



Fullskala branntest av elbil

VERSJON 1	DATO 2017-02-20	NØKKELOORD: Elbil Brann Fullskala test Thermal runaway
FORFATTER(E) Andreas Sæter Bøe		
OPPDRAGSGIVER(E) Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap	OPPDRAGSGIVERS REF. Jostein Ween Grav og Berit Svensen	
PROSJEKTNR. 20096:03	ANTALLSIDER OG VEDLEGG: 28 + 4 vedlegg	
SAMMENDRAG SP Fire Research har, i samarbeid med Skien brann- og feievesen, Høgskolen i Sørøst-Norge og Grenland Energy, gjennomført to fullskala branntester av elbiler av merke Tata Indica GLX. Batteriet i bilene var et 26 kWh Li-ion batteri med en katode bestående av nikkel, magnesium og kobolt (NMC-katode). I test 1 ble en elbil sluppet i fritt fall fra en høyde på 20 meter, for å simulere en kraftig kollisjon. Umiddelbart etter sammenstøtet begynte det å ryke kraftig fra batteriet. Etter ca. 7 minutter begynte bilen å brenne med synlige flammer. Bilen fikk deretter brenne fritt. Etter 2,5 timer ble temperaturen målt mellom 310 og 540 °C på ulike deler av batteripakken. Bilen var da fullstendig utbrent. Testen viser at en elbil som blir utsatt for en kraftig kollisjon kan begynne å brenne. I test 2 var målet å antenne batteripakken ved å bruke en ekstern varmekilde, for deretter å måle hvor mye sløkkevann som krevdes for å slukke brannen. Batteriet ble oppvarmet av en propanbrenner fra undersiden av bilen. Etter ca. 10 minutter begynte bilen å brenne med synlige flammer. Det ble gjennomført to sløkeforsøk under brannen. Brannen reantente etter første sløkeforsøk, men ble fullstendig sløkket i andre forsøk. Til tross for den eksterne oppvarmingen av batteriet, og at bilen var overtent i en lengre periode, begynte det ikke å brenne i batteripakken. Brannen kunne dermed sløkkes med samme innsatsmetode og tidsforbruk som en brann i en konvensjonell bensin-/dieselbil.		
UTARBEIDET AV Andreas Sæter Bøe	SIGNATUR	
KONTROLLERT AV Nina Reitan	SIGNATUR	
GODKJENT AV Paul Halle Zahl Pedersen	SIGNATUR	
RAPPORTNR. A17 20096:03-01	GRADERING Åpen	GRADERING DENNE SIDE Åpen

Historikk

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1	20.02.2017	Første versjon

Forord

Disse forsøkene er et utmerket eksempel på hvordan brannmannskapers ønske om å lære mer om faget sitt har resultert i to fullskala forsøk med elbiler. Skien brann- og feiervesen var initiativtaker til både gjennomføringen av testene og til fagdagen som ble avholdt samtidig. Disse forsøkene hadde altså ikke funnet sted om det ikke hadde vært for engasjementet til Skien brann- og feiervesen. I tillegg stilte Grenland Energy med de to elbilene og bidro med instrumentering av disse. Høgskolen i Sørøst-Norge bidro med videoopptak under selve testen. Selv om to forsøk ikke gir svar på alle spørsmål, anser vi likevel disse forsøkene som verdifull kunnskap om et fagområde hvor det fortsatt finnes kunnskapshull.

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap er prosjektets oppdragsgiver, og denne rapporten er en del av et større arbeid som pågår for å øke kunnskapen om hvilke utfordringer kjøretøy med nye energibærere gir, og hvordan de skal håndteres.

Innholdsfortegnelse

Utvidet sammendrag	4
Extended summary in English	6
Ordforklaringer	7
1 Bakgrunn	8
2 Forskningsspørsmål	9
3 Materialer og metode	10
3.1 Testmateriale – bil og batteri	10
3.2 Instrumentering og testoppsett	11
3.3 Visuelle observasjoner	12
4 Resultater	13
4.1 Test 1	13
4.2 Test 2	16
5 Diskusjon	19
5.1 Test 1	19
5.1.1 Lærdom fra test 1	19
5.1.2 Temperatur- og røykutvikling	20
5.1.3 Evaluering av testoppsettet	21
5.2 Test 2	21
5.2.1 Lærdom fra test 2	21
5.2.2 Temperaturutvikling	23
5.2.3 Sløkking	24
5.2.4 Batteriets tilstand etter test	24
5.3 Plassering av termoelementer	24
5.4 Batterienes tilstand før test	25
6 Konklusjon	26
Referanser	27
Vedlegg:	
A Informasjon om battericellene	
B Bilder fra test 1	
C Bilder fra test 2	
D Li-ion batteri	
D.1 Li-ion celle	
D.2 Sikkerhet til ulike Li-ion batterikjemier	

Utvidet sammendrag

SP Fire Research har, i samarbeid med Skien brann- og feievesen, Høgskolen i Sørøst-Norge og Grenland Energy, gjennomført to fullskala branntester av elbiler av merke Tata Indica GLX. Batteriet i bilene var et 26 kWh Li-ion batteri med en katode bestående av nikkel, magnesium og kobolt (NMC-katode).

De to testene, test 1 og 2, ble designet for å gi indikative svar på følgende to forsknings-spørsmål:

1. Vil et elbilbatteri kunne antenne av seg selv hvis bilen utsettes for en kraftig kollisjon?
2. Hvor mye vann behøves for å slokke en elbilbrann der batteriet har nådd *thermal runaway*?

Test 1

Målet var å simulere en kraftig kollisjon for å undersøke om batteriet i elbilen ville begynne å brenne som følge av den mekaniske påkjenningen.

Elbilen ble sluppet i fritt fall fra 20 meter med bakenden pekende nedover, for å simulere en kraftig påkjørsel bakfra i ca. 70 km/t. Like etter sammenstøtet med bakken begynte det å ryke kraftig fra batteriet, og etter ca. 7 minutter begynte bilen å brenne med synlige flammer. Bilen fikk deretter brenne fritt. Maksimal temperatur på oversiden av batteripakken ble målt til ca. 900 °C mellom ca. 18 og 35 minutter. Etter ca. 2,5 timer var bilen fullstendig utbrent, og det ble da målt temperaturer mellom 310 og 540 °C på ulike deler av batteripakken.

Relatert til forskningsspørsmål 1, viser resultatet fra test 1 at hvis en elbil blir utsatt for et kraftig mekanisk sammenstøt, eksempelvis en kollisjon, kan batteriet begynne å brenne i etterkant av sammenstøtet. Om en kollisjon vil føre til en brann, og hvor lang tid dette eventuelt tar, avhenger imidlertid av en rekke faktorer, som energi i sammenstøtet, treffvinkel på batteriet, hvor godt batteriet er beskyttet m.m. Resultatet fra testen viser likevel at en brann *kan* oppstå som følge av en kollisjon, noe som bør tas med i betraktningen når redningspersonell kommer til en ulykke med elbil. At batteriet kan være varmt i lang tid etter at brannen er slokket, er noe bergingsmannskaper bør kjenne til når de skal ta hånd om elbilen etter ulykken.

Test 2

Målet var å antenne batteriet ved bruk av en ekstern varmekilde, for så å studere hvor mye vann som var nødvendig for å slokke brannen.

Ved bruk av en propanbrenner ble bilen varmet opp fra undersiden, like under der batteriet var plassert. Etter ca. 2 minutter begynte det å ryke svakt fra bilen, og bilen begynte å brenne etter ca. 10 minutter. Første slokkeforsøk ble gjennomført etter 13:37 minutter, da det var fullt utviklet brann i bilen. Slokkeinnsatsen varte i ca. 30 sekunder og det ble brukt ca. 100 liter vann for å slokke alle synlige flammer. Etter kort tid tok brannen seg opp og utviklet seg igjen til en fullt utviklet brann. Etter 8 minutter med fullt utviklet brann (27:20 minutter etter teststart) ble et nytt slokkeforsøk igangsatt, og dette varte i omtrent 4 minutter. I løpet av denne tiden ble det brukt 550 liter vann. Temperaturene i batteriet økte ikke etter den siste innsatsen, og brannen ble erklært slokket.

Etter å ha studert temperaturmålingene og undersøkt batteriet fra test 2, er konklusjonen at batteriet ikke var involvert i brannen, og at *thermal runaway* ikke oppsto i battericellene. Det betyr at testen ikke gir svar på forskningsspørsmål 2, angående hvor mye

vann som kreves for å slokke en elbilbrann der batteriet har nådd thermal runaway. Når batteriet ikke har nådd thermal runaway og ikke brenner, kan brannen slokkes med samme innsatsmetode og tidsforbruk som en brann i en konvensjonell bensin-/dieselbil.

Resultatet fra test 2 er likevel interessant, fordi det viser at selv en fullt utviklet brann i en elbil ikke nødvendigvis fører til at batteriet begynner å brenne. Dersom dette resultatet kan reproduseres gjennom flere elbilbranntester, er det et viktig funn som innebærer at en ytre oppvarming (spredning fra annen brannkilde, påtenning osv.) generelt ikke initierer thermal runaway og brann i elbilbatteriet, og at en slik brann dermed kan slokkes som andre bilbranner. Dette vil eksempelvis kunne ha betydning for vurdering av risiko ved elbiler i parkeringskjellere.

Extended summary in English

SP Fire Research has, in cooperation with Skien Fire Department, University College of Southeast Norway and Grenland Energy, conducted two full scale fire tests on two electrical vehicles (EVs). The battery was a 26 kWh Li-ion battery with a cathode consisting of nickel, magnesium and cobalt (NMC-cathode).

The two tests carried out, tests 1 and 2, were designed to give indicative answers to the following scientific questions:

1. Will an EV battery ignite when the EV is exposed to a heavy car crash?
2. How much water is needed to extinguish an EV fire, when the battery has reached thermal runaway?

Test 1

The aim was to simulate a heavy car crash to study whether the battery would ignite due to the mechanical impact.

The EV was subjected to a free fall from 20 m height with the rear end pointing downwards, to simulate a 70 km/h crash from behind. Just after the impact, a large amount of smoke was produced from the battery, and after ca. 7 minutes the EV caught fire with visible flames. Thereafter the car burned freely. The maximum temperature on the top of the battery pack was 900 °C after ca. 18 - 35 minutes. After the car was fully burnt out, the temperatures on the battery pack were between 310 and 540 °C 150 minutes after the impact.

Regarding the scientific question no. 1, the results from test 1 indicate that if an EV is exposed to a heavy mechanical impact, e.g. a collision, the battery may ignite. However, whether an impact will lead to a fire depends on a number of factors, like the energy in the impact, the incident angle, how the battery is protected etc. The results still show that a fire *may* start as a result of a collision, and this is important for rescue workers and towing companies to be aware of.

Test 2

The aim was to initiate a fire in the battery by external heating with a propane burner, and subsequent study how much water that was needed to extinguish the fire.

The propane burner was positioned under the vehicle, just below the position of the battery. After ca. 2 minutes, small amounts of smoke were observed, while the car caught fire after ca. 10 minutes. The first extinguishing test was carried out after 13:37 minutes, and lasted for 30 seconds. In total, 100 liters of water was used to extinguish all visible flames. After a short time the fire reignited and developed to a fully developed car fire. At 27:20 minutes after test start, the second extinguishing test was carried out. At this time the car had been fully engulfed in flames for more than 8 minutes. The extinguishing time was about 4 minutes, and 550 liters of water were used. The temperatures did not increase after the last extinguishing test, and the fire was declared extinguished.

After having studied the temperature curves and investigated the battery pack from test 2, the conclusion was that the battery was not involved in the fire, and thermal runaway did not occur in the cells. This means that the test result is not valid to answer the scientific question 2, about how much water that is needed to extinguish an EV fire where the battery has reached thermal runaway.

