

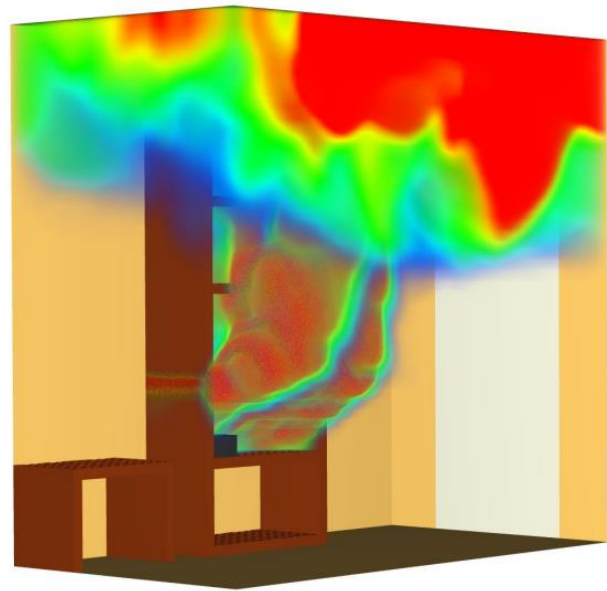


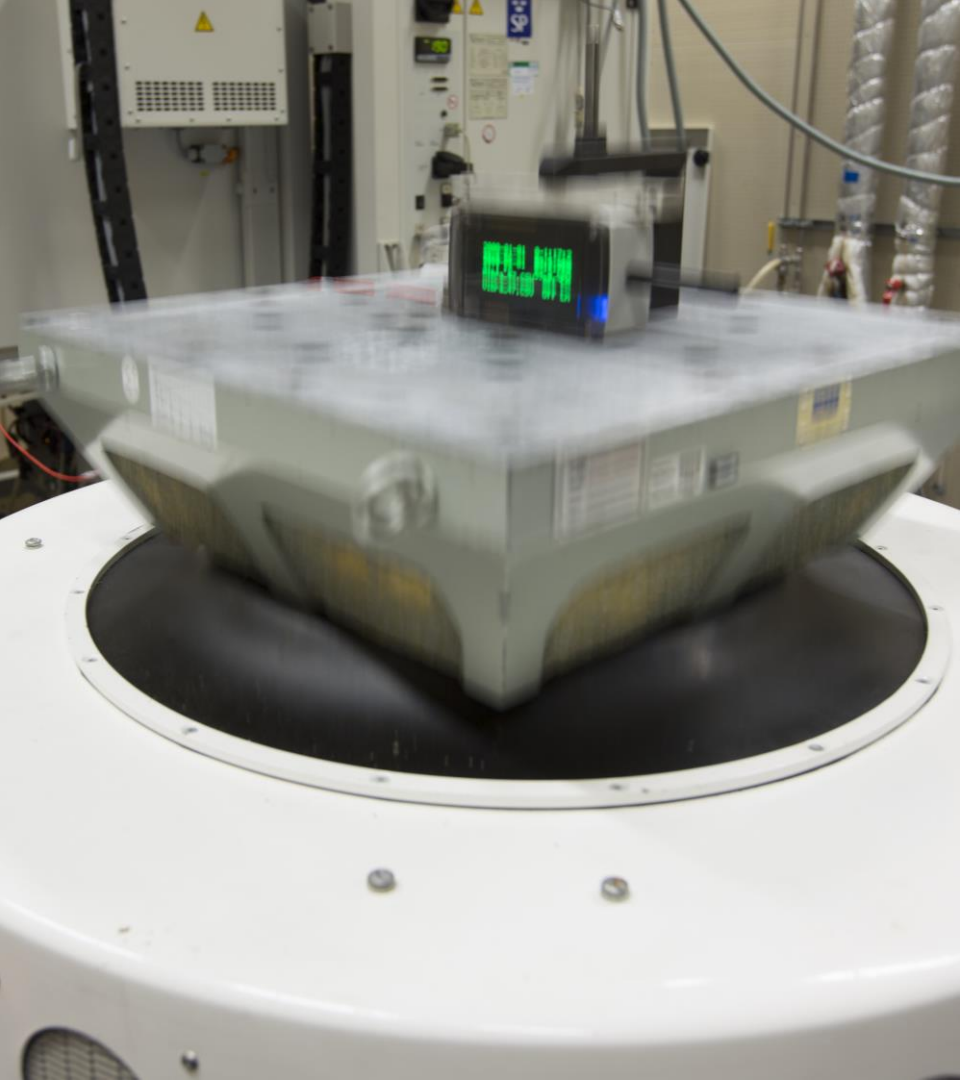
## Safety during battery testing

An introduction to risks, strategies and preventive actions

RISE Research Institutes of Sweden

**Andreas Anderson**  
Electrification and Reliability





# Summary

- Myths or facts ?
- Nomenclature
- Electrical risks
- Chemical risks
- Fire/ Explosion risks
- Potential failures
- Regulations and legislations
- Lessons learned
- Preventive actions
- SEEL – capabilities from a safety perspective

