



HITAASTI PYÖRIVIEN LAAKEREIDEN KUNNONVALVONTA

Heikki Merisalo

Opinnäytetyö
Huhtikuu 2012
Kone- ja tuotantotekniikka
Kone- ja laiteautomaatio
Tampereen ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Kone- ja laiteautomaation suuntautumisvaihtoehto

Merisalo, Heikki: Hitaasti pyörivien laakereiden kunnonvalvonta
Opinnäytetyö 39 sivua, liitteet 35 sivua
Huhtikuu 2012

Tämä opinnäytetyö tehtiin UPM-Kymmene Oyj:n Jämsänkosken tehtaalle. Opinnäytetyön päätehtävä oli kunnonvalvontajärjestelmän käyttöönotto hiertämön kaksoisviirapuristimeen, missä tärkein yksittäinen osa-alue oli järjestelmän hälytysrajojen määrittäminen. Käyttöönottoon liittyen tehtävänä oli myös laatia ohje järjestelmän käytöstä. Lisäksi opinnäytetyössä selvitettiin edellä mainitussa kaksoisviirapuristimessa ilmenneiden laakerivaurioiden syitä. Tarkoitus ei ollut saada välttämättä selville syitä vaurioihin, vaan dokumentoida vauriotietoja ja tehdä esiselvitystä, joka helpottaisi varsinaisten juurisyiden selvittämistä. Toisena lisätehtävänä opinnäytetyössä oli selvittää mahdollisia muita käyttökohteita samanlaiselle kunnonvalvontajärjestelmälle UPM:n Jämsänkosken ja Kaipolan tehtailla.

Opinnäytetyön aikana kunnonvalvontajärjestelmä otettiin käyttöön ja järjestelmän hälytysrajat asetettiin kohdilleen. Laakerivaurioiden aiheuttajien osalta huomio kiinnittyi erityisesti laakeriin ja laakeripesään kohdistuviin voimiin ja niiden selvittämiseen. Myös veden vaikutusta vaurioiden aiheuttajana pohdittiin. Kunnonvalvontajärjestelmän muiden käyttökohteiden osalta opinnäytetyössä tehtiin kartoitus potentiaalisista laitteista. Erityisesti järjestelmän laajentamisen kannattavuus hiertämön toiseen kaksoisviirapuristimeen arvioitiin.

Kunnonvalvontajärjestelmän käyttöönotto sujui hyvin, vaikkakin hälytysrajoja voi vielä joutua muuttamaan paremmiksi mahdollisten uusien laakerivaurioiden seurauksena. Opinnäytetyön avulla se onnistuu kuitenkin helposti. Laakerivaurioiden syiden tutkimisen johdosta saatiin selville, että laakereihin kohdistuvat kuormitusvoimat eivät aiheuta vaurioita. Voimien vaikutusta laakeripesiin ei tutkittu, mutta se voisi olla aiheellista tehdä. Muita käyttökohteita selvitetessä todettiin kunnonvalvontajärjestelmän laajentaminen toiseenkin kaksoisviirapuristimeen järkeväksi järjestelmän luotettavuuden ja kustannusten vuoksi.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Option of Machine Automation

Merisalo, Heikki: Condition Monitoring of Slowly Rotating Bearings
Bachelor's thesis 39 pages, appendices 35 pages
April 2012

This bachelor's thesis was made to UPM-Kymmene Jämsänkoski's papermill. Main purpose of this thesis was to introduce a condition monitoring system for a double wire press, in which the most important part was to determine alarm limits for this system. Additional aims of this thesis were to find out reasons for damages in the bearings of the double wire press and further to try to search for other devices in UPM Kaipola and Jämsänkoski mills, where this kind of condition monitoring system could be used.

Because of this thesis the condition monitoring system was introduced successfully and the alarm limits was set to correct values. The main reason for the damages in the bearings was not found, but there were few possible alternatives that can cause these damages. One potential reason under closer observation was the loads and forces that are generated in the press. Calculations performed in this thesis proves that the bearings can last the forces. Consequently, other parts of the press are most likely the cause of these damages. There were few devices in the mills that were suitable for the condition monitoring system. Main reason for the selection was the rolling speed of these devices, because the condition monitoring system works best with devices having low rolling speeds.

Keywords: Condition monitoring system, bearing

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	6
2 UPM-KYMMENE OYJ.....	7
3 KAKSOISVIIRAPURISTIN	8
3.1 Rakenne ja tehtävä	8
3.2 Laakerointi ja voitelu.....	9
4 KUNNONVALVONTAJÄRJESTELMÄ	10
4.1 Tekniikka	11
4.2 Oireiden tulkinta	13
5 HÄLYTYSRAJAT	17
5.1 Lähtötiedot.....	17
5.2 Hälytysrajojen tutkiminen ja testaus	21
5.3 Hälytysrajojen määrittäminen	22
5.3.1 HDm:n hälytysraja	23
5.3.2 BPFO:n hälytysraja	25
5.3.3 BPFI:n hälytysraja.....	27
5.3.4 BPFIM:n hälytysraja.....	29
5.4 Hälytysrajojen yhteenveto	30
6 LAAKEREIDEN KÄYTTÖIÄN PARANTAMINEN	31
6.1 Tietoja aikaisemmista laakerivaurioista	31
6.2 Parannusehdotukset	32
7 JÄRJESTELMÄN MUUT MAHDOLLISET KÄYTTÖKOHTEET	34
7.1 Kaksoisviirapuristimet.....	34
7.2 Muut kohteet.....	35
8 JOHTOPÄÄTÖKSET	37
9 LÄHTEET	38
10 LIITTEET.....	39

LYHENTEIDEN JA MERKKIEN SELITYKSET

HDc	High Definition Carpet
HDm	High Definition Maximum
BPFO	Ball Pass Frequency Outer race
BPFI	Ball Pass Frequency Inner race
BPFIM	Ball Pass Frequency Modulation, Inner race
SPM	Shock Pulse Method
HDesv	High Definition squared Shock Value

1 JOHDANTO

Olin kesällä 2011 työharjoittelussa UPM-Kymmene Jämsänkosken tehtaalla mekaanisessa kunnossapidossa. Kesän päätteeksi ilmoitin halukkuuteni tehdä opinnäytetyöni kyseiselle tehtaalle. Jämsänkosken tehtaan kaksoisviirapuristilla tapahtuneiden useiden laakerivaurioiden takia päätettiin toiseen puristimista hankkia kunnonvalvontajärjestelmä valvomaan laakereiden kuntoa. Järjestelmän käyttöönotto oli hyvä paikka opinnäytetyön tekemiselle, joten opinnäytetyöpaikka aukesi tähän tehtävään.

Kunnonvalvontajärjestelmän toimittaja teki kaikki järjestelmän ja ohjelman asennukset, mutta opinnäytetyössä tehtäväksi jäi asettaa järjestelmän asetukset vastaamaan kaksoisviirapuristimen tarpeita, sekä käyttöoppaan laatiminen järjestelmän käytöstä. Asetuksia oli lähinnä hälytysrajojen asettaminen ja muiden ohjelman ominaisuuksien asettaminen kohdilleen. Lisäksi opinnäytetyöhön sisällytettiin laakerivaurioiden syiden tutkiminen, sekä järjestelmän mahdollisten muiden käyttökohteiden selvittäminen UPM:n Jämsänkosken ja Kaipolan tehtailla.

Opinnäytetyössä kerrotaan kyseisestä iskusysäysmenetelmään perustuvasta kunnonvalvontajärjestelmästä tärkeimmät asiat. Näihin asioihin kuuluu oireiden tulkinnan ja järjestelmän ominaisuuksien kertominen. Itse opinnäytetyön työosuuksista ehkäpä tärkein on hälytysrajojen määrittäminen. Siinä perustellaan määritettyjen rajojen paikat. Laakereiden käyttöä parantamiseen liittyen dokumentoitiin aikaisempia laakerivaurioita ja pohdittiin mahdollisia syitä vaurioihin. Työn lopussa on katsaus mahdollisiin muihin laitteisiin, joihin kyseistä kunnonvalvontajärjestelmää voisi soveltaa. Koska iskusysäysmenetelmään perustuva kunnonvalvontajärjestelmä on parhaimmillaan hitaasti pyörivissä kohteissa, oli käyttökohteiden valinnan pääsyy kierrosnopeus.

2 UPM-KYMMENE OYJ

UPM on paperiteollisuuden alalla toimiva yritys. Tuotantoa yrityksellä on 16 maassa, lähinnä Euroopassa. Myyntiverkosto UPM:llä on maailmanlaajuinen. Vuonna 2010 Liikevaihto yrityksellä oli yli 10 miljardia euroa ja työntekijöitä noin 24 500. Noin 2/3 liikevaihdosta tulee paperista, noin kuudennes sellusta ja energiasta ja noin kuudennes teknisistä materiaaleista, kuten vaneri ja tarra. (UPM Biometsäteollisuuden edelläkävijä 2011, 2-4.)

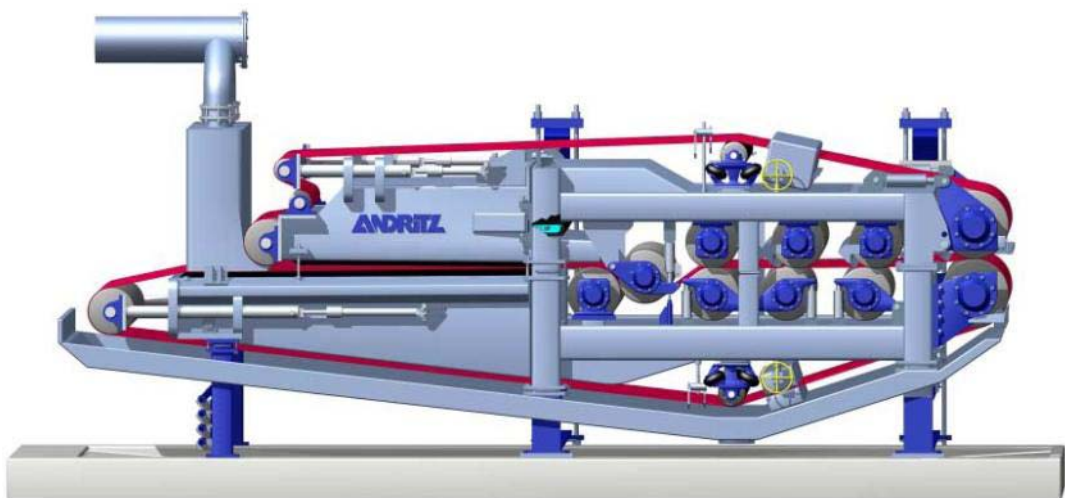
UPM-Kymmenen Jämsänkosken tehdas sijaitsee Jämsässä Keski-Suomessa. Jämsänkosken paperitehtaalla on 4 paperikonetta, joista kaksi valmistaa aikakausilehtipaperia ja kaksi erikoispaperia. Tuotantokapasiteetti tehtaalla on noin 930 000 tonnia vuodessa. Paperikoneet käyttävät pääraaka-aineenaan kuusikuitupuuta ja sellua. (UPM Jokilaakson tehtaot 2010, 24-30.)

3 KAKSOISVIIRAPURISTIN

Kaksoisviirapuristimia on Jämsänkosken tehtaalla kaksi. Molemmat kaksoisviirapuristimet sijaitsevat tehtaan hiertämöllä. Puristimet ovat Andritzin valmistamia ja ne on otettu käyttöön syksyllä 2007. Puristimet ovat keskeisessä osassa tätä opinnäytetyötä, koska opinnäytetyössä käyttöönotettava kunnonvalvontajärjestelmä asennetaan toiseen puristimista.

3.1 Rakenne ja tehtävä

Kaksoisviirapuristimen tehtävä on ylimääräisen nesteen poistaminen kuitumassasta. Neste poistetaan mekaanisesti kahden jatkuvasti kiertävän viiran välissä kiila- ja puristusalueella. Kuitumassa syötetään perälaatikosta kiila-alueelle tasaisesti koko työleveyden alalle. Kiila-alueella vesi poistetaan mekaanisesti pintapaineen avulla. Kuviossa 1 kiila-alue on kuvan vasen puoli. Puristusosassa vedenpoisto tapahtuu teloja yhteen puristamalla hydraulisten sylintereiden avulla. Puristusalue on kuvion 1 oikea puoli. Kuitumassa liikkuu puristimessa noin nopeudella 15 m/min, jolloin telat pyörivät noin 8 kierrosta minuutin aikana. Puristimen työleveys on 4,2m ja kokonaismassa 110 000 kg. Viiraa pyöritetään vetoteloilla, jotka ovat kaksi isompaa telaa puristusalueen lopussa. Vetotelojen massa on 6100 kg. Loput telat puristusalueella ovat puristusteloja, joiden massa on 4400 kg. (Andritz 2007, 26-31.)



Kuvio 1. Kaksoisviirapuristin (Andritz 2007, 28)

3.2 Laakerointi ja voitelu

Laakeroinnissa kaksoisviirapuristimilla käytetään SKF:n pallomaisia rullalaakereita. Vetoteloissa käytetään SKF 22338CC K/W33 C3 laakeria ja puristusteloissa SKF 22330CC K/W33 C3 laakeria. Puristustelojen laakerit ovat sisähalkaisijaltaan 150mm ja vetotelojen laakerit 190mm. Vetotelojen laakereiden dynaaminen kantavuusluku on 1 870 000 N ja staattinen kantavuusluku 2 650 000 N. Puristustelan laakereiden dynaaminen kantavuusluku on 1 270 000 N ja staattinen kantavuusluku on 1 760 000 N. (SKF 1991, 476-478.)

Vertailun vuoksi laakereiden dynaaminen ja staattinen kantavuusluku pystytään laskemaan, kun tiedetään laakeriin kohdistuvat voimat, laakerin pyörimisnopeus ja laakerin haluttu käyttöikä. Dynaaminen kantavuusluku saadaan laskettua kaavalla 1, jossa L on käyttöikä, C on dynaaminen kantavuusluku, P on laakeriin ekvivalenttikuormitus ja n on pyörimisnopeus. Kaavalla 2 saadaan laskettua staattinen kantavuusluku, jossa f on varmuusluku ja P on ekvivalenttikuormitus. Varmuusluvaksi tässä tapauksessa valitaan 1,5, joka on normaaleissa olosuhteissa tasaisesti kuormitetun laakerin varmuusluku. (Koneenosien suunnittelu 1995, 451-456.)

$$L_{10h} = \frac{1000000}{60 \times n} \times \left(\frac{C}{P}\right)^{\frac{10}{3}} \quad (1)$$

$$C_o = f_s \times P_o \quad (2)$$

Kaksoisviirapuristimien laakereiden voitelu hoidetaan Safematic automaattivoitelujärjestelmällä. Molempien puristimien vetotelojen laakereille järjestelmä ohjaa yksiulostuloisen annostelijaventtiilin kautta joka 5. tunti 5 g voiteluainetta. Esipuristustelojen laakereille järjestelmä ohjaa kaksiulostuloisen annostelijaventtiilin kautta joka 10. tunti 3 g voiteluainetta. Vetotelojen laakereille menee siis 24 g voiteluainetta vuorokaudessa ja esipuristustelojen laakereille 7,2g voiteluainetta vuorokaudessa. Voiteluaineen annostelumäärää ei ole muutettu missään vaiheessa, eli voiteluainetta on annosteltu aina sama määrä koko kaksoisviirapuristimien elinkaaren ajan. Laakereiden voiteluaineena käytetään Mobilith SHC 1500 voiteluainetta.

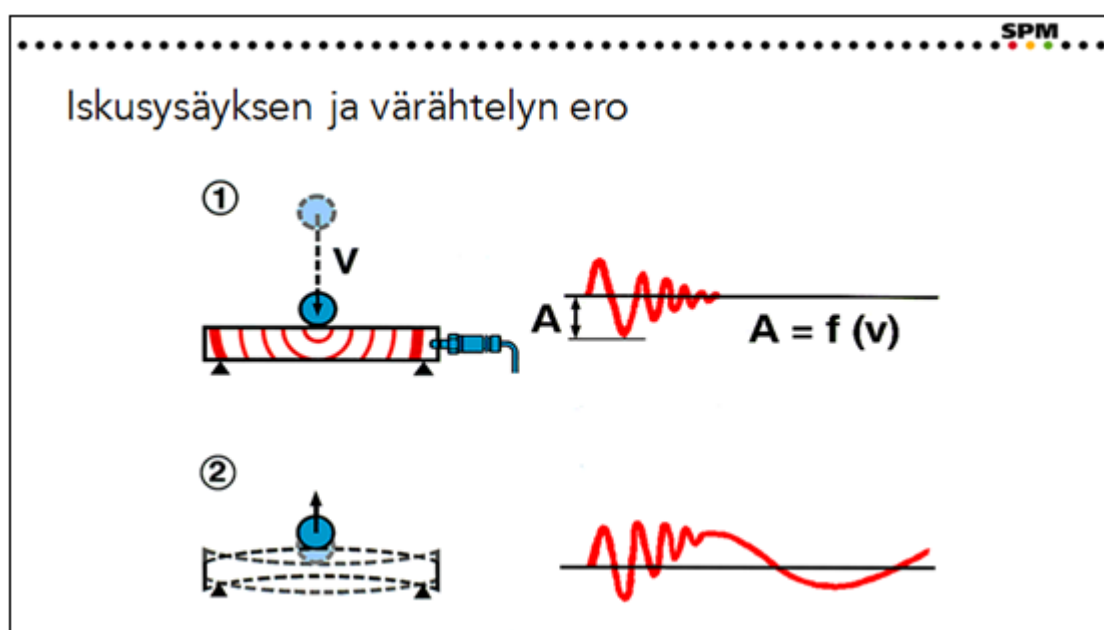
4 KUNNONVALVONTAJÄRJESTELMÄ

Jämsänkosken tehtaan kaksoisviirapuristimilla aiheutuneiden useiden laakerivikojen takia päätettiin syksyllä 2011 tehtaalle hankkia SPM:n kunnonvalvontajärjestelmä SPM HD. Koska aikaisempaa kokemusta kyseisestä järjestelmästä ei tehtaalla ole, niin kokeilumielessä vain toisen puristimen kahdeksan telan käyttöpuolen laakereille asennettiin järjestelmän anturit. Puristimelle asennetussa yksikössä on kuitenkin vielä 24 anturipaikkaa jäljellä. Näin siihen on helppo lisätä antureita, mikäli myöhemmin halutaan asentaa niitä lisää jompaankumpaan puristimista.

Järjestelmä koostuu Intellinova-mittausyksiköstä, Condmaster nova -ohjelmasta sekä iskusysäys- ja kierrosnopeusantureista. Intellinovan tehtävä on vastaanottaa antureilta tulevaa mittaustietoa ja käsitellä sitä. Käsitelty mittaustieto siirretään Condmaster nova -ohjelmaan. Ohjelman käytön päätarkoitus on valita halutut laakerista mitattavat oireet ja antaa niille hälytysrajat, joiden ylittymistä seurataan. Liitteessä 1 on opas Condmasterin peruskäyttöön ja samalla esittely ohjelman tärkeimmistä toiminnoista.

4.1 Tekniikka

SPM:n tekniikka perustuu iskusysäysmenetelmään. Yleensä laakereiden kunnonvalvonta perustuu värinämittaukseen, mutta SPM käyttää lähes ainoana iskusysäysmenetelmää, mikä on erinomainen hitaasti pyörivissä kohteissa. Värähtely johtuu noin 99 prosenttisesti pyörimisliikkeestä, noin 0,01 prosenttisesti kitkasta ja noin 1 prosenttisesti iskuista. SPM järjestelmä tutkii siis näitä iskuja. Kuviossa 2 on hyvin esiteltyä se miten iskumittaus eroaa värähtelymittauksesta. Iskusysäysmenetelmässä mitataan siis iskun voimakkuutta, eikä iskun seurauksena johtuvaa kappaleen värähtelyä, niin kuin värähtelymittaukseen perustuvissa menetelmissä. (SPM 2011, 3.)



Kuvio 2. Iskusysäyksen ja värähtelyn ero (SPM 2011, 7)

Tutkittaessa tyypillisiä iskupulsseja pystytään huomaamaan, että pulssit sisältävät monenlaisia taajuuksia. Pulssit kuitenkin sisältävät erityisesti 32kHz:n taajuutta. Iskusysäysanturi on tehty siten, että sen resonanssitaajuus on juuri tuo 32 kHz. Anturin joutuessa 32 kHz:n värähtelyn taajuus alueelle, rupeaa se resonoimaan. Tämä värähtely johdetaan anturissa pietsokeraamiseen levyyn, jolloin värähtely pystytään mittaamaan. Kuviossa 3 on esiteltynä anturi mittauskohteessa. Toimiakseen halutulla tavalla, anturin pitää olla asennettuna laakerin kuormitusalueelle mahdollisimman lähelle laakeria esimerkiksi laakeripesään. Kuvion 3 tapauksessa ylätelaa kuormittava voima on niin suuri, että tela kuormittaa laakerin yläosaa. Tästä johtuen anturi on asennettu laakeripesän yläosassa. (Sundström 2011, 3.)



Kuvio 3. Iskusysäysanturi mittauskohteessa (Kuvio: Heikki Merisalo 2012)

Laakereiden kierrosnopeuden tietäminen on myös yksi edellytys sille, että iskut pystytään tunnistamaan tietyiksi oireiksi. Kierrosnopeuden mittaamiseen käytetään induktiivista pulssianturia, joka mittaa molempia vetoteloja pyörittävien moottoreiden akselien kierrosnopeutta. Näistä kierrosnopeuksista saadaan laskettua kaikkien muiden telojen kierrosnopeudet ja sitä kautta myös laakereiden kierrosnopeudet.

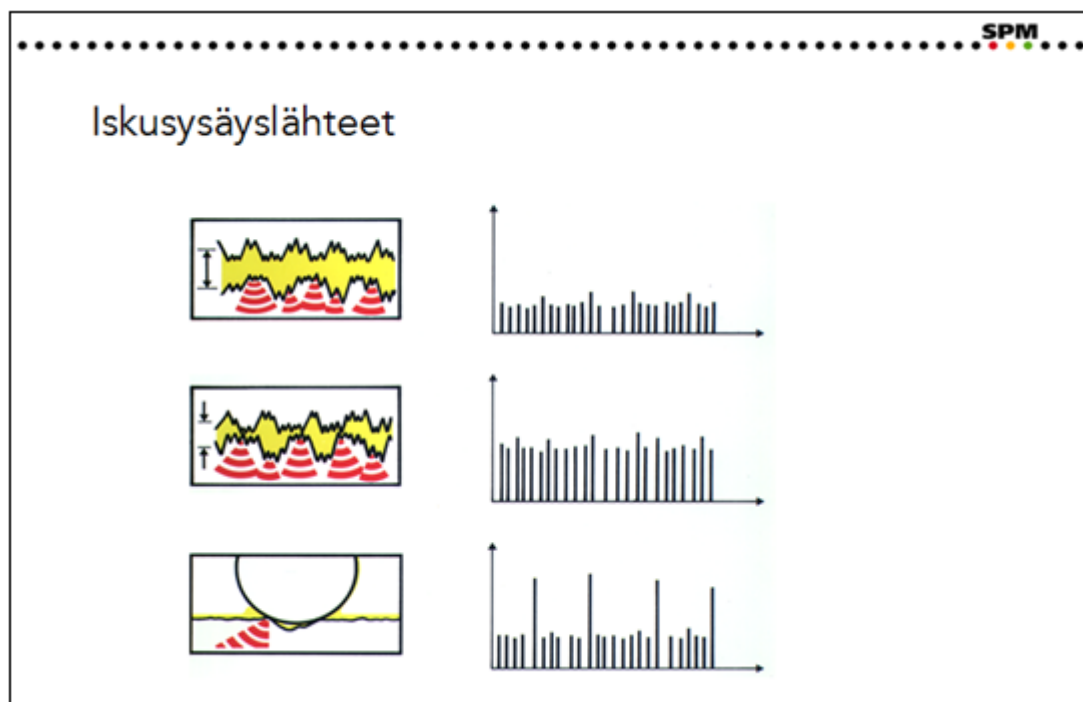
4.2 Oireiden tulkinta

Ohjelmassa pystytään määrittämään halutut laakerista mitattavat oireet. Erilaisia mitattavia oireita on paljon, mutta tärkeimpiä mitattavia oireita kaksoisviirapuristimien kannalta ovat HDc, HDm, BPFO, BPFi ja BPFIM. Condmaster novassa oireille annetaan alempi- ja ylempihälytysraja. Alempaa rajaa kuvataan keltaisella värillä ja ylempää punaisella värillä.