However, the result from test 2 is still interesting. The fact that the battery did not ignite despite the massive fire surrounding it, is an important finding. If the result from this test can be reproduced with other EV models, it will mean that a fire occurring from an outer source (like arson, fire spread etc.) in general will not cause thermal runaway in the battery pack of an EV, and the fire can be extinguished with the same extinguishing tactic and time consumed like a fire in a conventional diesel/gasoline car.

Ordforklaringer

Thermal runaway	Thermal runaway er en selvforsterkende, eksoterm reaksjon som produserer mye varme. Reaksjonen oppstår når temperaturen i en battericelle kommer opp i 130 – 250 °C, og består av nedbryting av anode, katode og elektrolytt. Temperaturgrensen for thermal runaway varierer mellom ulike batterikjemier. Reaksjonen fører i mange tilfeller til at battericellen begynner å brenne. I slike tilfeller er det den brennbare elektrolytten eller brennbar gass som er dannet som brenner. Reaksjonen er svært vanskelig å stoppe. Å stoppe en brann der thermal runaway har oppstått innebærer å kjøle ned naboliggende celler slik at thermal runaway ikke initieres der.
Modul	Et stort batteri består av flere atskilte moduler. Modulene er serie- og parallellkoblede for å oppnå ønsket spenning og kapasitet. Hver modul består igjen av flere enkeltceller, som også er koblet i serie- og parallell. I moderne elbilbatterier er modulene designet slik at en brann i en modul ideelt sett ikke skal spre seg fra en modul til en annen.
Li-ion	Litium-ion
Li-ion celle	Et Li-ion batteri består som oftest av mange Li-ion celler. Kort fortalt fungerer batteriet ved at Li-ioner beveger seg fra katoden (den negative elektroden) til anoden (den positive elektroden) gjennom en elektrolytt. Elektronene beveger seg i en sløyfe utenfor, og leverer strøm. Les mer om hvordan en Li-ion celle fungerer i Vedlegg D.
NMC-katode	En NMC-katode er en katode som består av en blanding av nikkel, magnesium og kobolt, sammen med litium og oksygen (LiNiMnCoO ₂).
Pose-celle	En pose-celle er en type batteriinnpakning som kan minne om en vakuumpakket kaffepose. Ved thermal runaway vil posen blåse seg opp, og til slutt sprekke dersom gasstrykket blir for stort.
BMS	BMS (<i>Battery Management System</i>) er batteriets overvåkingssystem. Dette systemet overvåker batteriets tilstand, og passer på at cellespenningen fordeles jevnt over alle celler.
Solid electrolyte interface	En solid electrolyte interface er et beskyttende sjikt på anoden i en Li-ion celle, som gjør at elektrolytten ikke kan reagere direkte med anoden.

1 Bakgrunn

Antallet elbiler på veiene har hatt en sterk økning de siste årene. Batteridrevne kjøretøy har andre branntekniske egenskaper enn konvensjonelle biler. En tidligere rapport fra SP Fire Research konkluderte med at enkelte brannrelaterte problemstillinger knyttet til elbiler ikke er tilstrekkelig kartlagt [1].

Basert på tidligere testresultater [2] og samtaler med bilindustrien, er det mye som tyder på at elbilbatterier er godt beskyttet mot brann. Det er likevel et aktuelt spørsmål om elbilbatterier vil antennes som følge av kollisjon. I 2015 ble en bil påkjørt av toget og begynte å brenne to timer senere, idet den skulle flyttes opp på bergingsbilen [3]. Med det økende antallet elbiler på veiene, vil også faren for flere kollisjoner kunne øke.

Det har spesielt vært diskutert om det er vanskeligere å slokke en elbilbrann enn en brann i en konvensjonell bil, og hvor mye vann som kreves til slukkingen. Det finnes få åpne testrapporter der vannmengden for å slokke store batteripakker i realistiske forsøk har blitt målt. I en omfattende testserie ble det i tre forsøk brukt henholdsvis 4410, 6640 og 9990 liter vann til slukking [4]. Grunnen til den store mengden vann var at det var vanskelig å komme til med vann der det trengtes. Andre, mindre omfattende branntester av elbilbatterier rapporterer at det kreves mindre vann [5].

Det finnes også for lite dokumentert informasjon om hvor lett en brann kan spre seg til batteriet dersom bilen begynner å brenne som følge av oppvarming fra en ytre kilde (brannspredning, påtenning osv.). Dette er eksempelvis viktig informasjon for å kunne vurdere om det behøves ekstra sikringstiltak for elbiler i innelukkede parkeringskjellere.

For å bidra til å tette disse kunnskapshullene har SP Fire Research, sammen med blant annet Skien brann- og feievesen, Høgskolen i Sørøst-Norge og Grenland Energy, utført to fullskala branntester av elbiler. Testene gir indikasjoner på hvordan et elbilbatteriet kan antennes, og hvordan en elbilbrann kan utvikle seg og slokkes.

2 Forskningsspørsmål

Prosjektet har hatt som mål å gi indikative svar på følgende forskningsspørsmål:

Forskningsspørsmål 1: Vil et elbilbatteri kunne antenne av seg selv hvis bilen utsettes for en kraftig kollisjon?

For å besvare spørsmålet ble en kollisjon bakfra simulert ved å slippe en elbil i fritt fall en høyde på fra 20 m, med bakenden pekende nedover. Temperaturmålinger på batteripakken og visuelle observasjoner under og etter test ga grunnlag for å vurdere om det begynte å brenne i batteripakken.

Forskningsspørsmål 2: Hvor mye vann behøves for å slokke en elbilbrann der batteriet har nådd thermal runaway?

Spørsmålet ble undersøkt ved å måle vannforbruket som ble brukt for å slokke brannen som oppsto etter ekstern oppvarming fra undersiden av batteriet i el bilen. Brannen ble ansett som slokkt når alle synlige flammer var borte, temperaturmålinger var falt til under 100 °C og ingen videre temperaturøkning ble målt. Temperaturmålinger på batteripakken og visuelle observasjoner under og etter test ble benyttet til å vurdere om thermal runaway hadde oppstått i batteriet.

Mer informasjon om bilene og batteriene finnes i kapittel 3.1 og vedlegg A.

3 Materialer og metode

3.1 Testmateriale – bil og batteri

De to elbilene som ble benyttet i dette prosjektet var ombygde, importerte biler, med modellnavn Tata Indica GLX, som vist i Figur 3-1. Bilene ble importert fra India og bensinmotoren ble deretter erstattet med en elmotor og et batteri. På verdensbasis er det solgt omtrent 1,2 millioner av bensinmodellen [6].



Figur 3-1 Elbilene som ble benyttet var en Tata Indica GLX der bensinmotoren var erstattet med en elektrisk motor og et Li-ion batteri.

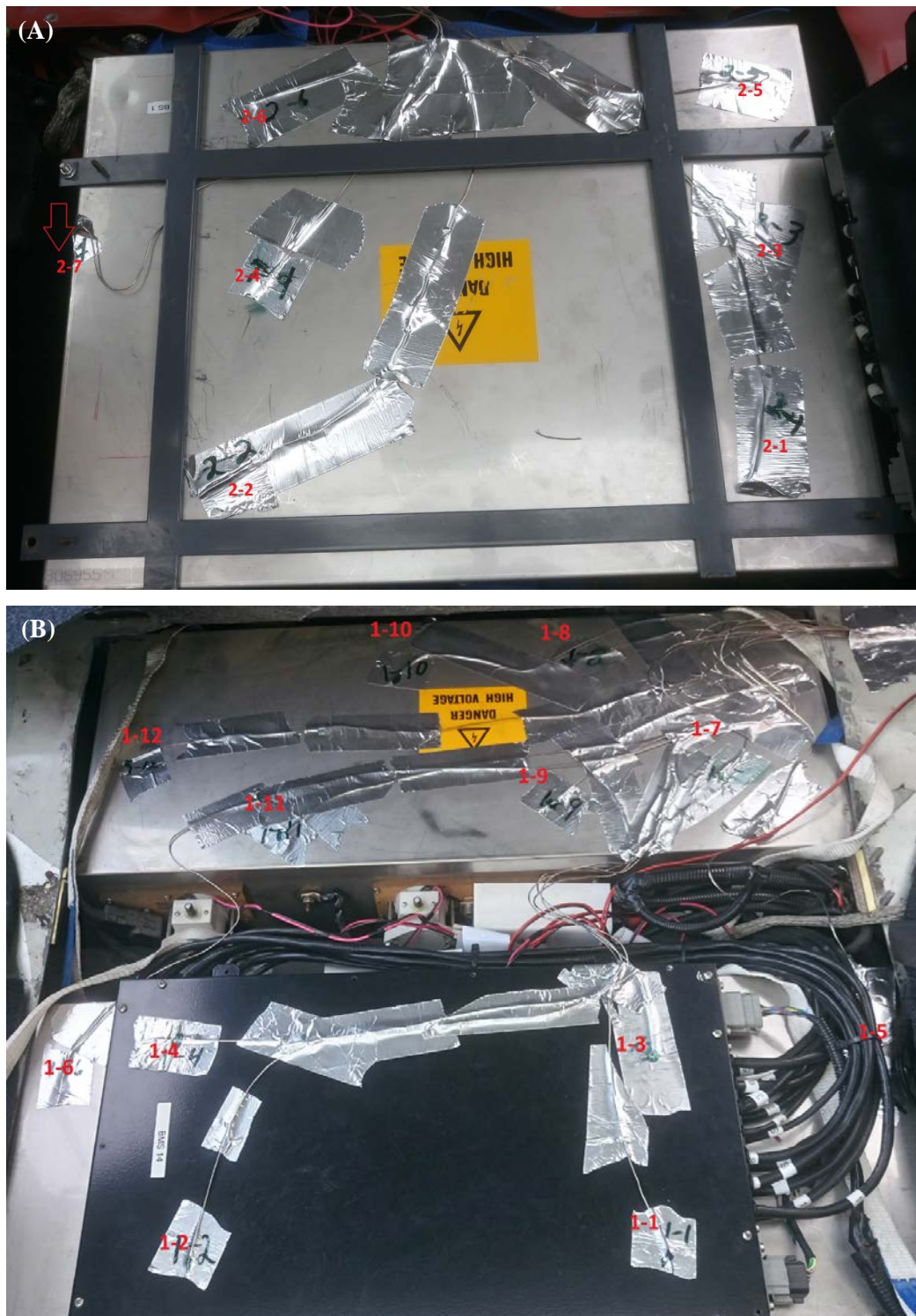
Elbilene var utstyrt med batteri av typen Li-ion batteri med NMC-katode, der cellene var såkalte «pose-celler». Batteriet var oppbygd av 12 moduler, der hver modul bestod av 30 celler. Batteriet hadde en kapasitet på 26 kWh. Batteriene var oppladet til ca. 60 % før testen. Figur 3-2 viser batteriet som ble benyttet i testene. Thermal runaway for celler med NMC-katode skjer ved ca. 210 – 220 °C [7]. Mer informasjon om Li-ion batteriet og dets egenskaper finnes i vedlegg A.



Figur 3-2 Batteriboks bestående av seks batterimoduler. Batteripakken som ble benyttet til elbilene i testene besto av to slike bokser, dvs. totalt 12 moduler. Hver batterimodul besto av 30 poseceller.