# Myths or facts?

## -Are lithium batteries safe?

- "A Tesla burns one time per 330 million driven kilometers"

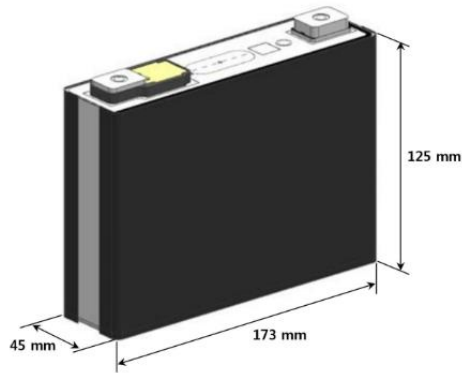
*-U.S. Department of Transportation*

- The average of a car fire in USA is one time per 30 million kilometers
- A total of 60 EV fires was recorded in Norway during three years time and 250 000 EVs are operating
- A fire in a fossil driven car is 5-10 times more common than in an EV.
- Video  
[https://www.youtube.com/watch?v=8HZ7qh\\_t46w&ab\\_channel=Titlovi](https://www.youtube.com/watch?v=8HZ7qh_t46w&ab_channel=Titlovi)

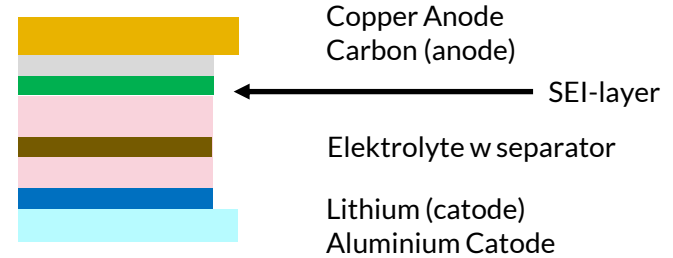
	Fires per 100 000
Hybrid	3 575
Gas	1 530
Electric	25

# Nomenclature

- Battery cell



Specification		
Nominal Capacity	min. 94 Ah ave. 95.6 Ah	
Nominal Voltage	3.68 V	
Energy (ave.)	350 Wh	
Voltage (max. charge)	4.15 V	
Discharge power (ave.)	5s at 25 °C, SOC 90%	1546 W
	30s at 25 °C, SOC 90%	1102 W
	30s at 25 °C, SOC 20%	966 W
	30s at -25 °C, SOC20%	155 W
Dimension (L x W x H, mm)	173 x 125 x 45	
Weight	max. 2.06 kg ave. 2.01 kg	



- SoC, State of Charge

# Nomenclature

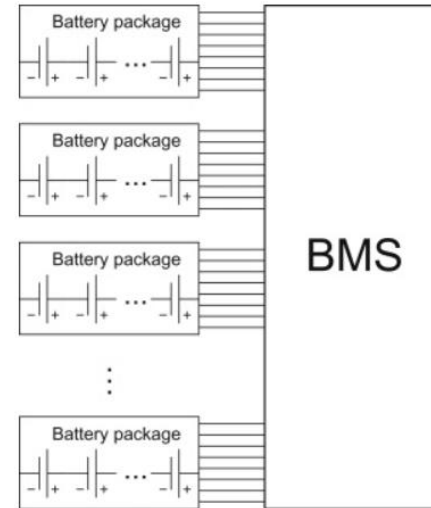
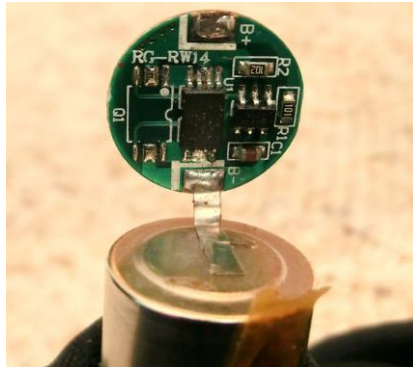
- Cell - Module - Pack



- Each cell carries approximately 4 volt
- The configuration of cells in series and parallel is presented as:
  - Module 8S1P (eight cells in series)
  - Pack of 8 modules in series 1P12S8S
- For a typical car battery ~96 cells in series will carry near 400 V

