test og under forskning / utvikling.



2.3 **Fakta om elbil**

- Elektriske biler drives av en elektrisk motor som forsynes med energi fra et "stort" batteri. Ved å trykke på gasspedalen styres energiflyten fra batteriet til motoren som driver hjulene.
- Når "tenningen" er på i en elbil er motoren klar til å drive hjulene. Det er ingen startmotor, girkasse eller kopling. Bilen settes i bevegelse så fort gasspedalen berøres eller det oppstår en feil i det elektriske systemet som sender samme signal som gasspedalen.
- Noen biler har nøkkelfri tenning som gjør bilen klar for start når nøkkel er i nærheten av bilen.
- En elektrisk motor har maks dreiemoment fra start – den akselererer momentant.
- Batteriet på nyere biler har en spenning på 400 – 700 V likestrøm. Ufarlig spenning er under 75 V likestrøm
- Kabler og brytere mellom fremdriftsbatteri og motor er normalt oransje.
- Det er vanligvis en stor sikkerhetsbryter i nærheten av batteriet som kan betjenes for å frakoble batteriet.
- Elektriske biler bruker motoren som brems ved å mellomlagre bremseenergien i noen store kondensatorer. Det tar noen minutter før disse er utladet etter stopp og spenningen er farlig.

2.3.1 **Eldre elbiler**

- Spenningen på batteriene er normalt under 48 V likestrøm. Altså ingen fare for elektrisk sjokk.
- Men korslutningsstrømmene er høye og kan medføre kraftige lysbuer.
- Batteriteknologi:
 - Vanlige bilbatterier koplet i parallell og i serie (Buddy, Reva).
 - Nikkel Kadmiumbatterier (Renault, Citroen) - giftig.
 - Natriumsaltbatterier (Think) – 370 graders brukstemperatur

2.3.2 **Nyere elbiler**

- Spenningen på batteriene er normalt på 400V likestrøm eller høyere. Stor fare for elektrisk sjokk ved berøring av begge polene på / ledningene fra batteriet.
- Batteriet er isolert fra karosseriet. Altså ingen fare ved berøring av bilen men en skade på kabler kan i ytterste konsekvens spenningssette karosseriet til bakken. Sannsynligheten er liten.
- Bremskondensatorene kan ha farlig spenning inntil 10 minutter etter stopp.
- Alle komponenter for fremdriftssystemet er godt merket og kabler og brytere er oransje.
- Det er alltid en stor frakoblingsbryter i nærheten av batteripakken – denne er normalt godt merket men kan befinne seg i gulvet / drivakselbrønn bak forsetene. Tilgang kan være under teppe eller under bilen foran bakhjul.
- Klippesoner er normalt godt merket.
- Batteripakken ligger normalt i drivakselbrønn eller midt under bilen for å være beskyttet mot kollisjon. Godt merket.



- Batteriteknologi:
 - Litium ion batterier i forskjellig innpakning.
 - Gir stor energitetthet
 - Kan hurtiglades til 80% av kapasitet
 - Har mange innebygde sikkerhetsfunksjoner. Overvåking av hver celle. Kollisjonsbryter som kobler fra batteriet ved en kollisjon.
- **MEN brann i litiumbatteri lar seg ikke slukke – må brenne ut. Kjøl ned med store mengder med vann for å hindre at flere celler antennes og at brannen sprer seg.**
 - Inneholder organisk elektrolytt som brenner som olje og utvikler flussyre.
 - Elektrodene avgir oksygen ved ca 200 grader C. Dette opprettholder en brann.

2.4 Forsiktighetsregler

Observere:

- Sjekk biltype
- Vurder batteri teknologi
- Vurder skader på batterikasse og kabler
- Er det tegn på varmeutvikling i batteriet – bruk gjerne infrarødt kamera? Dersom batteriet har interne skader vil dette medføre kortslutning og brann i løpet av minutter.
- Identifiser frakoblingsbryter og eventuelt klippesoner.

Håndtere farer:

- Skru av "tenning" – ved kontaktløs tenning fjernes sender minst 15 m vekk fra bilen.
- Blokker hjul
- Klargjør for kjøling og slukking - hvis skader tilsier dette.
- Koble fra hovedbryter batteri.
- Vær forberedt på at en brann i batteriet kan starte plutselig. Følg med på temperaturen på batteriet hvis det er et litiumbatteri. Hvis ukjent forutsettes det at det er et litiumbatteri.
- Unngå innånding av røyk da den kan inneholde flussyre.
- Dersom bilen er av nyere dato bruk verneutstyr som isolerer for 1000V ved klipping eller annen håndtering av deler av karosseriet. Dette inkluderer hansker, visir og hjelm godkjent for formålet.

2.5 Etter redning / innsats

- Batteriet vil fremdeles ha restenergi – den forsvinner ikke av seg selv.
- Sjekk batteritemperatur og om den er stigende. Et skadet batteri er ustabil og kan plutselig få en intern korslutning mellom celler og begynne å brenne.
- Før transport fra skadestedet må batteriet være koblet fra vha. hovedbryter. Vurder også om ytterligere tiltak er nødvendig før transport.
- Plasser bil som er utsatt for en større kollisjonsskade, typisk der intern batteribryter har koblet ut automatisk, på et sted er en eventuell brann ikke kan spre seg. Dette gjelder også batterier som er fjernet fra skadet bil.



