

VESIVOIMAKONEEN HIILIHARJOJEN VALINTA JA NII-
DEN KESTOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Orre Jonne

Opinnäytetyö
Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

2018

Tekniikka ja liikenne
Kone- ja tuotantotekniikka
Insinööri (AMK)

Tekijä	Jonne Orre	Vuosi	2018
Ohjaajat	TkL Timo Kauppi DI Matti Paaso		
Toimeksiantaja	Caverion Suomi Oy, Teollisuuden Ratkaisut Yksikön päällikkö Janne Hyyryläinen		
Työn nimi	Vesivoimakoneen hiiliharjojen valinta ja niiden kes- toon vaikuttavat tekijät		
Sivu- ja liitesivumäärä	43 + 0		

Opinnäytetyön aiheena on kahden vesivoimalaitoksen hiiliharjojen elinikä. Työn tarkoituksena oli selvittää kirjallisuuden avulla, mitkä tekijät vaikuttavat hiiliharjojen elinikään sekä tutkia, mistä kahden tutkimuksiin valitun voimalaitoksen generaattoreiden hiiliharjojen elinikäerot johtuvat. Työ kohdistuu kahteen Kemijoki Oy:n vesivoimalaitokseen Kemijoen vesistöalueella, joiden käyttö- ja kunnossapitotoiminnasta vastaa Caverion. Työssä käsiteltävät vesivoimalaitokset ovat Os-sauskosken ja Valajaskosken voimalaitokset.

Valajaskosken voimalaitoksessa hiiliharjat kuluvat reilusti nopeammin kuin Os-sauskosken voimalaitoksessa. Kulumisen vuoksi hiiliharjoja on vaihdettava Vala-jaskoskella useammin, ja tästä seuraa ylimääräisiä taloudellisia kuluja.

Työssä käytettäviä tutkimusmenetelmiä olivat anturimittaukset voimalaitoksilla sekä alan kirjallisuuden opiskelu. Antureilla mitattiin ilmankosteutta ja lämpötilaa voimalaitosten hiiliharjojen läheisyydestä. Muita työssä tutkittuja hiiliharjojen elin-ikään vaikuttavia tekijöitä olivat hiiliharjojen pitimien jousipaine, liukurenkaan ke-hänopeus, liukurenkaan lämpötila sekä hiiliharjojen ja liukurenkaiden välinen virtatiheys. Mittaustuloksia verrattiin toisiinsa ja kirjallisuuden antamiin raja-arvoihin.

Opinnäytetyön tulosten ja laskelmien mukaan Valajaskoskella hiiliharjojen ja liu-kurenkaiden välinen virtatiheys on liian pieni, ja sitä tulisi nostaa. Virtatiheyden suuruuteen voidaan vaikuttaa magnetointivirran lisäksi hiiliharjojen koolla ja mää-rällä. Pienempi hiiliharjojen kosketuspinnan kokonaispinta-ala nostaa virtati-heyttä.

Avainsanat

hiiliharjat, liukurenkaat, vesivoimalat, generaattorit,
magnetointi

Technology, Communication and Transport
Mechanical and Production Engineering
Bachelor of Engineering

Author	Jonne Orre	Year	2018
Supervisors	Timo Kauppi, Lic. Tech. Matti Paaso, M.Eng.		
Commissioned by	Caverion Suomi Oy, Teollisuuden Ratkaisut Janne Hyyryläinen, Unit Manager		
Subject of thesis	Selection of hydropower plant's carbon brushes of the generators and the factors affecting their lifespan		
Number of pages	43 + 0		

The topic of this Thesis is the lifespan of carbon brushes in two different hydropower plants. The goal was to study the factors that affect the lifespan of carbon brushes and to find out the cause for the differences in the lifespan of carbon brushes in the two hydropower plants. The two hydropower plants addressed in this Thesis are two power plants of Kemijoki Oy, where Caverion is responsible for maintenance and upkeep – the power plants of Ossauskoski and Valajaskoski.

The carbon brushes wear much faster in the power plant of Valajaskoski. The carbon brushes have to be replaced much more often at Valajaskoski than at Ossauskoski because of the rapid wear, which results in additional expenses.

Probe measurements and studying were the main research methods of this Thesis. The probes were used to measure humidity and temperature in the air near the carbon brushes. Other factors that affect the lifespan of carbon brushes addressed in the Thesis were the spring pressure of the brush holders, peripheral speed of the slip ring, temperature of the slip ring, and the current density between the carbon brushes and slip ring. The results of the measurements were compared to each other and to the critical values found in the literature concerning the topic.

According to the results and calculations of this work, the conclusion was made that the current density between the carbon brushes and slip rings at Valajaskoski is too low and that it should be increased. In addition to the size of magnetizing current, the current density can be influenced with the number and size of the carbon brushes. A smaller total surface area of the carbon brushes increases the current density.

Key words carbon brushes, slip rings, hydropower plants, generators, magnetizing

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	6
2	TEORIA	7
2.1	Vesivoimalan periaate.....	7
2.2	Generaattorin toiminta	8
2.3	Liukurengas ja hiiliharjat	9
2.4	Kalvo.....	11
2.5	Muita hiiliharjan elinikään vaikuttavia tekijöitä.....	12
3	TUTKIMUSMENETELMÄT	14
3.1	Lämpötilan ja ilmankosteuden mittaus	14
3.2	Virtatiheys.....	17
3.3	Kehänopeus.....	18
4	TULOKSET.....	19
4.1	Lämpötila	19
4.2	Ilmankosteus.....	24
4.3	Virtatiheys.....	28
4.4	Liukurenkaiden kehänopeus	30
4.5	Hiiliharjojen pinnat	30
5	TULOSTEN KÄSITTELY	32
5.1	Magnetointivirtatiheys	34
5.2	Lämpötila	36
5.3	Ilmankosteus.....	37
5.4	Liukurenkaiden kehänopeus	38
5.5	Yhteenveto ja kehitysehdotus	38
6	POHDINTA.....	41
	LÄHTEET.....	42

ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Caverion Suomi Oy:lle. Haluan kiittää Caverionin Janne Hyyryläistä, Jarno Onnelaa, Jouni Järvelää, sekä Hannu Jänkälää yhteistyöstä sekä positiivisesta asenteesta työtä kohtaan. Lisäksi haluan kiittää ohjajiani Timo Kauppia ja Matti Paasoa hyvästä opastuksesta.

Haluan myös kiittää sukulaisiani, tyttöystävääni, sekä erityisesti isosiskoani tuesta ja avusta opinnäytetyön aikana.

Kemi, 8.12.2018

Jonne Orre

1 JOHDANTO

Kemijoen vesistöalueella on useita Kemijoki Oy:n vesivoimaloita, joissa Caverion suorittaa käyttö- ja kunnossapitotoiminnot. Tämä työ käsittelee Ossauskosken ja Valajaskosken vesivoimaloiden hiiliharjojen elinikään liittyviä tekijöitä. Hiiliharjat ovat vesivoimaloiden generaattorien magnetointiprosessin kuluva osa ja niitä joudutaan uusimaan tietyin väliajoin riippuen kulumisen nopeudesta. Hiiliharjojen liian tiheä vaihtamisen tarve aiheuttaa luonnollisesti ylimääräistä työtä sekä ylimääräisiä taloudellisia kustannuksia.

Ossauskosken ja Valajaskosken vesivoimaloiden välillä on todettu huomattavia eroja hiiliharjojen eliniän suhteen. Ossauskoskella hiiliharjat vaihdetaan noin kaksi kertaa vuodessa, kun taas Valajaskoskella hiiliharjoja joudutaan vaihtamaan jopa kahden kuukauden välein. Hiiliharjat kulumat siis Valajaskoskella huomattavasti nopeammin kuin Ossauskoskella. Valajaskoskella on myös hiiliharjojen nopeasta kulumisesta aiheutuva pölyongelma. Hiiliharjojen pinnasta irtoaa hiiltä ympäristöön nopean kulumisen vuoksi, ja tästä aiheutuu ylimääräisten taloudellisten kulujen lisäksi myös ylimääräistä siivoustyötä.

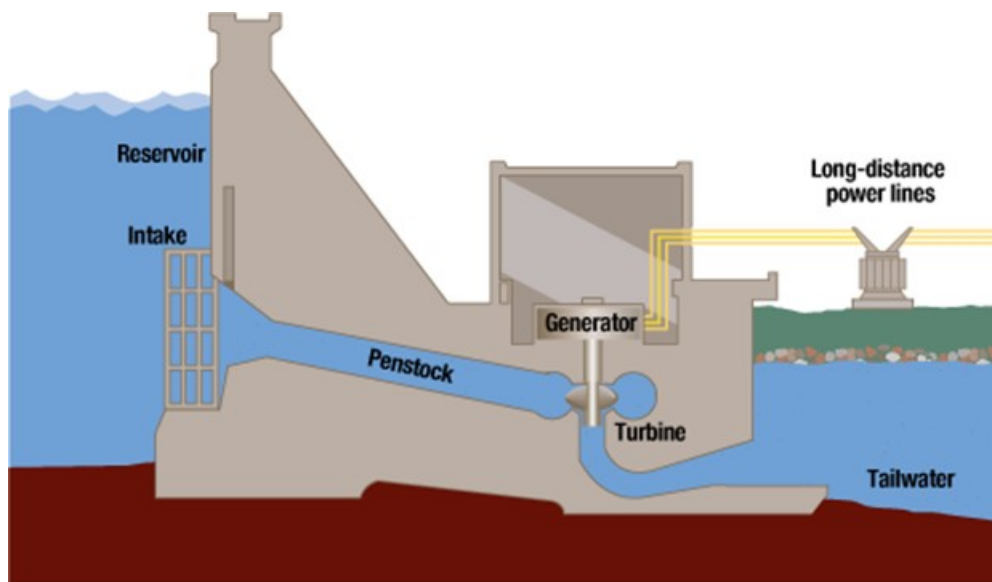
Tämän työn tarkoituksena on selvittää kirjallisuuden avulla, mitkä tekijät vaikuttavat hiiliharjojen elinikään sekä tutkia, mistä hiiliharjojen kulumisen erot Valajaskosken ja Ossauskosken voimaloissa mahdollisesti johtuvat. Työn tavoitteena on löytää selittäviä tekijöitä Valajaskosken hiiliharjojen nopealle kulumiselle, mahdollisia ratkaisuja sille, sekä selvittää hiiliharjoilta vaadittavia ominaisuuksia.

2 TEORIA

2.1 Vesivoimalan periaate

Vesivoimalaitoksessa muutetaan veden potentiaalienergia mekaaniseksi energiaksi turbiinin avulla. Virtaava tai putoava vesi pyörittää turbiinia, joka puolestaan pyörittää generaattorin akselia. Generaattori muuttaa mekaanisen energian sähköksi, joka sitten johdetaan hyötykäyttöön. (Kemijoki Oy 2018.)

Vesivoimalatyyppejä on useita, mutta Kemijoki Oy:n vesivoimalat edustavat tyyppiä, jossa vedelle tehdään korkeusero patoamalla sitä. Kuviossa 1 on esitetty tämän tyyppinen voimala. Veden korkeuseroja esiintyy myös luonnossa, esimerkiksi alaspäin virtaavien jokien tai vesiputousten muodossa, mutta korkeusero voidaan kuitenkin tehdä keinotekoisesti padon avulla. (Hydropower A Guide for Developers and Investors 2015, 17.) Korkeusero tarkoittaa vedenpinnan korkeuden eroa vesivoimalaitoksen veden sisäänottopisteen ja ulospääsyn välillä. Mitä suurempi veden korkeusero on, sitä suurempi teho ja sähköntuotto voimalaitoksella on. (Renewables First 2015.)



Kuvio 1. Vesivoimala. (Tennessee Valley Authority 2018)

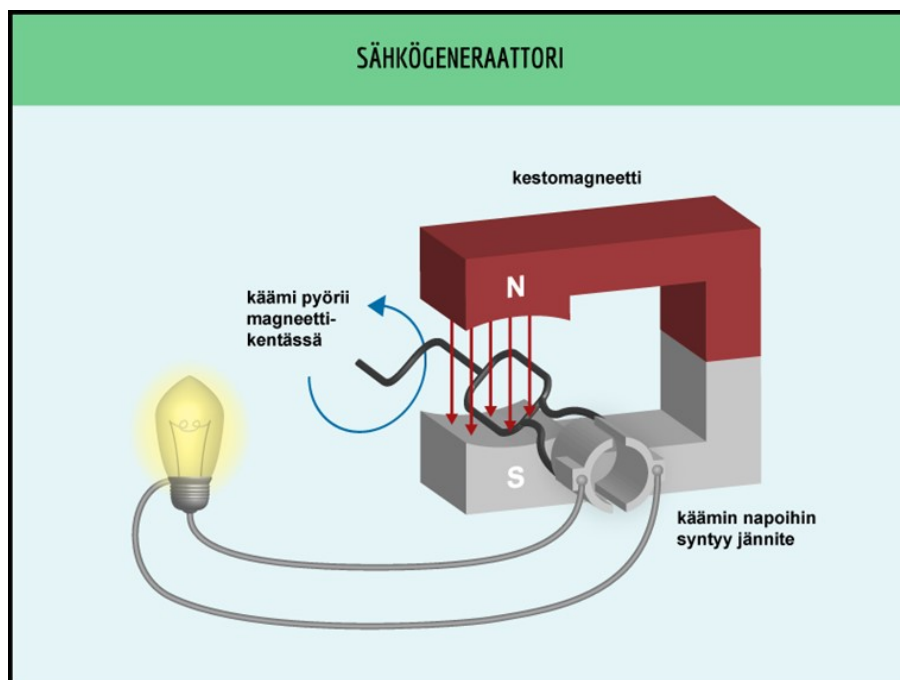
Pato toimii myös veden "säiliönä", jonka avulla voidaan säädellä sähköntuottoa päästämällä vettä laitokseen tai rajoittamalla sen virtausta tuotantotarpeiden mukaisesti. Näillä vesivoimalan yläpuolisilla patoaltailla vastataan erityisesti vuoro-

kauden sisäisiin kulutuksen vaihteluihin. Vettä juoksetetaan voimalaitoksella erityisesti aamupäivisin, jolloin sähkönkulutus on kodeissa ja työpaikoilla korkeimmillaan. (Kemijoki Oy 2018.)

2.2 Generaattorin toiminta

Generaattori on kone, joka osaa muuttaa mekaanista energiaa sähköiseksi energiaksi. Generaattorin toiminta perustuu induktiolakiin. Michael Faraday teki havainnon, jonka mukaan johtimen liike magneettivuossa, eli magneettikentässä, aiheuttaa johtimeen jännitteen. Toisin sanoen virtasilmukkaan indusoituu jännite, kun sen läpi kulkeva magneettivuo muuttuu. Tämä tilanne saadaan aikaan joko liikuttamalla johtavaa materiaalia magneettikentässä tai vaikuttamalla paikalla olevaan johtimeen liikkuvalla magneettikentällä. (Morganite 1978, 20-23.)

Kuviossa 2 on havainnollistettu generaattorin toimintaperiaatetta. Johdinta pyöritetään magneettikentässä indusoiden jännitettä.



Kuvio 2. Generaattorin periaate. (Karkkulainen, Karkkulainen & Kinnunen 2014)

Tässä työssä käsiteltävissä vesivoimaloissa generaattorin magneettikenttä tehdään hiiliharjojen ja liukurenkaiden avulla.

