

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikan koulutusohjelma

Kandidaatin työ

Joonas Helander

NIPPIVOIMAN MITTAUSLAITE
DEVICE FOR MEASURING THE NIP FORCE

Työn tarkastaja: Tutkijaopettaja Kimmo Kerkkänen

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 NIPPI JA SEN MERKITYS PAPERINVALMISTUSPROSESSISSA	2
2.1 NIPIN PERUSKÄSITTEITÄ	2
2.2 YLEISKATSAUS PAPERINVALMISTUSPROSESSIIN	3
2.3 PAPERIKONEEN PURISTINOSA	4
2.4 RAINAN VESIPITOISUUSPROFIILI POIKKISUUNNASSA PURISTINOSAN JÄLKEEN	5
2.5 LINEAARISESTI KONEEN POIKKISUUNNAASSA MUUTTUVA NIPPIVOIMA	6
3 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN HAHMOTTELEMINEN	9
3.1 ONGELMAKOHDAN TELOJEN OMINAISPIIRTEET	9
3.2 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN HAKU PERIAATTEELISELLA TASOLLA	10
3.3 MITTAAMINEN VENYMÄN PERUSTEELLA	10
3.4 MITTAAMINEN VÄRÄHTELYANALYYSIN PERUSTEELLA	12
3.5 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN VERTAILU JA KEHITELTÄVÄN JATKORATKAISUN VALINTA	16
4 RATKAISUN JATKOKEHITTELY	17
4.1 VENYMÄLIUSKAMITTAUS	19
4.1.1. WHEATSTONEN SILTAKYTKENTÄ	19
4.2 RUUVIVOIMAN MITTAUS RAKENTEESTA VOIMA- ANTURILLA	20
5 RAKENTEEN ELEMENTTIANALYYSI JA TULOSTEN ANALYSOINTI	23
5.1 FE-ANALYYSIN PERUSTEITA	23

5.2 TELAN TUENNAN FEM-MALLI	24
5.3 ANALYYSI RUUVIVOIMAN MITTAUKSEN KANNALTA	27
5.4 ANALYYSI VENYMÄLIUSKAMITTAUSTA VARTEN	29
5.5 TULOSTEN ANALYYSINTI	30
5.6 UUSI FE-ANALYYSI JA LOPULLINEN RATKAISU	31
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	33

1 JOHDANTO

Nippi on yksi nykyaikaisen paperikoneen tärkeimmistä mekanismeista. Nippejä esiintyy monissa paperinvalmistuksen eri vaiheissa erilaisin käyttötarkoituksin. Käytännössä nippi koostuu kahdesta toisiaan vasten painettavasta telasta. Näin telojen väliin syntyy puristusvoima, joka on teoriassa muodoltaan viivamainen.

Yksi prosessin lopputuloksen kannalta kriittisimmistä vaiheista on puristinosalla tapahtuva veden poistaminen rainasta puristuspaineen avulla. Tämä toteutetaan nipin avulla siten, että raina ajetaan toisiaan vasten puristettujen telojen välistä.

Tässä työssä haetaan ratkaisua useissa paperikoneissa havaittuun ongelmaan. Vaikka nippivoiman pitäisi teoriassa olla tasainen koko nipin leveydeltä, on tässä todellisuudessa havaittu merkittäviä epätasaisuuksia. Tämä puolestaan vaikuttaa ratkaisevasti lopputuotteen laatuun. Tavoitteena on kehittää mittalaite, jolla nippivoimaa voidaan luotettavasti mitata nipin molemmista päistä. Tämän mittatiedon perusteella on mahdollista muuttaa nipin kuormitusta jommalla kummalla puolella todellisen nippivoiman tasaamiseksi.

Nippivoima ei todellisuudessa muutu lineaarisesti telan suunnassa, vaan esimerkiksi telassa tapahtuva deformaatio aiheuttaa epätasaisuuksia nippivoimaan. Näitä epätasaisuuksia ei kuitenkaan huomioida tässä työssä. Tavoite on ainoastaan mitata nippivoimaa telojen molemmista päistä.

Mittauksen lähtökohdaksi otetaan kaksi nipin rakenteessa ilmenevää fysikaalista ilmiötä: rakenteessa ilmenevät venymät ja rakenteessa ilmenevät värähtelyt. Näitä ilmiöitä mittaamalla saadaan tieto myös todellisesta nipissä vaikuttavasta voimasta.

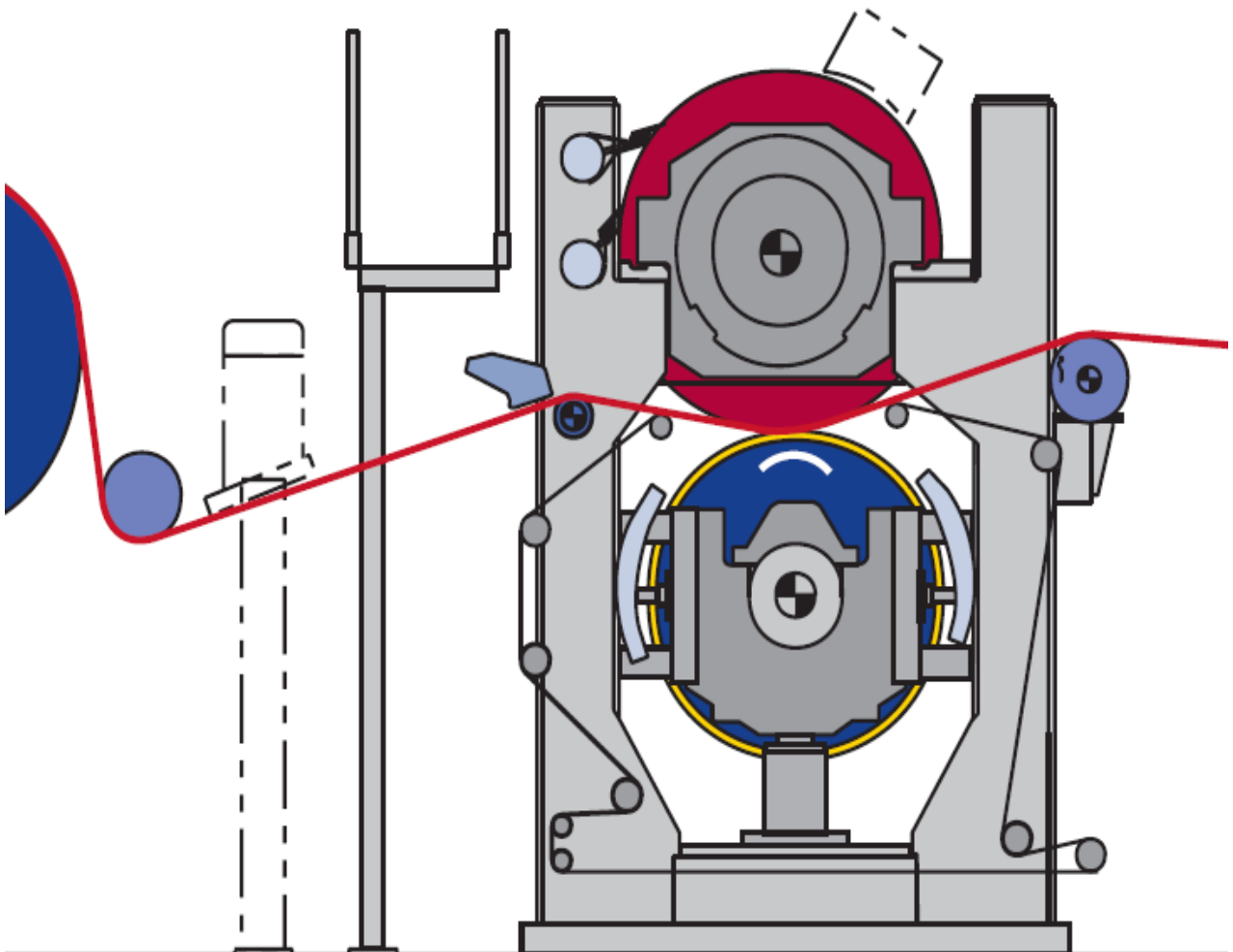
Työssä esitellyt käytännön sovellukset on tehty Tervasaaren paperikoneen 1. puristimen nipille, jossa epätasaisen nippivoiman ongelmia on havaittu runsaasti. Ratkaisua kehiteltäessä otetaan kuitenkin myös huomioon eri paperikoneiden poikkeavuudet toisistaan sillä periaatteella, että kehitetty ratkaisu olisi sovellettavissa myös muihin kuin vain tutkittuun nippiin.

2 NIPPI JA SEN MERKITYS PAPERINVALMISTUSPROSESSISSA

Nippi on yksi nykyaikaisen paperikoneen oleellisimmista käsitteistä. Kyseessä on kahden telan väliin jäävä kontaktialue. Tämän alueen läpi paperi kulkee joko paljaana rainana tai huopien/viiran kera. Paperinvalmistus on monivaiheinen prosessi ja nippejä käytetään eri vaiheissa erilaisiin tehtäviin. Peruseriaate on kuitenkin prosessin vaiheesta riippumatta jokseenkin sama: paperin ominaisuuksia pyritään muokkaamaan puristuspuheen avulla. /1/

2.1 NIPIN PERUSKÄSITTEITÄ

Nipin periaate on nähtävissä kuvassa 1. Paperirainan kulkiessa kahden telan välistä telojen päissä vaikuttava nippivoima aiheuttaa rainaan teoriassa viivakuorman. /1/



Kuva 1. Nipin periaate. /2/

Vaikka nippien kohdalla puhutaankin viivakuormista, on kuormitus todellisuudessa jakautunut äärellisen levyiselle alueelle. Tämä johtuu nippivoiman aiheuttamasta telojen deformaatiosta. /1/

Tämä teoreettinen kuorma on laskettavissa yksinkertaisesti yhtälöstä:

$$P = \frac{pA}{L} = \frac{2F}{L}, \quad (1)$$

jossa A on kontaktialueen pinta-ala, p keskimääräinen nippipaine, L nipin pituus ja F telan molemmissa päissä vaikuttava todellinen nippivoima. /1/

2.2 YLEISKATSAUS PAPERINVALMISTUSPROSESSIIN

Paperikoneen pääosiksi voidaan nimetä perälaatikko, viiraosa, puristinosa ja kuivatusosa. Näistä kolme ensimmäistä kuuluvat paperikoneen niinsanottuun märkään päähän ja kuivatusosa puolestaan kuivaan päähän. /3/

Perälaatikolta laimea kuituseos (sulppu) syötetään viiraosalle. Viira on päättymättömistä muovilangoista kudottu matto, jonka kudosten silmien läpi poistetaan suurin osa - parhaimmillaan jopa yli 95 % sulpun sisältämästä vesimassasta. Viiraosan jälkeen rainan kuivainepitoisuus on noin 15-20 %. Seuraavaksi vuorossa olevan puristinosan jälkeen kuiva-ainepitoisuus on saatu kasvatettua noin 50 %:iin. Puristinosa on esitelty tarkemmin kappaleessa 2.1. /3/

Puristinosan jälkeen siirrytään niin sanottuun kuivapäähän ja tarkemmin sanottuna kuivatusosaan. Tässä vaiheessa raina kulkee höyryllä lämmitettävien sylinterien päällä. Näin rainasta haihdutetaan vettä pisteeseen, jossa rainan kosteus on enää 3-10 %. Kuivatusosa saattaa myös valmistettavasta paperilaadusta johtuen sisältää erilaisia pintakäsittelyvaiheita. Tällainen on esimerkiksi suurihalkaisijainen jenkkisylinteri tai liimapuristin. Mahdollinen päällystys voidaan suorittaa kuivatusosan ohella myös erillisellä päällystyskoneella. /3/

Kuivatusosan jälkeen siirrytään kalanterille ja sen jälkeen rullaimelle. Kalanteroinnin tarkoituksena on viimeistellä paperin pinta ajamalla sitä tarkoitusta varten suunniteltujen nippien läpi.

Kalanteroinnin jälkeen siirrytään rullaimelle, jossa valmis paperi rullataan tampuuriraudan ympärille suureksi koneen levyiseksi konerullaksi. Tämän jälkeen paperi saatetaan lopulliseen, asiakkaan toivomaan muotoon. /3/

2.3 PAPERIKONEEN PURISTINOSA

Paperikoneessa sijaitsee lukuisia nippejä eri työvaiheissa. Tässä työssä tutkitaan kuitenkin nippivoimaa nimenomaan puristinosaalla, joten puristinosan tarkempi esittely on paikallaan.

