

# **LEUKAMURSKAIMEN KIINTEÄN LEUKAAN KOHDISTUVIEN VOIMIEN MITTAUS**

Badei Makhmour

Opinnäytetyö  
Elokuu 2013  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kone- ja laiteautomaatio

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Tampere University of Applied Sciences

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Kone- ja tuotantotekniikka  
Kone- ja laiteautomaatio

BADEI MAKHMOUR:

Leukamurskaimen kiinteään leukaan kohdistuvien voimien mittaus

Opinnäytetyö 49 sivua, joista liitteitä 8 sivua  
Elokuu 2013

---

Teollisuudessa tehtävillä mittauksilla on tärkeä rooli nykyajan tuotannossa ja yritystoiminnassa. Mittaustuloksia käytetään tuotesuunnittelussa ja tuotteiden kehittämisessä. Tämän opinnäytetyön tarkoitus on mitata Metso Minerals Oy:ssä suunnitellun laboratorioleukamurskaimen murskausvoimia.

Opinnäytetyön teoriaosuus rakentuu mittaustekniikan käsitteiden avaamisesta. Teoriaan sisältyvät mittaaminen, mittauksen suunnittelu ja toteutus, mittaajärjestelmä, mittaajärjestelmän rakenne sekä siihen kuuluvat komponentit. Lisäksi selvitetään voiman mittauksissa käytetyimmät menetelmät. Teoriaosuuden jälkeen käsitellään venymäliuskapohjainen mittaaminen. Opinnäytetyössä voimamittauksissa venymäliuskoilla pystyttiin mittaamaan vain z-suuntaisia murskausvoimia. Tarkoituksena oli myös selvittää moniakselisten voimien mittaustekniikka. Kolmikomponenttipietsoantureilla pystytään mittaamaan murskausvoimia x-, y- ja z-suunnalta. Työssä vertailtiin markkinoilla olevien valmistajien kolmikomponenttipietsoantureita. Vertailun jälkeen valittiin mittauskäyttöön sopivin tuote huomioon ottaen mittavaatimukset ja Metso Minerals Oy:n mittaustekniikan käytössä olevat mittamoduulit ja instrumentit.

Selvityksen lopputuloksista käy ilmi, että pietsoanturipohjaisessa mittauksessa on kiinnitettävä huomiota mitta-alueeseen, momenttiin, pietsoanturin asennukseen koneeseen, esikiristykseen ja kalibrointiin. Tällä hetkellä markkinoilla olevilla kolmikomponenttipietsoantureilla ei pystytä mittaamaan 150 kN suurempia voimia, ja niiden momentin kesto on rajallinen. Kuitenkin niiden käyttö pienikokoisissa koneissa kuten laboratorioleukamurskaimessa on mahdollista.

---

Asiasanat: mittaaminen, leukamurskain, venymäliuska, kolmikomponenttinen pietsoanturi.

## **ABSTRACT**

Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical and Production Engineering  
Machine Automation

**BADEI MAKHMOUR:**

Measurement of the Crushing Forces Applied to the Fixed Jaw of the Laboratory Jaw Crusher

Bachelor's thesis 49 pages, appendices 8 pages  
August 2013

---

Measurements have an important role in the modern industrial production. Measurement results are utilized in product design and development. The purpose of this thesis is to measure the crushing forces of a laboratory Jaw Crusher recently designed in Metso Minerals Inc.

The theoretical section explores measurement, designing and implementation of measurement, measurement system and components used in measurement system. In addition it explores the most used methods in force measurement. The strain gauge-based measurement is explained in the practical section of thesis. Because the crushing forces just in z-axis direction could be measured using strain gauges, the method of measuring of three component forces of  $x$ -,  $y$ - and  $z$ -axes is also explored. In this method measuring system is based on using three component piezoelectric sensors. In this thesis piezoelectric sensors of different manufacturers are compared to each other. The most applicable sensor to the measurement task is chosen considering the measurement demands and the current available equipment of measuring team of Metso Minerals Inc.

When using piezoelectric sensors in measurement, attention need to be paid to measuring range, moment, installation of piezoelectric sensor to crusher, preloading of sensor and calibration. The measurement of forces greater than 150 kN is not possible using the piezoelectric sensors available on the market and the allowed moment is also limited. However these kinds of sensors can be used for measurement of the forces of small crushers like crushing forces of laboratory Jaw Crusher.

---

Key words: measurement, jaw crusher, strain gauge, 3-component piezoelectric sensor.

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	YRITYSESITTELY JA TAUSTATIEDOJA .....	8
2.1	Metso-konserni ja Metso Minerals Oy .....	8
2.2	Murskaimet ja murskaustavat .....	8
2.3	Tutkimuskeskus ja kivilaboratorio .....	10
3	MITTAUS JA MITTAUSJÄRJESTELMÄT .....	11
3.1	Mittaus ja mittausten tarkoitus .....	11
3.2	Mittausjärjestelmä ja sen rakenne .....	11
3.2.1	Anturi .....	12
3.2.2	Muutin, vahvistin ja suodatin .....	13
3.2.3	A/D-muunnin .....	14
3.2.4	Tietokone ja tietojen käsittely .....	14
3.2.5	Tietojen siirto ja väylät .....	15
4	VOIMAN MITTAUS .....	17
4.1	Jännitys ja venymä .....	17
4.2	Resistiiviset venymäanturit .....	19
4.3	Kapasitiiviset anturit .....	21
4.4	Pietsosähköiset anturit .....	21
4.5	Venymä- ja pietsoantureiden vertailu .....	22
5	MITTAUSSYSTEEMIN VALINTA JA SUUNNITTELU .....	23
5.1	Voimanmittaussysteemin valinta .....	23
5.2	Voimanmittaussysteemin suunnittelu .....	23
5.3	Kalibrointi .....	24
6	MITTAUKSEN TAUSTA JA SUORITUS .....	26
6.1	Mittauksen tausta ja tarkoitus .....	26
6.2	Venymäliuskapohjainen mittaus .....	27
6.2.1	Venymäliuskojen asennus pultteihin ja holkkeihin .....	27
6.2.2	Pulttien kalibrointi vetokoneella .....	29
6.2.3	Laboratorioleukamurskaimeen asennettujen pulttien kalibrointi .....	31
6.2.4	Mittausten suorittaminen .....	32
6.2.5	Mittaustulosten analysointi .....	34
6.3	Selvitys pietsoantureilla mittaamisesta .....	37
7	POHDINTA .....	40
	LÄHTEET .....	41
	LIITTEET .....	42

Liite 1. Putkivenymäliuskan SKF-20783 tiedot.....	42
Liite 3. Vertikaalinen nostokiila.....	44
Liite 4. Kalibroinnin jännityskäyrät .....	45
Liite 5. Point Load Tester .....	46
Liite 6. Kistlerin valmistama voimarengas 9067 C.....	47
Liite 7. Pietsoanturin 9067 C esikiristyssetti .....	49

## LYHENTEET JA TERMIT

A/D-muunnin	analogia-digitaalimuunnin
$A_m$	A/D-muuntimen muunnosalue, V
$C$	kondensaattorilevyjen kapasiteetti, F
CSS	Closed Side Setting, murskaimen asetusarvo mm
DAQ	data acquisition, tiedonkeruuyksikkö
$E$	kimmokerroin, Pa
FSO	Full Scale Output, täysimittainen lähtö
HBM	Hottinger Baldwin Messtechnik, Saksalainen yritys
HSI	horizontal-shaft impactor, Vaaka-akselinen impaktori
$k_t$	resistiivisen venymäliuskan vakauserroin
$M$	momentti, Nm
$n$	A/D-muuntimen bittinumero
PCB	PicoCoulomB, Amerikkalainen yritys
$q$	resoluutio
$R$	resistiivisen venymäliuskan resistanssi, $\Omega$
RMS	root mean square, tehollisarvo
VSI	vertical-shaft impactor, Pystyakselinen impaktori
WBK16	Wavebook 16, venymäliuskamoduuli
$\Delta R$	resistanssin muutos, $\Omega$
$\varepsilon$	suhteellinen venymä, strain
$\varepsilon_x$	dielektrisyyskerroin
$\sigma$	normaalijännitys, N/m <sup>2</sup>

## 1 JOHDANTO

Mittaustekniikkaa käytetään laajalti teollisuuden eri aloilla erityisesti komponenttien ja laitteiden suunnittelussa. Mittaustekniikalla on tärkeä rooli suunnitellun laitteen tai komponentin toiminnan varmuudessa, tuotekehityksessä sekä laiteturvallisuudessa. Mittaukset auttavat myös ymmärtämään ja arvioimaan yrityksen tai toiminnan kannattavuutta ( Esala, Lehto & Tikka 2003, 6) .

Tämä opinnäytetyö käsittelee kiven murskauksessa käytetyn laboratorieleukamurskaimen murskausvoimia. Tutkimusaihe mahdollistui työskentelyni aikana Metso Minerals Oy:n tutkimuskeskuksen kivilaboratoriossa. Opinnäytetyön aihe valittiin, kun tutkimuskeskuksen kivilaboratorioon tuotiin laboratorieleukamurskain, jonka suunniteltua toimivuutta piti varmistaa mittauksilla. Opinnäytetyö rajattiin käsittelemään murskausvoimien mittausta, vaikka mittaustyö sisälsi murskaimen tehon, rungon lämpötilan, akselien momentin ja jännityksen sekä pyörimisnopeuden mittaukset.

Mittaustyössä mitattiin z-suuntaisia murskausvoimia käyttämällä venymäliuskoja. Lisäksi selvitettiin mahdollinen mittausta kolmikomponenttisilla piezoantureilla, joilla pystytään mittaamaan x-, y- ja z-suuntaisia murskausvoimia. Venymäliuskatesteistä saatuja voimia käytettiin piezoantureiden valintaperusteena. Opinnäytetyössä tehty selvitys piezoanturimittauksista käsittelee mittaustajärjestelmän, mittaustajärjestelmässä käytettävät komponentit ja anturit, antureiden esikiristyksen, kalibroinnin, asennuksen murskaimeen ja hinta-arvion tarvittavista antureista. Tutkimustuloksia tullaan käyttämään Metso Minerals Oy:n suunnittelussa ja tuotekehityksessä.

## 2 YRITYSESITTELY JA TAUSTATIETOJA

### 2.1 Metso-konserni ja Metso Minerals Oy

Metso on kansainvälinen teknologiakonserni, jonka tuotteita ja palveluita käytetään kaivos-, maarakennus-, voimantuotanto-, öljy- ja kaasu-, kierrätys-, massa- ja paperiteollisuudessa. Konserni syntyi vuonna 1999, kun paperi- ja kartonkikoneita valmistanut Valmet ja metalli- ja koneiteollisuusyhtiö Rauma yhdistyivät. Metson liiketoiminta jaetaan kolmeen pääosaan: kaivos- ja maarakennus, energia- ja ympäristöteknologia sekä paperi- ja kuituteknologia. Työntekijöitä on 50 maassa yhteensä noin 30 000. Konsernin liikevaihto vuonna 2012 oli 7,5 mrd euroa, ja osakkeet ovat listattuna NASDAQ OMX Helsinki Oy:ssä (Metson vuosikatsaus 2012.)

Tampereella toimiva Metso Minerals Oy on Metsokonsernin kaivos- ja maarakennuksen merkittävimpiä osaamiskeskuksia. Yritys valmistaa leuka-, kara- ja keskipakomurskaimia, tela-alustaisia mobiilimurskausyksiköitä sekä mobiiliseuloja, joita käytetään kaivos- ja maarakennusteollisuudessa. Henkilöstön määrä vuonna 2012 oli 1010 henkilöä. Lokomonkadun tehdasalueella on koneistushalli, kokoonpanolinja, valimo, jakelukeskus DC Europe, huoltokorjaamo, tutkimuskeskus, kivilaboratorio ja liiketoimintalinja.

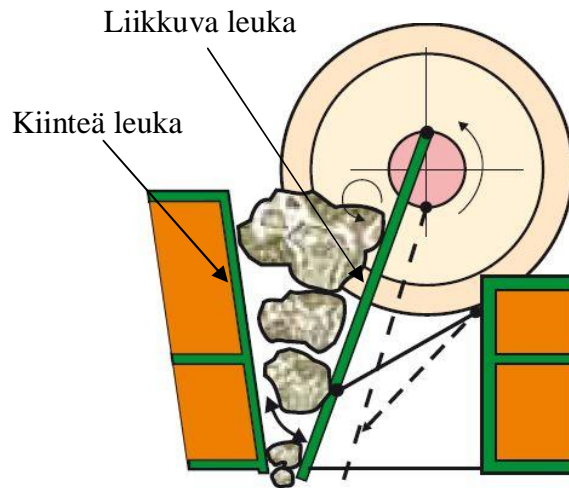
### 2.2 Murskaimet ja murskaustavat

Kaikki murskaimet voidaan jakaa murskausperiaatteen mukaan kahteen ryhmään:

- 1) Puristavat murskaimet, jotka murskaavat kivimateriaalia puristamalla sitä.
- 2) Iskevät murskaimet, jotka nopeilla iskuilla murskaavat kivimateriaalia.

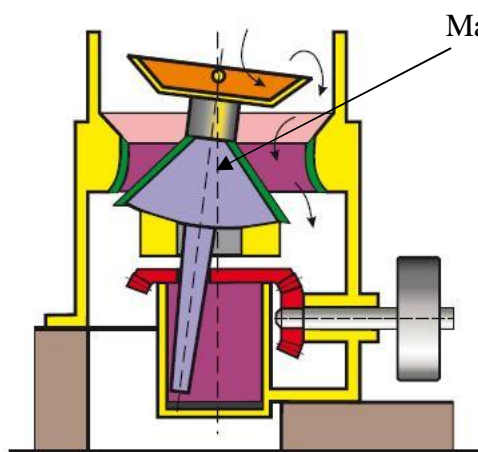
Puristaviin murskaimiin kuuluvat leuka-, kara- ja kartiomurskaimet. Impaktorit ovat iskuperiaatteella toimivia murskaimia ( Metso Minerals 2011, 21.) Leukamurskaimessa murskaus tapahtuu kiinteän ja liikkuvan leuan välissä (Kuva 1).



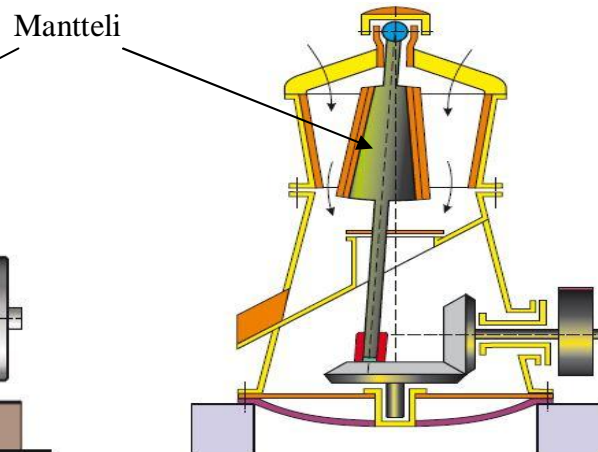


Kuva 1. leukamurskain (Metso Minerals 2011)

Leukamurskaimia käytetään ensimmäisessä murskausvaiheessa, jossa pienennetään kivimateriaalin kokoa niin, että se on sopivankokoista seuraavaa murskausvaihetta varten. Kara- ja kartiomurskaimissa (Kuva 2) ja (Kuva 3) kivimateriaalia murskataan murskauskammiossa kiinteän ulkoterän ja liikkuvan manttelin välissä. Kara- ja kartiomurskaimia käytetään toisen tai kolmannen vaiheen murskaimina. Niillä tehdään kivimateriaalista lopputuotteita tai esimurskataan kivimateriaalia seuraavaa murskausvaihetta varten. (Metso Minerals 2011, 21–24.)