Mittaustulosten trendiä pystyy tarkastelemaan kuvaajista (esim. kuvio 10) ja yksittäistä mittausta pystyy tarkemmin tarkastelemaan spektri-muodossa (esim. kuvio 5). HDc- ja HDm-arvojen kuvaajien pystyakselilla asteikkona käytetään HDn-asteikkoa. Muiden oireiden kuvaajissa pystyakselilla asteikkona on HDesv ja vaaka-akselin asteikko kuvaajissa on tietenkin aika. Mittaustuloksen spektrin pystyy asettamaan näyttämään spektriä kerrannaisten, taajuuden tai kierrosnopeuden mukaan. Pystyakselin asteikkona spektrissä on myös HDesv. Järjestelmä laskee eri algoritmien avulla laakerin kierrosnopeuden ja iskujen suhdetta. Suhteesta se pystyy päättämään, mikä oire on kyseessä kussakin vauriossa.

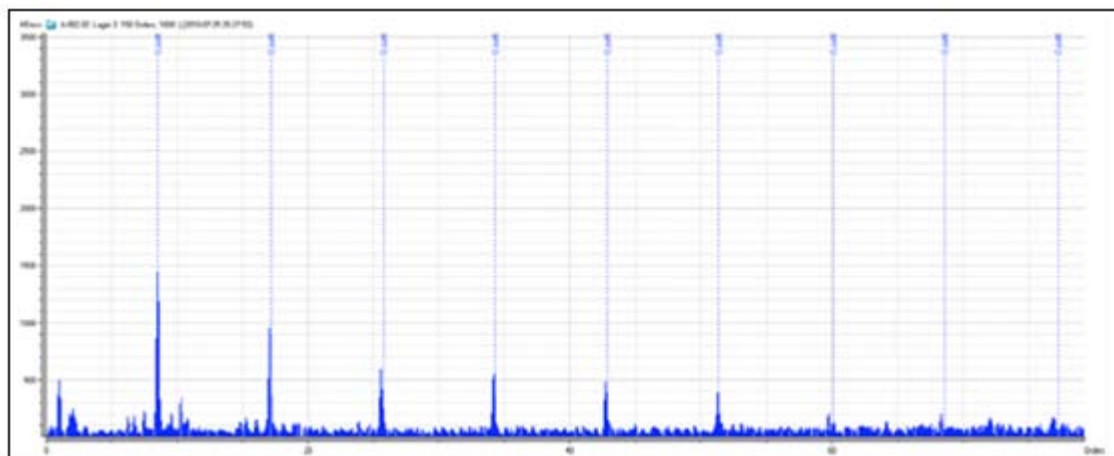
Oireista HDc on ns. mattoarvo, jonka tehtävä on havainnoida kuinka voimakkaita keskimääräisesti iskut ovat. HDc-arvosta pystytään päättämään voitelun taso. Jos kaikkien anturin havaitsemien iskujen voimakkuus lähtee nousemaan, on iskuja pehmentävä voitelukalvo todennäköisesti heikentynyt. Kaksi ylintä kohtaa kuviossa 4 esittelee hyvin, miten HDc-arvo käyttäytyy voitelukalvon muutosten mukaan. (Sundström 2010, 23)

HDm-arvo kuvaa suurinta iskua, mikä on tullut mittauksen aikana. HDm-arvon nousu kertoo anturin havaitsemien iskujen voimakkuuden noususta, jolloin laakerissa on todennäköisesti joku vaurio. Se ei kuitenkaan vielä kerro mikä vaurio on kyseessä, vaan vaurio pitää selvittää muiden oireiden kuvaajista tai spektreistä. Kuvion 4 alimmassa kohdassa on kuvattu HDm-arvon käyttäytyminen vauriotilanteessa. Sääntöä ei siitä ole, mikä on se raja, milloin laakerissa on vaurio HDm- tai HDc-arvon perusteella. Raja pitää itse kuhunkin kohteeseen yksilöllisesti päätellä. Hälytysraja määritetään sopivalle korkeudelle mittausarvon normaalitason yläpuolelle siten, että olosuhteista johtuvat mittausarvon nousut eivät laukaise hälytystä, mutta kuitenkin oikean vaurion tullessa raja on niin matalalla, että vaurio varmasti huomataan. (Sundström 2010, 23)

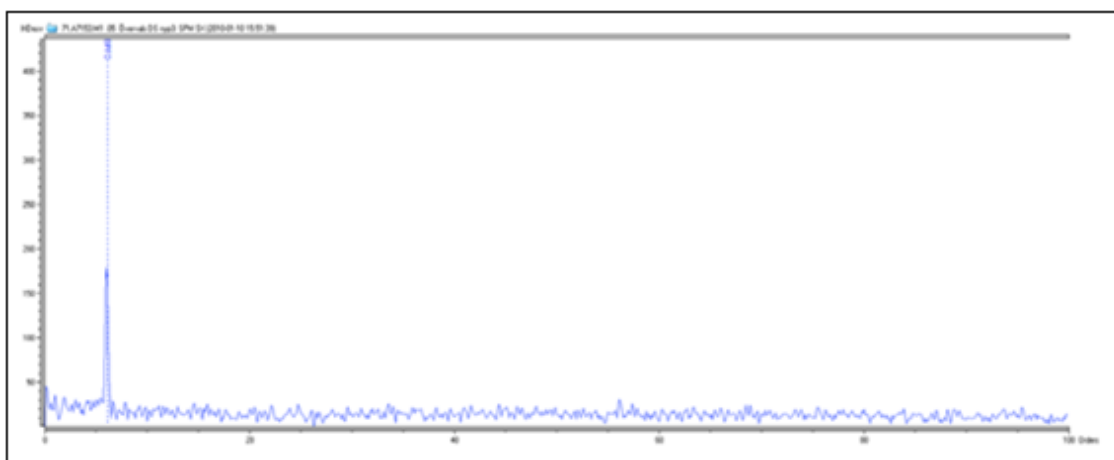


BPFO-arvo kertoo ulkokehävauriosta. Sitä laskeva algoritmi on määritetty siten, että se laskee kierrosnopeuden ja ulkokehän pituuden mukaan ulkokehään osuvat iskut. Kuviossa 5 on SPM:n esimerkki spektri ulkokehävaurioituneesta laakerista otetusta mittauksesta. Amplitudin korkeutta ja sen nousua on hyvä seurata, mutta vielä tärkeämpää on seurata vikakerrannaisten määrää. Kuviossa 6 on SPM:n esimerkki spektri ehjästä laakerista, jossa on yksi korkea amplitudipiikki. Ihanne tapauksessa ehjän laakerin spektrissä ei ole edes yhtä

korkeaa amplitudi piikkiä, mutta usein yksittäinen normaalitasosta paljon korkeammalle nouseva piikki ei tarkoita laakerivauriota. Piikki johtuu olosuhteista, missä laakeri on. Tämä tuo haastetta hälytysrajojen määrittämiselle, koska piikin takia pitää hälytysrajaa nostaa, mutta hälytysrajan pitää kuitenkin olla järkevällä tasolla havaitakseen oikeita vaurioita. (Sundström 2010, 28.)

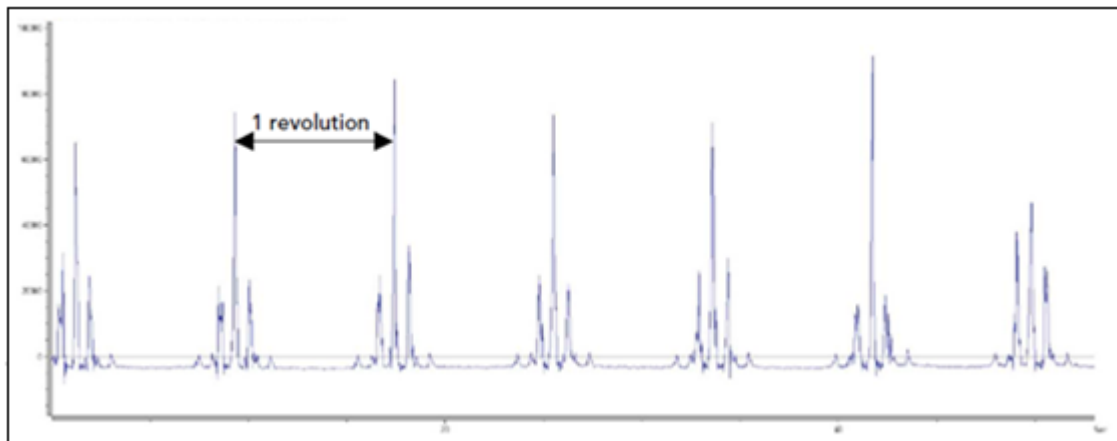


Kuvio 5. Spektri ulkokehävaurioituneesta laakerista (Sundström 2010, 28)



Kuvio 6. Esimerkki spektri korkeasta piikistä. (Sundström 2010, 28)

BPFI-arvo kertoo sisäkehävaurioista. Kuviossa 7 on esimerkki sisäkehävaurioituneen laakerin mittauksen spektristä. Kuvioista pystyy helposti huomaamaan sivunauhat, mitkä ovat yleisiä sisäkehävauriossa. BPFIM-arvo kertoo myös sisäkehävauriosta, mutta se keskittyy enemmän sivunauhojen havaitsemiseen. (Sundström 2010, 27.)



Kuvio 7. Spektri sisäkehävaurioituneen laakerin mittauksista (Sundström 2010, 27)

5 HÄLYTYSRAJAT

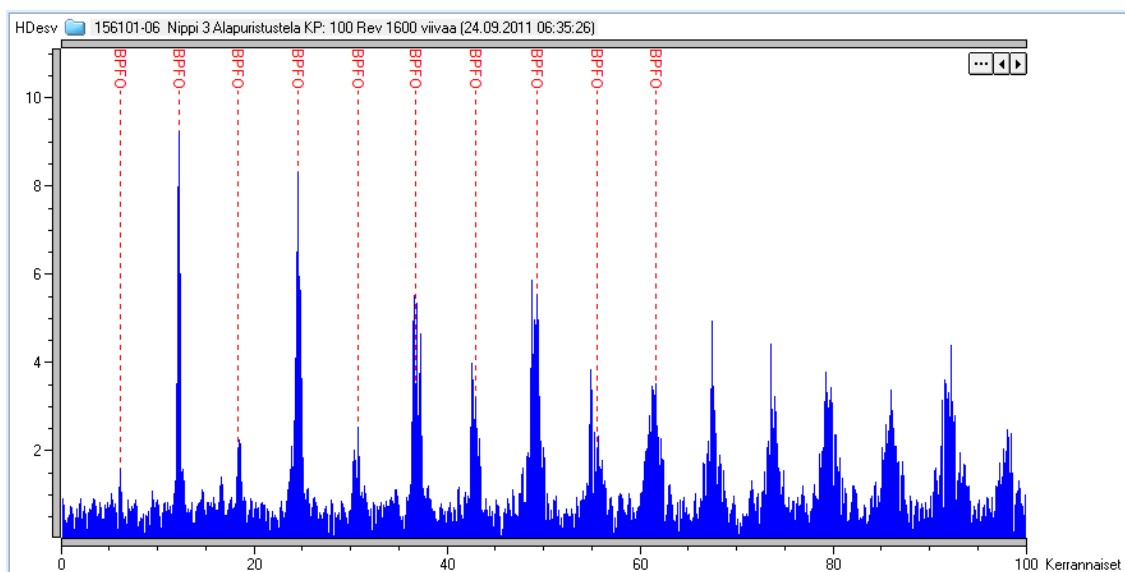
Yksi tärkeimmistä edellytyksistä järjestelmän helppoon ja sujuvaan käyttöön on oikein säädetyt hälytysrajat. Hälytysrajojen määrittämisen haasteellisuus piilee siinä, että jokainen mitattava kohde on omanlaisensa, eikä niitä voi aivan täysin verrata toisiinsa. Mitä isompi laakerien koko ero ja mitä suurempi niiden kuormitusten ero, sitä huonommin niitä voi verrata toisiinsa. On osattava tulkita mittausspektristä, mikä on oikeaa vauriota ja mikä olosuhteiden aiheuttamaa poikkeamaa normaaliarvoista. Hälytysrajojen määrittämiselle ei ole olemassa laskukaavaa, vaan määrittäminen tapahtuu vertailemalla, päättämällä ja järjestelmästä annettua tietoa hyväksikäyttämällä.

Kyseiseen kaksoisviirapuristimeen on asennettu 2 induktiivista pulssianturia kierrosnopeuden mittaamiseen, sekä 8 iskusysäysanturia vetoteloille ja kuudelle puristustelalle. Neljän nipin telojen laakereihin ei ole asennettu antureita ollenkaan, koska nippiä ei käytetä. Jokaiselle mitattavalle laakerille määritetään hälytysrajat HDm-, BPFO-, BPFI- ja BPFIM-arvoille.

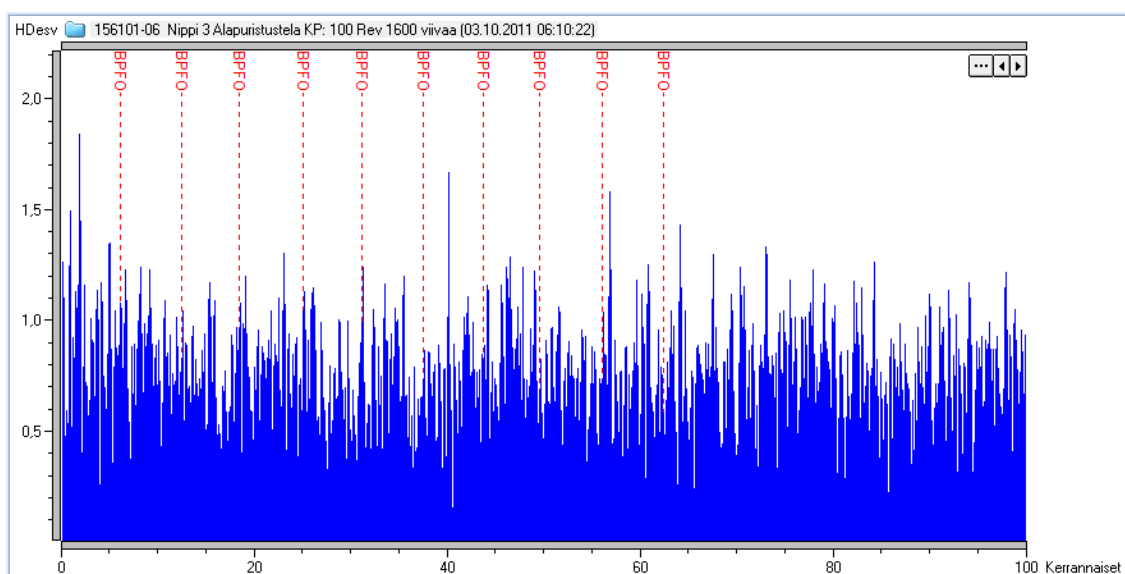
5.1 Lähtötiedot

Järjestelmä otettiin varsinaisesti kaksoisviirapuristimella käyttöön tammikuussa 2012, mutta järjestelmä asennettiin osittain jo syyskuussa 2011, josta lähtien se on kerännyt mittaustietoa laakereista. Syyskuun lopussa havaittiin yhdessä alatelan laakerissa ulkokehä vaurio. Vaurio näkyi järjestelmän tekemissä mittauksissa. Vaikka vaurioituneesta laakerista saatujen mittausten perusteella ei suoraan pystytä määrittämään joka telaan ulkokehän hälytysrajaa, antaa se silti hyvää kuvaa siitä, miten ulkokehävaurio näkyy mittaustuloksissa.

Kyseinen ulkokehävaurio näkyi muutoksena HDm- sekä BPFO-arvoissa. Kuviosta 8 nähdään vaurioituneesta laakerista otetun mittauksen spektri ja kuviossa 9 uuden laakerin mittaustuloksen spektri, joka asennettiin vaurioituneen tilalle. Kuvia vertailemalla pystytään toteamaan, että amplitudin korkeuden muutos voi olla hyvin pieni ehjän ja lievästi vaurioituneen laakerin välillä. Vaurioituneen laakerin pystyy kuitenkin havaitsemaan helposti spektrissä ilmenevistä kerrannaisista.

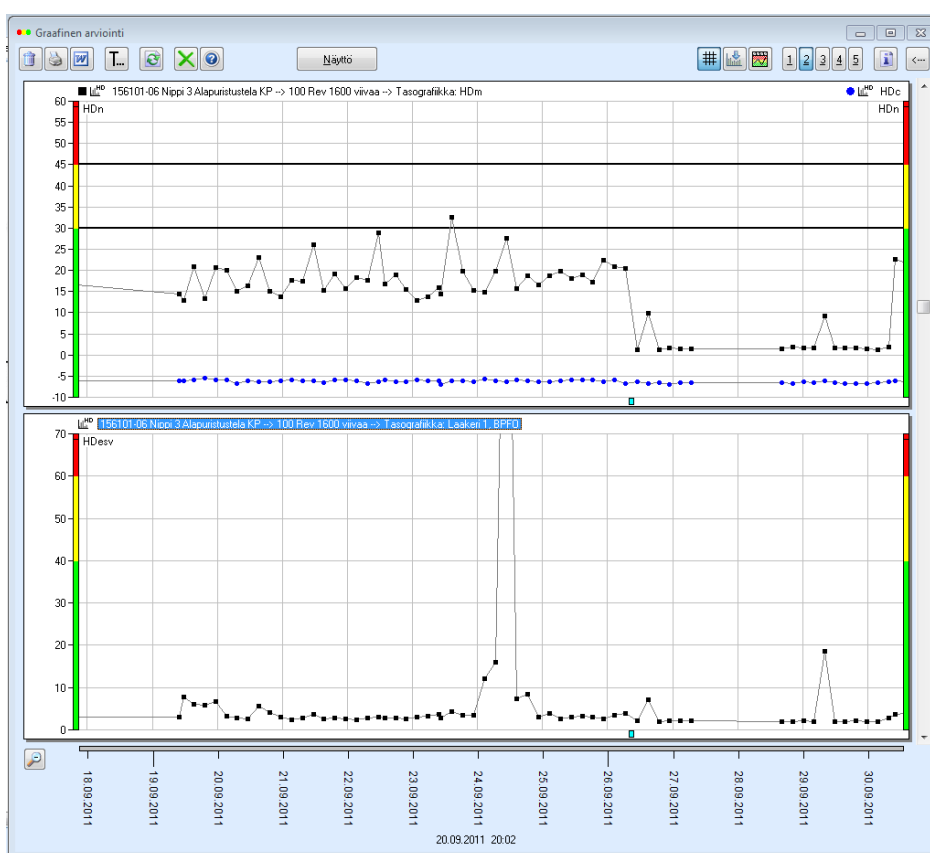


Kuvio 8. Spektri sisäkehävaurioituneen laakerin mittauksista



Kuvio 9. Spektri ehjän laakerin mittauksista

Kuviossa 10 nähdään diagrammit HDm- ja BPFO-arvoista. Vaurioitunut laakeri vaihdettiin 26.09.2011, mikä näkyy selvästi HDm-arvon muutoksena diagrammissa. Diagrammista ei kuitenkaan pystytä toteamaan HDm-arvon nousua. Todennäköisesti laakerissa on ollut vaurio jo järjestelmän käyttöönoton aikaan, joten arvo on ollut korkealla heti alusta lähtien. Hälytysrajojen määrittämisen vaikein tekijä on, että vaurio ei välttämättä näy kovinkaan suurena BPFO-arvon nousuna. Tämä pystytään toteamaan kuviosta 10, kun katsotaan BPFO-arvoja ennen 26.09. ja sen jälkeen. BPFO-arvo ei siis muuttunut juuri lainkaan.



Kuvio 10. Kuvaaja ulkokehävaurioituneen laakerin mittauksista

Tästä vauriosta pystyy siis tekemään ne johtopäätökset, että ulkokehävaurio hyvin todennäköisesti näkyy selvänä HDm-arvon nousuna. Vaikka BPFO kuvaa ulkokehävauriota ei sen arvo välttämättä nouse kovinkaan paljoa, ellei kyseessä ole vakava vaurio. Kuitenkin vaurio näkyy BPFO-arvossa kerrannaisten muodossa.

Kuviossa 11 nähdään fyysisesti laakerivaurio, josta edellä on mainittu. Paras olisi päästä vaihtamaan laakeri juuri tässä vaiheessa. Puristustelojen laakereina ovat samat laakerit joka kohteessa ja lähes samat kuormitukset, joten puristustelojen laakereiden mittausarvojen hälytysrajojen määrittämiseen tämä käy hyvänä vertailukohtana. Vaikka vetoteloilla on isommat laakerit ja isommat kuormitukset, voi näitä mittauksia ainakin suuntaa antavasti vertailla vetotelojen laakereiden mittausarvojen hälytysrajojen määrittämiseen.



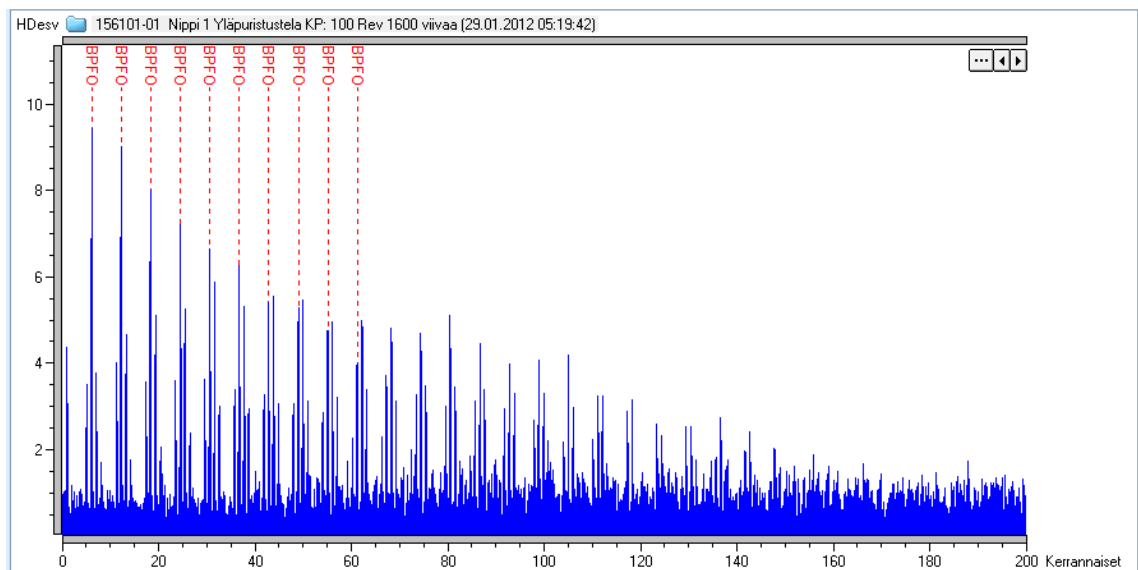
Kuvio 11. Vaurioitunut laakerin ulkokehä (Kuvio: Heikki Merisalo 2012)

Ennen opinnäytetyön aloittamista ei järjestelmä ollut havainnut muita vaurioita. Myöskään käsin tehdyissä tarkastuksissa ei ollut löytynyt muuta laakerivauriota järjestelmän käyttöönoton jälkeen. Oli kuitenkin hyvä onni, että kyseinen laakerivaurio sattui järjestelmän tehdessä jo mittauksia laakereille. Vaurioita tapahtuu kuitenkin keskimäärin puolen vuoden välein. Tästä johtuen olisi hyvinkin saattanut käydä niin, ettei opinnäytetyön aikana olisi tullut mitään vauriota, jota olisi voinut käyttää apuna hälytysrajoja määrittäessä.

5.2 Hälytysrajojen tutkiminen ja testaus

Työn aikana oli tarkoitus seurata laakereiden vika oireita ja mahdollisten vikojen sattua tarkastaa laakeri, jotta saataisiin parempaa varmuutta järjestelmän toimivuudesta. Koska hälytysrajoja ei pysty laskennallisesti määrittämään, olisi niiden perustelemisen kannalta myös hyväksi, jos saisi ennakkotapauksia vioista, joiden perusteella pystyisi määrittämään hälytysrajojen paikat.

Järjestelmä asennettiin varsinaisesti 25.1.2012, jota ennen oli kuitenkin jostain syystä ollut noin 2kk mittainen katko mittauksissa. Heti mittausten uudelleen alkaessa ilmeni 1. nipin ylätelassa ulkokehävikaa. Tämä vaurio-oire oli lähes samanlainen, kuin mikä oli ollut syyskuussa vioittuneessa laakerissa. Kuviossa 12 on spektri 1. nipin ylätelan laakerin mittauservoista. Vertaamalla tuota kuvaa syyskuussa hajonneen laakerin mittauservojen spektriin kuviossa 8, voidaan havaita yhtäläisyys. Kummassakaan spektrissä amplitudin korkeus ei ole kovin suuri, mutta kerrannaisia on molemmissa paljon.