Puristinosan pääasiallinen tehtävä on veden poistaminen rainasta. Viiraosalta tuleva raina on osittain veden täyttämä kuituverkosto. Puristinosaalla nippien aiheuttaman puristuspaineen avulla saadaan vesi poistumaan rainasta. Se mikä rainan kuiva-ainepitoisuus on ennen ja jälkeen puristuksen, riippuu pitkälti valmistettavasta paperilaadusta. Tyypillisesti se on kuitenkin ennen puristusta noin 20 % ja puristuksen jälkeen noin 50 %. /4/

Puristinosa seuraavan kuivatusosan energiankulutuksen ja ajettavuuden kannalta on erityisen oleellista, kuinka suureksi kuiva-ainepitoisuus saadaan puristinosaalla, joten on erittäin tärkeää, että puristinosa on suunniteltu mahdollisimman tehokkaaksi. Vaikka puristuksen tärkein tehtävä onkin veden poistaminen rainasta, on sillä myös muita tehtäviä. Se myös lujittaa ja tiivistää rainaa. Näin saavutetaan riittävä märkälujuus ja mahdollistetaan näin rainan katkeamaton siirto kuivatusosalle ja siellä sylinteriltä toiselle. Puristusvaiheella on suuri merkitys esimerkiksi lopputuotteen lujuuden, sileyden ja rakenteen symmetrian kannalta. /4/

Puristinosan nipeissä käytetään puristuksen apuna puristimessa kiertäviä huopia. Huovat pehmentävät nippikosketusta elastisuutensa ansiosta. Huovan tärkein tehtävä nipissä on kuitenkin rainan tukeminen ja rainasta poistettavan veden kerääminen. Lisäksi huovat siirtävät rainan nipistä toiseen. Toimiakseen tehokkaasti huovan tulee olla tasainen ja hienokuituinen. Lisäksi sen on myös oltava rainaa suurihuokoisempaa ja jäykempää, jotta vesi saadaan siirtymään puristettaessa rainasta siihen. /4/

Paperikoneissa käytetään lukuisia erityyppisiä puristimia. Näistä yksinkertaisin on sileä puristin, jossa nippi koostuu kahdesta sileästä telasta. Sileän puristimen vedenpoistokyky ei ole erityisen suuri ja täten sillä ei päästäkään kovin suuriin ajonopeuksiin. Imupuristimessa käytetään puolestaan

imutelaa huovan sisäpuolella. Imutelassa on alipaine, jolloin se imee kosteutta itseensä rainasta. Suurilla nopeuksilla tämän imun merkitys on kuitenkin suhteellisen pieni ja imupuristimen suurin merkitys on tyypillisesti rainan kunnostaminen ennen nippiä. Onsipintapuristimien teloihin on puolestaan tehty erilaisia onteloita, joihin vesi saadaan siirtymään huovasta mahdollisimman helposti. Onsipintapuristimia löytyy runsaasti erityyppisiä, jotka poikkeavat toisistaan lähinnä onteloiden mallin mukaan. Lisäksi käytetään muun muassa kaksoishuopapuristimia, joissa käytetään kahta huopaa puristamiseen perinteisen yhden sijaan. /4/

2.4 RAINAN VESIPITOISUUSPROFIILI POIKKISUUNNASSA PURISTINOSAN JÄLKEEN

Koko paperinvalmistusprosessin kannalta on erittäin oleellista, että vesipitoisuus on tasainen koko rainan leveydeltä puristuksen jälkeen. On kuitenkin useita asioita, jotka voivat vaikuttaa negatiivisesti tähän jakaumaan. Näitä syitä ovat esimerkiksi rainan epätasainen kosteusjakauma viiralta tultaessa, puristinpaineen epätasainen jakautuminen rainan poikki, rainan ja huovan virtausvastuksen epätasainen jakauma ja rainan epätasainen lämpötilaprofiili nipissä. /4/

Käytettäessä imuteloja tai onsipintapuristimia on epätasainen virtausjakauma potentiaalinen ongelma. Tällainen ongelma syntyy joko imureikien tai onsipintapuristimen onteloiden tukkeutuessa. Tämän ongelman ratkaisemiseksi on kehitetty erilaisia puhdistusjärjestelmiä. /4/

Toinen epätasaisen kosteusprofiilin aiheuttaja, johon on kiinnitettävä erityistä huomiota puristinosan suunnittelun kohdalla, on puristinpaineen tasainen jakautuminen. Tyypillisesti nipin puristusvoima saadaan aikaan hydraulisylintereillä, joiden puristusvoimaa seurataan jatkuvasti. Molemmilla puolilla (hoitopuoli ja käyttöpuoli) sijaitsee omat sylinterinsä. Jotta nippivoima olisi tasainen, on molemmilta puolilta puristettava yhtä suurella voimalla. Se, että nippiä ajetaan molemmin puolin yhtä suurella voimalla, ei kuitenkaan vielä takaa tasaista nippivoimaa koko telan matkalta. Nipin oma paino ja nipin viivakuorma aiheuttavat muodonmuutoksia, jotka vaikuttavat nippivoiman jakautumiseen. /1/

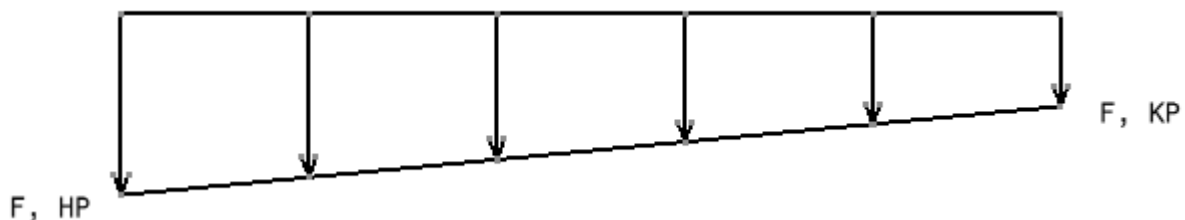
Mikäli nipissä käytettävät telat olisivat äärettömän jäykkiä, jakautuisi nippivoima teoriassa tasaisesti koko nipin alueelle. Näin ei toki kuitenkaan ole, vaan telan vaippa sekä taipuu että litistyy keskeltä. Tämän ongelman minimoimiseksi telat on usein bombeerattu. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että

tela on valmistettu muotoon, joka mahdollisimman hyvin kompensoi syntyvät taipumat ja litistymät. Perinteisen kiinteän bombeeraus- lisäksi on myös kehitetty niin sanottu säädettävä bombeeraus. Tällaisessa tapauksessa telan akseli on paikallaan ja sen ympärillä pyörii vaippa, jonka taipuma kompensoidaan hydraulisella paineella. Tätä ratkaisua on edelleen kehitetty siten, että telaan on rakennettu useita säädettäviä kuormituselementtejä. Näin voidaan kompensoida paikallisia nippikuorman vaihteluja. Tästä on edelleen jatkettu monivyyhykesäädettäviin teloihin, joissa on useita kymmeniä erikseen säädettäviä kuormituselementtejä. /1/

2.5 LINEAARISESTI KONEEN POIKKISUUNNAASSA MUUTTUVA NIPPIVOIMA

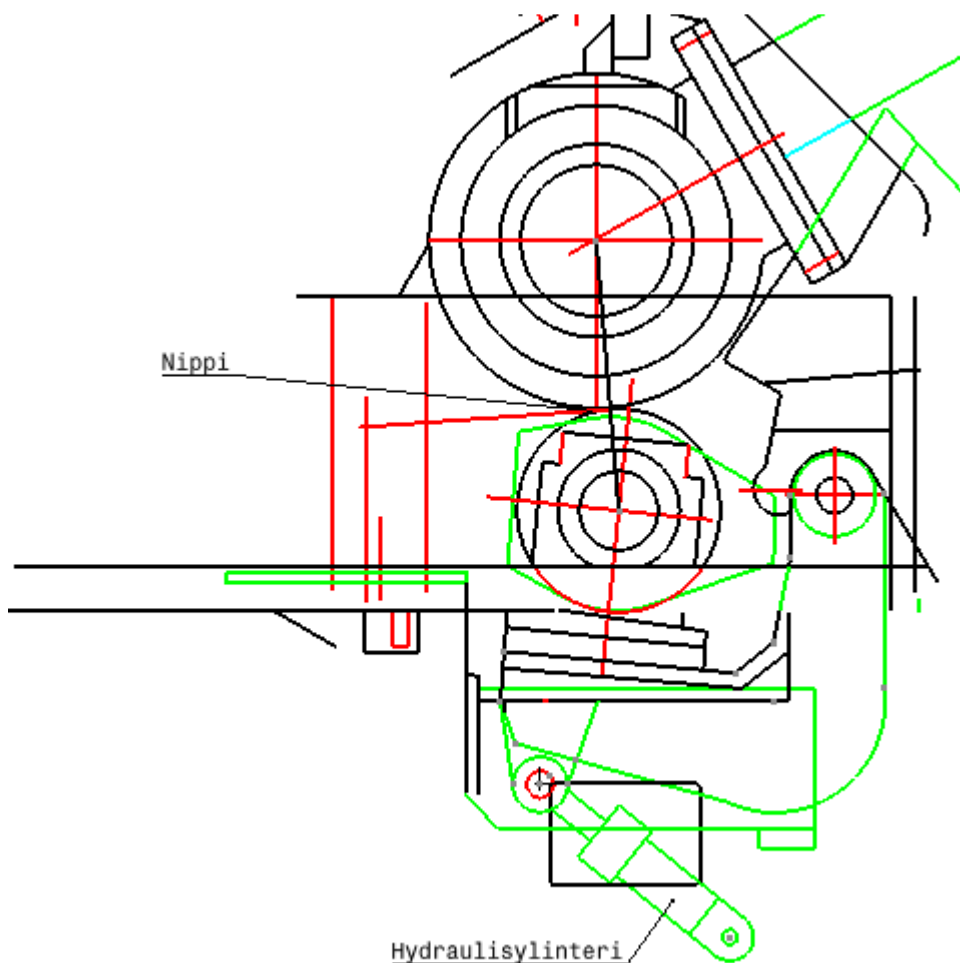
Tässä työssä ei puututa teoriaa tarkemmin telan taipuman aiheuttamaan nippikuorman epätasaisuuteen. Sen sijaan etsitään keinoja tarkastella todellista nippivoimaa hoito- ja käyttöpuolella. Kuten jo jo teoriaosuudesta käy ilmi, tulisi nippivoiman olla molemmilla puolilla yhtä suuri paperin mahdollisimman korkean laadun takaamiseksi.

Kun jätetään huomioonottamatta telan taipuman aiheuttama nippivoiman epätasainen jakautuminen, muodostuu teoreettinen viivakuormajakautuma lineaarisesti. Tällöin siis nippivoiman arvo muuttuu hoitopuolen todellisesta arvosta lineaarisesti käyttöpuolen arvoon (Kuva 2.)



Kuva 2. Esimerkki nippivoiman lineaarisesta jakautumisesta. Tässä esimerkkitapauksessa hoitopuolella nippivoima on suurempi kuin käyttöpuolella.

Kuvassa 3 on esimerkki tyypillisesti nipin rakenteesta puristinosalta. Kyseinen kuva on Tervasaaren paperitehtaan 1. puristimelta. Kyseisessä rakenteessa ylempi tela on siis kiinteä ja alempi tela ajettavissa ylätelaa vasten kuormitusvarsien välityksellä. Ajaminen ylätelaa vasten ja käytännössä siis nippivoima muodostetaan kuvassakin esitetyllä hydraulisylinterillä.



Kuva 3. Nippi Tervasaaren paperikoneen puristinosasta.

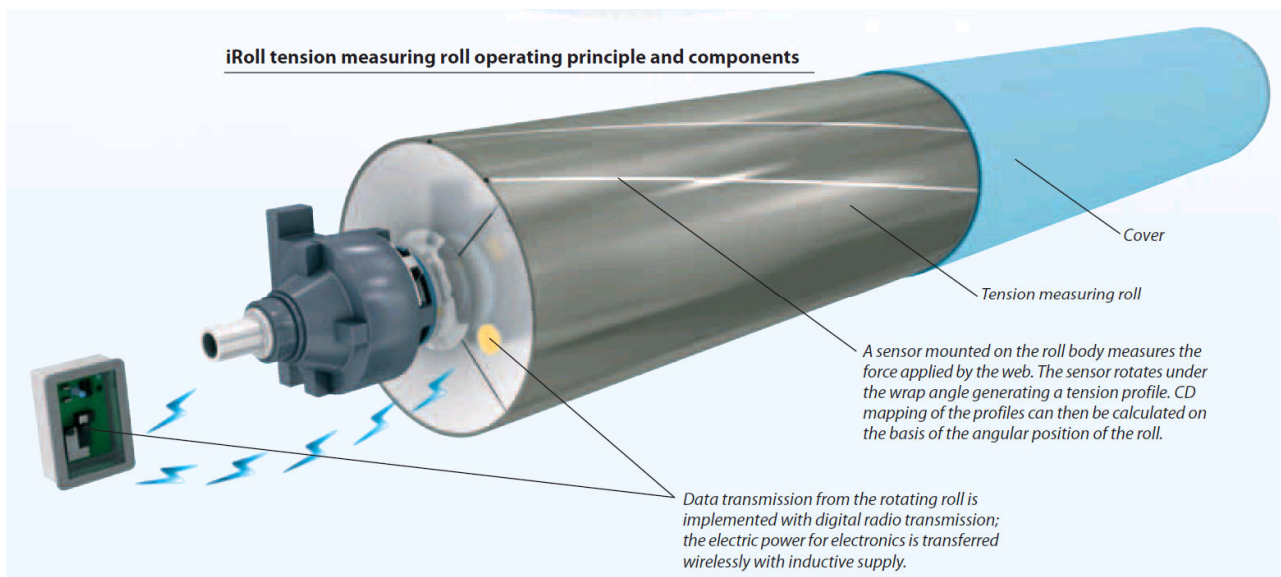
Tällaisessa rakenteessa nippivoimaa on perinteisesti säädelty sillä yksinkertaisella periaatteella, että sekä käyttö- että hoitopuolen sylintereitä ajetaan samalla voimalla. Tällöin nippivoima on teoriassa sama molemmilla puolilla. Käytäntö on kuitenkin osoittanut, että tästä teoriasta huolimatta todellisessa nippivoimassa saattaa olla suuriakin eroja hoito- ja käyttöpuolen välillä. /9/

Suurin syy eri suuruisiin nippivoimiin lienee kuormitusvarren nivelten kitka. Vaikka nivelten tulisi toimia jouheasti, on niissä kuitenkin havaittu jopa silmämääräisesti epätasaista käyttäytymistä. Käytännössä siis hydraulisyylinterin painetta nostettaessa kuormitusvarren liike on saattanut hetkellisesti jopa pysähtyä. Edelleen painetta lisättäessä tätä on sitten seurannut lopulta nykäisy ja liikkeen uudelleenjatkuminen. Muita vähemmän merkittäviä syitä eri suuruisiin nippivoimiin ovat

esimerkiksi mahdolliset valmistuksen pienet virheet ja telan massan epätasainen jakauma poikkisuunnassa. /5/