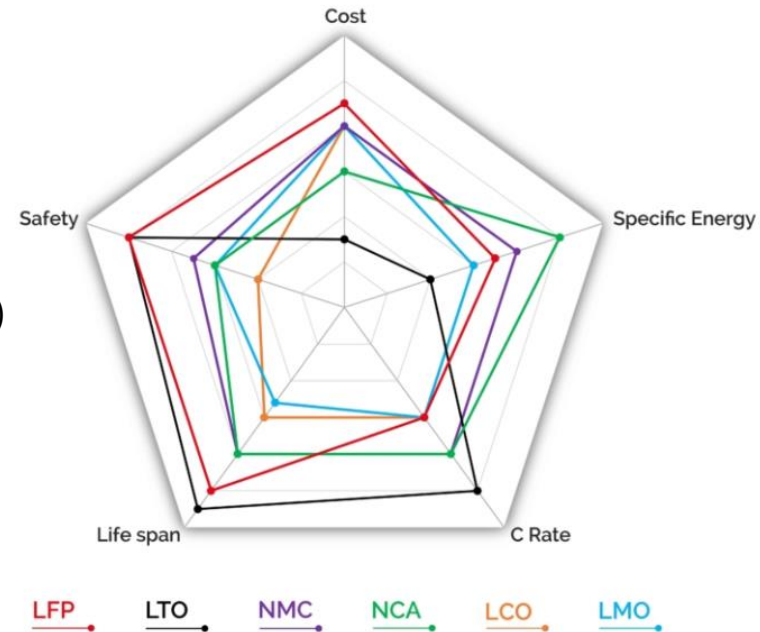
# Nomenclature

- BMS – Battery Management System
- Is needed due to the lithium cells being unable to equalize charge and for safety
- Manages for each cell:
  - Max voltage (overcharge)
  - Min voltage (over discharge)
  - Temperature
  - Discharge current
  - Fault detection



# Nomenclature

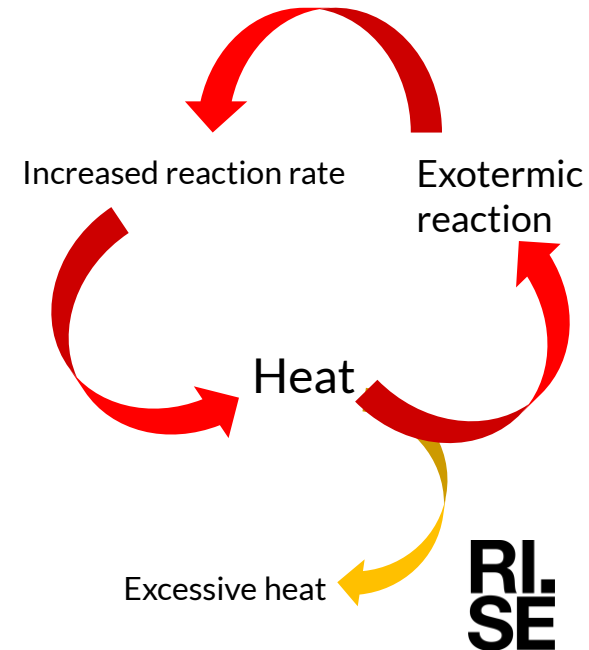
- Lithium batteries are all the same, aren't they? -No !
  - Lithium - Cobalt - Oxide ( $\text{LiCoO}_2$ )
  - Lithium - Manganese - Oxide ( $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ )
  - Lithium - Iron - Phosphate ( $\text{LiFePO}_4$ )
  - Nickel - Manganese - Cobalt ( $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_z\text{O}_2$ )
  - Nickel - Cobalt - Aluminium ( $\text{LiNiCoAlO}_2$ )
  - Lithium titanate ( $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ )
  - And at least 90 more...



# Nomenclature

- Thermal runaway
  - A state at which the battery chemistry starts to "decompose"
  - During this event the released energy creates heat that further increase the temperature and intensifies the reaction
  - This might lead to propagation to neighbouring cells

	Decomposition temperature °C	Heat release Joule/gram
NMC	210	600
LFP	270	200
NCA	150	940





# Electrical risks

- Electric shock, >60 VDC (>42 VAC)
- Arcs may cause radiation burns to skin and eyes
- Short circuits may cause direct burns
- Secondary effects such as fire and molten debris
- Equipment sensitive to over voltage

# Electrical risks

The employers responsibility when working with electricity

*"Arbetsgivaren har det yttersta ansvaret för arbetsmiljön. Därför har de också ansvar för att arbete där det finns risk för elektrisk fara kan bedrivas säkert. Enligt arbetsmiljölagen ska arbetsgivaren göra allt som behövs för att arbetstagaren inte ska utsättas för olycksfall eller ohälsa."*

<https://www.av.se/produktion-industri-och-logistik/elsakerhet/>

The main difference from working with "ordinary" electronics is that the batteries always carries energy !

-Therefore we need to think different.



# Electrical risks

## Checklista om elsäkerhet för arbetsgivare

Kontrollfrågor som du som arbetsgivare behöver kunna besvara innan ett arbete där det finns risk för elektrisk fara kan påbörjas.

