



Sähköavusteisen polkupyörän virtalukon syt-  
tymis- ja palomahdollisuuden selvitys  
Osa 2/3: Virtalukon syttymismahdollisuus nk. "worst case"  
-olosuhteissa

Tilaaaja: Solo-International Oy



---

Tilaaaja	Solo-International Oy Jari Komulainen Komeetankatu 1 02210 Espoo	
Tilaus	Tilaus sähköpostilla 21.4.2017 / Jari Komulainen	
Käsittelijät	VTT Expert Services Oy Tapio Klasila Biologinkuja 7, Espoo PL 1001 02044 VTT Puh. 020 722 5317 email tapio.klasila@vtt.fi	Risto Parikka Biologinkuja 7, Espoo PL 1001 02044 VTT Puh. 020 722 4651 email risto.parikka@vtt.fi

---

## Sähköavusteisen polkupyörän virtalukon syttymis- ja palomahdollisuuden selvitys

### Osa 2/3: Virtalukon syttymismahdollisuus nk. "worst case" -olosuhteissa

<b>Tausta</b>	Saatujen tietojen ja dokumenttien mukaan Solo-sähköpyörän virtalukon on epäilty syyttäneen laajahkon rivitalopalon Nurmijärvellä 25.5.2015.  VTT on aiemmin (VTT-S-03842-16, 2016) suorittanut tutkimuksen, joka osoitti, että kuormitettaessa laitetta maksimikuormituksella ja maksimaalisella akun lataustilalla ja toiminta-ajalla, lämpötila virtalukossa ei kohoa niin korkeaksi, että sähköavusteisen polkupyörän virtalukon materiaalit voisivat ilman laitteiston vikatilannetta syttyä palamaan. Nyt raportoitava tutkimus on kolmivaiheisen tutkimussarjan toinen osa.
<b>Näytteet</b>	Tutkimuksen kohteena oli Solifer-merkkinen sähköavusteinen yksivaihteinen polkupyörä. Pyörä oli vastaavaa mallia kuin se, jonka epäillään aiheuttaneen edellä mainitun rivitalopalon. Tutkittavaksi osoitetun pyörän toimitti VTT:lle Solo-International Oy.
<b>Tutkimukset</b>	Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, onko ajateltavissa olevissa vikatilanteissa mahdollista saada virtalukko syttymään pyörän omalla virtalähteellä. Tutkimuksessa tarkastellaan sekä tilannetta, jossa pyörä on käytössä maksimaalisesti kuormitettuna (esim. pitkäaikainen ylämäkiajotilanne, max. 15 A virta), sekä teoreettista tilannetta, jossa virta on jonkin laitteiston vikatilanteen vuoksi korkeampi, pysyen kuitenkin laitteiston 20 A sulakkeen sallimissa rajoissa. Tutkimuksen yhteydessä sulakkeen todettiin toimivan odotetusti, eli katkaisevan virtapiirin oikosulussa.

---

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille

VTT Expert Services Oy:n tai VTT:n nimen käyttäminen missään muussa muodossa mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaisu on sallittu vain VTT Expert Services Oy:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Tutkimus koostuu seuraavista osioista:

1. Käytettyjen virtalukkojen tarkastelu

Puretaan käytettyjä polkupyörän virtalukkoja, ja niiden kontaktipintojen mahdollinen kuluminen, sulaminen, hapettuminen tms. dokumentoidaan. Tietoa käytetään hyödyksi tutkimuksien myöhemmissä osioissa.

2. Juotosten irtoamisen testaus lämpötilan kohotessa

Virtalukon yhtenä suojaimekanismina on virtalukon nastoihin kytkeytyvien johtojen tinajuotos, jonka tulisi avautua ympäröivän rakenteen iteseyttymislämpötilaa alemmassa lämpötilassa. Tämä testataan kuumentamalla liitosta hallitusti sähkövirralla, ja toisaalta tarkka sulamislämpötila määritetään termoaalyysin avulla.

3. Kytkenäntästen sekä niiden vastinpintojen kipinöinnin ja pintojen hapettumisen/kontaminoitumisen vaikutus virtalukon lämpenemiseen

On tunnettua, että virtalukon kytkentäpintojen kontakteissa voi syntyä kipinöintiä, mikä pitkällä aikavälillä aiheuttaa vastinpintojen hapettumista ja kulumista. Tämä voi nostaa virtalukon lämpötilaa kontaktin vastuksen kasvun takia. Osiossa virtalukon avainta käännetään 10 000 kertaa edestakaisin. Virtalukon kääntöjen määrä on huomattavan suuri, sillä esimerkiksi silloin, jos pyörää käytetään satana päivänä vuodessa kaksi kertaa päivässä, 10 000 kääntöä vastaa 25 vuoden käyttöä. Rasituksen jälkeen mitataan virtalukon lämpötilan nousu pyörän eri kuormitustilanteissa.

4. Kontaminaation vaikutus virtalukon lämpenemiseen

Virtalukon kytkentäpintojen kontaminaation vaikutusta virtalukon lämpötilan nousuun testataan esimerkiksi tilanteissa, joissa virtalukko on rasvainen, kastunut tai kontaktipintojen väliin on jäänyt pinnoista kulumalla irronnutta kuparimurskaa.

5. Virtalukon osittaisen sulkeutumisen vaikutus lämpenemiseen

Teoriassa on mahdollinen tilanne, jossa virtalukon avain jää normaalien auki- ja kiinni-asentojen puoliväliin, mikä saattaa aiheuttaa kytkentäntästen osittaisen kontaktin. Testataan lämpötilan nousu virta-avaimen jäädessä auki- ja kiinni-asentojen puoliväliin.

6. Virtalukon sisällä olevan rasvan syttymisherkkyyden tutkiminen

Virtalukon sisällä on todettu olevan rasvaa, joka ei ole suoraan kontaktissa kytkentäpintojen kanssa. Osiossa tutkitaan kyseisen rasvan termistä käyttäytymistä termoaalyysillä. Lisäksi testataan, saadaanko virtalukko syttymään kipinästä tai ilman lämmittämällä virtalukkoa niin alhaisella lämpötilalla, että johtojen juotokset eivät vielä sula.

## Mittausjärjestely

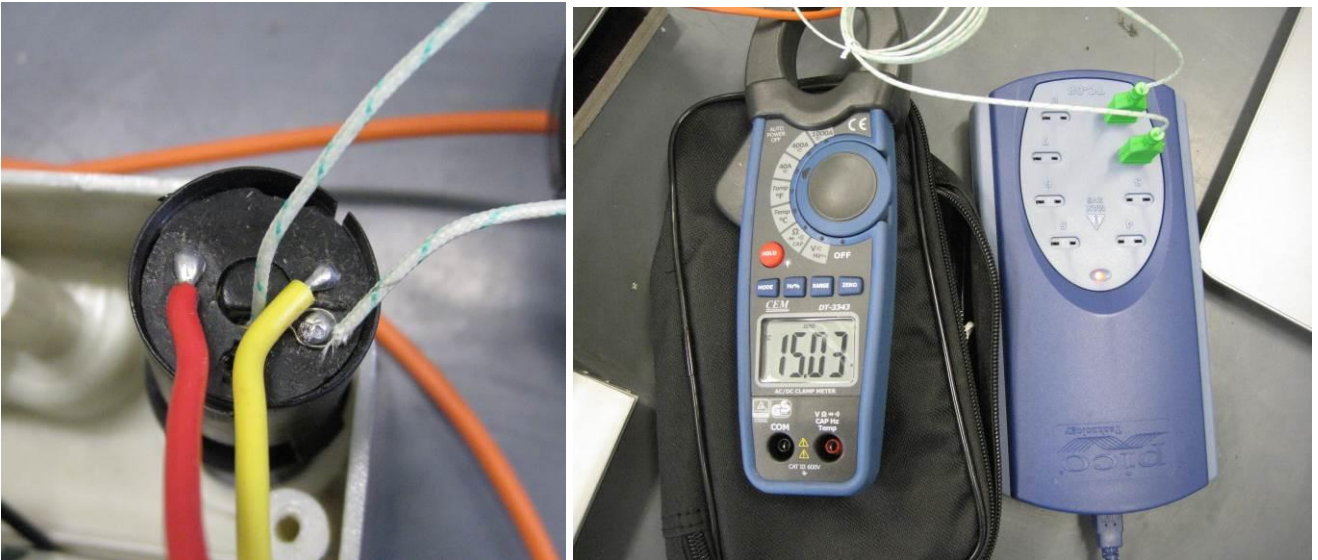
Testausta varten rakennettiin mittausjärjestely, jossa polkupyörän virtalukko oli osana virtapiiriä, jota kuormitettiin sähköpolkupyörän raskainta mahdollista käyttöä vastaavalla teholla. Jännitelähteenä toimi polkupyörän oma 24 V akusto.

Testien alussa akut olivat täyteen ladattuja. Pihtivirtamittarilla mitattu virtapiirin virta oli polkupyörän raskainta normaalia käyttötilannetta simuloivassa testauksessa tällöin noin 15 A, joka on samaa tasoa kuin edellisessä tutkimusvaiheessa (VTT-S-03842-16) polkupyörää maksimikuormituksella käytettäessä. Säätovastuksella virta saatiin nostettua noin 19,5 A:iin saakka, jonka laitteen oma 20 A sulake vielä sallii. Tällainen tilanne voisi teoriassa olla mahdollinen laitteiston vikatilanteessa.