2.3 Liukurengas ja hiiliharjat

Hiiliharjoilla siirretään sähköä paikallaan olevien ja liikkuvien osien välillä. Hiiliharjoja ja liukurenkaita käytetään vesivoimaloiden generaattorien magnetoinnin avuksi. Hiiliharjat ovat kosketuksessa liukurenkaaseen ja välittävät magnetoitinkäämityksen tarvitsemaa tasavirtaa roottoriin. Generaattorin magnetoimisvirta tehdään tasasuuntaamalla vaihtovirta ja johtamalla se liukurenkaiden ja hiiliharjojen kautta takaisin roottoriin. Tätä magnetoimistapaa kutsutaan harjalliseksi magnetoinniksi. (Lehtelä & Korpinen 2007, 3.)

Alun perin moottoreissa kommutaattorien kanssa hiiliharjan sijasta käytettiin kupariharjoja. Tämän menetelmän seurauksena oli raskasta kipinäointiä ja hyvin lyhyt kommutaattorin elinikä. Ongelman ratkaisemiseksi tehtiin kokeita hiilipalojen kanssa ja tuloksena oli merkittäviä parannuksia kupariharjoihin verrattuna. Termi hiiliharja on jäänyt noilta ajoilta, kun kupariharja näytti harjalta kuparilankojensa vuoksi. (Kroef n.d., 4-5.)

Hiiliharjat ovat magnetoitintiprosessin kulumia osia ja niitä joudutaan uusimaan tiedetyin väliajoin riippuen kulumisen nopeudesta. Hiiliharjojen kulumisen pyritään aina minimoimaan, sillä niiden uusiminen ja kulumisesta aiheutuvan hiilipölyn siivoaminen, aiheuttavat ylimääräisiä työtunteja sekä taloudellisia kuluja.

Liukurenkaallisella generaattorilla on kaksi liukurengasta, joilla on sama määrä hiiliharjoja. On yleistä, että liukurengas, joka on korkeammassa potentiaalissa, kuluu enemmän. Liukurenkaiden syöttöjännitteen napaisuutta voidaan kääntää ajoittain kulumisen tasaamiseksi. (Kerzenbaum 1996, 121.)

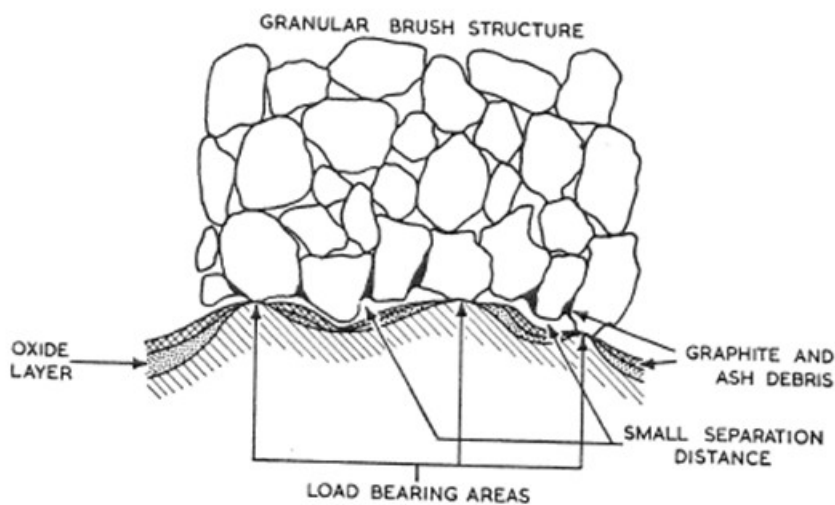
Hiiliharja voi terminä käsittää mitä tahansa moottorin tai generaattorin harjaa, joka sisältää hiiltä. Tässä työssä käsiteltävät hiiliharjat ovat kuitenkin pääasiassa vesivoimaloissa käytettävät sähkögrafiittihiiliharjat. Muita hiiliharjatyyppejä ovat esimerkiksi hiiligrafiitti- ja metalligrafiittihiiliharjat. (National Brush Digest 1957 & 1977, 6-7.)

Hiiliharjojen ainesosat ovat petrolikoksi, lammumusta, grafiitti ja piki, joka toimii sidosaineena. Kun näille perusaineille on tehty omat valmistelunsa, ne tai osa

niistä, riippuen halutusta lopputuotteesta, annostellaan ja sekoitetaan keskenään. Sekoitusosion jälkeen sekoitukselle tehdään lämpökäsittely erityisesti suunnitellussa uunissa, jossa sidosaine karbonoituu eli hiiltyy, ja sekoitus saa kiinteän rakenteen. Uunin jälkeen hiiliharjat ovat valmiita käyttöön tai viimeisteleviin toimenpiteisiin. (Kroef n.d., 5-7.)

Hiiliharjatyypeistä kuitenkin yleisin, eli sähkögrafiittihiiliharja, tehdään antamalla sille lämpökäsittelyn jälkeen uusi lämpökäsittely erityisessä sähköuunissa, jossa lämpötila nostetaan paljon korkeammalle kuin aikaisemmissa uuneissa on edes mahdollista. Tässä suuressa 2500 °C ylittävässä lämpötilassa käytännössä kaikki muut aineet paitsi hiili, jotka mahdollisesti onnistuivat välttämään aiemmat puhdistusvaiheet, höyrystyy ja lähtee pois. Alkuperäisen seoksen hiilen ja sidosaineen rakenteet muuttuvat amorfisesta muodosta grafiitin kiteiseksi rakenteeksi. (Kroef n.d., 7-8.)

Liukurengas ja hiiliharjat ovat kosketuksissa toisiinsa, kun liukurengas pyörii. Niiden välillä on kuitenkin vain vähän pinta-alaa kosketuksissa toisiinsa, siellä täällä olevien hyvin pienien kontaktipintojen välityksellä. Kuviossa 3 on havainnollistettu hiiliharjan ja liukurenkaan välistä kontaktia. Sähkö välittyy näiden paikkaa vaihtelevien kontaktipintojen kautta. Koska rajoitettu määrä pieniä kontaktipintoja kuljettaa sähkövirran, sen tiheys kontaktipintojen kohdalla on suuri. (Kroef n.d., 9; Morganite 1978, 70-72.)



Kuvio 3. Kontaktipinnat hiiliharjan ja liukurenkaan välillä. (Morganite 1978, 72)

Hiiliharjojen elinikään vaikuttavat mekaaninen ja sähköinen kulutus. Hiiliharjan mekaanisen kulutuksen aiheuttaa kitka ja sähköisen kulutuksen aiheuttaa sähköinen eroosio. (Hamilton 2000, 1.) Molempiin kulutustyyppisiin vaikuttaa hiiliharjan ja liukurenkaan välille syntyvä kalvo ja tätä kautta kalvon syntyyn vaikuttavat tekijät. Kuviossa 3 näkyy myös kyseinen kalvo ja sen kerrokset.

2.4 Kalvo

Hiiliharjan ja liukurenkaan välille, liukurenkaan pintaan, muodostuu ohut kalvo tai patina, joka pienentää liukurenkaan ja hiiliharjan välistä kitkaa huomattavasti. Hiiliharjan ja paljaan kuparin välinen kitkakerto on suhteellisen suuri, mutta hiiliharjan ja liukurenkaan välille syntyvä hyvä kalvo voi pienentää kitkakertoimen 10 %:iin alkuperäisestä paljaan kuparin arvosta. Liukurenkaan kalvo on siis äärimmäisen tärkeä tekijä hiiliharjan kulumisen suhteen. (Hamilton 2000, 1.)

Liukurenkaan kalvo koostuu kuparioksidista, vedestä ja hiilestä, joka on pääosin grafiittia. Kalvo syntyy, kun sähköinen jännite kulkee hiilen ja kuparin välillä vesihöyryn läsnäolossa. (Hamilton 2000, 2.) Grafiitin kalvo saa hiiliharjasta ja kalvon vedensaanti riippuu ilmankosteudesta. Hiiliharjan eliniän kannalta absoluuttisen ilmankosteuden alaraja on $2,5 \text{ g/m}^3$, jonka alle mentäessä voi hiiliharjassa alkaa ilmetä ongelmia ja kulumisen kasvaa. (Kroef n.d., 9-10.) Yhden lähteen mukaan kalvo muodostuu parhaiten $8-15 \text{ g/m}^3$ absoluuttisen ilmankosteuden alueella (Mersen 2017, 7). Toisen lähteen mukaan hyvä alue on $2-7 \text{ g/m}^3$. Tarvittava veden määrä ilmassa voi vaihdella hiiliharjan mukaan. (Hamilton 2000, 5.)

Kalvon kuparioksidin muodostumiseen vaikuttaa liukurenkaan lämpötila sekä hiiliharjan ja liukurenkaan välillä kulkeva virtatiheys. Kuparioksidikerros muodostuu kalvolle yli $100 \text{ }^\circ\text{C}$:n lämpötilassa ilman jännitettäkin (Scherer & Spry 1961, 2). Hiiliharjojen kautta kulkevan virtatiheyden suositeltu alue on hiiliharjakohtainen. Joissain sähkögrafiittihiiliharjoissa virtatiheyden alaraja on 6 A/cm^2 ja joissain 8 A/cm^2 . Mersenin suosittelema yläraja kaikille heidän sähkögrafiittihiiliharjoilleen on 12 A/cm^2 . (Mersen 2017, 14.)

Liian suuri virtatiheys voi synnyttää liukurenkaaseen liian paljon kalvoa ja siitä voi seurata kipinöintiä sekä palamista. Jos virtatiheys on liian pieni, kuparioksidikerroksen muodostuminen voi estyä ja siitä seuraa ylimääräistä kitkaa. (National Brush Digest 1957 & 1977, 10.)

2.5 Muita hiiliharjan elinikään vaikuttavia tekijöitä

Hiiliharjan kulumiseen suurin vaikuttava tekijä on liukurenkaan päälle syntyvä kalvo. Suurin osa tässä työssä käsitellyistä hiiliharjan elinikään vaikuttavista tekijöistä liittyy jotenkin kyseisen kalvon syntyyn.

Hiiliharjojen kulumiseen vaikuttavia tekijöitä:

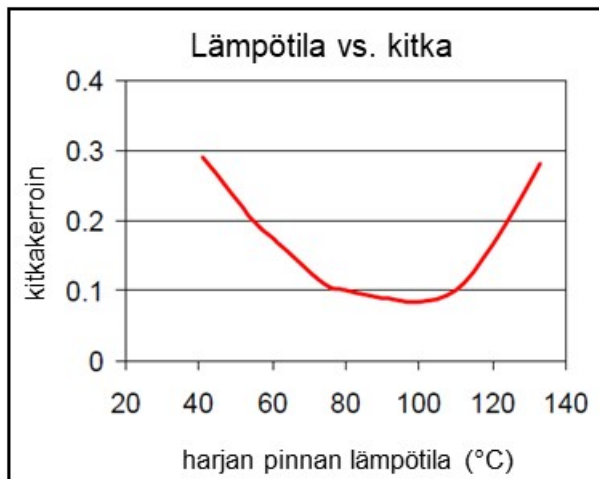
- ympäristön lämpötila ja liukurenkaan lämpötila
- ympäristön ilmankosteus
- ympäristön siisteys (pölyt, rasvat, haitalliset kaasut)
- virtatiheys
- kosketuspinnan kulkunopeus
- hiiliharjan paine
- hiiliharjan pitimen etäisyys liukurenkaasta
- liukurenkaan pinnan kunto
- kipinöinnin määrä. (O' Brien 2015, 44.)

Liukurenkaiden tuntumaan asennetaan hiiliharjoille pidikkeet, joissa on jousi, joka painaa hiiliharjaa liukurengasta vasten. Se, kuinka suurella paineella jousi painaa hiiliharjaa, vaikuttaa myös kulumiseen. Liian suuri jousipaine aiheuttaa mekaanista kulumista, eli ylimääräistä kitkaa, ja liian pieni paine aiheuttaa sähköistä kulumista, joka näkyy kipinöintinä. (Koenitzer 2017, 3-4.)

Lähteen suorittamien kokeiden mukaan jousipaineen minimisuositus teollisissa DC-laitteissa on 4 PSI, eli 280 g/cm². Mutta jos liukurenkaan nopeus on suuri tai hiiliharjojen virtatiheys hyvin pieni, hiiliharjojen kulumisen vähenee pienemmällä

jousipaineella. (Koenitzer 2017, 5-6.) Toisen lähteen mukaan suositeltu jousipai-
neen alue teollisuudessa on 140 – 360 g/cm² (Kroef n.d., 19).

Myös lämpötila vaikuttaa hiiliharjan ja liukurenkaan väliseen kitkakertoimeen.
Lämpötilan noustessa kitkakerroin pienenee, mutta tietyn rajan ylitettyä alkaa kit-
kakerroin taas nousta. (Holle 2010, 6; Hamilton 2000, 1.) Kuviossa 4 on esitetty
kyseistä lämpötilan ja kitkakertoimen suhdetta.



Kuvio 4. Lämpötilan ja kitkakertoimen suhde. (mukaillen Holle 2010, 7)

Liukurenkaiden kehänopeus vaikuttaa myös hiiliharjojen kulumiseen riippuen hii-
liharjasta. Sähkögrafiittihiiliharjoilla suositeltu kehänopeuden yläraja vaihtelee 40
– 60 m/s välillä. (Mersen 2017, 14; Pantrac n.d., 32-37.)

3 TUTKIMUSMENETELMÄT

Ossauskosken ja Valajaskosken voimalaitoksilta haluttiin tutkia kirjallisuudesta löydettyjä, kulumisen kannalta olennaisia muuttujia. Näitä olivat:

- absoluuttinen ilmankosteus (g/m^3)
- virtatiheys hiiliharjan ja liukurenkaan kosketuspinnassa (A/cm^2)
- lämpötila hiiliharjojen ja liukurenkaiden pinnassa ($^{\circ}\text{C}$)
- jousipaine (g/cm^2)
- liukurenkaan kehänopeus (m/s).

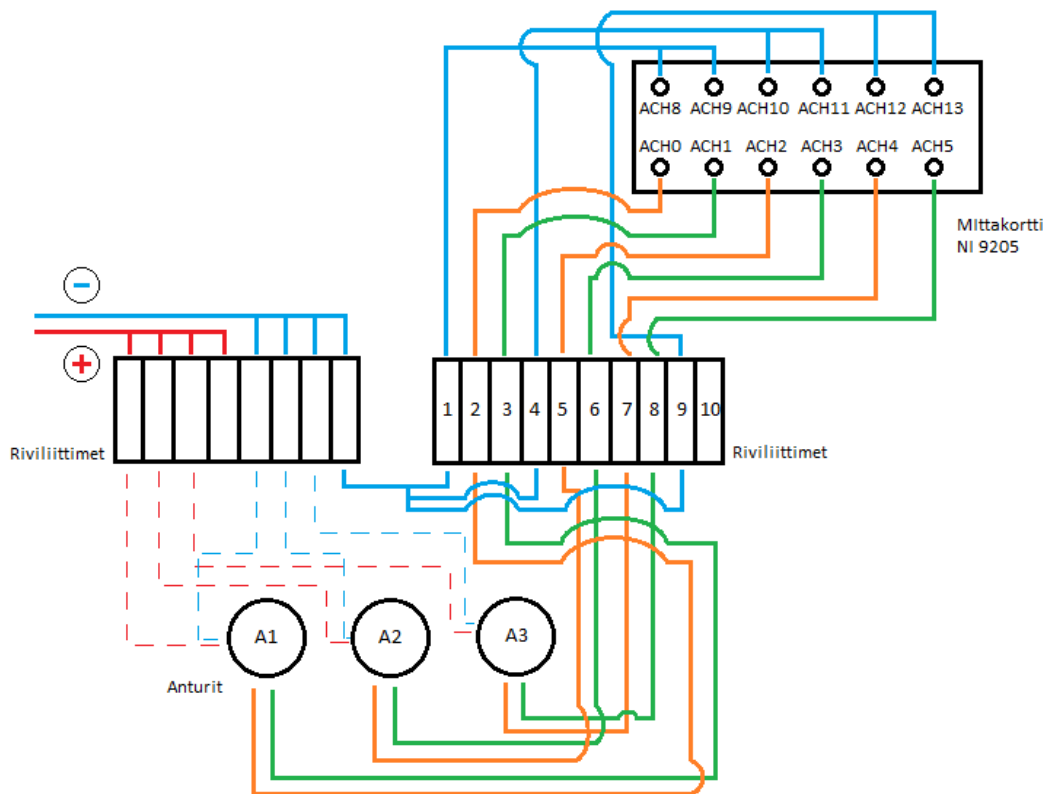
Yllä olevista muuttujista saatiin selville absoluuttinen ilmankosteus, virtatiheys, lämpötila liukurenkaan pinnassa ja liukurenkaiden kehänopeudet.