Kuvio 12. Spektri ehjän laakerin mittauksista. Spektri muistuttaa kuitenkin hyvin paljon ulkokehävaurioituneen laakerin mittaustulosta.

Laakeri päätettiin tarkastaa puristimen seistessä 10.2. Tarkastuksessa ei kuitenkaan löydetty mitään viitteitä ulkokehävauriosta, eikä muustakaan vauriosta. Tämä tapaus kertoo siitä, että aina ei pysty tulkitsemaan mittaustuloksia oikein ja turhia laakeritarkistuksia saattaa tulla eteen. On kuitenkin paljon parempi tehdä turhia tarkistuksia, kuin jättää tarkistukset tekemättä ja antaa laakerin hajota väärän tulkinnan takia.

Vetotelojen laakereille oli tyypillistä kuvion 6 mukainen korkea piikki mittaustuloksen spektrissä. Vetotelojen laakereita ei lähdetty kuitenkaan tarkastamaan, koska kohdan 4.2 mukaisesti tällainen piikki ei lähes koskaan johdu oikeasta vauriosta. Kyseinen piikki saattoi myös välillä kadota melkein kokonaan pois ja muutaman päivän päästä ilmestyä takaisin.

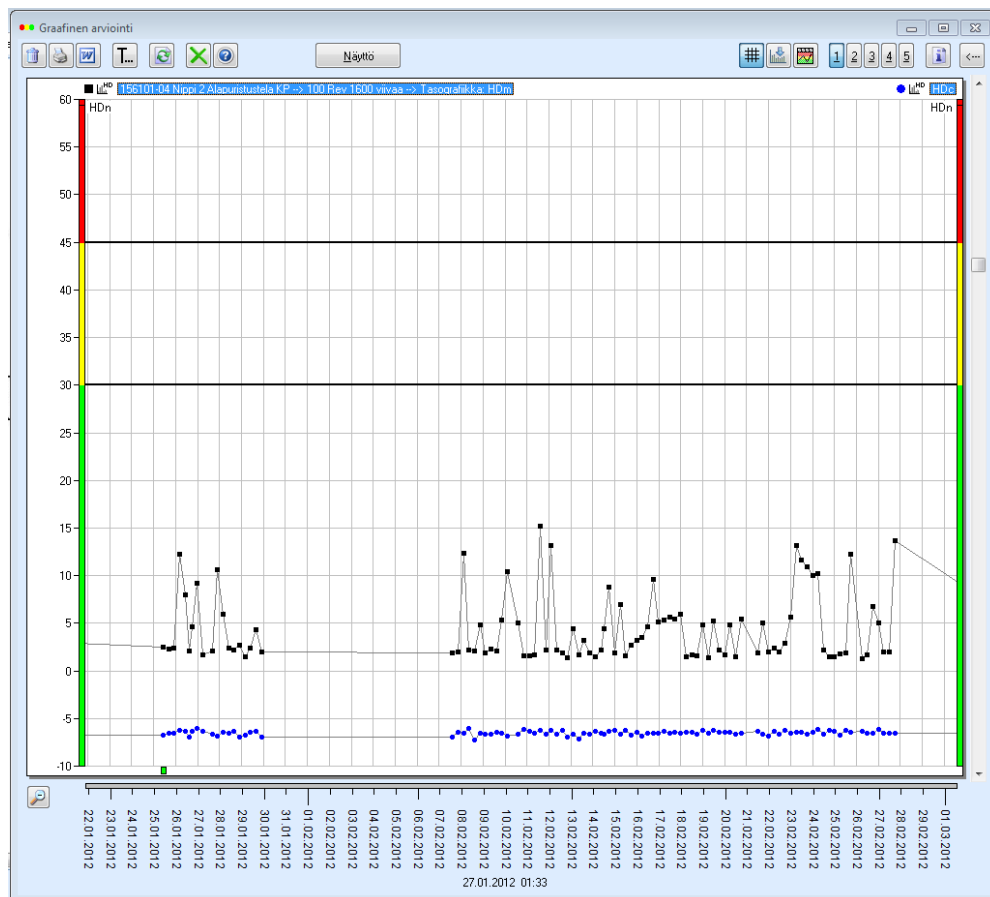
5.3 Hälytysrajojen määrittäminen

Joidenkin oireiden hälytysrajat olivat hyvin helppo ja selvä määrittää, koska kyseiset oireet käyttäytyivät hyvin samalla tavalla ja olosuhteista johtuvat poikkeavuudet olivat vähäisiä. Osaa rajoista oli kuitenkin vaikea päätellä. Lähinnä vaikeutta toi kohteiden erilaisista ominaisuuksista johtuvat vaihtelevat mittaustulokset.

Lähtökohtana hälytysrajojen määrittämiselle oli se, että alempi keltaisella merkitty hälytysraja toimisi mahdollisen vaurion ilmaisijana ja ylempi punaisella merkitty hälytysraja toimisi varman tai ainakin lähes varman vaurion merkinä. Oireet riippuvat niin paljon kohteesta, ettei rajoille ole laskennallista tai muutenkaan tarkkaa määrittämistä. Hälytysrajojen määrittäminen tapahtuu siis tarkkailemalla kohteita ja huomioimalla kunkin kohteen normaaleja piirteitä. Näiden perusteella jokaiselle kohteelle määritetään kohteen ominaisuudet huomioiden yksilölliset hälytysrajat.

5.3.1 HDm:n hälytysraja

HDm-arvon hälytysrajojen määrittäminen oli selkein määrittävä kaikista hälytysrajoista. Selkeys johtui HDm-arvon normaalitason tasaisuudesta. Pienen epävarmuustekijän hälytysrajan määrittämiselle antoi kuitenkin syyskuussa tapahtunut laakerivaurio (kuvio 11). Tällöin HDm-arvo nousi vain vähän normaalitason yläpuolelle, vaikka laakeri oli vaurioitunut. Edellä mainittu normaalitason tasaisuus voidaan hyvin todeta kuviosta 13, jossa HDm-arvo tekee pientä vaihtelua, mutta pysyy kuitenkin tietyllä tasolla. Tämä käyttäytyminen on tyypillistä joka kohteessa. Jos verrataan kohteita toisiinsa, niin normaalitasot ovat tietenkin eri tasolla jokaisen kohteen olosuhteiden ollessa erilaiset toisiinsa nähden.



Kuvio 13. HDm ja HDc oireiden kuvaaja.

HDm-arvon alempi hälytysraja päätettiin asettaa kohteesta riippuen 30:n ja 40:n välille HDn-asteikolla. Turhien hälytysten välttämiseksi raja asetettiin noin 20 yksikköä kunkin kohteen normaalitason yläpuolelle. Rajaa ei haluttu asettaa korkeammalle, koska syyskuussa hajonneen laakerin HDm-arvo oli korkeimmillaa vain noin 33:ssa HDn-asteikolla. Toisaalta Helmikuun aikana nippi 1:den ylätelan HDm-arvo nousi noin 30 yksikön korkeuteen HDn-asteikolla, vaikka laakeri oli täysin ehjä. Tästä syystä hälytysrajaa ei kannattanut laskea lähemmäs normaalitasoa, koska virheellisten hälytysten määrä olisi kasvanut. Turhien hälytysten kasvaessa luotettavuus hälytysrajoja kohtaan laskisi, mikä ei tietenkään olisi hyväksi.

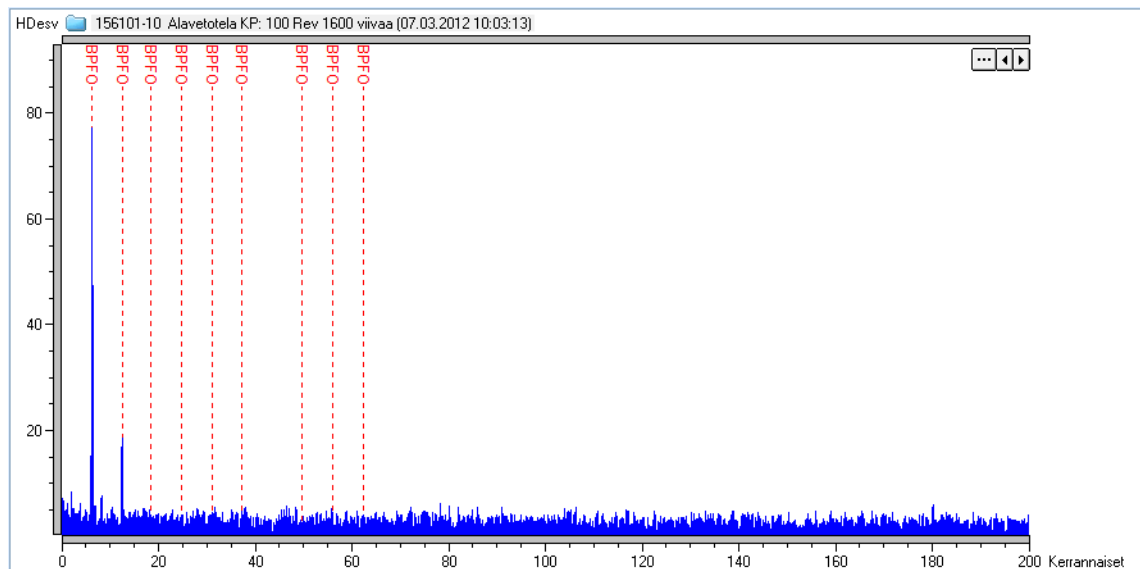
Ylempi hälytysraja haluttiin asettaa tasolle, johon olosuhteista tai muista häiriöistä johtuen HDm-arvo ei nouse. Toisin sanoen ylemmän hälytysrajan ylittyessä laakerissa on varmasti tai ainakin hyvin todennäköisesti vaurio. Ei tietenkään voida olla varmoja siitä, mille korkeudelle HDm-arvo voi nousta ilman oikeaa vauriota. Viiden ensimmäisen kuukauden aikana, joina järjestelmä on laakereiden kuntoa mitannut, ei HDm-arvo missään kohteessa ole noussut ilman oikeaa vauriota yli 40 yksikön korkeudelle HDn-asteikolla. Tämän perusteella päätettiin ylempi hälytysraja asettaa 20 yksikköä korkeammalle kuin alempi hälytysraja. Kohteesta riippuen ylempi hälytysraja asetettiin siis 50 ja 60 yksikön korkeudelle HDn-asteikolla.

5.3.2 BPFO:n hälytysraja

Suurimmassa osassa puristimilla tapahtuneista laakerivaurioista hajoamisen syy on ollut ulkokehävaurio. Tästä syystä BPFO-arvon hälytysrajojen on tärkeää olla mahdollisimman oikein määritetyt. BPFO-arvon hälytysrajojen määrittäminen ei ollut niin selvä määrittää kuin HDm-arvon hälytysraja. Epäselvyyttä toi BPFO-arvon normaalitason suurempi heittelehtiminen. Myös olosuhteista johtuva kuvion 14 mukainen piikki oli yleistä useassa mittauskohteessa. Kyseinen piikki nostaa selvästi BPFO-arvon normaalitasoa, jolloin hälytysrajaa pitää nostaa. Hälytysrajan nosto taas lisää mahdollisuutta, että oikea vaurio jää huomaamatta.

Ihanteellisin tilanne olisi, että laakeri ei pääsisi huonompaan kuntoon, kuin syyskuussa hajonnut laakeri oli (kuvio 11), vaan se vaihdettaisiin juuri tuossa kunnossa uuteen. Tällaisen vaurion huomaaminen ei vain aina onnistu. Kuviosta 10 voidaan todeta, että BPFO-arvo on niin matalalla kyseisessä vauriotilanteessa, että sen perusteella ei voida varmaksi sanoa, onko kyseessä vaurio vai kunnossa oleva laakeri. Vaikka kyseistä tilannetta ei suoraan voida vaurioksi todeta, voidaan sen perusteella kuitenkin epäillä vauriota ja tarvittaessa tarkistaa laakeri.

BPFO-arvon alemman hälytysraja asetettiin kohteesta riippuen 25 ja 90 yksikön välille HDesv-asteikolla. Syyskuisessa ulkokehävauriossa BPFO-arvo oli yhtä mittausta lukuun ottamatta alle 30 yksikön korkeudella HDesv-asteikolla, joten oli selvää, että BPFO-arvon hälytysrajan oli hyvä olla mahdollisimman alhainen. Mihinkään kohteeseen ei kuitenkaan hälytysrajaa voitu alle 25:n laittaa, koska monessa kohteessa BPFO-arvo heittelee lähellä 20:tä ilman oikeaa vauriota. Suuri vaihtelu kohteiden välillä johtui BPFO-arvon normaalitason erilaisuudesta eri kohteiden välillä, sekä ominaisuuksista johtuvista piikeistä, joista aikaisemmin kerroin. Kuviosta 14 pystytään hyvin havaitsemaan korkea piikki, jonka takia hälytysraja pitää asettaa korkeaksi, vaikka BPFO-arvon normaalitaso on matala.



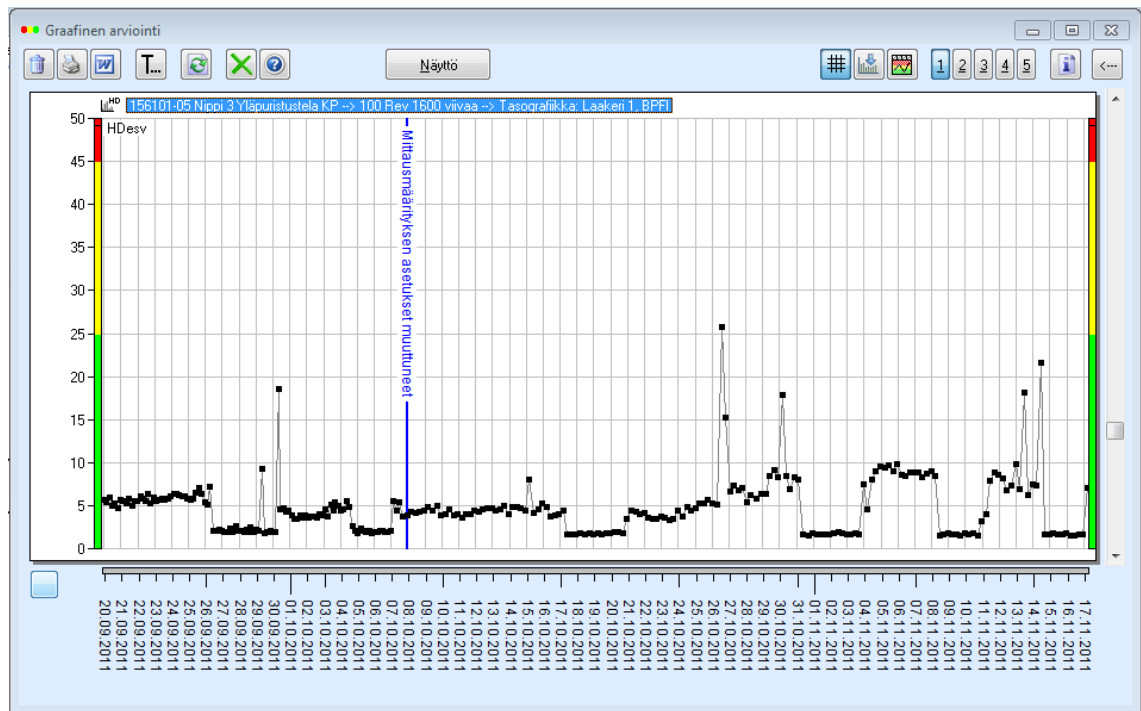
Kuvio 14. Spektri alavetotelan mittauksista.

Ylempi hälytysraja päätettiin laittaa paljon korkeammalle kuin alempi hälytysraja, koska BPFO-arvon trendille on tyypillistä nousta ominaisuuksista johtuvista syistä. Hälytysrajan korkealle asettamisella haluttiin varmistaa, ettei ylempi hälytysraja varmasti ylity turhaan. Puristustelojen laakereille ylempi hälytysrajan päätettiin asettaa 30 yksikköä korkeammalle kuin alempi hälytysraja, koska niissä kohteissa ei järjestelmän käytön aikana ole BPFO-arvo noussut ilman vauriota yli 35 yksikön HDesv-asteikolla. Vetotelojen laakereille ylempi hälytysraja päätettiin asettaa 50 yksikköä alemman hälytysrajan yläpuolelle, koska niissä kohteissa kuvion 14 mukainen piikki oli tyypillinen ja korkeimmillaan 90 yksikön korkeudella.

5.3.3 BPFIn hälytysraja

BPFI-arvon hälytysrajojen määrittäminen tapahtui lähes täysin kunkin kohteen normaalitason mukaan. Järjestelmän käytön aikana ei ole tapahtunut mitään sisäkehävauriota, jonka mittaustulosten perusteella pystyisi perustelemaan hälytysrajojen määrittästä. Koska sen parempia perusteluja sisäkehäoireiden hälytysrajoille ei ole, ovat hälytysrajat lähinnä suuntaa antavia.

Jokaisessa kohteessa oli selvä normaalitaso, mutta joissakin kohteissa mittaustulokset heittelevät välillä yli normaalitason. Kuviossa 15 on tyypillinen mittaustrendi, jossa on havaittavissa selvä normaalitaso, mutta välillä yksittäiset mittaustulokset heittelevät yli normaalitason. Puristustelojen laakereille BPFI-arvon alempi hälytysraja päätettiin asettaa 25 ja 30 yksikön välille HDesv-asteikolla, riippuen kohteen normaalitasosta ja sen yli nousseiden yksittäisten mittaustulosten korkeudesta. Niin kuin kuviossa 15 nähdään, saattaa jotkut yksittäiset mittaukset nousta yli 25 yksikön. Mielestäni kuitenkin noin kerran kuussa tullut turha hälytys ei vähennä järjestelmän uskottavuutta niin paljo, että hälytysrajaa kannattaisi sen takia nostaa korkeammalle. Ylemmän hälytysraja puristusteloille asetettiin 30 yksikköä alemman hälytysrajan yläpuolelle. Korkeimmillaan puristusteloilla yksittäiset mittaukset nousivat ehjällä laakerilla noin 30 yksikön korkeudelle, joten ylemmän hälytysraja asetettiin tasolle, jonne nämä yksittäiset mittaukset eivät todennäköisesti nouse.



Kuvio 15. BPF1 oireen kuvaaja

Vetotelojen laakereilla BPF1-arvon normaalitasot olivat selvästi korkeammalla kuin puristusteloissa, joten niiden alemman hälytysraja asetettiin 40 ja 60 yksikön välille HD Desv-asteikolla. Myös yksittäiset normaalitasosta poikkeavat mittaukset nousivat vetotelojen laakereilla korkeammiksi. Korkeimmillaan normaalitasosta poikenneet yksittäiset mittaustulokset nousivat vetoteloilla noin 50 yksikön korkeuteen HD Desv-asteikolla. Ylempi hälytysraja päätettiin asettaa 40 yksikköä alemman hälytysrajan yläpuolelle, jotta yksittäiset mittaukset eivät varmasti nousisi rajan yli.

5.3.4 BPFIM:n hälytysraja

BPFIM-arvon hälytysrajojen määrittäminen meni oikeastaan samaan tapaan kuin BPF-arvo, koska molemmat mittaavat sisäkehävaurioita, joista ei vaurioesimerkkiä ole. Puristustelojen laakereilla BPFIM-arvon normaalitaso oli noin 5 ja 10 yksikön välillä HDesv-asteikolla. Yksittäiset normaalitasosta poikkeavat mittaustulokset olivat korkeimmillaan noin 30 yksikön korkeudella. Näiden syiden perusteella päätettiin alempi hälytysraja asettaa puristusteloilla kohteesta riippuen 30 ja 40 yksikön välille HDesv-asteikolla. Puristustelojen laakereilla yksittäiset lähelle 30 yksikköä nousevat mittaustulokset olivat harvinaisia. Harvinaisuudesta huolimatta ylempi hälytysraja haluttiin asettaa 30 yksikköä alemman hälytysrajan yläpuolelle, jotta ylempi hälytysraja ei varmasti ylittyisi turhaan.

Vetotelojen laakereilla BPFIM-arvon normaalitaso oli paljon korkeammalla noin 30 ja 40 yksikön korkeudella. Myös yksittäiset normaalitasoa korkeammalle nousevat mittaukset nousivat vetotelojen laakereilla korkeammalle noin 60 yksikön korkeudelle. Näistä syistä johtuen päätettiin vetotelojen laakereille BPFIM-arvon alempi hälytysraja asettaa 50 ja 70 yksikön korkeudelle HDesv-asteikolla. Yksittäisten mittaus nostessa noinkin korkealle, päätettiin ylempi hälytysrajan asettaa 40 yksikköä alemman hälytysrajan yläpuolelle turhien hälytysten välttämiseksi.

5.4 Hälytysrajojen yhteenveto

Jotta määritetyistä hälytysrajoista saisi selvän käsityksen, on taulukkoon 1 kirjattu kaikki määritetyt hälytysrajat. Liitteessä 2 on kuvattuna myös nämä hälytysrajat diagrammeissa. Hälytysrajoista pystyy joidenkin oireiden kohdalla hyvin huomaamaan eron puristustelojen ja vetotelojen välillä. Vetoteloilla laakerit ovat isommat ja kuormitukset suuremmat. Tämä havainnollistaa hyvin, että hälytysrajat tulevat erilaisiksi eri kohteiden olosuhteista riippuen.

Taulukko 1. Oireiden hälytysrajat.

	HDm (HDn)		BPFO (HDesv)		BPFI (HDesv)		BPFIM (HDesv)	
	Alempi	Ylempi	Alempi	Ylempi	Alempi	Ylempi	Alempi	Ylempi
Nippi1 ylätela	40	60	40	70	25	55	35	65
Nippi1 alatela	40	60	40	70	25	55	35	65
Nippi2 ylätela	30	50	50	80	25	55	35	65
Nippi2 alatela	35	55	30	60	25	55	35	65
Nippi3 ylätela	35	55	50	80	25	55	40	70
Nippi3 alatela	40	60	30	60	25	55	35	65
Ylävetotela	40	60	80	130	55	95	70	110
Alavetotela	40	60	90	140	25	45	50	90

6 LAAKEREIDEN KÄYTTÖIÄN PARANTAMINEN

Opinnäytetyön aikana ei lähdetty tutkimaan laakerivaurioiden syitä, vaan SKF:n sekä UPM:n työntekijöiden kanssa mietittiin mahdollisia laakerivaurioiden aiheuttajia. Tarkoituksena ei siis ollut saada selville syitä laakerivaurioihin, vaan tehdä esiselvitystä, joka helpottaisi vauriosyiden paikallistamista opinnäytetyön jälkeen. Tässä kappaleessa on selvitetty lähtötietoja aikaisemmista laakerivaurioista, mahdollisia laakerivaurioiden aiheuttajia ja niiden pohjalta laadittuja selvityksiä.

6.1 Tietoja aikaisemmista laakerivaurioista

Kohdassa 5.1 mainitun laakerivaurion lisäksi kaksoisviirapurismilla oli tapahtunut kaksi muuta laakerivauriota, joiden vaurioituneet laakerit oli jätetty talteen. Kuviossa 16 oleva laakeri on kaksoisviirapuristin kahden ensimmäisen nipin alatelan käyttöpuolelta. Niin kuin kuvioista näkee, laakeri on pahasti vaurioitunut niin sisäkehältään kuin ulkokehältäänkin.



Kuvio 16. Kaksoisviirapuristin kahden vaurioitunut laakeri. (Kuvio: Heikki Merisalo 2012)

Kuviossa 17 on myös kaksoisviirapuristin kahden vaurioitunut laakeri. Laakeri on neljännen nipin alatelan käyttöpuolelta. Kuviosta näkee että laakerin sisäkehä on haljennut kokonaan, mutta myös ulkokehä on haljennut samalla tavalla kuin sisäkehä. Kaksoisviirapuristimilla on näiden kolmen vaurion lisäksi tapahtunut muitakin vaurioita, mutta dokumentoinnin puuttumisen takia ei vaurioista ole tietoa. Kuvioden 16 ja 17 laakereille oli tarkoitus teettää tarkempi vaurio analyysi, mutta se ei ehtinyt vielä valmistua tämän opinnäytetyön aikana.