Direktoratet for
samfunnssikkerhet og beredskap
Enhet for Elektriske anlegg

Notat

Dokument dato
17.10.2012

Vår referanse
12/ /GRJO

4 av 4

2.6 *Brann i bil som står til lading*

- Det gjelder de samme forsiktighetsregler og tiltak som er gitt foran.
- Stopp lading ved å dra ut kontakten.
- Ved hurtiglading trykkes nødstopp.
- Kjøøl ned med store mengder med vann til temperaturen på batteriet er normal.

Jostein Ween Grav
sjefingeniør



Vedlegg 5 - Prosedyre for slukke- og redningsarbeid på elektriske biler

1. Formål

Formålet med denne prosedyren er å gi instruksjoner og rettleiding for effektiv og sikker redning og slukking i ulykker som involverer én eller flere elektriske biler.

2. Omfang

Denne prosedyren gjelder for en ulykke der en elektrisk bil er involvert. Prosedyren er ment for rednings- og slukkemannskaper i Norge.

3. Referanser

- Elektriske kjøretøy-innsats og redning, DSB v/ Jostein Ween Grav
- Interim Guidance for electric and hybrid-electric vehicles Equipped with High voltage batteries, NHTSA
- ”Operative instruksjoner ved trafikkulykker” Sveio brann- og redningsvesen

4. Definisjoner

5. Prosedyre

Følg vanlig prosedyre for slukke- og redningsarbeid som brannvesenet i distriktet benytter. Dersom en av de involverte bilene i trafikkulykken er elektrisk bør denne fremgangsmåten følges:

Ved utrykking:

- Finn ut om en elektrisk bil er involvert i ulykken
- Innhent opplysninger om den elektriske bilen

På skadested:

Følg vanlig prosedyreoppgaver på skadested i tillegg til punktene beskrevet nedenfor:

1. Observere

- *Vurder skader på batteri og ledninger*
- *Vurder faren for brann i batteriet. (Benytt infrarødt kamera for å se varmeutvikling)*
Kortslutning og andre typer skader på batteripakken kan føre til brann



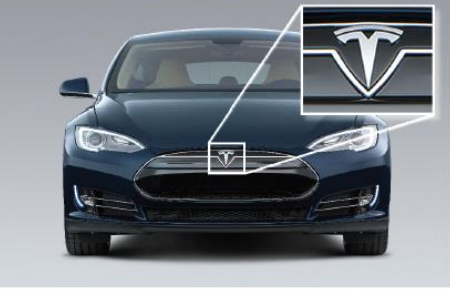
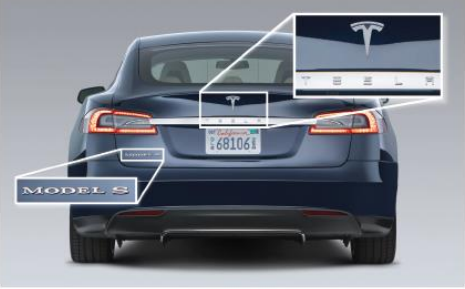
2. Redde

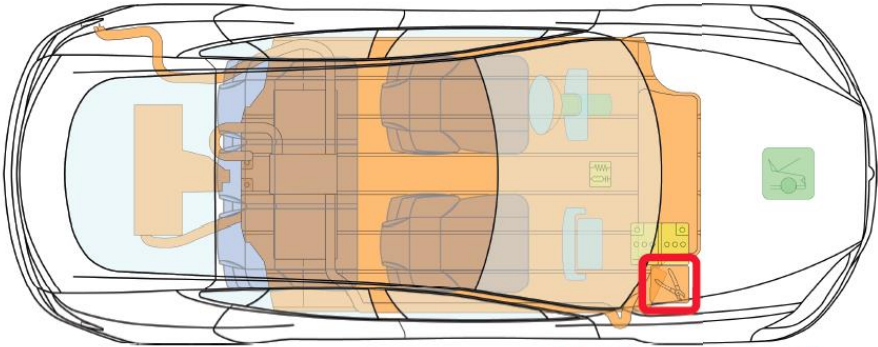
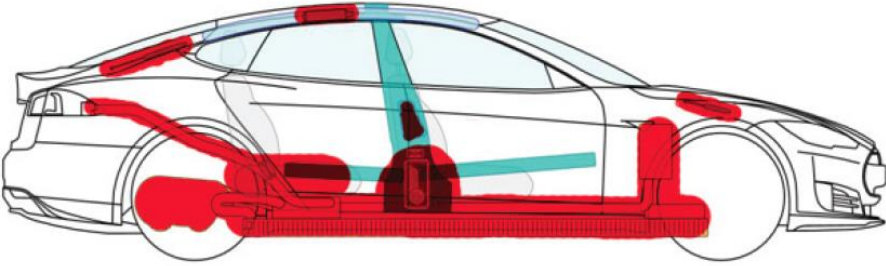
- *Stabilisere bilen*
- *Lokaliser hovedbryter og klippesoner, se Vedlegg 6 - Prosedyre for å gjøre ulike elbiler strømløse i ulykkessituasjon for detaljert beskrivelse for ulike typer elektriske biler*
- *Klippesoner elektrisk bil: A-stole/B-stolpe/C-stolpe (Kan variere og bør sjekkes opp mot hver enkelt bil)*
- *Fastklemte personer kan frigjøres ved å åpne tak etter klipp i angitte stolper*