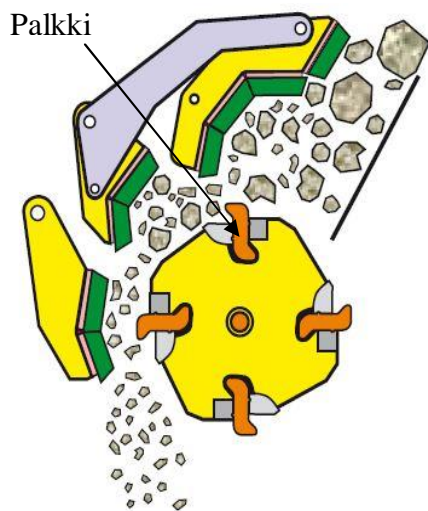
Kuva 2. karamurskain (Metso Minerals 2011)



Kuva 3. kartiomurskain (Metso Minerals 2011)

Kara- ja kartiomurskainten tuotetta murskataan hienoksi ja kuutiomuotoiseksi materiaaliksi impaktoreilla. Impaktoreita voidaan jakaa vaaka-akselisiin (HSI) ja pystyakselisiin (VSI) impaktoreihin. Vaaka-akselisessä impaktorissa kivimateriaalia murskataan kovilla iskuilla, jotka muodostuvat koneen roottorin runkoon asennettujen palkkien avulla.

Kivi murskautuu lisää murskaimen sisällä osuessaan muihin kiviin ja murskauslevyihin (Kuva 4). Pysty akselisessa impaktorissa (Kuva 5) kivimateriaalia syötetään roottorin keskiosan kautta, jonka jälkeen sitä kiihdytetään roottorissa ja vapautetaan roottorin kehässä olevien aukkojen kautta. Kivi murskautuu osuessaan toisiin kiviin. (Metso Minerals 2011, 21–25.)



Kuva 4. HSI (Metso Minerals 2011)



Kuva 5. VSI (Metso Minerals 2011)

### 2.3 Tutkimuskeskus ja kivilaboratorio

Metso Minerals Oy:n tutkimuskeskus otettiin käyttöön vuonna 2008. Tutkimuskeskuksessa asiakkaiden kivimateriaalia murskataan oikeiden murskainvalintojen varmistamiseksi. Tutkimuskeskuksessa on murskaimia, kuljettimia ja seulontalaitteita. Murskainkantaan kuuluvat C80-leukamurskain, HP200-karamurskain ja Barmac B5100SE-pysty akselinen impaktori. Kuljettimet mahdollistavat kivimateriaalin syötön murskaimiin ja murskatun materiaalin siirron seulontalaitteeseen. Seulontalaitteen seulontaverkkojen avulla pystytään erottamaan murskatun materiaalin eri fraktioita toisistaan.

Kivilaboratoriossa, joka on osa tutkimuskeskusta, suoritetaan kivilajien lujuutta, murskattavuutta ja kuluttavuutta määrittäviä kivitestejä. Tämän opinnäytetyön mittauskohteena oleva laboratorioleukamurskain on sijoitettu kivilaboratorioon.

### **3 MITTAUS JA MITTAUSJÄRJESTELMÄT**

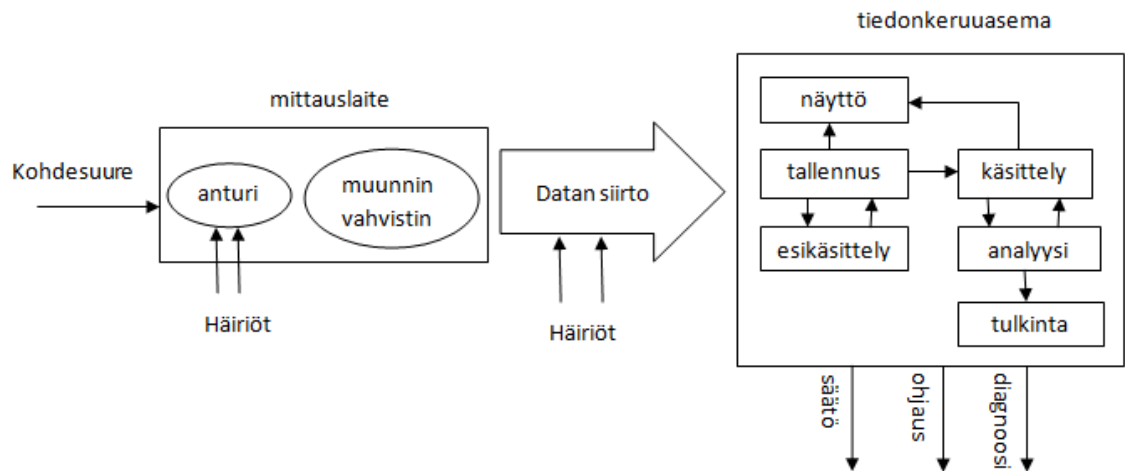
#### **3.1 Mittaus ja mittausten tarkoitus**

Standardi SFS3700:n (1998) mukaan mittaus muodostuu toiminnoista, joiden tarkoitus on määrittää suuren arvo. Tällainen on esimerkiksi voiman tai paineen arvon mittaaminen. Mittauksessa tutkitaan järjestelmään tai mittauskohteeseen vaikuttavia herätteitä (tulosuureet) ja järjestelmässä tapahtuvia muutoksia (lähtösuureet) herätteen vaikutuksesta (Halko, Härkönen, Lähteenmäki & Välimaa, 1990, 7). Esimerkki tällaisesta tapahtumaketjusta on metallipalkin pituuden laajeneminen lämpötilan noustessa.

#### **3.2 Mittausjärjestelmä ja sen rakenne**

Mittausjärjestelmällä tarkoitetaan materiaalien, organisaatioresurssien ja ohjelmien muodostamaa kokonaisuutta, jota käytetään mittausdatan hankkimiseen, siirtämiseen, prosessointiin, esittämiseen ja tallentamiseen (Waldemar Nawrocki, 2005, 1). Nykyään tietokoneita käytetään mittausprosessin datavirran kontrollointiin, jolloin mittausjärjestelmää sanotaan tietokonepohjaiseksi mittausjärjestelmäksi.

Mittauksen tehtävästä riippuen järjestelmän rakenteeseen voi kuulua erilaisia laitteita ja komponentteja. Yleiseen mittausrakenteeseen kuuluvat mittauslaite, datansiirto ja tiedonkeruu. Joissain mittausjärjestelmissä on myös etäkäsittely. Mittauslaite, joka muodostuu yleensä anturista, muuntimesta ja vahvistimesta tunnustelee mitattavaa suuretta ja muodostaa siitä signaalin. Muodostettu signaali siirretään käsittelyä, analysointia ja tallennusta varten tiedonkeruuasemaan. Signaalin käsittelyn jälkeen saatua informaatiota käytetään kohdesuureen säätöön, järjestelmän ohjaukseen tai diagnostiikkaan. Kuviossa 1 on mittausjärjestelmän yleinen rakenne. (Aumala, 2002, 16.)



Kuvio 1. Mittausjärjestelmän yleinen rakenne (Aumala 2002, muokattu)

Mittausjärjestelmää voidaan kuvata ja havainnollistaa myös käyttäen kaikkia laitteita ja instrumentteja, joita tarvitaan signaalin aikaansaamisesta lopputuloksen tallentamiseen. Nawrockin (2005, 3) mukaan mittausjärjestelmä muodostuu seuraavista toimintakomponenteista: anturi, muutin, suodatin, vahvistin, A/D-muunnin, monitori, tietokone ja teholaähde. Seuraavaksi käsitellään lyhyesti mittausjärjestelmään kuuluvia komponentteja ja laitteita.

### 3.2.1 Anturi

Mittausjärjestelmässä anturi toimii tuntoelimenä, joka reagoi saamaansa kohdesuureeseen, sen muutokseen ja muodostaa siitä informaatiota sisältävän signaalin. Esimerkiksi venymäliuskojen tuntoelimenä toimivan resistiivisen kalvon resistanssi muuttuu siihen kohdistuvan ulkoisen voiman seurauksena. Nykyään teollisuuden eri alojen käyttöön on kehitetty erilaisia antureita, jotka ovat hyvin tarkkoja ja soveltuvat käytettäväksi vaativissa olosuhteissa. Oikean anturityypin valitseminen vaatii tutustumista mittauksen vaatimukseen ja tehtävään. Teollisuuden tyypillisiä antureita ovat: lämpötila-anturit, paineanturit, virtausanturit, pituuden ja aseman anturit sekä voima-anturit.

### 3.2.2 Muutin, vahvistin ja suodatin

Anturista saadulle signaalille täytyy tehdä muutoksia ennen siirtämistä A/D-muuntimelle. Muutin, vahvistin ja suodatin sijoitetaan mittausjärjestelmässä anturin ja A/D-muuntimen väliin. Näiden komponenttien avulla anturin lähettämä signaali muunnetaan standardisignaaliksi. Standardisignaali tässä tapauksessa on virta- tai jännitesignaali, jonka arvo on yleensä 4 ... 20 mA, 0 ... 20 mA, 1 ... 5 V, 0 ... 5 V tai -10 ... 10 V.

Muuntimen (transducer) tehtävä on muuntaa anturin lähettämä signaali jännitteeksi tai virraksi. Muuntimesta saatu signaali vahvistetaan erilaisilla jännite- ja virtavahvistimilla (amplifier). Suodattimen (filter) tehtävä on muokata signaali halutunlaiseksi poistamalla häiritseviä signaaleja. Esimerkkinä suodattimista voi mainita ali- tai ylipäästösuodattimet.

Standardisignaalin muodostaminen venymäliuskan lähettämästä signaalista on hyvä esimerkki yllä kuvatuista prosesseista. Venymäliuska reagoi muodonmuutokseen lähettämällä signaalin eli resistanssin muutoksen. Venymäliuskan resistanssin muutos on hyvin pieni, joten se mitataan käyttämällä Wheatstonen siltaa. Wheatstonen sillan lähtösignaalin voi olla jännite tai virta, joka vielä vahvistetaan ennen lähettämistä A/D-muuntimelle.

Teollisuuden käytössä on myös moduuleja, jotka sisältävät kaikki komponentit, joita tarvitaan standardisignaalin aikaansaamiseksi anturin lähettämästä signaalista. Eri käyttöihin ja sovelluksiin on suunniteltu erilaisia moduuleja. On olemassa moduuleja lämpöparien, venymäliuskojen ja pietsantureiden signaalien käsittelyyn. Esimerkiksi Iotechin valmistamaan 8-kanavaiseen WBK16- moduuliin (Kuva 6) voidaan liittää 8 venymäliuskaa. Tämä moduuli sisältää jännitelähteen, siltatäydennyksen ja lisäksi jokaiselle kanavalle vahvistimen ja alipäästösuodattimen. (Nawrocki, 2005, 64.)



Kuva 6. Iotechin 8-kanavainen venymäliuskamoduuli (kuva: MC measurement computing 2013)

### 3.2.3 A/D-muunnin

Signaalin käsittely, analysointi ja tallentaminen tietokoneella vaatii, että tietokoneelle tuleva signaali on digitaalimuodossa. Analogia-digitaalimuunnin eli A/D-muunnin sijoittuu mittausjärjestelmässä ennen tietokonetta. Sen tehtävänä on muuntaa analoginen signaali digitaalseksi signaaliksi. Tämä analoginen signaali on yleensä jännite, joka muunnetaan binääriluvuksi. Digitaalinen kokonaisluku, joka saadaan A/D-muuntimesta on skaalattu versio analogiasignaalista bittilukuna. A/D-muuntimen tärkein parametri on resoluutio eli erottelukyky, joka ilmaisee muuntimen kykyä erotella toisistaan analogiasignaalin tasoja. Resoluutio voidaan laskea kaavasta (1) (Aumala, Ihalainen, Jokinen & Kortelainen 1998, 38).

$$q = \frac{A_m}{2^n} \quad \text{Kaava (1)}$$

$q$  = resoluutio

$A_m$  = A/D-muuntimen muunnosalue

$n$  = A/D-muuntimen bittinumero

Kaavan perusteella suurempi bittinumero merkitsee tarkemman resoluution saavuttamista. Esimerkiksi jos A/D-muuntimen tulosignaali on 0 ... 5 V ja bittinumero 12, resoluutio on 1,2 mV.

### 3.2.4 Tietokone ja tietojen käsittely

Mittaamalla saatujen tietojen analysointi on tärkeimpiä mittauksen vaiheita erityisesti, kun kyseessä on muutostilassa oleva suure. Tällöin anturi lähettää jatkuvasti tietosignaalia kohteesta. Näiden signaalien väliset riippuvuudet ja niiden tutkiminen antavat kallisarvoista tietoa kohteesta. Mittausjärjestelmät hyödyntävät tietokoneita ja ohjelmia keräämään, analysoimaan, käsittelemään, tallentamaan ja siirtämään mittaussignaalia. Nykyaikaiset tietojenkeruulaitteet sisältävät kannettavan tietokoneen, ohjelmat ja A/D-muuntimen sisältävän tietojenkeruuyksikön eli DAQ:in (Aumala, 2002, 123.) Kuvassa 7 on Iotechin valmistama tietojenkeruuyksikkö WaveBook/516E.

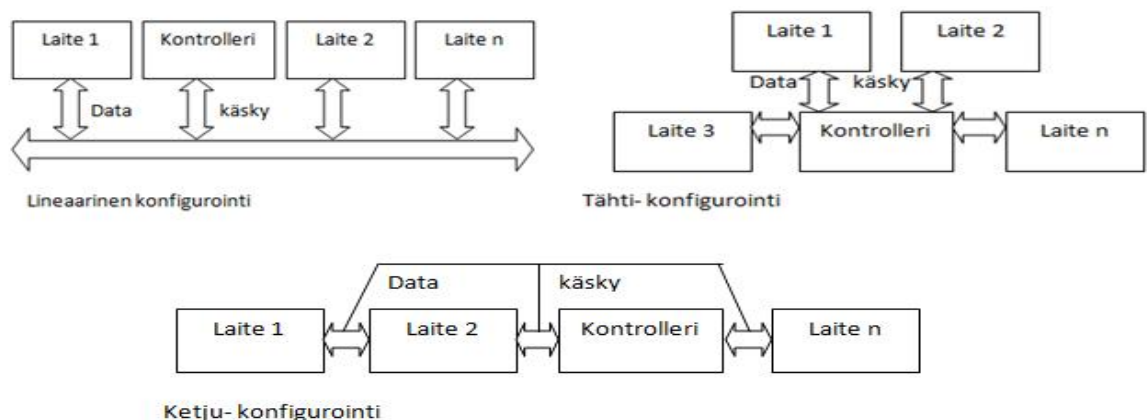


Kuva 7. IOtechin valmistama tietojenkeruuyksikkö WaveBook/516E(kuva:MC measurement computing 2013)

Eri valmistajat tarjoavat erilaisia ohjelmia esimerkiksi National Instruments tarjoaa DASyLab, LabVIEW- ja LabWindows-ohjelmat. Agilent Technologies ja Keithley vastaavasti tarjoavat VEE- ja TestPoint-ohjelmat.