Kuvio 17. Kaksoisviirapuristin kahden vaurioitunut laakeri (Kuvio: Heikki Merisalo 2012)

6.2 Parannusehdotukset

Yhtenä mahdollisena vauriotekijänä saattoi olla laakeriin päässyt kosteus. Laakeripesän rakenne ja tiivistys on kuitenkin sellainen, että kosteutta ei pitäisi pystyä laakeriin pääsemään. Voiteluaineen sekaan päässyt kosteus voi aiheuttaa pahoja vaurioita, joten on järkevää kuitenkin varmistaa onko kosteudella ollut osuutta kaksoisviirapuristimilla tapahtuneisiin vaurioihin. Laakerin voiteluaineesta päätettiin ottaa näyte SKF:lle tutkittavaksi, jotta

saataisiin varmuus mahdollisesti voiteluaineeseen päässeestä kosteudesta. Testi ei kuitenkaan ehtinyt valmistua tämän opinnäytetyön aikana. Kosteuden mahdollisesti aiheuttamista vaurioista voi myös löytyä viitteitä kohdan 6.1 laakereista, jotka lähetettiin SKF:lle tutkittavaksi. Tämänkään testin tulokset eivät ehtineet valmistua opinnäytetyön teon aikana.

Toinen huomiota herättävä seikka oli kuormitukset. Kaksoisviirapuristimissa teloja kuormitetaan toisiaan vasten hyvin voimakkaasti. Tämä on tietenkin ollut tiedossa jo puristimia suunniteltaessa, mutta ensimmäiset laakerivauriot sattuivat 4 vuoden käytön jälkeen. Tämän jälkeen vaurioitui useampi laakeri lyhyen jakson sisällä. Yhtäaikaiset vauriot saattoivat johtua siitä, että samanlaiset laakerit tulivat suunnilleen samoissa olosuhteissa samaan aikaan tiensä päähän. Tämä pisti kuitenkin miettimään olisiko 4 vuoden kuormitus mahdollisesti muokannut rakenteita. Erityisesti laakeripesät jotka toimivat samalla vipuvarsina teloja kuormitettaessa, ovat kovan kuormituksen alaisina.

Liitteessä 3 on laskettu laakeriin kohdistuvat voimat. Vertailemalla liitteessä laskettuja dynaamista ja staattista kantavuuslukua kohdan 3.2 kirjallisiin arvoihin, pystytään toteamaan, että laakerit eivät ainakaan kuormituksesta johtuen pitäisi hajota. Laskuista ei kuitenkaan selviä kestävätkö laakeripesät tämän kuormituksen. Tämä kyseinen asia on tutkimisen arvoinen, vaikka siihen ei enempää kantaa opinnäytetyössä otettukkaan.

7 JÄRJESTELMÄN MUUT MAHDOLLISET KÄYTTÖKOHTEET

Opinnäytetyössä oli myös tarkoitus miettiä muita mahdollisia käyttökohteita SPM:n kunnonvalvontajärjestelmälle UPM:n Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailla. Kaksoisviirapuristimista vain toisen puristimen käyttöpuolen laakerit oli anturoitu, joten myös järjestelmän laajentaminen kaikkiin kaksoisviirapuristimien laakereihin oli mietinnän arvoinen asia.

7.1 Kaksoisviirapuristimet

Suurimmat vaikuttavat asiat mietittäessä järjestelmän laajentamista molempiin puristimiin lienee järjestelmän luotettavuus ja kuinka kalliiksi laajentaminen käy. Luotettavuuden osalta pohdittava asia on, että pystyykö järjestelmä huomaamaan vauriot riittävän ajoissa ja tarpeeksi luotettavasti. Rahallisesti suurin kysymys lienee halutaanko investoida järjestelmään vai otetaanko riski mahdollisesta isommasta vauriosta. Tietenkin laakereita pystyy valvomaan muullakin tapaa kuin kyseisellä järjestelmällä, mutta ei varmasti yhtä hyvin.

Opinnäytetyön aikana ei yhtä vauriota lukuun ottamatta tullut muita laakerivaurioita, joiden perusteella olisi pystynyt arvioimaan järjestelmän luotettavuutta. Järjestelmän mittaukset antoivat opinnäytetyön aikana ristiriitaisia tuloksia luotettavuuden puolesta. Luotettavuutta nosti tämä yksi vauriotapaus, jonka järjestelmä hyvin tunnisti. Ristiriitaa kuitenkin teki toinen tapaus, jossa mittaukset olivat lähes identtiset tuohon vaurioon nähden, mutta tässä tapauksessa mitään vauriota ei ollut. Kyseinen vaurioitunut laakeri ei ollut kerinnyt vielä vaurioitua kovin pahasti, joten mittaustulokset olisivat todennäköisesti nousseet, jos laakeri olisi jätetty vielä pidemmäksi ajaksi kaksoisviirapuristimeen. Tämä antoi järjestelmästä sellaisen kuvan, että vaurion alkuaikoina ei pystytä varmaksi sanomaan, onko kyse vaurioituneesta laakerista vai ehjästä laakerista. On kuitenkin todennäköistä, että järjestelmä huomaa yhtään huonompaan kuntoon joutuneen laakerin, kuin mitä tämä kyseinen kuvion 11 tapaus on. Luotettavuuden puolesta järjestelmä olisi siis hyvä investointi, koska sillä varmasti pystyttäisiin estämään isommat vauriot, joissa laakeri vaurioituu pahasti ja mahdollisesti hajottaa samalla muitakin osia.

Rahallisesti järjestelmän laajentaminen molemmille puristimille tulee varmasti kalliimmaksi, kuin satunnaiset laakerin vaihdot. Kuitenkin laakeri pahasti hajotessaan saattaa hajottaa muitakin osia, jolloin kustannukset nousevat. Pahimmassa tapauksessa kaksoisviirapuristinta ei saada korjattua tarpeeksi nopeasti laakerivaurion jälkeen, mikä aiheuttaa tuotantotappioita. Tässä tapauksessa järjestelmän hinta on vähäinen.

Järjestelmän hankkiminen molemmille puristimille tulisi maksamaan noin 22 000 – 26 000 € riippuen siitä, hankkiiko kokonaan uuden järjestelmäyksikön vai lisääkö antureita vanhaan (SPM 2012, 1). Anturit ja niiden kaapelit ovat järjestelmän kalleimmat osat, joten paljoka halvemmaksi ei tule vaikka jo asennettuun järjestelmään hankkisi lisää antureita. Kustannusten vertailu järjestelmän ja mahdollisten vaurioiden välillä on sinänsä hankalaa, koska mahdollisista vaurioista aiheutuvia kustannuksia on vaikea arvioida. Järjestelmän investointi on todennäköisesti kuitenkin järkevä ratkaisu pitkällä aikavälillä.

7.2 Muut kohteet

SPM HD kunnonvalvontajärjestelmä on erikoistunut ja parhaimmillaan hitaasti pyörivissä kohteissa. Tästä syystä järkevintä oli rajata kohteet kierrosnopeuden perusteella. Paperiteollisuudessa on paljon kohteita mihin järjestelmää pystyy hyödyntämään. SPM on asentanut järjestelmänsä muilla paperitehtailla esimerkiksi juurikin viirapuristimiin, telapuristimiin, erilaisiin kuljettimiin ja sekoittimiin.

Kaipolan ja Jämsänkosken tehtailla kohteet, joihin järjestelmää voisi soveltaa, sijaitsivat lähinnä hiertämöllä ja siistaamolla. Itse paperikoneilta mahdollisia kohteita ei montaa löydy, koska kierrosnopeudet siellä ovat lähes kaikissa kohteissa korkeat. Kuviossa 18 on siistaamolla sijaitseva ruuvipuristin, jonka kierrosnopeus on noin 17 r/min. Siistaamolla on myös toinen ruuvipuristin, jonka kierrosnopeus on noin 6 r/min.

Hiertämöllä kaksoisviirapuristimen lisäksi muita mahdollisia kohteita on esimerkiksi hakesäiliön ruuvit, joiden laakereiden kuntoa on vaikea valvoa. Kiekkosuotimissa ja muissa suotimissa on myös matala kierrosnopeus. Huonona puolena näissä kaikissa kohteissa on, että niissä mitattavia laakereita ei ole montaa. Tästä syystä ihan samanlaista järjestelmää ei näihin kohteisiin kannata laittaa, kuin mitä kaksoisviirapuristimella on. SPM:llä on tarjota todennäköisesti kuitenkin toimiva ratkaisu myös näihin kohteisiin.



Kuvio 18. Ruuvipuristin 1. Kierrosnopeus noin 17 r/min (Kuvio: Pertti Haromo 2012)

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Opinnäytetyön aikana SPM HD kunnonvalvontajärjestelmä ei päässyt aivan täysin näyttämään potentiaaliaan, koska laakerivaurioita ei yhtä lukuun ottamatta tullut. Kuitenkin järjestelmän havaitsema laakerivaurio antoi luottamusta järjestelmää kohtaan ja järjestelmän uskotaan havaitsevan varmasti jatkossa ilmenevät laakerivauriot. Hitaasti pyörivät kohteet ovat aina hankalia kohteita kunnonvalvonnan puolesta. Iskusysäysmenetelmä on kuitenkin toimiva ratkaisu näissä kohteissa ja varmasti varteenotettava vaihtoehto valittaessa kunnonvalvontajärjestelmää tämän tyyppisiin kohteisiin.

Hälytysrajoista olisi varmasti tullut luotettavampia, jos olisi ollut enemmän laakerivaurioita, joiden perusteella määrittää rajoja. Hälytysrajat ovat nyt kuitenkin oikeilla kohdilla. Jos laakerivaurioita jatkossa ilmenee, on rajojen muuttaminen niiden perusteella nyt helpompaa. Opinnäytetyö toimii myös hyvänä apuna järjestelmän opiskelussa UPM:n työntekijöille, jos ei aikaisemmin ole järjestelmää käyttänyt.

Opinnäytetyössä ei mitään ratkaisuja vaurio ongelmiin ole, mutta tiedoista on todennäköisesti hyötyä selvittäessä tarkempia syitä vaurioihin. Osa tiedoista on kyllä ollut UPM:n työntekijöillä tiedossa ennen opinnäytetyötä, mutta tietoja ei ole juurikaan dokumentoitu. Opinnäytetyö toimii siis samalla myös dokumenttina tiedossa olevista asioista.

9 LÄHTEET

Airila, M., Ekman, K., Hautala, P., Kivioja, S., Kleimola, M., Martikka, H., Miettinen, J., Niemi, E., Ranta, A., Rinkinen, J., Salonen, P., Verho, A., Vilenius, M., Välimaa, V. 1995. Koneenosien suunnittelu. Helsinki: Werner Söderström Oy.

Andritz. 2007. Kaksoisviirapuristin TWP 425 ML, Asennus-, käyttö- ja huolto-ohje.

SKF. 1991. Laakerikirja. Torino: Stamperia Artistica Nazionale.

SPM. 2011. Patentoitu iskusysäysmenetelmä Shock Pulse Method.

SPM. 2012. Tarjous 4750/12 2012 Intellinova yksikön lisäys. Espoo.

Sundström, T. 2010. An Introduction to the SPM HD Method. Strängnäs.

UPM-Kymmene Oyj. 2011. Biometsäteollisuuden edelläkävijä.

UPM-Kymmene Oyj. 2010. Jokilaakson tehtaات.

10 LIITTEET

- 1 Condmaster nova –käyttöopas
- 2 Hälytysrajat
- 3 Laakeriin kohdistuvien voimien laskeminen

Condmaster nova -manuaali



Manuaali Condmasterin oleellisimmista perustoiminnoista ja niiden käytöstä, seurattaessa UPM-Kymmene Jämsänkosken tehtaan hiertämön kaksoisviirapuristin 1:n laakereiden kuntoa.

Oleellisten toimintojen esittely

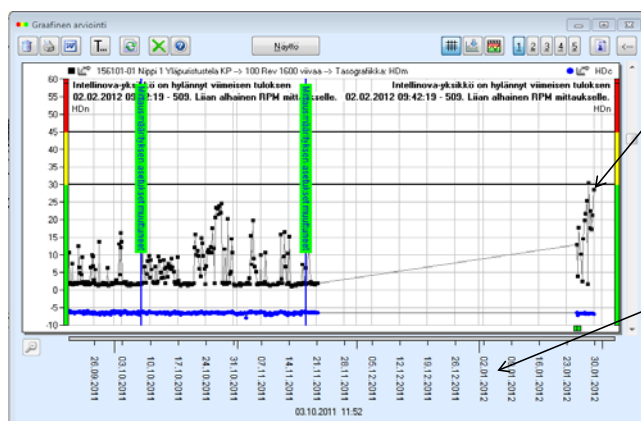


The screenshot displays the Condmaster Nova software interface. At the top, the title bar reads "Condmaster Nova". Below it, a navigation menu includes "Kunnossapito", "On line", "Tulosta", "Bekitevit", and "Järjestelmä". The main window shows a schematic diagram of a roller assembly with 16 numbered measurement points (1-16) and 10 numbered rollers (1-10). The interface includes several data fields and buttons: "Mittauspistetiedot", "Mittaustulokset", "Kommentit", "Graafinen arviointi", and "Spektri". A blue callout box on the right contains the text: "Kuvassa esiteltynä toiminnot, joita tarvitset tässä manuaalissa." The browser address bar shows "156101 Valkoispuu 1".

(jatkuu)

Graafinen arviointi

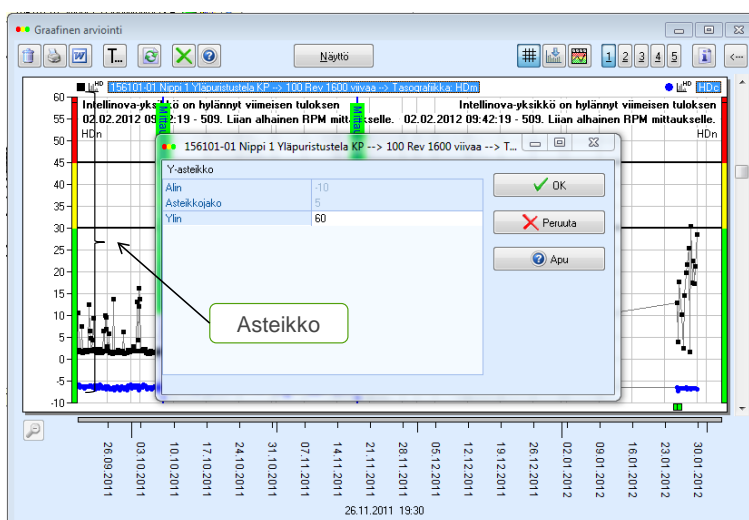
Graafiseen arviointiin pääset kaksoisklikkaamalla haluamasi mittapisteen graafinen arvio kuvaketta aloitussivulla.



Halutun mittauksen spektri kuvan saat avattua painamalla mittauksen päällä (nuolen osoittama piste) oikeaa hiiren painiketta, jolloin aukeaa pieni valikko, josta saa avattua spektrin.

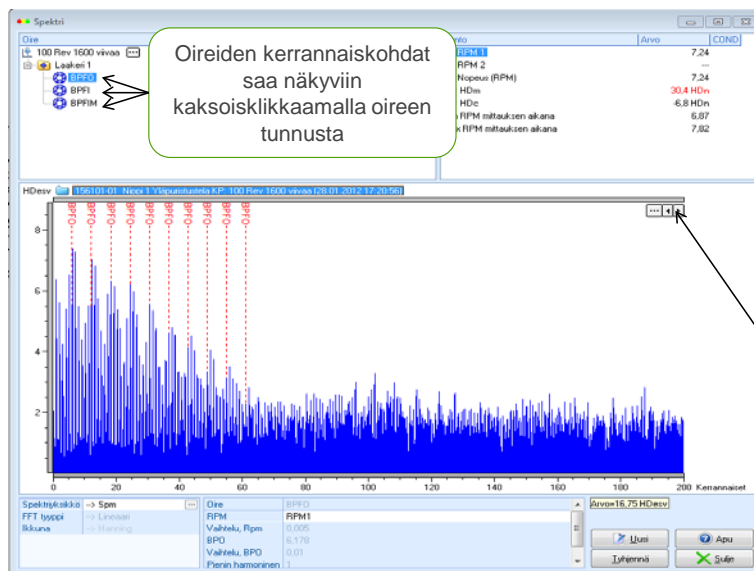
Aikajakso tarkentuu rajaamalla hiiren vasen painike pohjassa haluttu aikajakso nuolen osoittamalla alueella.

Graafisen arvioinnin asteikon muuttaminen



Asteikkoa pääsee muuttamaan painamalla diagrammin päällä hiiren oikeaa painiketta ja valitsemalla kohdan ominaisuudet.

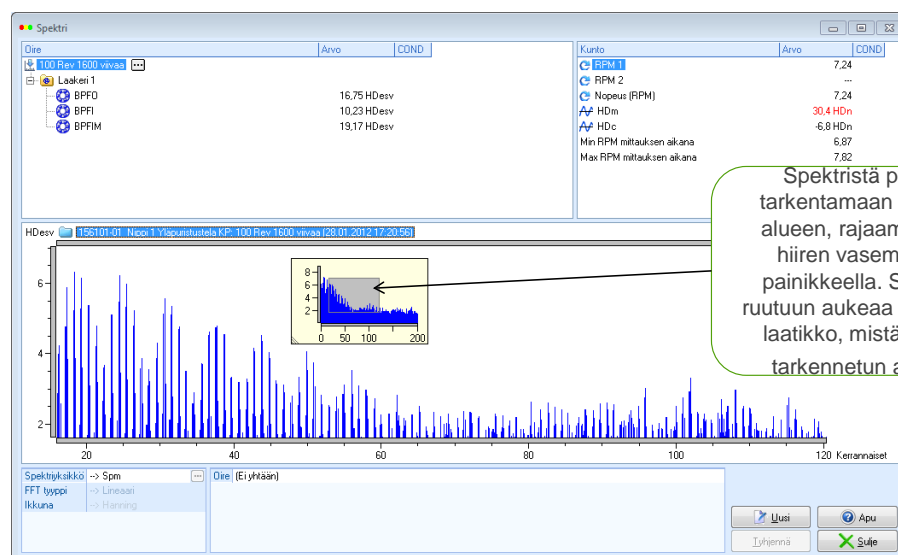
Spektri



5 | © UPM

Internal

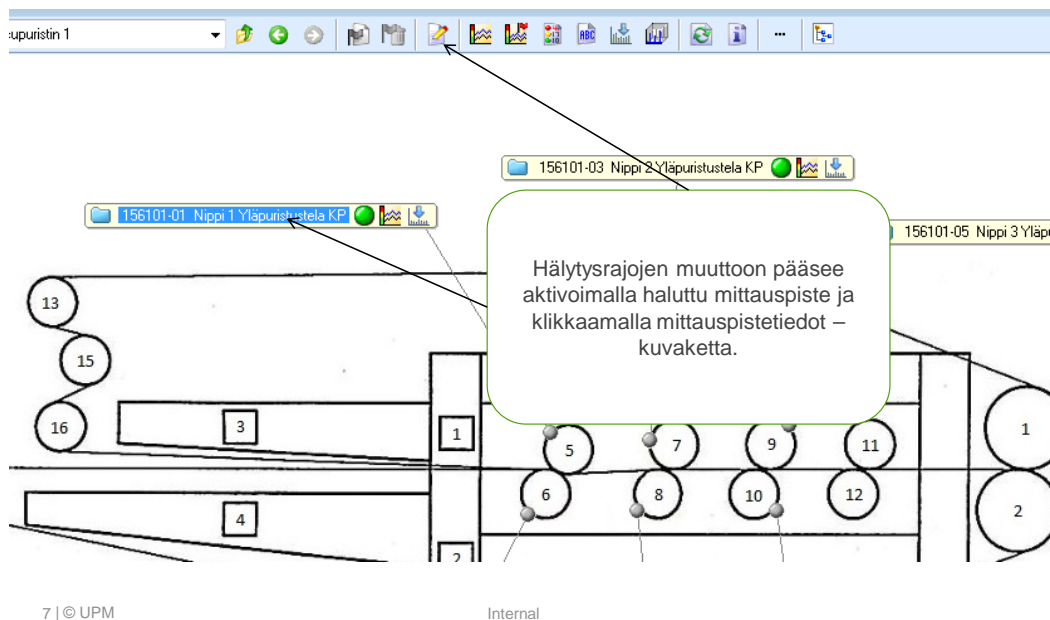
Spektri



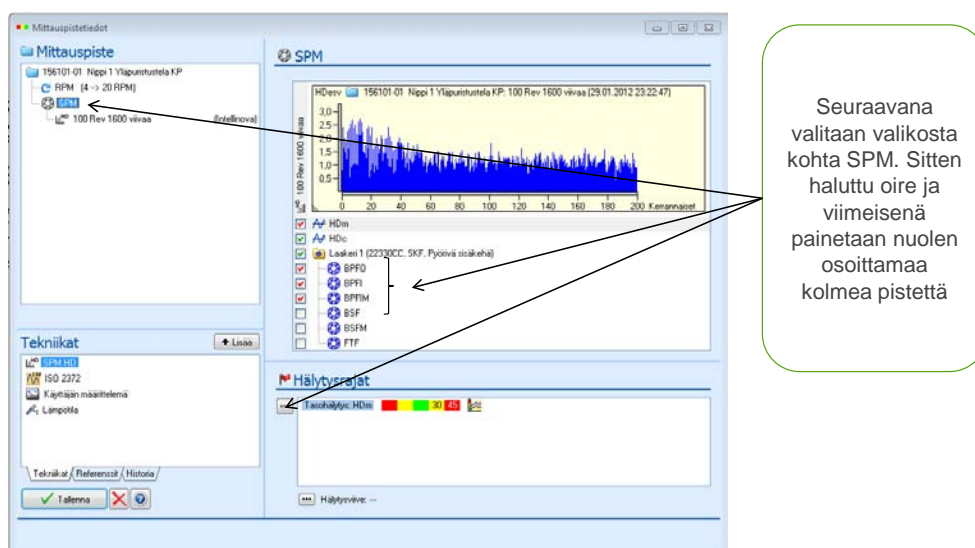
6 | © UPM

Internal

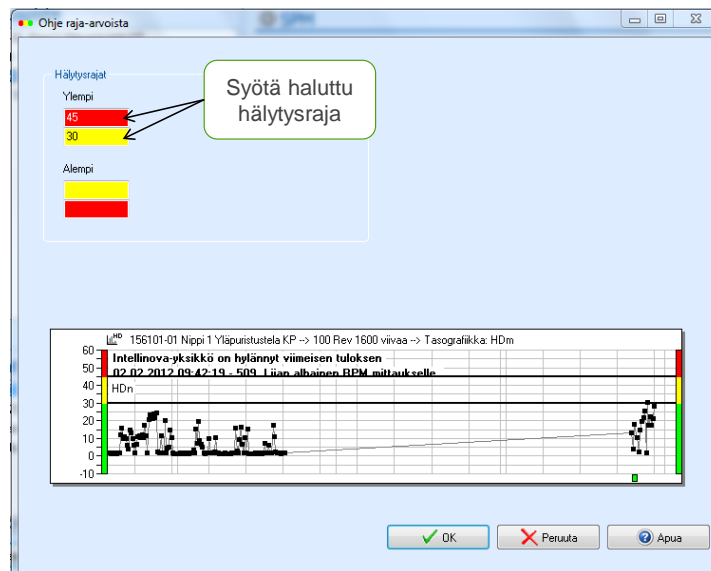
Hälytysrajan muuttaminen



Hälytysrajan muuttaminen



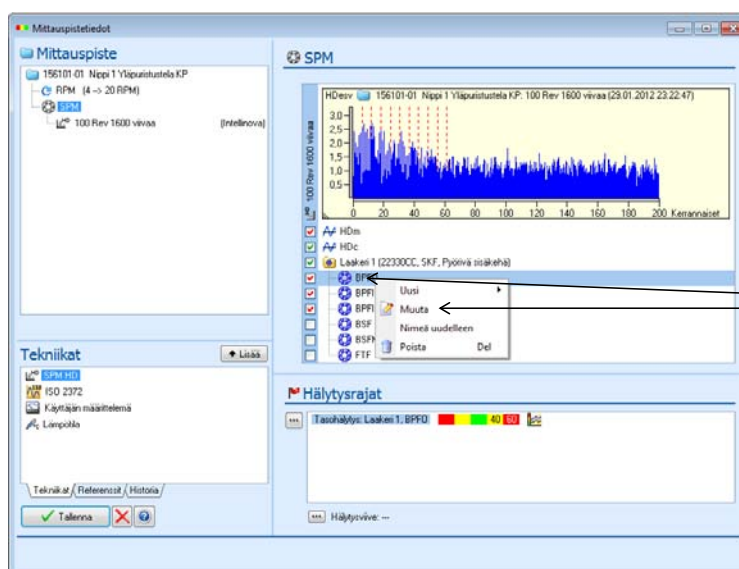
Hälytysrajan muuttaminen



9 | © UPM

Internal

Monikertojen lisäys hälytykseen



10 | © UPM

Internal

Monikertojen lisäys hälytykseen

Laakeri, oireparametrit

ISO laakerinumeri 22330CC SKF

Parametri	Arvo, Z	Vaihtelu, Z	Vähintään, harmo	Enintään, harmonis
BPO	6,178	0,01	1	10
BPI	8,822	0,01	1	10
2*BS	5,36	0,01	1	10
FT	0,412	0,01	1	10

RPM

RPM1

RPM1 RPM2 ABS () + - * /

Vaihtelu, RPM

Sivunauhut

0,005

2

OK Peruuta Apu

Enintään, harmoninen – kohtaan lisäämällä lukua, saadaan diagrammissa huomioitua monikerrat

Lisäämällä lukua vähintään, harmoninen – kohtaan, jättää diagrammi huomioimatta luvun verran korkeampia amplitudeja.