3. Slokke

- *Anta brann i batteripakken ved deteksjon av økende temperatur, røyk, flytende væsker, gnister, flammer, lyder fra selve batteripakken*
- *Benytt skum/vann til å slokke bilen eller kjøle ned batteripakken. (Brann i bilen forutsetter ikke brann i batteripakken).*
- *Brann i batteripakken kan re-antenne ved bruk av vann som slökkemiddel. **Aldri** bruk små mengder vann ved sløkking av brann i batteripakke!*
- *Om mulig la batteripakken brenne ut*

Vedlegg 6 - Prosedyre for å gjøre ulike elbiler strømløse i ulykkesituasjon

Tesla Model S	
<u>Identifiser elbilen</u>	
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Nummerskilt (EL XXXXX) 2. Front: T Bak: T, Tesla, Model S <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;">   </div>
<u>Stabiliser elbilen</u>	
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Lås alle fire hjul med hjulstoppere 2. Sett bilen i ”park”- modus
<u>Gjør elbilen strømløs</u>	

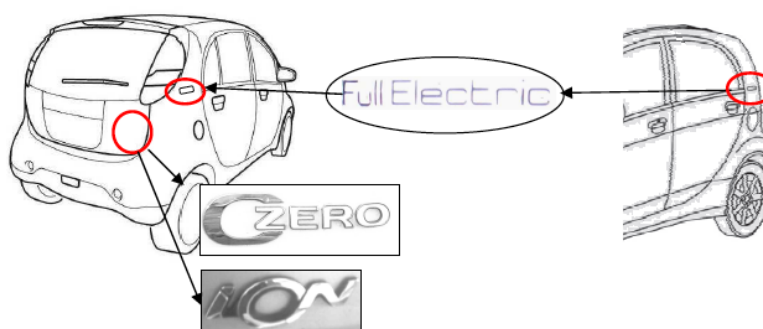
	<p>Fremgangsmåte for å klippe ”first responder cut loop”</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Åpne panseret, ”cut loop” befinner seg på passasjersiden 2. Fjern plastisk lokk 3. Kutt kabelen 2 ganger <p><i>Ved å kutte denne kabelen gjøres bilen strømløs og airbagene deaktiveres.</i></p>  <p style="color: red; font-size: small;">Cut loop is located on the passenger side, under the hood and the plastic access panel</p>
<p><u>Elbilens kutte- og klippesoner</u></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Model S har områder markert med rødt som er definert som ”ikke-kuttsoner”. Dette er høyspenningsområder, gassfjærer og SRS og airbag områder • Aldri kutt eller knus disse områdene, dette kan føre til alvorlig skade eller død • Grønn markering viser områder med stål (Vanskelig eller umulig å klippe)  <p style="color: red; font-size: small;">Do not cut through areas shown in red</p>
<p><u>Hurtig frigjøring</u></p>	
	<p>Det er mulig å klippe av bilens tak for å frigjøre personer i bilen.</p>

(Tesla Motors Inc., 2013)

Peugeot iOn, Citroen C-ZERO

Identifiser elbilen

1. Nummerskilt (EL XXXXX)
2. Bak: iOn eller C-ZERO
Passasjerside bak: Full electric
Førerside bak: Full electric



Stabiliser elbilen

Kontroller at kjøretøyet er immobilisert

1. Gir plassert i parkeringsmodus
2. Håndbrekk
3. Hjulstoppere

Gjør elbilen strømløs

1) Steng av bilens elektriske system ved hjelp av én av to følgende metoder:

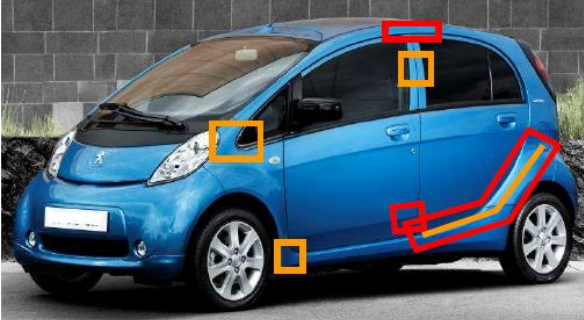
1. Slå den elektriske bryteren på rattstammen til "LOCK" posisjon og fjern nøkkelen.
2. Ta ut sikringen til "Power Control Unit" fra sikringsskapet under panseret.

2) Vent i minst 1 minutt før du går videre til neste trinn, EV-systemet stenger ned i løpet av denne tiden

3) Koble 12 V batteri fra negativ og positiv pol

Koble fra 12 V batteriets minuspol ved å følge denne fremgangsmåten:

1. Åpne panseret (kommandoen er på høyre side)
2. Ta av dekslet til 12 V batteri under panseret