### 3.2.5 Tietojen siirto ja väylät

Suunniteltaessa mittausjärjestelmiä on otettava huomioon informaation siirto ja virtaus järjestelmän eri osien välillä. Mittausjärjestelmässä olevien laitteiden liitännäskonfiguroinnin mukaan järjestelmät voidaan jakaa lineaarisiin sekä tähti- ja ketjutyyppisiin. Lineaarinen tyyppi on yleisin käytetty konfigurointityyppi. Se on hyvin elastinen järjestelmätyyppi, koska laitteiden liittäminen järjestelmään tai niiden irrottaminen järjestelmästä on nopeaa ja helppoa. Tähtityyppi sisältää enemmän laitteita kuin lineaarinen tyyppi, ja tämän takia se on rakenteeltaan monimutkaisempi. Ketjutyyppi on järjestelmätyypeistä vähiten elastinen. (Nawrocki, 2005, 1–3.) Kuviossa 2 on mittausjärjestelmän eri konfigurointityypit.



Kuvio 2. Mittausjärjestelmän eri konfigurointityypit (Nawrocki 2005, muokattu)

Mittausjärjestelmät voidaan jakaa myös informaation siirtotavan mukaan sarja- ja rinnakkaisjärjestelmiin. Aumalan, Ihalaisen, Jokisen ja Kortelaisen (1998, 12) mukaan sarjamuodossa digitaalisignaali siirretään bitit peräkkäin parikaapelia tai koaksiaalikaapelia käyttäen. Rinnakkaismuodossa signaalin kaikki bitit siirretään yhtäaikaaisesti monijohdinkaapelia käyttäen. Esimerkkeinä rinnakkaisväylistä ovat IEEE 488 ja VXI-väylä. RS-232, Profibus, Can ja MicroLan ovat tunnettuja sarjaväyliä. Mittausjärjestelmissä ja eri hierarkiatasoilla tiedonsiirtotarpeiden mukaan voidaan käyttää erilaisia väyliä.



## 4 VOIMAN MITTAUS

Tämän päivän tuotannon ja valmistamisen peruskäsitteisiin kuuluu kannattavuus ja taloudellinen käyttökelpoisuus. On suunniteltava taloudellisesta näkökulmasta tuottavia laitteita ja komponentteja. Tämän takia on tärkeitä suunnitella tuotteita, jotka ovat rakenteeltaan sekä kevyitä että rasitusta ja kuormitusta kestäviä. Mittaamalla rakenteen eri osiin kohdistuvia jännityksiä ja voimia voidaan varmistaa sen toimivuus ja luotettavuus.

Voiman mittausta voidaan hyödyntää tuotteen kehittämissä vaiheissa, tuotannossa, eri tuotantosysteemien kontrolloinnissa ja turvallisuuden tarkistamisessa. Kehittämissä vaiheissa käyttökohteita ovat materiaalien testaukseen tarkoitettut laitteet, komponenttien testaus auto- ja ilmailuteollisuudessa ja momenttien mittaus moottoreissa ja pumpuissa. Tuotantovaiheissa käyttökohteita ovat esimerkiksi voiman mittaus kaapeleiden ja putkien asentamisessa, valssaimen voimat metalliteollisuudessa, puristusvoimat metallilevyjen tuotannossa ja leikkausvoimat koneistuksessa. Kontrollin ja turvallisuuden käyttökohteita ovat kiinnitysköysien ja -ketjujen jännitysmittaus laivateollisuudessa ja nostureiden rakenteen jännitysmittaus.

Voiman mittauksessa voidaan käyttää venymäliuskapohjaisia antureita, pietsantureita, hydraulisia, pneumaattisia ja kapasitiivisia antureita. Seuraavaksi käydään läpi jännitys ja venymä sekä voiman ja jännityksen mittaukseen käytetyimpiä menetelmiä.

### 4.1 Jännitys ja venymä

Kappaleeseen vaikuttavat voimat aiheuttavat muodonmuutoksia kappaleessa. Jännityksen mittaamiseen tarkoitettujen järjestelmien käyttävät juuri tätä muodonmuutosta hyväkseen. Muodonmuutokset kuten kutistuminen tai venyminen muunnetaan sähköiseksi signaaliksi käyttäen venymäliuskoja (Nawrocki, 2005, 41.) Normaalijännitys  $\sigma$  syntyy, kun voima  $F$ , kohdistuu kohtisuoraan kappaleen poikkipinta-alaan  $A$ . Kaavassa 2 on normaalijännityksen määrittäminen (Jarmo Saarineva, 2007, 2.1).

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Kaava (2)}$$

$\sigma$  = normaalijännitys (N/m<sup>2</sup>) tai Pa

$F$  = kohtisuorainen voima (N)

$A$  = kappaleen poikkipinta-ala (m<sup>2</sup>)

Veto- tai puristusvoiman vaikutuksesta kappale kokee muodonmuutoksen venymän tai kutistumisen muodossa. Suhteellinen venymä  $\varepsilon$ , ilmaisee pituuden muutoksen ja alkuperäisen pituuden suhteen. Suhteellinen venymä on arvoltaan hyvin pieni eikä sillä ole yksikköä, mutta sitä voidaan ilmaista käyttäen jälkiliitettä mikrostrain ( $\mu\varepsilon$ ). Suhteellinen venymä voidaan laskea kaavasta 3 (Saarineva 2007, 2.1).

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad \text{Kaava (3)}$$

$\varepsilon$  = suhteellinen venymä

$\Delta L$  = pituuden muutos (m)

$L$  = alkuperäinen pituus (m)

Samansuuruinen jännitys aikaansaa erilaisia venymiä eri materiaaleissa. Mitattaessa kappaleeseen kohdistuvia voimia ja jännityksiä voidaan käyttää Hooken lakia, kun tiedetään voiman aikaansaama venymä ja kappaleen materiaali. Hooken lain mukaan elastisella alueella suhteellinen venymä on suoraan verrannollinen jännitykseen ja kääntäen verrannollinen kimmokerroimeen. Kimmokerroin  $E$ , on materiaalikohtainen kerroin. Kaavassa 4 on Hooken lain määrittäminen (Saarineva 2007, 2.1.1).

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{Kaava (4)}$$

$\varepsilon$  = suhteellinen venymä

$\sigma$  = jännitys (Pa)

$E$  = kimmokerroin (Pa)

## 4.2 Resistiiviset venymäanturit

Resistiivinen venymäanturi on lankavastus, jota käytetään mekaanisten jännitysten mittaamiseen (Nawrocki, 2005, 42). Yleinen venymäanturi muodostuu tuntoelimenä toimivasta metallisesta, puolijohde- tai laminaattikalvosta ja muovisesta pohjakalvosta (Kyowa 2013, 7). Venymäanturi asennetaan kappaleen pinnalle, jonka venymistä mitataan. Voiman ja jännityksen alaisena kappale ja sen päälle asennettu venymäanturi muuttavat muotoaan. Muodonmuutoksen seurauksena venymäanturin tuntoelimenä toimivan kalvon resistanssi muuttuu. Resistanssin muutos on suoraan verrannollinen jännityksen suuruuteen. Kaavassa 5 on ilmaistu resistanssin muutokseen vaikuttavat tekijät (Nawrocki 2005, 43).

$$\Delta R = k_t \times R \times \frac{\sigma}{E} \quad \text{Kaava (5)}$$

$\Delta R$  = resistanssin muutos ( $\Omega$ )

$K_t$  = tuntokalvon vakauserroin

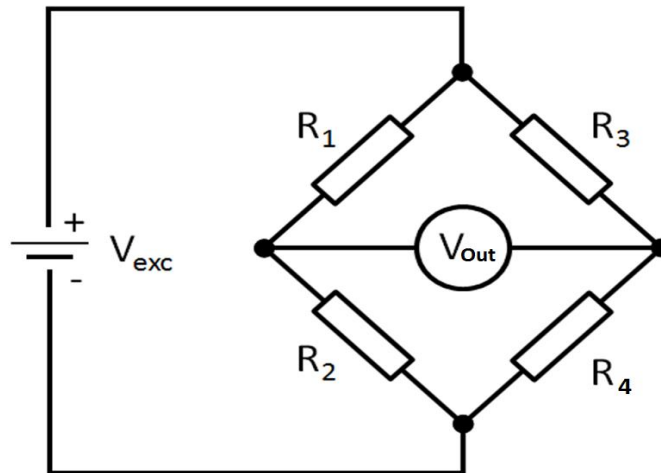
$R$  = tuntokalvon resistanssi ( $\Omega$ )

$\sigma$  = jännitys (Pa)

$E$  = kappaleen kimmokerroin (Pa)

Kaavassa olevan vakauserroimen  $K_t$  arvo riippuu tuntokalvon materiaalista. Metalliset tuntokalvot ovat kupari-nikkeli-seoksia ja niiden vakauserroin on 2. Venymäantureiden tuntokalvon materiaalina käytetään myös puolijohdeita, joiden vakauserroimet ovat 20 ja 100 välillä. Puolijohdemateriaalien etu on niiden suuri resistanssin muutos jännityksen alaisena. Puolijohdemateriaalien heikkous on niiden suuri lämpötilakerroin  $\alpha_T$ . Tämä tarkoittaa, että venymäanturin puolijohdetuntokalvo laajenee lämpötilan muutoksesta nopeasti ja herkästi, mikä nostaa mittausvirheitä huomattavasti. Nawrockin mukaan maksimikäyttölämpötila puolijohdevenymäliuskoille on 100 °C, joka on paljon pienempi kuin metallisten venymäliuskojen maksimikäyttölämpötila 500 °C. Tuntokalvojen resistanssi voi vaihdella 100  $\Omega$  ja 5 k $\Omega$  välillä. Yleisimmät resistanssiarvot ovat kuitenkin 120  $\Omega$  ja 350  $\Omega$ . Venymäliuskan käyttötarkoituksen mukaan valmistetaan erimuotoisia tuntokalvovaihtoehtoja, kuten ruudukko-, rosetti- tai kierremuotoisia tuntokalvoja.

Venymäliuskan resistanssin muutokset ovat luokkaa  $10^{-4} - 10^{-2} \Omega / \Omega$ . Näitä arvoja ei pystytä mittaamaan tavanomaisilla mittauslaitteilla. Venymäantureiden resistanssin muutoksen mittaamiseen käytetään Wheatstonen siltaa. Wheatstonen silta muodostuu neljästä vastuksesta, jotka ovat sijoitettu kuvion 3 mukaisesti siltaan.



Kuvio 3. Wheatstonen sillan rakenne

Sillan tulojännite ( $V_{exc}$ ) on yleensä tasa- tai vaihtojännite. Joskus voidaan käyttää myös virtalähdettä. Karl Hoffmannin mukaan sillan vastukset on valittava niin, että kaikki vastukset ovat samansuuruisia tai  $\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$ . Tällöin sillan lähtöjännite  $V_{out} = 0$  eli silta on tasapainotilassa. Kun jokin sillan vastuksista kokee resistanssin muutoksen, silta menettää tasapainotilansa ja saa lähtöjännitteen, jonka arvo on suoraan verrannollinen resistanssin muutokseen (Hoffmann, 1989, 146–148.)

Wheatstonen sillan vastus tai vastuksia voidaan korvata venymäliuskoilla, ja näin venymäliuskan resistanssin muutokset jännityksen vaikutuksesta aikaansaavat sillan lähtöjännitteen. On olemassa kolme erilaista siltakonfiguraatiota: neljännessiltaus, puolisiltaus ja täyssiltaus. Neljännessiltauksessa vain yksi sillan vastuksista korvataan venymäliuskalla. Puoli- ja täyssiltauksissa korvataan vastaavasti 2 ja 4 sillan vastusta venymäliuskoilla. Siltausvaihtoehto on valittava mittaustarkoituksen mukaan. Yleisin käytetty siltauskonfigurointi on neljännessiltaus.

### 4.3 Kapasitiiviset anturit

Kapasitiivisia antureita käytetään paineen ja jännityksen mittaukseen. Niitä käytetään erityisesti sovelluksissa, joissa lämpötila on korkea. Kapasitiivisten antureiden antamat tulokset ovat luotettavia jopa 800 °C lämpötilassa. Kun voima kohdistuu anturin kondensaattorilevyihin, niiden välinen etäisyys ja kapasiteetti muuttuvat. Kapasiteetin suuruus määräytyy kaavan 6 mukaan (Nawrocki 2005, 47).

$$C = \frac{\varepsilon_x \times S}{x} = \frac{k}{\sigma(P)} \quad \text{Kaava (6)}$$

$\varepsilon_x$  = dielektrisyyskerroin

$S$  = kondensaattorilevyjen pinta-ala

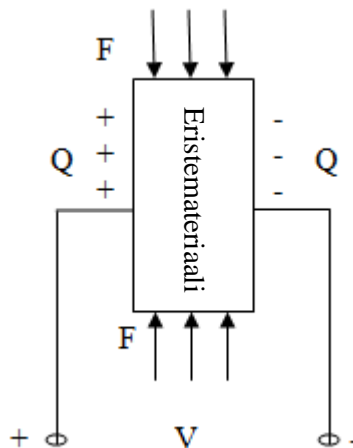
$x$  = levyjen välinen etäisyys

$\sigma$  = jännitys,  $P$  = paine

$k$  = kapasitiivisen anturin kerroin (Nawrocki, 2005, 47–48.)

### 4.4 Pietsosähköiset anturit

Pietsosähköisessä anturissa voiman vaikutuksesta metallilevyjen välissä oleva eristemateriaalin kiderakenne kokee muodonmuutoksen. Muodonmuutoksen seurauksena syntyy sähköinen varaus ja jännite. Syntyneen jännitteen suuruus on suoraan verrannollinen voiman suuruuteen. Kuviossa 4 on pietsosähköisen anturin rakenne.



Kuvio 4. Pietsosähköisen anturin rakenne (Nawrocki 2005, muokattu)

Pietsosähköisen anturin kanssa on käytettävä vahvistinta, jonka sisäinen vastus on todella suuri. Pietsosähköinen anturi on tarkoitettu mittaamaan vain dynaamisia jännityksiä ja paineita (Nawrocki, 2005, 48.)

#### 4.5 Venymä- ja pietsoantureiden vertailu

Voiman mittaukseen käytettäviä pietsosähkö- ja venymäantureita on valtava määrä. Taulukossa 1 on vertailtu pietso- ja venymäantureiden ominaisuuksia.