Kommenttien lisäys

Condmaster Nova - [Kommentit]

Summa: 01.01.1990 Näytä: Kaikki 1/2

Uuden kommentin lisäykseen pääsee nuolen osoittamasta kohdasta

Kommenttien tiedot

Mittauspöytä, Lala 156101-01

Tilanne: OK02 Normaali käynti

Alku: 25.01.2012 08:26:00

Valokommentti

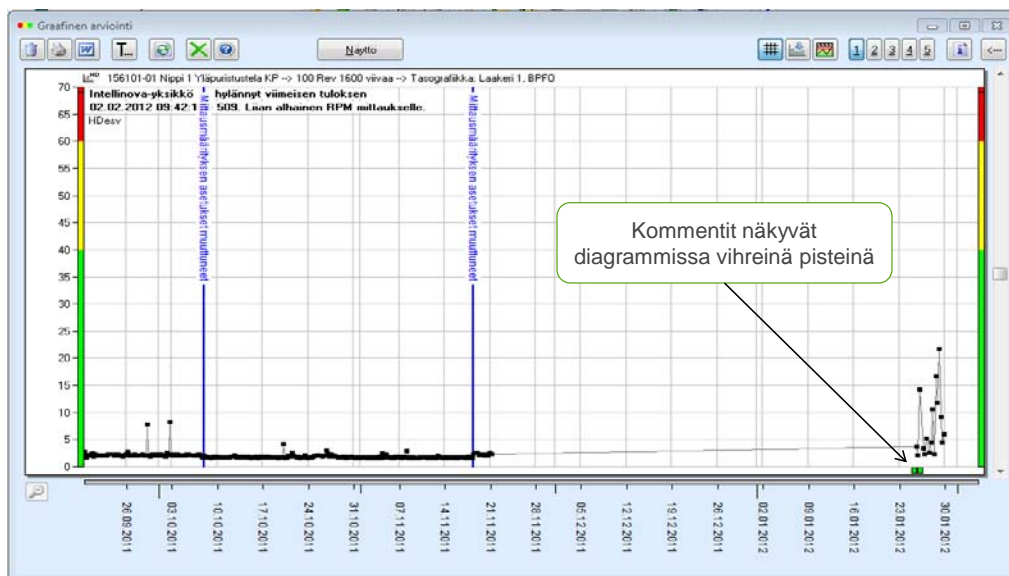
Kokonaan kunnossapito

Liitteet: Uusi Muokkaa Poista Poista

Kommentteihin pääset aloitussivun kommentit kohdasta.

Kommenttiin pystyy myös lisäämään kuvan, nuolen osoittamasta kohdasta

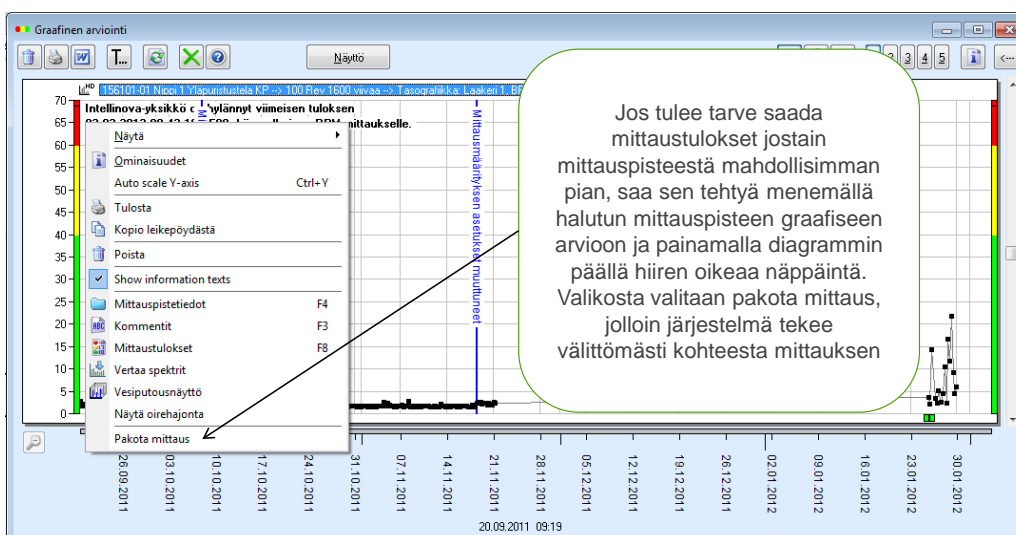
Kommenttien lisäys



13 | © UPM

Internal

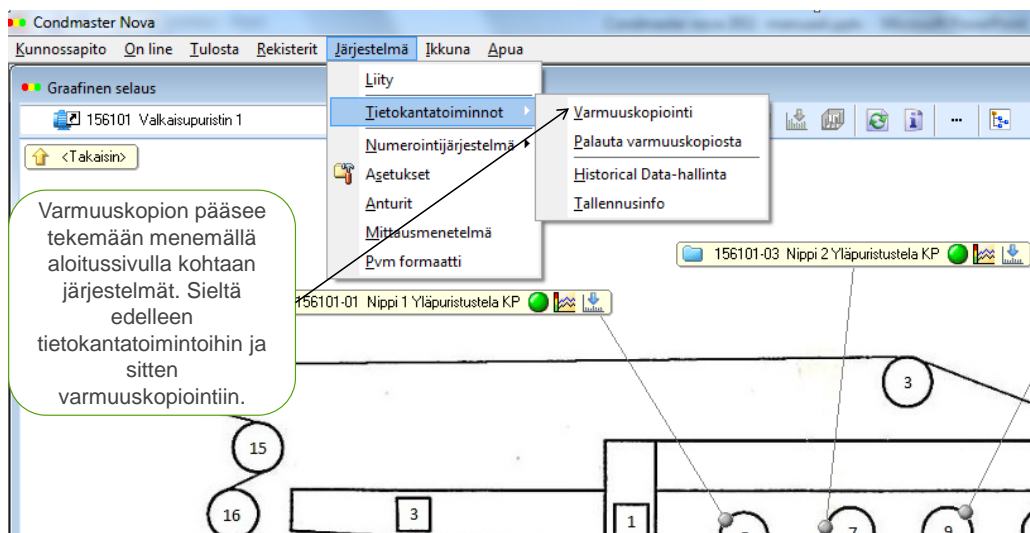
Järjestelmän pakottaminen mittaukseen



14 | © UPM

Internal

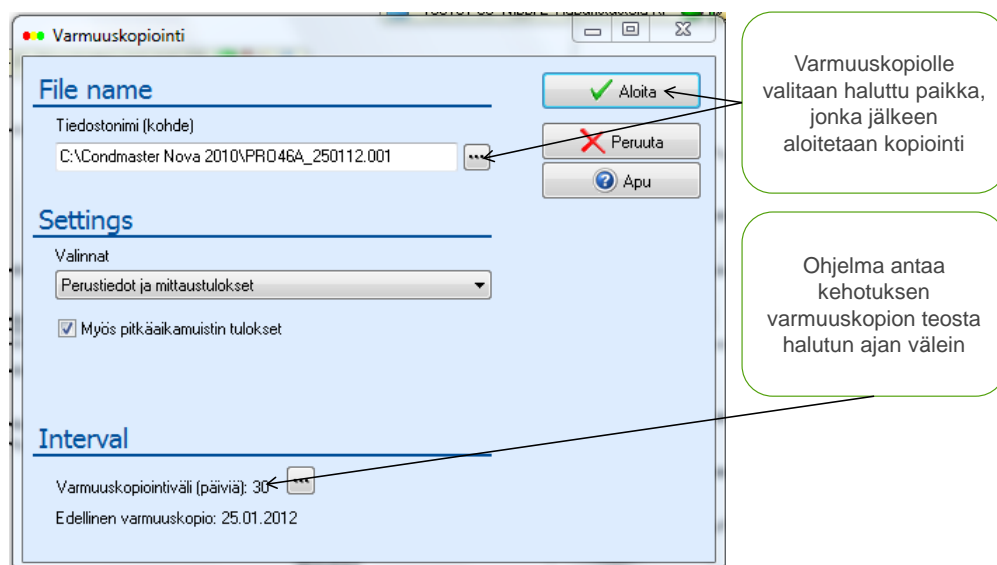
Varmuuskopion teko



15 | © UPM

Internal

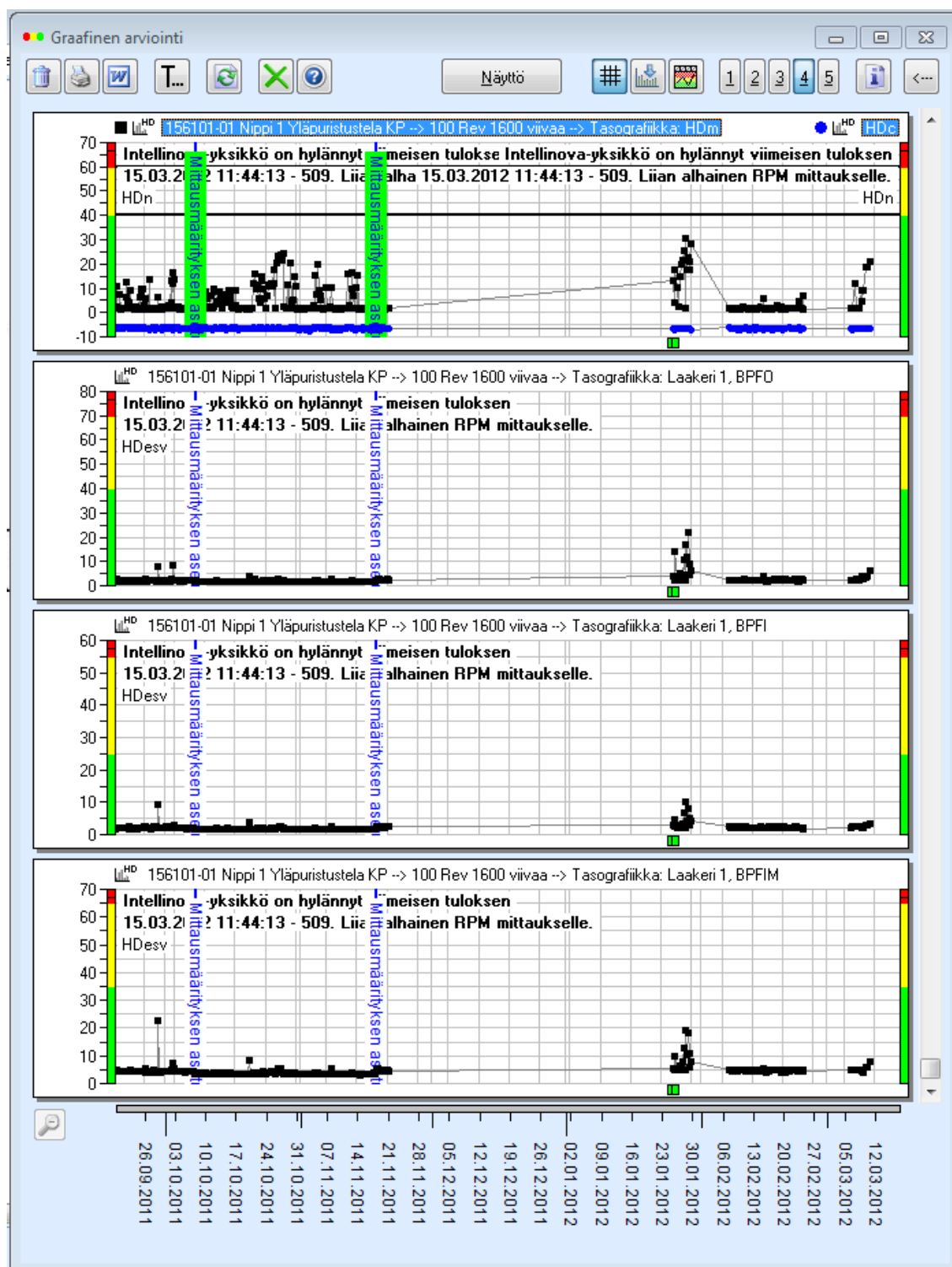
Varmuuskopion teko



16 | © UPM

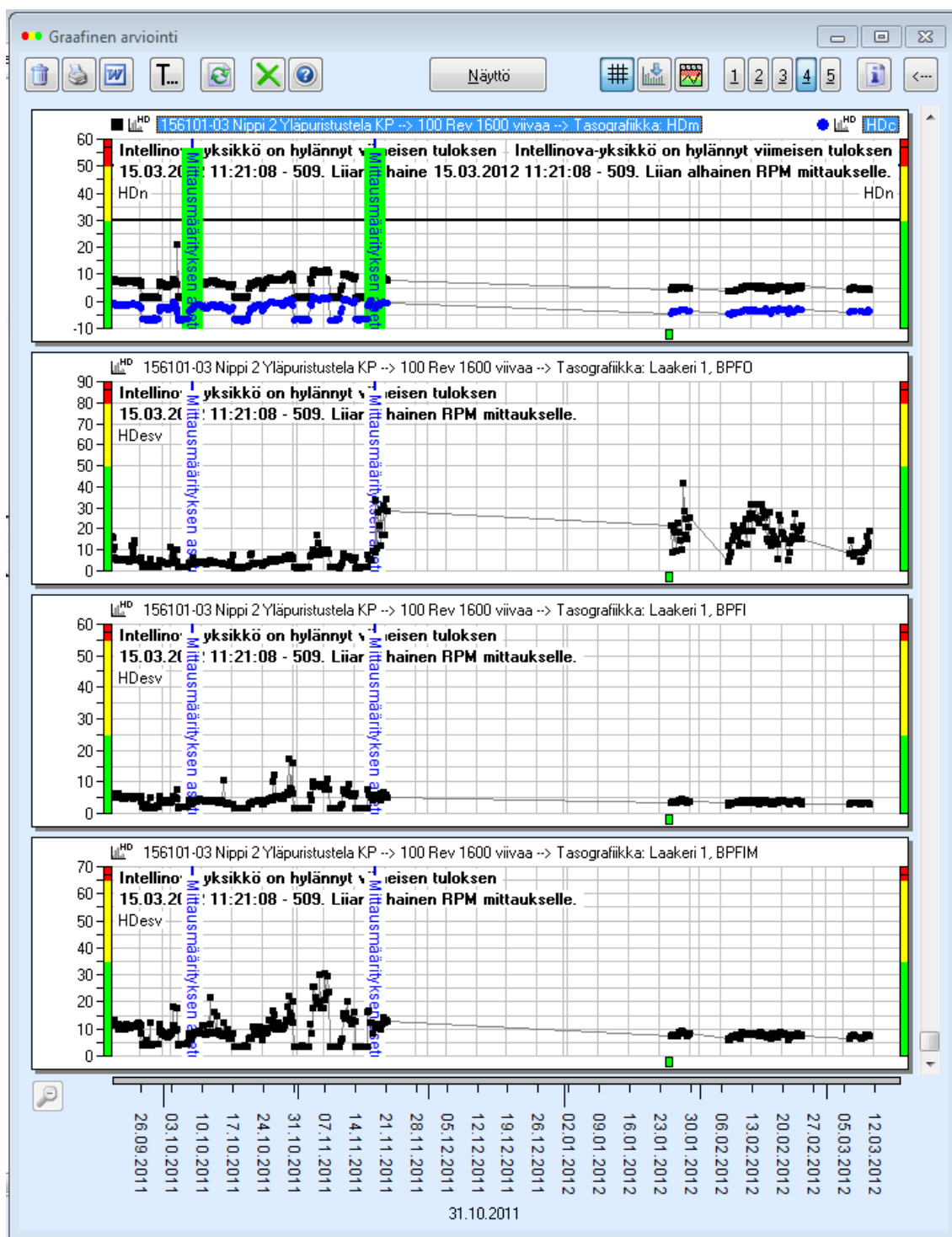
Internal

LIITE 2: 1 (8)

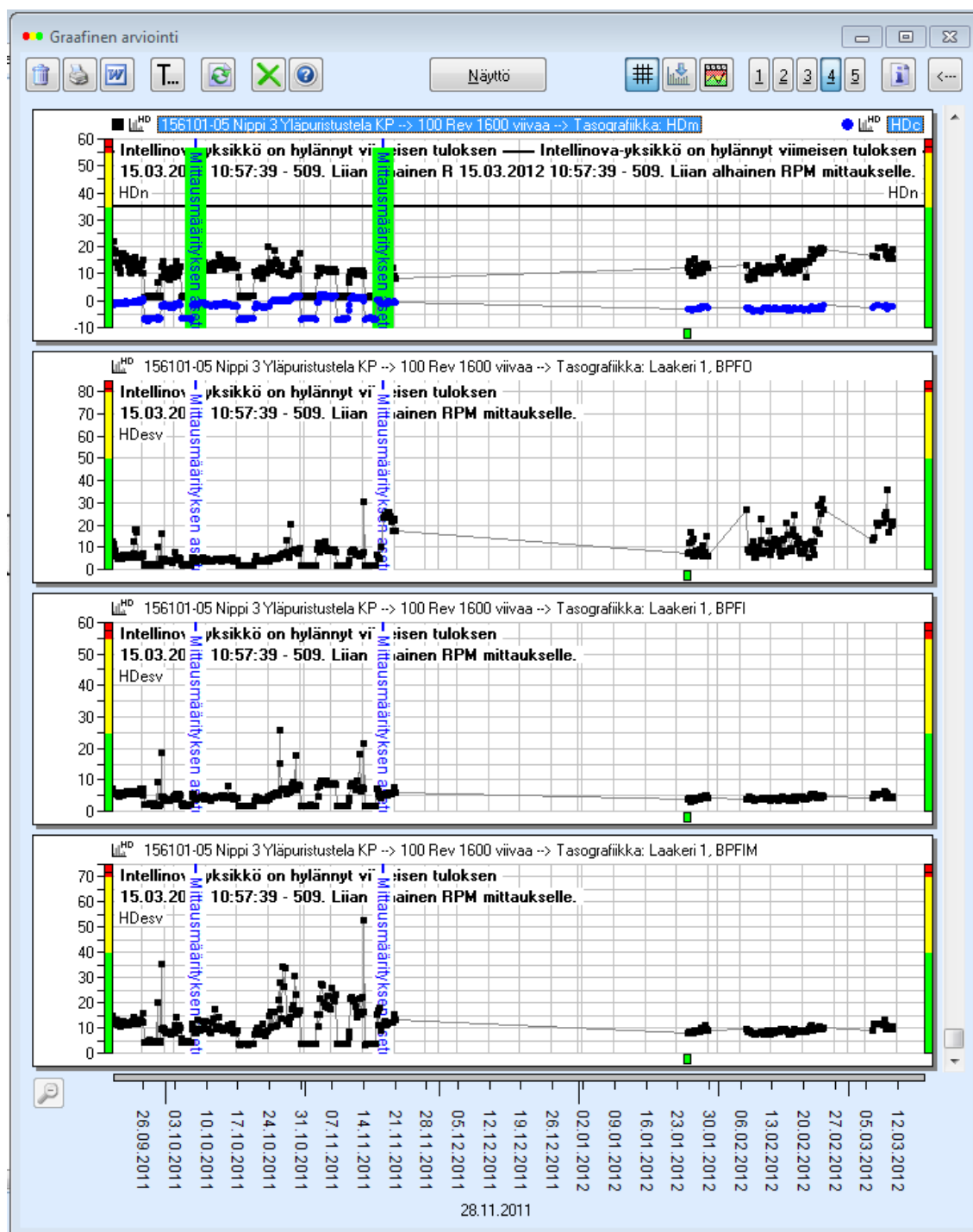


(jatkuu)

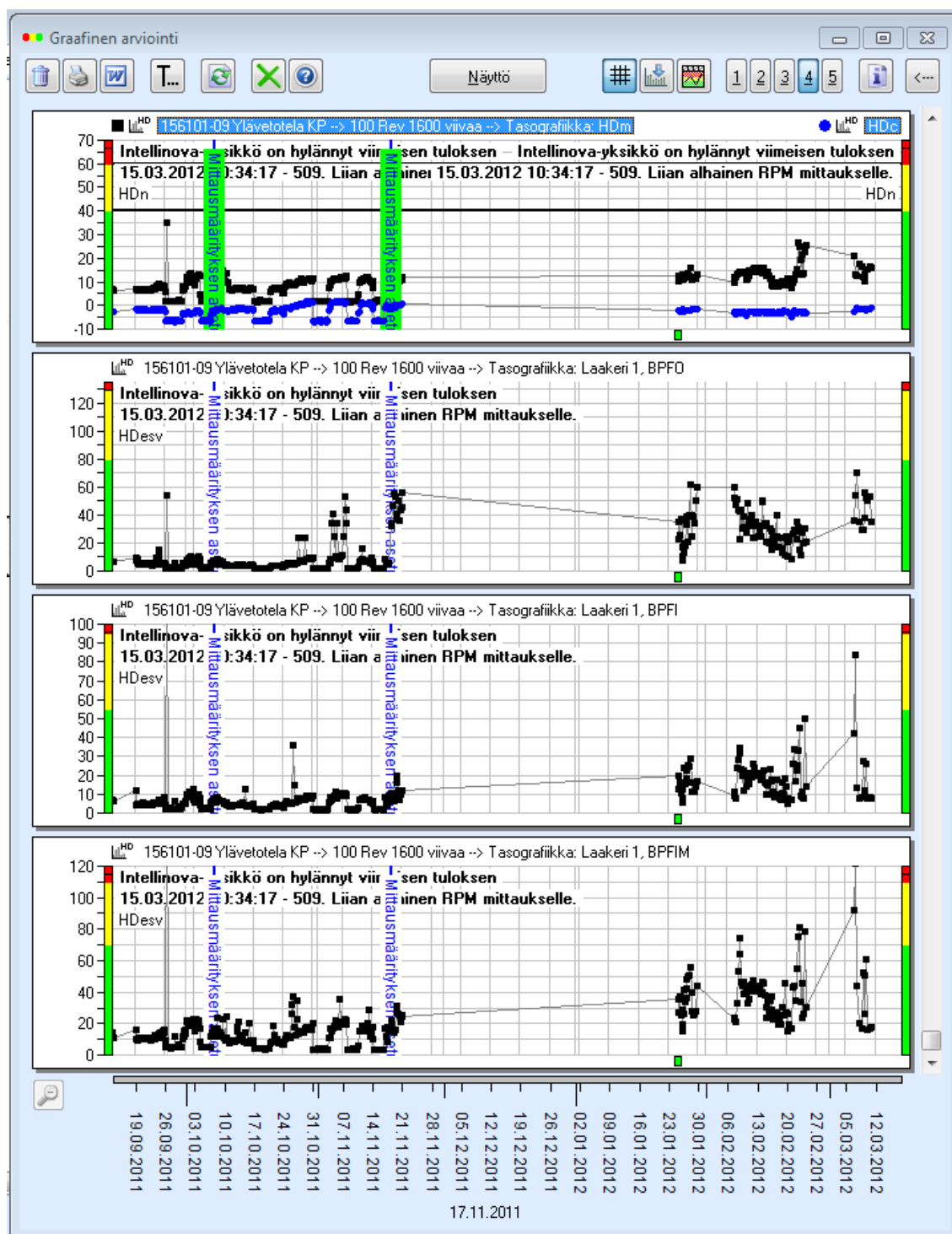
LIITE 2: 2 (8)