3.1 Lämpötilan ja ilmankosteuden mittaus

Lämpötila ja ilmankosteus mitattiin Vaisalan HMP110 antureilla, joilla pystyttiin mittaamaan lämpötilaa ja ilmankosteutta yhtä aikaa. Valajaskoskelle asennettiin kolme HMP110 anturia liukurenkaiden ja hiiliharjojen läheisyyteen. Mittauskampanja kesti noin kolme viikkoa. Sen jälkeen anturit siirrettiin Ossauskoskelle, missä tehtiin noin kahden viikon mittainen mittauskampanja. Antureilla ei saatu mitattua lämpötiloja liukurenkaiden tai hiiliharjojen pinnasta, vaan niitä ympäröivästä ilmasta. Liukurenkaiden pinnasta saatiin kuitenkin mitattua lämpötilaa lämpökameran avulla. Ympäröivän ilman lämpötila- ja ilmankosteustiedolla saatiin selville absoluuttinen ilmankosteus.

HMP110 anturi pystyy mittaamaan lämpötilaa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ alueelta, ja se mittaa ilman suhteellisen kosteuden. Anturit antavat lämpötilan ja ilmankosteuden mittaukset voltimäärinä, jotka sitten muutetaan vastaaviksi celsiusasteiksi tai suhteellisen ilmankosteuden prosenteiksi. Näissä mittauksissa anturit olivat säädetty toimimaan jännitealueella 0-5 voltia, jossa 0 voltia vastaa $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ lämpötilaa (T) tai 0 % suhteellista ilmankosteutta (RH), ja 5 voltia vastaa $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ tai 100 %. Analoginen signaalilähtö on lineaarinen.

Kolmen anturin mittaustieto kerättiin dataloggerille riviliittimien ja NI 9205 mittakortin avulla. Virtalähteestä jaettiin käyttöjännite riviliittimien kautta kaikille antureille. Antureista johdettiin lämpötila- ja ilmankosteustieto riviliittimien kautta mittakortille. Mittakortti oli yhteydessä dataloggeriin USB-portin kautta. Kuviossa 5 näkyy periaatepiirros mittausjärjestelystä. Antureilta tulevat oranssilla värillä merkityt johdot toivat mittauksissa lämpötilatiedon mittakortille ja vihreällä värillä merkityt johdot toivat ilmankosteustiedon.



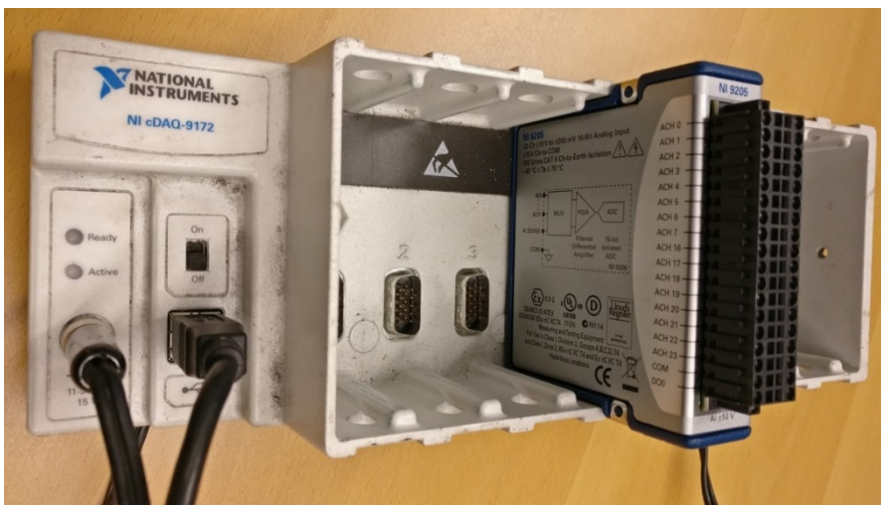
Kuvio 5. Periaatepiirros mittausjärjestelystä.

Riviliittimet ja johdot, joiden perusteella yllä oleva kuvio 5 on tehty, näkyvät todellisessa mittausjärjestelmässä kuvassa 1.



Kuva 1. Riviliittimet.

Mittakortti oli asennettuna NI cDAQ-9172 alustalle, jonka kautta se voitiin kytkeä dataloggeriin USB:llä. Alusta ja mittakortti näkyvät kuvassa 2. Mittausohjelmistona käytettiin National Instrumentsin Signal Express sovellusohjelmistoa.



Kuva 2. Mittakortti ja USB alusta.

Ilmankosteudesta on tärkeämpää tietää absoluuttinen ilmankosteus, joka ilmoittaa veden määrän tiedetyssä tilavuusyksikössä. Absoluuttinen ilmankosteus saadaan selville laskukaavalla, kunhan tiedetään ilman lämpötila sekä suhteellinen ilmankosteus. Absoluuttinen ilmankosteus A (g/m^3) voidaan laskea kaavalla:

$$A = C * Pw/T \quad (1)$$

missä

C	on	2,16679 gK/J
P_W	on	höyrynpaine [Pa]
T	on	absoluuttinen lämpötila [K].

P_W lasketaan kaavalla:

$$P_W = \left(P_{ws}(T) * \frac{RH}{100} \right) * 100 \quad (2)$$

missä

$P_{ws}(T)$	on	kyllästymishöyrynpaine T (°C)
RH	on	suhteellinen ilmankosteus.

$P_{ws}(T)$ lasketaan kaavalla:

$$P_{ws} = A * 10^{\frac{m*T}{T+T_n}} \quad (3)$$

missä

A, m, T_n	ovat	vakioita, jotka löytyvät alla olevasta kuvioista 6
T	on	lämpötila [°C].

	A	m	T _n	max error	Temperature range
water	6.116441	7.591386	240.7263	0.083%	-20...+50°C
	6.004918	7.337936	229.3975	0.017%	+50...+100°C
	5.856548	7.27731	225.1033	0.003%	+100...+150°C
	6.002859	7.290361	227.1704	0.007%	+150...+200°C
	9.980622	7.388931	263.1239	0.395%	+200...+350°C
	6.089613	7.33502	230.3921	0.368%	0...+200°C
ice	6.114742	9.778707	273.1466	0.052%	-70...0°C

Kuvio 6. Vakiot kaavalle (3). (Vaisala 2013, 6)

3.2 Virtatiheys

Hiiliharjojen ja liukurenkaan välisen kosketuksen virtatiheyden laskemiseksi tarvitaan generaattorin hiiliharjojen lukumäärä per liukurengas, hiiliharjojen kosketuspinnan pinta-ala ja magnetointivirran määrä. Näitä tietoja saatiin haastattele-

malla voimaloiden tuntijoita paikan päällä ja sähköpostitse. Hiiliharjojen koot saatiin selville mittaamalla voimaloilta saatuja käytettyjä hiiliharjoja. Virtatiheys J lasketaan kaavalla:

$$J = \frac{I}{A \cdot n} \quad (4)$$

missä

I	on	magnetointivirta [A]
A	on	hiiliharjan kosketuspinta-ala [cm ²]
n	on	hiiliharjojen lukumäärä yhdellä liukurenkaalla.

3.3 Kehänopeus

Liukurenkaan kehänopeus saadaan selville, kun tiedetään liukurenkaan pyörimisnopeus ja sen halkaisija. Tiedot halkaisijoista ja pyörimisnopeuksista saatiin selville haastattelemalla voimalassa työskenteleviä henkilöitä. Liukurenkaan kehänopeus v (m/s) lasketaan kaavalla:

$$v = \pi * d * n \quad (5)$$

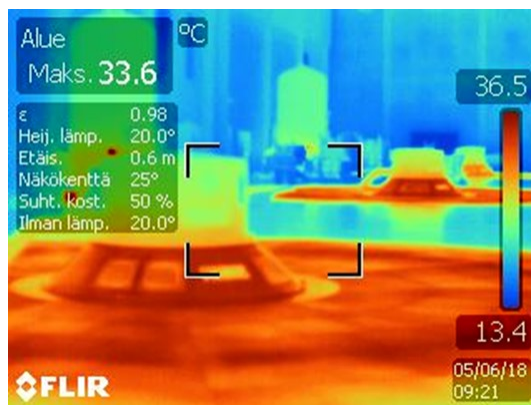
missä

d	on	liukurenkaan halkaisija [m]
n	on	liukurenkaan pyörimisnopeus [r/s].

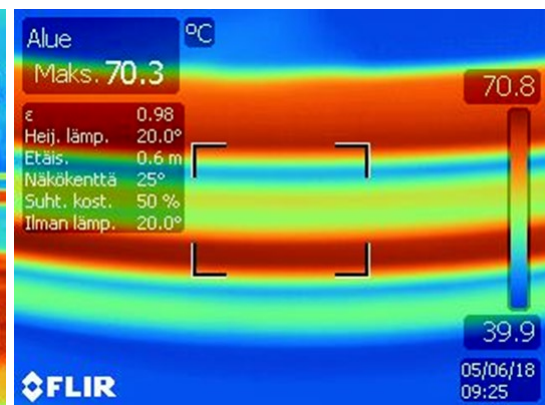
4 TULOKSET

4.1 Lämpötila

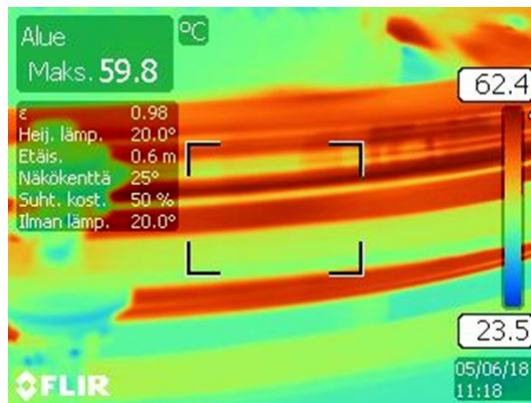
Kuvissa 3-5 on esitetty lämpökameralla otettuja kuvia voimalaitoksilta ja generaattoreiden liukurenkaista. Kuvien mukaan Ossauskoskella liukurenkaiden lämpötila on luokkaa 70 °C ja Valajaskoskella luokkaa 60 °C.



Kuva 3. Ossauskosken koneet.

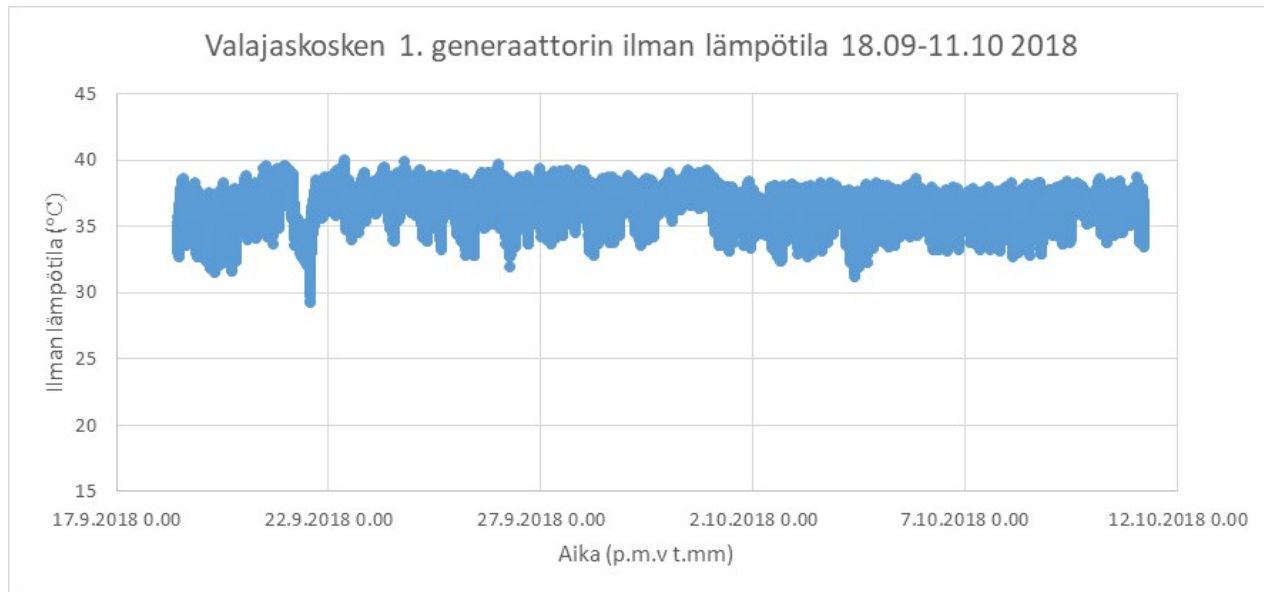


Kuva 4. Ossauskosken liukurenkaat.

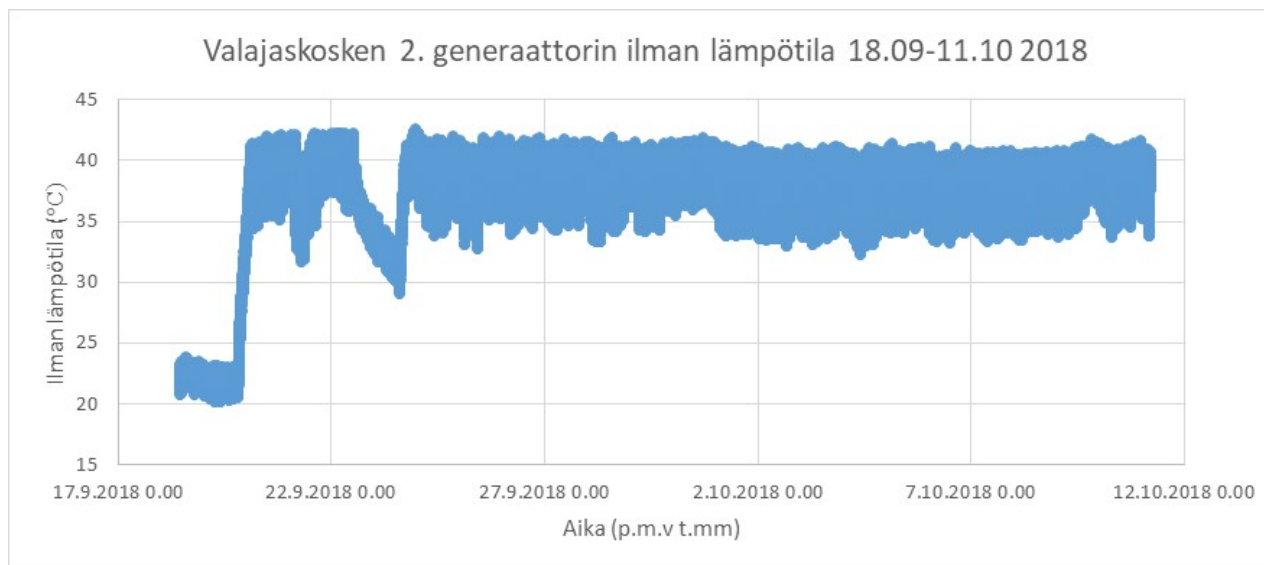


Kuva 5. Valajaskosken liukurenkaat.