**Taulukko 1. Venymä- ja pietsoantureiden vertailu**

<b>Venymäanturi</b>	<b>Pietsoanturi</b>
Staattiset ja dynaamiset voimat	Dynaamiset voimat
Pitkät mittausjaksot	Lyhyet mittausjaksot, kun voima pieni
Hyvä lineaarisuus	Heikompi lineaarisuus
Hyvät kalibrointimahdollisuudet	Mittaukset suurella resoluutiolla myös vaikeissa olosuhteissa.
Käyttö mahdollista epäsuotuisissa olosuhteissa hyvin suojatun rakenteen takia	Korkea käyttöturvallisuus, kaapelin erinomainen tiivisrakenne mahdollistaa tiivin liitoksen anturin kanssa
Todella tarkka	Tarkkuus vaatii voima-alueen kalibrointia
Kooltaan pieni, mutta venymäliuskoista rakennettu voima-anturi on isokokoinen	Hyvin kompakti, vain 4 mm korkea

## 5 MITTAUSSYSTEEMIN VALINTA JA SUUNNITTELU

### 5.1 Voimanmittaussysteemin valinta

Voimanmittauksen sovelluskohteita on rajaton määrä teollisuuden eri aloilla. Sopivan mittaussysteemin valinta on mahdollista vasta silloin, kun sovelluksen yksityiskohtat ovat tiedossa. Näitä yksityiskohtia ovat mitattavan voiman suuruusluokka, kuormituspisteiden lukumäärä, voiman suunta, voiman vaikutuksen kesto ja ympäristöolosuhteet. Anturi on valittava niin, että se kestää siihen kohdistuvat voimat. Ylikuormitus vähintään vaarantaa kalibroinnin ja pahimmassa tapauksessa voi tuhota anturin. Antureiden lukumäärään vaikuttavat käytössä oleva tila, voiman kuormituspisteiden lukumäärä, vaadittu tarkkuus ja hintarajoitukset. Yksi- tai kaksisuuntaisten anturien valinta riippuu siitä, onko kyseessä puristusvoima, vetovoima vai molempia. Mittaus voi olla staattinen tai dynaaminen vaihtelunopeuden eli taajuuden mukaan. Mittaussysteemin on pystyttävä seuraamaan voiman vaihtelua eli anturilla on oltava suurempi ominaisvärähtelytaajuus kuin mittaussovelluksen maksimitaajuus. Moniakseliset anturit mahdollistavat voiman eri komponenttien mittauksen. Jotkut anturit pystyvät mittaamaan samaan aikaan  $x$ -,  $y$ - ja  $z$ -suuntaiset voimat ja momentit. (The Institute of Measurement and Control: Guide to the Measurement of Force 2013.)

Ylhäällä mainittujen mittaussysteemin valintaan vaikuttavien tekijöiden lisäksi on otettava huomioon tiedon siirto anturista tiedonkeruuyksikköön, mittausepäätarkkuus, antureiden asentaminen kohteeseen, esikiristys ja kalibrointimenetelmä.

### 5.2 Voimanmittaussysteemin suunnittelu

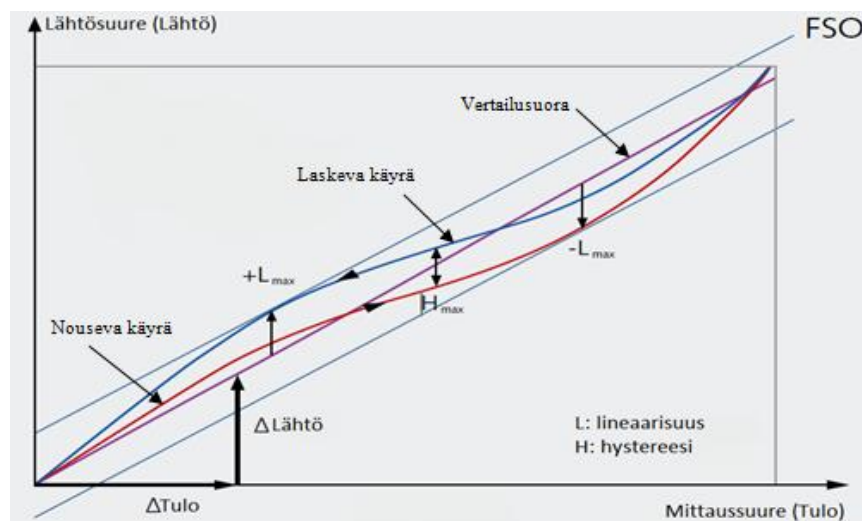
Onnistunut voimanmittaussysteemin suunnittelu vaatii turvallisuustekijöiden ja ympäristöolosuhteiden tuntemusta sekä anturin esikiristuksen ja asentamisen taitoja. Turvallisuuden näkökulmasta vaaratekijöitä ovat sähköiset, mekaaniset, hydrauliset ja kemikaaliset tekijät sekä lämpötilatekijät. Ympäristö, jossa mittaussysteemi sijaitsee asettaa omat vaatimuksensa suunnittelutyöhön. Lämpötila, värähtely, kosteus, korroosio

ja paineen vaihtelu ovat esimerkkejä ympäristöparametreista. Onnistunut suunnittelu huomioi tilan, jota tarvitaan komponenttien asentamiseen, kalibrointiin ja huoltoon. Antureiden ja asennusosien sijainti mittaussysteemissä on mietittävä tarkkaan, jotta välttyttäisiin sivuvoimilta ja vääntömomentilta. Suunnittelun on myös varmistettava, ettei muu rakenteen osa vaimentaisi tai ottaisi vastaan voimaa, jota anturin kuuluu ottaa vastaan ja mitata. (The Institute of Measurement and Control: Guide to the Measurement of Force 2013.)

### 5.3 Kalibrointi

Kalibrointi on prosessi, jossa hyvin määritetyissä olosuhteissa vertaillaan mittausinstrumentin lähtösignaalia sitä vastaavaan tunnettuun tulosignaaliin. Anturit ja mittausinstrumentit täytyy kalibroida säännöllisesti, koska niiden ominaisuudet muuttuvat käytön, ympäristön ja vanhenemisen takia. Kalibroinnilla varmistetaan, että mittaukset ovat tarkkoja, luotettavia ja kansainvälisesti verrattavissa keskenään. (Kistler 2012, 31.)

Jokaisen anturin kanssa toimitetaan toimintaspesifikaatio, josta saadaan tietoja esimerkiksi anturin toiminta-alueesta, herkkyudesta, lineaarisuudesta ja hystereesistä. Nämä toiminta-arvot annetaan yleensä tuotesarjalle. Tästä syystä tietyn tuotteen toiminta-arvot on varmistettava kalibroinnilla. Kuviossa 5 on anturin ominaiskäyrä.



Kuvio 5. anturin ominaiskäyrä (Kistler 2012, muokattu)

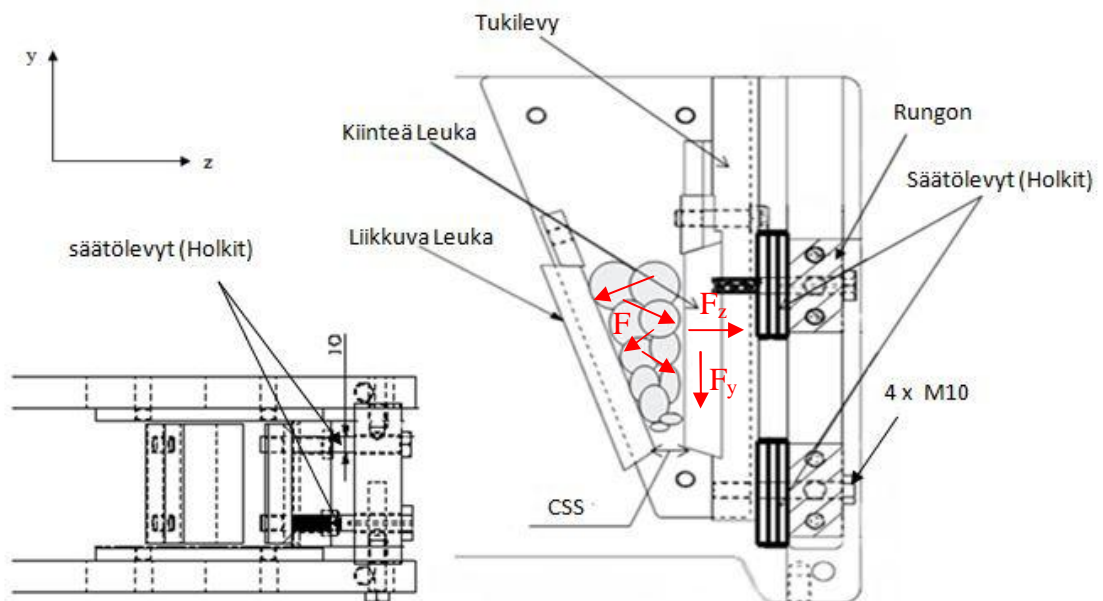


Kuviossa 5, FSO (Full Scale Output) on lähtösignaalien erotus, kun mittasuureiden arvo on 0 ja maksimi. Hystereesi kuvaa nousevan ja laskevan käyrän lähtöarvojen maksimierotusta samassa tuloarvossa. Herkkyys on käyrän kulmakerroin, joka saadaan jakamalla lähtöarvojen muutos vastaavalla tulojen muutoksella. Käytännössä ei ole olemassa täysin lineaarista suhdetta tulojen ja lähtöjen välillä.  $L_{max}$  kuvaa todellisen ja ideaalisen eli vertailusuoran maksimipoikkeamaa.

## 6 MITTAUKSEN TAUSTA JA SUORITUS

### 6.1 Mittauksen tausta ja tarkoitus

Mittauksen tarkoitus oli mitata Metso Minerals Oy:ssä suunnitellun laboratorioleukamurskaimen kiinteään leukaan kohdistuvat  $y$ - ja  $z$ -suuntaiset voimat. Mittaukset suoritettiin koelaitoksen kivilaboratoriossa, johon murskain on sijoitettu. Koneen koko on 1028 mm x 426 mm x 866 mm. Koneen moottorin teho on 5,5 kW ja pyörimisnopeus 1500 rpm. Epäkeskoakselin pyörimisnopeus on välillä 265 – 575 rpm. Pyörimisnopeudet ovat säädettävissä taajuusmuuttajan avulla. Kiven murskaaminen laboratorioleukamurskaimessa tapahtuu samalla periaatteella kuin muissakin leukamurskaimissa. Kiven murskautumista tapahtuu useassa kohdassa murskauskammiota. Ensin suurimmat kivet murskautuvat kammion yläosassa ja putoavat alaspäin kiilan muotoisessa kammiossa. Sama ilmiö toistuu kunnes murskatut kivet ovat riittävän pieniä mahtumaan läpi kammion alapäässä olevasta aukosta (CSS). Kiinteä leuka on pultattu tukilevyyn ja rungon etuosaan, ja liikkuva leuka on kiinni epäkeskoakselissa sekä nivelöidyssä tukipisteessä. Liikkuvaa leukaa liikuttaa epäkeskoakseli. Kivimateriaali liikkuu murskauskammiossa alaspäin epäkeskoakselin aikaansaaman liikkeen ja maan vetovoiman avulla. Kuviossa 6 on esitetty voimavektorit punaisina nuolina sekä leukamurskaimen leuat, rungon etuosa ja säätölevyt.



Kuvio 6. leukamurskaimen kammio leukoineen ja rungon etuosa

Kuviossa 6 olevia Säätolevyjä poistamalla tai lisäämällä pystytään muuttamaan CSS-arvoa. CSS-arvo eli Close Side Setting tarkoittaa kiinteän ja liikkuvan leuan välistä lyhintä etäisyyttä liikkeen aikana. CSS-arvoa säätämällä saadaan halutun kokoisia tuotteita syötetyistä kivimateriaaleista. Mittauksissa säätölevyt pultin ja rungon etuosan välillä on korvattu metalliholkeilla.

Mittaustyössä käsitellään venymäliuskoihin perustuva mittaus. Metso Mineralsilla käytetyimpiä antureita mittauksissa ovat olleet venymäliuskat, joista mittaustiimillä on runsaasti kokemusta. Lisäksi mahdollisena moniakselisten voimien mittaustapana on tutkittu pietsoantureiden käyttöön perustuvaa mittausta.

## **6.2 Venymäliuskapohjainen mittaus**

Yleisten mittausjärjestelmien tavoin, mittausjärjestelmän rakenteeseen kuuluvat tuntoelimenä toimiva venymäliuska-anturi, mittamoduuli ja tietokone. Venymäliuskoina ovat Kyowan valmistamat SKF-putkiliuskat ja yleiskäyttöön tarkoitettut KFG-liuskat. Liuskojen tiedot löytyvät liitteistä 1 ja 2. Venymäliuskoista saatu signaali vahvistetaan, suodatetaan ja muunnetaan digitaalisignaaliksi IOtechin 8-kanavaisella WBK 16 venymäliuskamoduulilla. Venymäliuskamoduuli liitetään tietokoneeseen Ethernet-kaapelilla. Tietojen käsittelyä varten käytetään DASyLab- ohjelmaa.

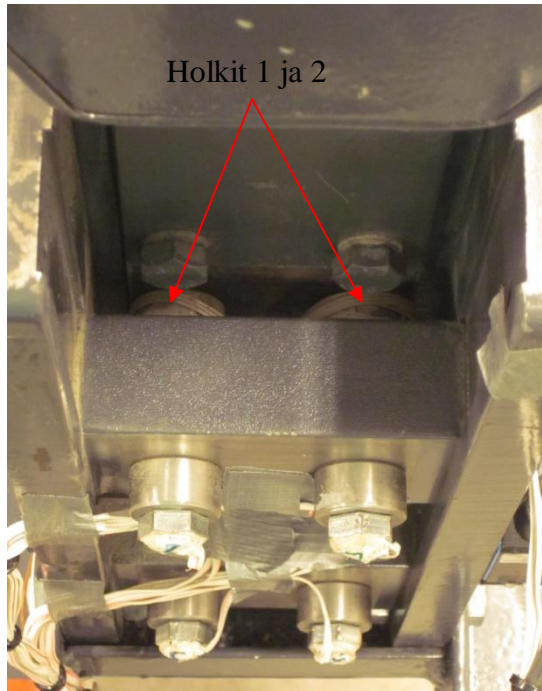
Työ voidaan jakaa seuraaviin osiin:

- venymäliuskojen asennus pultteihin ja holkkeihin
- pulttien kalibrointi vetokoneella
- pulttien ja holkkien asennus laboratorioleukamurskaimeen ja kalibrointi
- mittausten suorittaminen
- tulosten analysointi

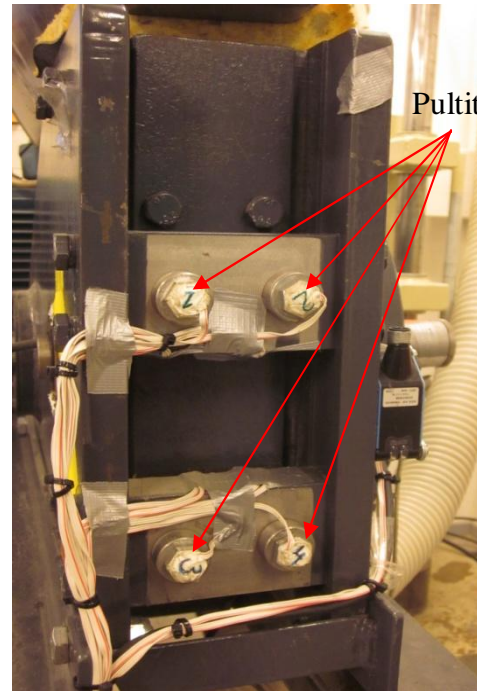
### **6.2.1 Venymäliuskojen asennus pultteihin ja holkkeihin**

Kuten kuviossa 6 voi todeta, kiinteä leuka on kahdella pultilla kiinnitetty tukilevyyn ja tukilevy neljällä pultilla rungon etuosaan. Koska voima on mitattava kiinteän leuan

puolelta, venymäliuskat sijoitetaan rungon etuosassa olevaan neljään pulttiin. Lisäksi rungon etuosan ja tukilevyn väliin sijoitetaan säätölevyjä korvaavat holkit. Jokaisen holkin läpi menee yksi pultti. Näin ollen holkkeja on 4 kappaletta. Koneen rungon etuosasta ylhäältä otetusta kuvasta 8 näkyy pultit ja holkit asennettuna koneeseen. Kuvasta näkyy vain holkit 1 ja 2. Kuva 9 on otettu edestä ja siinä ovat pultit ja pultteihin asennetut anturit.