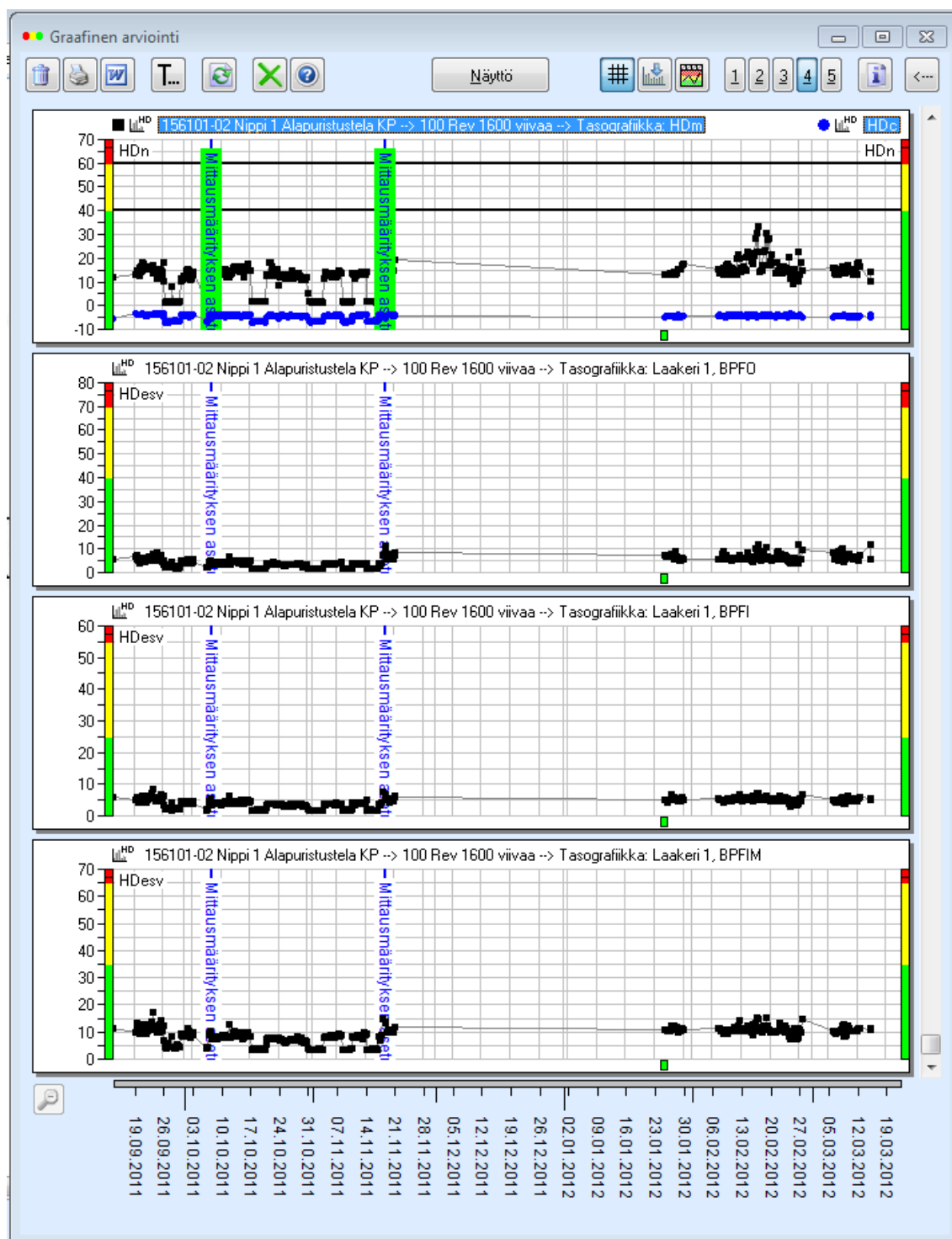
LIITE 2: 3 (8)



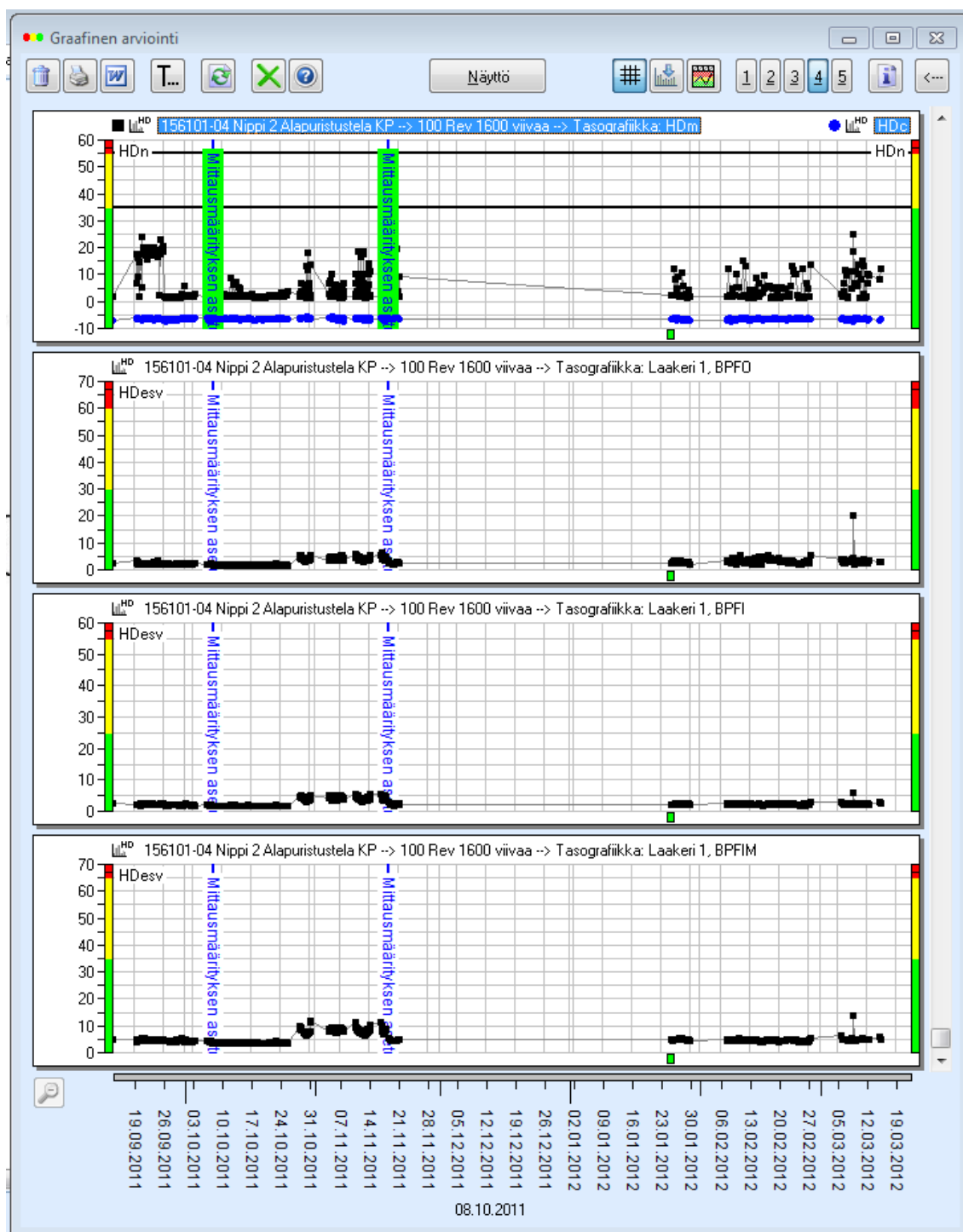
LIITE 2: 4 (8)



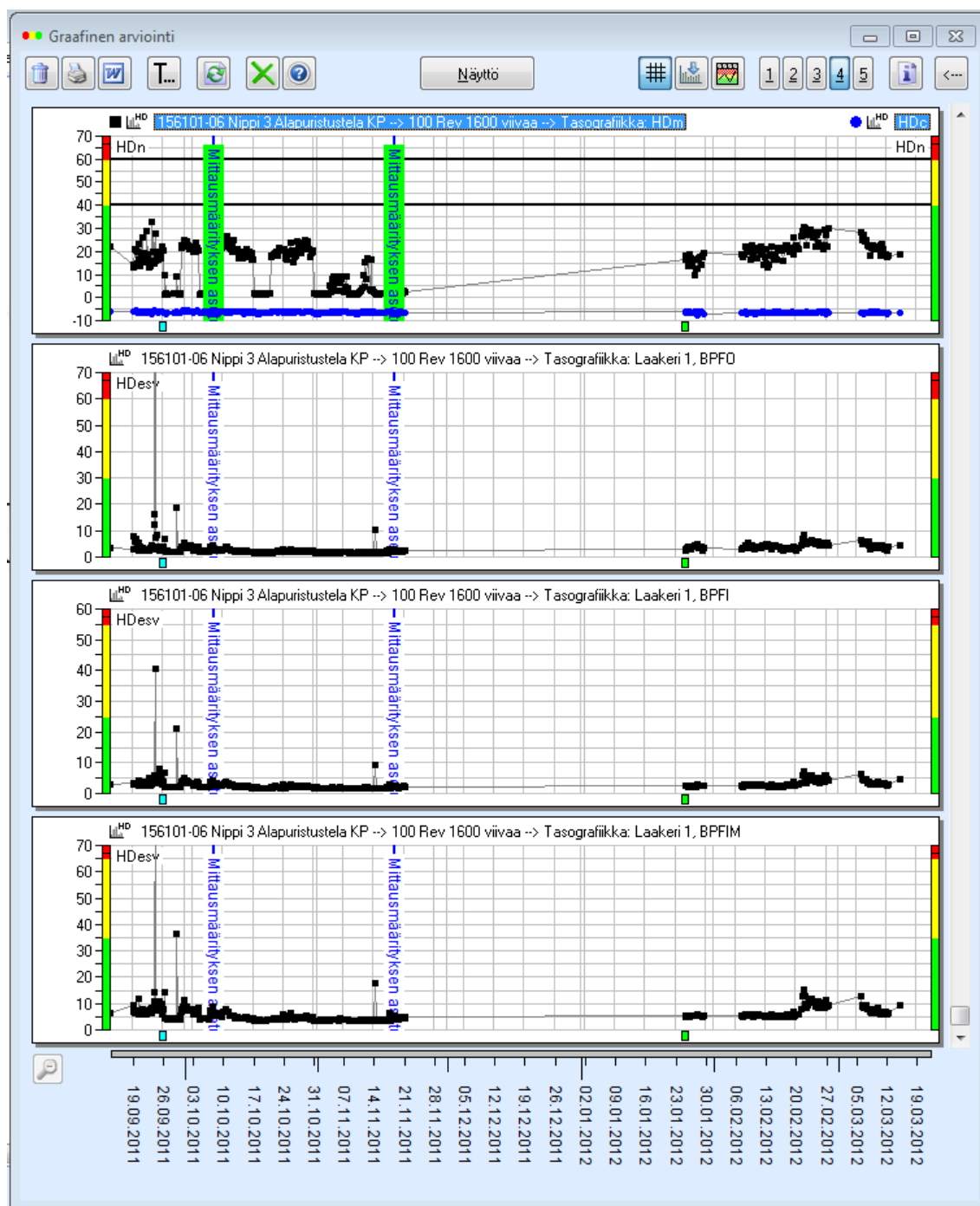
LIITE 2: 5 (8)



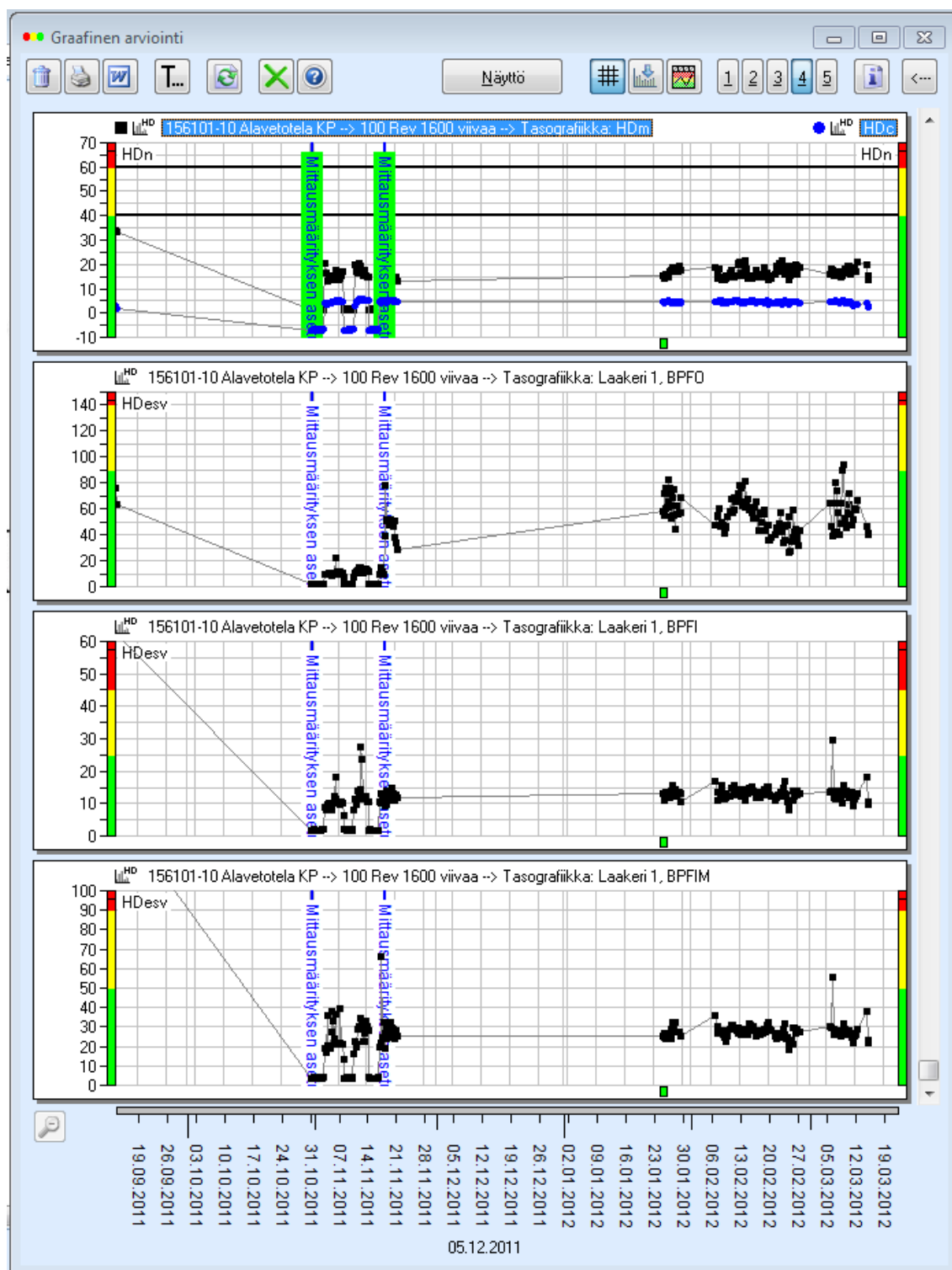
LIITE 2: 6 (8)



LIITE 2: 7 (8)



LIITE 2: 2 (8)



LAAKEREIHIN KOHDISTUVAT VOIMAT

Kaikilla sylintereillä on sama männän sisähalkaisija 125 mm. Kaavassa 1 on laskettuna männän sisäpinta-ala. Telan massa on kaikilla teloilla sama 4400 kg.

$$A = \pi(0,0625 \text{ m})^2 \quad (1)$$

$$A = 0,012272 \text{ m}^2 \quad (2)$$

Taulukossa 1 on esitettyinä kuormituspaineeet, joilla sylintereitä kuormitetaan normaalisti. Puristin yhden nippi neljä ei ole käytössä.

Taulukko 1. Kuormituspaineeet.

Puristin 1	Nippi 1	Nippi 2	Nippi 3	
Paine (bar)	50	40	40	
Paine (MPa)	5	4	4	
Puristin 2	Nippi 1	Nippi 2	Nippi 3	Nippi 4
Paine (bar)	50	40	40	60
Paine (MPa)	5	4	4	6

Kaavalla 2 saadaan laskettua sylintereiden voimat taulukon 1 paineilla.

$$F = A \times p \quad (3)$$

Taulukossa 2 on laskettuna kaavan 2 avulla lasketut sylintereiden voimat. Sylintereitä on kaikissa nipeissä 2 kappaletta. Taulukkoon 2 on myös laskettuna voima, jonka molemmat sylinterit nippiin aiheuttavat. Yhteisvoima saadaan kertomalla sylinterin voima kahdella, koska sylinterit ovat samanlaisia ja niissä on sama paine.

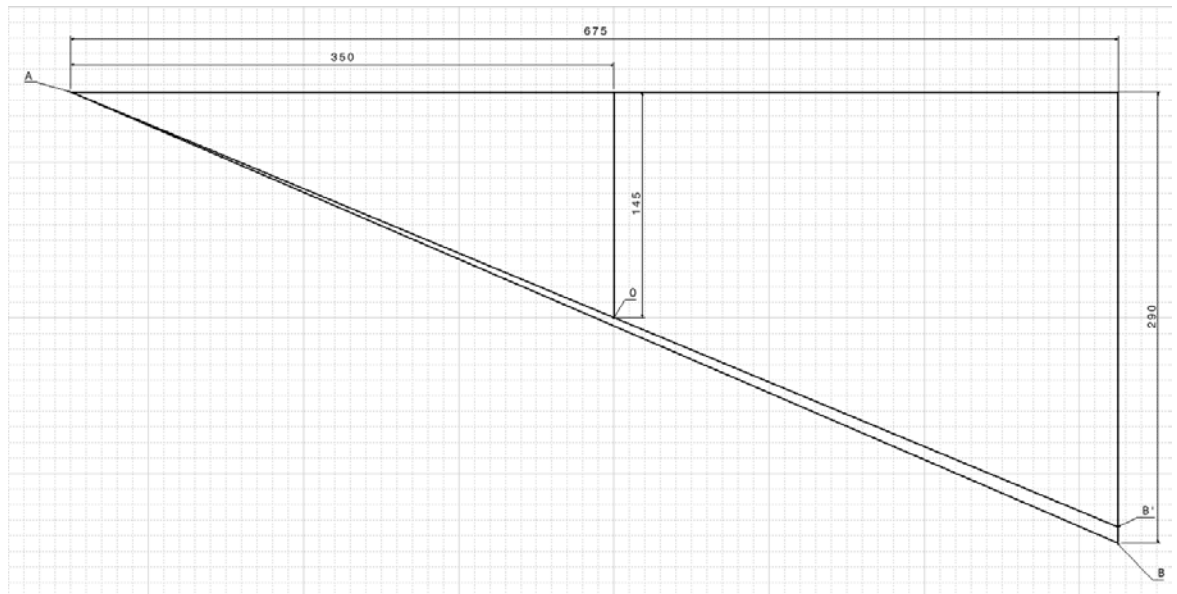
Taulukko 2. Sylintereiden voimat.

Puristin 1	Nippi 1	Nippi 2	Nippi 3	
Voima (N)	61360	49088	49088	
Yhteisvoima (N)	122720	98176	98176	
Puristin 2	Nippi 1	Nippi 2	Nippi 3	Nippi 4
Voima (N)	61360	49088	49088	73632
Yhteisvoima (N)	122720	98176	98176	147264

(jatkuu)

LIITE 3: 2 (19)

Kuviossa 1 on laakeripesän mitoitukset. Laakeripesät ovat samanlaiset kaikissa nipeissä. Piste A on laakeripesän nivelpiste. Piste O on laakerin keskipiste. Piste B on sylinterin kiinnityskohta laakeripesään ja piste B' on se piste sylinterin vaikutussuoralla, johon nivelpisteestä laakerin keskipisteen kautta kulkeva suora osuu.



Kuvio 1. Laakeripesän mitoitus

Kuvion 1 avulla pystytään laskemaan oleellisia tietoja laakeriin kohdistuvia voimia laskettaessa. Kaavassa 4 on laskettuna nivelpisteen ja pisteen B' välisen suoran ja vaakatason välinen kulma. Kaavassa 6 on laskettuna pisteiden A ja O välisen suoran pituus

$$\tan \alpha = \frac{145}{350} \quad (4)$$

$$\alpha = 22,504^\circ \quad (5)$$

$$L_{AO} = \sqrt{(350 \text{ mm})^2 + (145 \text{ mm})^2} \quad (6)$$

$$L_{AO} = 378,847 \text{ mm} \quad (7)$$

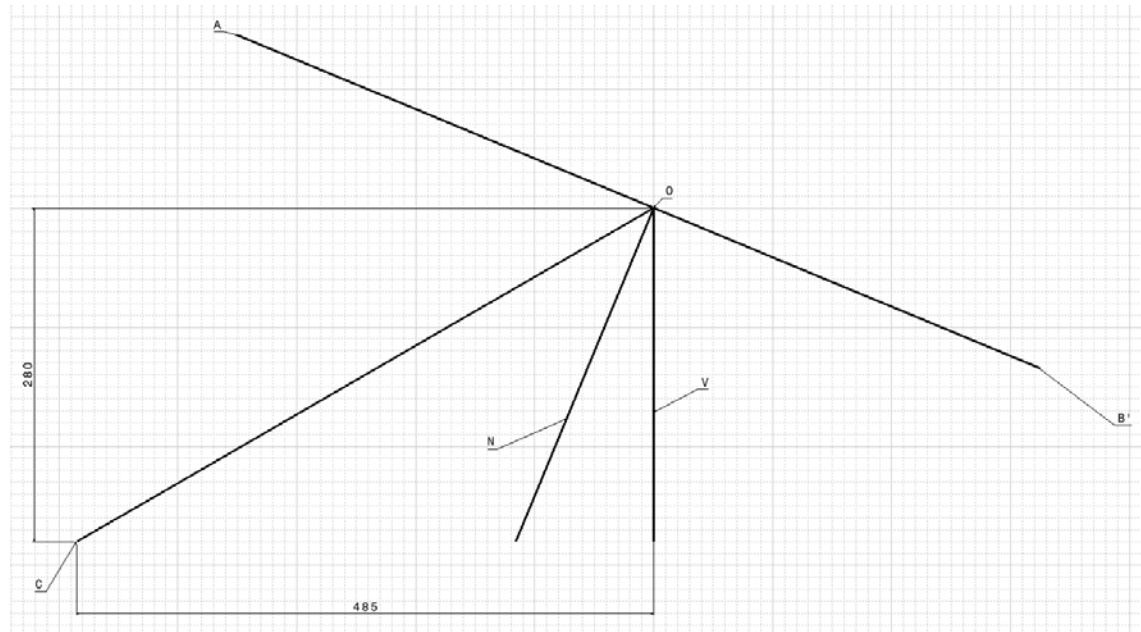
Kaavassa 5 olevan kulman avulla saadaan kaavassa 8 laskettua pisteiden A ja B' välisen suoran pituus.

$$L_{AB'} = \frac{675}{\cos(22,504)} \quad (8)$$

$$L_{AB'} = 730,633 \text{ mm} \quad (9)$$

KUORMITUSLASKUT NIPISSÄ 1

Nipin 1 tapauksessa ylätelaa kuormitetaan, jolloin piste O on ylätelan keskipiste ja piste C on alatelan keskipiste. Kuviossa 2 on nippi yhden mitoituskuva.



Kuvio 2. Mitoituskuva ensimmäisestä nipistä

Voimien laskemiseksi tarvitsee tietää suoran CO ja suoran AB' normaalin välinen kulma γ , joka on laskettu kaavassa 12. Suorien N ja V välinen kulma on sama, kuin kaavan 5 kulma.

$$\gamma = \arctan\left(\frac{485 \text{ mm}}{280 \text{ mm}}\right) \quad (10)$$

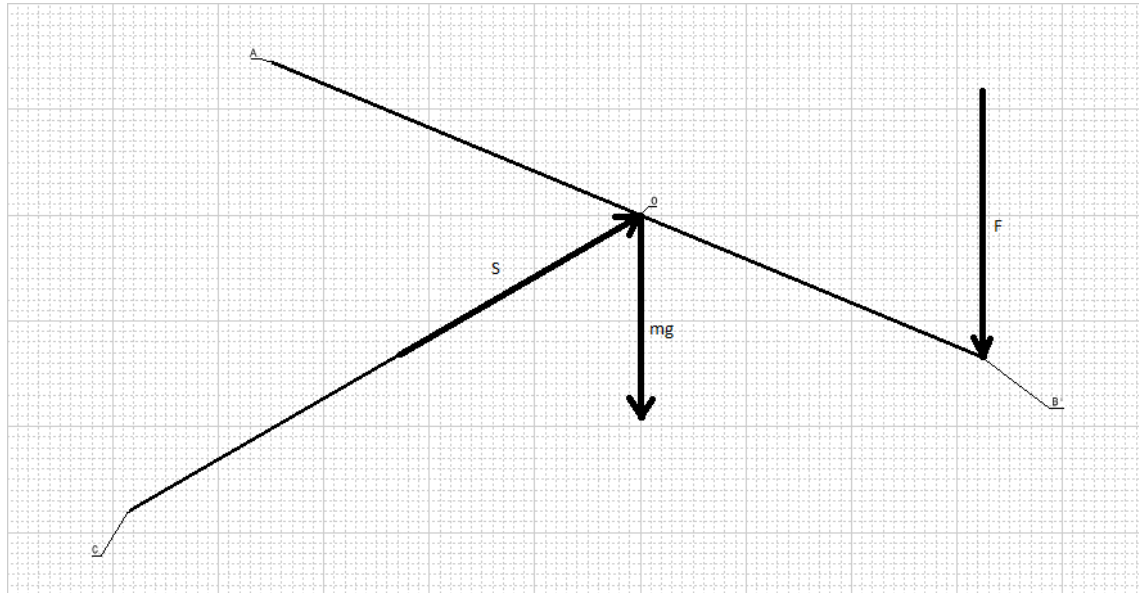
$$\gamma = 60,00^\circ \quad (11)$$

$$\gamma_1 = 60,00^\circ - 23,504^\circ \quad (12)$$

$$\gamma_1 = 37,498^\circ \quad (13)$$

LIITE 3: 3 (19)

Kuviossa 3 on nippi yhden sylinterin ja ylätelan vapaakappakekuva. Voimien laskennassa ensimmäisenä lasketaan sylinterin voiman F vaikutus laakereihin kaavassa 12.