Jotta nippivoima olisi mahdollista saada yhtä suureksi molemmin puolin, on tarpeen saada luotettava mittatieto nippivoiman suuruudesta molemmin puolin. Edellä kerrotun perusteella käytetty hydraulisynterin paineen mittaus ei anna riittävän tarkkoja tuloksia, vaan ongelmaan on tarpeen kehittää toisenlainen ratkaisu. /5/

Uusiin paperikoneisiin on kehitetty monenlaisia mittausratkaisuja todellisen nippivoiman aktiiviseen seurantaan. Esimerkiksi Metso Paper on kehittänyt iROLL-nimisen anturoidun telan, joka monitoroi todellisen nippivoiman koko telan matkalta (kuva 4). Tällainen ratkaisu mahdollistaakin erittäin tarkan nippivoiman säädön joko molemmin puolin hydraulisyntereihin tai säädettävällä bombeeruksella varustetun telan tapauksessa koko telan matkalta. Vaikka epätasainen nippivoiman jakautuminen aiheuttaakin merkittäviä tappioita monissa käytössä olevissa koneissa, ei tällaisen ratkaisun jälkiasennus ole perusteltavissa korkeista kustannuksista johtuen. /5/



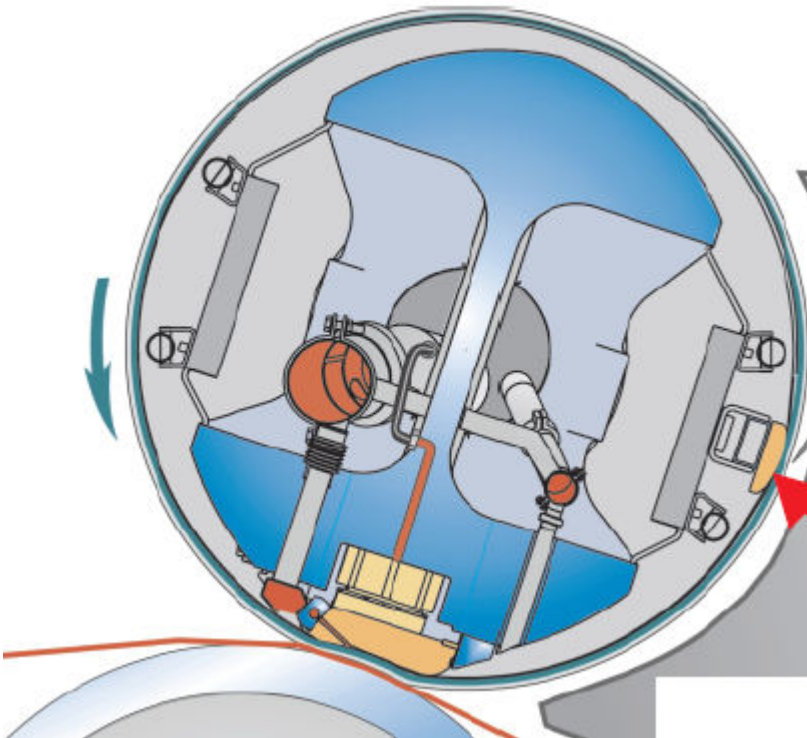
Kuva 4. Metson nippivoimaa mittaava iRoll, jonka sensorit välittävät tiedon nippivoimasta langattomasti vastaanottimelle. /6/

3 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN HAHMOTTELEMINEN

3.1 ONGELMAKOHDAN TELOJEN OMINAISPIIRTEET

Tässä työssä tarkasteltava nippi koostuu kahdesta telasta, joista toinen on niinsanottu SYM-tela (alempi tela kuvassa 3.) ja toinen puolestaan imutela (ylempi tela). Käytännössä tällaista puristinta kutsutaan kenkäpuristimeksi. Näiden telojen ominaispiirteet asettavat tiettyjä rajoitteita ja vaatimuksia ongelman ratkaisulle.

SYM-tela koostuu vastatelan (imutela) mukaisesti muotoillusta kengästä sekä sen päällä kulkevasta nauhasta. /4/ Vastatelana toimii siis imutela, joka on esitelty kappaleessa 2.1. Tilannetta vastaava nipin rakenne on nähtävissä kuvassa 5.



Kuva 5. Kenkäpuristimen rakenne. /7/

Tällaiseen nippiin ratkaisun hakeminen on hieman vaikeampaa kuin esimerkiksi sileillä teloilla varustetun nipin tapauksessa. Tällöin nippivoimaa olisi mahdollista mitata telan akselilta. Kenkäpuristimessa telojen päissä ei kuitenkaan ole varsinaista akselia mittausta varten, joten mittauskohdalla on etsittävä muualta.

Vaihtoehdoksi mittauskohdalle jää nyt jomman kumman telan kannatusrakenteet. Toisaalta imutelaan kohdistuu myös toinen nippivoima, joten tutkittavan nippivoiman analysoimiseksi on mittauspisteen sijaittava nimenomaan SYM-telaa kannattelevassa rakenteessa.

3.2 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN HAKU PERIAATTEELISELLA TASOLLA

Jotta ongelmaan voi kehittää käytännön ratkaisun, on tunnettava teoreettisella tasolla tämänkaltaisen teräsrakenteen fyysistä käyttäytymistä. On siis tiedettävä, minkälaisia fysikaalisia ilmiöitä rakenteessa ilmenee nippivoiman johdosta. Seuraavaksi on analysoitu kaksi erilaista rakenteessa esiintyvää fysikaalista ilmiötä, jonka perusteella käytännön ratkaisua on lähdetty hakemaan.

3.3 MITTAAMINEN VENYMÄN PERUSTEELLA

Teräksen venymän ja jännityksen välistä yhteyttä on perinteisesti tutkittu vetosauvakokeen avulla. Tällöin terässauvaa vedetään sen pituusakselin suuntaisesti ja samalla mitataan venymää. Yleisesti tiedetään, että vedolla olevan sauvan normaalijännitys on

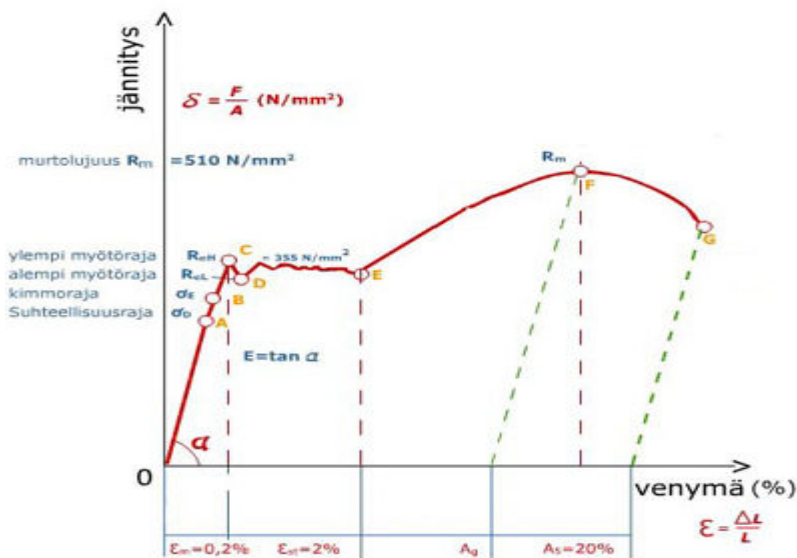
$$\sigma = \frac{F}{A}, \quad (2)$$

jossa σ on siis kappaleeseen syntyvä normaalijännitys, F kappaleessa vaikuttava voima ja A sauvan poikkipinta-ala. /8/ Tämän perusteella voidaan siis laskea jännitys kappaleessa, kun vetävä voima ja sauvan poikkipinta-ala tunnetaan. Näiden tietojen perusteella puolestaan voidaan laatia jännitys-venymä-piirros, jossa suhteellinen venymä kulkee vaakaa-akselilla ja kappaleessa vaikuttava jännitys puolestaan pystyakselilla. Suhteellinen venymä voidaan mittatietojen perusteella laskea yhtälöstä

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0}, \quad (3)$$

jossa L on vedolla olevan sauvan pituus ja L_0 sauvan alkuperäinen pituus. /8/

Teräksen ollessa kyseessä jännitys-venymäpiirros on tyypillisesti lineaarinen alkuosaltaan. Venymä siis kasvaa suoraan verrannollisesti suhteessa jännitykseen. Liikuttaessa lineaarisella alueella palautuu venymä myös lineaarisesti samaa suoraa pitkin, mikäli kuormitus poistetaan. Lineaarisen alueen jälkeen tullaan suhteellisuusrajalle, jossa poikkeama origoon piirretystä käyrän tangentista on 0.001-0.002 %. Tämän jälkeen tullaan kimmorajalle, joka määritellään siten, että kuorman poistamisen jälkeen rakenteeseen jää pysyvä venymä suuruudeltaan 0.01-0.02 % sauvan alkuperäisestä pituudesta. Seuraavaksi tullaan myötörajalle, jonka kohdalla jännitys ei enää nouse vaikka venymä kasvaakin. Teräksille on tyypillisesti erotettavissa myös ylempi ja alempi myötöraja. Myötöalueen jälkeen jännitys alkaa jälleen nousta saavuttaen lopulta murtorajan. Tyypillinen teräksen jännitys-venymä-piirros on nähtävissä kuvassa 6. /8/



Kuva 6. Tyypillinen teräksen jännitys-venymäpiirros. /9/

Käytännössä voidaan tehdä oletus, että tutkittavassa telan kannatinrakenteessa liikutaan selkeästi kimmoisella alueella. Tällaista rakennetta ei mitoiteta niin, että rakenteessa tapahtuisi merkittävää plastisoitumista. Kimmoisella alueella liikuttaessa on voimassa Hooken laki, jonka mukaan

$$\sigma = E\varepsilon, \quad (4)$$

jossa E on materiaalille ominainen kimmomoduuli ja ε suhteellinen venymä. /8/ Tämä yksinkertaistus yksinkertaistaa tehtävää analyysiä huomattavasti. Käytännössä siirryttäessä epälineaariseen - siis plastiselle - alueelle, muuttuisi venymän laskeminen numeeriseksi ongelmaksi, jolloin käytännön ratkaisu olisi huomattavasti raskaampaa. /8/

Yksi ratkaisuvaihtoehto onkin mitata venymää jostakin tietyistä rakenteen kohdasta ja tämän venymän perusteella ratkaista nipissä vaikuttava voima. Tyypillinen mittalaite venymän mittaamiseen on venymäliuska. Venymäliuskaa kiinnitetään rakenteeseen siten, että siinä ilmenee vastaava venymä kuin tutkittavassa rakenteessa. Tällöin puolestaan jännite liuskan päiden välillä muuttuu. Lopulta tämän päiden väliltä mitatun jännityksen avulla voidaan laskea rakenteessa ilmenevä venymä.

Venymän mittaus venymäliuskalla on perinteinen, hyvin tunnettu ja suhteellisen yksinkertainen menetelmä. Haasteeksi tässä nousee lähinnä liuskan sijoittaminen rakenteeseen. Oleellista on toisaalta löytää kohta, jossa ilmenee riittävän suuria muodonmuutoksia luotettavien mittaustulosten aikaansaamiseksi. Toisaalta kohdan on myös oltava siinä määrin selkeä, että liuskat kyetään asettamaan riittävän luotettavalla tarkkuudella samalle kohtaan sekä hoito- että käyttöpuolella.

Käytännössä venymäliuskan paikan hakemiseksi on käytettävä FE-analyysiä. FE-analyysin avulla saadaan suhteellisen pienellä työmäärällä laskettua siirtymät - ja näiden perusteella venymät - rakenteen eri osissa tietyllä nipin kuormituksella. Toisaalta FE-analyysin avulla voidaan myös laskea todellinen nippivoima siirtymien perusteella. Nippivoiman lukuarvo ei kuitenkaan tässä tapauksessa ole erityisen oleellinen, vaan tärkeää on nimenomaan, että nippivoima on yhtä suuri molemmilla puolin. Tämän todentamiseksi taas riittää, että vastaavista kohdista mitatut venymät ovat yhtä suuret sekä hoito- että käyttöpuolella.

3.4 MITTAAMINEN VÄRÄHTELYANALYYSIN PERUSTEELLA

Venymän ohella toinen merkittävä fysikaalinen ilmiö tällaisessa rakenteessa on värähtely. Paperikoneessa on lukuisia värähtelyn lähteitä, joista pyörivät telat ovat merkittävimpiä. Toisaalta nippivoima vaikuttaa myös osaltaan ilmenevään värähtelyyn, joten nippivoima on mitattavissa myös tätä kautta.