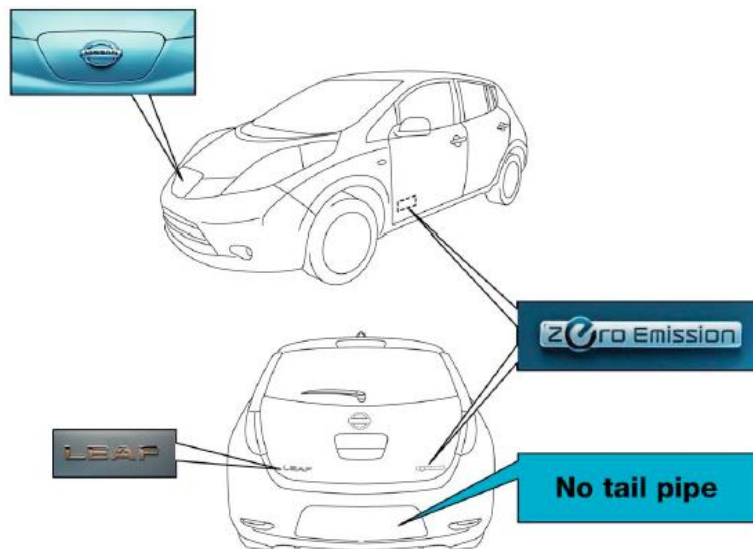
	<ol style="list-style-type: none"> 3. Drei plastmutteren mot venstre, og fjern deretter batteriets øvre deksel 4. Koble fra batteriets minuspol med et isolert verktøy 5. Deretter frakobles batteriets plusspol med et isolert verktøy <p>4) Vent minst 5 minutter før du fortsetter til neste trinn</p> <p>5) Fjern ”service plug”. Dette isolerer den elektriske kretsen i traksjonsbatteriet. (Bruk verneutstyr)</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Skyv førersete til bakerste posisjon og rull opp teppet under setet 2. Fjern servicelokket 3. Trekk i spaken til ”service plug” <p>6) Kontroller at bilen er strømløs før det utføres klipping/kutting</p>
<p><u>Elbilens kutte- og klippesoner</u></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Aldri kutt i selve batteripakken. • Unngå å kutte I fargede områder for å unngå risiko av høyspenning elektrisk sjokk og utløsning av SRS airbagsystem. <div style="text-align: center;">  <div style="display: flex; justify-content: flex-end; align-items: center; margin-top: 10px;"> <div style="margin-right: 10px;"> <p>Legend</p> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 2px solid yellow; width: 20px; height: 10px; margin-right: 5px;"></div> Area not recommended </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-bottom: 5px;"> <div style="border: 2px solid red; width: 20px; height: 10px; margin-right: 5px;"></div> Danger Area </div> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="border-bottom: 2px solid yellow; width: 20px; margin-right: 5px;"></div> High Voltage Cables </div> </div> </div> </div>
<p><u>Hurtig frigjøring</u></p>	
	<p>Det er mulig å klippe av bilens tak for å frigjøre personer i bilen.</p>

(PSA Peugeot Citroën)

Nissan Leaf

Identifiser elbilen

1. Nummerskilt (EL XXXXX)
2. Front: Nissan
Bak: LEAF, Zero emission, ingen eksosrør
Førerside: Zero emission



Stabiliser elbilen

1. Elektrisk håndbrekk (bremsedal holdes lett inn)
2. Dra i håndbrekk-bryteren
3. Stabiliser med hjulstoppere

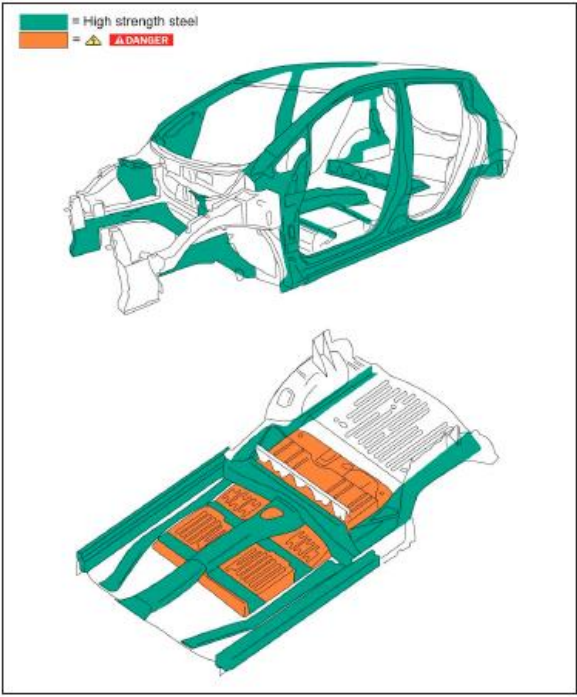
Gjør elbilen strømløs

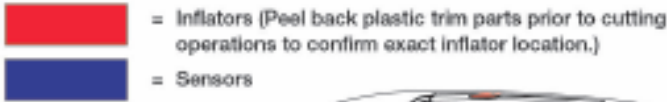
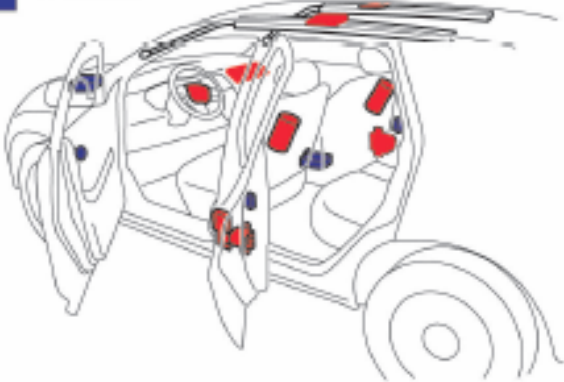
Prosedylene for å gjøre en Nissan Leaf strømløs har anbefaling om å vente 10 minutter fra prosedyren er utført til bilen er strømløs. Ved en trafikkulykke vil det ikke være tid til å vente og leverandøren bør foreslå andre prosedyrer.

