

PAALUTUSKONEEN RUN- GON VENYMÄLIUSKAMIT- TAUKSEN ANALYSOINTI JA FEM-MALLIN VERIFIOINTI

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma/Tutkinto-ohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Severi Parkkinen	
Työn nimi Paalutuskoneen rungon venymäliuskamittauksen analysointi ja FEM-mallin verifiointi	
Päiväys	7.5.2021
Sivumäärä/Liitteet	48/1
Ohjaaja(t) Tatu Westerholm	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Junttan Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Toimeksiantajana tälle opinnäytetyölle toimi Junttan Oy. Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää, miten tarkkoja tuloksia lujuuslaskelmista Ansyskellä on mahdollista saada, kun laskentojen tekemiseen käytetään kokoonpanoa, ja näin verifioida käytetty FEM-malli. Aiemmin suoritettujen venymäliuskamittausten tuloksia oli tarkoitus verrata lujuuslaskelmista saatuihin tuloksiin ja käyttää tässä apuna regressioanalyysiä. Tavoitteena siis oli varmistaa, että lujuuslaskennoissa voidaan jatkossakin käyttää kokoonpanoista rakennettuja FEM-malleja.</p> <p>HBM Finland suoritti venymäliuskamittaukset kolmessa eri mittaustilanteessa, keilin ollessa pystyssä ja kallistettuna sekä koneen oikealle että vasemmalle puolelle 18,43°. Lujuuslaskennoissa käytettiin opinnäytetyön pohjana toimineen Erikoistumisprojekti 2:n aikana rakennettua FEM-mallia. Malliin jouduttiin sittemmin lisäämään venymäliuskojen paikat, jotta tulokset saadaan juuri venymäliuskojen kohdalta regressioanalyysiä varten. Lujuuslaskelmia varten FEM-malli on valmisteltu niin, että se vastaa rungon tilannetta, jossa se venymäliuskamittauksen aikaan on ollut. Mallin korjaamisen jälkeen täytyi määritellä lujuuslaskelmissa käytettävät asetukset ja rungon eri kohtiin vaikuttavat kuormitukset sekä erotella laskentatilanteet toisistaan.</p> <p>Työn tuloksena ei saatu vastausta siihen, että saadaanko lujuuslaskelmista tarkkoja tuloksia käyttäen apuna regressioanalyysiä ja kokoonpanoa FEM-mallina. Työn myötä saatiin kuitenkin selville, että tällä tavalla suoritettujen venymäliuskamittausten myötä ei saada vertailtavia tuloksia aikaan, koska liuskojen määrä on ollut liian vähäinen tarpeeseen nähden.</p> <p>Tulevaisuudessa tätä opinnäytetyötä voidaan hyödyntää venymäliuskamittausten suunnittelussa, kun tuloksia on tarkoitus verrata lujuuslaskelmista saatuihin tuloksiin.</p>	
Avainsanat FEM-malli, venymäliuskamittaus, venymäliuska, regressioanalyysi	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Severi Parkkinen			
Title of Thesis Analyzing Strain Gage Measurement Data of Piling Machine's Frame and Verification of FEM-model			
Date	7 May 2021	Pages/Appendices	48/1
Supervisor(s) Tatu Westerholm			
Client Organisation/Partners Junttan Oy			
<p>Abstract</p> <p>The client organization for this thesis was Junttan Oy. The aim of this thesis was to find out how accurate results strength calculations of Ansys are when an assembly is used as a FEM-model and to verify the used FEM-model that way. The aim was to compare the results from conducted strain gage measurements to the results given from strength calculations and use regression analysis for that. The goal set for this thesis was to ensure that strength calculations can be performed using a slightly modified production model of the piling machine's frame in the future.</p> <p>Strain gage measurements in three different situations, while the leader was in vertical position and tilted left and right by 18.43°, were conducted by HBM Finland. The FEM-model constructed in an earlier project, was used in strength calculations. Later during this thesis, it was necessary to change the places of strain gages in the FEM-model to make it possible to get results right from the spots the gages were installed to for regression analysis. FEM-model was constructed so that it matched with the piling machine's frame in every measurement. After adjustments to the FEM-model were made, the settings and loads in different places in the machine's frame had to be determined and different calculations separated.</p> <p>As a result, it can be said that the study did not provide an answer to the question whether accurate results can be obtained in strength calculations by using regression analysis and an assembly as a FEM-model. However, it was found out that no comparable results can be obtained in the way the strain gage measurements were planned and performed due to the used number of strain gages.</p> <p>In the future, this thesis can be used to help in the planning of strain gage measurements when the results are going to be compared to the results of strength calculations.</p>			
<p>Keywords FEM-model, strain gage measurement, strain gage, regression analysis</p>			