Kuvio 3. VKK1

Kaavoissa 14-16 on momentti pisteen A suhteen, josta saa laskettua voiman S .

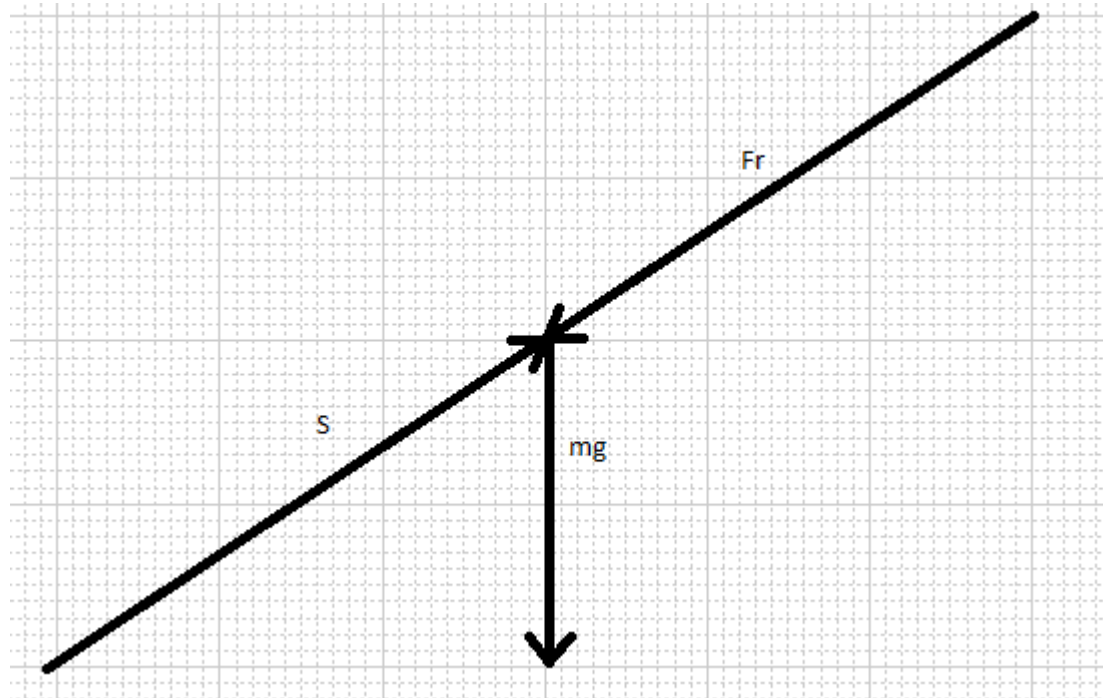
$$0 = 2 \times F \times \cos 22,504 \times L_{AB'} + mg \times \cos 22,504 \times L_{AO} - S \times \cos 37,498 \times L_{AO} \quad (14)$$

$$S = \frac{122720 \text{ N} \times \cos 22,504 \times 0,730633 \text{ m} + 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 22,504 \times 0,378847 \text{ m}}{\cos 37,498 \times 0,378847 \text{ m}} \quad (15)$$

$$S = 325860 \text{ N} \quad (16)$$

LIITE 3: 5 (19)

Kuviossa 4 on ylätelan vapaakappalekuva ja kaavoissa 17-24 laskettu laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 4. VKK2

$$F_{ry} = S - mg \times \cos 60 \quad (17)$$

$$F_{ry} = 325860 \text{ N} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 60 \quad (18)$$

$$F_{ry} = 304278 \text{ N} \quad (19)$$

$$F_{rx} = mg \times \cos 30 \quad (20)$$

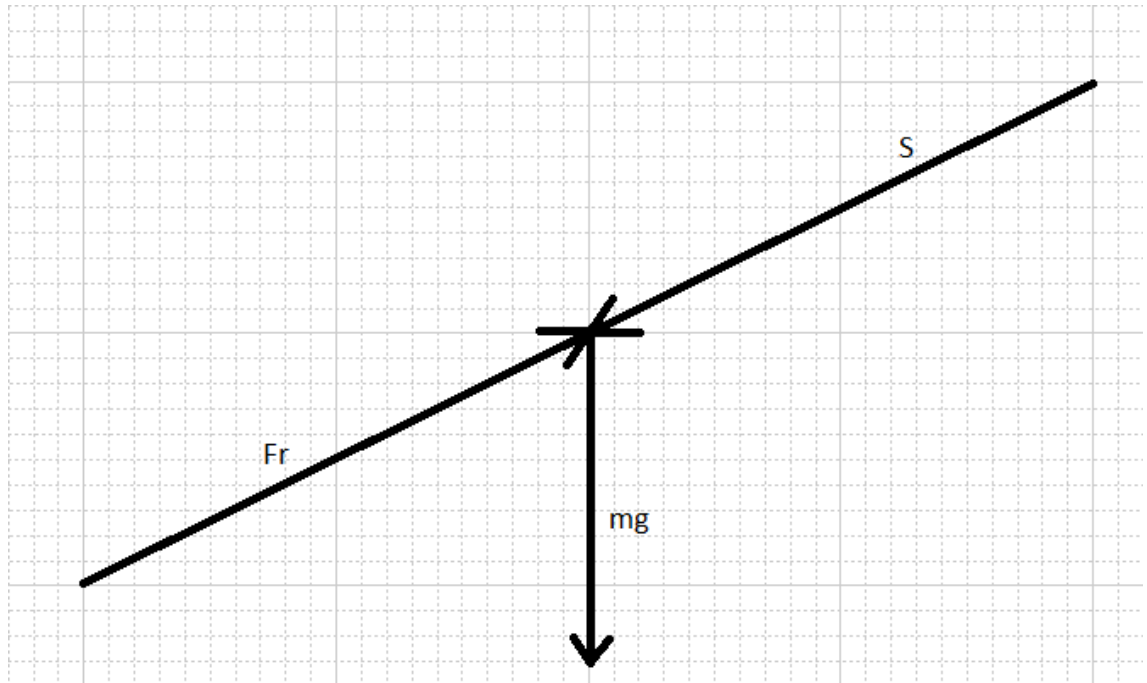
$$F_{rx} = 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 30 \quad (21)$$

$$F_{rx} = 37381,12 \text{ N} \quad (22)$$

$$F_R = \sqrt{(304278 \text{ N})^2 + (37381,12 \text{ N})^2} / 2 \quad (23)$$

$$F_R = 153283 \text{ N} \quad (24)$$

Kuviossa 5 on vapaakappalekuva nippi yhden alatelaan kohdistuvista voimista. Kaavoissa 25-32 on laskettu laakeriin kohdistuva resultantti voima



Kuvio 5. VKK3

$$F_{ry} = S + mg \times \cos 60 \quad (25)$$

$$F_{ry} = 325860 \text{ N} + 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 60 \quad (26)$$

$$F_{ry} = 347442 \text{ N} \quad (27)$$

$$F_{rx} = mg \times \cos 30 \quad (28)$$

$$F_{rx} = 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 30 \quad (29)$$

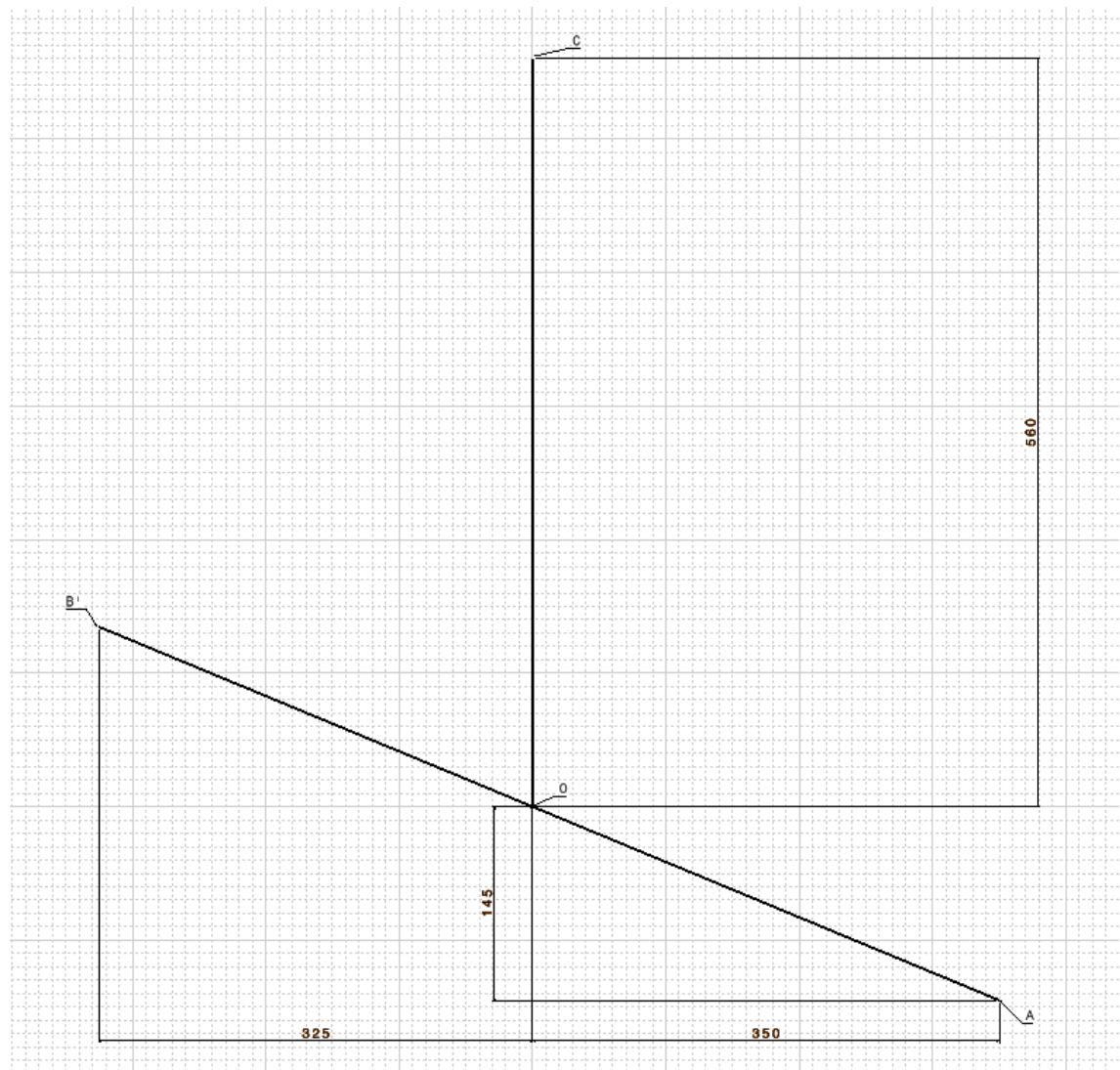
$$F_{rx} = 37381,12 \text{ N} \quad (30)$$

$$F_R = \sqrt{(347442 \text{ N})^2 + (37381,12 \text{ N})^2} / 2 \quad (31)$$

$$F_R = 174724,55 \text{ N} \quad (32)$$

KUORMITUSLASKUT NIPISSÄ 2

Kuviossa 6 on nippi kahden mitoituksen, joista on laskettu suoran CO ja suoran AB' normaalin välinen kulma kaavoissa 33-36. Alatela on kuormittava, jolloin piste O on alatelan keskipiste ja piste C ylätelan keskipiste



Kuvio 6. Mitoituskuva toisesta nipistä

$$\delta = \arctan\left(\frac{350 \text{ mm}}{145 \text{ mm}}\right) \quad (33)$$

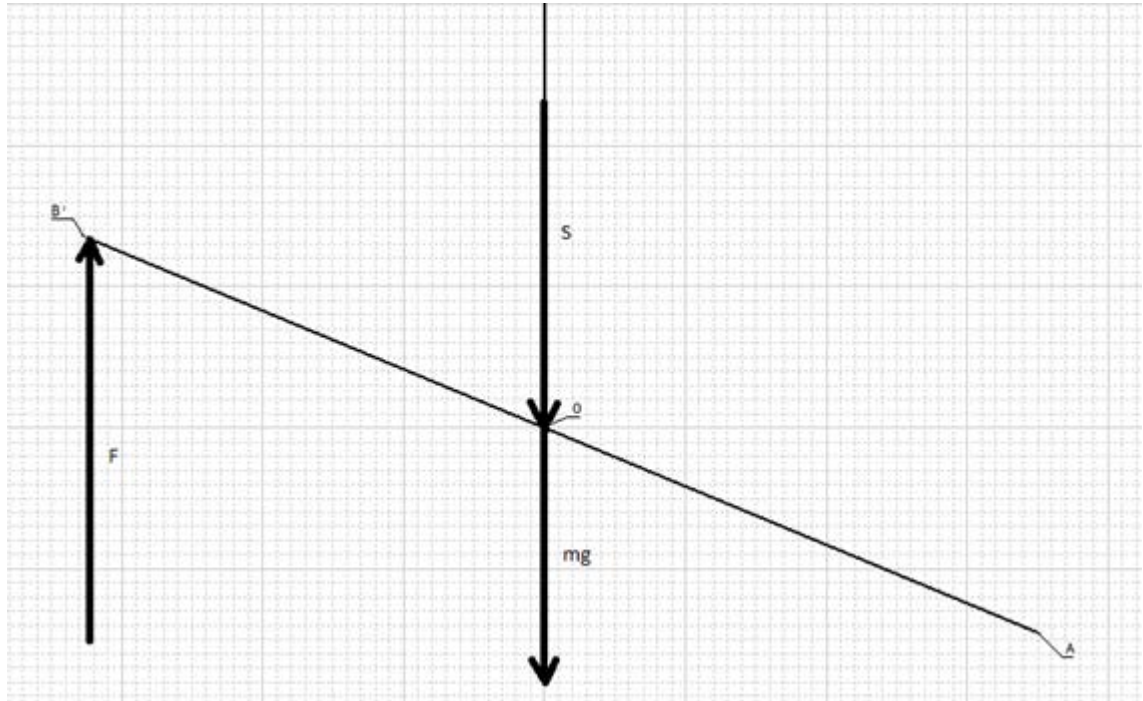
$$\delta = 67,496^\circ \quad (34)$$

$$\delta_1 = 90^\circ - 67,496^\circ \quad (35)$$

$$\delta_1 = 22,504^\circ \quad (36)$$

LIITE 3: 8 (19)

Kuviossa 7 on vapaakappalekuva nippi kahdesta. Kaavoissa 37-39 on laskettu voima S.



Kuvio 7. VKK4

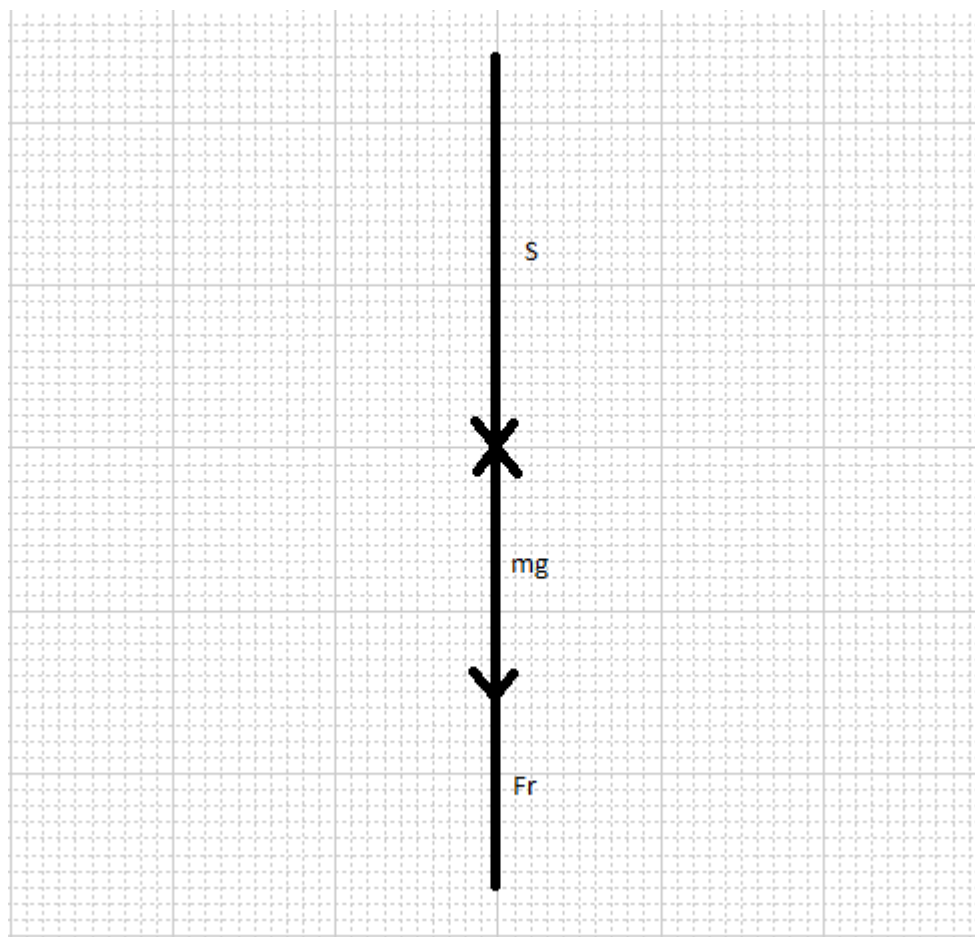
$$0 = 2 \times F \times \cos 22,504 \times L_{AB'} - S \times \cos 22,504 \times L_{AO} - mg \times \cos 22,504 \times L_{AO} \quad (37)$$

$$S = \left(98176 \text{ N} \times \cos 22,504 \times 0,730633 \text{ m} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \times \cos 22,504 \times 0,378847 \text{ m} / \cos 22,504 \times 0,378847 \text{ m} \right) \quad (38)$$

$$S = 146183 \text{ N} \quad (39)$$

LIITE 3: 9 (19)

Kuviossa 8 on vapaakappalekuva alatelasta ja kaavoissa 40-44 on laskettu laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 8. VKK5

$$F_r = S + mg \quad (40)$$

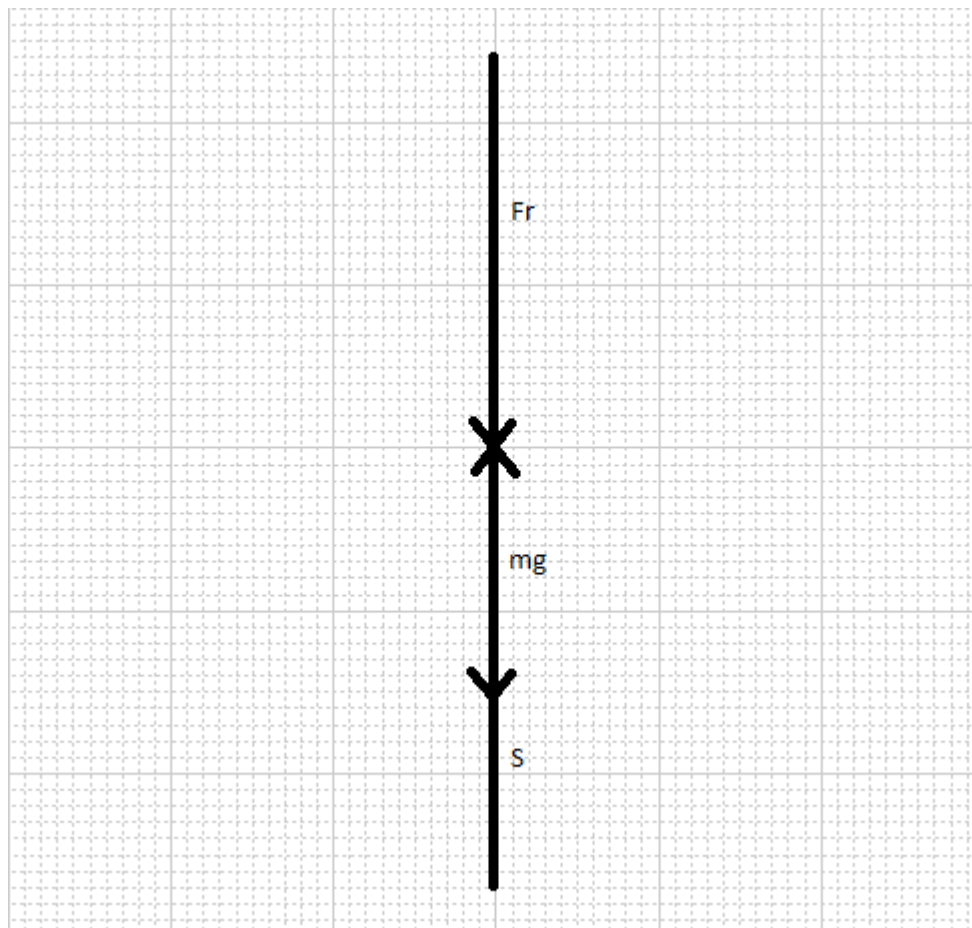
$$F_r = 146183 \text{ N} + 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (41)$$

$$F_r = 189347 \text{ N} \quad (42)$$

$$F_R = \frac{189347 \text{ N}}{2} \quad (43)$$

$$F_R = 94673 \text{ N} \quad (44)$$

Kuviossa 9 on vapaakappalekuva ylätelasta ja kaavoissa 45-49 on laskettu laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 9. VKK6

$$F_r = S - mg \quad (45)$$

$$F_r = 146183 \text{ N} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (46)$$

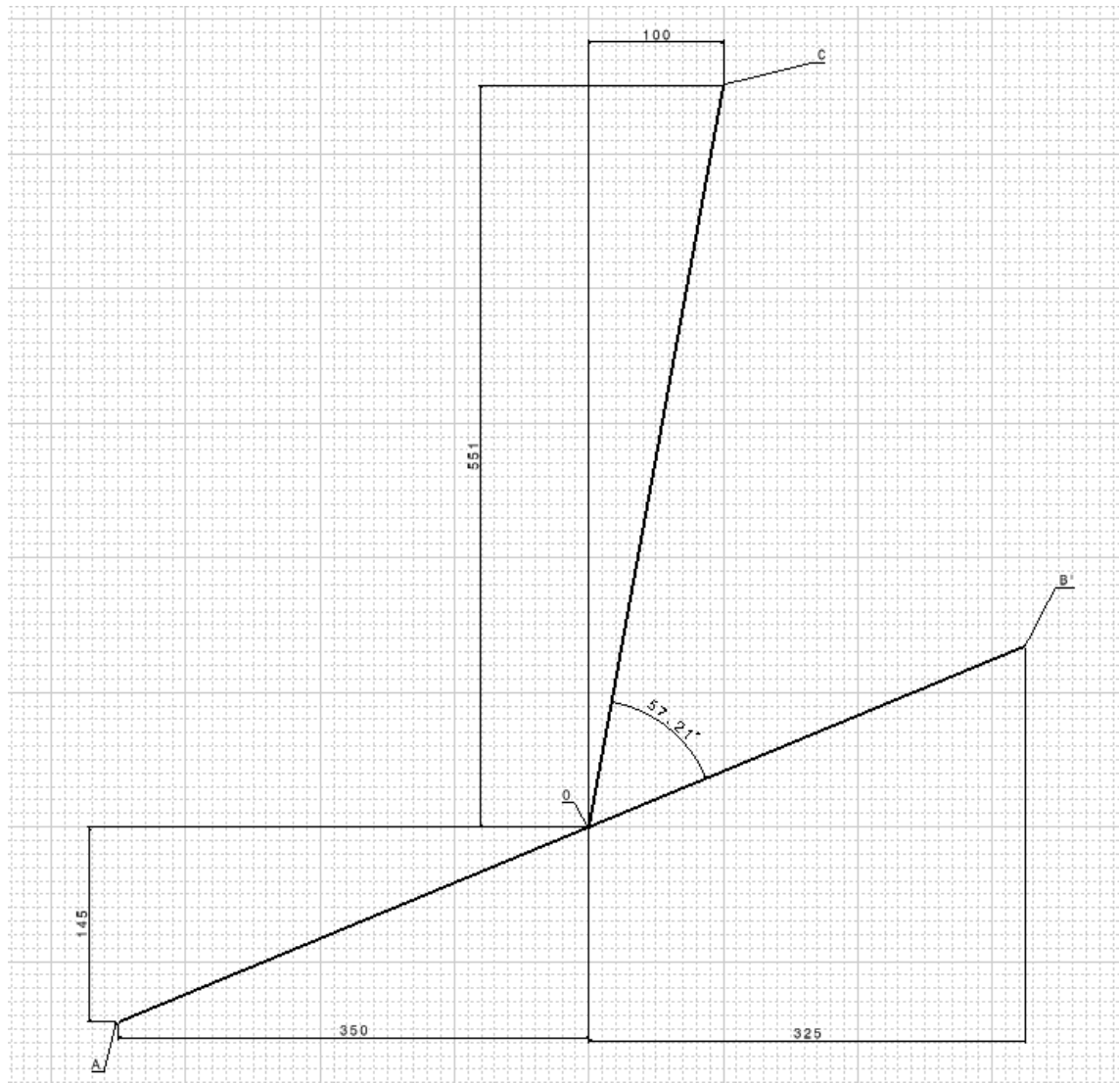
$$F_r = 103019 \text{ N} \quad (47)$$

$$F_R = \frac{103019 \text{ N}}{2} \quad (48)$$

$$F_R = 51509 \text{ N} \quad (49)$$

KUORMITUSLASKUT NIPISSÄ 3

Kuviossa 10 on nipin 3 mitoituskuva. Kaavoissa 50-51 on laskettu suoran AB' normaalin ja suoran CO välinen kulma. Kaavoissa 52-53 on laskettu suoran CO ja vertikaalisen suoran välinen kulma. Piste O on alatelan keskipiste ja piste C ylätelan keskipiste.