Teoriassa paperikoneen telan painopisteen tulisi olla täsmälleen telan akselin kohdalla. Käytännössä näin ei kuitenkaan ole, vaan teloissa on aina jonkin verran epäkeskeisyyttä. Tämä epäkeskeisyys aiheuttaa puolestaan rakenteeseen värähtelyherätteen. /10/

Yksinkertaisuuden vuoksi tässä käydään läpi yhden vapausasteen systeemi, jossa rakenteessa on vain yksi värähtelevä massa, jolla on yksi ominaismuoto. Tällaisen rakenteen periaate on nähtävissä myös kuvassa 7. Tällöin poikkeamalle tasapainoasemasta voidaan kirjoittaa:

$$x(t) = X \cdot \sin(\omega_r t - \theta), \quad (5)$$

jossa ω_r on epäkeskeisyyden kulmanopeus, t aika nollassa hetkestä lähtien ja θ nollassa hetken vaihekulma. /10/ X puolestaan on värähtelyn amplitudi, jolle voidaan puolestaan kirjoittaa

$$X = \frac{m_0 e}{m} \frac{r^2}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2\xi r)^2}}, \quad (6)$$

jossa m on koko värähtelevän rakenteen massa, m_0 epäkeskeisesti pyörivä massa, e massakeskipisteen etäisyys rotaatioakselilta, ja ξ vaimennussuhde. /10/ Vaimennussuhteelle voidaan puolestaan kirjoittaa:

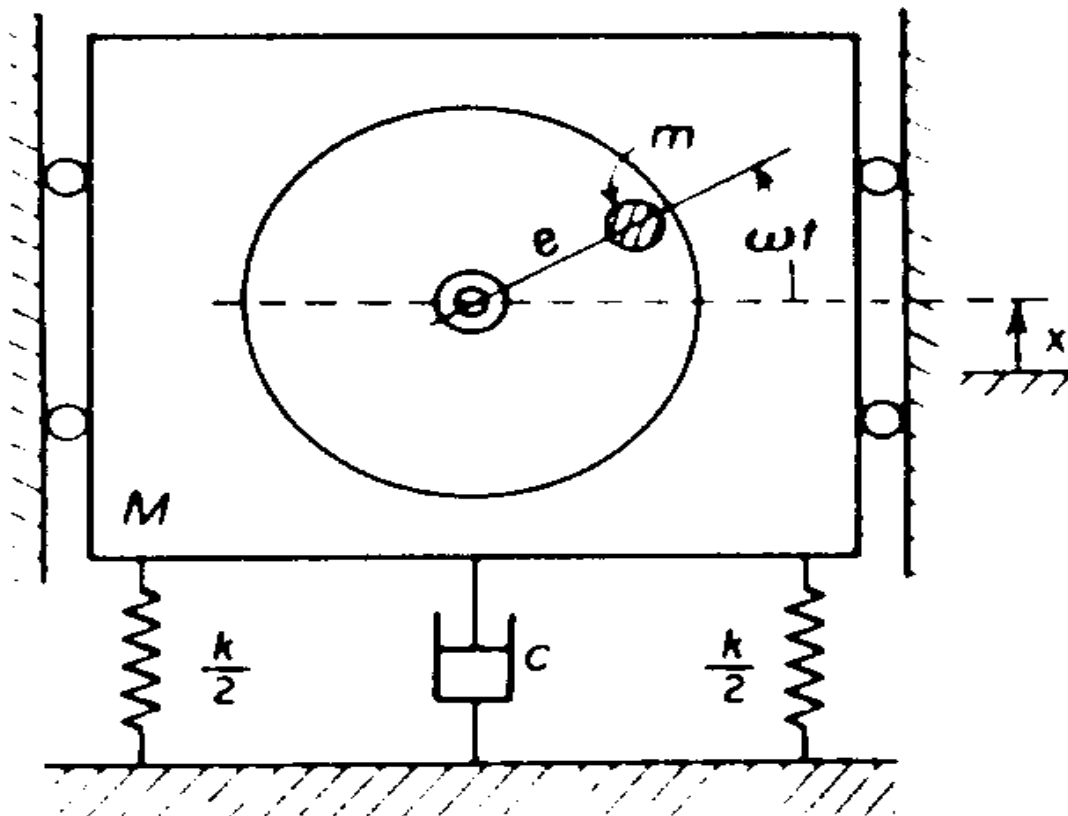
$$\xi = \frac{c}{2\sqrt{km}}, \quad (7)$$

jossa puolestaan c on rakenteen vaimennusvakio ja k rakenteen jousivakio. /5/ Yhtälöstä 6 on edelleen määrittelemättä parametri r , jonka määritelmä kuuluu seuraavasti:

$$r = \frac{\omega}{\omega_n} \quad (8)$$

Tässä ω_n on rakenteen ominaiskulmataajuus, [10/ jonka määritelmä puolestaan on:

$$\omega_n = \sqrt{k/m} \quad [5/ \quad (9)$$



Kuva 7. Yhden vapausasteen värähtelymekanismi, jossa heräte aiheutuu pyörivän kappaleen massaepäkeskeisyydestä. [10/

Kuten kappaleessa 1 esitettiin, koostuu nippi kahdesta toisiaan vastaan painettavasta telasta. Tällöin telojen välille syntyy siis nippivoima, joka voidaan laskea yhtälöstä (1). Telojen deformaatiosta johtuen nipin kontaktipinta-ala kasvaa nippivoiman kasvaessa. Toisaalta tämä tarkoittaa, että telojen siirtymä toisiaan vastaan suhteessa nippivoimaan pienenee. Käytännössä siis käsiteltäessä rakennetta kuvassa 7 esitetyn systeemin kaltaisena rakenteena muuttuu rakenteen jousivakio (k)

suuremmaksi nippivoiman kasvaessa. Tätä ilmiötä voidaan vielä hieman havainnollistaa matemaattisesti. Suhteellinen venymä on Hooken lain mukaisesti:

$$\varepsilon = \sigma / E, \quad (10)$$

ja jännitys σ puolestaan:

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (11)$$

Yhtälöiden (10) ja (11) perusteella saadaan puolestaan siirtymälle kirjoitettua uusi lauseke:

$$\varepsilon = F / EA. \quad (12)$$

Jousivakion yleinen määritelmä on /8/

$$k = \frac{F}{\Delta l}. \quad (13)$$

ja suhteellisen venymän määritelmä on puolestaan /8/

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}. \quad (14)$$

Yhtälöissä Δl on pituuden muutos ja l alkuperäinen pituus. /8/ Jousivakiolle voidaan yhtälöiden 12, 13 ja 14 perusteella kirjoittaa

$$k = EA. \quad (14)$$

yhtälöstä (14) nähdään nyt – kuten edellä jo todettiin - , että rakenteen jousivakio kasvaa nipin pinta-alan kasvaessa. Käytännössä tämän havainnon hyöty on nyt, että tiedetään rakenteen jousivakion kasvavan nippivoiman kasvaessa. Jousivakio puolestaan vaikuttaa rakenteessa

ilmeneviin värähtelyihin yhtälöiden (5) – (9) mukaisesti. Tältä pohjalta nippivoimaa olisi mahdollista analysoida värähtelymittausten perusteella.

Tältä pohjalta käytännön mittaus olisi mahdollista toteuttaa siten, että rakenteeseen asetettaisiin kiihtyvyyssanturit ja saatujen kiihtyvyyssarvojen perusteella saataisiin laskettua värähtelyn amplitudi. Tässä kappaleessa on käsitelty yhden vapausasteen systeemiä, joten käytännössä mitattaisiin värähtelyjä vain yhdessä suunnassa. Amplitudin perusteella puolestaan on mahdollista laskea rakenteen teoreettinen jousivakio. Tätä kautta puolestaan päästäisiin kiinni todelliseen nippivoimaan. Edelleen ongelmana on erisuuruinen nippivoima hoito- ja käyttöpuolella, joten oleellista olisi jälleen analysoida ja vertailla amplitudilukemia molemmin puolin.

Käytännössä tämä ratkaisu vaatisi suhteellisen paljon rakenteen analysointia. Rakenteen jousivakiota ja sen muutoksia telojen deformaatiosta johtuen olisi jälleen analysoitava FE-analyysiä käyttäen. Saatujen amplitudiarvojen lisäksi olisi jatkuvasti otettava tulosten tulkinnassa huomioon telan pyörimisnopeus, sillä tutkittavan värähtelyn herätehän aiheutuu nimenomaan pyörivästä telasta.

3.5 RATKAISUVAIHTOEHTOJEN VERTAILU

Lopullista ratkaisua valittaessa tulee ottaa huomioon monia asioita. Tärkein asia on se, että valitulla menetelmällä voidaan ylipäänsä saada rakenteesta ulos tuloksia, joiden perusteella on tehtävissä tarvittavia johtopäätöksiä. Toisaalta tulee myös miettiä kuinka käytetyllä ratkaisulla lopulta päästään näihin tuloksiin ja johtopäätöksiin.

Värähtelyyn perustuvalla mittauksella on merkittäviä etuja puolellaan. Käytännön asennustyötä vaadittaisiin tätä vaihtoehtoa käytettäessä hyvin vähän. Käytännössä olisi tarpeen ainoastaan asentaa kiihtyvyyssanturi telan tuennalle mahdollisimman lähelle akselointia. Tämän jälkeen loppu olisikin analyysiä ja tulosten tulkitsemista.

Itse analyysi olisi kuitenkin tässä tapauksessa äärimmäisen haastava. Analyysiin tulisi vaikuttamaan lukuisia asioita, joiden vaikutusta olisi etukäteen äärimmäisen vaikea arvioida. Ensinnäkin paperikoneessa syntyy prosessin aikana lukuisia herätteitä ja oikean vasteen löytäminen mittauskohdasta saattaisi olla haasteellista. Tosin suoritettaessa mittaus mahdollisimman läheltä

telan tuentaa, voisi juuri kyseisen telan aiheuttaman vasteen olettaa näkyvän tuloksissa selvästi muita voimakkaampana. /11/

Toisaalta myös rakenteen jousivakion määrittäminen saattaisi tuottaa ongelmia. Kyseessä on kuitenkin suhteellisen monimutkainen rakenne, jolle ei välttämättä ole tehtävissä luotettavia tuloksia antavia yksinkertaistuksia. Tämä ei välttämättä olisi ongelma, mikäli rakenne olisi identtinen hoito- ja käyttöpuolella. Rakenteessa on kuitenkin eroja puolesta riippuen, joten tässä on selvä ongelmakohta. /11/

Suurin ongelma värähtelymittauksessa olisi kuitenkin analysoida millä tavoin lineaarisesti muuttuva kuorma aiheuttaa runkoon värähtelyjä. Nippi on kuitenkin puolelta toiselle jatkuva rakenne, joten hoitopuolen nippivoima vaikuttaa toisaalta käyttöpuolen vasteeseen ja toisin päin. Edelleenkin tämäkin ongelma voisi olla ratkaistavissa, mutta sen vaatima analyysimäärä on niin suuri, ettei tässä tilanteessa ole järkevää lähteä viemään tätä ratkaisua eteenpäin. Etenkin kun lopulta ratkaisun toimivuudesta ei ole takeita. Käytännössä ainoa järkevä tapa lähteä kehittämään tätä ratkaisua olisi antureiden asentaminen kohteeseen ilman sen suurempia ennakoanalyyssejä. Tämän jälkeen saatujen tulosten perusteella sitten pyrittäisiin päättämään, onko tällä tavalla mahdollista saada tuloksia, jonka perusteella saataisiin tietää nippivoima. /11/

Värähtelyanalyysin vaikeuden vuoksi päädytään hakemaan ratkaisua venymän mittauksesta. Vaikka mittauksen periaate on nyt selvillä, on lopullisen ratkaisun toteuttamiseksi edelleen lukuisia erilaisia vaihtoehtoja. Markkinoilla on runsaasti erilaisia venymää tai voimaa mittaavia antureita. Nyt seuraavana tavoitteena on löytää tähän käyttökohteeseen sopiva anturi ja sijoittaa se siten, että saadut tulokset ovat mahdollisimman luotettavia. Vaikka ratkaisua haetaan nyt nimenomaan Tervasaaren koneen puristinosalle, on tarkoitus kuitenkin löytää mahdollisimman yleispätevä ratkaisu, joka olisi käyttökelpoinen vähäisellä muokkauksella myös muihin kohteisiin.

4 RATKAISUN JATKOKEHITTELY

Erilaisia tällaiseen mittaukseen soveltuvia mahdollisia anturityyppejä on lukuisia. Seuraavassa on esitelty 2 erityisesti tähän sovellukseen soveltuvaa anturivaihtoehtoa.

4.1 VENYMÄLIUSKAMITTAUS

Venymäliuskamittaus on perinteinen tapa mitata venymiä ja niiden perusteella myös jännityksiä kappaleen pinnalla tietyssä suunnassa. Mittaus perustuu nyt siihen, että liuskan päistä mitattu jännite muuttuu liuskan pituuden muuttuessa. Olettaen, että liuska on liimattu riittävän hyvin tutkittavaan kappaleeseen, on liuskan muodonmuutos sama kuin muodonmuutos itse tutkittavassa kappaleessa. /8/

Venymäliuskan jännite on määritelty yleisesti

$$R = \rho \frac{4L}{\pi D^2}, \quad (16)$$

jossa ρ on langan ominaisvastus, L sen pituus ja D halkaisija. /8/ Kun yhtälö 16 differentioidaan, saadaan puolestaan.

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} - 2 \frac{\Delta D}{D} + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad /8/ \quad (17)$$

Toisaalta tiedetään myös, että poikittaissuppeamalle voidaan kirjoittaa

$$\frac{\Delta D}{D} = -\nu \frac{\Delta L}{L}, \quad (18)$$

jossa ν on Poissonin vakio. /8/ Sijoittamalla yhtälö 18 yhtälöön 17 saadaan:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta L}{L} (1 + 2\nu) + \frac{\Delta \rho}{\rho}. \quad /8/ \quad (19)$$

Tämä voidaan vielä kirjoittaa muotoon

$$\frac{\Delta R}{R} = k\varepsilon, \quad (20)$$

missä

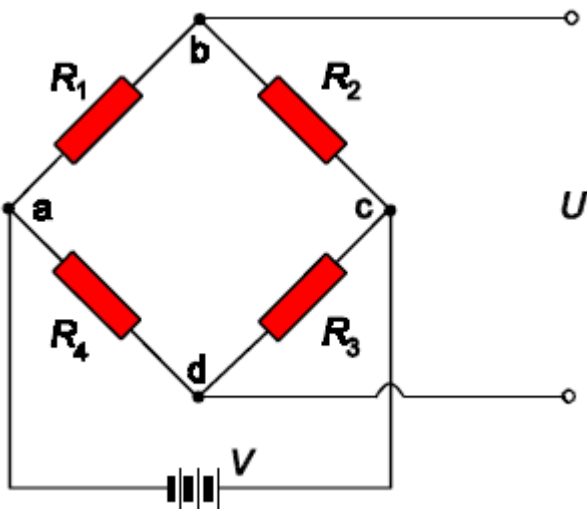
$$k = 1 + 2\nu + \frac{\Delta\rho/\rho}{\Delta L/L} \quad /8/ \quad (21)$$

Kerroin k on liuskalle ominainen liuskavakio ja sen arvot ovat tyypillisesti luokkaa 2..4. /12/

4.1.1 WHEATSTONEN SILTAKYTKENTÄ

Venymäliuskamittauksissa käytetään harvemmin yksittäistä liuskaa, vaan mittaukset suoritetaan tyypillisesti Wheatstonen siltkytkennällä. Wheatstonen silta voi olla niin sanottu neljännessilta, puolisolta tai kokosilta. Seuraavassa on esitetty Wheatstonen kokosillan käyttöperiaate. /8/

Wheatstonen kokosillassa on neljä vastusta (vastukset ovat tässä sovelluksessa siis venymäliuskoja) kytkettynä kuvan 8 mukaisesti.