Mittausjärjestelyä on esitelty Kuvissa 1 - 2.

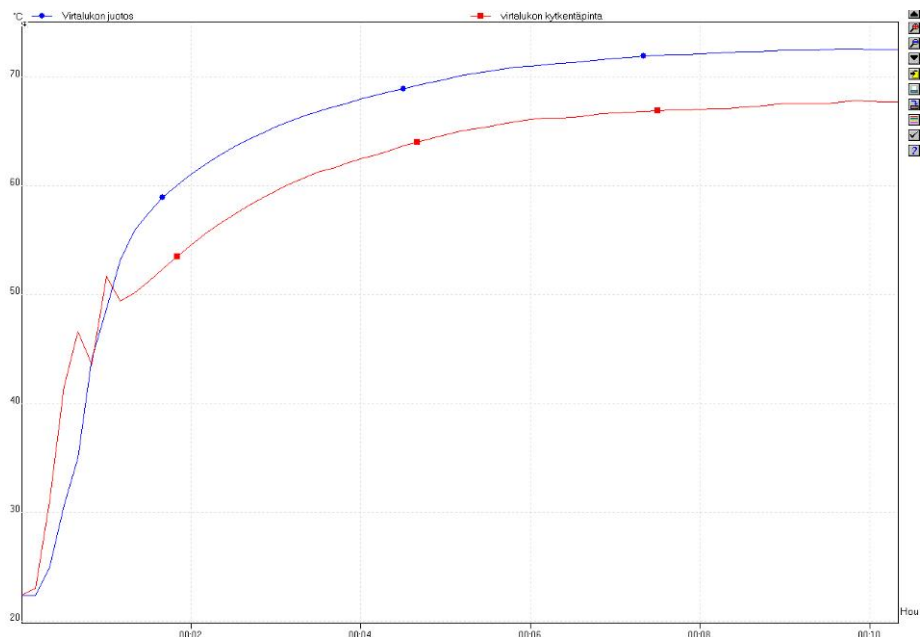


*Kuva 1. Mittausjärjestely. Vastukset ja niiden säätölaite kuvassa etualalla ja oikealla.*



Kuva 2. Termoelementtilangat kiinnitettynä virtalukon pohjaan (vas.) sekä virta- ja lämpötilamittauslaitteet (oik.).

Mittausjärjestelyn vastaavuus edellisessä tutkimusvaiheessa (VTT-S-03842-16) käytettyyn järjestelyyn tarkistettiin mittaamalla lämpötilaa uudesta virtapiiriin kytketystä virtalukosta (Kuva 3). Mittauspisteet olivat virtalukon pohjassa (termolangan pää lähellä virtalukon kytkentäpintoja) sekä pohjan ulkopinnalla sijaitsevassa tinajuotoksessa. Edellisessä tutkimuksessa mitattu maksimilämpötila oli 66,9 °C. Tässä tutkimuksessa käytetyllä mittausjärjestelyllä, virran ollessa noin 15 A, maksimilämpötiloiksi saatiin 72,6 °C (juotos) ja 67,8 °C (virtalukon pohja). Mittausjärjestelyn voitiin näin ollen todeta simuloivan erittäin hyvin maksimaalisesti kuormitetun polkupyörän todellista käyttöä.



Kuva 3. Ehjästä virtalukosta mitatut lämpötilat.

## Suoritus ja tulokset

### 1. Käytettyjen virtalukkojen tarkastelu

Kuvissa 4 - 6 on esitetty edellisessä tutkimusvaiheessa (VTT-S-03842-16) testatun virtalukon pohjan kontaktipinnat. Kyseinen virtalukko oli jo ennestään käytetystä polkupyörästä peräisin. Kyseisessä testissä laitetta kuormitettiin maksimikuormituksella ja maksimaalisella akun lataustilalla ja toiminta-ajalla. Käytännössä laitteen käyttäjä ei ajaessaan voi kuormittaa laitetta jatkuvasti näin voimakkaasti.

Edellisen tutkimusvaiheen testissä virtalukon pohjan maksimilämpötilaksi mitattiin termoparianturilla n. 67 °C. Kuvista 4 - 6 voidaan havaita, että virtalukon kuparisissa kytkentänastoissa on lämpövärjäytymiä ja kipinöinnin jälkiä. Kipinöinnin jäljet näkyvät selvästi myös messinkisen vastakappaleen yhdessä kontaktipisteessä. Paikallisesti kontaktipintojen lämpötila aivan metallin pinnassa on näin ollen ollut huomattavasti virtalukon pohjasta mitattua lämpötilaa korkeampi. Ympäröivien muoviosien sulamista ei ole kuitenkaan havaittavissa.



Kuva 4. Tutkimuksessa VTT-S-03842-16 testatun virtalukon pohjan kontaktipinnat.

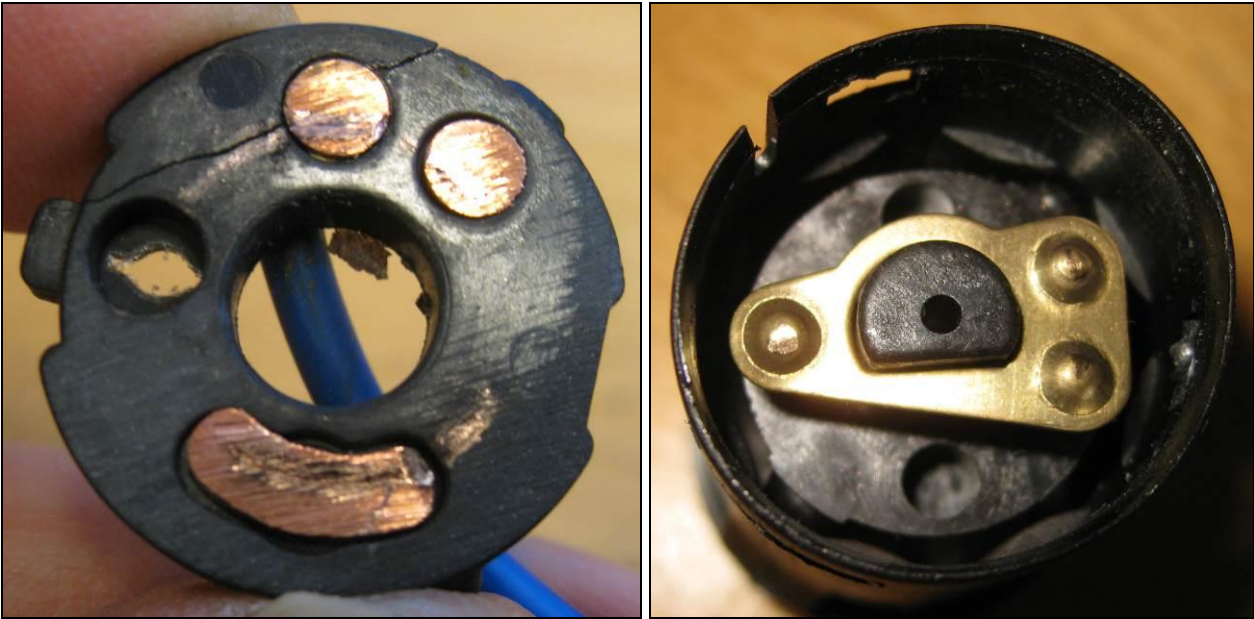


Kuva 5. Lähikuvia tutkimuksessa VTT-S-03842-16 testatun virtalukon kytkentänastojen pinnoista.



Kuva 6. Tutkimuksessa VTT-S-03842-16 testatun virtalukon toisena kytkentäpintana toimiva messinkinen vastakappale (vas.) ja lähikuva kontaktipinnasta (oik.). Lähikuvassa oleva kontaktipinta sijaitsee vastakappaleessa (vas.) oikealla ylhäällä.