Strømsystemet kan slås av på én av følgende måter:

Hovedprosedyre: Slå av "power"-bryteren og koble fra 12 V batteriet

1. Sjekk READY indikatoren. Hvis den er på, er høystrømsystemet aktivt
2. Sett bilen i parkeringsmodus

	<ol style="list-style-type: none"> 3. Trykk på ”power”-bryteren én gang for å skru av høystrømsystemet. Kontroller at READY indikatoren er av. 4. Hvis mulig hold nøkkelen minst 5 meter unna bilen 5. Frakoble negativ batterikabel, og isoler kabelen med isoleringsteip 6. Det er anbefalt å vente minst 10 minutter etter at ”power”-bryteren er skrudd av 7. Start redning <p><u>Alternativ prosedyre: Slå av hovedstrømbryteren og koble fra 12 V batteriet</u></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Finn åpning i teppet bak girspaken på forhøyningen i gulvet. Dra opp teppebiten 2. Fjern de tre boltene og ta vekk lokket 3. Slå av hovedstrømbryteren ved å presse bryteren og rotere håndtaket oppover. Dra hovedstrømbryteren helt ut av beholderen ved hjelp av håndtaket 4. Det er anbefalt å vente minst 10 minutter etter hovedstrømbryteren er fjernet 5. Frakoble negativ batterikabel, og isoler kabelen med isoleringsteip
<p><u>Elbilens kutte og klippesoner</u></p>	
	<ul style="list-style-type: none"> • Grønn sone: ”High strength” stål • Oransje sone: FARE <p>Unngå klipping i batteripakken og airbag-deler</p> <p style="text-align: center;">High Strength Steel Locations</p> 

	<p>  </p>  <p>DO NOT Cut Air Bag Parts!</p>
<p><u>Hurtig frigjøring</u></p>	
	<p>Det er mulig å klippe av bilens tak for å frigjøre personer i bilen.</p>

(Nissan North America Inc., 2012)

**Vedlegg 7 - Utstyrliste**

Utstyr	Antall	Ansvar
Termoelement	13 stk.	Arjen
Pc + logger		Arjen
Gipsplater under bil	Store nok til å dekke underlag under bil	Arjen
Tildekking av termoelement ledninger	Metall plater	Finnes på ResQ
Avbitertang	1 stk.	Arjen
Jekk	1	Arjen
Ståltråd(binde fast termoelementer)	1 rull	Arjen
Sprittusj og gaffa-teip	1 stk.	Lisa/Siril
Jernstang	1 stk.	ResQ
Skjæreutstyr (avbitertang, kniv, saks)		ResQ
Sperreteip	1 rull	ResQ
Lighter	1 stk.	Lisa/Siril
Stoppeklokker	2 stk.	Lisa/Siril
<i>Antennelsesvæsker</i>		
Tennvæske	3 dl	Arjen
<i>Mat/drikke</i>		
Varm kaffe/ te/ brus og pappkopper til deltakerne	Nok	Lisa/Siril
Kjeks	Nok	Lisa/Siril



Vedlegg 8 - Mal SJA
Sikker jobbanalyse

SJA tittel:	Aksjon:	SJA ansvarlig:
--------------------	----------------	-----------------------

SJA deltakerliste			
Sted:	SJA ansvarlig:		
Dato:			
Kl:			
Navn	Dato	Signatur	Ansvarsområde



Beskrivelse av arbeidet:					
Forutsetninger:					
Nr.	Deloppgave	Risikomomenter	Mulig konsekvens	Risikoreduserende tiltak	Ansvarlig
1	Plassering av gipsplater	Spisse kanter. Montering av plater.	Kuttskade Klemskade	Benytte verneutstyr	
2	Utplassering av bil på gipsplater	Bilen er skadet og skarpe kanter kan føre til skade ved utplassering. Bilen kan trilles over utplasseres kroppsdeler.	Kuttskade Klemskade Bruddskade	Benytte verneutstyr	
3	Montering av termoelementer	Montering	Kuttskade	Benytte vernehansker	
4	Antennelse i el- bilens kupé	Røykforgiftning Stråling	Åndedrettsproblemer Brannskade	Benytte verneutstyr (Brannmansbekledning)	



5	Observasjon av bilbrannen	Røykskade Stråling Dekkekspløsjon, airbag-ekspløsjon, vinduer knuses/blåses ut Oppvarming av batteriet Batteriekspløsjon Bevegelse av bil	Åndedrettsproblemer Brannskade Flyvende objekter, splinter, kuttskader Kobber og andre flytende metaller kan sprute ut av batteriet Utslipp av farlige gasser, flyvende objekter, splinter, kuttskader Kan komme for nærme sikkerhetssone	Holde deltakere utenfor sikkerhetssone. Benytte åndedrettsvern. Alle skal benytte vernebriller og hjelm. Benytte verneutstyr (Brannmansbekledning) Studentene og Arjen Benytte åndedrettsvern og verneutstyr. Benytte verneutstyr	
6	Opprydning etter forsøk	Opprydning/flytting av bil Farlige gasser fra batteriet i vraket	Kuttskader, klemskader Inhalering av farlige avfallsgasser	Verneutstyr Åndedrettsvern	