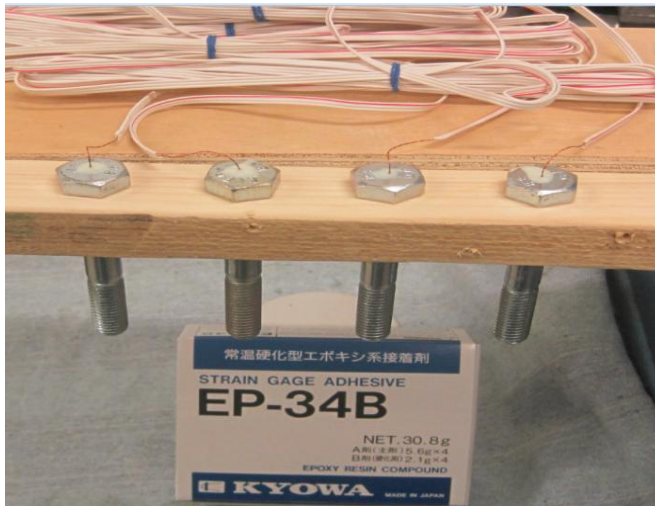
Kuva 8. pultit ja holkit asennettuna koneeseen



Kuva 9. pultit ja pultteihin asennetut anturit

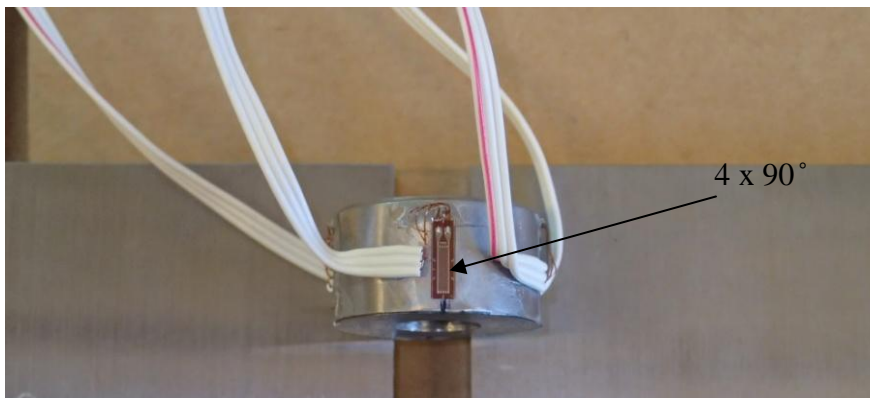
(Kuvat: Badei Makhmour 2013)

Holkien sisähalkaisija on 10,6 mm ja ulkohalkaisija 25 mm. Murskauksen aikana pultteihin ja holkkeihin kohdistuu puristava voima, joka välittyy venymäliuskoihin ja aiheuttaa resistanssin muutoksen liuskoissa. SKF-putkiliuskojen asennusta varten M 10-pultteihin porataan 2 mm:n reikä 27 mm:n syvyyteen kannan puolelta. Poratut reiät puhdistetaan asetonilla ja täytetään Kyowan valmistamalla EP-34B-liimalla. Lopussa putkiliuska upotetaan reikään. Kuvassa 10 on SKF-venymäliuskat asennettuna pultteihin.



Kuva 10. asennusliima ja pultteihin asennetut SKF-venymäliuskat (Kuva: Badei Makhmour 2013)

KFG-liuskat asennetaan holkkien 1 - 4 ulkopintaan. Holkkeihin 1 ja 3 asennetaan kaksi venymäliuskaa 180 asteen ja holkkeihin 2 ja 4 neljä venymäliuskaa 90 asteen kulmaerolla. Kuvassa 11 on holkki, johon on asennettu 4 KFG-venymäliuskaa.

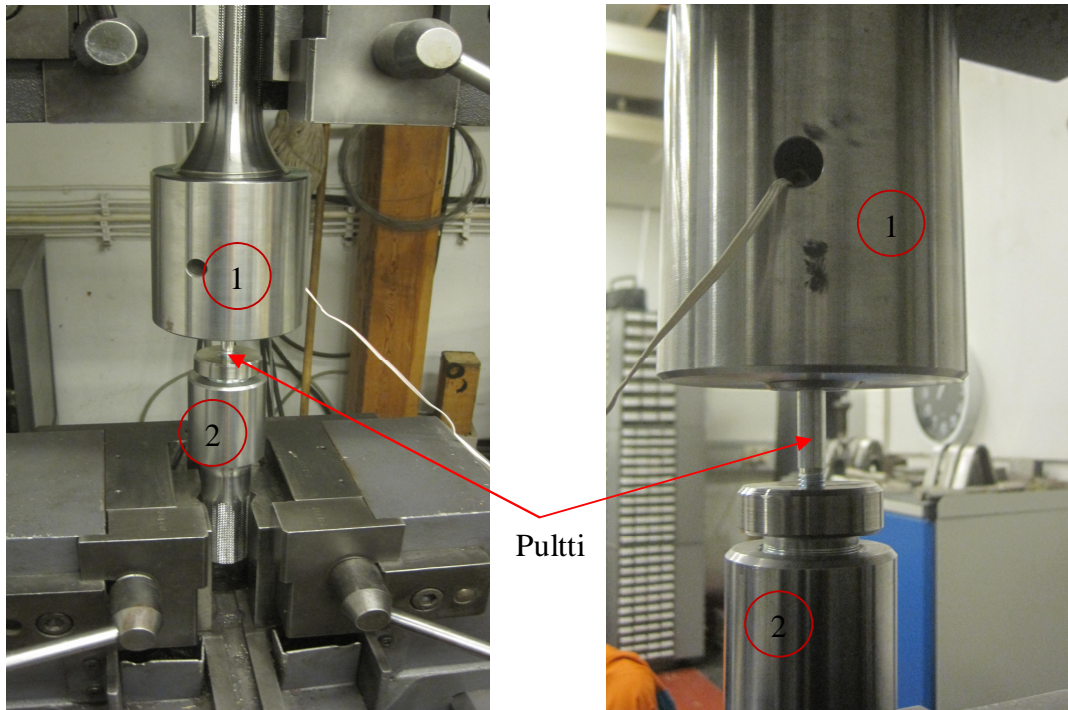


Kuva 11. holkkiin asennettu 4 kpl KFG-yleisvenymäliuskaa (Kuva: Esko Rantanen 2013)

### 6.2.2 Pulttien kalibrointi vetokoneella

Kalibroinnin tarkoitus on varmistaa, että liimatut venymäliuskat pysyvät pulteissa kuormituksen aikana ja tunnetun voiman vaikutuksesta aiheutuvat jännitykset täsmäivät laskettujen jännitysarvojen kanssa. Kalibroinnissa jokainen pultti vedetään vetokoneella kolmella tunnetulla voimalla 1 kN, 5 kN ja 10 kN. Vetokokeet suoritetaan Metso Mineralsin terästehtaan laboratoriossa. Kutakin voimaa vastaan saatu jännitysarvo mittauksesta tallennetaan tietokoneeseen. Lopussa mitatut arvot vertaillaan laskettuihin arvoihin. Pulttien asennusta varten vetokoneeseen käytetään välikappaleita 1 ja 2.

Toiseen välikappaleeseen kiinnitetään pultin kierreosuus ja toiseen kannan osuus. Välikappaleet kiinnittyvät vetokoneen leukoihin. Kuvassa 12 pultti on kiinni välikappaleiden ja vetokoneen leukojen välissä.



Kuva 12. pultti sijoitettuna välikappaleiden ja vetokoneen leukojen väliin (Kuva: Badei Makhmour 2013)

Vetovoimat ja pultin poikkipinta-ala, johon voima kohdistuu on tiedossa. Jännitykset voidaan laskea kaavasta 2. Kun pultin poikkipinta-ala on  $75,4 \text{ mm}^2$  ja vetovoima  $10 \text{ kN}$ :

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \text{Kaava (2)}$$

$$\sigma = \frac{10\,000 \text{ N}}{75,4 \text{ mm}^2} = 132,6 \text{ MPa}$$

Taulukossa 2 ovat pultin poikkipinta-ala  $A$ , vetovoimat  $F$ , lasketut jännitykset  $\sigma_L$ , mitatut jännitykset vedosta  $\sigma_M$  ja mitattujen jännitysten keskiarvo  $\sigma_K$ .

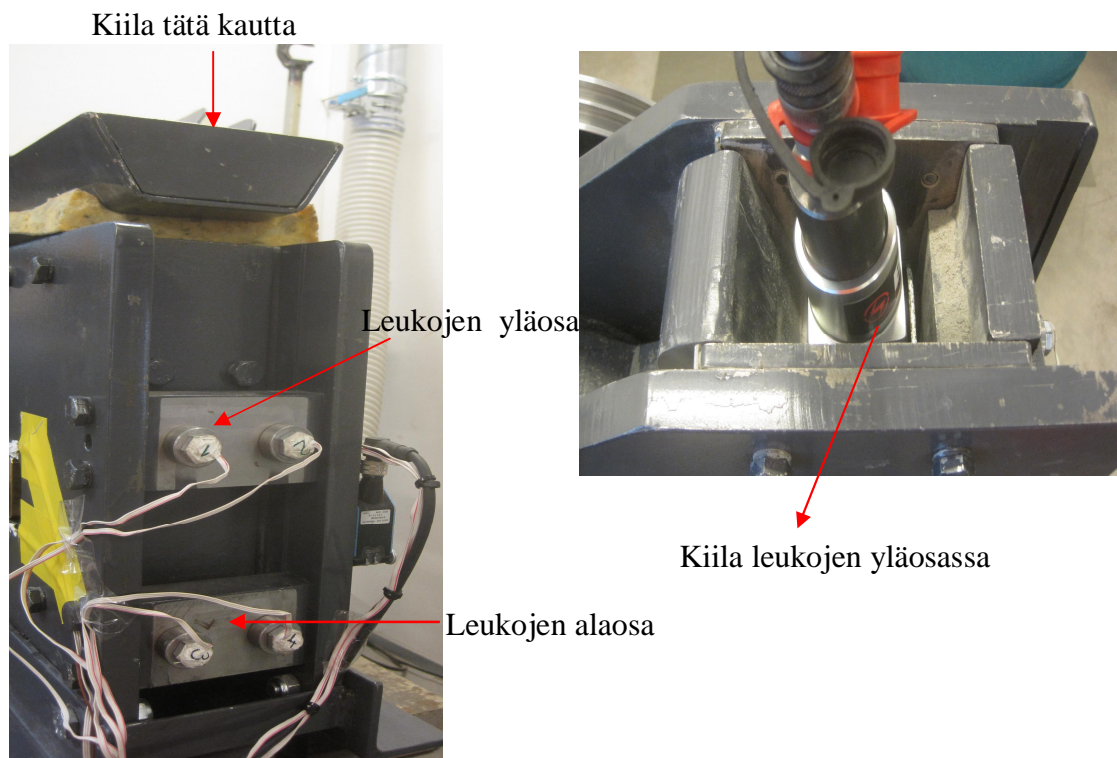
Taulukko 2. lasketut ja mitatut jännitykset vedossa.

$A \text{ (mm}^2\text{)}$	$F \text{ (N)}$	$\sigma_L \text{ (Mpa)}$	$\sigma_M \text{ (Mpa)}$				$\sigma_K \text{ (Mpa)}$
			Pultti 1	Pultti 2	Pultti 3	Pultti 4	
75,4	1000	13,3	8,9	13,7	12,8	18,1	13,4
	5000	66,3	58,1	67,9	63,5	74,3	65,9
	10000	132,6	124,1	134,6	129,5	141,8	132,5

Tulosten mukaan mitattujen jännitysten keskiarvot seuraavat hyvin tarkasti laskettuja arvoja. Kalibroinnin aikana huomattiin, että yksi venymäliuskoista ei toiminut. Venymäliuska korvattiin uudella venymäliuskalla.

### 6.2.3 Laboratorioleukamurskaimeen asennettujen pulttien kalibrointi

Asennettujen pulttien kalibroinnilla selvitetään tunnettujen voimien pulteissa aikaan saamat jännitykset. Nämä jännitysarvot auttavat arvioimaan murskausvoimat varsinaisessa mittauksessa. Ennen varsinaista kalibrointia pultit kiristetään kireyteen 250 MPa. Kalibroinnissa tunnetut voimat kohdistetaan kiinteään ja liikkuvaan leukaan. Kalibroinnissa hydraulisesti toimiva vertikaalinen nostokiila (Liite 3) sijoitetaan ensin kammioon kiinteän ja liikkuvan leuan alaosaan pulttien 3 ja 4 kohdalle. Kiilan avulla leukoihin kohdistetaan 10 kN, 20 kN ja 30 kN voima, ja voimia vastaavat mitatut jännitykset tallennetaan tietokoneeseen. Samat voimat kohdistetaan kiilalla leukojen yläosan kautta pultteihin 1 ja 2. Kuvasta 13 näkyy pulttien paikat rungossa ja kiilan asetus leukojen välissä.



Kuva 13. vertikaalinen nostokiila leukojen yläosassa (Kuva: Badei Makhmour 2013)

Kalibroinnista saadut esimerkkijännityskäyrät ovat liitteessä 4. Kalibroinnista saadut jännitysarvot näkyvät taulukosta 3. Taulukossa ovat voima  $F$ , leukojen yläpuolella olevien pulttien 1 ja 2 sekä leukojen alapuolella olevien pulttien 3 ja 4 jännitykset  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ . Ylä- ja alaleukojen jännitysten keskiarvot ovat  $\sigma_y$  ja  $\sigma_a$ .