ESIPUHE

Haluan kiittää Junttan Oy:tä, joka tarjosi opinnäytetyölle aiheen ja erityisesti Junttan Oy:ltä haluan kiittää työn ohjaajia Jarkko Vainikaista ja Tatu Silvastia hyvästä työn ohjauksesta ja tsemppaamisesta.

Kiitos myös opinnäytetyön ohjaajalle, Tatu Westerholmille, joka jaksoi opastaa regressioanalyysin käytössä ja tarjosi koululta käyttöön kannettavan tietokoneen, jossa oli nCode-ohjelmisto asennettuna. Tämä helpotti venymäliuskamittausten jälkikäsitteilyä. Hän myös opasti kyseisen ohjelmiston käytössä.

Kuopiossa 27.4.2021

SISÄLTÖ

LYHENTEET JA TERMIT	8
1 JOHDANTO	9
2 OPINNÄYTETYÖN POHJANA TOIMINEET PROJEKTIT	9
3 ASIAKASYRITYKSEN JA TYÖSSÄ KÄYTETTÄVIEN OHJELMISTOJEN ESITTELY	10
3.1 Junttan Oy	10
3.2 Solidworks.....	10
3.2.1 Esittely	10
3.2.2 Solidworksin hyödyntäminen työssä	11
3.3 Adams-ohjelmisto	11
3.3.1 Esittely	11
3.3.2 Ohjelmiston hyödyntäminen työssä	12
3.4 Ansys	14
3.4.1 Esittely	14
3.4.2 Ohjelman käyttö työssä	15
3.5 nCode ICE-Flow	16
3.5.1 Esittely	16
3.5.2 Ohjelman käyttö työssä	17
4 LASKENTAMALLIN RAKENTAMINEN	18
5 LUJUUSLASKENNAN SUORITTAMINEN	21
5.1 Runkoon vaikuttavat kuormitukset	21
5.2 Laskentatilanteiden valmistelu	24
5.2.1 Geometria ja materiaalit	25
5.2.2 Koordinaatistot	25
5.2.3 Kontaktit	27
5.2.4 Verkko.....	27
5.2.5 Rakenteeseen vaikuttavat rasitukset ja analyysin asetukset	28
5.2.6 Laskennoilta haettavat tulokset	29
5.3 Haasteet laskentojen suorittamisessa	29
6 VENYMÄLIUSKAMITTAUSTEN VALMISTELU JA SUORITTAMINEN	31
6.1 Mittausten valmistelu	31
6.2 Mittauksen suorittaminen	32

6.2.1	Mittauskokoontapano	32
6.2.2	Mittausten tiedot ja mittausten suoritus	33
6.3	Mittausdatan jälkikäsitteily	34
7	VENYMÄLIUSKAMITTAUKSEN SKAALAUUS KOKO RUNKOON	40
7.1	Tulosten vertailutapa	40
7.2	Regressioanalyysi.....	41
7.2.1	Tilastomalli	41
7.2.2	Regressioanalyysimenetelmä kuormitusten tunnistuksessa.....	42
8	MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI	44
9	YHTEENVETO.....	46
	LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	48
	LIITE 1. VENYMÄLIUSKAMITTAUSTEN SUUNNITTELU OTTAEN HUOMIOON REGRESSIOANALYYSIN TARPEET	49