3.2 Instrumentering og testoppsett

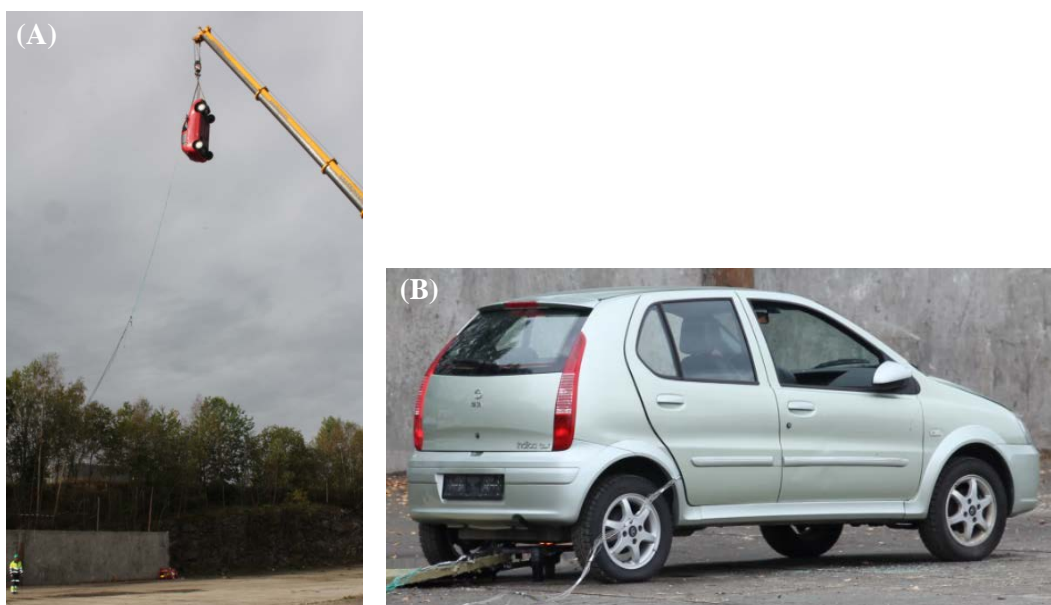
I begge testene ble det målt temperaturer som ble logget en gang i sekundet (1 Hz). Temperaturene ble målt med termoelementer av type K koblet til en datalogger av type Agilent Data Acquisition 34972A. På grunn av litt ulik tilkomst til batteriene i de to bilene, ble det benyttet ulikt antall termoelementer i test 1 og 2. Plasseringen av termoelementene på batteripakken i de to testene er vist i Figur 3-3. I tillegg var to termoelementer plassert inne i bilkupéen. Det ble også gjort videoopptak av testene.



Figur 3-3 Plassering av termoelementer på batteripakkene i test 1 (A) og test 2 (B).

I test 1 var målet å studere om batteriet ble antent ved en kraftig kollisjon bakfra. Figur 3-4 (A) viser bilen heist opp ved hjelp av en heisekran til en avstand på ca. 20 meter mellom bakken og bilens bakende, som pekte nedover. Bilen ble deretter sluppet i fritt fall på signal. Hastigheten til bilen når den traff bakken ble approksimert til 70 km/t, beregnet ved bruk av loven om energibevaring og antatt luftmotstand lik null.

I test 2 var målet å studere hvor mye vann som kreves for å slokke en elbilbrann, ved først å antenne batteriet ved ekstern oppvarming. Batteriet ble varmet opp med en liten propanbrenner plassert under bakre del av bilen, som vist i Figur 3-4 (B). Propanbrenneren ble skrudd av når bilen begynte å brenne selvstendig. Fra dette tidspunktet ble batteriet videre oppvarmet kun fra varmen fra brannen.



Figur 3-4 (A) viser testoppsettet for test 1, der bilen henger ca. 20 meter over bakken, og er klar for å bli sluppet i fritt fall mot bakken. (B) viser testoppsettet for test 2, der batteriet varmes med en liten propanflamme fra undersiden.

3.3 Visuelle observasjoner

Visuelle observasjoner av testforløpene ble utført ved fysisk tilstedeværelse under test, og fra opptak med videokameraer plassert i ulike vinkler. De visuelle undersøkelsene av tilstanden til batteriene etter test ble utført av Skien brann- og feievesen.

4 Resultater

4.1 Test 1

Bilen ble sluppet fra 20 m, og det begynte å ryke kraftig fra bilen like etter at den traff bakken. Etter ca. 7 minutter begynte bilen å brenne med synlige flammer, og den fikk deretter brenne fritt. Brannen var sløkket 2,5 timer etter at bilen ble sluppet, men temperaturen ble fremdeles målt til mellom 310 °C og 540 °C på ulike deler av batteripakken.

Detaljert informasjon om observasjoner under testen finnes i Tabell 4-1. Temperaturutviklingen under testen på oversiden av batteripakken er vist i Figur 4-1 og Figur 4-2. Se Figur 3-3 (A) for plassering av de nummererte termoelementene 2_1 – 2_6. Bilder fra testen finnes i vedlegg B. En kort film av forsøket er tilgjengelig på YouTube¹.

Tabell 4-1 Visuelle observasjoner gjort under test 1.

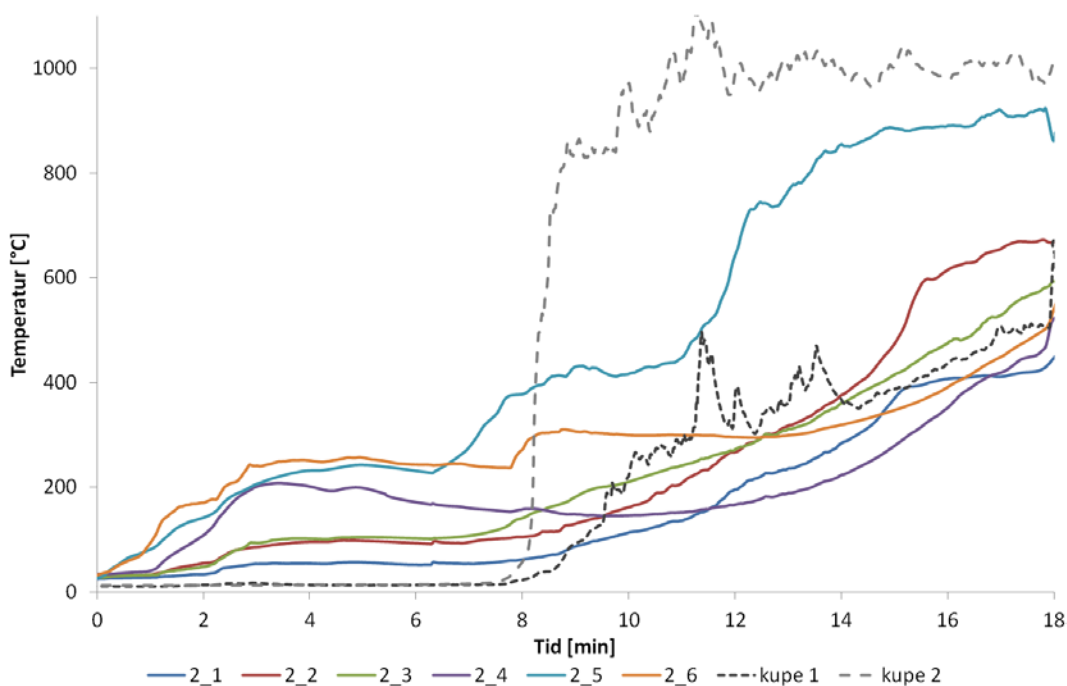
Tid [mm:ss]	Observasjon
00:00	Bil slippes fra 20 m.
00:20	Gråhvit røyk kommer til syne under bilen. Det er tydelig å se at røyken kommer fra batteriet.
00:50	Røymengden øker stadig.
01:50	Røyken blir mørkere, og det er stadig kraftig røykutvikling. Det observeres foreløpig ingen flammer.
03:40	Røyken blir hvitere igjen. Røyken har avtatt mye.
04:58	Røyken blir mørkere.
06:10	Røyken er helt hvit. Røykproduksjonen avtar stadig.
06:50	Flammer observeres for første gang.
06:55	Røykproduksjonen har avtatt betraktelig, mens brannen tar seg opp.
07:30	Brannen er foreløpig lokalisert til bakre del av bilen, men sprer seg raskt.
08:15	Bilen er overtent. Det kommer flammer ut fra alle åpninger.
09:40	Det er nå kraftig sort røyk.
18:00	Det brenner fortsatt i kupéen og under bilen. Brannen har avtatt noe.
20:00	Brannen har tydelig avtatt fra maksimal intensitet.
22:00	Brannen sprer seg nå til ytersiden av fronten på bilen.
23:00	Brannen har tatt seg opp noe i intensitet.
24:30	Det er hovedsakelig batteriet og fronten på bilen som brenner.
30:30	Det brenner fortsatt godt i fronten. Kupéen er så godt som sløkket.
150:00	Brannen er sløkket.

Figur 4-1 viser temperaturutviklingen for de første 18 minuttene av testen. For tre av termoelementene (2_4, 2_5 og 2_6) økte temperaturen kraftig de første minuttene etter teststart, og var mellom 200 – 250 °C etter ca. 3 minutter. Temperaturøkningen for de resterende termoelementene på batteripakken (2_1, 2_2 og 2_3) var mer langsom, med en temperatur på mellom 50 – 100 °C etter ca. 3 minutter. I perioden mellom 3 og 6 minutter etter teststart var temperaturen stabil for de fleste termoelementene, bortsett fra TC 2_4, som sank noe i temperatur. Ved 06:20 minutter økte temperaturen i TC 2_5 kraftig igjen.

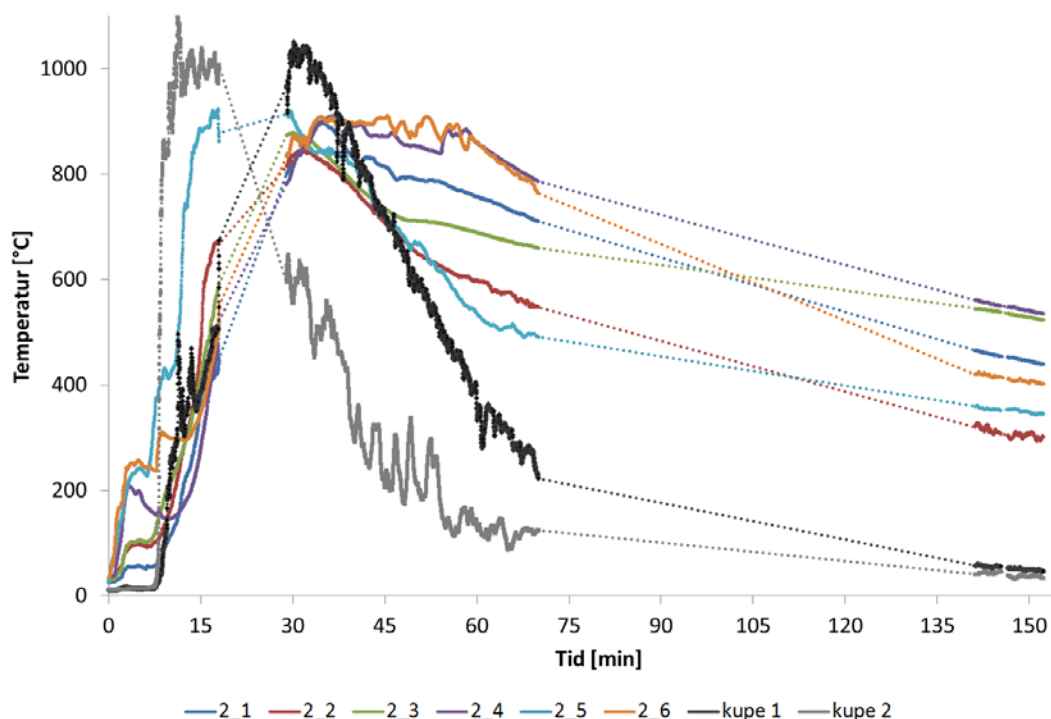
¹ <https://www.youtube.com/watch?v=-EhjY3Mb7uA&feature=share> besøkt 08.februar 2017.

Det samme skjedde for TC 2_6 ved 07:45 minutter etter teststart, omtrent samtidig som det ble observert full overtenning i kupéen, som frem til dette tidspunktet hadde stabilt lav temperatur. Etter dette tidspunktet økte samtlige temperaturer på batteripakken.