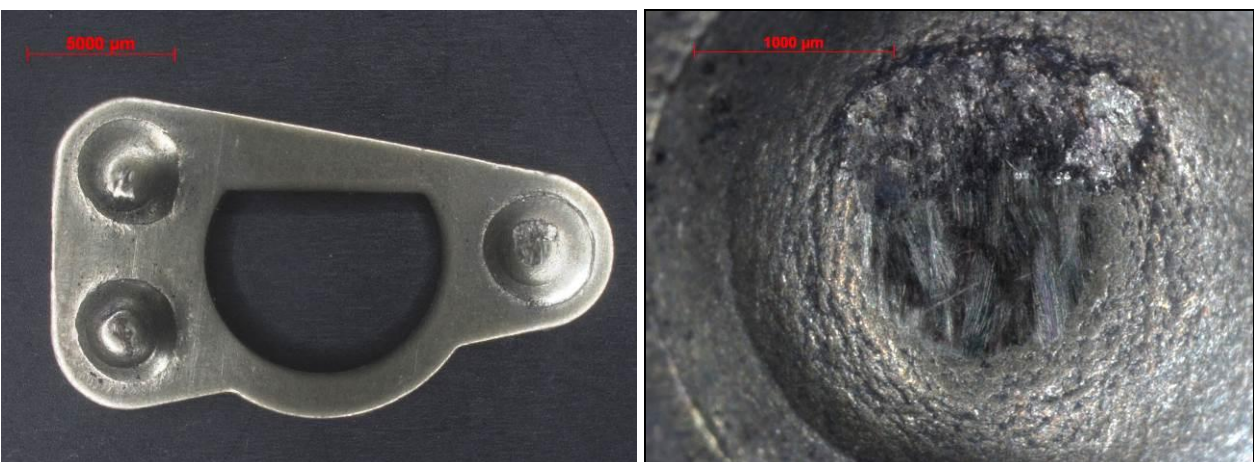
Kuvissa 7 - 9 on esitetty tämän tutkimuksen osiossa 3 käytetyn virtalukon pohjan kontaktipinnat ennen varsinaisen mittauksen suorittamista. Virtalukkoa on käännetty 10 000 kertaa edestakaisin. Koska polkupyörän moottori käynnistyy ainoastaan polkupyörää poljettaessa, virtalukon avainta käännettäessä vain hyvin pieni virta kytkeytyy laitteistoon. Tällöin mm. käyttökahvassa olevat LED-valot kytkeytyvät. Kontaktipinnoissa on kuitenkin 10 000 käynnön jälkeen havaittavissa jälkiä kipinöinnistä (kuvat 5, oik. ja 6, oik.). Selvää materiaalin siirtymistä sekä kuparinastoista muovipinnalle (Kuva 4, vas.) että muovipinnasta kuparinastojen pinnoille (Kuva 5) on myös havaittavissa.



Kuva 7. Kontaktipinnat virtalukossa, jota on käännetty 10 000 kertaa edestakaisin.



Kuva 8. Lähikuvia kuparinastojen pinnoista virtalukossa, jota on käännetty 10 000 kertaa edestakaisin. Virtalukon pohja on murtunut irrotettaessa (vas.).



Kuva 9. Toisena kytkentäpintana toimiva messinkinen vastakappale (vas.) ja lähikuva kontaktipinnasta (oik.). Kyseinen kontaktipinta sijaitsee vastakappaleessa (vas.) vasemmalla alhaalla.



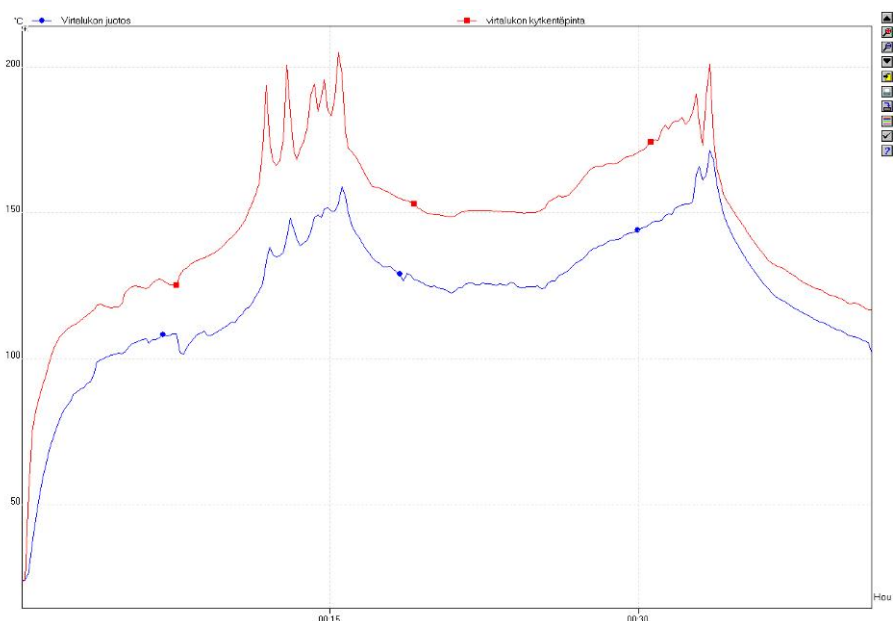
## 2. Juotosten irtoamisen testaus lämpötilan kohotessa

Jäljempänä kuvattavien testien yhteydessä juotosten todettiin irtoavan lämpötilan kohotessa (esim. osiot 3, 4 ja 5). Tarkkaa lämpötilaa juotosten sulamiselle oli kuitenkin vaikeaa määrittää testitilanteessa, koska lämpötilan kohoaminen saattoi olla hyvin nopeaa tai juotos saattaa kuumetessaan heikentyä mekaanisesti, jolloin irtoaminen tapahtuu jo sulamislämpötilaa alemmassa lämpötilassa. Tämän vuoksi juotosmetallin tarkka sulamislämpötila määritettiin termoanalyysin avulla. Termoanalyysissä juotoksen sulaminen tapahtui lämpötila-alueella 183 - 194 °C, mikä on selvästi alempi kuin puhtaan tinan sulamispiste. Juotostinan termoanalyysin yksityiskohtaiset tulokset on esitetty Liitteessä 1.

## 3. Kytkenäntästen sekä niiden vastinpintojen kipinöinnin ja pintojen haettumisen/kontaminoitumisen vaikutus virtalukon lämpenemiseen

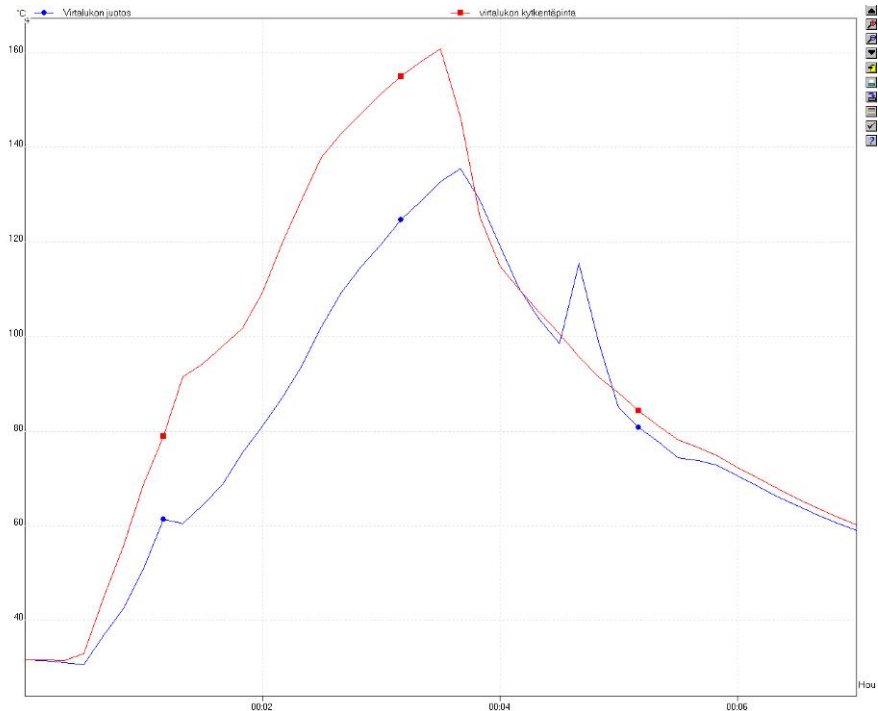
Osiossa 3 testaus suoritettiin käyttäen virtalukkoa, jota oli käännetty 10 000 kertaa edestakaisin, mikä on huomattavasti enemmän kuin olisi oletettavaa usean vuoden jatkuvassa käytössä. Kuten edellä todettiin, vastinpinnoissa oli havaittavissa kipinöinnin jälkiä ja materiaalin siirtymistä sekä kuparinastoista muoviin, että muovista kuparinastoihin.

Lämpötilamittauksen tulokset noin 15 A virtaa käytettäessä on esitetty Kuvasessa 10. Lämpötilan maksimiarvo virtalukon pohjassa oli noin 205 °C ja juotoksessa noin 170 °C. Lämpötilahuiput ilmenevät kuvaajassa piikkeinä, mikä viitanee kontaktipintojen pinnankarheushuippujen hetkellisiin kiinnihitsautumisiin. Todennäköisenä syynä virtalukon kytkentäosien voimakkaaseen lämpenemiseen on kuparinastojen pinnalle tarttuneen bakeliitin eristävä vaikutus.

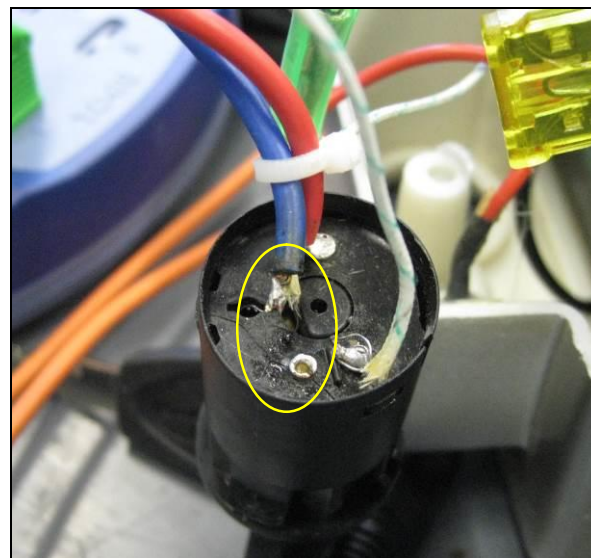


Kuva 10. Lämpötilamittauksen tulokset noin 15 A virtaa käytettäessä.