- Har du säkerställt att den som ska utföra arbetet har tillräcklig kunskap för det aktuella arbetet? Detta med avseende på såväl anläggningens status, typ av elektrisk utrustning och egen utbildningsnivå för uppdraget.
- Har du säkerställt att den som utför arbetet har fått ta del av relevant dokumentation om anläggningen eller den elektriska utrustningen?
- Har du säkerställt att det utförts en elsäkerhetsplanering inför arbetet?
- Finns det tydliga säkerhetsanvisningar för hur arbetet ska genomföras?
- Föreligger det några språkliga problem med att inhämta tillräcklig kunskap om anläggningen?
- Har du säkerställt att kommunikationen mellan den/de som utför arbetet och den som har utsetts att svara för arbetets säkerhet fungerar väl?
- Har du säkerställt att det finns tydliga rutiner för fränkoppling, som också innebär att anläggningen förblir fränkopplad?
- Har du säkerställt att det finns tydliga rutiner kring spänningsprovning inför att ett arbete ska påbörjas?
- Har du säkerställt att det finns rutiner som innebär att den som utför arbetet inte kan komma i kontakt med angränsande spänningssatta anläggningsdelar? Det kan till exempel vara ställverk vid sidan om eller utrustning inom närområdet som kommer att vara spänningssatt under arbetet.

<https://www.av.se/produktion-industri-och-logistik/elsakerhet/>

# Chemical risks

- Toxicity
  - Consult the datasheet for guidance
  - Tested cells might leak electrolyte
  - Waste water from fire extinguishing is not allowed to be drained and needs to be collected
  - Gases emitted at thermal runaway

Gas	Concentration (%)	Hazard
Carbon Dioxide (CO <sub>2</sub> )	~30	Asphyxiant
Hydrogen (H <sub>2</sub> )	~30	Flammable
Carbon Monoxide (CO)	~20-25	Flammable, Toxic
Methane	5-8	Flammable
Ethylene	3-8	Flammable
Ethane	1-3	Flammable
Propylene	1-3	Flammable
C4s and others	<1	Flammable
HF	0.3	Corrosive, Toxic

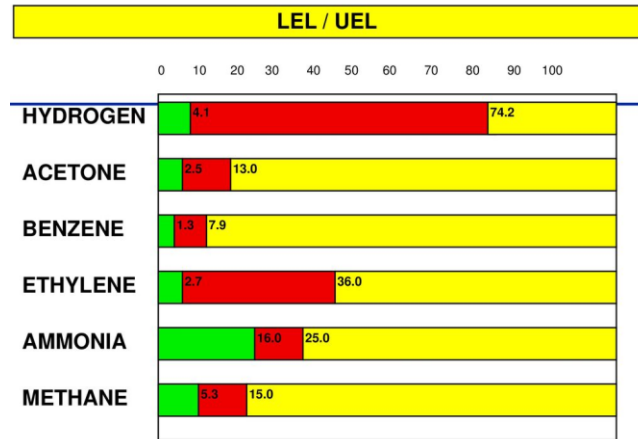
# Chemical risks

- Hydrogen Fluoride, HF
  - Cells typically contains lithium hexafluorophosphate (LiPF<sub>6</sub>)
  - At thermal runaway this will release Hydrogen Fluoride, HF
  - HF is extremely reactant, however this property also act to neutralize the gas relatively quickly
  - HF reacts with water and forms hydroflouric acid
  - Skin contact (due to water from moist skin) is poisonous, the symptoms are not emediately imminent, and the state cares for medical assistance and is treated with calcium
  - As the gas is extremely irritant, it is in reality not possible to inhale in order to cause severe effects



# Fire/explosion risks

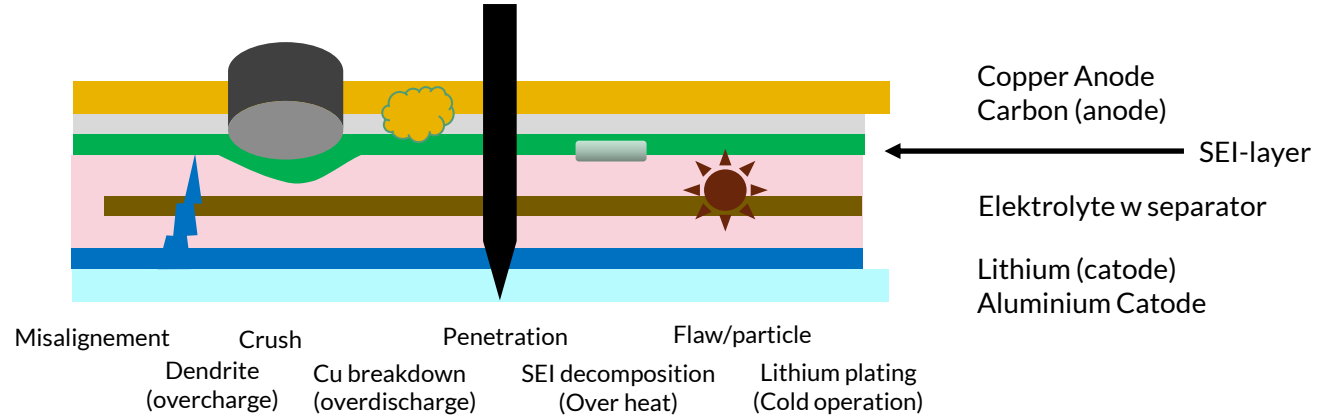
- Hydrogen, H<sub>2</sub>
  - Flammable and explosive in concentrations from 4 to 75%
  - LEL - Lower Explosion Limit UEL - Upper Explosion Limit