		Avkjøling av batteri i vann	Inhalering av farlige avfallsgasser	Åndedrettsvern	
		Vasking av området	-	-	
Er den totale risikoen akseptabel? JA	Anbefaling/godkjenning	Dato/signatur	Kryss av for at SJA er gjennomgått		
	SJA ansvarlig				
Konklusjon/kommentarer:	Ansvarlig for utførelse av arbeid		Oppsummering:		
	Område/driftsansvarlig				
	Annen stilling				



Sjekkliste for SJA					
Nr.	SJA tittel:	Oppfylt			Kommentarer
		JA	NEI	Ikke aktuell	
1.	Dokumentasjon og erfaring				
1.1	Er dette en kjent arbeidsoperasjon?				
1.2	Finnes det dekkende instruks hvis uhell?				
1.3	Er SJA møte gjennomført?				
1.4	Er det andre som burde vært på SJA møte?				
2.	Kompetanse				
2.1	Finnes det nødvendig personell og kompetanse på jobben				
3.	Kommunikasjon og koordinering				
3.1	Er det en jobb der flere enheter/grupper må koordineres?				
3.2	Er god kommunikasjon og sambandsmiddel på plass?				
3.3	Er det mulige konflikter med samtidige aktiviteter på området?				
3.4	Er det avklart hvem som leder arbeidet?				
3.5	Er det planlagt tilstrekkelig tid for aktiviteten?				
4.	Fysiske sikkerhetssystemer				
4.1	Er og forblir barrierer som skal bidra til en sikker evakuering av personell intakte?				
4.2	Er og forblir barrierer for å slukke eller begrense brann/eksplosjon intakte?				
5.	Sikkerhetsutstyr				
5.1	Er verneutstyr kjent for alle involverte?				
5.2	Er sikkerhetssone etablert og vist med sperreteip?				
5.3	Er sløkkemiddel tilgjengelig?				
6.	Utstyr til utførelse av forsøk				
6.1	Er alt måleutstyr kontrollert?				
6.2	Har alle riktig og tilstrekkelig verneutstyr?				
6.3	Er alt personell klar over møteplass ved				



	uønsket hendelse?				
6.4	Er førstehjelpsutstyr tilgjengelig?				
7.	Området				
7.1	Er det påkrevd med befaring for å verifisere tilkomst til forsøksplassen?				
7.2	Er det tatt hensyn til brannfarlig gass/væske/materialer i området?				
7.3	Er det tatt hensyn til mulig eksplosjon under forsøket?				
8.	Forsøkssted				
8.1	Er forsøksplassen ren og ryddig?				
8.2	Er det tatt hensyn til behov for merking/skilting/avsperring				
8.3	Er det tatt hensyn til transportforhold til/fra forsøkssted?				
8.4	Er det tatt hensyn til behov for ekstra vakt?				
8.5	Er det tatt hensyn til vær og vindforhold?				
8.6	Er det tatt hensyn til tilkomst for slökkemannskaper?				
8.7	Er det tatt hensyn til rømning?				



Telefonliste	
Nødetater	Tlf:
Brannvesen	110
Politi	112
Ambulanse	113
Studenter	
Siril H. Agerup	92 81 73 69
Lisa S. Blikeng	416 58 661
ResQ Haugesund	
Administrasjon	41 75 50 00
Varslingsnummer for alvorlig hendelse	953 62 943
Avdelingsleder kontaktes ved mindre skader	41 37 15 18
Vardafjell VGS	52 70 99 10
Viktige organer	
Giftsentralen	22 59 13 00
Arbeidstilsynet	815 48 222
Faglige kontakter	
Arjen Kraaijeveld	994 78 496
Reidar Skrunes	934 80 196



Vedlegg 9 - Utfylt SJA

SJA tittel: Brann i elektrisk bil	Aksjon: Forsøk utført på ResQ, Haugesund	SJA ansvarlig: Lisa Schei Blikeng
--	---	--

SJA deltakerliste			
Sted: Haugesund ResQ	SJA ansvarlig: Lisa Schei Blikeng		
Dato: 7.februar 2013			
Kl: 12.00			
Navn	Dato	Signatur	Ansvarsområde

Beskrivelse av arbeidet: Det skal gjennomføres et forsøk av				
---	--	--	--	--



brann i en elektrisk bil på ResQ i Haugesund.					
Forutsetninger: Ikke regn Vindretning					
Nr.	Deloppgave	Risikomomenter	Mulig konsekvens	Risikoreduserende tiltak	Ansvarlig
1	Plassering av gipsplater	Spisse kanter. Montering av plater.	Kuttskade Klemskade	Benytte verneutstyr	
2	Utplassering av bil på gipsplater	Bilen er skadet og skarpe kanter kan føre til skade ved utplassering. Bilen kan trilles over utplasseres kroppsdelar.	Kuttskade Klemskade Bruddskade	Benytte verneutstyr	
3	Montering av termoelementer	Montering	Kuttskade	Benytte vernehansker	
4	Antennelse i el- bilens kupé	Røykforgiftning Stråling	Åndedrettsproblemer Brannskade	Benytte verneutstyr (Brannmansbekledning)	