Kuvassa 11 on esitetty lämpötilamittauksen tulokset noin 19,5 A virtaa käytettäessä. Lämpötilan nousu oli tällöin hyvin nopeaa, ja johtimen juotos irtosi jo noin 3,5 minuutin testiajan jälkeen (Kuva 12).

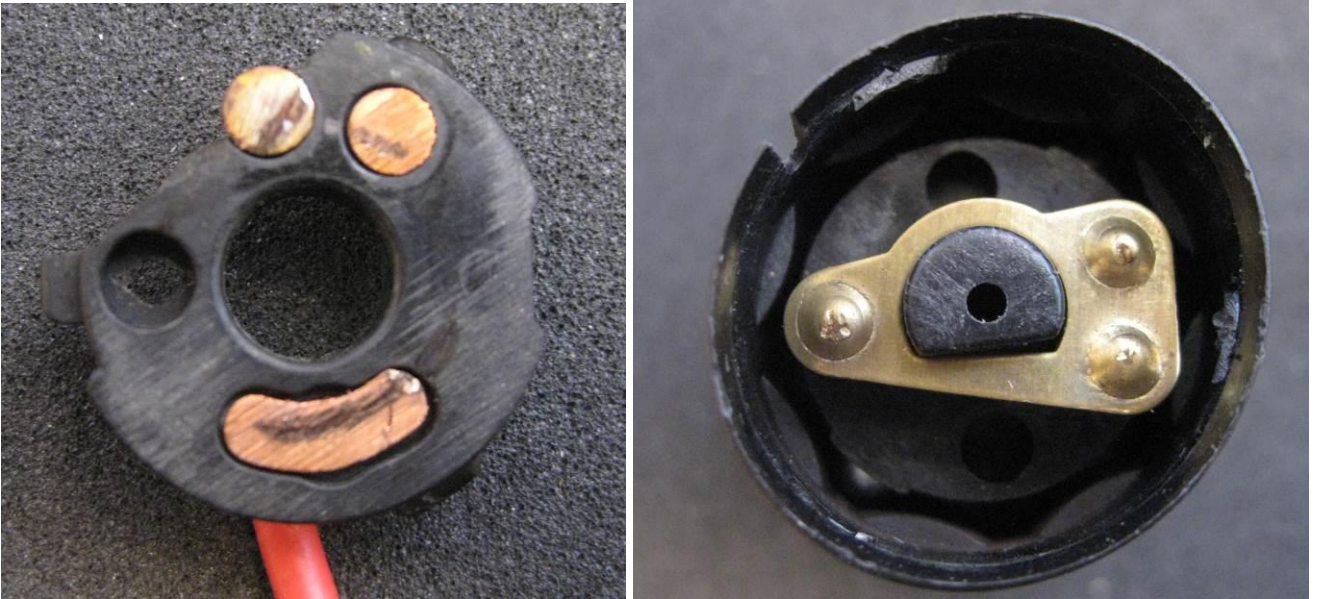


Kuva 11. Lämpötilamittauksen tulokset noin 19,5 A virtaa käytettäessä.



Kuva 12. Irronnut juotos.

Virtalukko avattiin ja kontaktipinnat tarkastettiin testin jälkeen (Kuva 13). Huolimatta lämpötilan voimakkaasta paikallisesta kohoamisesta kytkentäpinoissa, muovin sulamista ei ole lainkaan havaittavissa virtalukon pohjassa eikä lieriömäisessä kotelo-osassa.

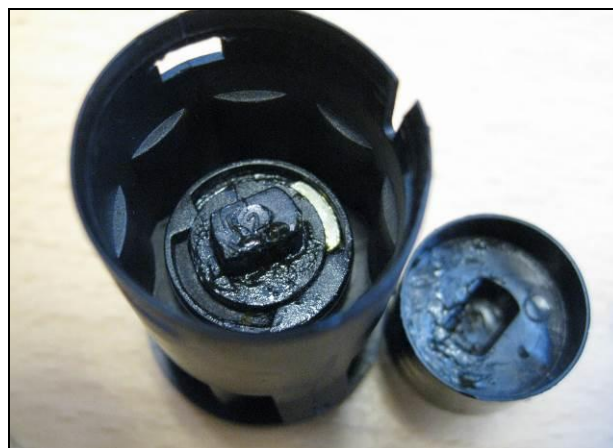


*Kuva 13. Virtalukon kontaktipinnat testin (osio 3) jälkeen. Samat pinnat ennen testin aloittamista on esitetty Kuvassa 4.*

#### 4. Kontaminaation vaikutus virtalukon lämpenemiseen

Virtalukon kytkentäpintojen kontaminaation vaikutusta virtalukon lämpötilan nousuun testattiin tilanteissa, joissa virtalukko on rasvainen, kastunut tai kontaktipintojen väliin on jäänyt kontaktipinnoista irronnutta kuparimurskaa.

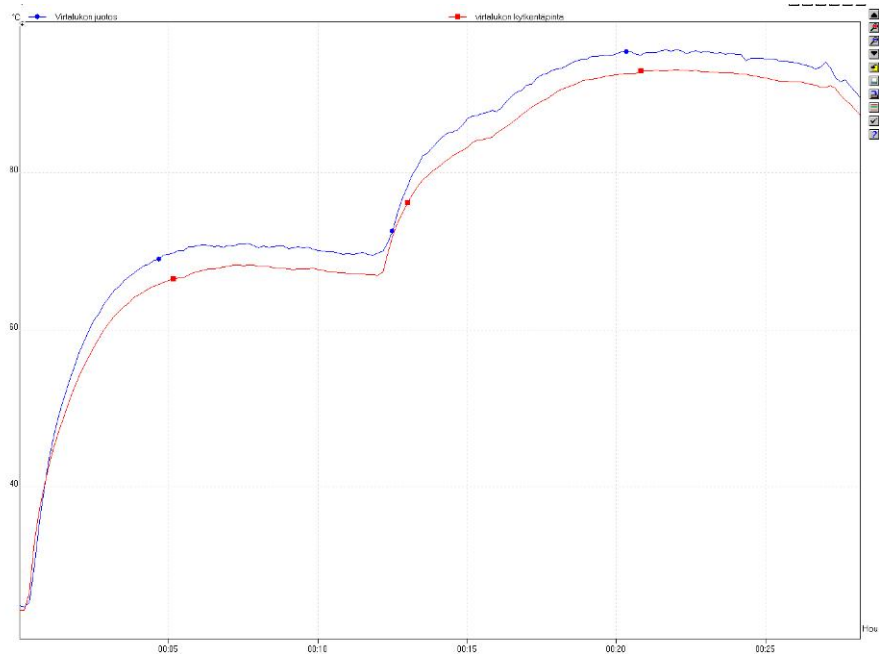
Virtalukon sisällä on todettu olevan hieman rasvaa tai rasvamaista materiaalia, joka ilmeisesti toimii muoviosien välisenä voiteluaineena (Kuva 14). Rasva sijaitsee osien välissä suljetussa tilassa eikä se normaalitilanteessa ole suorassa kontaktissa metallisiin kytkentäpintoihin. Rasvan määrä oli hyvin pieni: irti kaavitun rasvan massa oli noin 4 mg.



*Kuva 14. Rasvaa virtalukon sisällä.*

Rasvan vaikutusta testattiin käsittelemällä kytkentäpinnat ennen mittauksen suorittamista virtalukon sisäosista irrotetulla rasvalla. Lämpötilamittauksen tulokset on esitetty Kuvassa 15. Mittaus aloitettiin noin 15 A virtaa käyttäen,

ja lämpötilan tasaannuttua, noin 12 minuutin kuluttua mittauksen käynnistymisestä, virta nostettiin arvoon 19,5 A. Maksimilämpötilaksi juotoksesta mitattuna saatiin alemmalla virralla noin 71 °C ja korkeammalla virralla 95 °C. Tuloksen perusteella voitelurasvalla ei ollut merkittävää vaikutusta virtalukon toimintaan ja lämpenemiseen.



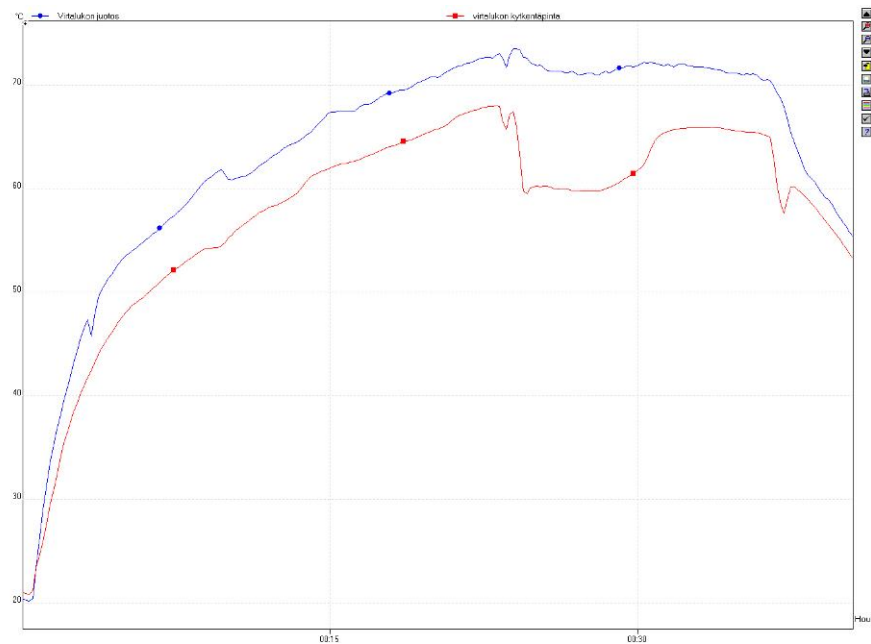
Kuva 15. Lämpötilamittauksen tulokset rasvalla käsitellyllä virtalukolla. Virta on nostettu arvosta 15 A arvoon 19,5 A ajanhetkellä 12 min.