FP 3 - 21

# Potential failures

## Internal cell failures



## External failures

- Structural damages, resonances, crash, leading to secondary failures
- Fatigue, mechanical and thermal
- Fire
- Corrosion
- IoT, software malfunction or terror attacks
- ?

# Regulations and legislations -some highlights

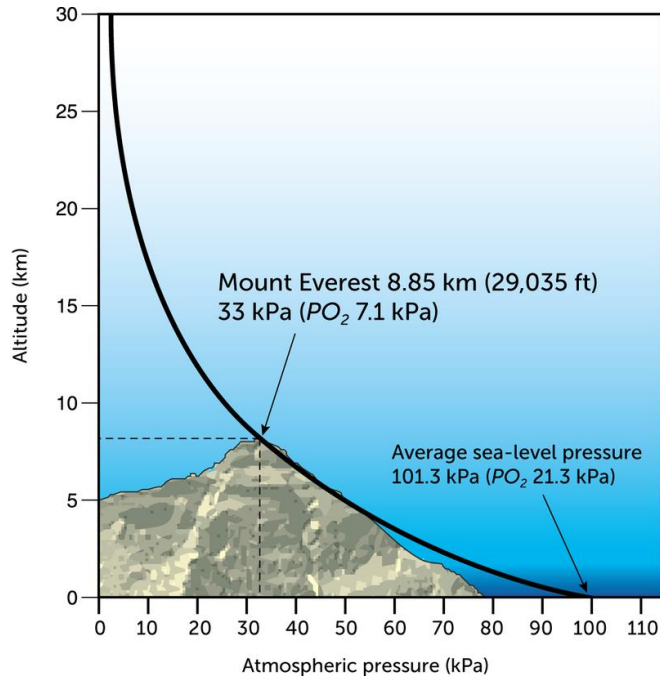
- UN 38.3 addresses transportation testing for lithium cells and batteries
  - The main procedures and severities are found in similar standards
- ECE R100 addresses lithium batteries installed in 4-wheel electric vehicles for the transport of persons and/or goods

For testing also consider:

- National regulations, example MSB
- Local regulations, polutions in air and/or water



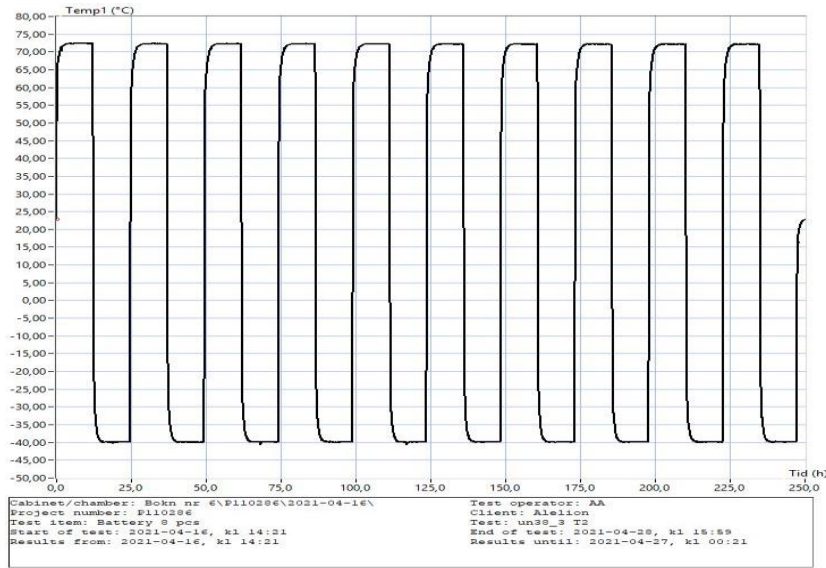
# UN 38.3 T1 - Altitude



- The test cells and batteries shall be stored at a pressure of 11.6 kPa or less for at least six hours at ambient temperature ( $20 \pm 5^\circ\text{C}$ )
- No function monitoring
- Low risk test