Kuvio 10. Mitoituskuva kolmannesta nipistä

$$\varepsilon = 90^\circ - 57,21^\circ \quad (50)$$

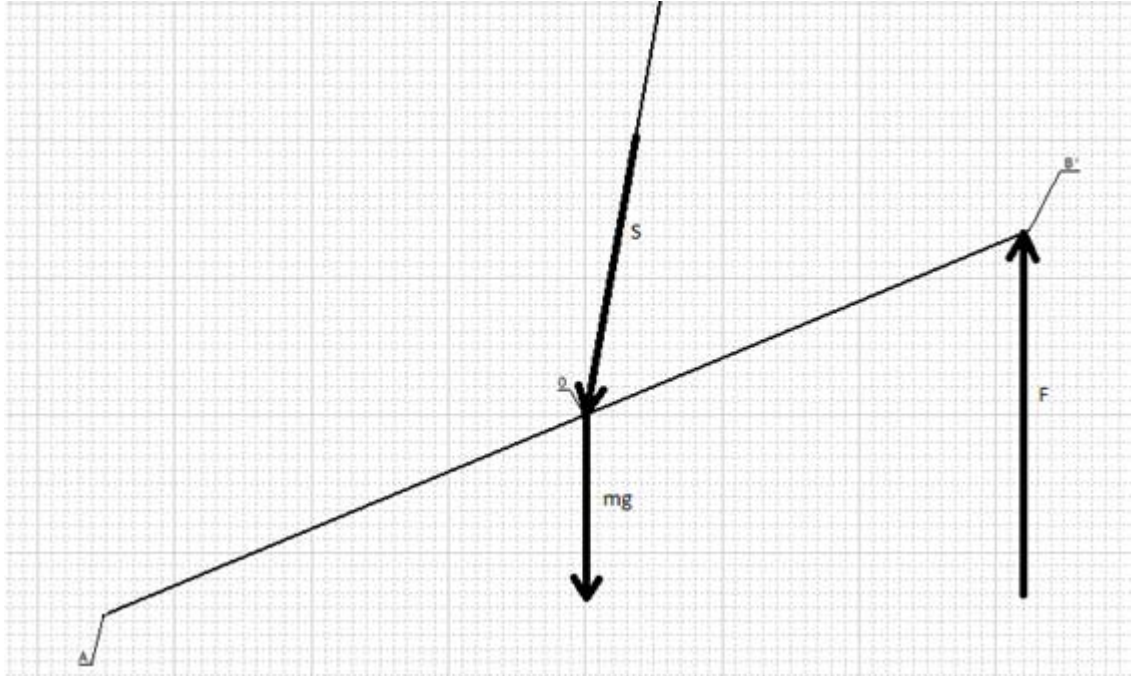
$$\varepsilon = 32,79^\circ \quad (51)$$

$$\varepsilon_1 = \arctan\left(\frac{100 \text{ mm}}{551 \text{ mm}}\right) \quad (52)$$

$$\varepsilon_1 = 10,29^\circ \quad (53)$$

LIITE 3: 12 (19)

Kuviossa 11 on nippi kolmen sylinterin ja alatelan muodostama vapaakappalekuva. Kaavoissa 54-56 on laskettu voima S .



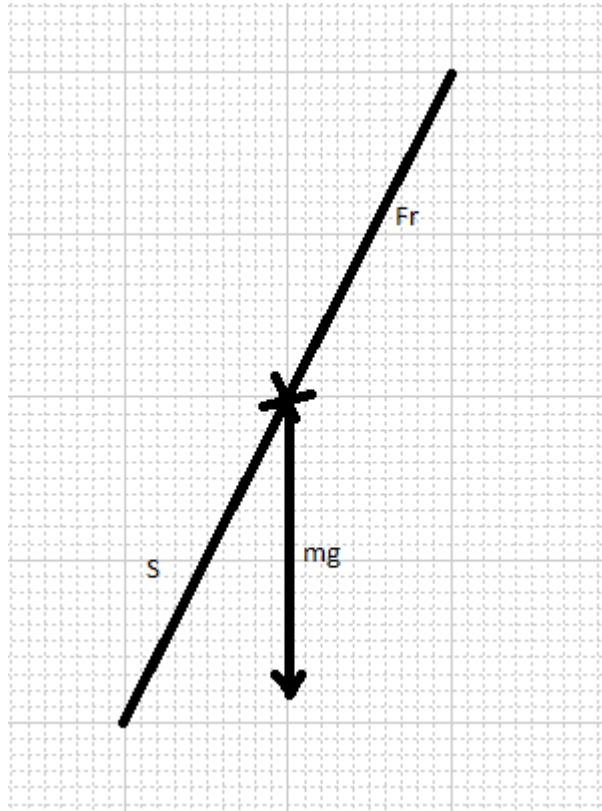
Kuvio 11. VKK7

$$0 = 2 \times F \times \cos 22,504 \times L_{AB'} - S \times \cos 32,79 \times L_{AO} - mg \times \cos 22,504 \times L_{AO} \quad (54)$$

$$S = \frac{98176 \text{ N} \times \cos 22,504 \times 0,730633 \text{ m} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 22,504 \times 0,378847 \text{ m}}{\cos 32,79 \times 0,378847 \text{ m}} \quad (55)$$

$$S = 160641,78 \text{ N} \quad (56)$$

Kuviossa 12 on ylätelan vapaakappalekuva ja kaavoissa 57-64 on laskettu laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 12. VKK8

$$F_{ry} = S - mg \times \cos 10,29 \quad (57)$$

$$F_{ry} = 160641,78 \text{ N} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 10,29 \quad (58)$$

$$F_{ry} = 118172 \text{ N} \quad (59)$$

$$F_{rx} = mg \times \cos(90 - 10,29) \quad (60)$$

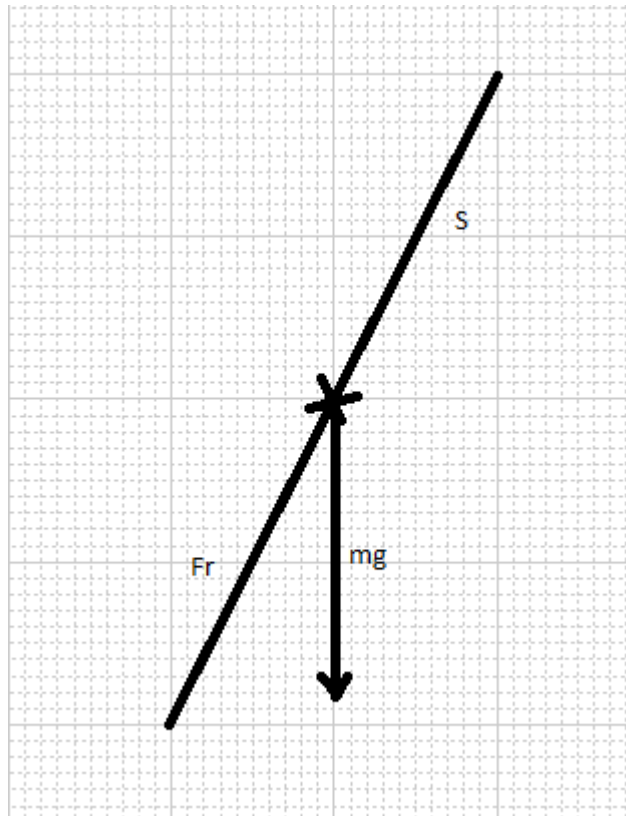
$$F_{rx} = 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 79,71 \quad (61)$$

$$F_{rx} = 7710,41 \text{ N} \quad (62)$$

$$F_R = \sqrt{(118172 \text{ N})^2 + (7710,41 \text{ N})^2} / 2 \quad (63)$$

$$F_R = 59211,6 \text{ N} \quad (64)$$

Kuviossa 13 on alatelan vapaakappalekuva. Kaavoissa 65-72 on laskettu laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 13. VKK9

$$F_{ry} = S + mg \times \cos 10,29 \quad (65)$$

$$F_{ry} = 160641,78 \text{ N} + 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 10,29 \quad (66)$$

$$F_{ry} = 203112,5 \text{ N} \quad (67)$$

$$F_{rx} = mg \times \cos(90 - 10,29) \quad (68)$$

$$F_{rx} = 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 79,71 \quad (69)$$

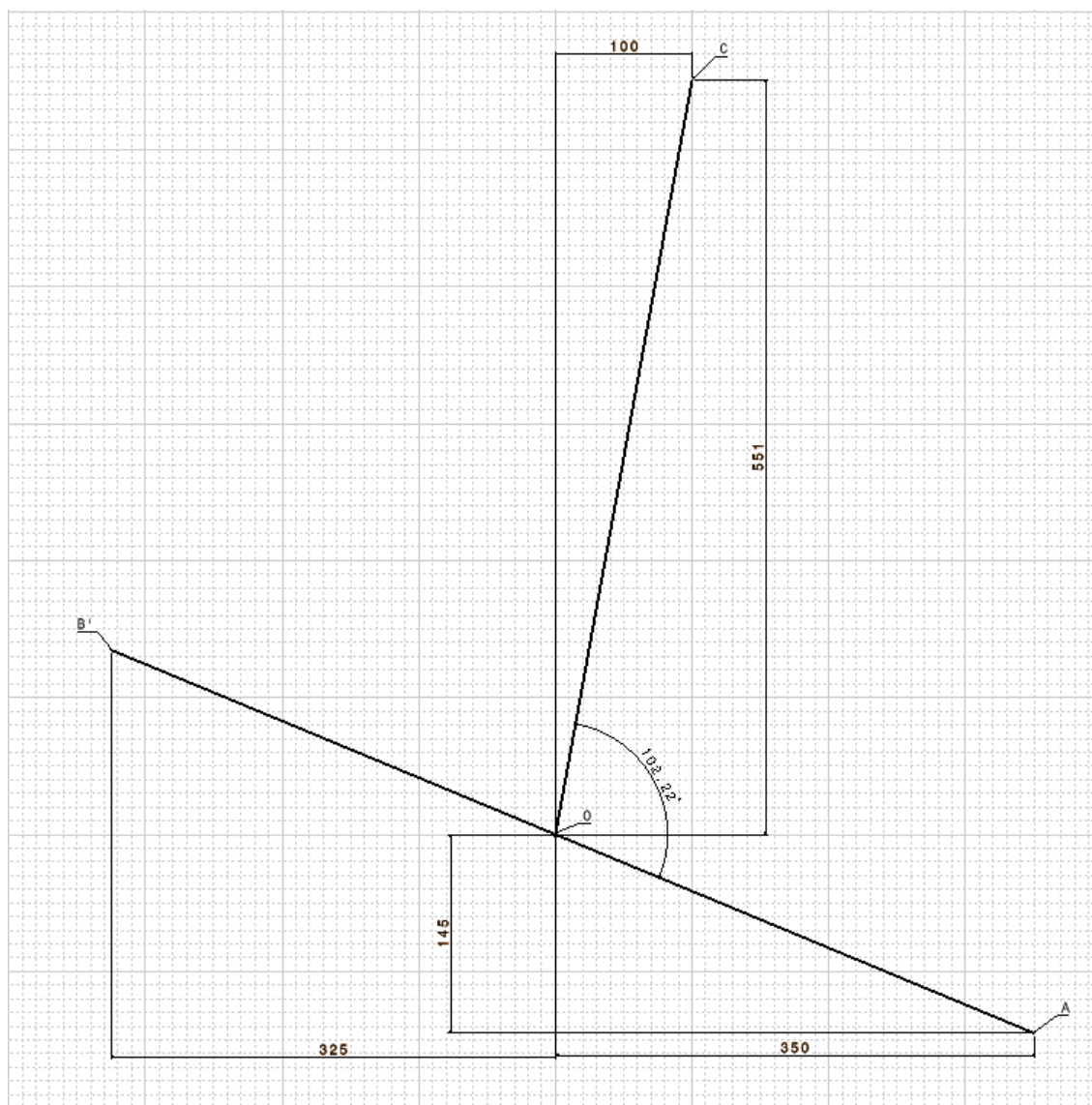
$$F_{ry} = 7710,41 \text{ N} \quad (70)$$

$$F_R = \sqrt{(203112,5 \text{ N})^2 + (7710,41 \text{ N})^2} / 2 \quad (71)$$

$$F_R = 101,629 \text{ N} \quad (72)$$

KUORMITUSLASKUT NIPISSÄ 4

Kuviossa 14 on mitoituskuva nippi neljästä. Kaavoissa 73-74 on laskettu suoran CO ja suoran AB' normaalin välinen kulma.



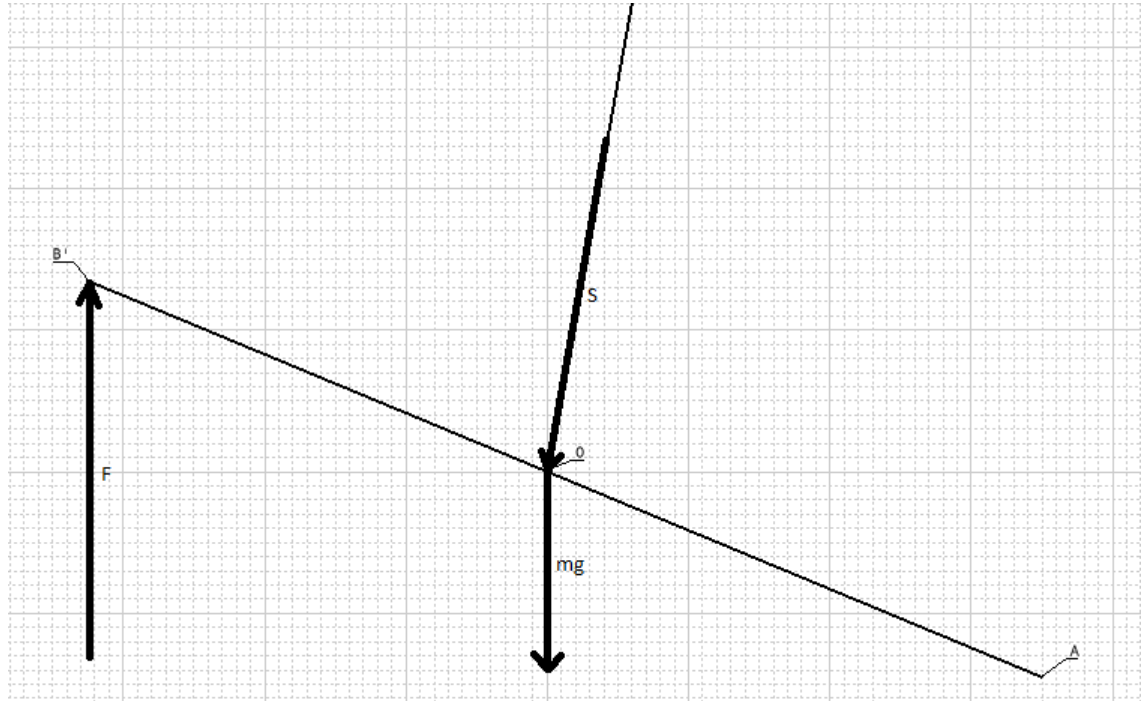
Kuvio 14. Mitoituskuva neljänestä nipistä

$$\theta = 102,22^\circ - 90^\circ \quad (73)$$

$$\theta = 12,22^\circ \quad (74)$$

LIITE 3: 16 (19)

Kuviossa 15 on nippi neljän sylinterin ja alatelan muodostama vapaakappalekuva. Kaavoissa 75-77 on laskettu voima S .



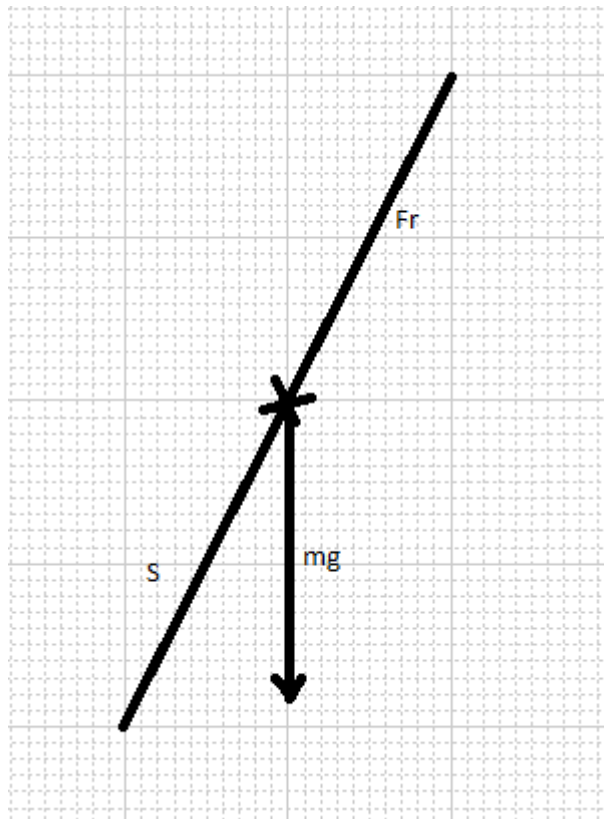
Kuvio 15. VKK10

$$0 = 2 \times F \times \cos 22,504 \times L_{AB'} - S \times \cos 12,22 \times L_{AO} - mg \times \cos 22,504 \times L_{AO} \quad (75)$$

$$S = \frac{147264 \text{ N} \times \cos 22,504 \times 0,730633 \text{ m} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 22,504 \times 0,378847 \text{ m}}{\cos 12,22 \times 0,378847 \text{ m}} \quad (76)$$

$$S = 227663,67 \text{ N} \quad (77)$$

Kuviossa 16 on ylätelan vapaakappalekuva. Kaavoissa 78-85 on laskettuna laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 16. VKK11

$$F_{ry} = S - mg \times \cos 10,29 \quad (78)$$

$$F_{ry} = 227663,67 \text{ N} - 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 10,29 \quad (79)$$

$$F_{ry} = 185193,9 \text{ N} \quad (80)$$

$$F_{rx} = mg \times \cos(90 - 10,29) \quad (81)$$

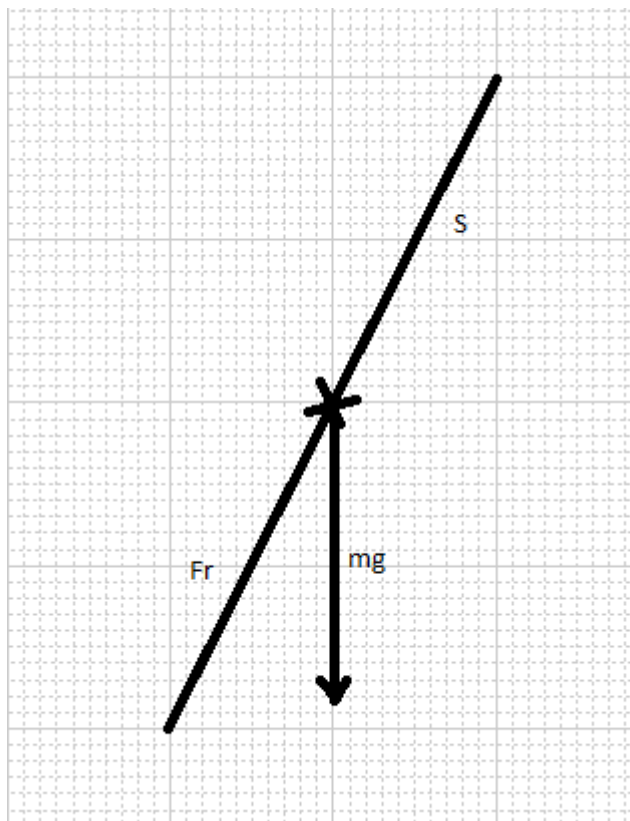
$$F_{rx} = 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 79,71 \quad (82)$$

$$F_{rx} = 7710,41 \text{ N} \quad (83)$$

$$F_R = \sqrt{(185193,9 \text{ N})^2 + (7710,41 \text{ N})^2} / 2 \quad (84)$$

$$F_R = 92677,2 \text{ N} \quad (85)$$

Kuviossa 17 on alatelan vapaakappalekuva. Kaavoissa 86-93 on laskettu laakeriin kohdistuva resultanttivoima.



Kuvio 17. VKK12

$$F_{ry} = S + mg \times \cos 10,29 \quad (86)$$

$$F_{ry} = 227663,67 \text{ N} + 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 10,29 \quad (87)$$

$$F_{ry} = 270133,4 \text{ N} \quad (88)$$

$$F_{rx} = mg \times \cos(90 - 10,29) \quad (89)$$

$$F_{rx} = 4400 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times \cos 79,71 \quad (90)$$

$$F_{rx} = 7710,41 \text{ N} \quad (91)$$

$$F_R = \sqrt{(270133,4 \text{ N})^2 + (7710,41 \text{ N})^2} / 2 \quad (92)$$

$$F_R = 135121,7 \text{ N} \quad (93)$$

LAAKERIN DYNAAMINEN JA STAATTINEN KANTAVUUS

Tutkittavan laakerin tarvittavat tiedot kaavat 94-95 saadaan opinnäytetyön kohdasta 3.2.

$$C = 1\,270\,000\text{ N} \quad (94)$$

$$C_o = 1\,760\,000\text{ N} \quad (95)$$

Suurin laakerin kohdistuva voima on ensimmäisen nipin alatelassa. Laakeriin kohdistuva voima on kuvattu kaavassa 96.

$$F_R = 174724,55\text{ N} \quad (96)$$

Kaavassa 97-99 on laskettuna laakerin dynaaminen kuormitusluku. Laakerin pyörimisnopeus on 8 r/min ja käyttöikä noin 60 000 h, joka vastaa noin seitsemän vuoden yhtäjaksoista käyttöä. Laakeriin ei kohdistu akselin suuntaisia voimia, joten ekvivalenttikuormitus P on säteen suuntainen voima.

$$C = \left(\frac{10}{3}\right) \sqrt{\frac{60 \times n \times L_{10} h}{10^6}} \times P \quad (97)$$

$$C = \left(\frac{10}{3}\right) \sqrt{\frac{60 \times 8 \frac{r}{min} \times 60000\text{ h}}{10^6}} \times 174724,55\text{ N} \quad (98)$$

$$C = 289242,9\text{ N} \quad (99)$$

Laakerin staattinen kuormitusluku on laskettu kaavassa 100-102. Kaavan varmuusluvuksi valitsin 1,5.

$$C_o = f_s \times P_o \quad (100)$$

$$C_o = 1,5 \times 174724,55\text{ N} \quad (101)$$

$$C_o = 262086,8\text{ N} \quad (102)$$