Veden vaikutusta virtalukossa testattiin kastelemalla virtalukko ennen mitausta ja valuttamalla testin aikana hieman vettä virtalukon pohjaan.

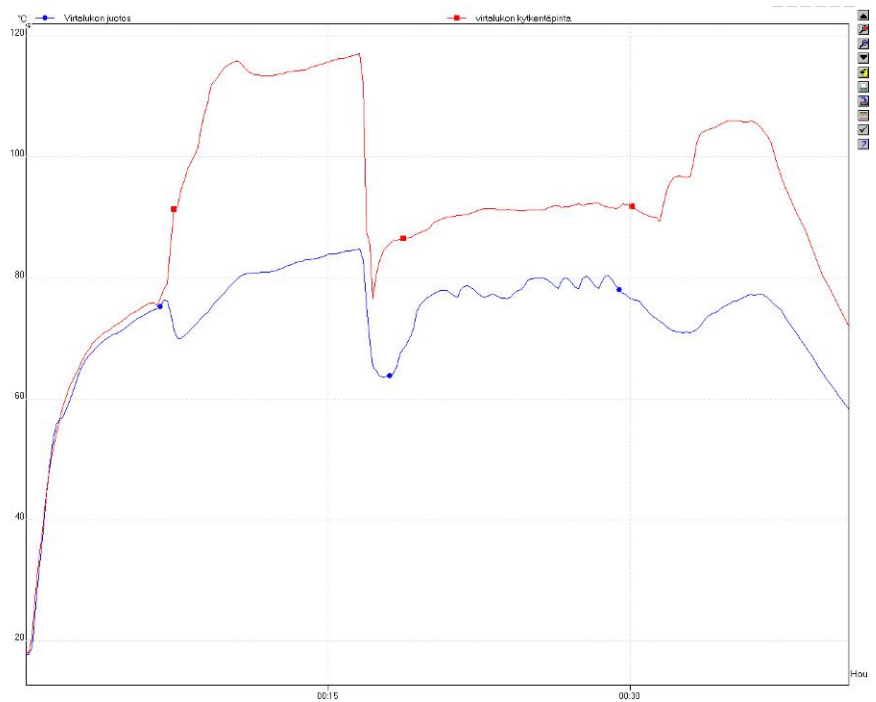
Lämpötilamittauksen tulokset kastuneella virtalukolla noin 15 A virtaa käytettäessä on esitetty Kuvassa 16. Virtalukon pohjaan on lisätty vettä ulkoa päin ajanhetkellä 23 min. Kuvasta havaitaan lämpötilan nousseen aluksi suhteellisen normaalisti, mutta veden lisäämisen jälkeen lämpötila virtalukon pohjassa on laskenut veden jäähdyttävän vaikutuksen vuoksi.

Käytettäessä noin 19,5 A virtaa (Kuva 17) virtalukon pohjan lämpötila alkoi voimakkaasti nousta ajanhetkellä n. 7 min. Lämpötilan nousu kuitenkin pysähtyi n. 117 °C lämpötilan jälkeen. Myös tässä tapauksessa lämpötila virtalukon pohjassa laski veden lisäämisen jälkeen selvästi veden jäähdyttävän vaikutuksen vuoksi. Virtalukon pohjan lämpötila kohosi vielä tämän jälkeen noin 106 °C lämpötilaan saakka, mutta tämän jälkeen akkujen lataus alkoi nopeasti heiketä.

Veden vaikutus virtalukon toimintaan 15 A virtaa käytettäessä vaikutti näin ollen vähäiseltä, mutta korkeampaa 19,5 A virtaa käytettäessä virtalukon lämpötila kohosi normaalia enemmän aiheuttamatta kuitenkaan johtimien juotosien irtoamista.

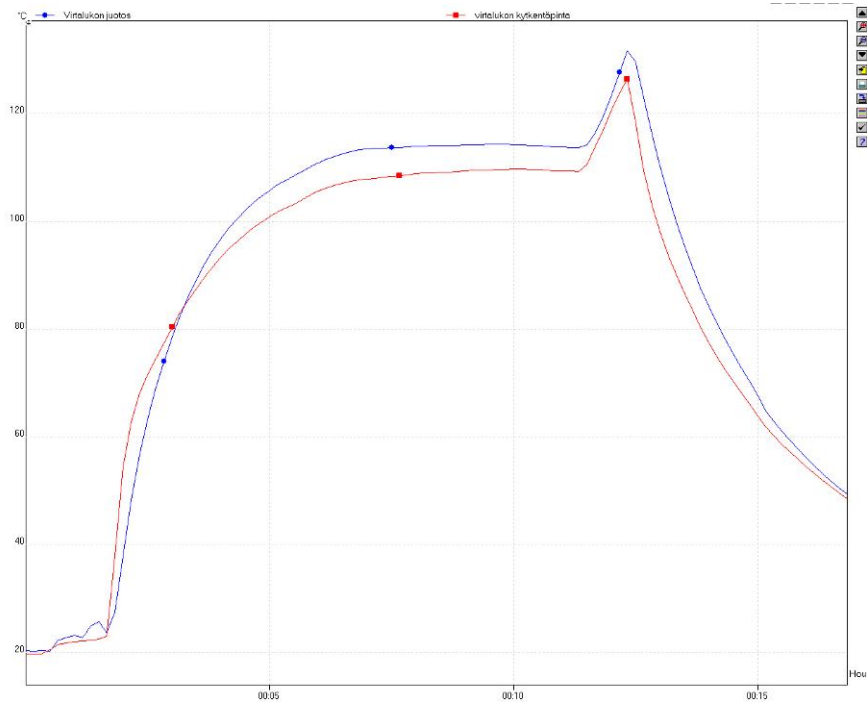


Kuva 16. Lämpötilamittauksen tulokset kastuneella virtalukolla noin 15 A virtaa käytettäessä. Virtalukon pohjaan on lisätty vettä ulkoa päin ajanhetkellä 23 min.



Kuva 17. Lämpötilamittauksen tulokset kastuneella virtalukolla noin 19,5 A virtaa käytettäessä. Virtalukon pohjaan on lisätty vettä ulkoa päin ajanhetkellä 16:30.

Kontaktipintojen väliin jääneen kuparimurskan vaikutusta virtalukon lämpötilaan testattiin raaputtamalla kuparinastojen pintoja ennen mittauksen suorittamista siten, että pinnoilla ja niiden ympäristössä oli havaittavissa runsaasti irtonaista kuparipurua. Testin tulokset on esitetty Kuvassa 18. Kuvasta havaitaan, että lämpötilan kohoaminen 15 A virtaa käytettäessä oli normaalia voimakkaampaa. Lämpötila tasaantui noin 114 °C arvoon. Kun virta nostettiin arvoon n. 19,5 A, lämpötila alkoi nopeasti kohota ja johtimen juotos irtosi jo noin yhden minuutin jälkeen.

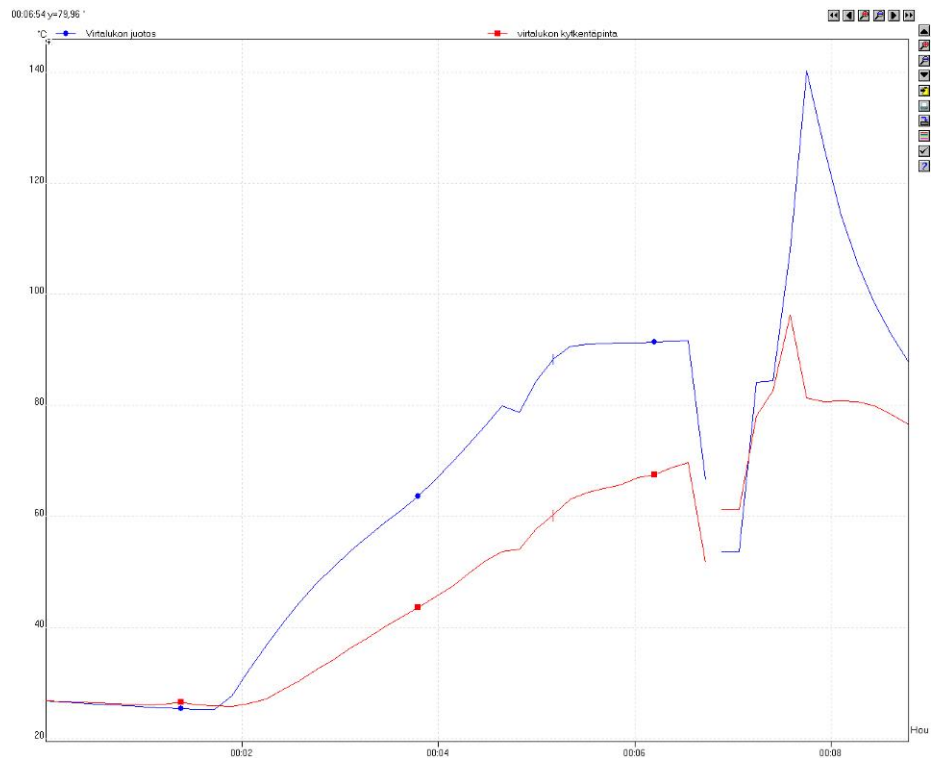


Kuva 18. Lämpötilamittauksen tulokset virtalukolla, jonka kontaktipintojen väliin on jäänyt kontaktipinnoista irronnutta kuparimurskaa. Virta on nostettu arvosta 15 A arvoon 19,5 A ajanhetkellä 12:22, jonka jälkeen johtimen juotos irtosi.