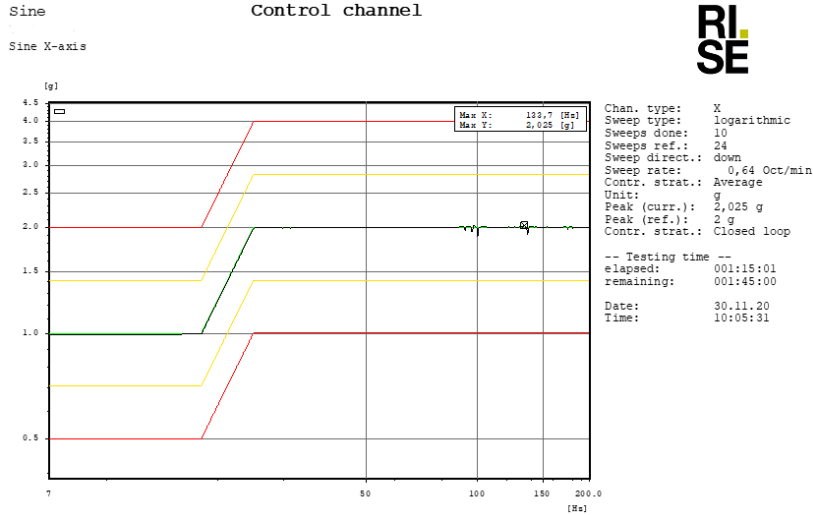


# UN 38.3 T2 – Temp cycling



- The test cells and batteries shall be subjected to thermal cycling between -40 and +72°C
- The aim is to qualify battery seals and internal connections by rapid temperature change
- No function monitoring
- Low risk test, leakage and internal breakage might occur

# UN 38.3 T3 - Vibration



- The test cells and batteries shall be subjected to sinusoidal vibrations between 7 and 200 Hz
- The aim is to qualify the battery mechanical integrity
- Monitoring of several parameters
- High risk test, leakage, structural and internal breakage might occur

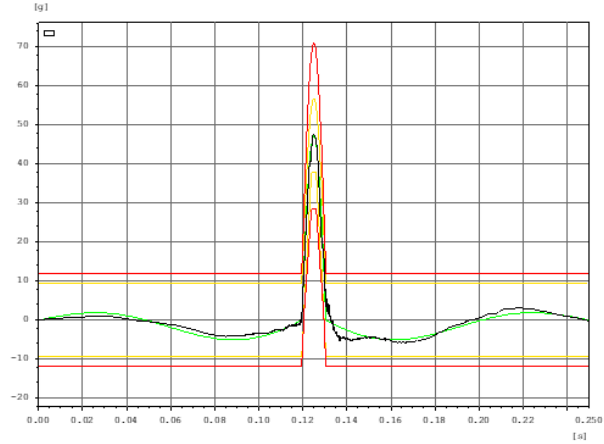
Classical Shock

C1



# UN 38.3 T4 - Shock

Shock 2



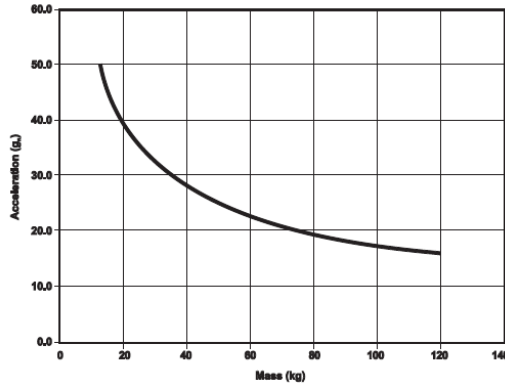
```
Chan. no: 1
Chan. type: C
Level: 0,0 dB
Resolution: 2,44e-04 s
Unit: g
Peak (curr.): 47,5 g
Peak (ref.): 47,3 g

-- Pulses on curr. level --
done: 3
remaining: 0

-- Pulses total --
done: 13
remaining: 13

Date: 22.03.21
Time: 11:11:07
```

- The test cells and batteries shall be subjected to a half sine shock pulse of up to 50 g for large batteries and 150 g for small batteries
- The aim is to qualify the battery mechanical integrity
- Monitoring of several parameters
- High risk test, leakage, structural and internal breakage might occur



$$Acceleration(g_n) = \sqrt{\left(\frac{30000}{mass^*}\right)}$$



# UN 38.3 T5 – Short circuit

- Battery heated to 57°C
- Short circuit (less than 0.1 Ohm) for 6h
- Max 170°C, no fire, no explosion
- Fuse, current limiting, venting mechanisms are allowed
- Hazardous outcome are expected

# UN 38.3 T6 – Crush test

- Crush test can initiate internal short circuits
- Max 170°C, no fire, no explosion, no disassembly for 6h
- Hazardous outcome should be expected