Kuva 8. Wheatstonen kokosilta. /12/

Siltaan syötetään nyt tasajännitettä (V) napojen a ja c välille. Jännitettä (U) puolestaan mitataan napojen b ja d väliltä. Täksi mitatuksi jännitteeksi saadaan nyt /12/

$$U = \frac{R_1 R_3 - R_2 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V. \quad /12/ \quad (22)$$

Ennen itse mittausta silta tasapainotetaan siten, että $U = 0$. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että

$$R_1 R_3 = R_2 R_4. \quad /12/ \quad (23)$$

Tasapainotetussa sillassa resistanssien (käytännössä liuskojen pituuksien) muutokset aiheuttavat mitattavassa jännitteessä muutoksen

$$\Delta U = \frac{R_1 R_2}{(R_1 + R_2)^2} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) V. \quad /12/ \quad (24)$$

Paras herkkyys saavutetaan, kun

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_4}{R_3} = 1. \quad /12/ \quad (25)$$

Tällöin

$$\frac{\Delta U}{V} = \frac{1}{4} \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right). \quad /12/ \quad (26)$$

Ottamalla vielä huomioon yhtälö (20) saadaan edellinen muotoon

$$\frac{\Delta U}{V} = \frac{k}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4). \quad /12/ \quad (27)$$

4.2 RUUVIVOIMAN MITTAUS RAKENTEESTA VOIMA-ANTURILLA

Telan laakeripesä kiinnittyy kuormitusvarteen neljällä ruuvilla. Nämä ruuvit on osoitettu nuolilla kuvassa 9.



Kuva 9. Telan laakeripesä. Kiinnitysruuvit osoitettu nuolilla.

Ruuvissa vaikuttaa nyt esikristisyvoima jo ennen kuin nippivoima alkaa vaikuttaa rakenteessa. Tämä voima muuttuu nippivoiman vaikutuksesta ja tätä ruuvivoimaa mittaamalla voidaan tutkia itse nippivoimaa.

Esikristisyvoima aiheuttaa ruuviin venymän, joka voidaan määrittää yhtälöstä

$$\Delta L = \frac{FL}{EA}, \quad (28)$$

jossa F on esikiristysvoima, L ruuvien pituus, E kimmomoduuli ja A ruuvien laskennallinen poikkipinta-ala. /13/

Alustan puristuman määrittämiseksi määritellään käsite redusoitu lieriö. Tämä tarkoittaa laskennallista aluetta, jonka joustavuus vastaa likimain todellisen rakenteen joustavuutta. Käsiteltävässä tapauksessa on kyse kierrereikään asennettavasta ruuvista. Tällaiselle tapaukselle redusoidun lieriön halkaisija saadaan yhtälöstä

$$A_{red} = \frac{\pi(d_k^2 - d_h^2)}{4} + \frac{\pi d_k L_k}{8} \left[\left(\sqrt[5]{\frac{L_k}{L_k + d_k} + 1} \right)^2 - 1 \right], \quad (29)$$

jossa d_k on ruuvien kannan kantopinnan halkaisija, d_h ruuvien reiän halkaisija ja L_k liitettävien osien joustava yhteispaksuus. /13/ liitettävien osien jousivakio on nyt laskettavissa yhtälöstä

$$k_{al} = \frac{A_{red} E_p}{L_k}, \quad (30)$$

jossa E_p on alustan kimmokerroin. /13/ Edelleen saadaan ratkaistua alustan kokoonpuristuma, joksi saadaan

$$\Delta L_p = \frac{F_a}{k_{al}}, \quad (31)$$

jossa F_a on ruuvissa vaikuttava esikiristysvoima. /13/

Nippivoima aiheuttaa nyt lisäpuristuman alustaan. Käytännössä tämä johtaa ruuvivoiman pienenemiseen. Näin ruuvivoimaa mittaamalla voidaan analysoida nippivoimaa. Tiedetään myös, että liikuttaessa kimmoisella alueella pätee

$$\delta L_r = \delta L_p, \quad (32)$$

jossa δL_r on ruuvien venymän muutos ja δL_p alustan puristuman muutos. /13/

5 RAKENTEEN FE-ANALYYSI

5.1 FE-ANALYYSIN PERUSTEITA

FE-analyysi on eri teollisuuden aloilla laajalti käytettävä menetelmä, jolla voidaan analysoida esimerkiksi erilaisten rakenteiden lujuutta, ominaisaajuuksia sekä lämpöjakaumaa ja sen aiheuttamia sisäisiä jännityksiä. Tässä tapauksessa tutkitaan nimenomaan rakenteen lujuutta ja erityisesti rakenteen siirtymiä. Vaikka menetelmä ei ole erityisen uusi, on sen merkitys noussut merkittävästi vasta viimeisinä muutamina vuosikymmeninä. Tämä johtuu tietotekniikan nopeasta kehityksestä. Tämän ansiosta menetelmän sovellusmahdollisuudet ovat lisääntyneet kovaa vauhtia. FE-menetelmä onkin nykyään yleinen työkalu kaikenkokoisissa yrityksissä, sillä se on tehokkaasti käytettävissä aivan tavallisillakin mikrotietokoneilla. FE-analyysin käyttökohteet voidaan jakaa karkeasti kolmeen ryhmään: 1) tasapainotilan ongelmat, 2) ominaisarvo-ongelmat sekä 3) muuttuvat (esimerkiksi ajan funktiona) ongelmat. /14/

FE-analyysi perustuu siihen, että tutkittava rakenne jaetaan elementteihin. Nämä elementit on liitetty toisiinsa niin sanotuista solmupisteistä. Staattista tasapainotilaa ratkaistaessa koko rakenteen siirtymiä voidaan nyt arvioida näiden solmupisteiden siirtymien avulla. Materiaaliominaisuuksien perusteella puolestaan voidaan edelleen laskea jännitykset rakenteessa, kun siirtymät tiedetään. Tietyn tyyppisen elementin yhtälöt ovat aina samanlaisia. Näin laskenta saadaan suoraviivaiseksi. Käytännössä siis vain elementin solmukoordinaatit, materiaaliominaisuudet ja kuormitukset on muunnettava yleiseen muotoon. Yksittäisten elementtien yhtälöt kootaan koko rakenteen yhtälöön, joka on yleisesti muotoa:

$$[k]\{U\} = \{F\}. \quad (15)$$

Tässä $[k]$ on neliömatriisi, joka kuvaa rakenteen jäykkyyttä, $\{U\}$ solmusiirtymien pystyvektori ja $\{F\}$ solmuissa vaikuttavien voimien pystyvektori. /14/ Jotta tämä yhtälö olisi ratkaistavissa, on tietyt solmusiirtymät – eli reunaehdot – määritettävä. Käytännössä kyse on siitä, että jäykän kappaleen liike ei ole mahdollista. /14/

Yksinkertaisin rakenneanalyysissä käytettävä elementtityyppi on päistään nivelöity sauva. Sauvaelementin jäykkyydsmatriisi on johdettu esimerkiksi lähteen /14/ sivulla 8 potentiaalienergian minimin perusteella. Täksi jäykkyydsmatriisiksi saadaan

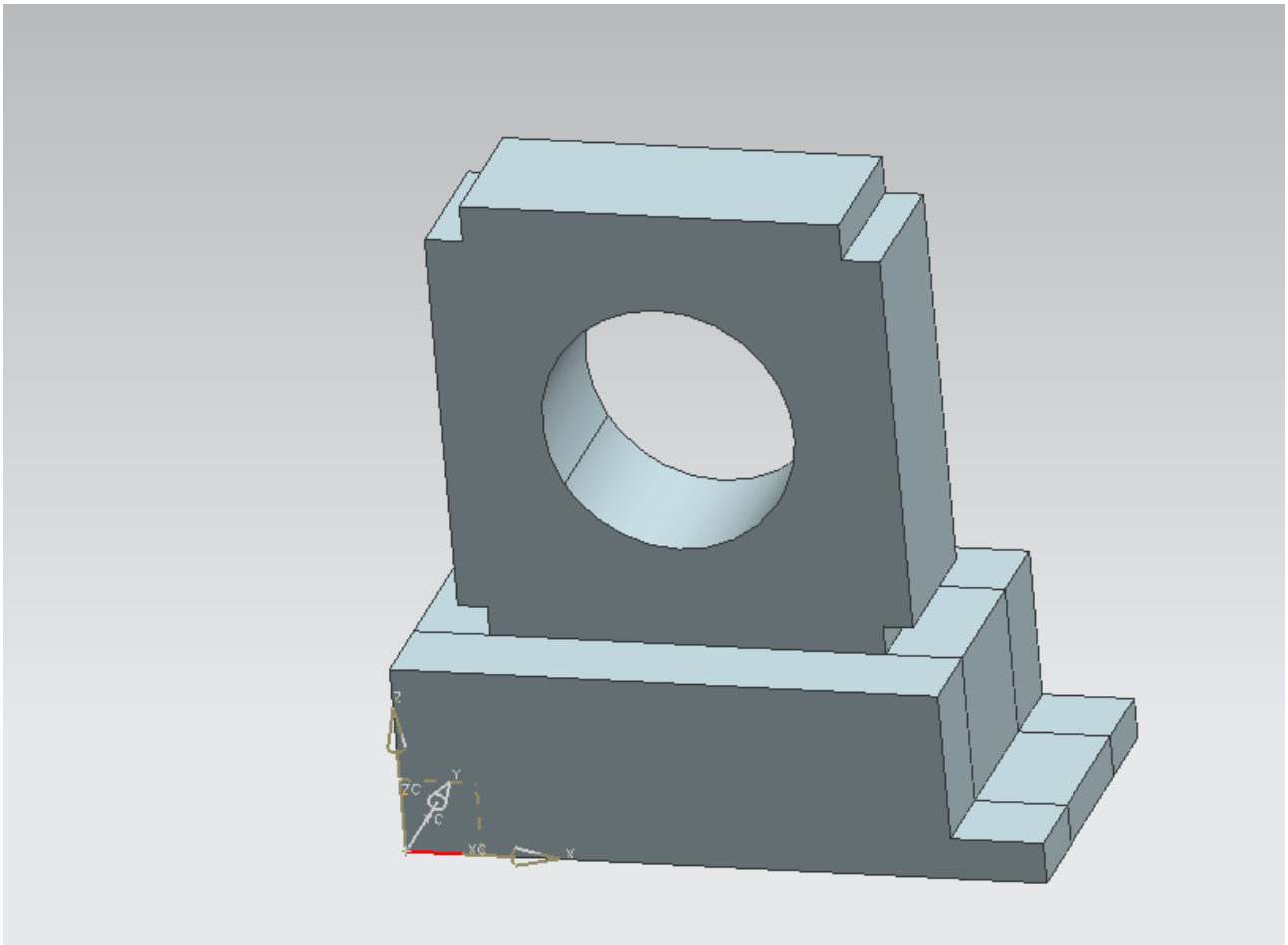
$$\frac{AE}{L} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}, \quad (16)$$

jossa A on sauvan poikkipinta-ala, E kimmomoduuli ja L sauvan pituus. /14/

Käytetyssä analyysissä on käytetty 8-solmuisia 3d-elementtejä. Tämän elementtityypin jäykkyydsmatriisia ei käsitellä tässä erikseen sen suuren koon vuoksi. Mainittakoon kuitenkin, että jäykkyydsmatriisin kooksi tulee 24x24. /14/