##### 5. Virtalukon osittaisen sulkeutumisen vaikutus lämpenemiseen

Virtalukkoa käytettäessä todettiin, että avain saattaa jäädä on- ja off-asentojen puoliväliin, mutta avain ei tällöin irtoa virtalukosta. Virta ei kuitenkaan tällöin kytkeytynyt, mikä todettiin myös lämpötilamittauksessa.

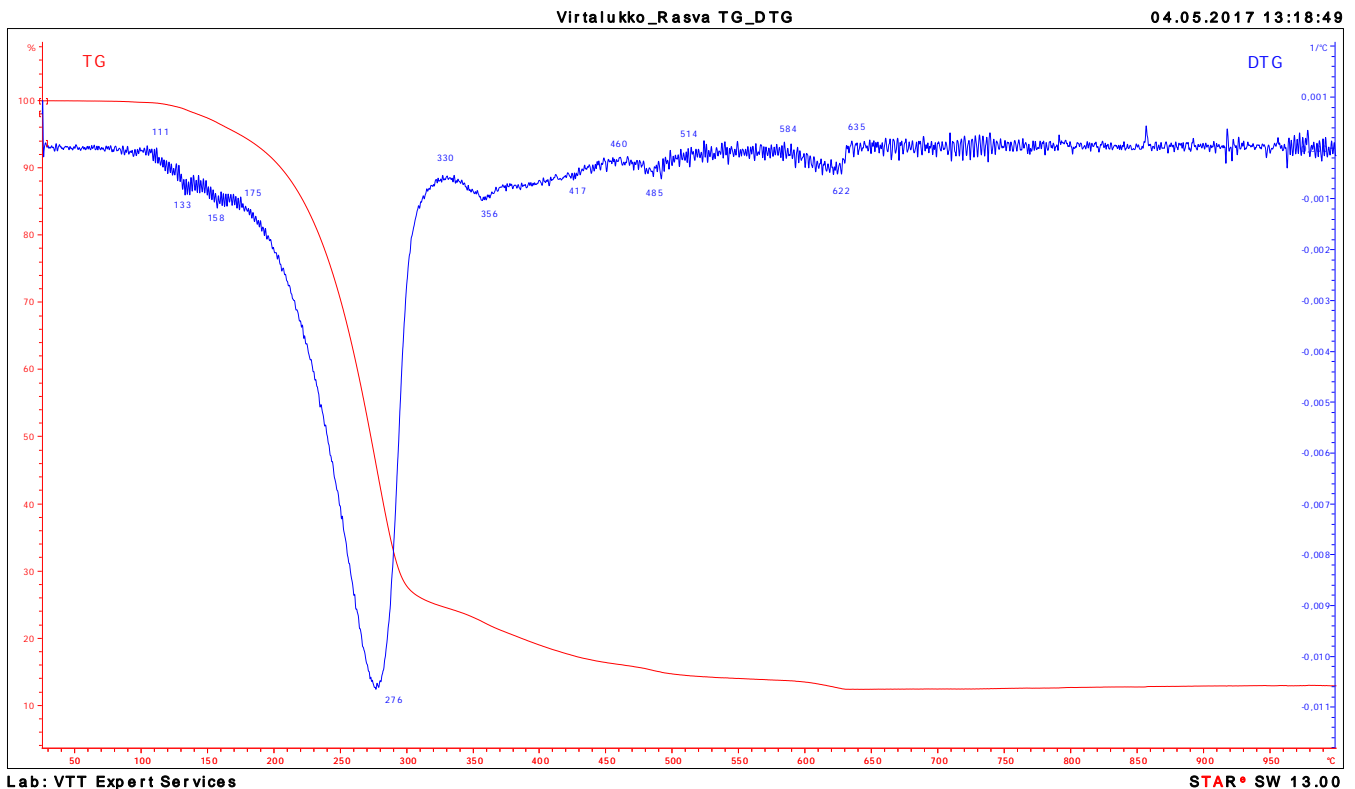
Lisätestinä testattiin lämpötilan nousua silloin, kun avainta käännetään maksimikuormituksen ollessa päällä 19,5 A virtaa käytettäessä. Käytännössä tällaisen tilanteen syntyminen olisi erittäin epätodennäköistä. Kuvasta 19 havaitaan, että yritettäessä kytkeä virtaa päälle kuormitettuna, lämpötila nousi hyvin nopeasti ja johtimen liitos irtosi lähes välittömästi.



Kuva 19. Virtalukon avainta käännettiin maksimikuormituksella 19,5 A virtaa käytettäessä. Virta käännettiin pois ajanhetkellä 6:30 ja uudestaan päälle ajanhetkellä 7:45, jolloin johtimen juotos irtosi.

#### 6. Virtalukon sisällä olevan rasvan syttymisherkkyyden tutkiminen

Osiossa 6 selvitettiin virtalukon sisältämän rasvamaisen materiaalin termistä hajoamiskäyttäytymistä termooanalyysillä. Termooanalyysin tuloksena saadut TG- ja DTG-käyrät on esitetty Kuvassa 20.

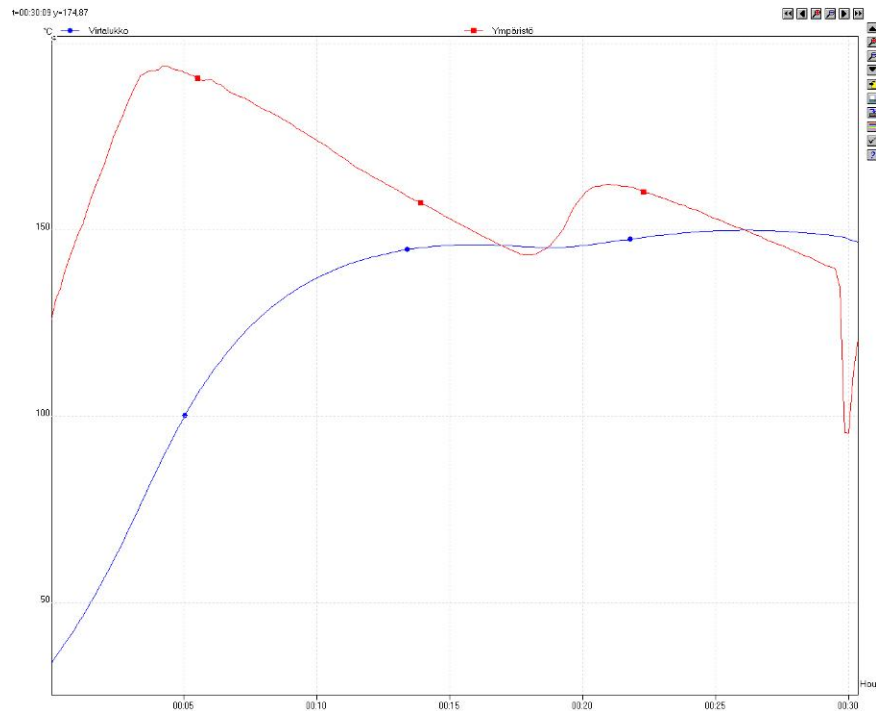


Kuva 20. Virtalukon sisältämän rasvan TG- ja DTG-käyrät.

Tutkimusten perusteella näytteen rasvan terminen hajoaminen alkoi lämpötilassa n. 110 °C. Suurin massakato tapahtui lämpötila-alueella 175 - 330 °C.

Virtalukon mahdollista syttymistä testattiin uunissa, jonka lämpötilaa säädettiin siten, että virtalukosta mitattu lämpötila oli välillä 145 - 150 °C. Lämpötilakäyrät testin ajalta on esitetty Kuvassa 21. Virtalukko ei testin aikana syttynyt palamaan. Virtalukko ei syttynyt myöskään testin lopussa, kun sitä koskettiin useita kertoja palavalla liekillä.





Kuva 21. Virtalukon syttymistesti. Sininen käyrä kuvaa lämpötilaa virtalukon sisällä, jossa rasva sijaitsee. Punainen käyrä kuvaa ilman lämpötilaa uunissa.