# UN 38.3 T7 - Overcharge

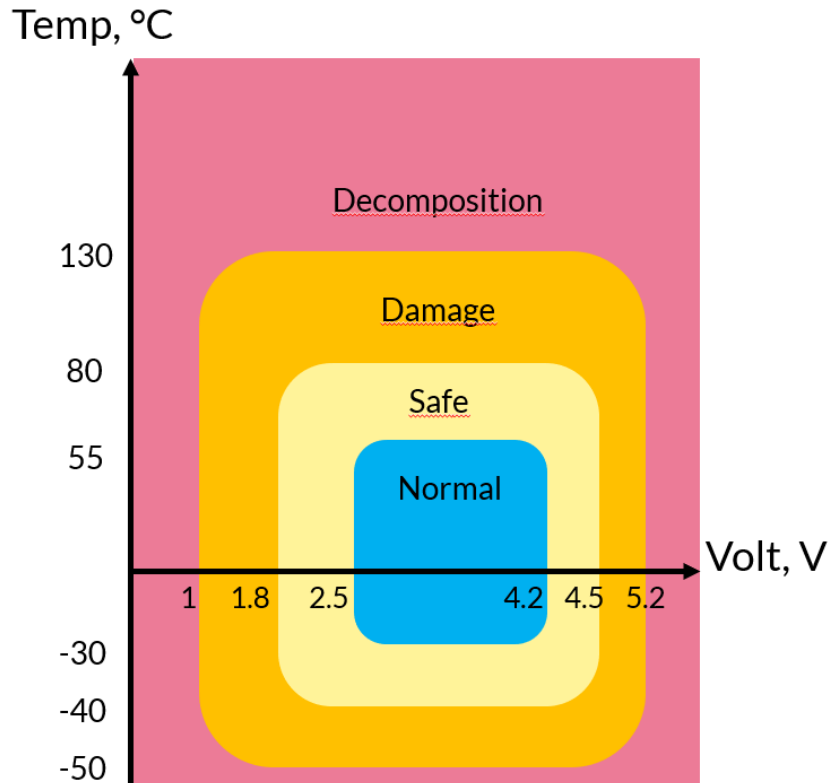
- Overcharge with 200% current during 24 h to
  - 2 times voltage for <18V
  - 1,2 times voltage for >18V
- No fire, no disassembly for 7 days

## UN 38.3 T8 - Discharge



- Forced discharge with 100% current and 12 V
- The test results in reversed polarity
- No fire, no disassembly for 7 days





## Lessons learned

- Problems are mostly frequent when electrically "provoking" the batteries
- Mechanical tests can result in electrical provocation
- Problems are associated with elevated temperatures
- The severity of the failure is related to the SoC
- The history of the cells may indicate increased risks
- Never test larger batteries than needed



## Isolerande handskar för elektriker

Extremt slitstarka.

- Specialbehandlade handskar med goda dielektriska egenskaper.
- Uppfyller testkraven för punkteringsmotstånd, riv- och draghållfasthet.
- Har en mycket god passform som följer handens konturer.

[> Se fullständig produktbeskrivning](#)

Klass

Storlek

[> Se alla artiklar \(10\)](#)



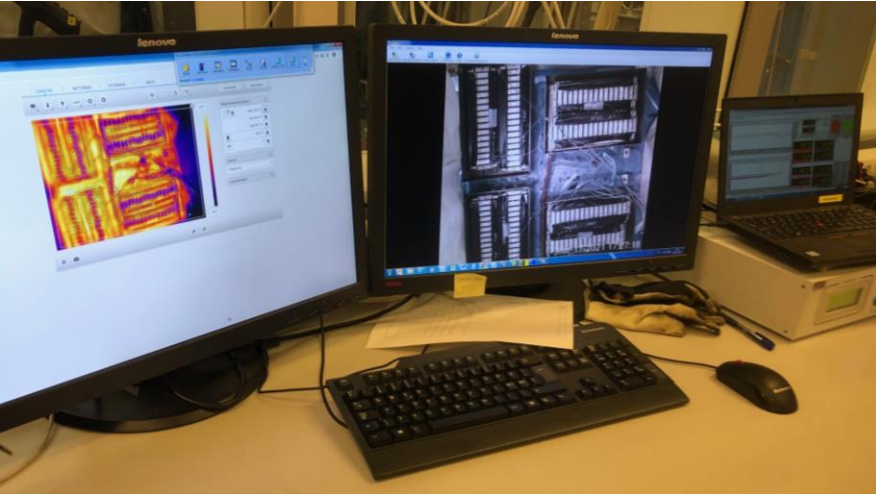
# Preventive actions

## 5 classical ways to prevent risk

- Elimination
- Substitution
- Barriers - Protection
- Barriers - Limited exposure
- Personal protective equipment

## Consider

- Cable gauge, fuses
- Galvanically isolated voltage measurements
- Section down high voltage batteries\*
- Suitable laboratories



# Preventive actions

## Parameter monitoring

- Pack voltage (cell voltage), a 100 mV drop should be considered as significant
- Pack temperature with time history
- Thermal imaging
- Gas detectors

## Precautions

- Forced ventilation
- Be prepared to immerse in water

All of the high-risk tests is performed under surveillance. As transducers may fail, giving a false alarm, every action is decided by an operator.