**Taulukko 3. kalibroinnista mitatut jännitykset.**

$F$ (kN)	$\sigma_1$ (Mpa)	$\sigma_2$ (Mpa)	$\sigma_3$ (Mpa)	$\sigma_4$ (Mpa)	$\sigma_y$ (Mpa)	$\sigma_a$ (Mpa)
10	8,35	10,25	11,5	11,4	9,30	11,45
20	15,05	18,80	19,2	21	16,93	20,10
30	23,25	29,65	27,7	34,6	26,45	31,15

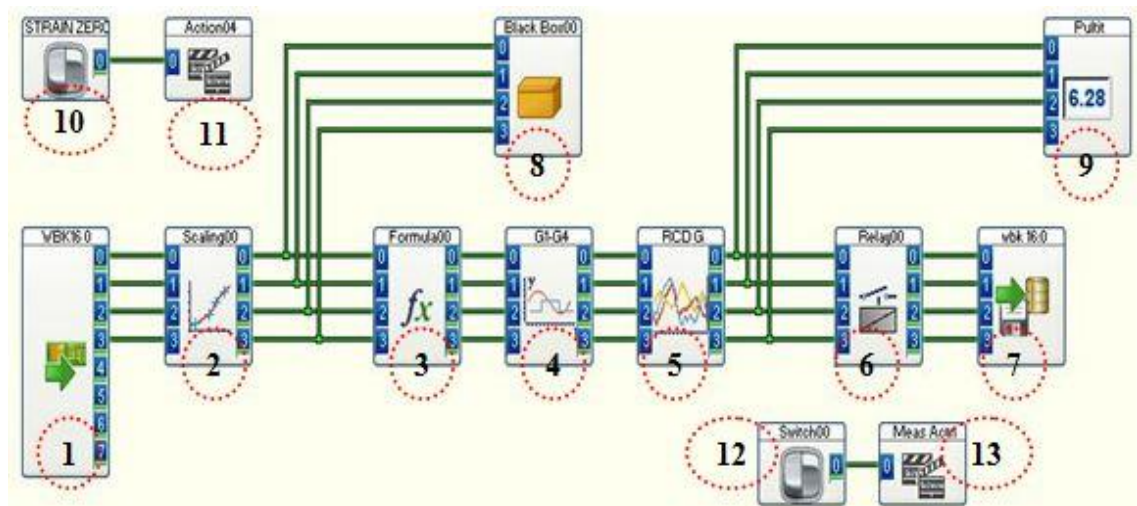
Pulttien kalibroinnissa käytetyn vertikaalisen kiilan voima tulee hydraulipumpusta, jonka maksimipaine on 160 MPa. Jotta tiedetään painetta vastaava voima, laite kalibroidaan käyttämällä Point Load Testerä (Liite 5). Kivilaboratoriossa olevaa Point Load Testerä käytetään mittaamaan kiven murskaamiseen tarvittavaa voimaa. Kalibroinnissa kiila asetetaan testerin kärkien väliin ja sitä puristetaan tunnetulla voimalla. Hydraulipumpun osoittama paine vastaa testerin puristusvoimaa. Kalibroinnissa huomattiin, että voiman ja paineen välinen suhde on 1. Esimerkiksi kun testerin puristusvoima oli 20 kN, hydraulipumpun paine oli 20 MPa.

#### 6.2.4 Mittausten suorittaminen

Pulttien kalibroinnin jälkeen suoritetaan varsinaiset testit, joissa erilaisia kivimateriaaleja murskataan laboratorioleukamurskaimella. Mittaukset suoritetaan kaksi kertaa. Ensimmäisten mittausten yhteydessä holkkien anturointi puuttuu. Silloin mitataan pulttien jännitykset ja leuan puoleiset voimat. Toisten mittausten yhteydessä mitataan sekä pulttien että anturoitujen holkkien jännitykset. Holkkien jännitysten mittauksesta saadaan tärkeitä voimatietoja. Näitä tietoja käytetään selvityksessä, joka käsittelee moniakselisten voimien mittausta pietsoantureilla. Testeissä pulttien ja holkkien jännitysten lisäksi mitataan pyörimisnopeus, moottorin teho, akselin momentti ja koneen rungon lämpötila. Tässä työssä käsitellään vain murskausvoimaan liittyvät pulttien ja holkkien jännitysten mittaukset.



Mittauksissa venymäliuskojen lähettämää signaalia käsitellään National Instrumentsin DASyLab 12- ohjelmistolla. Ohjelma muodostuu lohkokaaviosta. Lohkokaavio sisältää näyttö-, ohjaus- ja signaalinkäsittelykomponentteja, joita valitaan graafisesta valikosta. Jokaisen komponentin parametreja pystytään määrittämään ja muokkaamaan. Pulttien jännitysmittauksessa käytetty lohkokaavio näkyy kuvista 7.



Kuvio 7. mittauksen lohkokaavio moduuleineen.

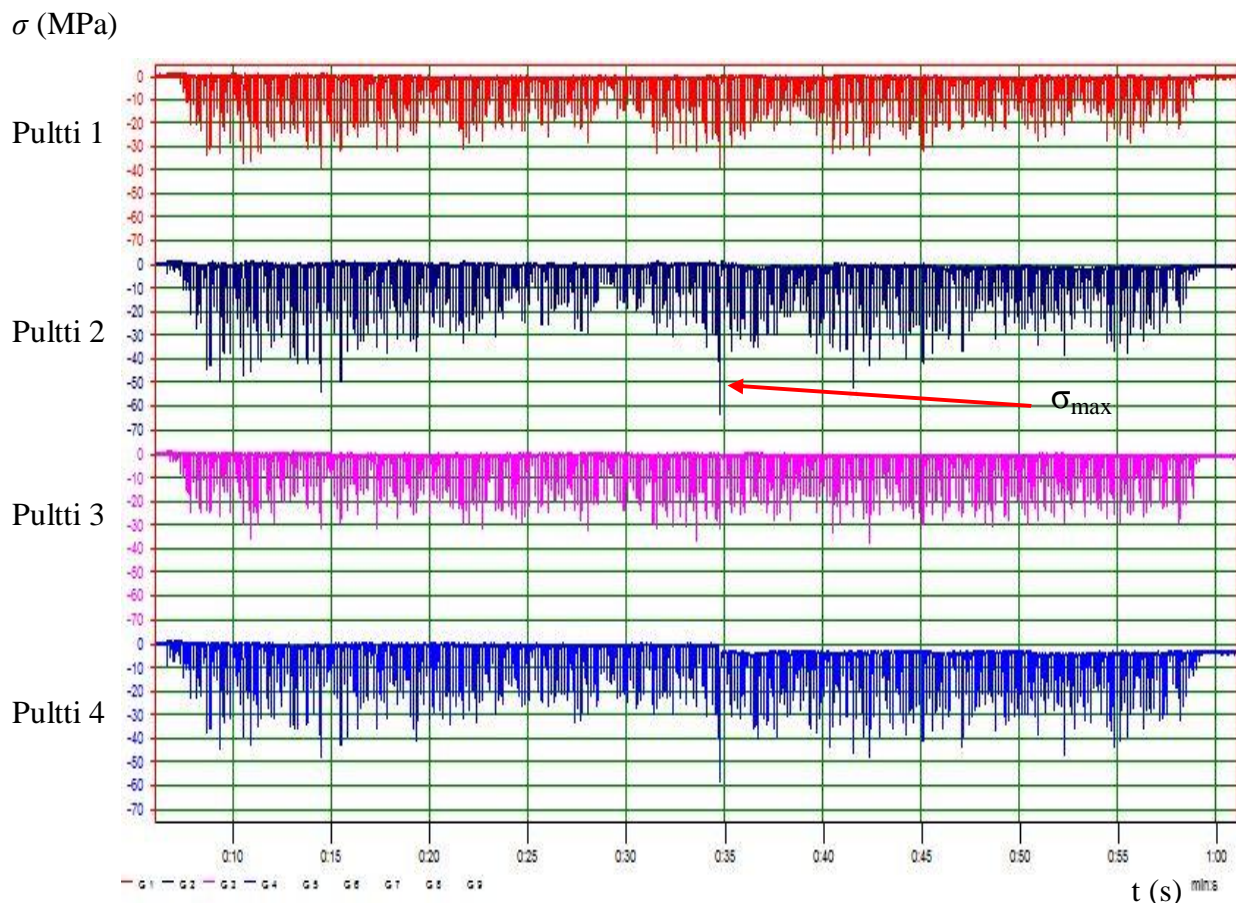
Kaaviossa olevan analogisen sisääntulomodiuulin (1) neljään ensimmäiseen kanavaan liitetään pultteihin liitetyt venymäliuskat. Skaalausmoduulissa (2) ovat skaalausarvot. Skaalauksessa 0  $\mu\epsilon$  ja 1020  $\mu\epsilon$  venymää vastaavat 0 MPa ja 210 MPa jännitystä. Kaavakomponentti (3) sisältää kaavan, jossa sisääntulosignaalin arvosta vähennetään esikiristysarvo. Pultit esikiristetään asennuksen yhteydessä jännityksellä 250 MPa. Y/t-komponentin (4) piirtämästä jännityskäyrästä pystyy seuraamaan jännityksen muutosta ajan suhteen mittauksen aikana. Komponentista (5) pystytään katsomaan mittadataa mittauksen jälkeen. Relemoduulilla (6) käynnistetään datan tallentaminen (7) tietokoneeseen. Relemoduulin käynnistämiseen tarvitaan komponentit (12) ja (13). Moduuli (8) sisältää esikiristysarvon. Digitaalimittari (9) näyttää mittausarvot lukuarvoina. Moduuleilla (10) ja (11) käynnistetään moduuli 8.

Varsinaisissa testeissä 10 kg kivimateriaalia, jonka fraktio on 10 – 20 mm murskataan laboratorioleukamurskaimella. Kivimateriaaleja on viisi erilaista: Talvivaara, Takamaa, Parainen, Patavuori ja Sorila. Takamaa ja Patavuori ovat vulkaniittia, Parainen kalkkikiveä, Talvivaara nikkelimalmia ja Sorila graniittia. Kaikkiaan testejä tehdään 10 kertaa. Testeissä 1 ja 2 mitataan vain pulttien jännitykset. Testeissä 3 - 10 mitataan sekä

pulttien että holkkien jännitykset. Asetusarvo (CSS) testissä 1 on 8 mm ja muissa testeissä 7 mm.

### 6.2.5 Mittaustulosten analysointi

Jokaisesta mittauksesta saadaan mittadiagrammeja, joista on helppo saada mittatulosten minimi- ja maksimiarvot. Lisäksi DASyLabilla on mahdollisuus tutkia diagrammin tiettyjä alueita tarkempien tietojen saamiseksi. Esimerkiksi tietyltä mitta-alueelta voidaan saada RMS eli tehollisarvo. Kuviossa 8 on pulttien jännitysdiagrammi, mikä näyttää pulttien jännitystä murskauksen aikana. Diagrammi on toisen testin (CR 2) tuloksista ja siinä oli suurin mitattu jännitys  $\sigma_{\max}$ .



Kuvio 8. CR 2:n testin tulosten diagrammi.

Mittausten kannalta tärkeimpiä analysoitavia asioita ovat pultteihin ja holkkeihin murskauksen aikana kohdistuvat jännitykset. Pulttien jännitysanalysoinnista saadaan murskausvoimat kiinteän leuan puolella. Pulttien kalibroinnista jo tiedetään tunnettujen voimien 10 kN, 20 kN ja 30 kN pulteissa aikaan saamat jännitykset. Murskauksen aikana pultteihin kohdistuvat jännitykset saadaan diagrammeista. Näitä murskausjännityksiä vastaavat murskausvoimat lasketaan kalibrointijännitysten ja voimien avulla.

Holkkien jännitysten analysoinnista saadaan tärkeää tietoa pietsoanturimittausta varten. Holkkeihin kohdistuvat voimat lasketaan kaavasta 2, kun kaavan jännitykseksi sijoitetaan holkkiin kohdistuva murskausjännitys ja pinta-alaksi holkin poikkipinta-ala. Esimerkiksi holkin 4 maksimijännitys murskauksen aikana on 155,55 MPa ja holkin pinta-ala on 377,8 mm<sup>2</sup>. Näiden arvojen mukaan holkkiin 4 kohdistuu maksimivoima  $F_{max}$  seuraavasti:

$$\sigma_{max} = \frac{F_{max}}{A} \quad \text{Kaava (2)}$$

$$F_{max} = \sigma_{max} \times A = 155,55 \frac{N}{mm^2} \times 402,6 mm^2 = 62,62 kN$$

Taulukkoon 4 on kerätty 10 testistä saadut pulttien ja holkkien maksimijännitykset ja niistä lasketut leuanpuoleiset maksimivoimat ja holkkeihin kohdistuvat maksimivoimat.

**Taulukko 4. testeistä saadut pulttien ja holkkien jännitykset ja niitä vastaavat leuanpuoleiset murskausvoimat ja holkkeihin kohdistuvat voimat. Sinisellä merkittynä testeissä havaitut suurimmat voimat ja jännitykset.**

Testi	Materiaali		Pultti 1	Pultti 2	Pultti 3	Pultti 4	Holkki 1	Holkki 2	Holkki 3	Holkki 4
CR 1	Talvivaara Nikkelimalmi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	43,06	61,63	35,86	58,76	–	–	–	–
		$F_{\max}$ (kN)	57,36	62,90	39,84	50,01	–	–	–	–
CR 2	Talvivaara Nikkelimalmi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	38,83	63,35	37,58	55,25	–	–	–	–
		$F_{\max}$ (kN)	51,72	64,66	41,76	47,02	–	–	–	–
CR 3	Talvivaara Nikkelimalmi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	50,08	28,63	38,16	50,14	30,78	131,80	78,68	125,20
		$F_{\max}$ (kN)	59,69	20,15	42,19	42,93	11,63	49,79	29,72	47,30
CR 4	Takamaa Vulkaniitti	$\sigma_{\max}$ (MPa)	42,00	37,64	39,89	59,37	46,68	142,55	81,04	155,55
		$F_{\max}$ (kN)	50,06	26,49	44,10	50,83	17,63	53,85	30,62	58,76
CR 5	Parainen Kalkkikivi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	21,40	16,47	21,51	26,89	21,83	42,26	14,03	40,72
		$F_{\max}$ (kN)	25,51	11,59	23,78	23,02	8,25	15,96	5,30	15,38
CR 6	Patavuori Vulkaniitti	$\sigma_{\max}$ (MPa)	34,15	25,49	40,55	49,68	33,15	103,33	70,70	109,24
		$F_{\max}$ (kN)	40,70	17,94	44,83	42,53	12,52	39,04	26,71	41,27
CR 7	Parainen Kalkkikivi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	18,69	14,35	19,87	20,73	22,20	25,64	7,32	33,02
		$F_{\max}$ (kN)	22,28	10,10	21,97	17,75	8,39	9,69	2,77	12,47
CR 8	Talvivaara Nikkelimalmi	$\sigma_{\max}$ (MPa)	42,53	27,73	32,95	47,93	38,33	110,08	48,78	99,76
		$F_{\max}$ (kN)	50,69	19,51	36,43	41,04	14,48	41,59	18,43	37,69
CR 9	Takamaa Vulkaniitti	$\sigma_{\max}$ (MPa)	42,31	36,37	38,91	51,10	48,06	150,71	88,24	134,18
		$F_{\max}$ (kN)	50,43	25,59	43,02	43,75	18,16	56,93	33,33	50,69
CR 10	Sorila Graniitti	$\sigma_{\max}$ (MPa)	42,71	29,41	37,77	44,99	41,42	106,46	70,44	92,34
		$F_{\max}$ (kN)	50,91	20,70	41,76	38,52	15,65	40,22	26,61	34,88

$F_{\max}$  tarkoittaa pulttien kohdalla leuan puoleista maksimivoimaa ja holkkien kohdalla holkkiin kohdistuvaa maksimivoimaa.