Figur 4-2 viser temperaturutviklingen gjennom hele testen. I to perioder ble temperaturen ikke logget. Fra figuren kan man se at alle termoelementene på batteripakken hadde sin maksimale temperatur mellom 16 og 35 minutter. Videoopptak viser at brannen allerede hadde avtatt mye på dette tidspunktet, og det brant hovedsakelig i fronten av bilen. Fra dette tidspunktet begynte temperaturene målt på batteripakka å synke, men sank mye saktere enn temperaturene i kupéen. Temperaturen målt på batteriet var mellom 310 og 540 °C 150 minutter etter teststart.

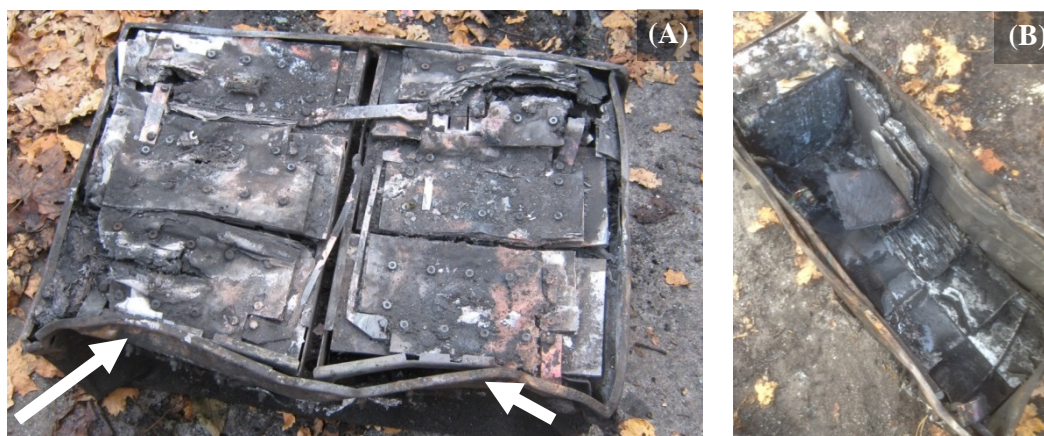


Figur 4-1 Temperaturutvikling målt på batteripakken fra 0 til 18 minutter etter teststart. Kurvene viser temperaturer for seks termoelementer (2_1 – 2_6) montert på oversiden av batteripakken og to termoelementer (kupe 1 og kupe 2) i bilkupéen.



Figur 4-2 Temperaturutvikling gjennom hele testen. Kurvene viser temperaturer for seks termoelementer (2_1 – 2_6) på oversiden av batteripakken og to termoelementer (kupe 1 og kupe 2) montert i bilkupéen. I to perioder (ca- 18 – 29 min og 70 – 141 minutter, markert med stiplede linjer) ble temperaturene ikke logget.

Omtrent tre uker etter testen ble batteriet fjernet fra bilen. Visuelle undersøkelser viste at batteriet var fullstendig forbrent, og at det ikke var noen intakte celler igjen. Figur 4-3 viser batteripakken etter test.



Figur 4-3 Batteriet ca. tre uker etter test. (A) viser den ene boksen i batteripakken (seks av totalt 12 moduler), der batteriet var totalt utbrent. Bortsett fra to tydelige hakk (vist med piler i figuren), var batteripakken nokså hel, til tross for det kraftige sammenstøtet den hadde blitt utsatt for. (B) viser den andre boksen i batteripakken (seks av totalt 12 moduler), der cellene var fullstendig ødelagte. Den øverste modulen i bildet er ikke demontert, mens de andre fem modulene er plukket fra hverandre.

4.2 Test 2

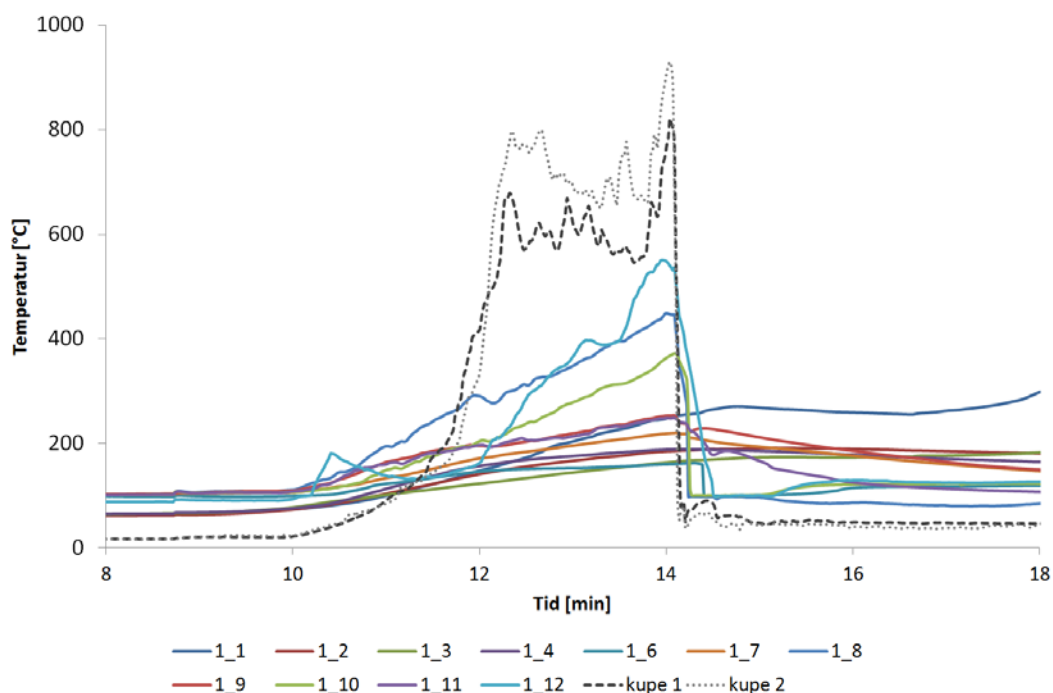
Elbilen og batteriet ble utsatt for ekstern varme fra en propanbrenner, og det begynte å brenne i bilen etter ca. 10 minutter. Etter ca. 12 minutter ble propanbrenneren fjernet. Det ble gjennomført sløkkeforsøk i to omganger. Sløkkeforsøk 1 ble iverksatt etter 13:37 minutter. Flammene ble raskt slokkes, men brannen reantente etter kort tid. Sløkkeforsøk 2 ble gjennomført 27:20 minutter etter teststart, og etter dette tok ikke brannen seg opp igjen. Detaljert informasjon om observasjoner under testen finnes i Tabell 4-2. Temperaturutviklingen er vist i Figur 4-4 og Figur 4-5. Se Figur 3-3 (B) for plassering av de nummererte termoelementene. Bilder fra testen finnes i Vedlegg C.

Tabell 4-2 Visuelle observasjoner gjort under test 2.

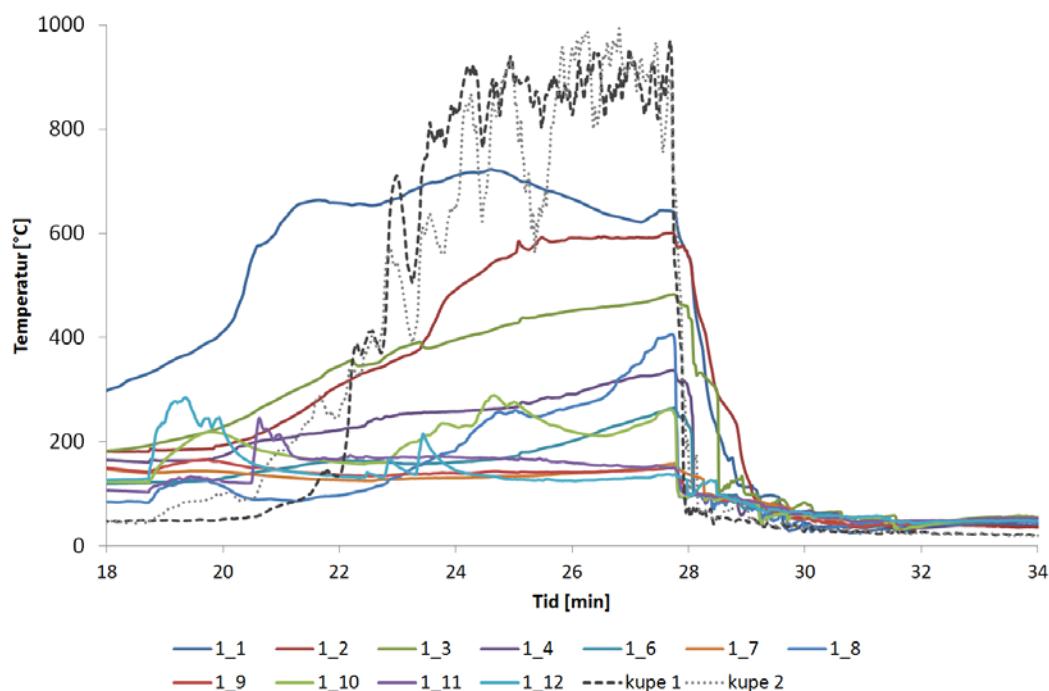
Tid [mm:ss]	Observasjon
00:00	Propanbrenner antennes. Temperaturen på termoelementene ligger mellom 60 og 100 °C.
01:00	Små mengder røyk observeres under bilen.
02:00	Røykproduksjon fra under bilen blir kraftigere.
04:00	Røykproduksjonen har ikke økt ytterligere.
09:20	Røyk kommer hovedsakelig ut fra vinduer. Røyken fra under bilen har avtatt.
09:57	Brann har oppstått inne i kupéen.
10:41	Det er kraftig røykutvikling og noen flammer observeres.
12:10	Propanbrenneren fjernes.
12:24	Kraftige flammer kommer ut gjennom sidevinduene foran.
13:37	Slokking (slokkeforsøk 1) iverksettes. Alle synlige flammer slokkes. Slokking foregår gjennom ødelagte vinduer og fra undersiden av bilen. Ca. 100 liter vann blir brukt.
14:10	Slokkeforsøk 1 avsluttes. Mye hvit røyk kommer fra bilen, det meste er trolig vanndamp.
15:20	Det kommer mindre røyk fra bilen. Røyken her skyldes en tidlig fase av brannen.
16:00	Nye flammer oppstår i bagasjerommet, rett over batteripakken.
18:15	Det brenner kraftig i bagasjerommet og noe innover i kupéen.
20:46	Det brenner nå kraftig på utsiden/baksiden av bilen.
22:22	Hele bakre del av bilen er omkranset av flammer.
23:33	Alt av interiør er overtent.
25:43	Airbag eksploderer.
27:20	Slokking (slokkeforsøk 2) iverksettes på ny. Det er vanskeligere å slokke flammene rundt batteriet denne gangen.
28:31	Flammer observeres for siste gang.
31:40	Slokkeforsøk 2 avsluttes.

Figur 4-4 viser temperaturutviklingen under slukkeforsøk 1, som ble iverksatt etter 13:37 minutter og varte i 33 s. Rett før slukking var det full overtenning i kupéen og flere av termoelementene hadde temperaturer over kritisk grense for thermal runaway. I slukkeforsøket ble alle synlige flammer slokket, men det ble ikke utført etterslukking. Totalt i slukkeforsøk 1 ble det brukt ca. 100 liter vann. Etter kort tid tok brannen seg opp igjen, først i bagasjerommet (over batteriet), og deretter videre i kupéen. Fra videoopptak kan man se at det brant kraftig i bagasjerommet over batteriet ved ca. 16 minutter, selv om dette ikke indikeres tydelig fra temperaturkurvene.

Figur 4-4 viser temperaturutviklingen under slukkeforsøk 2, som ble iverksatt 27:20 minutter etter teststart og varte i 4:20 minutter. I dette slukkeforsøket var det noe mer utfordrende å slukke flammene, men likevel gjennomførbart. Etter at de synlige flammene var slokket, ble det også etterslokket i flere minutter. Slukkingen ble kun gjennomført på steder hvor det normalt er lett å komme til enhver bil; gjennom ødelagte vinduer, opp i hjulbrønnen og fra under bilen. Totalt i slukkeforsøk 2 ble det brukt ca. 550 liter vann. Etter dette slukkeforsøket ble det ikke observert temperaturøkning på batteripakken, og brannen ble erklært slokket.