Kuvioissa 7 ja 8 nähdään Valajaskosken kahden generaattorin liukurenkaiden ja hiiliharjojen ympäristöstä HMP110 antureilla mitatut lämpötilat. Kolmanteen generaattoriin asennettu HMP110 anturi meni rikki kesken mittauskampanjan, joten sieltä ei saatu mittauksia.

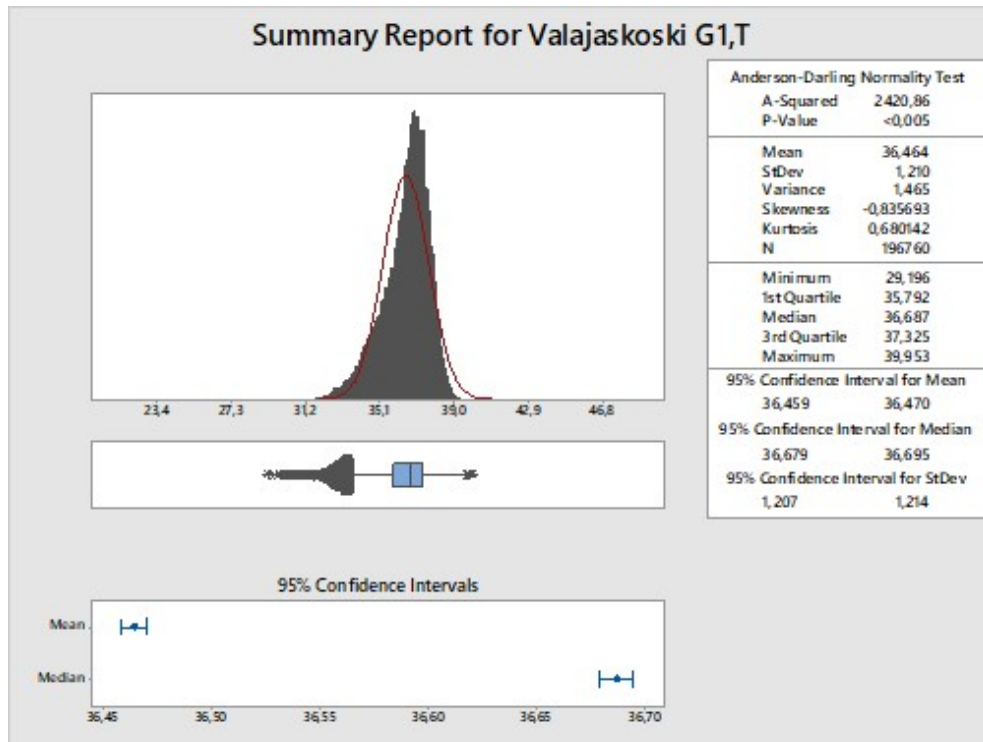


Kuvio 7. Valajaskosken 1. generaattorin lämpötilat liukurenkaiden ja hiiliharjojen ympäristössä 18.09.2018 – 11.10.2018.

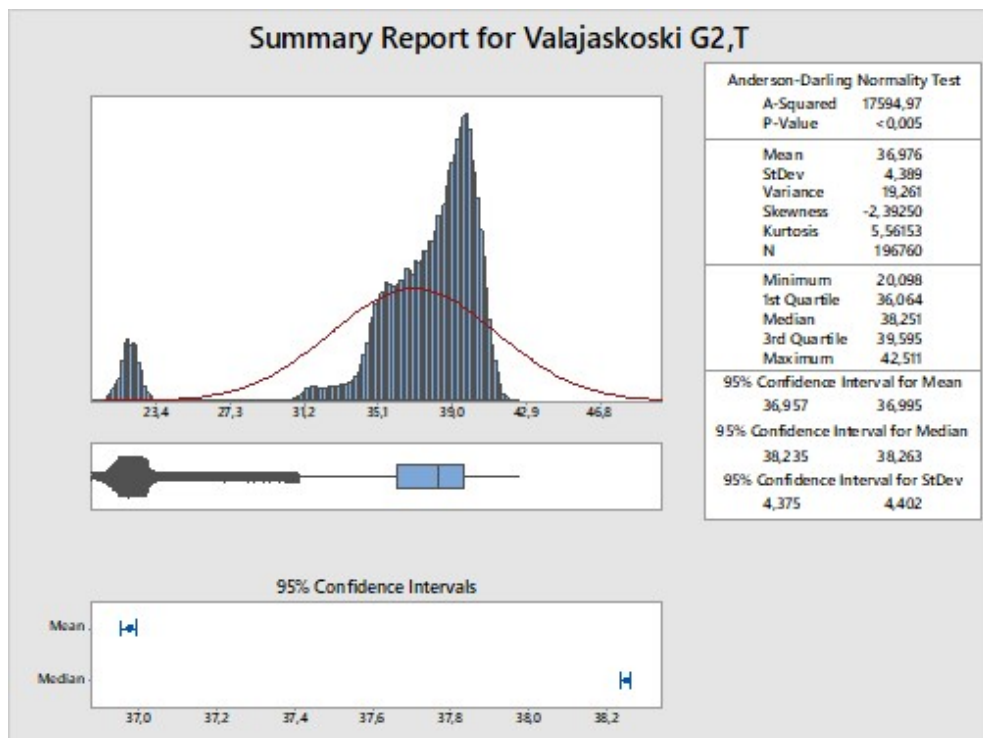


Kuvio 8. Valajaskosken 2. generaattorin lämpötilat liukurenkaiden ja hiiliharjojen ympäristössä 18.09.2018 – 11.10.2018.

Kuvioissa 9 ja 10 on esitetty Mlnitab®17-ohjelmistolla Valajaskosken lämpötilatiedoista lasketut tilastolliset tunnusluvut. Kuvioiden mukaan lämpötilojen keskiarvot ovat lähes samat molemmilla generaattoreilla. Lämpötilan hajonta on 2. generaattorilla 3.6 –kertainen suurempi kuin 1. generaattorilla. Tämä johtuu siitä, että 2. generaattori oli pysähdyksissä mittauskampanjan alussa, jolloin lämpötila on ollut 20 - 25 °C välissä jonkin aikaa.

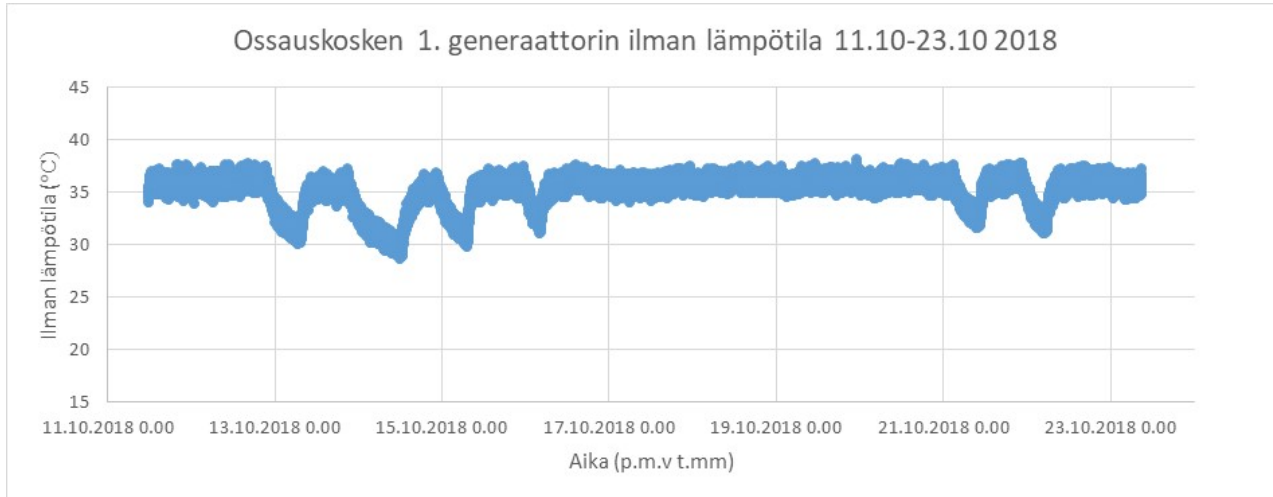


Kuvio 9. Valajaskosken 1. generaattorin lämpötilamittausten tilastolliset tunnusluvut.

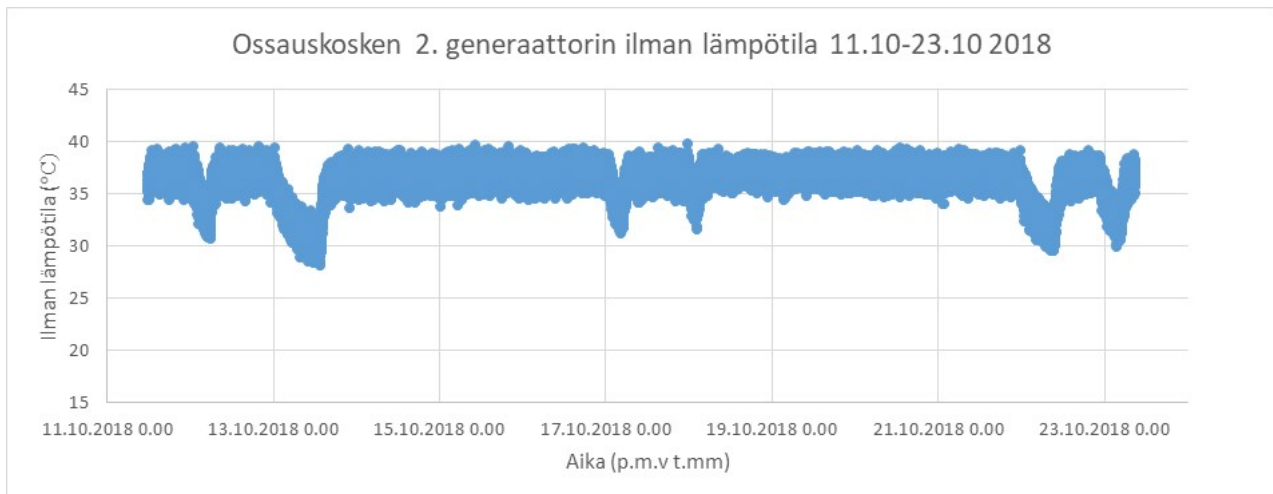


Kuvio 10. Valajaskosken 2. generaattorin lämpötilamittausten tilastolliset tunnusluvut.

Kuvioissa 11 ja 12 nähdään Ossauskosken kahden generaattorin liukurenkaiden ja hiiliharjojen ympäristöstä HMP110 antureilla mitatut lämpötilat. Kuvioiden mukaan lämpötilojen vaihtelu on vähäistä.

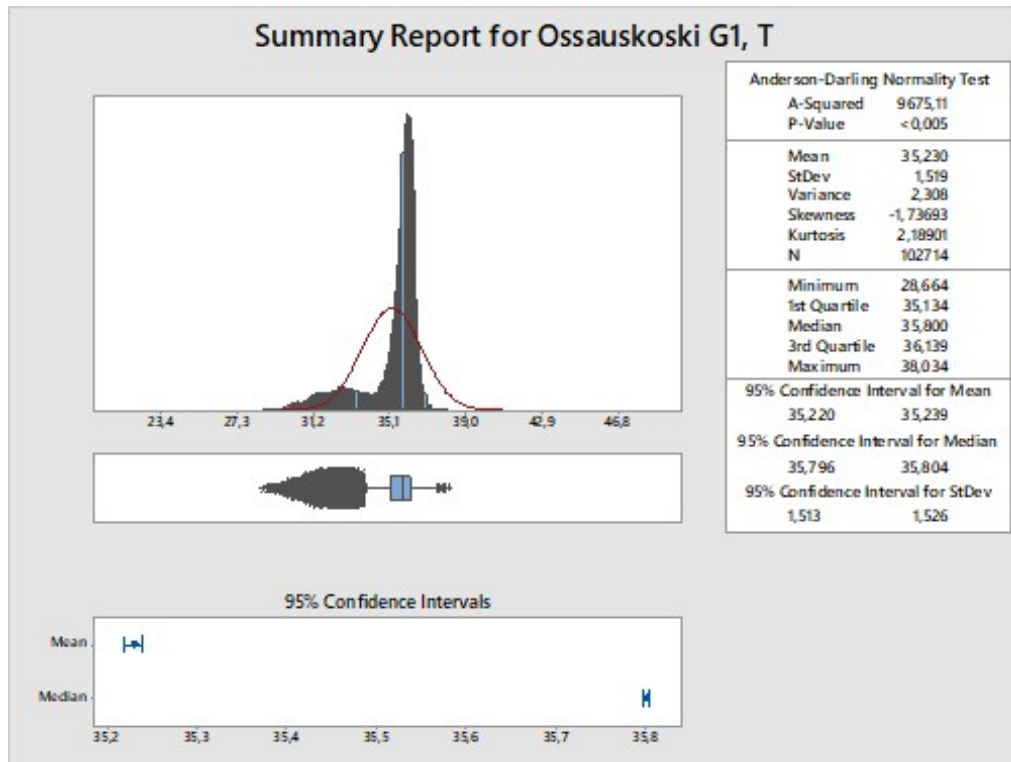


Kuvio 11. Ossauskosken 1. generaattorin lämpötilat hiiliharjojen ja liukurenkaiden ympäristössä 11.10.2018 – 23.10.2018.

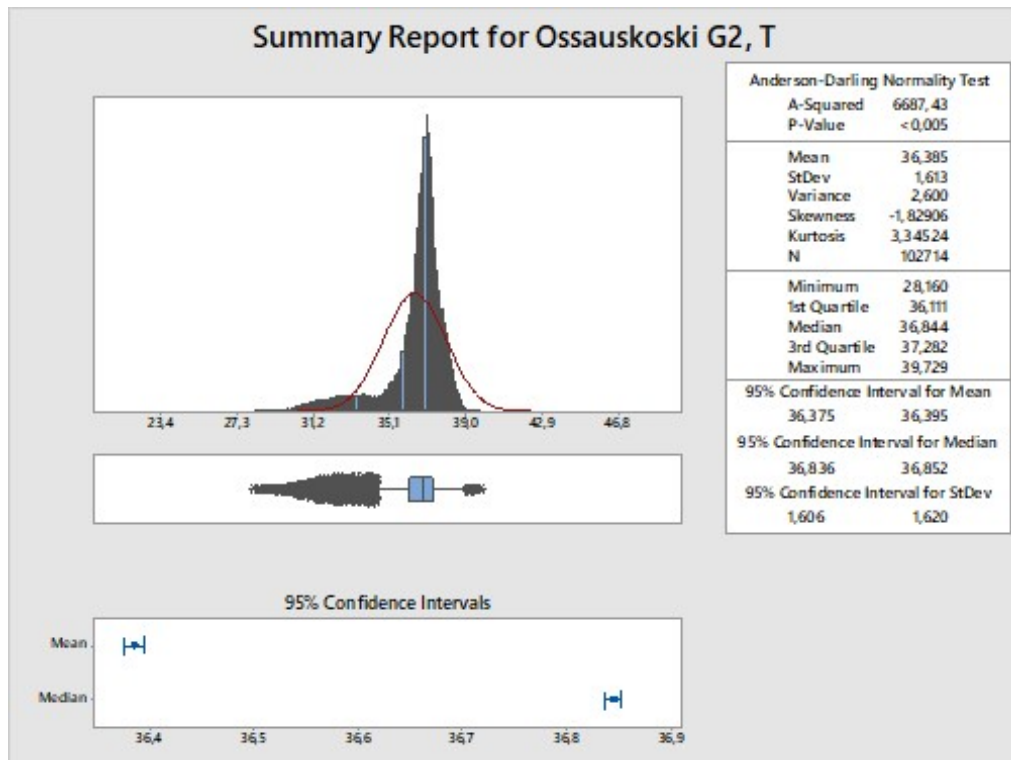


Kuvio 12. Ossauskosken 2. generaattorin lämpötilat hiiliharjojen ja liukurenkaiden ympäristössä 11.10.2018 - 23.10.2018.