KUVAT

Kuva 1.	Ajoaparametrit Adamsissa. (Laitinen, 2021)	13
Kuva 2.	Standardin mukaiset asetukset tuulikuormien säätämiseksi. (Laitinen, 2021).....	13
Kuva 3.	Rungon palkit vääntyneet rasituksen alaisena toistensa läpi. Näin voi käydä, kun osien välillä on pienikin rako ja kontakteille määritetyt rajat ovat virheelliset.	15
Kuva 4.	Ø40 mm akseli lukitsee vaakapuomin paikalleen.	16
Kuva 5.	Kuva nCode ICE-Flow:n jälkikäsitteilyprosessista venymäliuskamittauksista saadulle datalle.	18
Kuva 6.	Laskentatilanteiden havainnollistamiskuva. (Junttan Oy, 2019)	20
Kuva 7.	Massatiedot Adams-ohjelmistossa. (Laitinen, 2021)	22
Kuva 8.	Ristiniveleen kohdistuvat kuormitukset komponentteineen. Kuvan kuormitusten arvoja ei ole käytetty tässä työssä, vaan kuva esittää vain simuloinnista saatavien tulosten esitystavan. (Laitinen, 2021)	23
Kuva 9.	Vasempaan sivukallistussylinteriin kohdistuvat kuormitukset komponentteineen. Kuvan kuormitusten arvoja ei ole käytetty tässä työssä, vaan kuva esittää vain simuloinnista saatavien tulosten esitystavan. (Laitinen, 2021)	23
Kuva 10.	Ristiniveleen kohdistuva momentti newtonmetreinä. Kuvan kuormitusten arvoja ei ole käytetty tässä työssä, vaan kuva esittää vain simuloinnista saatavien tulosten esitystavan. (Laitinen, 2021)	24
Kuva 11.	Koordinaatiston määrittäminen pisteisiin. Kaarevilla pinnoilla paikalliskoordinaatisto määritetään liuskan suuntaisesti tangenttina.	26
Kuva 12.	Paalutuskoneen runkoon vaikuttavat rasitukset.	28
Kuva 13.	Rungon tukipiste - kääntökehän alin pinta.....	28

Kuva 14. Nollapisteen virhetesti liuskojen asennuspäivältä. (HBM, 2018)	34
Kuva 15. Nollapisteen virhetesti mittauspäivältä. (HBM, 2018).....	34
Kuva 16. ASCIITranslate-prosessointityökalu, jolla .ASC-tiedostomuodossa oleva data voidaan muuttaa ohjelmalle luettavaan muotoon.	36
Kuva 17. ASCIITranslatein seuraava sivu, jolla valitaan otsikkorivien ja kanavien lukumäärä.	36
Kuva 18. ASCIITranslatein ikkuna, jossa ohjelmalle kerrotaan näytetaajuus ja X-akselin lähtöarvo. .	37
Kuva 19. Muunnetun datatiedoston tuonti GlyphWorks-ohjelmaan.....	37
Kuva 20. Mittausdata puunäkymänä ja yhden kanavan data vietyä työtasolle.	38
Kuva 21. Yhden mittaustilanteen data tuotuna työtasolle. Dataikkunaan on liitetty Time Series Calculator, jolla yksikkömuunnokset saadaan tehtyä kaikkiin kanaviin kerralla.	38
Kuva 22. Time Series Calculatorin asetukset.....	39
Kuva 23. Kanavien yksikkömuunnoksista koostuva lista, josta saadaan graafiset tulokset jännityksinä ajan funktiona.	40
Kuva 24. Black Box -tilastollinen prosessi.	41
Kuva 25. Oikean kallistustilanteen aikaan mitatut sivukallistussylinterien paineet.	44
Kuva 26. Vasemman kallistustilanteen aikaan mitatut sivukallistussylinterien paineet.	45

LYHENTEET JA TERMIT

- PDM (*Product Data Management*) = tuotetiedon hallintajärjestelmä
- FEA (Finite Element Analysis) = elementtilaskenta
- FEM (*Finite Element Method*) = elementtimenetelmä
- CAE (*Computer-aided Engineering*) = tietokoneavusteinen suunnittelu
- TSCalculator = *Time Series Calculator*
- kimmokerroin/kimmomoduuli/Young's modulus

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty toimeksiantajana toimivalle yritykselle, Junttan Oy:lle, joka on yksi maailman johtavista paalutus-, monikäyttö-, poraus- ja stabilointikoneiden, hydraulijärkäleiden, kairojen ja voimayksiköiden valmistajista.