Suurin mitattu pulttien jännitys 63,35 MPa saatiin testistä 2 , jossa murskattiin Talvivaaran kivimateriaalia. Tämä jännitys kohdistui pulttiin 2 ja vastaa leuanpuoleista voimaa 64,66 kN. Holkeista maksimijännitys kohdistui holkkiin 4 ja sen suuruus on 155,55 MPa, joka vastaa 62,62 kN voimaa.

### 6.3 Selvitys pietsoantureilla mittaamisesta

Kuten luvussa 4 on käsitelty, voiman mittaamiseen on olemassa erilaisia instrumentteja ja antureita. Pietsoanturit ovat tärkeä osa nykymittaustekniikan instrumentteja. Tässä kappaleessa selvitetään minkälaiset pietsoanturit sopivat laboratorioleukamurskaimen murskausvoimien mittaukseen ja mitä asioita mittauksessa täytyy ottaa huomioon.

Mittauksen toteuttamisessa on otettava huomioon, että kuvion 6 mukaiseen laboratorioleukamurskaimen runkoon saa tehdä rakenteellisia muutoksia vain pituussuunnassa, sillä leveyssuuntaista tilaa on vain 78 mm. Dynaamista voimaa on mitattava y- ja z-suunnasta. Jotta pystytään valitsemaan sopiva anturi, on tiedettävä mittauksen aikana anturiin kohdistuva maksimivoima. Venymäliuskamittauksista holkkeihin kohdistuva maksimi z-suuntainen murskausvoima on 62,63 kN. Mainittujen valintavaatimusten perusteella mittaukseen sopiva anturi on monikomponenttinen dynaaminen anturi, jonka tilantarve on vähäinen, ja joka kestää pölyistä ja kosteaa ympäristöä. Lisäksi anturin z-suuntainen mitta-alue on oltava suurempi kuin 62,63 kN.

Monilla valmistajilla on laaja valikoima pietsoantureita. Selvityksessä tutustuttiin HBM:n , PCB:n ja Kistlerin tuotteisiin. Jokaisen edellä mainitun yrityksen myyntiedustaja kutsuttiin tapaamiseen, jossa heidän kanssa käytiin läpi laboratorioleukamurskaimen murskausvoimien mittaus ja mittausvaatimukset. Edellä mainituista yrityksistä PCB ja Kistler valmistavat moniakselisia pietsoantureita. HBM valmistaa yksiakselisia pietsoantureita ja tilauksesta moniakselisia venymäliuskapohjaisia antureita asiakkaan mittausvaatimusten mukaan. PCB:llä ja Kistlerillä on tarjolla voimarenkaita (Force Ring) ja voimalinkkejä (Force Link). Voimarengas on kolmiakselinen kalibroimaton pietsoanturi. Voimalinkki on voimarengas, joka on kalibroitu valmiiksi kahden metallilevyn väliin.

Molempien valmistajien voimalinkit ovat mitoiltaan 80 x 80 x 90. Voimalinkkien käyttö mittaukseen ei ole mahdollista leukamurskaimen rakenteen ja voimalinkkien

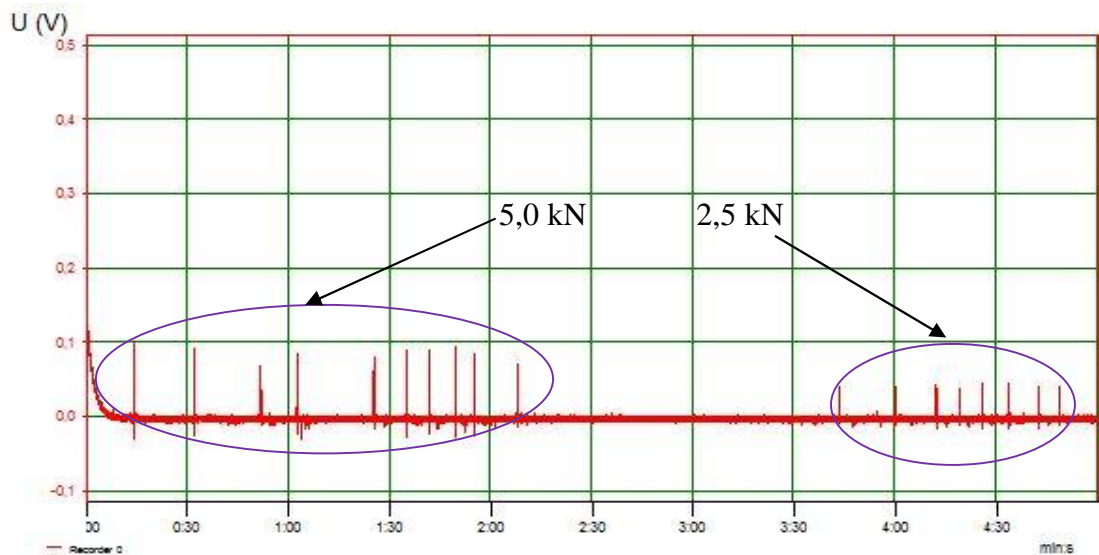
leveysmitan takia. Sopivan pietsoanturin valitsemiseksi tärkeimmät tiedot kerättiin valmistajien voimarenkaiden tiedoista. Nämä tiedot on esitetty taulukossa 5. Mukaan on otettu myös myyntiedustajien hintatarjous, johon kuuluu 2 pietsoanturia, 2 kaapelia ja 2 kiristyssettiä.

**Taulukko 5. Kistlerin ja PCB:n valmistamien 3-akselisten pietsoantureiden vertailu.**

Valmistaja	Kistler	PCB
Tuote	9067 C	260A03
$F_z$ (kN)	60	44,48
$F_{x,y}$ (kN)	30	17,79
$M_z$ (N.m)	500	325,4
$M_{x,y}$ (N.m)	500	440,7
Mitat	60 x 60 x 21	57,1 x 57,1 x 20,07
Herkkyys	(pC/N)	(mV/N)
$F_z$	-3,9	0,06
$F_{x,y}$	-8,1	0,28
Lineaarisuus (%FSO)	$\leq \pm 0,25$	$\leq \pm 1$
Hintatarjous (€)	8520	8676

Myyntiedustajien vierailujen pohjalta ja huomioon ottaen mittavaatimukset ja tuotteiden hinnat, Kistlerin valmistama voimarengas 9067 C todettiin parhaaksi valinnaksi (Liite 6). Pietsoantureita tarvitaan laboratorioleukamurskaimeen 2 kappaletta. Anturit sijoittuvat keskelle kiinteän leuan ylä- ja alaosaa rungon etuosan ja tukilevyn väliin. Silloin leuan yläpuolella olevat holkit 1 ja 2 korvataan yhdellä pietsoanturilla ja toisella pietsoanturilla leuan alapuolella olevat holkit 3 ja 4. Leuan yläpuolella olevat pultit 1 ja 2 korvataan pietsoanturin esikiristykseen tarkoitettulla kiristyspultilla (Liite 7) . Toisella kiristyspultilla korvataan leuan alapuolella olevat pultit 3 ja 4.

Pietsoanturin hankinnan perusedellytyksenä oli se, että pietsoanturit ovat yhteensopivia mittaustiimin käytössä olevan WBK 18-vahvistimen kanssa. Tarkoituksena oli varmistaa, että vahvistimella pystytään muuntamaan pietsoanturin lähettämä sähkövaraus jännitteeksi ja kalibroimaan anturi staattisilla voimilla. Tätä varten Kistleriltä saatiin yksiakselinen pietsoanturi 9323A, joka kytkettiin WBK 18-vahvistimeen ja Point Load Testerin avulla siihen kohdistettiin staattisia voimia 2,5 kN ja 5,0 kN. Pietsoanturin kalibrointi staattisilla voimilla onnistui ja siitä saatiin kuvion 9 diagrammi. Diagrammiin ilmestyi viiva, aina kun staattinen voima vapautettiin. Koska Point Load Testerillä oli vaikea saada tasan 2,50 tai 5,0 kN staattisia voimia, diagrammiin on ilmestynyt eri korkuiset viivat.



Kuvio 9. pietsoanturin kalibroinnista saatu diagrammi.

Tarkan mittaustuloksen saamisen tärkeä edellytys on anturin asianmukainen asennus koneeseen. Kosketuspinnat anturin ja koneen rungon välillä pitää olla tasaiset ja jäykät, jotta voima jakautuu tasaisesti. Koska anturin kotelo on tehty ruostumattomasta teräksestä, leukamurskaimen tukilevyn ja rungon etuosan materiaaliksi suositellaan käytettäväksi jotain taulukossa 6 mainituista materiaaleista.

Taulukko 6. suositeltuja materiaaleja käytettäväksi tukilevyn ja rungon etuosan materiaalina. (Kistler 2013)

Standardi	Ruostumaton teräs	Lämpökäsitelty teräs
DIN	22CrNi17	Ck45
W.Nr.	1.4057	1.1191
AFNOR	Z15CN16.02	XC42H1;XC45
B.S.	431 S29	080 H46
JIS	SUS 431	S45C
AISI/SAE	431	1 045

Pietsoanturin 9067 C esikiristysvoima määräytyy sivusuuntaisten voimien  $x$  ja  $y$  suuruudesta. Suositeltuna esikiristysvoimana valmistajan mukaan on 10 kertaa  $x$ - tai  $y$ -suuntaisten voimien maksimi-arvo. Mittavaatimusten mukaan voidaan käyttää suurempia tai pienempiä esikiristysvoimia. Maksimi  $z$ -suuntainen voima anturilla on 200 kN.  $Z$ -suuntaisen ja esikiristysvoiman erotus ilmaisee murskauskäyttöön jäävän voiman suuruuden eli todellisen mittausalueen. Varsinaisessa testissä pietsoantureilla on suositeltavaa esikiristää antureita kireyteen 140 kN, ja murskata ensimmäisenä materiaalina pehmeintä kivimateriaalia esimerkiksi Paraisten kalkkikiveä. Ensimmäisestä murskauksesta saadaan tarkempia tietoja voimien suuruudesta ja näin ollen voidaan muuttaa esikiristysvoimaa ja murskauskäyttöön jäävää mittausaluetta.

## 7 POHDINTA

Opinnäytetyön tavoitteet täyttyivät z-suuntaisten murskausvoimien mittauksesta ja moniakselisten voimien mittauksen selvittämisestä. Käyttämällä venymäliuskoja pystyttiin mittaamaan laboratorioleukamurskaimen kiinteään leukaan kohdistuvat z-suuntaiset voimat. Venymäliuskamittauksessa holkkeihin kohdistuvien voimien mittausta voidaan parantaa esimerkiksi koneistamalla holkin ja koneen tukilevyn ja etuosan kosketuspinnat pietsoanturin valmistajan ohjeiden mukaisesti. Tukilevyn ja rungon etuosan täytyy olla yhdensuuntaisia. Lisäksi käytettyjen holkkien kalibroinnin kannalta luotettavampien tulosten saamiseksi holkit täytyy valmistaa täsmälleen samanpituisiksi.

Moniakselisten voimien mittausselvityksen mukaan:

- murskausvoimia pystytään mittaamaan x-, y- ja z-suunnalta käyttämällä Kistlerin valmistamia kolmikomponenttisiä pietsoantureita
- pietsoanturit ovat yhteensopivia mittaustiimin käytössä olevan WBK 18-vahvistimen kanssa
- antureiden kalibrointi onnistuu staattisella voimalla
- antureiden kiinnittäminen murskaimeseen vaatii rakennemuutoksia murskaimessa

Pietsoanturimittauksesta koituvat kulut on arvioitu, ja mittauksen toteuttaminen on kiinni yrityksen johdon päätöksestä. Jatkossa kolmikomponenttisiä pietsoantureita voidaan käyttää myös pienten koneiden voimamittauksissa huomioon ottaen murskausvoimien suuruuden.

Tämän työn haasteena oli, ettei minulla ollut aiempaa kokemusta mittauksista ja mittaustekniikasta. Työ tehtiin yhteistyönä, jossa oli mukana suunnittelu- ja mittaustiimi. Opinnäytetyön ansiosta tutustuin mittaustekniikkaan ja myös paremmin Metso Minerals Oy:n mittaustiimin toimintaan.



## LÄHTEET

Aumala, O. 2002. Mittaustekniikan perusteet. 11. korjattu painos. Helsinki: Hakapaino Oy.

Aumala, O., Ihalainen, H., Jokinen, H. & Kortelainen, J. 1998. Mittaussignaalien käsittely. 3. uudistettu painos. Tampere: Klingendahl Paino Oy.

Esala, V-P., Lehto, H. & Tikka, H. 2003. Konepajatekniset mittaukset ja kalibroinnit. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.

Guide to the Measurement of Force. Julkaistu 1998 ja päivitetty 2013. The Institute of Measurement and Control: London. Luettu 5.6.2013.  
<http://www.npl.co.uk/upload/pdf/forceguide.pdf>

Halko, P., Härkönen, S., Lähteenmäki, I. & Välimaa, T. 1990. Teollisuuden mittaustekniikka. Helsinki: VAPK.

Hoffmann, K. 1989. An introduction to measurements using Strain gages. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH.

Kistler Group. 2012. Process Instrumentation and Automation. Switzerland: Kistler Group.

Kyowa electronic instruments Co., LTD. 2013. What's a strain gage?. Tokyo: Overseas Department.

Metso Minerals. 2011. Crushing and Screening Handbook. 5. painos. Tampere: Kirjanpaino Hermes.

Metso. 2012. Vuosikatsaus. Luettu 18.7.2013.  
[http://www.metso.com/fi/corporation/ir\\_fin.nsf/WebWID/WTB-041116-2256F-D7EF0?OpenDocument](http://www.metso.com/fi/corporation/ir_fin.nsf/WebWID/WTB-041116-2256F-D7EF0?OpenDocument)

Nawrocki, W. 2005. Measurement systems and sensors. Massachusetts: Artech House Inc.

Saarineva, J. 2007. Lujuusoppi Peruskurssi. 6. uudistettu painos. Tampere: Klingendahl Paino Oy.