Kuvioissa 13 ja 14 on esitetty Minitab®17-ohjelmistolla Ossauskosken lämpötilatiedoista lasketut tilastolliset tunnusluvut. Kuvioiden mukaan lämpötilojen keskiarvot ja vaihteluväli ovat lähes samat molemmilla generaattoreilla.



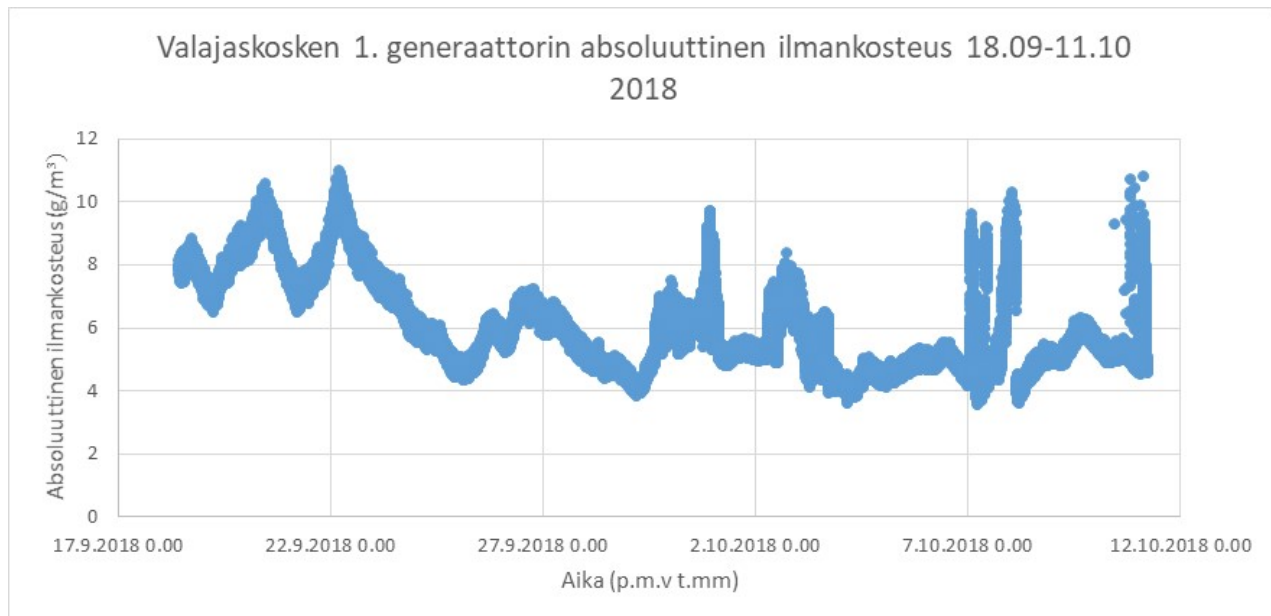
Kuvio 13. Ossauskosken 1. generaattorin lämpötilamittausten tilastolliset tunnusluvut.



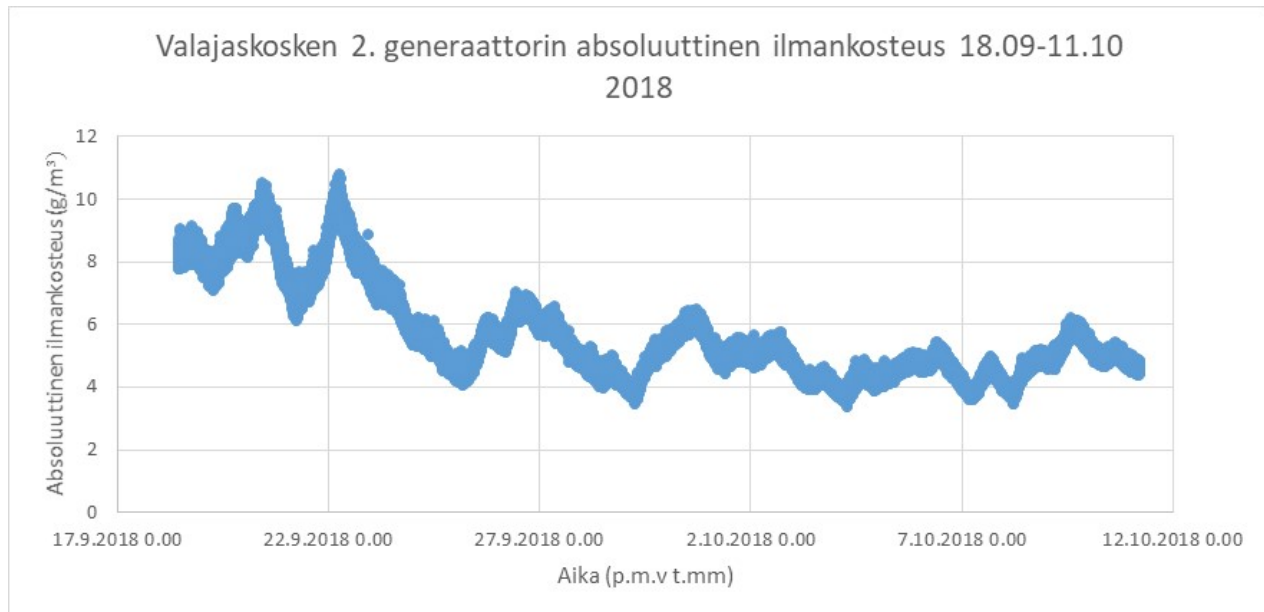
Kuvio 14. Ossauskosken 2. generaattorin lämpötilamittausten tilastolliset tunnusluvut.

4.2 Ilmankosteus

Kuvioissa 15 ja 16 on esitetty absoluuttiset ilmankosteudet Valajaskoskelta 1. ja 2. generaattoreilta. Kuvioihin on valmiiksi laskettu absoluuttiset ilmankosteudet käyttäen HMP110 antureilla mitattuja ilmankosteus- ja lämpötilatietoja. Absoluuttiset ilmankosteudet on laskettu käyttäen luvussa 3.1 esiteltyjä kaavoja (1), (2) ja (3). Kuvioiden mukaan ilmankosteus vaihtelee molemmilla generaattoreilla noin 7 g/m^3 verran.

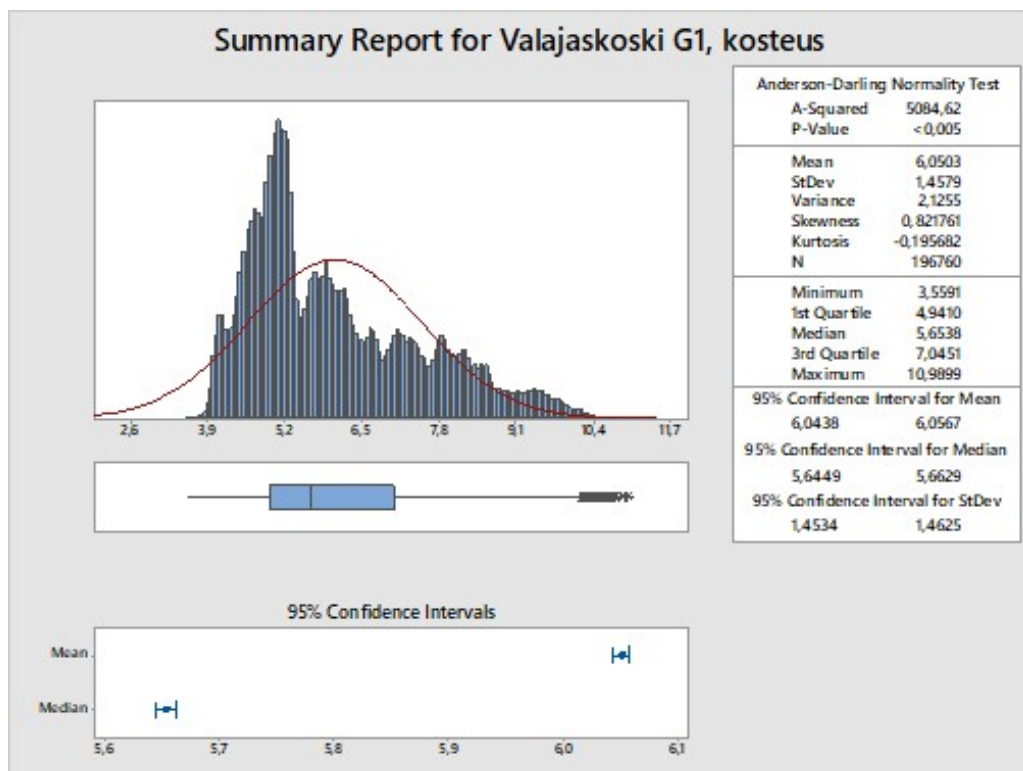


Kuvio 15. Valajaskosken 1. generaattorin absoluuttiset ilmankosteudet aikavälillä 18.09.2018 - 11.10.2018.

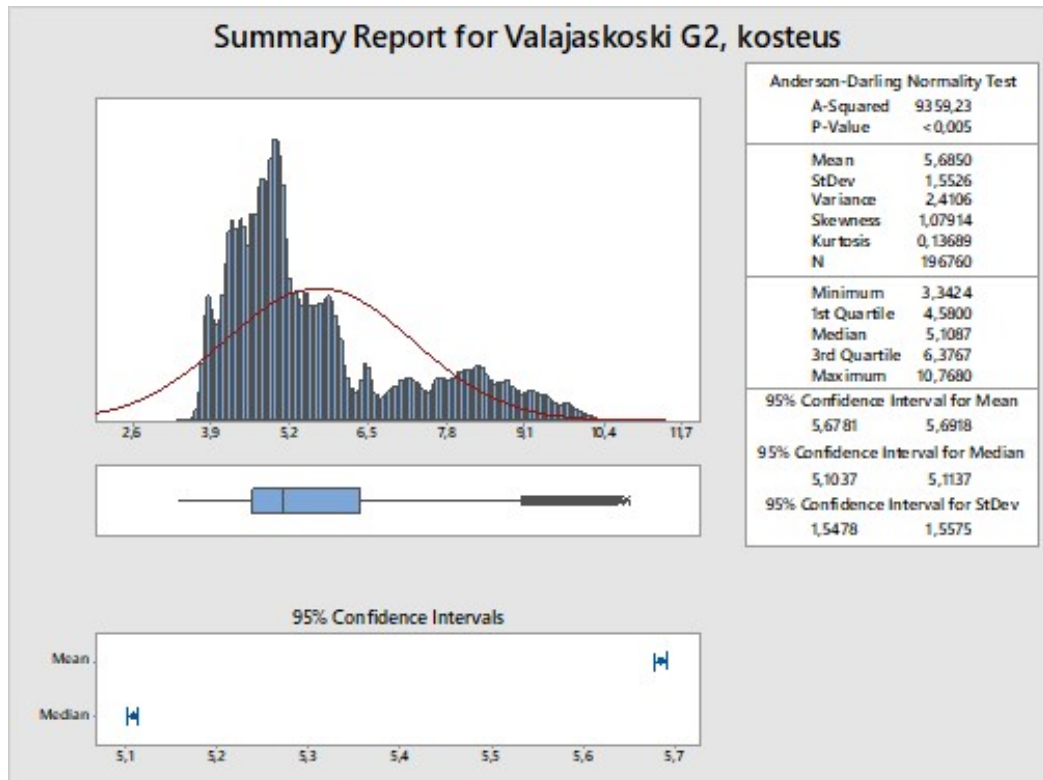


Kuvio 16. Valajaskosken 2. generaattorin absoluuttiset ilmankosteudet aikavälillä 18.09.2018 - 11.10.2018.

Kuvioissa 17 ja 18 on esitetty Minitab®17-ohjelmistolla Valajaskosken kosteustiedoista lasketut tilastolliset tunnusluvut. Jakaumat ovat samankaltaisia ja ilmankosteus vaihtelee molemmilla generaattoreilla noin 3.5 – 11 g/m³ välillä.

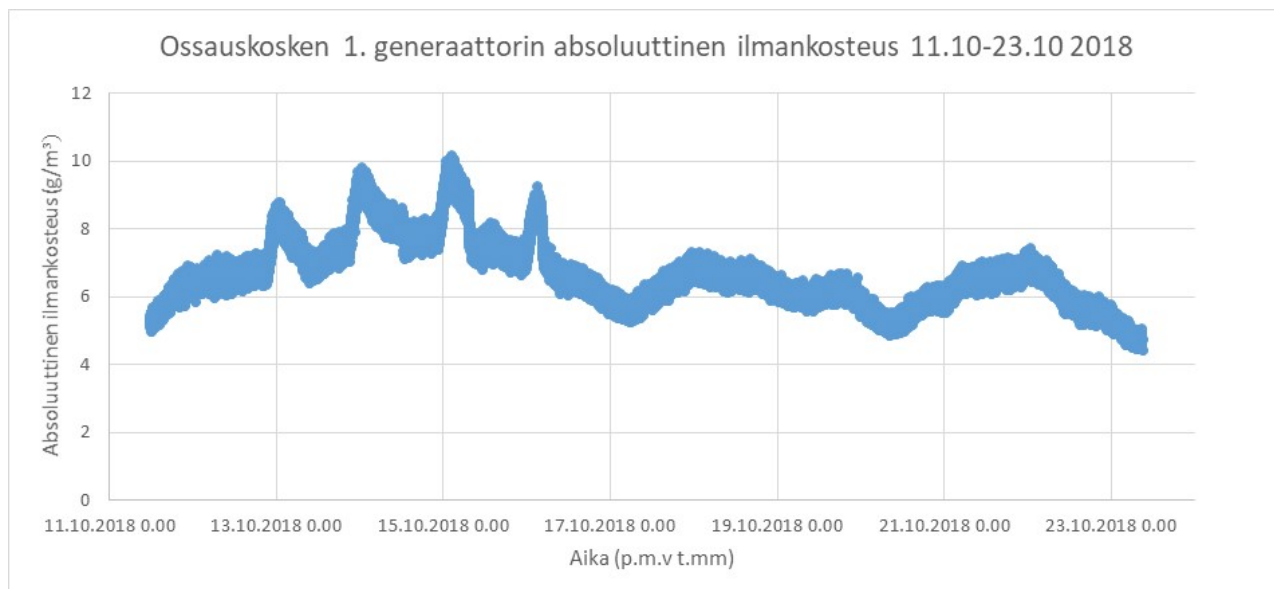


Kuvio 17. Valajaskosken 1. generaattorin ilmankosteustietojen tilastolliset tunnusluvut.