Figur 4-4 Temperaturutvikling under slukkeforsøk 1. Kurvene viser temperaturer for 11 termoelementer (1_1 –1_4 og 1_6 – 1_12) montert på oversiden av batteripakken og to termoelementer (kupe 1 og kupe 2) i kupéen. Termoelement 1_5 ble ødelagt under testen og er ikke inkludert.



Figur 4-5 Temperaturutvikling under slukkeforsøk 2. Kurvene viser temperaturer for 11 termoelementer (1_1 –1_4 og 1_6 – 1_12) montert på oversiden av batteripakken og to termoelementer (kupe 1 og kupe 2) i kupéen. Termoelement 1_5 ble ødelagt under testen og er ikke inkludert.

Omtrent tre uker etter testen ble batteriet hentet ut fra bilen. Visuelle undersøkelser viste at batteripakkene var blitt utsatt for kraftig varme, men ikke hadde begynt å brenne. Spenningen på batteripakken ble målt til 90 volt. Batteriet ble ikke plukket fra hverandre, og enkeltceller ble derfor ikke vurdert. Figur 4-6 viser batteriet etter test.



Figur 4-6 En del av batteripakken ca. tre uker etter test. Kablene er delvis smeltet, men ellers er det ingen tegn til at en brann har funnet sted. Dersom cellene hadde brent, ville batteriet ha hatt tydelige sotmerker. Fraværet av sotmerker tyder på at varmepåvirkningen har skjedd via strålevarme ovenfra, og ikke fra battericellene selv.

5 Diskusjon

Det ble kun utført én test for hvert scenario. Resultatene kan gi oss indikative svar, men har samtidig et begrenset gyldighetsområde. Det er derfor viktig at resultatene blir sammenlignet med annen informasjon som finnes, og ikke blir gjeldende som en fasit for disse problemstillingene.

5.1 Test 1

5.1.1 Lærdom fra test 1

Målet med test 1 var å gi et indikativt svar på om et elbilbatteri antenner av seg selv hvis bilen utsettes for en kraftig kollisjon. Resultatene indikerer at dette kan skje, ved at elbilbatteriet i elbilen ble antent som følge av den kraftige mekaniske påkjenningen fra sammenstøtet med bakken etter det frie fallet. Det ble konkludert med at termoelementene ble oppvarmet på grunn av varme fra eksoterme reaksjoner i batteriet og ikke på grunn av brannen på utsiden av batteriet. Bakgrunnen for konklusjonen var at batteriet fremdeles hadde en temperatur på mellom 310 og 540 °C etter at resten av bilen var fullstendig utbrent, noe som viser at det har skjedd en kjemisk reaksjon inne i batteriet, og at den fortsatte etter testen. At batteriet holdt en så høy temperatur i lang tid etter at resten av bilen var utbrent, kan være viktig informasjon i forbindelse med bilberging og oppbevaring av kjøretøyet etter test.

Basert på resultatet fra testen, er det imidlertid ikke mulig å si på et generelt grunnlag at elbilbatterier vil antenne etter en kollisjon eller annen mekanisk påkjenning. Dette skyldes at batterier har ulik plassering i ulike biler, ulik grad av kollisjonsbeskyttelse og ulik batterikjemi.

I testen traff bilen bakken i ca. 70 km/t med bakenden først. Siden batteriet befant seg i bakre del av bilen, ble en mekanisk påkjenning bakfra vurdert til å være den mest ugunstige posisjonen med hensyn til skade på batteriet. Dersom bilen hadde blitt sluppet med fronten først, er det ikke sikkert at resultatet ville blitt det samme. Hvilken side av bilen som er den mest ugunstige å bli påkjørt fra med hensyn til brann i batteriet, vil variere for ulike biltyper, ut fra hvor batteriet er plassert og hvordan det er beskyttet.

Batterikjemien i batteriene ligner på hva som ellers finnes på markedet, og resultatene er derfor til en viss grad overførbare til andre elbiler. Elbiler kan imidlertid også ha ulike plasseringer av batteriet, og ulike batteripakker kan ha ulike beskyttelser mot omgivelser og mellom battericeller. Testen gir derfor ikke svar på hvor kraftig en kollisjon må være for å forårsake at batteriet i andre typer elbiler skal begynne å avgi gass eller brenne.

En viktig faktor som skiller elbilen i denne testen fra en mer moderne elbil, er at moderne elbiler er produsert som elbiler. Elbilen i denne testen var ombygd med ettermontert batteri, noe som kan ha betydning for hvor godt beskyttet batteriet var.

Alle biler blir testet gjennom ulike testinstanser (Euro NCAP[8], ADAC [9] mfl.). Dersom det er et stort problem at elbiler begynner å brenne som følge av kollisjon, burde dette allerede ha vært avdekket gjennom slike tester. På den annen side vil ikke de standardiserte testseriene fange opp alle mulige sammenstøt som kan oppstå, og enkelte hendelser [3] [10] [11] bekrefter aktualiteten ved dette temaet. Redningspersonell bør derfor få nødvendig opplæring i hvordan elbiler som har blitt utsatt for ulykker skal håndteres.

5.1.2 Temperatur- og røykutvikling

Gass- og røykproduksjon

Gassproduksjon ble ikke målt under testen. At det produseres gass fra batteriet er imidlertid et forventet forløp dersom man antar at en eller flere celler har fått en fysisk skade. En fysisk skade på batteriet kan føre til kortslutninger internt i battericeller eller skape kortslutninger i batteripakken, hvorav begge fører til varmeproduksjon. Når temperaturen i en celle øker, begynner en rekke ulike reaksjoner å skje. Ved 90 – 120 °C kan et beskyttende lag (*solid electrolyte interface*) på anoden begynne å dekomponere eksotermt. Ved temperaturer over 120 °C kan elektrolytten reagere direkte med anoden. Ved ytterligere økt temperatur vil elektrolytten begynne å dekomponere. Alle disse reaksjonene produserer varme og ulike gasser. Kjente gasser som dannes er CO₂, H₂, CO, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, HF og POF₃ [7][12][13][14]. Det faktum at store mengder røyk ble produsert like etter sammenstøtet med bakken, og før synlige flammer ble observert, er derfor et tegn på at thermal runaway pågikk eller var i ferd med å begynne.

Thermal runaway

Thermal runaway skjer normalt når temperaturen i en celle overgår 210 – 220 °C (for NMC-katode) [7]. Det er vanskelig å si nøyaktig når thermal runaway oppsto i de ulike delene av batteriet, men mye tyder på at det oppsto et sted i nærheten av termoelementene 2_5 og 2_6 (se Figur 3-3A) ganske umiddelbart etter sammenstøtet. At det ikke brant i bilen 3 minutter etter teststart, betyr at all varmeøkning i termoelementene skyldtes varmepåvirkning fra batteriet. Temperaturen i termoelement 2_6 var 250 °C etter 3 minutter, og det kan derfor antas at temperaturen et sted i batteripakken var høyere. Dette er over grensen for når thermal runaway er forventet å skje for Li-ion batterier med NMC-katode, og er derfor et godt argument for at thermal runaway har oppstått allerede på dette tidspunktet i minst én celle.

Temperaturmålinger

I perioden 03:00 – 06:20 minutter var temperaturene relativt stabile, og synkende for termoelement 2_4. De mest sannsynlige årsakene til denne utviklingen er følgende:

1. Perioden 00:00 – 03:00 minutter etter teststart: Enkelte celler hadde nådd *thermal runaway* som følge av skadene fra sammenstøtet, og produserte varme som ble overført til nærliggende celler i perioden fram til 3 minutter etter teststart.
2. Perioden 03:00 – 06:20 minutter etter teststart: Etter 3 minutter produserte ikke lenger cellene som hadde nådd *thermal runaway* nok energi til å øke temperaturen i nærliggende celler ytterligere. Varmen som ble produsert varmet imidlertid opp nærliggende celler nok til at eksoterme reaksjoner startet (temperatur > 90 °C), selv om *thermal runaway* foreløpig ikke hadde oppstått. De eksoterme reaksjonene produserte nok varme til at temperaturen holdt seg konstant, men ikke nok til å øke temperaturen ytterligere. De kjemiske reaksjonene produserte imidlertid mye røyk, noe som er et tydelig tegn på at eksoterme reaksjoner foregikk i cellene.
3. Ved tidspunkt 06:20 minutter etter teststart økte plutselig temperaturen kraftig i nærheten av termoelement 2_5. Dette tyder på at flere celler i dette området hadde nådd *thermal runaway* og produserte mye varme. Varmen var tilstrekkelig til å antenne interiøret i bilen, og de første flammene ble observert ved tidspunkt 06:50 minutter etter teststart. Brannen bidro deretter ytterligere til å varme opp resten av cellene.

5.1.3 Evaluering av testoppsettet

En kollisjon ble simulert ved at bilen ble heist opp med en heisekran til 20 meter høyde, og deretter sluppet i fritt fall med bakenden pekende nedover. Hastigheten bilen traff bakken med ble beregnet til ca. 70 km/t, og kan sammenlignes med en kraftig påkjørsel bakfra. Den simulerte kollisjonen anses som realistisk i forhold til en reell kollisjon.

Elbilene som ble brukt i testene var produsert som bensinbiler, og deretter bygd om til elbiler. De er derfor ikke fullstendig representative for de moderne elbilene som finnes på markedet, som i stor grad² blir bygd som elbiler fra grunnen av. Dette kan utgjøre en betydelig forskjell med hensyn til hvor godt batteriene er beskyttet mot en kollisjon. Det er derfor mulig at moderne elbiler tåler kraftigere mekanisk påkjenning enn de ombygde bilene i disse testene, uten at batteriet tar skade.

5.2 Test 2

5.2.1 Lærdom fra test 2

Målet med test 2 var å gi et indikativt svar på hvor mye vann som behøves for å slokke en elbilbrann der batteriet har nådd thermal runaway. Thermal runaway skulle initieres ved bruk av en ekstern varmekilde.

Den visuelle undersøkelsen viste at batteriet hadde blitt utsatt for stor varme, men ikke nok til at det begynte å brenne i batteriet. Ved i tillegg å legge temperaturkurvene til grunn, har vi konkludert med at thermal runaway ikke fant sted i batteriet, og testen ga dermed ikke svar på hvor mye vann som trengs for å slokke en batteribrann i en elbil. Testen viser imidlertid at en brann i en elbil ikke nødvendigvis er utfordrende å slokke, fordi selv om bilen er fullstendig overtent, brenner ikke nødvendigvis batteriet. En brann i en elbil der ikke elbilbatteriet er involvert i brannen, kan slokkes med samme innsatsmetode og tidsforbruk som en brann i en konvensjonell bensin-/dieselbil.

De høyeste temperaturene målt på batteripakken skyldtes påvirkning fra selve brannen (fra interiør osv.), og er ikke resultat av varmeproduksjon i batteriet. Det ble målt temperaturer på over 600 °C på oversiden av batteripakken i en periode på 8 minutter. Til tross for denne varmepåkjenningen ovenfra, og i tillegg brannen på undersiden av bilen som følge av brennende komponenter som falt ned, var ikke dette tilstrekkelig til at temperaturen i battericellene ble høy nok til å initiere thermal runaway.

Et elbilbatteri er normalt godt beskyttet og har få brennbare komponenter rundt seg. I tillegg er en plassering av batteriene lavt i bilen fordelaktig med hensyn til brann, siden varmen fra en brann stiger oppover. Dette bidrar til å begrense hvor mye varme som overføres fra en brann i selve bilen til battericellene. På grunn av ulike batteridesign og batterikjemier vil det kunne variere mellom ulike bilmodeller hvor lett en battericelle antenner, og hvor lett brannen kan spre seg mellom celler og mellom moduler.