5.2 TELAN TUENNAN FEM-MALLI

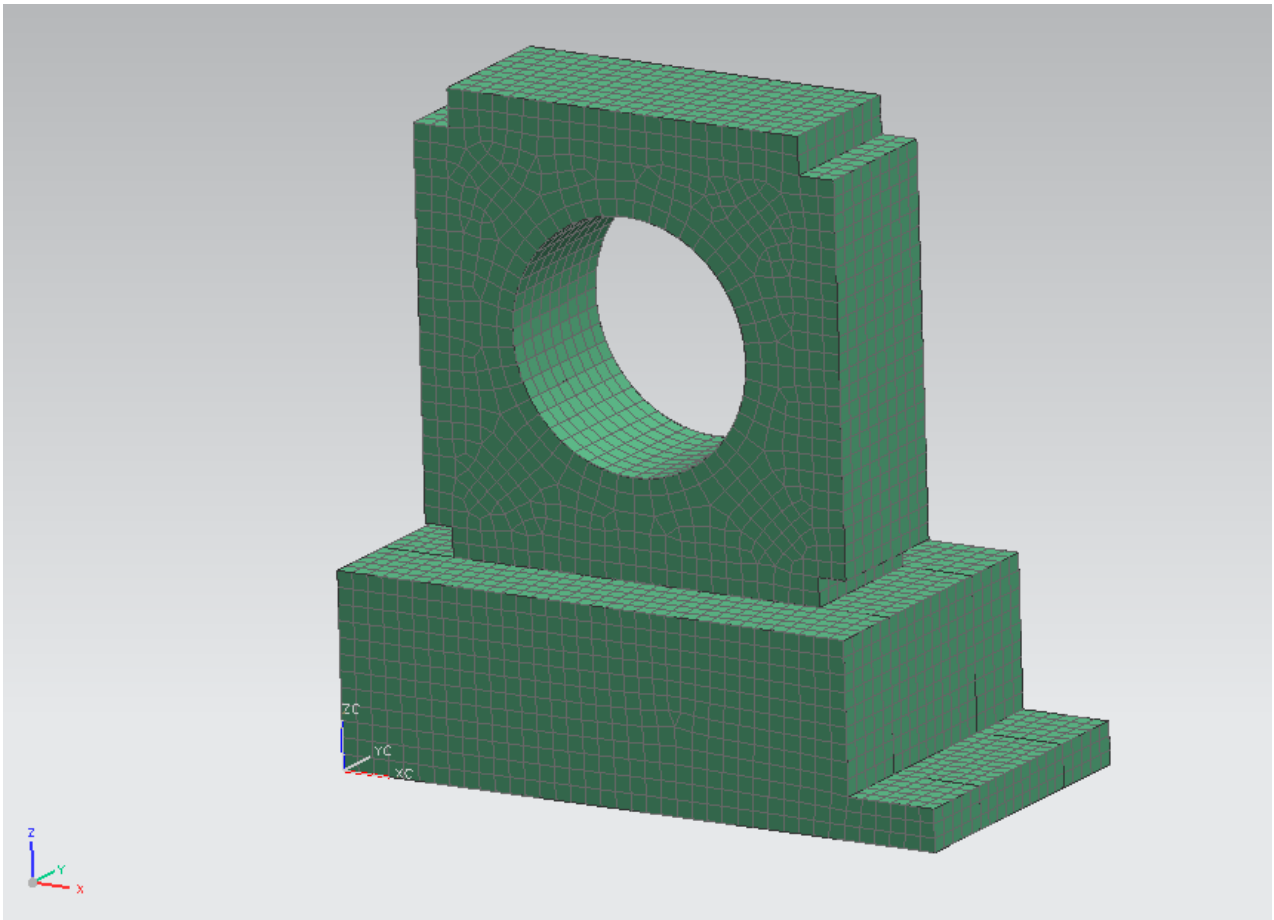
Jotta edellä esiteltyjen ratkaisuvaihtoehtojen soveltuvuudesta saataisiin selvä kuva, tehtiin rakenteesta FEM-malli. Mallista tarkasteltiin erityisesti siirtymiä, sillä niiden pohjaltahan mittaus on suunniteltu tehtäväksi. Rakenteesta luotiin ensimmäiseksi 3d-malli, joka on nähtävissä kuvassa 10.



Kuva 10. Laakeripesän ja sen tuennan 3d-malli.

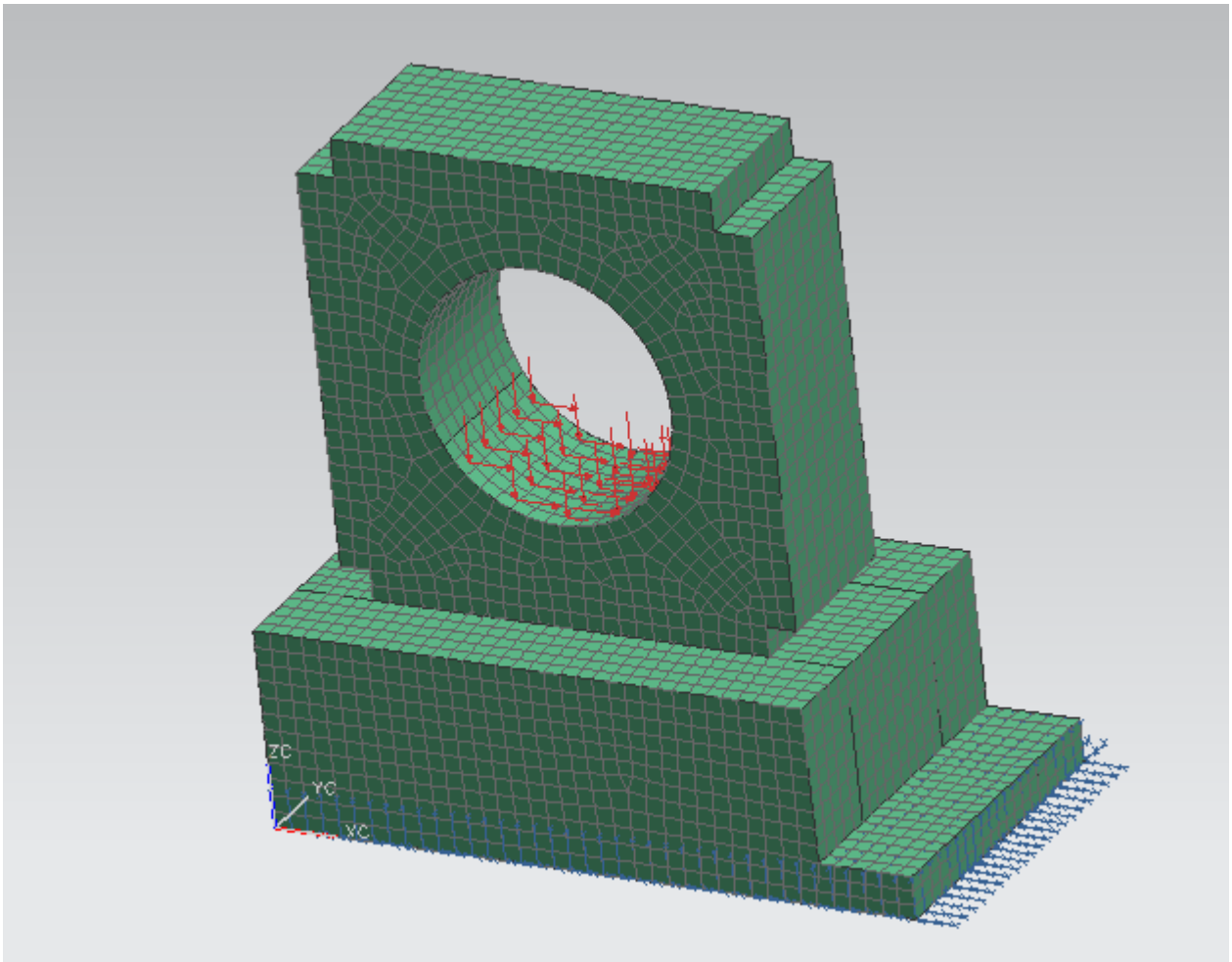
Niin 3d-mallinnus kuin myös elementtiverkon generointi tehtiin NX6.0 ohjelmalla. Itse FE-analyysissa käytettiin NX Nastran-ratkaisijaa.

3d-malliin luotiin elementtiverkko, jossa käytettiin 8-solmuisia 3d-solidielementtejä. Elementtiverkko on nähtävissä kuvassa 11. Itse laakeripesä ja pesän alusta on mallinnettu kahdella eri verkolla ja sen jälkeen liitetty toisiinsa liimakontaktilla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että näiden kahden verkon yhdyspintojen solmut eivät liiku suhteessa toisiinsa.



Kuva 11. Luotu elementtiverkko.

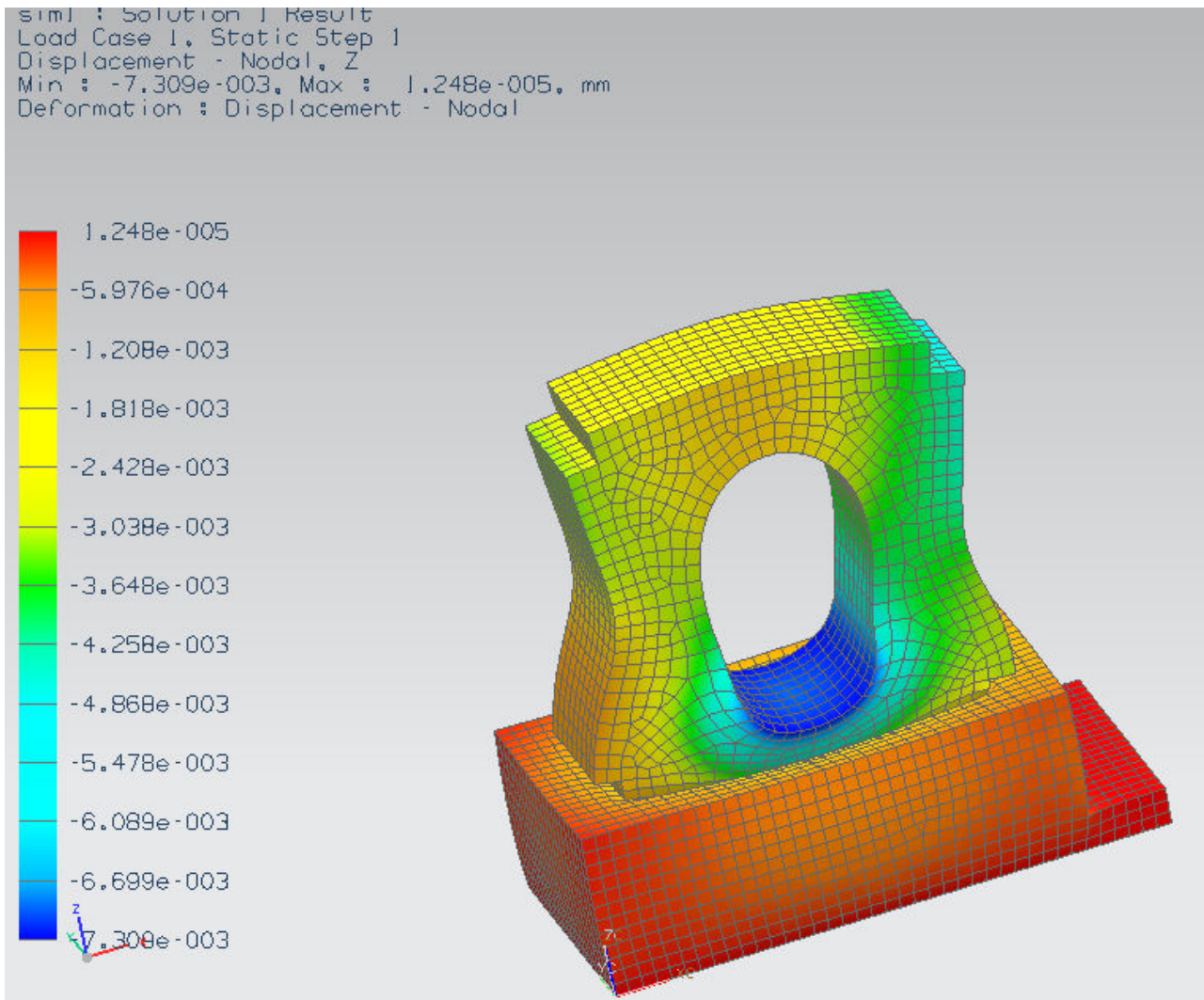
Seuraavaksi rakenteelle asetettiin kuormitus ja reunaehdot. Reunaehdot luotiin yksinkertaisesti niin, että koko rakenteen alapinnalta asetettiin kaikki translaatiovapausasteet kiinni. Rotaatiovapausasteitahan solidielementeillä ei olekaan. Kuormitus asetettiin puolestaan reiän pohjalla siten, että nippivoima vaikutti reiän pinnalla korkeuden $0.3 \times$ reiän halkaisija reiän pohjalta alapuolella. Nippivoima ei tule rakenteeseen suoraan ylhäältä vaan 4.75 astetta sivusta (kuvassa vasemmalta puolen). Tämän vuoksi voima mallinnettiin kahdella komponentilla siten, että näiden kahden komponentin yhteenlaskettu vektori oli nippivoiman puolikkaan kokoinen, koska koko nippivoimahan kohdistuu kahdelle vastaavalle laakeripesälle. Reunaehdot ja kuormitukset ovat nähtävissä kuvassa 12.



Kuva 12. Elementtimalli, jossa näkyvissä kuormitukset ja reunaehdot.

5.3 ANALYYSI RUUVIVOIMAN MITTAUKSEN KANNALTA

Kuten aiemmin jo mainittiin, ollaan tuloksia tarkasteltaessa kiinnostuneita lähinnä siirtymistä. Koska kuormitus tulee rakenteeseen lähes suoraan ylhäältä päin, on tarpeen tarkastella nimenomaan pystysuuntaisia siirtymiä. Erityisesti ruuvivoiman mittausta käytettäessä nimenomaan pystysuuntainen siirtymä ratkaisee muutoksen ruuvivoimassa. Venymäliuskat sen sijaan voisi sijoittaa myös muuten kuin pystysuoraan, mutta käytännössä ne on järkevintä sijoittaa tässä tapauksessa nimenomaan pystysuoraan jo asennettavuuden vuoksi. Pysty- eli z-suuntaiset siirtymät on nähtävissä kuvassa 13.