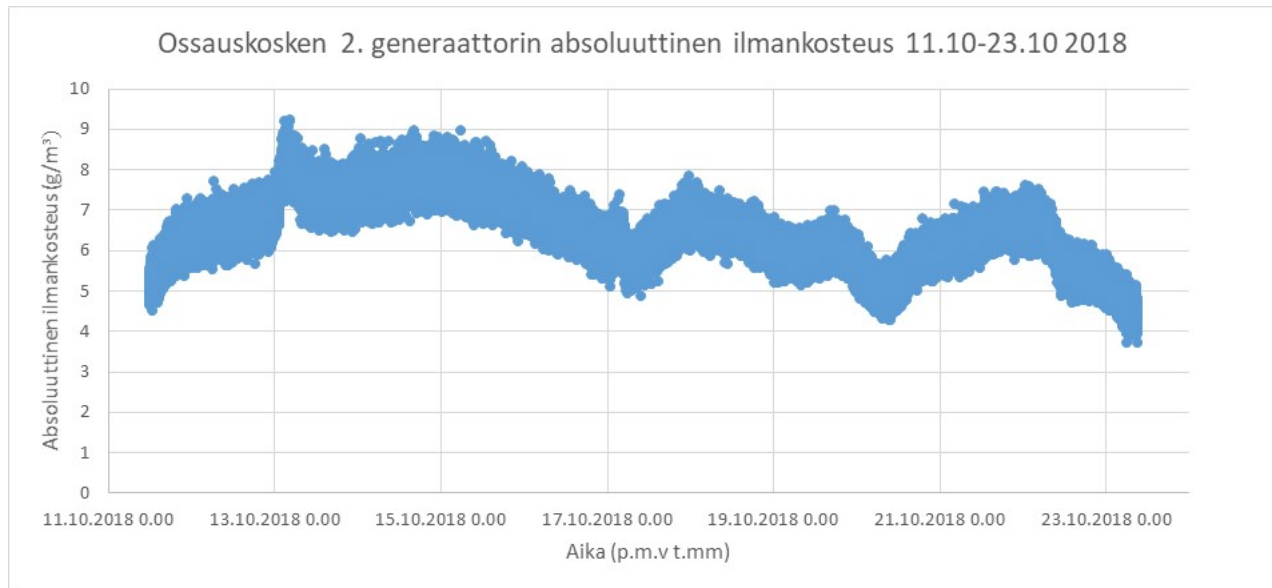


Kuvio 18. Valajaskosken 2. generaattorin ilmankosteustietojen tilastolliset tunnusluvut.

Kuvioissa 19 ja 20 on esitetty absoluuttiset ilmankosteudet Ossauskoskelta 1. ja 2. generaattoreilta. Kuvioiden mukaan ilmankosteus vaihtelee molemmilla generaattoreilla noin 5 g/m^3 verran.

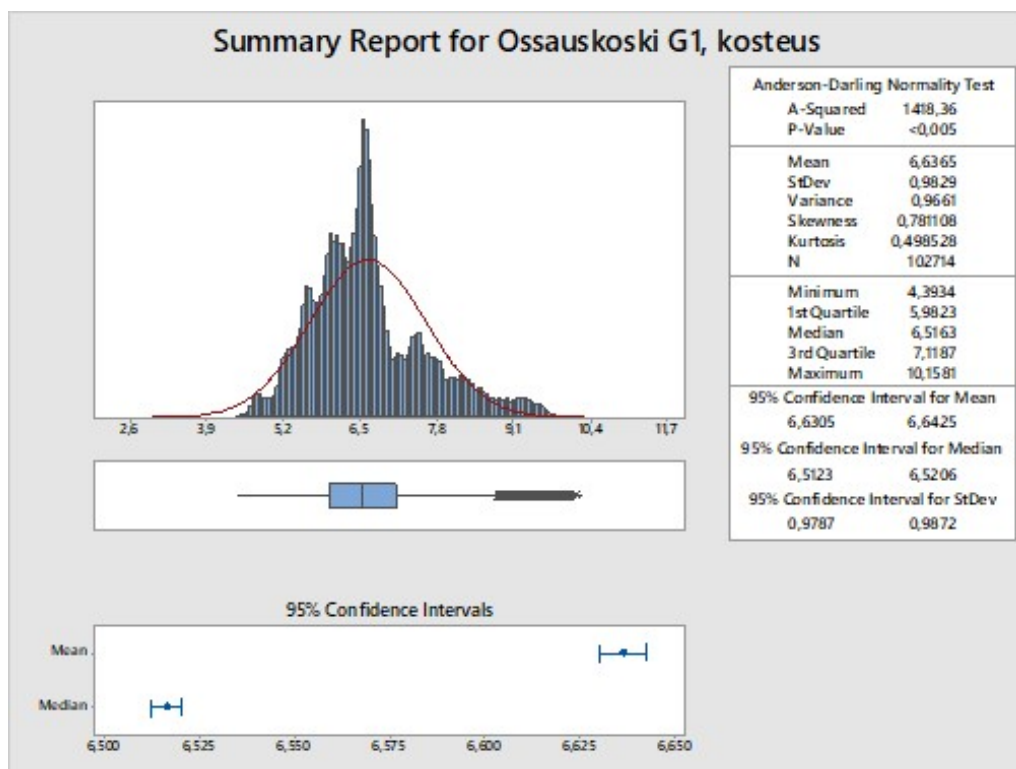


Kuvio 19. Ossauskosken 1. generaattorin absoluuttiset ilmankosteudet aikavälillä 11.10.2018 - 23.10.2018.

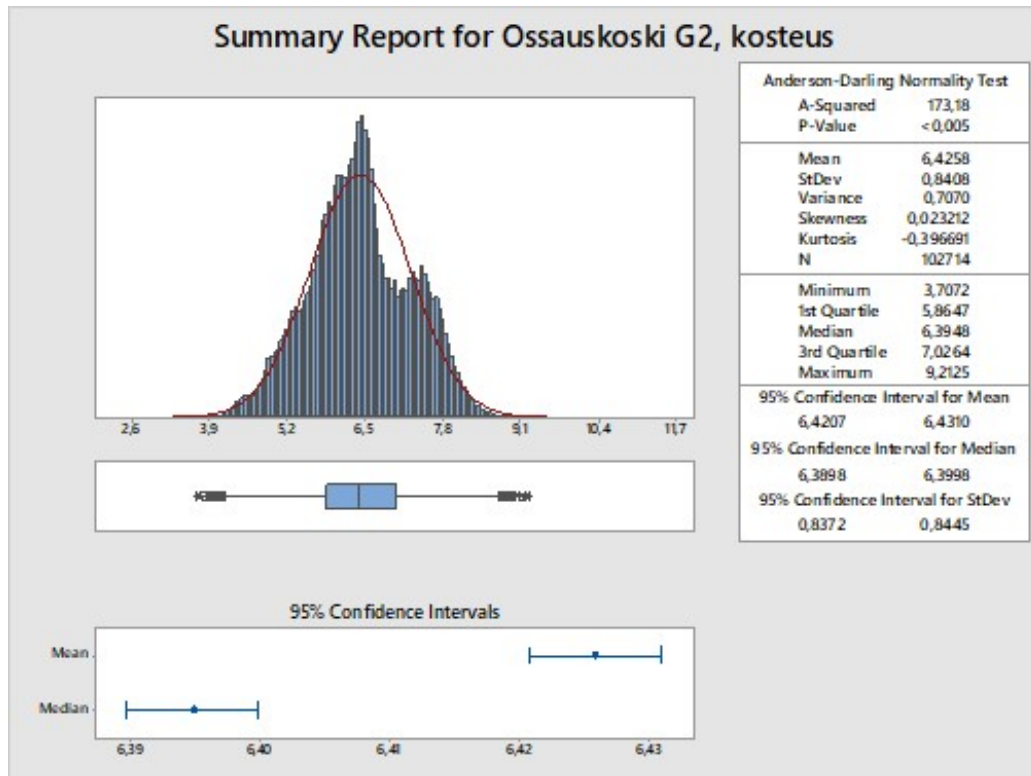


Kuvio 20. Ossauskosken 2. generaattorin absoluuttiset ilmankosteudet aikavälillä 11.10.2018 - 23.10.2018.

Kuvioissa 21 ja 22 on esitetty Minitab®17-ohjelmistolla Ossauskosken kosteustiedoista lasketut tilastolliset tunnusluvut. Jakaumat ovat samankaltaisia, mutta 1. generaattorilla on kuvien mukaan hieman kosteampaa.



Kuvio 21. Ossauskosken 1. generaattorin ilmankosteustietojen tilastolliset tunnusluvut.



Kuvio 22. Ossauskosken 2. generaattorin ilmakeuustietojen tilastolliset tunnusluvut.

4.3 Virtatiheys

Virtatiheydelle saatiin laskelma Valajaskosken 3. generaattorille Merseniiltä, joka toimii hiiliharjatoimittajana kyseiselle voimalaitokselle. Kuviossa 23 on esitetty kyseinen laskelma. Laskelma ei kuitenkaan ole luotettava, sillä siinä on käytetty väärää arvoa hiiliharjojen koolle. Kyseisellä generaattorilla on käytössä hiiliharjat, joiden kosketuspinta-ala on noin 10 cm² eikä 8 cm², kuten laskelmassa on esitetty.

Calculation current density

Site: Another site in Kemijoki
Date 2018.04.03



With current brush holders

t	a	r
32	25	41

 mm

Number of brushes per ring	Area per brush cm ²	Total area cm ²	Load Amps	Current density	
8	8	64	526	8,22	Max. continuously load according to specification
			447,1	6,99	at 85% of max. load.
			283	4,11	at 50% of max. load

Possible reduction of brushes

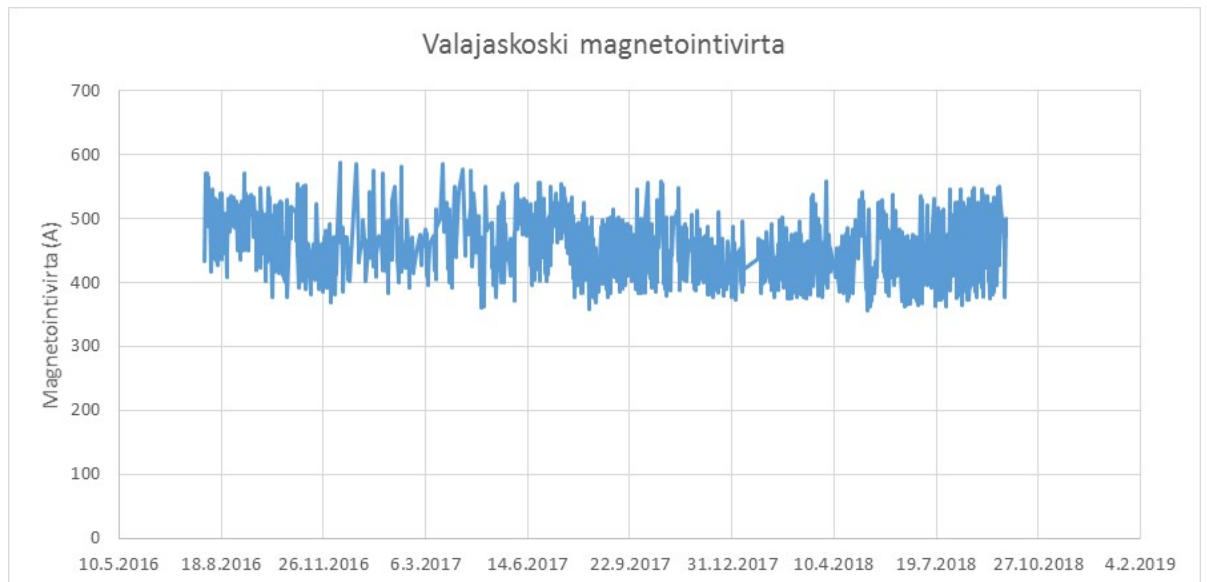
t	a	r
32	25	

 mm

Number of brushes per ring	Area per brush cm ²	Total area cm ²	Load Amps	Current density	
6	8	48	526	10,96	Max. continuously load according to specification
			447,1	9,31	at 85% of max. load.
			283	5,48	at 50% of max. load

Kuvio 23. Valajaskosken virtatiheys laskelma Merseniltä.

Valajaskosken osalta saatiin voimalaitoksen tietojärjestelmästä hyvin magnetointivirtatietoa. Kuviossa 24 on esitetty Valajaskosken magnetointivirtoja kahden vuoden ajalta. Ensimmäinen magnetointivirtatieto on 2016 elokuulta ja viimeisin 2018 syyskuulta.



Kuvio 24. Magnetointivirrat Valajaskoskella aikavälillä elokuu 2016 – syyskuu 2018.

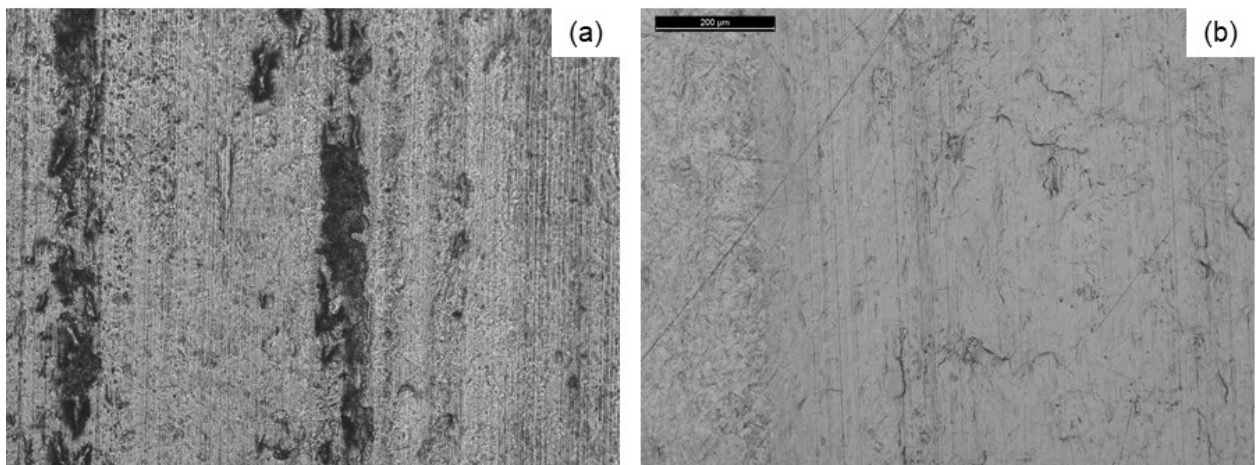
4.4 Liukurenkaiden kehänopeus

Liukurenkaat pyörivät 88,6 kierrosta minuutissa, eli 1,48 kierrosta sekunnissa Valajaskoskella ja 92 kierrosta minuutissa, eli 1,53 kierrosta sekunnissa Ossauskoskella. Liukurenkaiden halkaisijat ovat 1,4 metriä Valajaskoskella ja 1,401 metriä Ossauskoskella. Luvun 3.3 kaavalla (5) laskettuna Valajaskosken liukurenkaiden kehänopeus on 6,5 m/s ja Ossauskosken liukurenkaiden kehänopeus on 6,75 m/s.