For å vurdere resultatene fra dette prosjektet i en større kontekst er det interessant å sammenligne resultatene med tidligere utførte studier.

² VW Golf er et unntak der en eksisterende modell har blitt redesignet til en elbilutgave.

- I Japan [2] ble støtfangeren til en Nissan Leaf påtent med 80 g brennbar væske. Brannen spredte seg langs utsiden av bilen etter ca. 9 minutter. Resultatene indikerer at thermal runaway oppstod i batteriet først etter 37 minutter, da en kraftig jetflamme skjøt ut fra batteriet. På samme tid falt spenningen over batteriet fra 400 til 150 volt.
- I Haugesund [15] ble en Peugeot iOn 2012-modell antent med en 30 kW propanbrenner. Propanbrenneren ble plassert rett under bilen pekende opp mot der batteriet var plassert. Et plastdeksel beskyttet undersiden av batteripakken. Flamme ble observert i bilen etter 9:30 minutter, og batteriet ble vurdert til å begynne å brenne omtrent samtidig. Det ble ikke foretatt slokking og bilen fikk brenne ut. Batteriet ble undersøkt etter testen, og det ble bekreftet at alle cellene hadde oppnådd thermal runaway og var utbrente.
- I en testserie fra Canada [16] ble det utført sju branntester på tre elbiler, to plug-in hybrider og to bensinbiler. Brannen ble igangsatt ved bruk av en 2 MW propanbrenner, og batteriet tok fyr etter ca. 7 minutter. Batteripakken var atskilt fra brenneren kun med et tynt plastdeksel. Dekselet brant raskt bort slik at batteripakken ble direkte eksponert for flammen.

De nevnte testene viser at tiden det tar før et batteri antenner kan variere. I test 2 i denne rapporten ble batteriet eksponert for propanflammen i 12 minutter uten at batteriet antente. Selv om testene fra Canada og Haugesund viser at batterier kan begynne å brenne allerede etter 7 – 10 minutter, viser den japanske testen at det kan ta så lang tid som 37 minutter. Grunnen til forskjellene kan eksempelvis være følgende:

- **Batteriene var ulikt beskyttet:**
Hvordan batteriet er beskyttet vil ha innvirkning på hvor raskt batteriet varmes opp. I testene fra Haugesund og Canada var batteripakken kun beskyttet med et tynt plastdeksel fra undersiden av bilen. Når plastdekselet blir direkte eksponert for en flamme og brenner, vil beskyttelsen svekkes.
- **Varmeeksponeringen var ulik:**
I test 2 i denne rapporten var det brukt en liten propanflamme rettet mot batteriet, som etter hvert ble avløst av en kraftig brann over og under batteriet. I testen fra Canada ble det brukt en 2 MW propanbrenner, i testen fra Haugesund en 30 kW propanbrenner, mens i testen fra Japan ble støtfangeren på bilen påtent. Test 2 i denne rapporten og testen fra Japan skiller seg fra de andre ved at batteriet hovedsakelig ble oppvarmet ved at bilen brant, mens i de to andre testene var det påført en svært kraftig lokal oppvarming. Testen fra Japan er den mest realistiske med hensyn til å etterligne et reelt brannscenario, siden bilen i størst grad fikk brenne av seg selv.
- **Batteriet var ulikt oppladet:**
Det er påvist en sammenheng mellom ladenivået og reaktiviteten til et batteri [17]. Sammenlignet med et utladet batteri, vil et fulladet batteri være mer reaktivt både med hensyn til varmeavgivelse og å initiere thermal runaway. I test 1 og 2 i denne rapporten var batteriene oppladet til ca. 60 %, mens i testene fra Canada, Haugesund og Japan var batteriene oppladet til 85 og 100 %. Batterienes ladenivå kan derfor ha hatt noe å si for resultatet. Det er også verdt å nevne at batteriene i test 1 og 2 ble ladet opp utenfor BMS-systemet, slik at celledspenningen kan ha vært noe ujevn. Les mer om ladingen av batteriene i kapittel 5.4.

- **Batteriene hadde ulik batterikjemi:**
En viktig faktor som påvirker hvor reaktive battericeller er, er hvilken materialsammensetning de består av. Ulike batterikjemier har forskjellig grense for thermal runaway og ulik grad av energitetthet. Normalt vil et batteri med høy energitetthet være mer utsatt for at thermal runaway oppstår. Batterikjemien for testene fra Canada er ikke oppgitt, mens i de andre testene er det brukt batterier som har høy grense for thermal runaway og er vurdert til å være sikre batterier. Les mer om ulike batterikjemier og thermal runaway i vedlegg D.2.

Forskjellene mellom resultatene fra test 2 og tidligere studier underbygger viktigheten av å gjennomføre flere tester innenfor dette feltet.

Det viktigste resultatet fra test 2 er at elbilbatteriet ikke nødvendigvis antennes når en elbil er fullstendig overtent. Hvis det gjennom ytterligere testing kan vises at brann i en elbil som følge av en ytre faktor (brannspredning, påtenning osv.), generelt ikke initierer thermal runaway i batteriet, og dermed kan slokkes som med samme innsatsmetode og tidsforbruk som en brann i en konvensjonell bensin-/dieselbil, vil dette være viktig informasjon om hvordan brannsikkerheten i for eksempel parkeringskjellere skal vurderes. Hvis man ikke klarer å reprodusere resultatet fra test 2, er det viktig å fokusere på hvordan en batteribrann kan slokkes mest effektivt med minst mulig bruk av vann.

Bilprodusentene er stadig opptatt av forbedre bilene både med hensyn til ytelse og sikkerhet. Ved å velge batterikjemier med høy energitetthet vil ytelsen og rekkevidden kunne forbedres, mens sikkerheten blir dårligere fordi grensen for thermal runaway reduseres. For å kompensere for den reduserte sikkerheten, blir overvåkingssystemer og batterioppbygging designet spesielt med tanke på å ivareta sikkerheten.

5.2.2 Temperaturutvikling

Test 2 viste at temperaturen på batteripakken økte betydelig først når kupéen antente. Dette tyder på at den målte temperaturøkningen hovedsakelig skyldtes varme fra brannen og ikke eksoterme reaksjoner i batteriet. Termoelementene som ble hurtig oppvarmet av brannen, ble samtidig raskt nedkjølt ved slokking. De øvrige termoelementene viste ikke tilsvarende rask økning eller nedgang i temperatur. Det tyder på at de i mindre grad var påvirket av brannen og slokkevannet, og dermed ga et riktigere resultat for hvilken varmepåvirkning som kom fra batteriet.

Basert på de høye temperaturene som ble målt i løpet av testen, var det forventet at deler av batteripakken var oppvarmet over grensen for thermal runaway. Slokkeforsøk 2 hadde imidlertid ikke problemer med å stoppe denne prosessen, og temperaturen økte ikke etter slokkeforsøk 2. Fra tidligere batteritester der batteriet har nådd thermal runaway, har det vært utfordrende å stoppe temperaturutviklingen i batteriet. Dette underbygger konklusjonen om at cellene i batteriet ikke nådde thermal runaway. Alle celler ble ikke undersøkt etter testen, og vi kan derfor ikke utelukke at thermal runaway kan ha oppstått i et fåtall av celler. Vi kan imidlertid med sikkerhet si at majoriteten av cellene ikke nådde thermal runaway, og at det ikke var tegn etter brann på batteripakken etter testen.

De tre kaldeste termoelementene på batteripakken målte en temperatur mellom 130 – 150 °C like før slokkeforsøk 2, og ga trolig et riktigere bilde av hvor varmt det var i selve batteriet. Dette er over grensen for når eksoterme reaksjoner begynner å skje, men under grensen for når thermal runaway oppstår.

5.2.3 Slokking

Brannen ble nesten slokket med 100 liter vann i slokkeforsøk 1, og ble fullstendig slokket i slokkeforsøk 2 med ca. 550 liter vann. Siden vi antar at batteriet ikke nådde thermal runaway, er ikke dette resultatet overraskende, fordi en elbilbrann der batteriet ikke har nådd thermal runaway vil kunne slokkes med samme innsatsmetode som en brann i en bensin-/dieselbil.

Det er mulig at slokkingen ble igangsatt for tidlig og at thermal runaway ville blitt initiert hvis den eksterne oppvarmingen hadde pågått i lenger tid. Observasjonen av brannbildet, med full overtenning i mange minutter og temperaturmålinger som viste en temperatur godt over den kritiske grensen for thermal runaway, utgjorde grunnlaget for avgjørelsen om å slokke brannen på de valgte tidspunktene. Samtidig ville brannvesenet normalt ha vært på stedet etter dette tidsrommet i et reelt brannscenario.

5.2.4 Batteriets tilstand etter test

Etter test ble batteriet undersøkt visuelt. Det var helt tydelig at batteriet hadde blitt utsatt for en varmepåkjenning, men ikke hadde brent. Det faktum at 90 volt ble målt på batteriet tyder også på at deler av batteriet var tilnærmet uskadet. Samtidig hadde batteriet mistet en del spenning, noe som også tyder på at en del celler var gjennomgått en prosess slik at de ikke lenger var spenningsatt. Siden batteriet ikke ble plukket fullstendig fra hverandre, kan vi ikke utelukke at enkelte celler nådde thermal runaway. Uansett var det ikke blitt produsert tilstrekkelig varme til at thermal runaway var initiert i naboliggende celler. Hvis det hadde skjedd ville hele, eller en stor del av, batteripakken vært betydelig mer skadet.

5.3 Plassering av termoelementer

Siden bilen i test 1 ble utsatt for et kraftig sammenstøt, er det ikke utenkelig at termoelementene kan ha forskjøvet seg noe i forhold til den plasseringen de hadde initielt. Termoelement 2_7 sluttet å fungere i løpet av testen og er derfor ikke inkludert i resultatene. De øvrige termoelementene fungerte og oppførte seg tilsynelatende uavhengig av hverandre (temperaturen gikk opp og ned uavhengig av andre termoelementer). På bakgrunn av dette er det grunn til å tro at de ulike målte temperaturene gjenspeiler oppvarming av ulike områder av batteripakken, som igjen kan knyttes til ulike moduler i batteripakken. Siden termoelementene ble plassert oppå batteripakken og ikke rett på battericellene, vil det ha vært en viss forsinkelse mellom målt temperatur og reell temperatur i cellene. Forsinkelsen gjør at det er vanskelig å si nøyaktig når thermal runaway inntraff for de ulike modulene.

Også i test 2 var termoelementene plassert oppå batteripakken. At temperaturen til enkelte termoelementer økte og avtok med brannutviklingen i kupéen, tyder på at termoelementene både var oppvarmet av brannen og direkte nedkjølt av vann som ble brukt til å slokke brannen. Termoelementenes måleverdi var dermed ikke fullstendig representativt for hvor varmt det var inne i batteripakken. Enkelte termoelementer ble påvirket i mindre grad av både brannen og slokkevannet, og ga trolig en riktigere indikasjon på temperaturen inne i batteriet.

5.4 Batterienes tilstand før test

Batteriene som ble brukt hadde vært ubrukt i en lengre periode. Like før testene ble batteriene oppladet til 60 %. Oppladingen ble imidlertid utført utenfor BMS-systemet, slik at man ikke hadde kontroll på hvordan spenningen var fordelt på de ulike cellene. Ladefordelingen på hver enkelt celle kan derfor ha avviket noe fra gjennomsnittet. At enkelte celler var overladet, bekreftes i stor grad ved at temperaturen målt på batteripakken økte en del under lading. Temperaturen på batteriet i test 1 var mellom 26 og 34 °C etter lading, mens batteriet i test 2 var mellom 88 og 102 °C etter lading. Spesielt for batteriet i test 2, tyder dette på at det allerede var skjedd en reaksjon i batteriet.