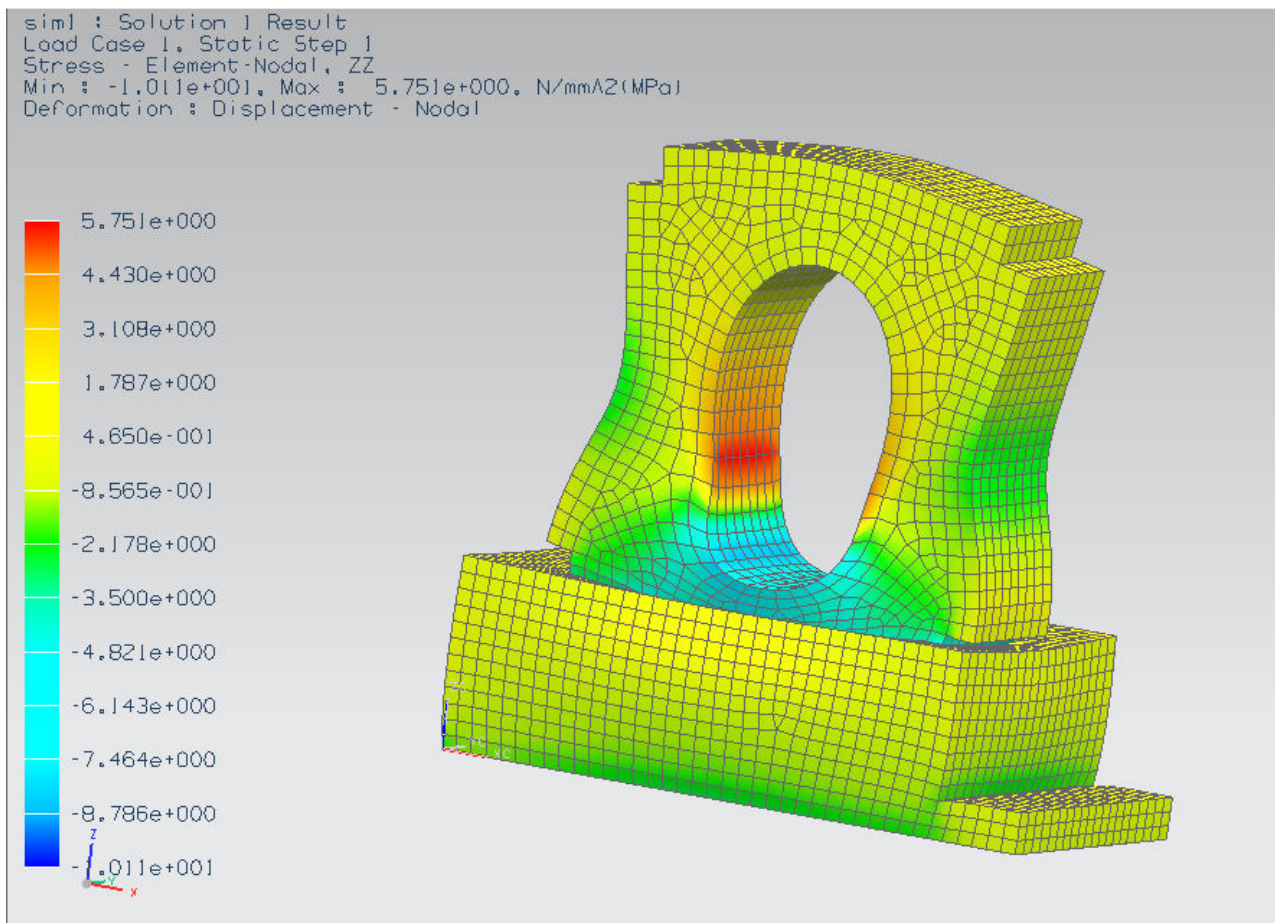


Kuva 13. Rakenteen deformoitunut (skaalattu) muoto ja pystysuuntaiset siirtymät.

Kiinnitysruuvien kohdalla suurimmaksi siirtymäksi saadaan nyt $6.2 \cdot 10^{-4} \text{ mm}$. Tämän perusteella voidaan tehdä suurpiirteinen arvio kiinnitysruuvien kiristysvoiman muutoksesta nippivoiman johdosta. Lujuusopin perusyhtälöitä hyödyntäen saadaan voiman muutokseksi noin 100 N ajettaessa nippivoima nolasta normaaliin kuormaan. Jotta tämän voiman perusteella voitaisiin nippivoimaa arvioida hyödyllisellä tarkkuudella, on käytettävän anturin kyettävä havaitsemaan korkeintaan 10 N muutokset ruuvivoimassa. Ruuvien alkuperäinen esikiristysvoima on noin 50 kN, joten anturin tulisi havaita jo noin 0.02% muutos ruuvivoimassa. Tällaisiakin antureita löytyy toki markkinoilta, mutta ei sellaisena mallina, jonka voisi suoraan sijoittaa ruuviin.

5.4 ANALYYSI VENYMÄLIUSKAMITTAUSTA VARTEN

Venymäliuskojen sijoittelua varten oleellista olisi tietää kohdat, joissa toisaalta puristuma ja toisaalta venymä ovat suurimmillaan. Tätä varten sovellettiin sekä kuvassa 13 näkyvää rakenteen deformatiivista muotoa että kuvassa 14 esitettyjä rakenteen pystysuuntaisia von Mises-jännityksiä. Näistä nähdään nyt, että puristuma on suurimmillaan reiän alapuolella. Suurin positiivinen venymä ilmenee puolestaan reiän molemmilla sivuilla. Käytännössä siis venymäliuskat tulisi Wheatstonen siltakytkennässä sijoittaa siten, että 1 liuska sijaitsee reiän oikealla puolella, 1 vasemmalla puolella ja 2 alapuolella.

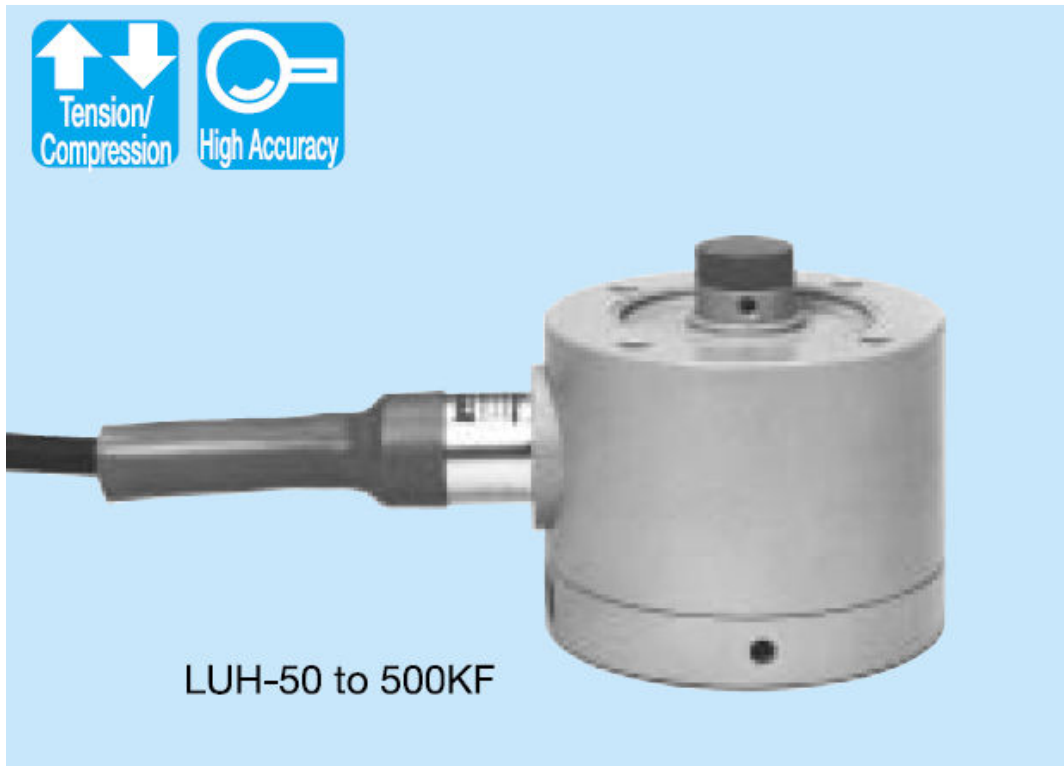


Kuva 14. Rakenteen pystysuuntaiset jännitykset.

5.5 TULOSTEN ANALYSOINTI

Venymäliuskamittaus Wheatstonen sillalla on paljon käytetty perinteinen menetelmä. Tässäkin tapauksessa sen soveltaminen olisi mahdollista. Sillä on kuitenkin myös haittapuolensa. Lähinnä tällainen on liuskojen asennuksen edellyttämä tarkkuus. Toisaalta myös ratkaisun yleispätevyys on kyseenalainen. Nippivoiman suunta vaihtelee eri koneissa huomattavasti, joten liuskojen paikat olisi katsottava aina konekohtaisesti.

Ruuvivoiman mittauksessa parasta olisi sen helppo asennettavuus. Käytännössä riittäisi renkaan muotoisen voima-anturin asentaminen ruuvin alle. Tämä kaatuu kuitenkin siihen, että markkinoilta löytyvien renkaan muotoisten anturien erottelutarkkuus ei ole riittävä. Toisaalta markkinoilta löytyisi riittävän tarkkoja antureita, mutta näiden malli ei suoraan sovellu käyttökohteeseen. /15/ Esimerkki tällaisesta anturista on nähtävissä kuvassa 15. Tällaisen anturin käyttö edellyttäisi kokonaisen anturikonstruktion suunnittelun, eikä se ole tässä tapauksessa käytännöllisin ratkaisu.



Kuva 15. Riittävän tarkkuuden omaava voima-anturi. /16/

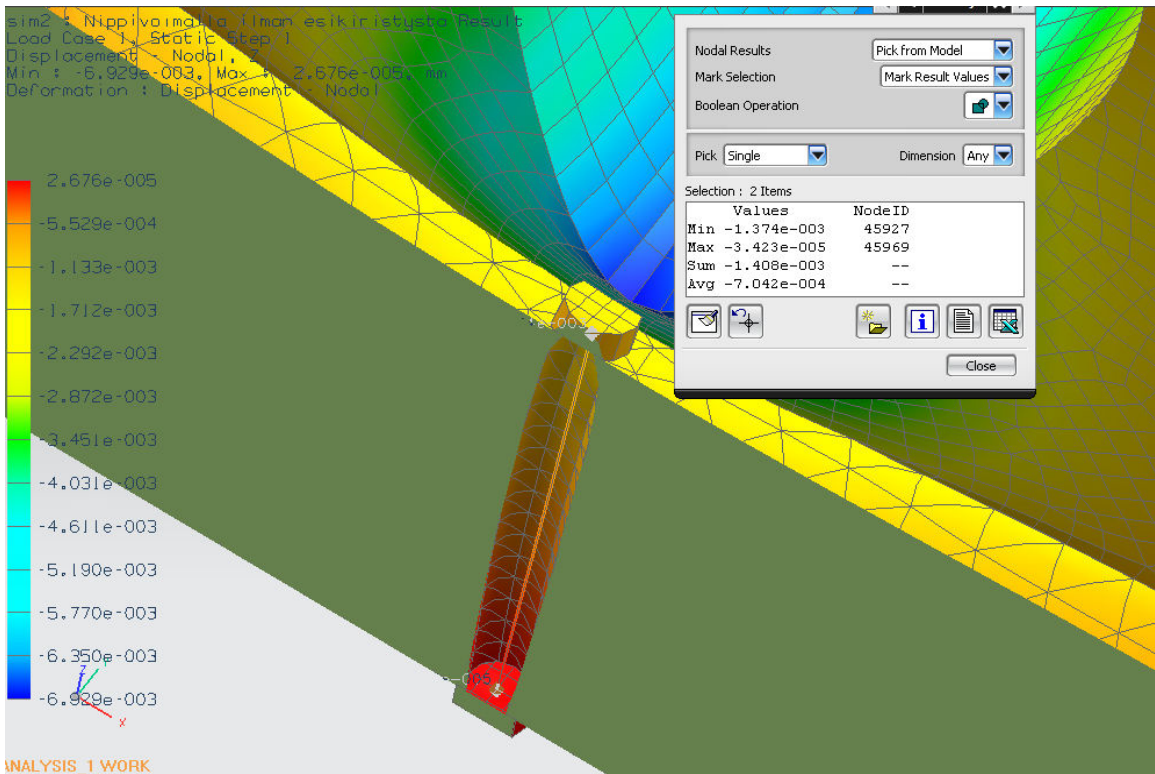
Myös ruuvivoiman mittaukseen liittyy ongelma eri koneiden eri suuntaisesta nippivoimasta. Kuitenkin tämä tarjoaisi ongelmaan erityisesti asennettavuudeltaan erittäin käytännöllisen ratkaisun. Tämän vuoksi tätä vaihtoehtoa kehiteltiin vielä hieman pidemmälle.

5.6 UUSI FE-ANALYYSI JO LOPULLINEN RATKAISU

Seuraavaksi tutkittiin vielä vaihtoehto, jossa rakenteen läpi porataan reikä, johon sijoitetaan ruuvi. Tämä ruuvi voidaan sitten kiristää millä tahansa esikiristysmomentilla, koska se ei kannata mitään kuormaa rakenteessa. Tämän ruuvin voiman muutosta mittaamalla saadaan tieto todellisesta nippivoiman suuruudesta.

Tätä varten tehtiin uusi FEM-malli, johon mallinnettiin reikä keskellä rakennetta mahdollisimman lähelle laakeripesää. Lisäksi rakenteeseen mallinnettiin läpi menevä M6 ruuvi palkkielementtinä. Lisäksi tämän palkin päihin mallinnettiin solidit, joille määritettiin kontakti rakenteen pintaa vasten. Näin asettamalla jälleen nippivoima vaikuttamaan laakeripesään oli mahdollista saada selville ruuvin pituuden muutos nippivoiman johdosta.

Kuvassa 16 on esitetty kyseinen ratkaistu elementtimalli, siten että rakenne on leikattu ruuvin reiän kohdalta. Lisäksi näytölle on poimittu ruuvin päiden pystysuuntaiset siirtymät.



Kuva 16. Ruuvin päiden pystysuuntaiset siirtymät nippivoiman johdosta.

Kuvasta nähdään, että ruuvin alapää on siirtynyt alaspäin 0.000034 mm ja yläpää puolestaan 0.00137 mm. Näin ruuvin pituuden muutokseksi saadaan 0,00134 mm. Yhtälön 3 perusteella saadaan nyt

$$\varepsilon = 0.00134\text{mm} / 230\text{mm} = 5.8261 \cdot 10^{-6}$$

Yhtälön 4 perusteella tämä puolestaan vastaa jännitystä

$$\sigma = E\varepsilon = 1.224\text{MPa}$$

M6-ruuvin jännityspinta-ala on 20.1mm^2 [17]. Yhtälöstä 28 puolestaan voidaan johtaa yhtälö ruuvivoiman muutokselle:

$$\Delta L = \frac{FL}{EA} \Rightarrow \Delta F = \frac{\Delta LEA}{L} = \sigma A = 1.224\text{MPa} \cdot 20.1\text{mm}^2 = 24.6\text{N}$$

Asettamalla ruuville nyt suhteellisen pieni esikristys, on nippivoima mitattavissa riittävällä tarkkuudella ruuvivoiman muutoksesta. Kyseiseen mittaukseen soveltuva anturi on esimerkiksi PCB Piezotronicsin 201LB01, /16/ jonka puristuksen mitta-alue on 45 N eli noin 60 % odotettavasta voiman muutoksesta. Anturille suositellaan esikristysvoimaksi 267 N, jolloin tarkkuus on parhaimmillaan. Kyseisen anturin dimensiot on esitetty kuvassa 17. Sen tekniset tiedot löytyvät puolestaan kuvasta 18. Piirustus lopullisesta konstruktiosta antureineen on esitetty liitteessä 1. Anturin tarkemmat tekniset tiedot on esitetty liitteessä 2.