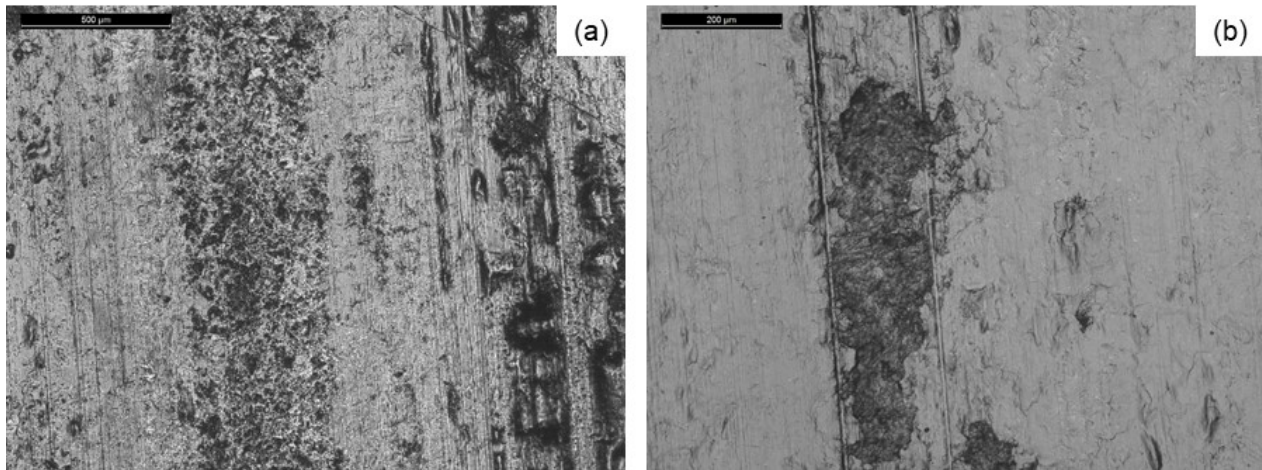
4.5 Hiiliharjojen pinnat

Kuvissa 6 - 8 on esitetty Valajaskosken käytetyistä hiiliharjoista valomikroskooppilla otettuja kuvia. Kuvien kuvausteksteissä VL tarkoittaa Valajaskoskea ja sen perässä on generaattorin numero. Generaattorin numeron jälkeen tulevat A ja Y tarkoittavat alemmaa ja ylempää liukurengasta. Esimerkiksi VL1A tarkoittaa Valajaskosken ensimmäisen generaattorin alemman liukurenkaan hiiliharjaa.

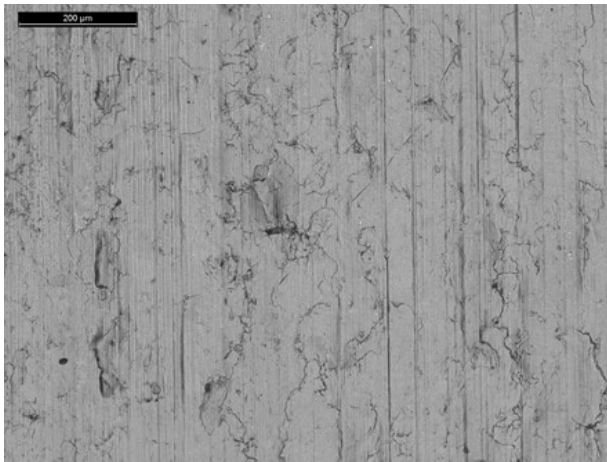
Kaikista käytetyistä hiiliharjoista löytyi kuvan 6 b) mukaista sileän näköistä pintaa, sekä kuvan 7 a) mukaisia tummia jälkiä. Kolmannen generaattorin hiiliharjassa näyttäisi olevan enemmän pitkiä ja ohuita jälkiä, kun taas 1. ja 2. generaattorien hiiliharjoissa esiintyy enemmän leveitä jälkiä.



Kuva 6. Generaattorin 1 käytetyt RE80 hiiliharjat. a) VL1A ja b) VL1Y



Kuva 7. Generaattorin 2 käytetyt RE80 hiiliharjat. a) VL2A ja b) VL2Y


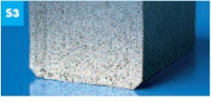






Kuva 8. Generaattorin 3 käytetty ylemmän liukurenkaan EG389P hiiliharja.







5 TULOSTEN KÄSITTELY

Mittauskampanjoiden tavoitteena oli selvittää mahdollisia eroavaisuuksia kahden vesivoimalan hiiliharjojen käyttöolosuhteissa, jotka mahdollisesti selittäisivät hiiliharjojen kulumisen eroja kyseisillä voimaloilla. Vesivoimaloista haluttiin saada selville virtatiheys, lämpötila, ilmankosteus, jousipaine ja liukurenkaiden kehänopeus. Näistä muuttujista saatiin selville muut paitsi jousipaine.

Tarkastellaan hiiliharjoja ennen mittauksien tuloksien käsittelyä. Kuvioissa 25 ja 26 on esitetty mahdollisia liiallisen kulumisen oireita hiiliharjoissa.

	S1	Tiivis ja kiiltävä kosketuspinta	Normaali toiminta
	S3	Hieman huokoinen kosketuspinta	Normaali toiminta
	S5	Pinta, jossa on hienoa hiushalkeamaa	Normaali toiminta, hieman pölyn vaikutusta
	S7	Pinta, jossa on hiushalkeamaa	Aiheuttajat: Alikuormitus, pölyn, öljyn tai rasvan vaikutus, alhainen jousipaine
	S9	Urautumista ja hiushalkeamaa	Aiheuttajat: Samaa kuin S7 mutta vahvempaa
	S11	Haamujälkiä, vaikea kommutointi	Aiheuttajat: Kommutointi ongelmat, esim. hiilen pidin tai kääntönapa väärässä kohdassa

Kuvio 25. Hiiliharjojen kulumisjälkiä. (mukaillen Pantrac n.d., 14-15)

	S13	Palanut reuna	Aiheuttajat: Vaikea kommutointi, raskas kipinöinti, kontaktin keskeytys epäpyöreän kommutaattorin tai pitimen heikon jousipaineen vuoksi
	S15	Syöpynyt pinta	Aiheuttajat: Sähköinen ylikuormitus, kontaktin keskeytys
	S17	Laminoitunut kosketuspinta	Aiheuttajat: Käämitysongelman aiheuttamien palaneiden kontaktipintojen alueiden antamat jännitepiikit kommutoinnin aikana
	S19	Kahdet pinnat kaksoisharjoilla	Aiheuttajat: kallistuminen molempiin suuntiin käytävissä koneissa
	S21	Kuparipesiytmät	Aiheuttajat: Kuparihiukkasten tarttuminen
	S23	Rikkoutuneet reunat	Aiheuttajat: Ylös noussut välilamelli, kommutaattorin epäkeskeisyys, alhaisen kuormituksen aiheuttama harjan värinä

Kuvio 26. Hiiliharjojen kulumisjälkiä. (mukaillen Pantrac n.d., 16-17)

Verrataan kuvioden 25 ja 26 kulumisjälkiä Valajaskosken ja Ossauskosken voimaloiden käytettyihin hiiliharjoihin ja niiden kosketuspintoihin, jotka on esitetty kuvissa 9 ja 10. Kaikissa Valajaskosken hiiliharjoissa on havaittavissa kuvioden 25 ja 26 S7 tai S9 hairlining-oiretta, joka voi johtua liian alhaisesta virtatiheydestä, pölystä, oljystä tai liian alhaisesta jousipaineesta. Ossauskosken hiiliharjoissa kyseistä jälkeä ei näy.



Kuva 9. Valajaskosken käytettyjä hiiliharjoja.



Kuva 10. Ossauskosken käytettyjä hiiliharjoja.

Jousipaineita ei saatu mitattua, joten jousipaine on mahdollinen syy Valajaskosken hiiliharjojen pintojen jäljille. On kuitenkin epätodennäköistä, että jousipaine olisi Valajaskoskella liian alhainen, koska se näkyisi myös kipinöintinä, ja kipinöintiä ei ole havaittu yhdessäkään koneessa.

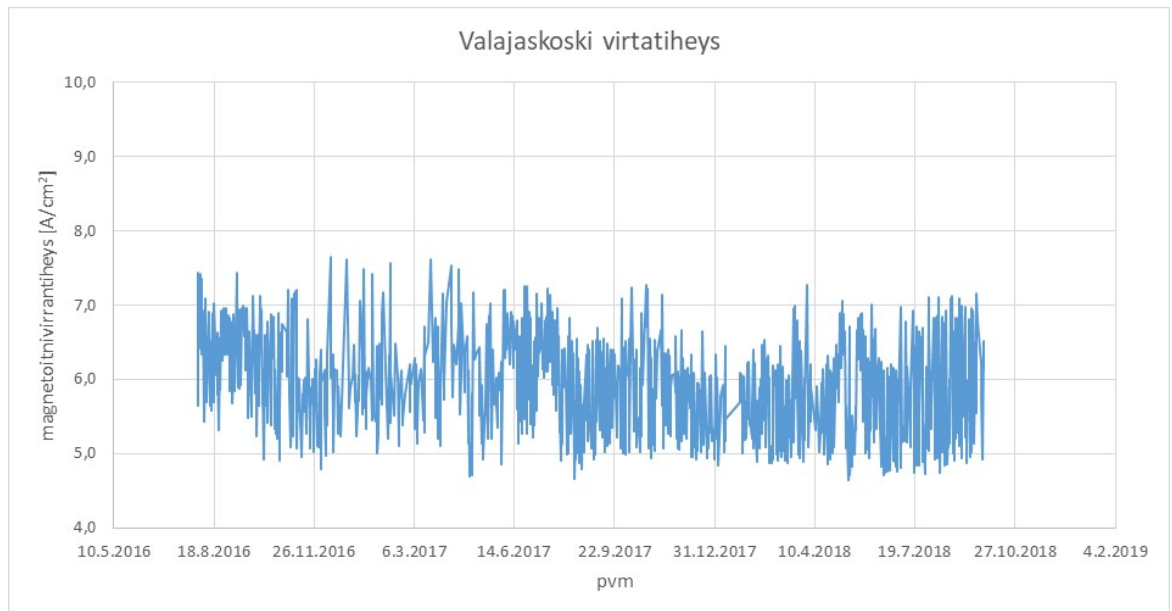
Kuvioiden S7 tai S9 oireet voivat johtua myös pölystä. Valajaskoskella on kohtalainen pöyongelma, joka johtuu hiiliharjojen nopeasta kulumisesta. Kuluminen irrottaa pintaa hiiliharjoista, joka leviää ympäristöön pölyksi. Kyseinen pöly ei kuitenkaan selitä hiiliharjojen nopeaa kulumista, sillä se on nopean kulumisen seuraus, joten on syytä tarkastella myös virtatiheyttä.

5.1 Magnetointivirtatiheys

Virtatiheyden merkitystä hiiliharjojen kulumiselle käsiteltiin aiemmin luvussa 2.4. Hiiliharjojen suositeltu virtatiheys alue vaihtelee hiiliharjoittain noin 6-12 A/cm² alueella. Toinen virtatiheyden alaraja sähkögrafiittihiiliharjoilla on 8 A/cm². (Mersen 2017, 14.)

Luvussa 4.3 kuviossa 24 on esitelty Valajaskosken magnetointivirta 1. generaattorille kahden vuoden ajalta ja sen perusteella voidaan laskea virtatiheys samalle ajanjaksolle, käyttäen luvun 3.2 kaavaa (4). Kaavassa (4) tarvitaan magnetointivirtatiedon lisäksi hiiliharjojen lukumäärä per liukurengas ja niiden kosketuspinta-ala. Kuviossa 27 on esitelty Valajaskosken lasketut virtatiheydet. Kuvioihin on laskettu virtatiheys käyttäen Valajaskosken hiiliharjojen määriä, kokoja sekä luvun 4.3 kuvion 24 mukaista magnetointivirtatietoa. Valajaskoskella on 12 hiiliharjaa liukurengasta kohti, ja yhden hiiliharjan kosketuspinta-ala on $6,4 \text{ cm}^2$.

Kuvion 27 mukaan Valajaskosken 1. generaattorin virtatiheydet ovat reilusti yleisten virtatiheys raja-arvojen alapuolella. Virtatiheyksille sähkögrafiittihiiliharjojen alaraja-arvot ovat 6 A/cm^2 tai 8 A/cm^2 hiiliharjasta riippuen. Virtatiheydet Valajaskoskella ovat olleet alle 6 A/cm^2 yli puolet ajasta, joten on todennäköistä, että liian alhainen virtatiheys on hyvin merkittävä tekijä hiiliharjojen nopealle kulumiselle kyseisellä voimalaitoksella. Kuten aiemmin luvun 5 alussa mainittiin, Valajaskosken käytettyjen hiiliharjojen pintojen kulumisen oireet voivat viitata liian alhaiseen virtatiheyteen myös.

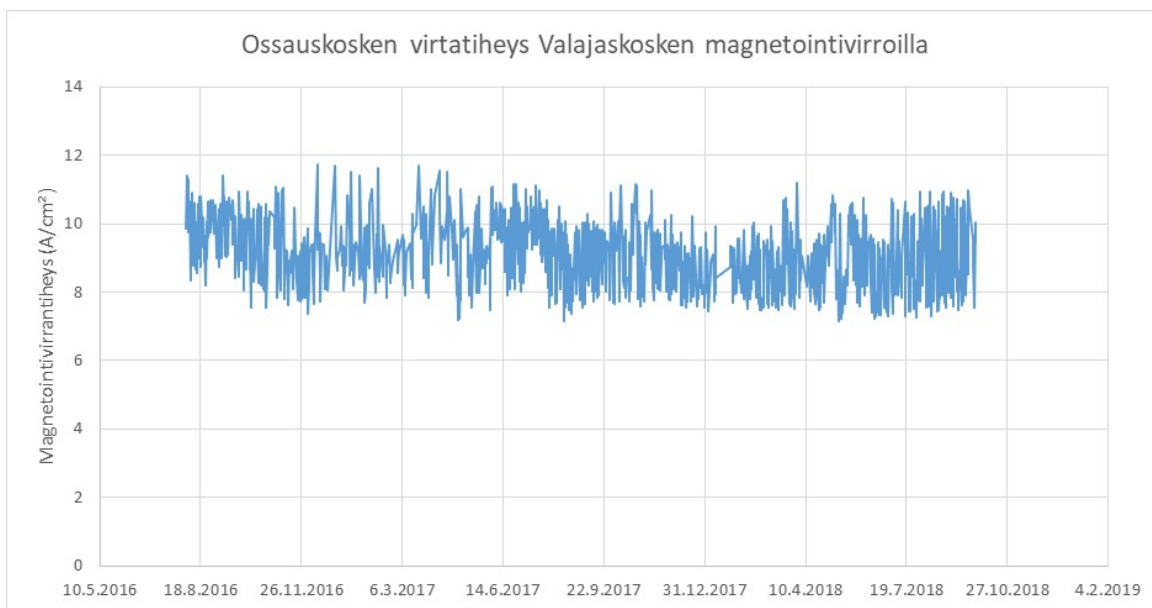


Kuvio 27. Valajaskosken virtatiheys.

Ossauskosken osalta ei ollut saatavissa vastaavaa pitkäaikaista magnetointivirtatietoa, mutta yksittäisiä magnetointivirtatietoja saatiin voimalalla vierailuiden yhteydessä. Ossauskosken magnetointivirrat olivat noin 630-640 ampeeria käyntikertojen aikana, yhden hiiliharjan kosketuspinta-ala on 5 cm^2 , ja harjoja oli 10

kappaletta per liukurengas. Näillä tiedoilla laskettuna luvun 3.2 kaavaa (4) käyttäen Ossauskosken virtatiheydet ovat 12,6 – 12,8 A/cm². Ossauskoskella on siis huomattavasti suuremmat virtatiheydet kuin Valajaskoskella.

Ossauskosken magnetointivirrat ovat suuremmat kuin Valajaskoskella, mutta myös hiiliharjojen lukumäärä ja niiden kosketuspinta-alan koot ovat Ossauskoskella pienempiä kuin Valajaskoskella, mikä osittain selittää suuremman virtatiheyden. Tarkastellaan hiiliharjojen kokojen ja lukumäärien merkitystä virtatiheydelle laskemalla virtatiheys käyttämällä Valajaskosken magnetointivirtatietoa ja Ossauskosken hiiliharjojen määriä ja kosketuspinta-aloja. Kuviossa 28 on esitetty edellä mainitun laskelman tulokset käyttäen luvun 4.3 kuvion 24 mukaisia Valajaskosken magnetointivirtatietoja kahden vuoden ajalta. Valajaskosken virtatiheydet olisivat siis hyvällä tasolla, jos käytössä olisi Ossauskoskea vastaavat hiiliharjojen määrät ja koot.