6 Konklusjon

To elbiler av merke Tata Indica GLX, utstyrt med Li-ion batterier med en kapasitet på 26 kWh, har gjennom to fullskala branntester gitt informasjon om hvordan en elbil kan oppføre seg når den blir utsatt for en kraftig kollisjon, hvordan den brenner og hvordan batteriet kan påvirkes av en brann.

Resultatet fra test 1 viste at en elbil kan begynne å brenne som følge av en kraftig kollisjon. Det er imidlertid ikke grunnlag for å si om det samme ville skjedd for andre typer elbiler enn den som ble benyttet i denne testen. Om et elbilbatteri begynner å brenne vil kunne avhenge av en rekke faktorer, som energi i sammenstøtet, hvor sammenstøtet skjer, hvor i bilen batteriet er plassert og hvor godt det er beskyttet.

Resultatet fra test 2 viste at en fullt utviklet bilbrann ikke nødvendigvis vil antenne elbilbatteriet. Dersom resultatet kan reproduseres gjennom flere elbilbranntester, er det et viktig funn, og innebærer at elbiler som begynner å brenne som følge av en ytre faktor (spredning, påtenning osv.) i mange tilfeller kan slokkes med samme innsatsmetode og tidsforbruk som en brann i en konvensjonell bensin-/dieselbil. Dette vil kunne ha betydning for hvordan man eksempelvis vurderer risikobildet i en underjordisk parkeringskjeller.

Referanser

1. Reitan NK, Bøe A. Brannsikkerhet og alternative energibærere: El- og gasskjøretøy i innelukkede rom [Internet]. Trondheim, Norway: SP Fire Research AS; 2016 Feb. Report No.: A16 20096-1:1. Available from: <http://spfr.no/publikasjoner>
2. Watanabe N, Sugawa O, Suwa T, Ogawa Y. Comparison of fire behavior of an electric-battery-powered vehicle and gasoline-powered vehicle in real-scale fire test. In: Proceedings from 2nd International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2012. Chicago, USA: SP Technical Research Institute of Sweden; 2012. p. 195–206.
3. Bolstad K, Urstad T. Personbil påkjørt av toget i Råde. Moss Avis [Internet]. 2015 desember [cited 2017 Feb 10]; Available from: <https://www.moss-avis.no/nyheter/rade/togulykker/personbil-pakjort-av-toget-i-rade/s/5-67-193113>
4. Long jr. RT, Blum AF, Bress TJ. Best Practices for Emergency Response to Incidents Involving Electric Vehicles Battery Hazards: A Report on Full-Scale Testing Results [Internet]. NFPA; 2013 Jun. Available from: <http://www.nfpa.org/news-and-research/fire-statistics-and-reports/research-reports/for-emergency-responders/fireground-operations/emergency-response-to-incident-involving-electric-vehicle-battery-hazards>
5. DEKRA - Lithium-Ionen-Batterien stellen in Brandversuchen Sicherheit unter Beweis [Internet]. [cited 2015 Dec 11]. Available from: http://www.dekra.com/de/pressemitteilung?p_p_lifecycle=0&p_p_id=ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay&_ArticleDisplay_WAR_ArticleDisplay_articleID=24844066
6. Tata Motors celebrates the Indica's 10th anniversary with the launch of the limited edition of Indica Vista [Internet]. Tata Motors celebrates the Indica's 10th anniversary with the launch of the limited edition of Indica Vista. 2008 [cited 2016 Nov 28]. Available from: <https://web.archive.org/web/20131003101404/http://tata.com/company/releases/inside.aspx?artid=JRJI3w7xCQo=>
7. Golubkov AW, Fuchs D, Wagner J. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. R Soc Chem. 2014;4:3633–42.
8. EURO NCAP [Internet]. [cited 2016 Dec 1]. Available from: <http://www.euroncap.com/en/about-euro-ncap/>
9. ADAC [Internet]. [cited 2016 Dec 1]. Available from: <https://www.adac.de/sp/technikzentrum/en/crash-test-facility/default.aspx>
10. Smith B. Chevrolet Volt Battery Incident Overview Report. NHTSA; 2012. Report No.: DOT HS 811 573.
11. ChinaAutoWeb [Internet]. ChinaAutoWeb. 2012 [cited 2016 Dec 8]. Available from: <http://chinaautoweb.com/2012/05/three-byd-e6-passengers-killed-in-fiery-crash-spurring-ev-safety-concern/>
12. Spotnitz R, Franklin J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. J Power Sources. 2003 Jan 1;113(1):81–100.
13. Balakrishnan PG, Ramesh R, Prem Kumar T. Safety mechanisms in lithium-ion batteries. J Power Sources. 2006 Apr 21;155(2):401–14.

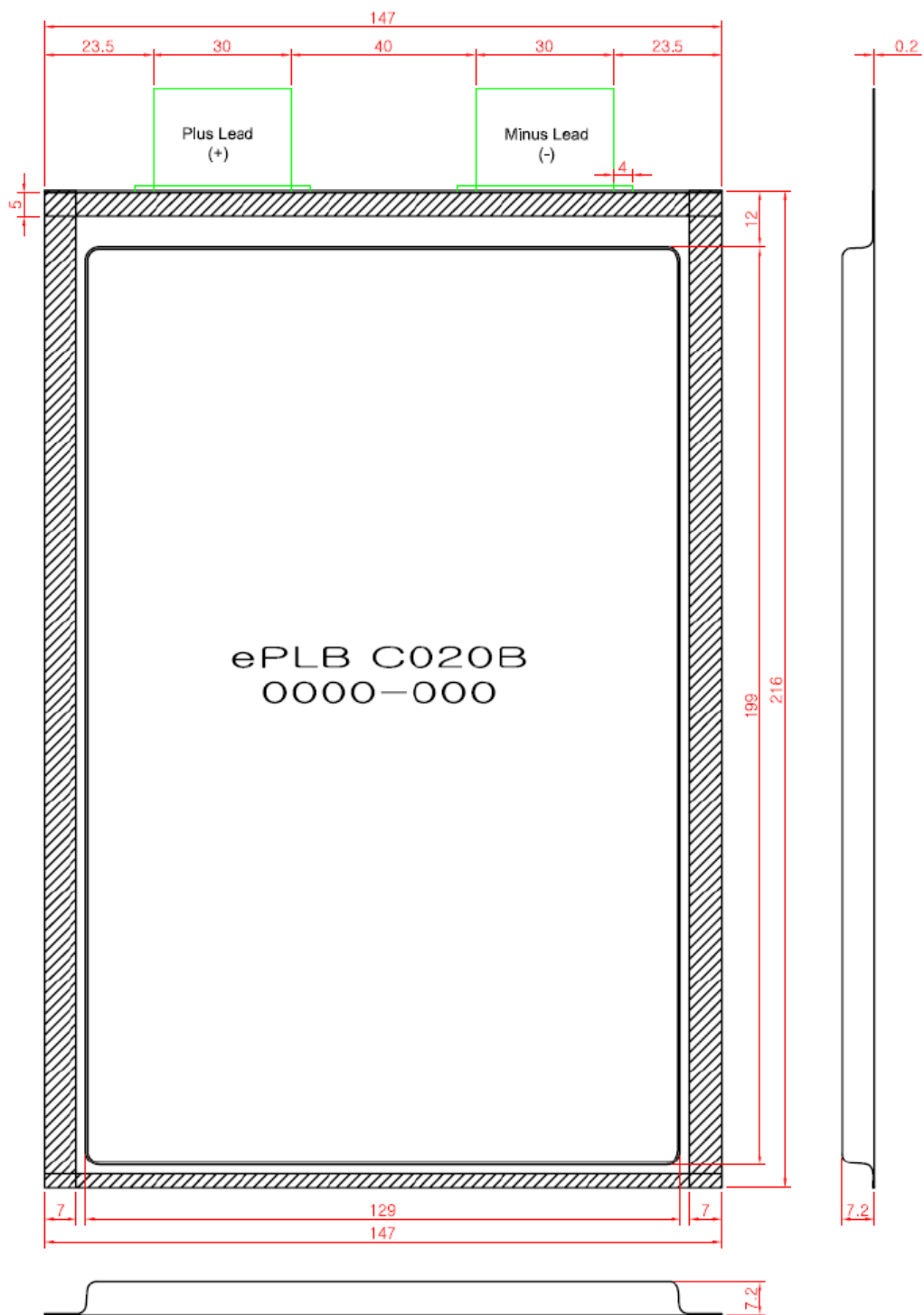
14. Larsson F, Andersson P, Blomqvist P, Lorén A, Mellander B-E. Characteristics of lithium-ion batteries during fire tests. *J Power Sources*. 2014 Dec 20;271:414–20.
15. Hegén Agerup S, Schei Blikeng L. Brann i elektrisk bil. Høgskolen Stord/Haugesund; 2013.
16. Lam C, MacNeil D, Kroker R, Loughheed G. Full-Scale Fire Testing of Electric and Internal Combustion Engine Vehicles. In: *Proceedings from 4th International Conference on Fires in Vehicles - FIVE 2016*. Baltimore, USA; 2016. p. 95–106.
17. Roth EP, Doughty DH. Thermal abuse performance of high-power 18650 Li-ion cells. 2004;128:308–18.
18. Isidor B. *BATTERIES in a portable world*. Fourth Edition. Cadex Electronics Inc.; 2016.

A Informasjon om battericellene

Tabell A-1 lister egenskaper til battericellene og -modulene som ble brukt under testingen, og Figur A-1 viser dimensjonene til en battericelle.

Tabell A-1 Batteriegenskaper

	ERN 6 modul	ERN 6 Batteripakke
Celleprodusent	EiG	-
Cellekjemi	NMC	-
Cellespenning [V]	Minimum	-
	Nominell	-
	Maksimum	-
Nominell kapasitet [Ah]	20	20
Antall	celler: 30	moduler: 12
Cellekonfigurasjon	3P10S	6P60S (2P6S)
Vekt [kg]	16.5	294
Volum [L]		234
Lengde [mm]	270	1042
Bredde [mm]	133	944
Høyde [mm]	240	377
Total spenning [V]	Minimum	180
	Nominell	219
	Maksimum	243
Strøm maks [A]	100	200
Nominell energy kapasitet [kWh]	2.19	26
Volumetrisk energitetthet [Wh/L]	254	111
Gravimetrisk energitetthet [Wh /kg]	133	88
Battery Management System		REAP
Introduisert i år	2011	2011



Figur A-1 Battericellens dimensjoner. Alle tall er oppgitt i mm.

B Bilder fra test 1

Figur B-1, B-2 og B-3 viser bilder henholdsvis før, under og etter testen.



Figur B-1 Bilde tatt før testen. Bilen er heiset opp med heisekran og henger i ca. 20 meter høyde med bakenden vendende nedover, klar for å bli sluppet i fritt fall mot bakken.



Figur B-2 Bilder tatt under testen. Omtrentlig tidspunkt etter slippet av bilen er angitt i bildene. (A) Betydelig røykproduksjon og gråhvit røyk. (B) Økt røykproduksjonen og mørkere røyk. (C) Kraftig røykproduksjon. (D) Hovedsakelig hvit røyk. (E) Flammer kan observeres og røykmengden er betraktelig redusert, noe som tyder på at en stor del av gassene som produseres fra batteriet brenner opp. (F) Full overttenning i kupéen av bilen. (G) Bilen er i full fyr. (H) Brannen har spredt seg til fronten av bilen. (I) Deler av bilen er fullstendig utbrent, mens det fortsatt brenner godt foran.