5	Observasjon av bilbrannen	Røykskade Stråling Dekkeeksplosjon, airbag-eksplosjon, vinduer knuses/blåses ut Oppvarming av batteriet Batteriekspløsjon Bevegelse av bil	Åndedrettsproblemer Brannskade Flyvende objekter, splinter, kuttskader Kobber og andre flytende metaller kan sprute ut av batteriet Utslipp av farlige gasser, flyvende objekter, splinter, kuttskader Kan komme for nærme sikkerhetssone	Holde deltakere utenfor sikkerhetssone. Benytte åndedrettsvern. Alle skal benytte vernebriller og hjelm. Benytte verneutstyr (Brannmansbekledning) Benytte åndedrettsvern og verneutstyr. Benytte verneutstyr	
6	Opprydning etter forsøk	Opprydning/flytting av bil Farlige gasser fra batteriet i vraket	Kuttskader, klemskader Inhalering av farlige avfallsgasser	Verneutstyr Åndedrettsvern	



		Avkjøling av batteri i vann	Inhalering av farlige avfallsgasser	Åndedrettsvern	
		Vasking av området	-	-	
Er den totale risikoen akseptabel? JA	Anbefaling/godkjenning	Dato/signatur	Kryss av for at SJA er gjennomgått		
	SJA ansvarlig				
Konklusjon/kommentarer: Dersom batteriet har tatt fyr under forsøket bør det settes i vann i minst 12 timer. Vannet absorberer giftige gasser og forebygger dårlig lukt.	Ansvarlig for utførelse av arbeid		Oppsummering:		
	Område/driftsansvarlig				
	Annen stilling				



Sjekkliste for SJA					
Nr.	SJA tittel:	Oppfylt			Kommentarer
		JA	NEI	Ikke aktuell	
1.	Dokumentasjon og erfaring				
1.1	Er dette en kjent arbeidsoperasjon?	x			Forsøket utføres på plass som er godkjent for å utføre slike arbeidsoppgaver, ResQ.
1.2	Finnes det dekkende instruks hvis uhell?	x			Følger ResQ instruks
1.3	Er SJA møte gjennomført?	x			21.januar med veiledere. 25. januar med elever fra medielinja
1.4	Er det andre som burde vært på SJA møte?	x			SJA-møte gjennomføres før forsøk med ALLE personer som er tilstede under brannen.
2.	Kompetanse				
2.1	Finnes det nødvendig personell og kompetanse på jobben	x			Kompetanse fra ResQs ansatte og Arjen Kraaijeveld
3.	Kommunikasjon og koordinering				
3.1	Er det en jobb der flere enheter/grupper må koordineres?	x			Elever fra medielinja som skal filme forsøket og personer som utfører forsøket.
3.2	Er god kommunikasjon og sambandsmiddel på plass?	x			Sambandsmiddel ikke aktuelt. Kommunikasjon via telefon.
3.3	Unngås mulige konflikter med samtidige aktiviteter på området?	x			Ja. Forsøket foregår etter arbeidstid.
3.4	Er det avklart hvem som leder arbeidet?	x			Arjen Kraaijeveld
3.5	Er det planlagt tilstrekkelig tid for aktiviteten?	x			Ja.
4.	Fysiske sikkerhetssystemer				



4.1	Er og forblir barrierer som skal bidra til en sikker evakuering av personell intakte?	x			Ja. Rømningsvei utenfor sikkerhetssone
4.2	Er og forblir barrierer for å slukke eller begrense brann/eksplosjon intakte?	x			Vannslange og andre slökkemidler
5. Sikkerhetsutstyr					
5.1	Er verneutstyr kjent for alle involverte?	x			Alle skal være informert om dette før forsøket starter
5.2	Er sikkerhetssone etablert og vist med sperreteip?	x			Beregnet og etablert på forhånd av studenter
5.3	Er slökkemiddel tilgjengelig?	x			Brannhydrant på området.
6. Utstyr til utførelse av forsøk					
6.1	Er alt måleutstyr kontrollert?	x			Skal sjekkes før forsøket utføres
6.2	Har alle riktig og tilstrekkelig verneutstyr?	x			Alle som skal delta på forsøket må ha riktig og tilstrekkelig verneutstyr
6.3	Er alt personell klar over møteplass ved uønsket hendelse?	x			Dette informeres om på forhånd Merket med 'M' før inngang til feltet
6.4	Er førstehjelpsutstyr tilgjengelig?	x			I bygg på feltet
7. Området					
7.1	Er det påkrevd med befaring for å verifisere tilkomst til forsøksplassen?		x		Nei, men befaring gjort sammen med veiledere for aktuelle personer.
7.2	Er det tatt hensyn til brannfarlig gass/væske/materialer i området?	x			Ingen aktivitet i området under forsøk
7.3	Er det vernet mot brannfarlig gass/væske/materialer under forsøket?	x			Sikker avstand motsatt fra vindretningen.
7.4	Er det tatt hensyn til mulig eksplosjon under forsøket?	x			Ja. Sikkert området er avgrenset med sperring.
8. Forsøkssted					
8.1	Er forsøksplassen ren og ryddig?	x			Ja.
8.2	Er det tatt hensyn til behov for merking/skilting/avsperring	x			Dette er avklart på forhånd av forsøket