Suomen Standardisoimisliitto SFS 3700. 1998. Luettu 30.4.2013.  
<http://sales.sfs.fi.elib.tamk.fi/sfs/servlets/DownloadServlet?action=getFile&forContract=10223&productId=154726>

## LIITTEET

Liite 1. Putkivenymäliuskan SKF-20783 tiedot

KYOWA		MADE IN JAPAN		
<b>TYPE</b> SKF-20783				
<b>GAGE FACTOR</b> (24°C,50%RH)	1.99 ± 1.0%	<b>LOT No.</b> Y3493S	<b>BATCH</b> 005A	T02
<b>GAGE LENGTH</b>	3 mm	<b>TEMPERATURE COEFFICIENT</b> OF GAGE FACTOR +0.008 % / °C		
<b>GAGE RESISTANCE</b> (24°C,50%RH)	120.0 ± 0.8 Ω	<b>APPLICABLE GAGE CEMENT</b> EP-34B, EP-180		
<b>ADOPTABLE THERMAL EXPANSION</b>	11.7 PPM/°C	<b>QUANTITY</b>		5
<b>KYOWA STRAIN GAGES</b>				


## Liite 2. Yleisvenymäliuskan KFG-5-120-C1 tiedot

<b>KYOWA</b>		<b>MADE IN JAPAN</b>		
<b>TYPE</b> KFG-5-120-C1-11L5M3R				
<b>GAGE FACTOR</b> (24°C,50%RH)	2.07 ± 1.0%	<b>LOT No.</b> Y3580S	<b>BATCH</b> 394A	T02
<b>GAGE LENGTH</b>	5 mm	<b>TEMPERATURE COEFFICIENT OF GAGE FACTOR</b> +0.008 %/°C		
<b>GAGE RESISTANCE(24°C,50%RH)</b>	119.6 ± 0.4 Ω	<b>APPLICABLE GAGE CEMENT</b> CC-33A , EP-34B		
<b>ADOPTABLE THERMAL EXPANSION</b>	11.7 PPM/°C	<b>QUANTITY</b> 10		
<b>KYOWA STRAIN GAGES</b>				

Liite 3. Vertikaalinen nostokiila

## Vertical Lifting Wedge

▼ Show: LW-16 with SB-2 and optional LWB-1



- Requires .39 inch access gap
- Lifting force 16 ton at 10,000 psi hydraulic pressure
- Automatic mechanical retraction (single acting)
- Securely raises or lowers 16 tons with no slippage
- Lifting wedge LW-16 includes safety block SB-2
- Use in tandem to lift 32 tons, or 64 tons
- .83 inch of vertical lift from each step (maximum lift to 2.72 inches with optional LWB-1 stepped block)

### LW Series


**Minimum Clearance:**  
**.39 inches**

**Maximum Lift Height:**  
**2.02\*-2.72\* inches**

**Maximum Force:**  
**16 tons**


**Maximum Operating Pressure:**  
**10,000 psi**

▼ For lifting heavy equipment with minimum floor clearance the LW-16 is the ideal tool.






**ER-Series Load Skates**  
In combination with the Enerpac Lifting Wedge we recommend Load Skates for moving heavy loads.  
*Page: 170*



**Split-Flow Manifolds**  
Split Flow Valves to control two or four lifting wedges simultaneously.  
**AM-21** with 3 ports 3/8" NPTF.  
**AM-41** with 5 ports 3/8" NPTF.  
*Page: 118*



▲ **Optional LWB-1 Stepped Block**



**LW-16**

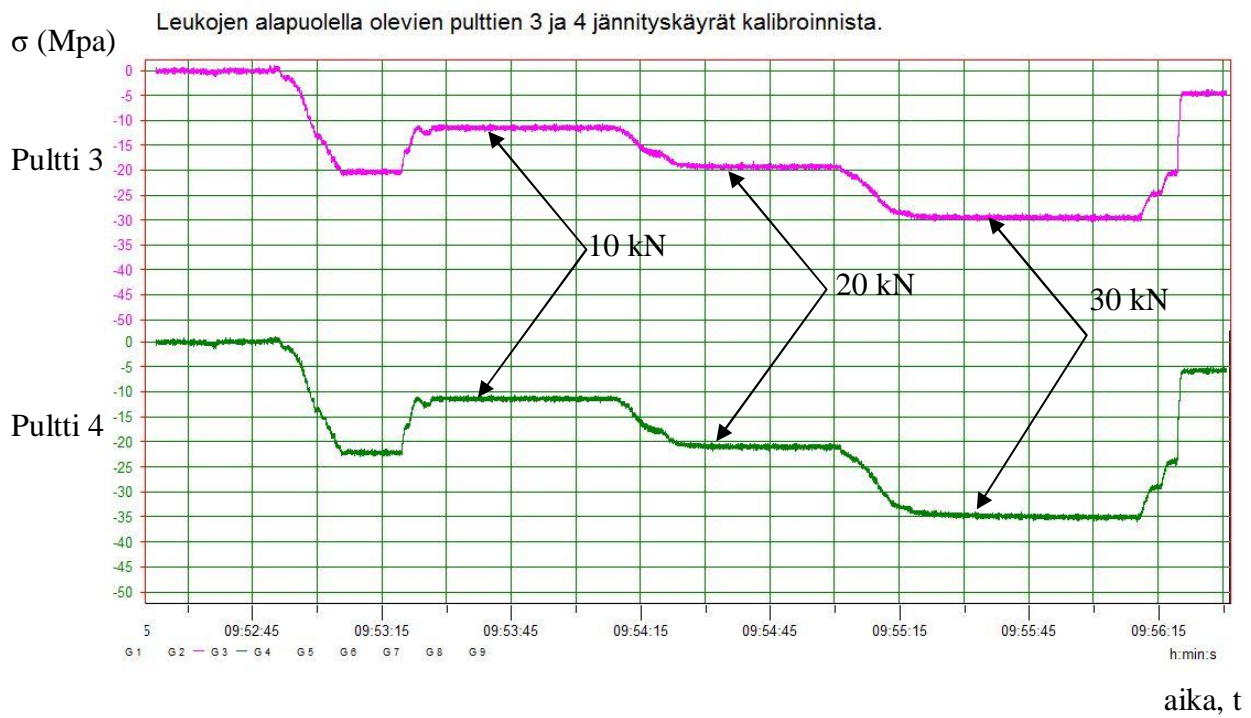
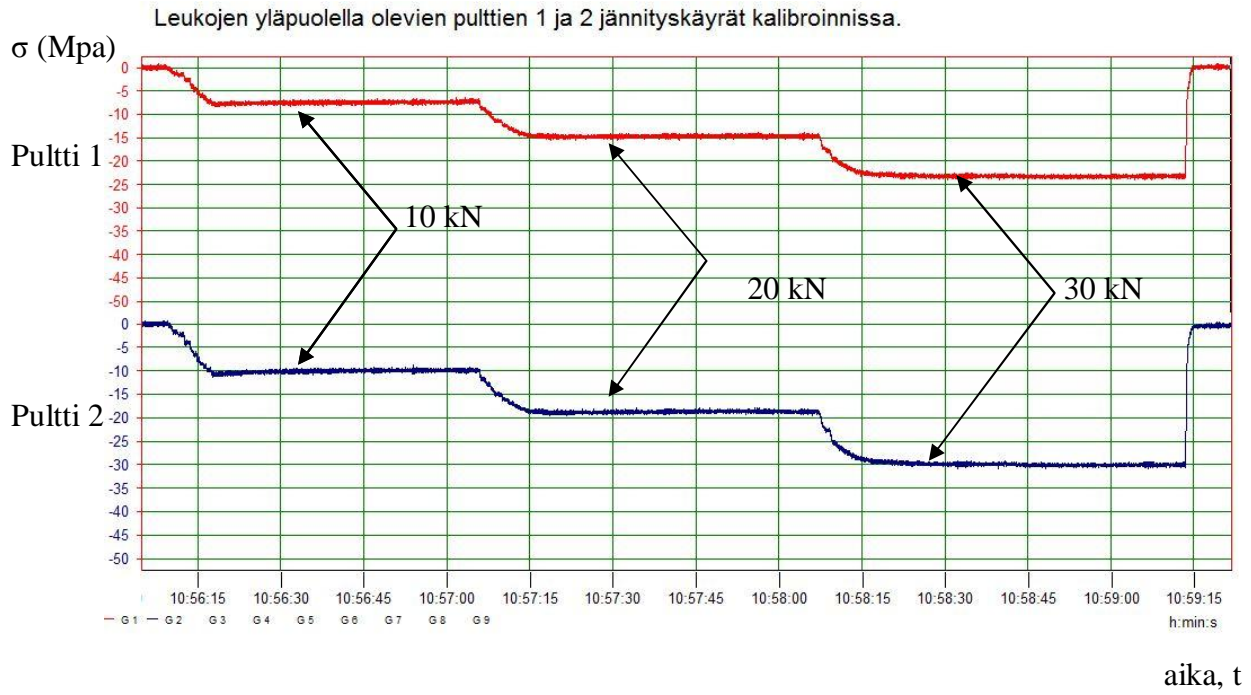
Max. Lifting Force	Model No.	Minimum Clearance Gap	Max. Lift per Stage	Max. Lifting Height	Max. Lifting Height Using Stepped Block	Oil Capacity	Weight
(ton)		(in)	(in)	(in)	(in)	(in <sup>3</sup> )	(lbs)
16	LW-16	.39	.83	2.02	2.72	4.75	15.4

\*Use optional stepped block LWB-1 to increase wedge lifting height 1.18 inches.

168
www.enerpac.com

<http://www.enerpac.com/en-us/industrial-tools-imperial/mechanical-hydraulic-specialty-tools/lw-series-vertical-lifting-wedge>

## Liite 4. Kalibroinnin jännityskäyrät



## Liite 5. Point Load Tester

## Point Load Tester

SPECIFICATION		POINT LOAD TESTER	Model 6500
<b>LOAD CELL</b>		<b>HYDRAULIC JACK</b>	
Range:	0-50 kN	Capacity:	67 kN
Accuracy:	< 0.2%	Stroke:	76 mm
Temperature Range:	0-50 Deg C	<b>POWER</b>	
Separation:	76mm max	Battery:	8 x 1.25V Rechargeable
<b>FUNCTIONS</b>		Life:	15 hours continuous
Peak	Retain peak load during testing	Charge Period:	14 hours
Track	Very low strength testing	<b>FRONT PANEL</b>	
Recall	Recover last 5 values	Display:	Intelligent LCD
Configure	Sets readout option	<b>DIMENSIONS / WEIGHT</b>	
<b>PLATENS</b>		Inst:	180 x 205 x 475mm / 14Kg
Stainless steel with hardened stainless steel ball points		Box:	250 x 300 x 525mm / 6.5 Kg



**HMA**  
HALLEY & MELLOWES AUSTRALASIA

Head Office: 1/72 Bayfield, Bayswater VIC 3153  
Telephone: +61 (0)3 9720 5950 Email: melbourne@hmagroup.com.au  
[www.hmagroup.com.au](http://www.hmagroup.com.au)

<http://www.geotechsystems.com.au/pdf/6500.pdf>



Type 9067C

#### Technical Data Type 9067C, 9068C

Range	$F_x, F_y$	kN	-30 ... 30 <sup>1)</sup>
	$F_z$	kN	-60 ... 60 <sup>1)</sup>
	$F_z$	kN	0 ... 200 <sup>2)</sup>
Overload	$F_x, F_y$	kN	-35/35 <sup>1)</sup>
	$F_z$	kN	-70/70 <sup>1)</sup>
Calibrated range	$F_x$	kN	0 ... 30 <sup>1)</sup>
	$F_y$	kN	0 ... 30 <sup>1)</sup>
	$F_z$	kN	0 ... 60 <sup>1)</sup>
	$F_z$	kN	0 ... 200 <sup>2)</sup>
Permissible moment load	$M_x, M_y$	N·m	-500/500 <sup>1)</sup>
	$M_z$	N·m	-500/500 <sup>1)</sup>
Threshold		N	<0,01
Sensitivity	$F_x, F_y$	pC/N	≈-8,1 <sup>1)</sup>
	$F_z$	pC/N	≈-3,9 <sup>1)</sup>
Linearity, each axis		%FSO	≤±0,25 <sup>1)</sup>
Hysteresis, each axis		%FSO	≤0,25 <sup>1)</sup>
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%	≤±0,5 <sup>1)</sup>
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%	≤±2 <sup>1)</sup>
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%	≤±3 <sup>1) 3)</sup>
Rigidity	$C_x, C_y$	N/μm	≈700
	$C_z$	N/μm	≈4 500

<sup>1)</sup> Standard mounting with preload of 140 kN

<sup>2)</sup> Without preload

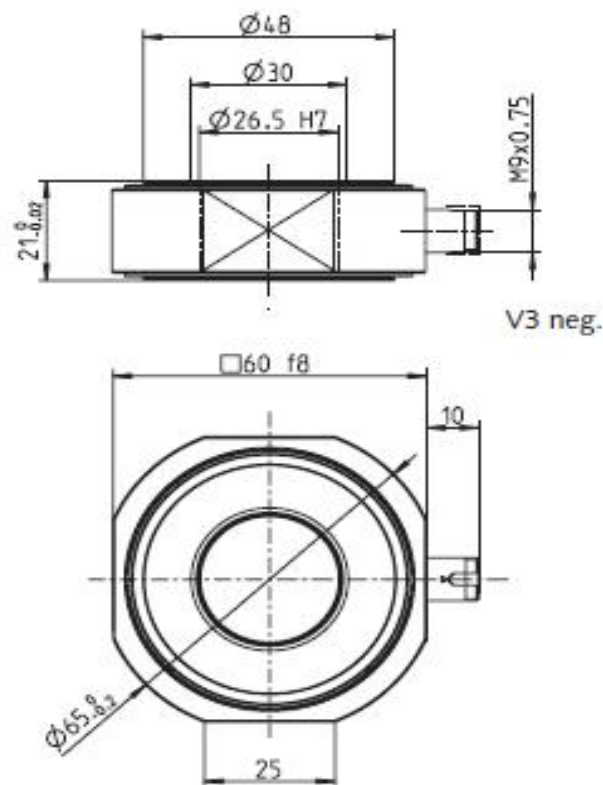
<sup>3)</sup> Crosstalk  $F_x, F_y \rightarrow F_z$  is ≤±2 % if e.g. four sensors are assembled into one dynamometer.

2(2)

### Other Technical Data Type 9067C, 9068C

Operating temperature range	°C	-40 ... 120
Insulation resistance at 20 °C	$\Omega$	$>10^{13}$
Ground insulation	$\Omega$	$>10^8$
Capacitance, each channel	pF	100
Connecting plug		V3 neg.
Weight	g	285
Degree of protection according to EN60519		
with cable Type 1698AA/AB		IP65
with cable Type 1698ACsp		IP67

### Dimensions 3-Component Force Sensor Type 9067C, 9068C





## Liite 7. Pietsoanturin 9067 C esikiristyssetti



## Technical Data

Type		9460...	9461...	9465...	9451A...	
for sensor	Type	9017C/ 9018C	9027C/ 9028C	9047C/ 9048C	9067C/ 9068C	
Inside $\varnothing$	mm	6,5	8,1	14,1	26,5	
Preloading bolt						
	Thread	M6x0,75	M8x1	M14x1,5	M20x1,5	
	Length L	mm	29	40	57	78
Preloading force $F_v$	kN	10	20/25	60	140	
Preloading bolt						
	Proof stress $R_{p0,2}$	N/mm <sup>2</sup>	1250	1 250	1 250	
	Stress at $F_v$ $\sigma_v$	N/mm <sup>2</sup>	629	915	631	790

<http://kistler.com/fi/en/product/sensor-preloading-elements/9451ASP>