Kuva 17. Mittauksessa käytettävä anturi 201B01. /18/

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ongelmaan löydettiin ratkaisu, jonka voidaan olettaa suoriutuvan mittauksesta luotettavasti. Luonnollisestikin tehtyihin analyyseihin liittyy tiettyjä epäluotettavuuksia, joten kaikkien laskettujen lukuarvojen voidaan olettaa olevan lähinnä suuntaa-antavia. Kuitenkin tässä tapauksessa

tärkeintä on saada mitattua siirtymiä samalla tavalla paperikoneen molemmilta puolin ja sen tämä menetelmä mahdollistaa.

Mikäli halutaan saada tarkkoja lukuarvoja todellisesta nippivoimasta pelkkien suhteellisten arvojen sijaan, on mittalaite kalibroitava paikan päällä. Absoluuttisia voiman arvoja ei voida luotettavasti määrittää pelkillä analyttisillä menetelmillä.

Mittaus on mahdollista toteuttaa myös venymäliuskein, mutta esitelty ruuvivoimaratkaisu on tätä selvästi parempi nimenomaan asennettavuudeltaan. Wheatstonen siltaa käytettäessä liuskojen asennuksessa sattuvat kulmavirheet saattaisivat vaikuttaa negatiivisesti tulosten luotettavuuteen. Sen sijaan ruuvivoimaa mitattaessa riittää, että pystytään poraamaan reikä rakenteen läpi kohtisuoraan.

Tosin on otettava huomioon, että konstruktiota varten tehtävän reiän poraus saattaa olla ongelmallista. Jotta oheisessa piirustuksessa esitettyyn kohtaan olisi mahdollista porata reikä, on rakennetta purettava jonkin verran. Tämä taas aiheuttaa seisokin koneelle. Tämän ongelman merkitys on kuitenkin katsottava tapauskohtaisesti. Mikäli ongelma porattavuuden suhteen on liian suuri, on ratkaisua mahdollista muokata siirtämällä reiän paikkaa. Nykyinen reikä sijaitsee kohdassa, jossa siirtymät ovat suurimmillaan, mutta oletettavasti myös muista kohdista olisi mahdollista saada luotettavia tuloksia. Toisaalta ratkaisua on mahdollista muokata myös lyhentämällä reikää. Tällöin reikää ei siis porata läpi vaan ensin porataan vapaareikä ja sen perään kierre, johon ruuvi kiinnitetään.

Kyseinen ratkaisu on mahdollista soveltaa myös muihin kuin tässä tapauksessa analysoituun puristinosaan. Laakeripesän tuenta on eri puristimilla tyypillisesti suhteellisen samanlainen. Erona on yleensä lähinnä nippivoiman suunta. Tässä esitetty ratkaisu toimii erityisesti, kun nippivoima kohdistuu rakenteeseen jotakuinkin ylhäältä päin. Mikäli voima kohdistuu laakerille enemmän sivusta, on mittalaite mahdollista sijoittaa joko itse laakeripesän tai sen tuennan kylkeen. Näin voitaisiin mitata poikittaisia siirtymiä, joita poikittainen nippivoima aiheuttaisi. Mikäli nippivoima tulee rakenteeseen selvästi viistosti, saattaa esitetyllä ratkaisulla olla vaikeuksia saada riittävän tarkkoja tuloksia.

LÄHTEET

/1/ Tenovaara, Heikki. FE-menetelmän soveltuvuus paperikoneen nippilaskentaan. Lappeenranta. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu. 2002.

/2/ NipcoFlex-kalanteritekniikka - lisäämässä pakkauspaperien valmistuskapasiteettia ja parantamassa paperin laatua. [www-tuotedokumentti]. Voith Paper. [viitattu 1.12.2009]. Saatavissa: http://www.voithpaper.com/media/vp_fi_twsonder_14_nipcoflex_BP.pdf.

/3/ Häggblom-Ahnger, Ulla & Komulainen Pekka. Paperin ja kartongin valmistus. Helsinki. Opetushallitus. 2001. ISBN 952-13-1280-7.

/4/ Paperin valmistus. Osa 1. Suomen paperi-insinöörien yhdistys. 1983. ISBN 951-99479-0-6.

/5/ Taipale, Matti. Toimitusjohtaja, Emering Oy. Henkilökohtainen tiedonanto. 2009.

/6/ iRoll tension measuring roll. Adds to quality and runnability. [www-tuotedokumentti]. Metso Paper. [viitattu 1.12.2009]. Saatavissa: [http://www.metsopaper.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-080417-2256E-A956E/\\$File/42109_V2_FI.pdf?openElement](http://www.metsopaper.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-080417-2256E-A956E/$File/42109_V2_FI.pdf?openElement)

/7/ SymBelt Roll. For enhanced pressing process. [www-tuotedokumentti]. Metso Paper. [viitattu 1.12.2009]. Saatavissa: [http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-060925-2256E-371A1/\\$File/PM060925_SymBelt_roll_flyer.pdf?openElement](http://www.metso.com/MP/Marketing/mpv2store.nsf/BYWID/WID-060925-2256E-371A1/$File/PM060925_SymBelt_roll_flyer.pdf?openElement)

/8/ Pennala, Erkki. *Lujuusopin perusteet*. Otakustantamo. 1987. ISBN 951-671-311-4.

/9/ Teräs materiaalina.[verkkodokumentti]. Tampereen ammattikorkeakoulu. [viitattu 8.12.2009]. Saatavissa: http://www.tamk.fi/terasrakenteet/terasmaterialina/tehtavat/jann_venym_valit/jann_ven_valit.htm

/10/ Inman, Daniel J. Engineering vibration. Upper Saddle River (NJ). Pearson Prentice Hall. 2008. ISBN 978-0-13-228173-7-0-13-228173-2

/11/ von Hertzen, Raimo. Professori. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Henkilökohtainen tiedonanto. 2009.

/12/ Nykänen, Timo. Lujuusoppi II. Luentomateriaali. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

/13/ Karhula, Jukka. Koneenosien mitoitus. Koneenosien suunnittelun jatkokurssi, luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2007.

/14/ Fagan, M. J. *Finite element analysis. Theory and practice*. Harlow: Longman. 1992. 315 s. ISBN 0-582-02247-9

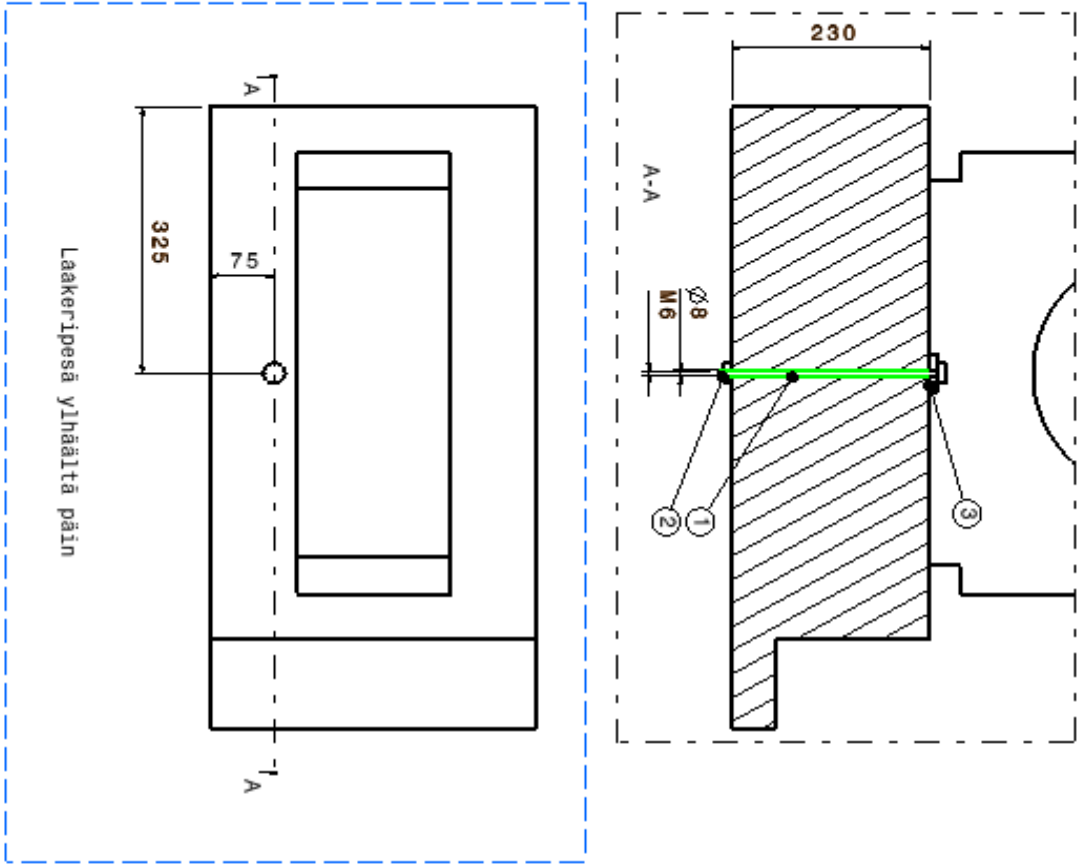
/15/ Kukkurainen, Kari. Toimitusjohtaja. Straintech Finland Oy. Henkilökohtainen tiedonanto. 2009.

/16/ LUH-F. High accuracy tension/compression load cells. [www-tuotedokumentti]. Kyowa. [viitattu 1.12.2009]. Saatavisa <http://www.kyowa-ei.co.jp/english/products/sensors/loadcell/pdf/2-40.pdf>.

/17/ Karhula, Jukka. Koneenosien suunnittelu. Koneenosien suunnittelun peruskurssi, luentomoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto. 2006.

/18/ Model 201B01. [www-tuotedokumentti]. PCB Piezotronics. [viitattu 1.12.2009]. Saatavissa http://www.pcb.com/spec_sheet.asp?model=201B01&item_id=2286

LIITE 1. PIIRUSTUS LOPULLISESTA KONSTRUKTIOSTA



Osa- no	Selite	Kpl
1	Ruuvi M6x280	1
2	Mutteri M6	1
3	Voima-anturi 201B01	1

LIITE 2. MITTAUKSESSA KÄYTETTÄVÄN ANTURIN TEKNISET TIEDOT

Model 201B01

Product Type: Load Cell, Force Sensor

ICP® quartz force ring, 10 lb comp., 500 mV/lb

[View Spec Sheet \(PDF\)](#)

View [photo](#) and [drawing](#) .

PERFORMANCE	ENGLISH	SI
Sensitivity(± 15 %)	500 mV/lb	112,405 mV/kN
Measurement Range(Compression)	10 lb	0.04448 kN
Maximum Static Force(Compression)	60 lb	0.267 kN
Broadband Resolution(1 to 10,000 Hz)	0.0002 lb-rms	0.0008896 N-rms [1]
Low Frequency Response(-5 %)	0.01 Hz	0.01 Hz [2]
Upper Frequency Limit	90 kHz	90 kHz [3]
Non-Linearity	≤ 1 % FS	≤ 1 % FS [4]
ENVIRONMENTAL		
Temperature Range	-65 to +250 °F	-54 to +121 °C
Temperature Coefficient of Sensitivity	≤ 0.03 %/°F	≤ 0.054 %/°C
ELECTRICAL		
Discharge Time Constant(at room temp)	≥ 50 sec	≥ 50 sec
Excitation Voltage	20 to 30 VDC	20 to 30 VDC
Constant Current Excitation	2 to 20 mA	2 to 20 mA
Output Impedance	≤ 100 ohm	≤ 100 ohm
Output Bias Voltage	8 to 14 VDC	8 to 14 VDC
Output Polarity(Compression)	Positive	Positive
PHYSICAL		
Preload	60 lb	0.267 kN
Stiffness	12 lb/μin	2.1 kN/μm [1]
Size (Diameter x Height x Bolt Diameter x Sensing Surface)	0.650 in x 0.310 in x 0.25 in x 0.50 in	16.5 mm x 7.9 mm x 6 mm x 12.7 mm
Size (ID)(Hole Diameter)	0.251 in	6.38 mm
Size (OD)(Sensor)	0.650 in	16.51 mm
Weight	0.35 oz	10 gm
Housing Material	Stainless Steel	Stainless Steel
Sealing	Hermetic	Hermetic
Electrical Connector	10-32 Coaxial Jack	10-32 Coaxial Jack
Electrical Connection Position	Side	Side
SUPPLIED ACCESSORIES:		
Model 080A82 Assembly Lubricant (1)		
Model 081A11 Mounting Stud, 10-32 x 0.730, BeCu (1)		
Model 082B01 Anti-Friction Washer (1)		
Model 083B01 Pilot Bushing (1)		
OPTIONAL VERSIONS		
M- Metric Mount		
Supplied Accessory : Model M081A11 Mounting Stud, M5 x 0.8 x 0.730, BeCu (1) replaces Model 081A11		
Supplied Accessory : Model M083B01 Pilot Bushing (1) replaces Model 083B01		
N- Negative Output Polarity		
Output Polarity(Compression)	Negative	
W- Water Resistant Cable		
Electrical Connector	Sealed Cable	
Electrical Connection Position	Side	