Kuvio 28. Virtatiheys Ossauskosken hiiliharjoilla ja Valajaskosken virtatiheyksillä.

5.2 Lämpötila

Lämpötilatietoja saatiin selville liukurenkaiden ja hiiliharjojen ympäröivästä ilmasta anturimittauksin. Ympäröivän ilman lämpötila ei ole merkittävä tieto hiiliharjojen kulumisen kannalta, mutta sitä tietoa tarvitaan absoluuttisen kosteuden laskemiseksi. Tärkeää hiiliharjojen kulumisen kannalta on selvittää lämpötila liukurenkaiden pinnasta.

Liukurenkaiden pinnasta saatiin lämpötilatietoa lämpökameran avulla. Lämpökameran kuvat on esitetty luvussa 4.1 kuvissa 4 ja 5. Kuvissa Valajaskosken liukurenkaassa lämpötila on 59,8 °C ja Ossauskosken liukurenkaassa 70,3 °C. Valajaskoskella vaikuttaisi siis olevan kohtalaisesti alhaisempi lämpötila liukurenkaiden pinnassa kuin Ossauskoskella.

Lämpötilan vaikutusta kitkakertoimeen käsiteltiin luvussa 2.5. Liukurenkaan ja hiiharjan välinen kitkakerroin on suurempi alhaisessa lämpötilassa ja liian korkeassa lämpötilassa. Lämpökameralla otettujen kuvien arvojen mukaan Valajaskoskella on siis noin 1,5 kertaa suurempi kitkakerroin liukurenkaiden ja hiiharjojen välillä, ja se vaikuttaa hiiharjojen kulumiseen.

Lämpökamerakuvia on kuitenkin vain kahdelta päivältä ja rajoitetusti, joten jatkossa tulisi tehdä lisää mittauksia tiedon varmentamiseksi.

5.3 Ilmankosteus

Ilmankosteuden merkitystä hiiharjojen kulumiselle käsiteltiin luvussa 2.4. Luvussa 4.2 on esitelty mittauksien perusteella lasketut absoluuttiset ilmankosteudet 1. ja 2. generaattoreille hiiharjojen ja liukurenkaiden ympäröivästä ilmasta Valajaskoskella ja Ossauskoskella. Absoluuttiset ilmankosteudet ovat laskettu käyttäen luvussa 3.1 esiteltyjä kaavoja (1), (2) ja (3).

Mittauksien perusteella Valajaskoskella 1. ja 2. generaattorien absoluuttinen ilmankosteus vaihteli noin 3,5 - 11 g/m³ välillä. 1. generaattorin ilmankosteuden keskiarvo oli noin 6,1 g/m³ ja 2. generaattorin ilmankosteuden keskiarvo on noin 5,7 g/m³. Valajaskosken mittauksien kesto oli noin kolme viikkoa.

Ossauskoskella 1. generaattorin absoluuttinen ilmankosteus vaihteli noin 4,4 - 10,2 g/m³ välillä, ja niiden keskiarvo oli noin 6,6 g/m³. 2. generaattorilla absoluuttinen ilmankosteus vaihtelee noin 3,7 - 9,2 g/m³ välillä, ja niiden keskiarvo on noin 6,4 g/m³. Mittaukset Ossauskoskella kestivät noin kaksi viikkoa.

Kummassakaan voimalaitoksessa ilmankosteudet eivät menneet kirjallisuuden antamalle alarajalle 2,5 g/m³, vaan ne pysyivät hyväksyttävällä alueella. Keskiarvojen perusteella Ossauskoskella kuitenkin oli hieman kosteampi ilma, joten se

voi olla yksi osasy siihen miksi hiiliharjat kestävät siellä pidempään. Merkittävin syy ilmankosteus ei kuitenkaan ole, sillä erot ilmankosteudessa voimalaitosten välillä olivat hyvin pienet.

5.4 Liukurenkaiden kehänopeus

Kehänopeuksien raja-arvoja sähkögrafiittihiiliharjoille esiteltiin luvussa 2.5. Kehänopeuden suositeltu yläraja vaihtelee sähkögrafiittihiiliharjoilla 40 - 60 m/s välillä. Luvussa 4.4 esitettiin Valajaskosken ja Ossauskosken kehänopeudet. Valajaskoskella liukurenkaiden kehänopeus oli noin 6,5 m/s ja Ossauskoskella noin 6,75 m/s.

Voimalaitosten kehänopeudet eivät ole lähelläkään hiiliharjojen spesifikaatioiden antamia ylärajoja, eikä niissä ole voimalaitosten välillä merkittäviä eroja. Hiiliharjojen kulumisen erot voimalaitosten välillä eivät siis johdu liukurenkaiden kehänopeuksista.

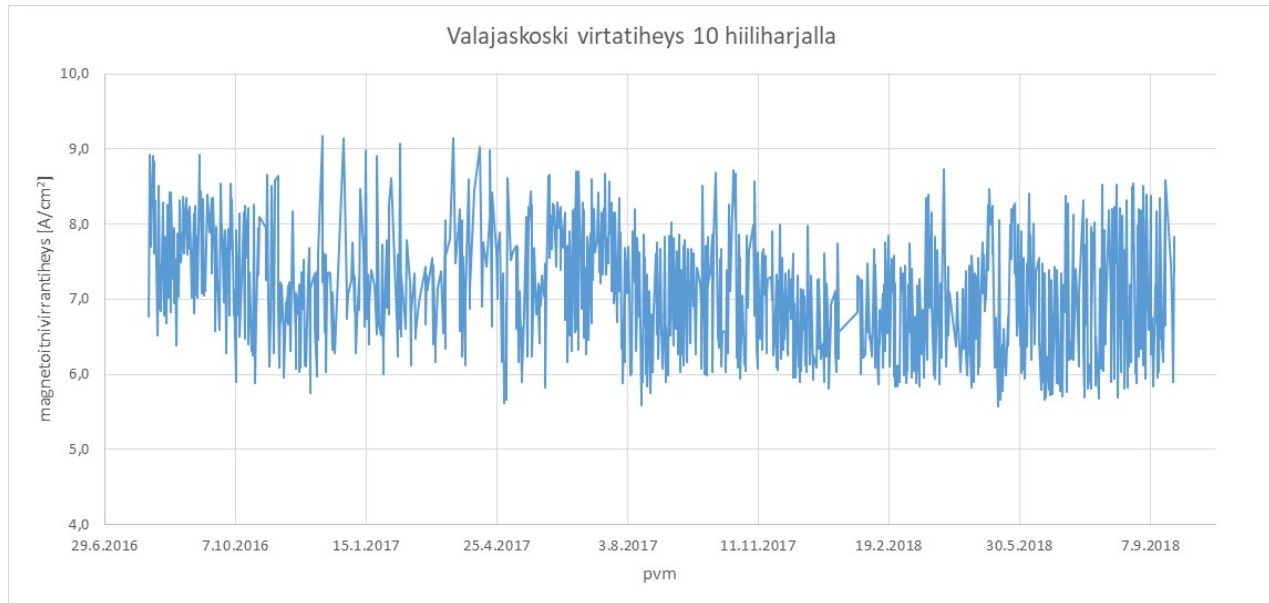
5.5 Yhteenveto ja kehitysehdotus

Ilmankosteus on molemmissa voimalaitoksissa kirjallisuuden antamalla hyväksyttävällä alueella. Voimalaitosten välinen ero ilmankosteuden suhteen on myös niin pieni, että se ei aiheuttaisi nykyisen tiedon mukaista suurta eroa hiiliharjojen kulumisessa.

Liukurenkaiden lämpötilassa voimalaitosten välillä on 10 °C:n ero. Valajaskoskella on alhaisempi liukurenkaiden lämpötila, mikä johtaa hieman korkeampaan kitkakertoimeen hiiliharjojen ja liukurenkaan välillä. Alhaisempi lämpötila voi johtua alhaisesta virtatiheydestä, joten virtatiheyden nostaminen oikealle alueelle on tärkeysjärjestyksessä etusijalla.

Valajaskosken vesivoimalaitoksessa liukurenkaiden ja hiiliharjojen virtatiheys on ollut liian alhainen jo ainakin kaksi vuotta luvun 4.3 kuvion 24 magnetointivirtojen mukaan laskettuna. Pitkäaikainen alhainen virtatiheys on voinut myös hiljalleen vaurioittaa liukurenkaan pintaa, tehden kulumisesta entistä tehokkaampaa. Laskettujen virtatiheyksien mukaan Valajaskoskella on kahden vuoden aikana ollut virtatiheys kirjallisuuden antamien alarajojen alapuolella noin puolet ajasta.

Yksinkertaisin tapa nostaa virtatiheyttä on hiiliharjojen vähentäminen. Valajaskosken 1. ja 2. generaattoreilla on nykyisin 24 hiiliharjaa per generaattori, eli 12 per liukurengas. Kuviossa 29 on esitetty millainen virtatiheys Valajaskosken 1. generaattorilla olisi ollut 10 hiiliharjalla per liukurengas menneen kahden vuoden aikana. 10 hiiliharjalla Valajaskosken virtatiheys pysyisi siis kirjallisuuden antaman alarajan 6 A/cm^2 yläpuolella suhteellisen kiitettävästi.



Kuvio 29. Valajaskosken virtatiheys 10 hiiliharjalla.

Kuviossa 30 on esitetty Valajaskosken 1. generaattorin virtatiheys laskettuna kahden menneen vuoden ajalle kahdeksalla hiiliharjalla. Kahdeksalla hiiliharjalla Valajaskosken virtatiheys olisi siis yleisesti ottaen paremmalla alueella kuin kymmenellä hiiliharjalla. Valajaskoskella on kuitenkin käytössä RE80 hiiliharja, jonka spesifikaation mukaan sen virtatiheyden suositeltu yläraja olisi 10 A/cm^2 (Pantrac n.d., 33-34). Kahdeksan hiiliharjaa liukurengasta kohti saattaisi siis johtaa liian korkeaan virtatiheyteen nykyisillä hiiliharjoilla. Kymmenen hiiliharjaa olisi siis RE80 hiiliharjan spesifikaation mukaan parempi määrä.



Kuvio 30. Valajaskosken virtatiheys kahdeksalla hiiliharjalla.

Tulosten perusteella suositellaan, että Valajaskosken 1. ja 2. generaattoreilta yri-
tettäisiin vähentää hiiliharjoja 24 hiiliharjasta 20 hiiliharjaan, eli 10 hiiliharjaan per
liukurengas.

6 POHDINTA

Työn tavoitteena oli saada selville, mistä Ossauskosken ja Valajaskosken voimalaitoksien hiiliharjojen elinikäerot johtuvat. Minulla ei ollut aiheeseen pohjatietoa, joten aihe oli uusi ja mielenkiintoinen. Työ pitikin aloittaa hiiliharjojen opiskelulla ja tiedonhaulla, joka oli hieman haastavaa aiheen suomenkielisen materiaalin vähäisyyden vuoksi. Aiheen opiskelun yhteydessä selvisi myös, että aiheeseen liittyy merkittävä määrä sähkötekniikkaa, johon minulla ei myöskään ollut vahvaa taustatietoa. Myös teoriaosuuden kirjoittaminen oli haastava osuus opinnäytetyötä, aiheen suomenkielisen materiaalin vähäisyyden vuoksi. Kaikki hiiliharjoja koskeva kirjallisuus, mitä tätä työtä varten opiskelin, oli englanninkielistä.

Työn tavoitteeseen päästiin lopulta mielestäni kiitettävästi. Valajaskosken ja Ossauskosken voimalaitoksilta löytyi selviä eroja, sekä selittäviä tekijöitä Valajaskosken hiiliharjojen nopealle kulumiselle. Erityisesti voimalaitosten virtatiheydessä oli merkittäviä eroja. Valajaskosken virtatiheys oli ollut jo pitkään liian alhainen, haitaten hyvän kalvon tai patinan muodostumista liukurenkaisiin.

Opinnäytetyön aihepiiri oli täysin uusi minulle, joten oppimiskokemuksena työ oli oikein hyvä. Työn aikana pääsi myöskin käymään vesivoimalaitosten sisällä tutustumassa laitoksiin tarkemmin. Hiiliharjojen opiskelun lisäksi sain tutustua antureiden toimintaan ja niiden mittauksien valmisteluun. Anturimittausten valmistelu toi oman lisähaasteensa työhön, mutta niidenkin ymmärtäminen onnistui onneksi myös lopulta.

LÄHTEET

National Brush Digest 1957 & 1977. National Electrical Carbon Corporation.

Hamilton, R.J. 2000. DC Motor Brush Life – White Paper. IEEE Transactions on Industry Applications 11/2000, 1682-1687.

Holle, M. 2010. Effects of hardness on the lifetime of graphite brushes used for aircraft starter generators. Wichita State University.

Hydropower A Guide for Developers and Investors 2015. International Finance Corporation. Viitattu 26.9.2018. https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/top-ics_ext_content/ifc_external_corporate_site/sustainability-at-ifc/publications/hydroelectric_power_a_guide_for_developers_and_investors

Karkkulainen, J., Karkkulainen, O. & Kinnunen, A. 2014. eFysiikka 9. Luku 35 Generaattori. Viitattu 5.10.2018. <https://peda.net/valkeakoski/opetuspalvelut/pk/naakan-koulu/oppiaineet/fysiikka/fy-m%C3%A4ntyl%C3%A4/e9k2/35-generaattori>

Kemijoki Oy 2018. Vesivoiman tuotanto. Viitattu 28.9.2018. <https://www.kemijoki.fi/vesivoima/vesivoiman-tuotanto.html>

Kerzenbaum, I. 1996. Inspection of Large Synchronous Machines Checklists, Failure Identification, and Troubleshooting. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York.

Koenitzer, J. 2017. The Effect of Spring Pressure on Carbon Brush Wear Rate. Helwig Carbon Products, Inc. Milwaukee, Wisconsin, USA.

Korpinen, L. & Lehtelä, R. 2007. Sähkövoimatekniikkaopus. Luku 10 Sähkökoneet. Viitattu 24.7.2018. http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_2osa.pdf

Kroef, J.J.A. n.d. Carbon Brushes for Electrical Machines. Viitattu 20.06.2018. https://docmh.net/the-philosophy-of-money.html?utm_source=carbon-brushes-for-electrical-machines-pdf

Mersen 2017. Carbon brushes for motors and generators. Viitattu 28.06.2018. <https://www.mersen.com/sites/default/files/publications-media/2-ptt-carbon-brush-technical-guide-mersen.pdf>

Morganite 1978. Carbon Brushes and Electrical Machines. Morganite Electrical Carbon Limited.

O'Brien, J. 2015. Carbon brushes, a new lease of life. Process Industry Informer 10/2015, 44-45.

Pantrac n.d. Carbon Brushes for Industrial and Railway Technology. Viitattu 22.11.2018. https://www.skckarbon.com.tr/images/stories/dokumanlar/pantrac_carbon_brushes_en.pdf

Renewables First 2015. Head and flow detailed review. Viitattu 28.9.2018. <http://www.renewablesfirst.co.uk/hydropower/hydropower-learning-centre/head-and-flow-detailed-review/>

Scherer, P.M. & Spry, W.J. 1961. The Effect of Carbon Structure on Copper Oxidation at a Sliding Electrical Contact. Research Laboratory, National Carbon Company Division of Union Carbide Corporation, Parma, Ohio.

Tennessee Valley Authority 2018. How Hydroelectric Power Works. Viitattu 29.11.2018. <https://www.tva.gov/Energy/Our-Power-System/Hydroelectric/How-Hydroelectric-Power-Works>

Vaisala 2013. Humidity conversion formulas. Viitattu 19.9.2018. https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/Humidity_Conversion_Formulas_B210973EN-F.pdf