Virtalukon lieriömäinen kotelo-osa sulii jo testin alkuvaiheessa ohuimmalta osaltaan (Kuva 22). On ilmeistä, että ohuen seinämän lämpötila kohosi korkeammaksi kuin mitattu lämpötila virtalukon sisällä. Aiemmassa tutkimuksessa VTT-S-03842-16 virtalukon lieriöosan sulamispisteeksi oli todettu 158 °C.



Kuva 22. Osittain sulanut virtalukko testin jälkeen.

Virtalukosta erotetun rasvan syttymistä sellaisenaan ja paperiin imeytettynä testattiin lisäksi 200 ja 250 °C lämpötilassa. Rasva ei syttynyt palamaan, joten sen itsesyttymislämpötila on näin ollen korkeampi kuin 250 °C.

## Yhteenveto

### 1. Käytettyjen virtalukkojen tarkastelu

Tarkasteltavana olleet käytetyt virtalukot olivat olleet testikäytössä, joka on huomattavasti todellista sähköavusteisen polkupyörän käyttöä kuormittavampaa.

Edellisessä tutkimusvaiheessa VTT-S-03842-16 testatun virtalukon kuparisissa kytkentänastoissa oli lämpövärjäytymiä ja kipinöinnin jälkiä. Kipinöinnin jäljet näkyivät selvästi myös messinkisen vastakappaleen kontaktipisteessä. Paikallisesti kontaktipintojen lämpötila aivan metallin pinnassa oli näin ollen ollut huomattavasti virtalukon pohjasta mitattua lämpötilaa (max. 67 °C) korkeampi. Ympäröivien muoviosien sulamista ei ollut kuitenkaan lainkaan havaittavissa.

Virtalukossa, jota oli käännetty 10 000 kertaa edestakaisin, kontaktipinnoissa oli myös havaittavissa jälkiä kontaktipintojen kipinöinnistä. Selvää materiaalin siirtymistä sekä kuparinastoista muovipinnalle, että muovipinnasta kuparinastojen pinnoille oli lisäksi havaittavissa.

### 2. Juotosten irtoamisen testaus lämpötilan kohotessa

Jäljempänä kuvattavien testien yhteydessä juotosten todettiin säännönmukaisesti irtoavan lämpötilan kohotessa riittävästi (esim. osiot 3, 4 ja 5).

Termoanalyysissä juotoksen sulaminen tapahtui lämpötila-alueella 183 - 194 °C, mikä on selvästi alempi kuin puhtaan tinan sulamispiste.

### 3. Kytkenäntösten sekä niiden vastinpintojen kipinöinnin ja pintojen haittumuutoksen/kontaminoitumisen vaikutus virtalukon lämpenemiseen

Osiassa 3 testaus suoritettiin käyttäen virtalukkoa, jota oli käännetty 10 000 kertaa edestakaisin.

Noin 15 A virtaa käytettäessä lämpötilan maksimiarvo virtalukon pohjassa oli noin 205 °C ja juotoksessa noin 170 °C. Lämpötilahuiput ilmenivät kuvaajassa piikkeinä, mikä viitanee kontaktipintojen pinnankarheushuippujen hetkellisiin kiinnihitsautumisiin. Noin 19,5 A virtaa käytettäessä lämpötilan nousu oli hyvin nopeaa, ja johtimen juotos irtosi jo noin 3,5 minuutin testiajan jälkeen.

Todennäköisenä syynä virtalukon kytkentäosien voimakkaaseen lämpenemiseen oli kuparinastojen pinnalle tarttuneen bakeliitin eristävä vaikutus.

Kun virtalukko avattiin ja kontaktipinnat tarkastettiin testin jälkeen, muovin sulamista ei ollut lainkaan havaittavissa virtalukon pohjassa eikä lieriömäisessä kotelo-osassa.

### 4. Kontaminaation vaikutus virtalukon lämpenemiseen

Rasvan vaikutusta lämpenemiseen testattiin käsittelemällä kytkentäpinnat ennen mittauksen suorittamista virtalukon sisäosista irrotetulla rasvalla. Maksimilämpötilaksi juotoksesta mitattuna saatiin alemmalla virralla (15 A) noin 71

°C ja korkeammalla virralla (19,5 A) 95 °C. Tuloksen perusteella voitelurasvalla ei ollut merkittävää vaikutusta virtalukon toimintaan ja lämpenemiseen.

Veden vaikutusta virtalukossa testattiin kastelemalla virtalukko ennen mitausta ja valuttamalla testin aikana hieman vettä virtalukon pohjaan. Noin 15 A virtaa käytettäessä lämpötila nousi aluksi suhteellisen normaalisti (max. 73,5 °C), mutta veden lisäämisen jälkeen lämpötila virtalukon pohjassa laski veden jäädyttävän vaikutuksen vuoksi. Käytettäessä noin 19,5 A virtaa virtalukon pohjan lämpötila nousi korkeimmillaan n. 117 °C saakka. Myös tässä tapauksessa lämpötila virtalukon pohjassa laski veden lisäämisen jälkeen selvästi.

Veden vaikutus virtalukon toimintaan 15 A virtaa käytettäessä vaikutti näin ollen vähäiseltä, mutta korkeampaa 19,5 A virtaa käytettäessä virtalukon lämpötila kohosi normaalia enemmän aiheuttamatta kuitenkaan johtimien juotosien irtoamista.

Kontaktipintojen väliin jääneen kuparimurskan vaikutusta virtalukon lämpötilaan testattiin raaputtamalla kuparinastojen pintoja ennen mittauksen suorittamista siten, että pinnoilla ja niiden ympäristössä oli havaittavissa runsaasti irtonaista kuparipurua. Lämpötilan kohoaminen 15 A virtaa käytettäessä oli normaalia voimakkaampaa, ja lämpötila tasaantui noin 114 °C arvoon. Kun virta nostettiin arvoon n. 19,5 A, lämpötila alkoi nopeasti kohota ja johtimen juotos irtosi jo noin yhden minuutin jälkeen.

#### 5. Virtalukon osittaisen sulkeutumisen vaikutus lämpenemiseen

Virtalukkoa käytettäessä todettiin, että avain saattaa jäädä on- ja off-asentojen puoliväliin. Virta ei kuitenkaan tällöin kytkeytynyt, mikä todettiin myös lämpötilamittauksessa.

Yritettäessä kytkeä virtaa päälle maksimaalisesti kuormitettuna (virta 19,5 A), lämpötila nousi hyvin nopeasti ja johtimen liitos irtosi lähes välittömästi.

#### 6. Virtalukon sisällä olevan rasvan syttymisherkkyuden tutkiminen

Tutkimusten perusteella näytteen rasvan terminen hajoaminen alkoi lämpötilassa 110 °C. Suurin massakato tapahtui lämpötila-alueella 175 - 330 °C.

Virtalukon mahdollista syttymistä testattiin uunissa, jonka lämpötilaa säädettiin siten, että virtalukosta mitattu lämpötila oli välillä 145 - 150 °C. Virtalukko ei testin aikana syttynyt palamaan. Virtalukko ei syttynyt myöskään testin lopussa, kun sitä kosketettiin useita kertoja palavalla liekillä.

Rasvan syttymistä sellaisenaan ja paperiin imeytettynä testattiin lisäksi 200 ja 250 °C lämpötilassa. Rasva ei syttynyt palamaan, joten sen itsesyttymislämpötila on näin ollen korkeampi kuin 250 °C.

## Tulosten tarkastelu

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää, onko ajateltavissa olevissa vikatilanteissa mahdollista saada virtalukko syttymään pyörän omalla virtalähteellä. Tutkimuksessa tarkasteltiin sekä tilannetta, jossa pyörä on käytössä maksimaalisesti kuormitettuna (esim. pitkäaikainen ylämäkijatilanne, max. 15 A virta), sekä teoreettista tilannetta, jossa virta on jonkin laitteiston vikatilanteen vuoksi korkeampi, pysyen kuitenkin laitteiston 20 A sulakkeen sallimissa rajoissa.

Taulukkoon 1 on koottu testatut vikatilanteet, mitatut lämpötilat ja havainnot mahdollisesta johtimen irtoamisesta ja virtalukon syttymisestä.