# Post preventive actions

## Proving av litiumbatterier, hantering och handlingsplan vid olycka.

Följande utrustning/sensorer finns tillgängliga

Thermoelement  
Cellspänning  
Brandvarnare (optisk)  
Webbkamera  
IR-termometer  
Skyddsutrustning (person)

Mjukvaran larmar operatören om något värde är onormalt. Den gör inget aktivt utan ev åtgärd är upp till operatören.

Om mjukvaran larmar kontrollera vilket värde som orsakat larmet. Det är möjligt att det beror på kabelbrott, mätvärde avgör.

Vid elektrolytfläckage använd heltäckande skyddsutrustning (kläder, andningskydd, visir, handskar), vid kontakt med fukt/vatten bildas vätefluorid, HF, vilket är starkt frätande.

Om ett batteri skenar i temperatur eller om cellspänningen ändras eller gas evakueras:

Avbryt vibrationen genom att stänga av vibratorn så att inte rök, sugns i ventilationen samtidigt som spänningen till vibratorn stängs av.

Den batterimodul som genererar felet ska kylas genom att vattenfylla den enskilda behållaren. Kranar sitter innanför dörren, en per behållare.

Möjlighet finns att se provföremålen med en webbkamera för att enklare avgöra vilken modul som är påverkad.

Om öppen låga/flamma delekteras ska brandkåren kontaktas via 112.

Adress: **Brinellgatan 4, 504 62 Borås, Hus 18.**

Ange att det är litiumbatterier som brinner.

Gå inte in i hallen om batterierna har börjat ventileras/brinna.

Stäng av ventilationen via EXOScada och stäng alla spjäll och isolera därmed syretillförsel och spridning av brand.

Kontakta kollegor. En person bör placeras och varna så att åtkomst från kontoren till hus 18 inte är möjlig (Hus 18 är en egen brandcell). En annan person bör ta emot och dirigera brandkåren.

Lås upp porten till hallen utifrån så att brandkåren får tillträde.

Mellan provningar och efter avslutad prov kan en IR termometer eller värmekamera användas för att delektera ev lokal värmeutveckling i batterierna.

Ett batteri som uppvisar interna temperaturavvikelser ska betraktas som farligt och får inte arbeta med.

Kontaktuppgifter:

Andreas Anderson	5353
Mikael Holmsbo	5671
Per-Staffan Bergstr	5309
Robert Johansson	5457
Joakim Lindeblom	5295
David Gustavsson	5606

- Increase forced ventilation to avoid aggressive gas being released into the lab and to keep the concentrations below LEL
- Immersion in water/cooling to prevent one cell in thermal runaway to propagate to neighbouring cells
- Call the fire department\*

All actions are written onto an **action plan on paper** minimizing any decisions to be made in panic

-Disposal, check for regulations for shipping, MSB

# So...

## At work:

- Tests should never be made on packs with unproven celltypes
- Actions should be made remotely
- Start with the smallest cell
- Choose correct SoC

## At home:

- Charge batteries with a timer
- Check charger voltage, max 4.2 V per S
- Store batteries properly



## SEEL, battery abuse lab Borås

The lab in Borås will focus on:

- Charging
- Short circuits
- Vibrations and mechanical shock
- Extreme temperatures
- Fire risks

Large testing hall	3 x Small testing hall	2 x Vibrator halls	Climate chambers	Cycling lab
Battery systems (ESS, vehicles, packs, modules)	Cells and modules	Modules and packs	Cells, modules, packs, vehicles (walk-in chamber)	Battery cyclers for performance and abuse testing, up to 1500 VDC

# SEEL, battery abuse lab Borås

Vibrator 1: IMV K200

Vibrator 2: IMV A74 + Climate 2200l

Climate chambers:

3x1300l

1x1000l

Walk-in chamber

Abuse chamber: 3x10,5m<sup>2</sup>

Abuse hall: 1x132m<sup>2</sup>

Conditioning units

Smoke gas scrubber, 170 000 Nm<sup>3</sup>/h

Digatron

3 Pack tester 800V

6 Pack tester 1000V

1 Module tester 150V

1 Cell tester 5V

PEC

2 Cell tester

1 Module tester

2 Hydraulic units

DC supply

Pressure vessel

Pressure chamber

# Safety during battery testing

## An introduction to risks, strategies and preventive actions



Andreas Anderson

010-516 53 53

[andreas.anderson@ri.se](mailto:andreas.anderson@ri.se)

Andreas har jobbat på RISE sedan 2004 och på enheten för miljötålighet sedan 2018. Han har en civilingenjörsexamen, arbetar som senior ingenjör och är ansvarig för driften och utvecklingen av enhetens mekaniska labb i Borås vid sidan av att driva ett FoU-team. Just nu är han engagerad i byggnationen och drifttagandet av det sk SEEL-labbet i Borås där batterier under 2023 ska kunna abusetestas. Andreas jobbar även med skadeutredning med metoder för att finna den faktiska rotorsaken vid problem och avslutningsvis komma med förslag på avhjälpande lösningar.