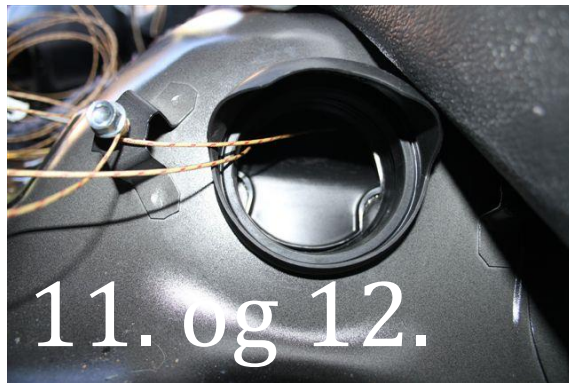
8.3	Er det tatt hensyn til transportforhold til/fra forsøks sted?	x			Ja.
8.4	Er det tatt hensyn til behov for ekstra vakt?			x	
8.5	Er det tatt hensyn til vær og vindforhold?	x			Det tas hensyn til nedbørsmengde og plassering av personer i forhold til vindretning.
8.6	Er det tatt hensyn til tilkomst for slokkemannskaper?	x			Ja.
8.7	Er det tatt hensyn til rømning?	x			Ja.

Vedlegg 10 - Plassering av termoelementer





HØGSKOLEN STORD/HAUGESUND





Vedlegg 11 - Forsøkslogg

00:00: Start av logger og 2 kameraer
01:00: Start av industribrenner
03:00: Brann i plastikk under bilen
04:19: Glød under bilen (Plastikkbiter dette ned)
06:00: Termoelement 12 (batteripakke) → 118, 9 °C → 180 °C
07:00: Start kamera 3
07:44: Poffer i batteri. Gjenstander detter ned
09:00: Mengder plastikk smelter
10:28: Flammer inne i bilen
10:40: Brenner slås av
11:45: Celler poffer
12:50: Ventilierende flamme fra batteri (elektrolytt brenner)
13:00: Stor røyksøyle
14:30: Mer flammer
15:20: Elektrolytt brann
16:00: Smell elektrolytt
16:30: Celle, elektrolytt brann
17:00: Bil tuter
18:00: Gnister, lysglimt fra katode
18:50: Elektrolyttbrann
21:30: Brenner i venstre bakrute
22:10: Dekkbrann
22:50: Dekkekspløsjon
23:00: Flammer ut frontrute
26:50: Airbag
39.30: Celle ventilerer
40.10: Elektrolytt brann
40:50: Celle ventilerer
44:00: Batteri fortsatt temp 800-900 °C
60:00: Batteri brenner, ryker fra bilen
90:00: Bakre del av batteri brenner m/ lite flamme
90:00: Logger skrur av



Vedlegg 12 - Total energi fra industribrenner

$$\rho_{\text{Propan}} = 1,899 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1,899 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3} = 1,899 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{l}}$$

$$\text{Mengde propan} = 1,899 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{l}} \cdot 206 \text{ l} = 0,391194 \text{ kg} = 391,194 \text{ g}$$

$$\Delta H_{c_{\text{Propan}}} = 46,45 \frac{\text{kJ}}{\text{g}}$$

Total energi:

$$\text{Energi} = 46,45 \frac{\text{kJ}}{\text{g}} \cdot 391,194 \text{ g} = 18170,9613 \text{ kJ}$$

$$= \frac{18170,9613 \text{ kJ}}{600 \text{ s}} = \mathbf{30,3 \text{ kW}}$$



Vedlegg 13 – Branntekniske beregninger

$$\Delta H_c = 62,02 \text{ MJ/kg}$$

$$\Delta H_{eff} = \chi \cdot \Delta H_c = 0,7 \cdot 62,02 \text{ MJ/kg} = 43,4 \text{ MJ/kg}$$

Antatt areal hele bilen:

$$\begin{aligned} A_t &= (l \cdot b + l \cdot h + b \cdot h) \cdot 2 \\ &= ((2,9 \cdot 1,27) + (2,9 \cdot 1,6) + (1,27 \cdot 1,6)) \cdot 2 \\ &= 20,7 \end{aligned}$$

Vindu venstre:

$$\begin{aligned} h_1 &= 0,2 \text{ m} \\ b_1 &= 0,8 \text{ m} \end{aligned}$$

Vinduer høyre:

$$\begin{aligned} h_2 &= h_3 = 0,4 \text{ m} \\ b_2 &= b_3 = 0,8 \text{ m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} A_0 &= A_1 + A_2 + A_3 \\ &= h_1 \cdot b_1 + h_2 \cdot b_2 + h_2 \cdot b_3 \\ &= (0,2 \cdot 0,8) + (0,4 \cdot 0,8) + (0,4 \cdot 0,8) \\ &= 0,16 + 0,32 + 0,32 \\ &= 0,8 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} H_0 &= \frac{(A_1 \cdot h_1) + (A_2 \cdot h_2) + (A_3 \cdot h_3)}{A_0} \\ &= \frac{(0,16 \cdot 0,2) + (0,32 \cdot 0,8) + (0,32 \cdot 0,8)}{0,8} \\ &= 0,66 \text{ m} \end{aligned}$$

Teoretisk maksimal effekt:

$$\dot{Q} = 0,09 \cdot A_0 \cdot \sqrt{H_0} \cdot \Delta H_{eff} = 0,09 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{0,66} \cdot 43,4 \text{ MJ/kg} = 2,5 \text{ MW}$$

Maksimale energiinnholdet i bilen:

$$\begin{aligned} Q &= \dot{Q} \cdot t \\ &= 2,5 \text{ MW} \cdot 5400 \text{ s} = 13500 \text{ MJ} \end{aligned}$$