*Taulukko 1. Testatut vikatilanteet ja testeissä tehdyt havainnot.*

Vikatilanne	Maksimilämpötila (°C)		Juotoksen irtoaminen		Virtalukon syttyminen	
	15 A	19,5 A	15 A	19,5 A	15 A	19,5 A
10 000 kääntöä (kulu- neet/kontaminoituneet kytkentäpinnat)	205	160	Ei	Irtosi	Ei	Ei
Rasvaa kytkentäpin- noilla	71	95	Ei	Ei	Ei	Ei
Kastunut virtalukko	74	117	Ei	Ei	Ei	Ei
Metallipurua kytken- täpinnoilla	114	131	Ei	Irtosi	Ei	Ei
Avain jäänyt puolivä- liin	Ei kytkey- tynyt	Ei kytkey- tynyt	Ei	Ei	Ei	Ei
Avaimen kääntö käy- tön aikana	Ei testattu	140	Ei	Irtosi	Ei	Ei

Suoritetuissa tutkimuksissa yhdessäkään virtalukolle aiheutetussa vikatilanteessa virtalukko ei syttynyt palamaan. Suoritetuissa tutkimuksissa todettiin, että virtalukon pohjan lämpötila voi kohota huomattavasti normaalia korkeammaksi, mikäli kytkentäpintojen välinen kontakti on häiriintynyt. Voimakas lämpötilan nousu mitattiin virtalukosta, jonka virta-avainta oli käännetty edestakaisin 10 000 kertaa. Lämpötilan nousun todennäköisenä syynä oli kytkentänastoja ympäröivän bakeliitin kulkeutuminen kuparisten kytkentänastojen pinoille. Bakeliitti toimii tällöin pintojen välisenä eristeenä. Tässäkään tapauksessa, huolimatta siitä, että virtalukon pohjasta mitattu korkein lämpötila oli 15 A virtaa käytettäessä yli 200 °C, ympäröivissä muoviosissa ei ollut merkkejä sulamisesta. Virtalukon pohjan lämpötilan nousua aiheuttivat myös kuparinastoista irronnut metallipuru ja jossain määrin virtalukkoon päässyt vesi. Käytettäessä 19,5 A virtaa, eräissä testitilanteissa havaittu hyvin nopea lämpötilan nousu pysähtyi johtimen juotoksen irtoamiseen.

Suoritetussa tutkimuksessa tehdyillä termoanalyseillä täydennettiin virtalukon ja akkukotelon materiaalien ominaisuuksien tietoja, joista osa oli määritetty jo edellisessä tutkimuksessa VTT-S-03842-16. Taulukkoon 2 on koottu tutkimuksen kannalta keskeisimmät materiaaliominaisuudet.

Taulukko 2. Termoanalyysien keskeisimmät tulokset.

Materiaali/osa	Sulamis piste (°C)	Itsesyttymislämpötila (°C)
Akkukotelon muovi	Ei havaittavissa (amorfinen)	380
Virtalukon lieriöosan muovi	158	290
Virtalukon pohjan muovi (bakeliitti)	Ei havaittavissa (amorfinen)	>400
Rasva virtalukon sisällä	Ei määritetty	>250
Johtimien juotokset	183 - 194	Ei määritetty

Taulukko 2 osoittaa, että kaikkien virtalukossa ja sen läheisyydessä käytettyjen materiaalien itsesyttymislämpötilat ovat olennaisesti korkeampia kuin johtimien juotosten sulamislämpötila ja myös korkeampia kuin yhdessäkään suoritettussa testissä virtalukon pohjasta mitatut maksimilämpötilat.

Nyt raportoitava tutkimus oli kolmivaiheiseksi suunnitellun tutkimussarjan toinen osa. Suoritettujen tutkimusten perusteella kolmannen vaiheen (palon leviämisen simulointi) toteuttaminen ei ole mahdollista, koska tutkimuksen kohteena ollut virtalukko ei syttynyt palamaan.

## Johtopäätökset

Suoritetuissa tutkimuksissa yhdessäkään sähköavusteisen polkupyörän maksimaalisesti kuormitetulle virtalukolle aiheutetussa vikatilanteessa virtalukko ei syttynyt palamaan.

Virtalukon johtimien juotosten sulamislämpötilan todettiin olevan merkittävästi alempi kuin minkään virtalukossa ja sen läheisyydessä käytetyn materiaalin itsesyttymislämpötila. Käsityksemme mukaan kaikissa ajateltavissa olevissa vikatilanteissa laitteiston virtapiiri katkeaa juotosten irtisulamiseen tai sulakkeen palamiseen ennen syttymislämpötilaa.

Espoo, 17.5.2017



Tapio Klasila  
Tuotepäällikkö



Risto Parikka  
Erityisasiantuntija

JAKELU

Tilaaaja, 1 kpl  
VTT, arkisto, 1 kpl

## LIITE 1

Virtalukossa käytetyn juotosmetallin termoaalyysitutkimus

## Virtalukossa käytetyn juotosmetallin termooanalyysitutkimus

### Näytteet

Tutkittavaksi toimitettiin sähköpolkupyörän virtalukosta irrotettu pala, jossa oli muovin ympäröimä metallinasta sekä siihen kiinnittynyttä juotosmetallia.

### Tehtävä

Tutkimuksen tehtävänä oli selvittää virtalukon sisältämän juotosmetallin termistä käyttäytymistä termooanalyysillä. Kiinnostuksen kohteena oli erityisesti se, missä lämpötilassa juotosmetalli sulaa.

### Suoritus

Analyysia varten virtalukon juotosmetallista leikattiin pieni kappale. Termooanalyysi tehtiin kappaleelle sellaisenaan Mettler TGA 851e –termovaa’alla käyttäen seuraavia parametreja:

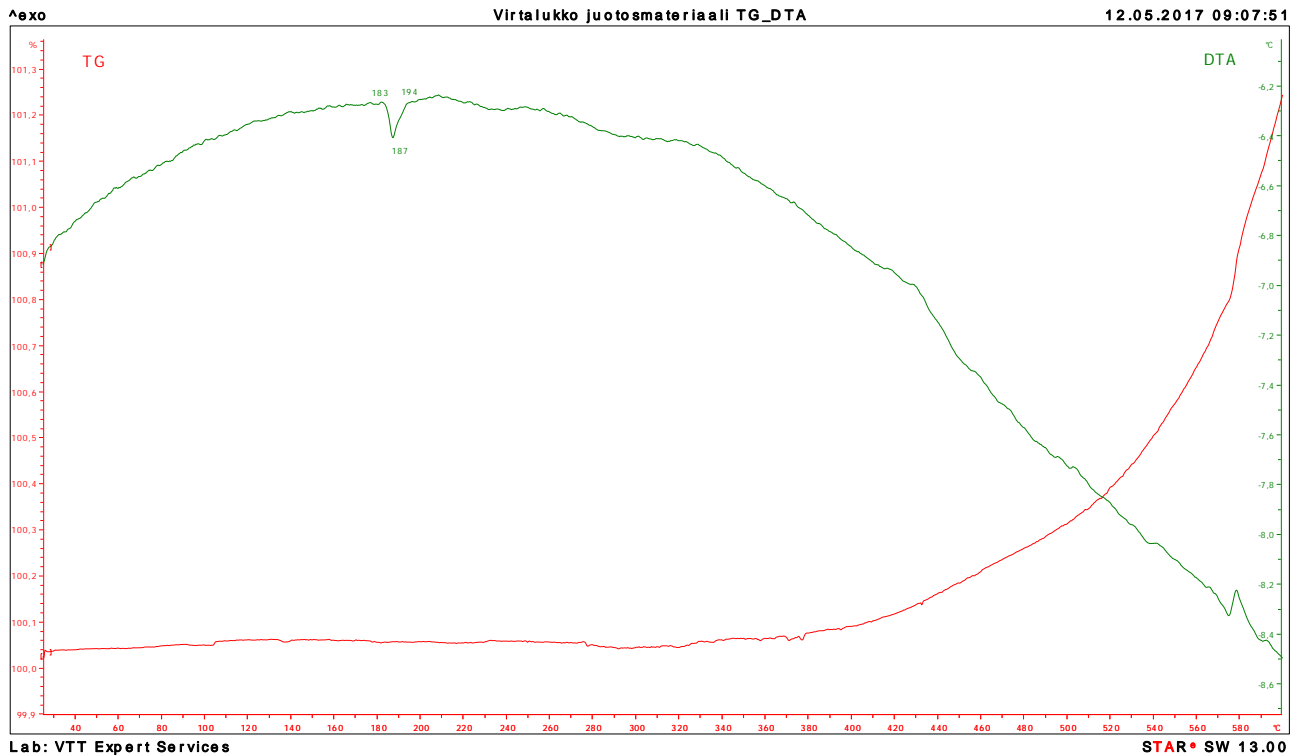
atmosfääri	virtaava ilma, 50 ml/min
upokas	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , 150 µl
lämmitysnopeus	5 °C/min
maksimilämpötila	600 °C
näytekokko	25,12 mg

### Tulokset

Juotosmetallin termooanalyysissä havaittiin, että sen massa pysyi vakiona noin lämpötilaan 360 °C asti. Sen jälkeen massa alkoi kasvaa, aluksi hitaasti mutta sitten kiihtyen niin, että ajon päättyessä 600 °C:ssa massa oli runsaan 1 % suurempi kuin lähtötilanteessa. Kyse oli mitä ilmeisimmin metallin hapettumisesta vallitsevassa ilma-atmosfäärissä.

Metallin DTA-käyrässä havaittiin endoterminen piikki lämpötilavälillä 183 °C – 194 °C. Piikin huippu oli lämpötilassa 187 °C. Piikki oli seurausta materiaalin sulamisesta.

Näytteen TG- ja DTA-käyrät on esitetty kuvassa 1.



**Kuva 1.** Virtalukon juotosmetalli, TG- ja DTA-käyrät.

### Tarkastelu

Suoritetun termoanalyysitutkimuksen perusteella tutkitun näytteen, virtalukon sisältämän juotosmetallin, sulaminen tapahtui lämpötila-alueella 183 °C – 194 °C.

Espoo 15.5.2017

Pertti Koskinen  
Erityisasiantuntija