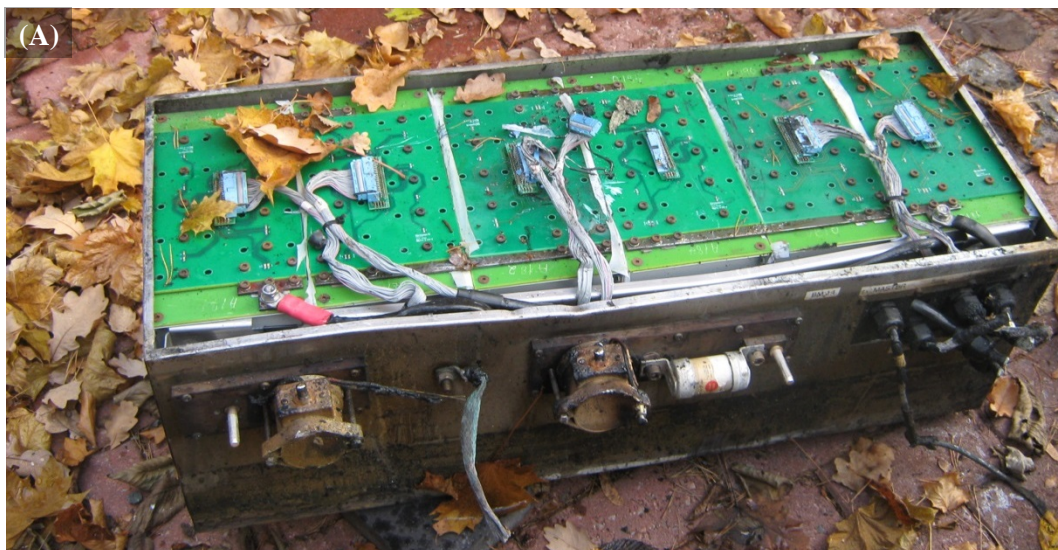
Figur B-3 Bilde (A) – (C) viser bilen fra ulike vinkler ca. 150 minutter etter testen. Brannen har slokket av seg selv, bilen var utbrent og det var fortsatt mange hundre grader i batteripakken. Batteriet ble tatt ut av bilen ca. tre uker etter test, og cellene i de to boksene (D) og (E) som utgjorde batteripakken var fullstendig ødelagte. Øverst i (D) er en komplett modul, mens de andre modulene i bildet er plukket fra hverandre.

C Bilder fra test 2

Figur C-1 og C-2 viser bilder før, under og etter testen.



Figur C-1 Bilder tatt før (A), under (B) – (E) og etter (F) – (H) testen. Omtrentlig tidspunkt etter teststart (antennning av propanbrenneren) er angitt i bildene som er tatt under testen. (A) Batteriet varmes med en liten propanflamme fra undersiden. (B) Like etter at propanbrenneren er fjernet, brenner det godt i kupéen. (C) Like før slokkeforsøk 1 iverksettes. (D) Slokkeforsøk 1 er ferdig. (E) Like før slokkeforsøk 2 iverksettes. (F) Bilen ble aktivt slokkes, og med unntak av fronten er bilen nesten utbrent. (G, H) Utbrent bil fra baksiden.



Figur C-2 Bilde (A) og (B) viser de to boksene som utgjorde batteripakken. Det er tydelig at batteriet har blitt utsatt for kraftig varme, ved at kablene er delvis smeltet, men ellers er det ingen tegn til at en brann har funnet sted. Dersom cellene hadde brent, ville batteriet ha hatt tydelige sotmerker. Fraværet av sotmerker tyder på at varme-påvirkningen har skjedd via strålevarme ovenfra, og ikke fra battericellene selv.

D Li-ion batteri

D.1 Li-ion celle

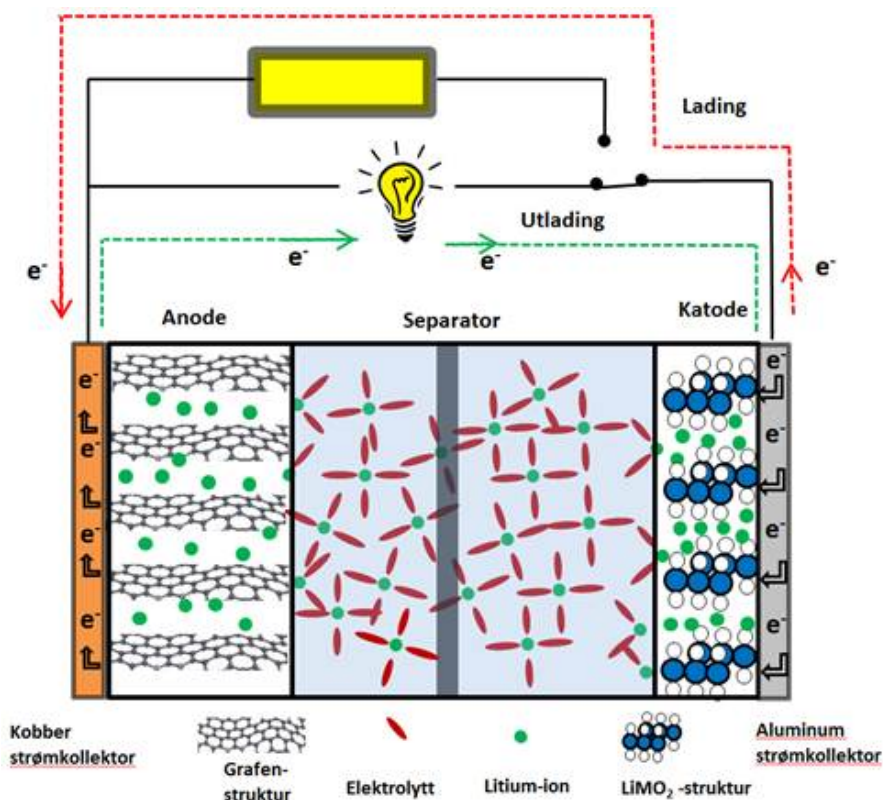
Li-ion batterier kan ha mange ulike former og fasonger. De kan være sylindrerformede, rektangulære eller de kan framstilles i en slags tettpakket pose, som minner om vakuumpakkede kaffeposer. Felles for alle disse er at de har en positiv og negativ elektrode, og en elektrolytt.

Elektrodene består av to ulike materialer og er adskilt av en separator. Separatoren har som oppgave å danne en fysisk barriere mellom anoden og katoden, men samtidig slippe igjennom litium-ioner. Separatoren består oftest av en porøs polyetylen- eller polypropylenfilm, og har en tykkelse på ca. 20 μm .

Enkelt forklart er elektrolytten et løsemiddel og et salt som gjør det mulig å transportere ioner. Elektrolytten består nesten utelukkende av litium-saltet LiPF_6 sammen med en organisk løsemiddelblanding av karbonater, slik som etyl-, metyl- og metyl etyl karbonat.

Anoden er av karbon, der grafitt er mest brukt. De vanligste katodematerialene består av en blanding av litium, oksygen og ulike metaller. Se Tabell D-1 for eksempler.

Når et Li-ion batteri lades beveger litium-ioner seg fra katoden til anoden, mens elektroner strømmer via en ekstern elektrisk krets. Det motsatte skjer ved utlading av batteriet. Figur D-1 viser en forenklet skisse av en Li-ion celle.



Figur D-1 Illustrasjon av en typisk Li-ion celle.

D.2 Sikkerhet til ulike Li-ion batterikjemier

Ved å endre sammensetninger av katoden kan følgende av cellens egenskaper endres:

- **Sikkerhet** er en betegnelse for hvor lett thermal runaway kan oppstå.
- **Energitettheten** kan variere fra ca. 80 – 300 Wh/kg.
- **Ytelse og effekt** er et mål på hvor mye strøm en battericelle kan levere per tid.
- **Levetiden** angir hvor mange ganger batteriet kan lades og utlades før det begynner å miste effekt.
- **Kostnaden** å produsere cellene varierer med hensyn til ytelsene angitt ovenfor.

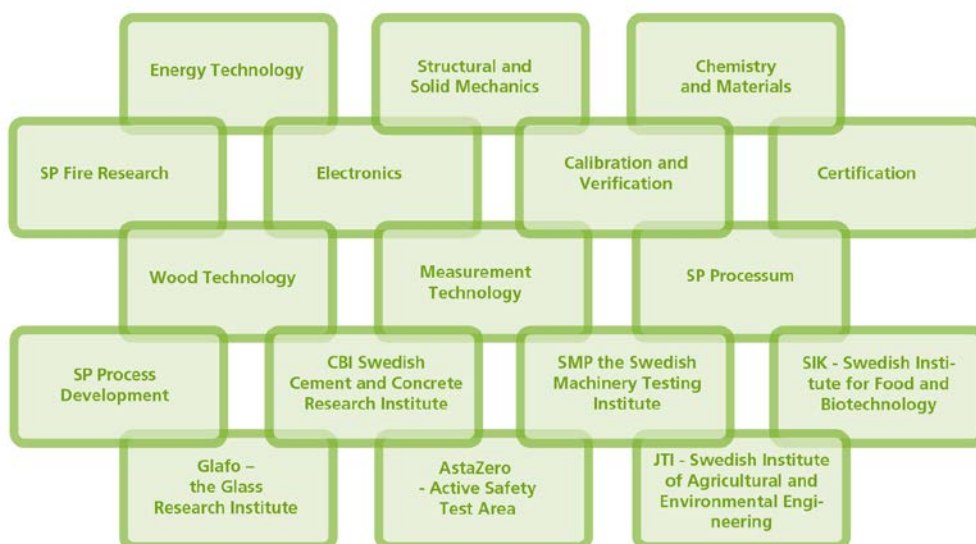
I Tabell D-1 er de mest brukte batteritypene opplistet med deres egenskaper. I tillegg lages det varianter av disse for å spisse enkelte egenskaper.

Tabell D-1 Egenskaper til ulike batterikjemier [18]

Kjemi	Litium kobalt oksyd	Litium mangan oksyd	Litium nikkell mangan	Litium jern-fosfat	Litium nikkell kobolt aluminium oksyd	Litium titanat
Forkortelse	LiCoO ₂ (LCO)	LiMn ₂ O ₄ (LMO)	LiNiMnCoO ₂ (NMC)	LiFePO ₄ (LFP)	LiNiCoAlO ₂ (NCA)	Li ₂ TiO ₃ (LTO)
Nominell spenning	3,6 V	3,7 (3,8) V	3,6 (3,7) V	3,2 (3,3) V	3,6 V	2,4 V
Fulladet	4,2 V	4,2 V	4,2 V	3,65 V	4,2 V	2,85 V
Fullt utladet	3,0 V	3,0 V	3,0 V	2,5 V	3,0 V	1,8 V
Minimum spenning	2,5 V	2,5 V	2,5 V	2,0 V	2,5 V	1,5 V
Energitetthet [Wh/kg]	150 – 200	100 – 150	150 – 220	90 – 120	200 – 260	70 – 80
Ladehastighet	0,7 – 1 C	0,7 – 1 C	0,7 – 1 C	1 C	1 C	1 C
Utladings-hastighet	1 C	1 C	1-2 C	1 C	1 C	10 C
Levetid (sykluser)	500 – 1000	300 – 700	1000 – 2000	1000 – 2000	500	3000 – 7000
Thermal runaway	150 °C	250 °C	210 °C	270 °C	150 °C	En av de sikreste batteriene
Typisk innpakning	18650, prismetisk, posecelle	Prismetisk	18650, prismetisk, posecelle	26650, prismetisk	18650	Prismetisk

SP Technical Research Institute of Sweden

Our work is concentrated on innovation and the development of value-adding technology. Using Sweden's most extensive and advanced resources for technical evaluation, measurement technology, research and development, we make an important contribution to the competitiveness and sustainable development of industry. Research is carried out in close conjunction with universities and institutes of technology, to the benefit of a customer base of about 10000 organisations, ranging from start-up companies developing new technologies or new ideas to international groups.



SP Fire Research AS

Postboks 4767 Sluppen, 7465 Trondheim

Telefon: 464 18 000

E-post: post@spfr.no, Internett: www.spfr.no

www.spfr.no

SPFR-rapport A17 20096:03-01



For mer informasjon om publikasjoner utgitt av SP Fire Research og SP:
www.spfr.no/publikasjoner og www.sp.se/publ