Opinnäytetyön tarkoituksena oli varmistaa, että lujuuslaskennoissa käytettävien mallien mallinnusprosessi on sellainen, että laskennoista saatavat tulokset vastaisivat mahdollisimman hyvin käytössä olevan koneen runkoon kohdistuvia rasituksia todellisuudessa, ja näin ollen laskentamallien mallinnusta voitaisiin jatkaa saman periaatteen mukaisesti myös jatkossa. Jos venymäliuskamittauksista ja laskentamallien pohjalta suoritettujen laskentojen tulosten välillä ilmeni suuria eroja, niin eroja aiheuttavat tekijät on pyritty tunnistamaan, jonka jälkeen nämä tekijät on laskentamallien suunnittelu- prosessissa otettu huomioon tarkempien tuloksien aikaan saamiseksi.

Tämä opinnäytetyö on Junttan Oy:ssä ensimmäinen laatuaan oleva tutkimus, jossa vertaillaan venymäliuskamittauksista saatuja tuloksia laskentamallien pohjalta tehtyihin lujuuslaskelmiin. Venymäliuskamittaukset on tehty rungon kolmesta eri mittauspisteestä, kolmessa eri mittaustilanteessa, ja näiden pisteiden kohdalta saatavia tuloksia tullaan käyttämään apuna sekä tulosten tuottamisessa että tulosten vertailussa. Työssä on myös pyritty selvittämään mahdollisuutta skaalata venymäliuskamittausten tuloksia kolmesta eri pisteestä koskemaan koko koneen runkoa, eli onko mahdollista saada venymäliuskamittauksesta eri rungon osiin kohdistuvia rasituksia, kun mittauspisteitä on kolme. Tämän onnistuessa olisi mahdollista tarkastella koneen runkoon kohdistuvia rasituksia laajemmassa mittakaavassa ja samalla saataisiin verifioitua laskentamalli. Työssä tuloksia tullaan vertailemaan regressioanalyysin avulla.

2 OPINNÄYTETYÖN POHJANA TOIMINEET PROJEKTIT

Tämän opinnäytetyön pohjana toimii kevään 2020 aikana valmistunut, Severi Parkkisen konetekniikan insinööriopintoihin kuuluva Erikoistumisprojekti 2. Työssä käsiteltiin hieman venymäliuskamittausten teoriaa ja HBM:n suorittamissa venymäliuskamittauksissa käytettäviä materiaaleja, mittauspisteiden valmistelua mittauksia varten, mittauksissa käytössä olevia laitteita ja ohjelmistoja sekä itse mittauksia. Näiden lisäksi projektiin kuului tässä opinnäytetyössä hyödynnettävän FEM-mallin rakentaminen.

Erikoistumisprojektissa rakennettua FEM-mallia hyödynnetään tässä työssä lujuuslaskentojen tekemisessä. Lujuuslaskentojen tekemiseen käytetään Ansys-ohjelmistoa, johon tuodaan rakennettu FEM-malli, jonka jälkeen malliin voidaan määrittää työssä tarkasteltaviin paalutuskoneen rungon pisteisiin kohdistuvat rasitukset. Koneen runkoon kohdistuvien voimien komponenttien määrittämistä, lujuuslaskelmissa käytettävää ohjelmistoa sekä siinä käytettäviä asetuksia tullaan tarkastelemaan työssä tarkemmin myöhemmässä vaiheessa.

3 ASIAKASYRITYKSEN JA TYÖSSÄ KÄYTETTÄVIEN OHJELMISTOJEN ESITTELY

Tässä pääluvussa esitellään opinnäytetyön tilannut asiakasyritys eli Junttan Oy. Yrityksen lisäksi esitellään yrityksen käytössä olevat ohjelmistot, joita tässä työssä hyödynnettiin. Lisäksi esitellään ohjelmisto, jonka Savonia-ammattikorkeakoulu on antanut käytettäväksi työtä varten, kuin myös muut käytettävät ohjelmat.

3.1 Junttan Oy

Junttan Oy on suomalainen, Sinituote-konserniin kuuluva, hydraulisten paalutuskoneiden ja -laitteiden, ExcaDrill-kaivuporakoneyksiköiden suunnitteluun, valmistukseen, markkinointiin ja huoltoon erikoistunut yhtiö. Yhtiö on perustettu Pentti Heinosen toimesta vuonna 1976, mutta yhtiön juuret juontavat 1960-luvulle Savon Varvi-nimiseen perustusalun yritykseen. Yrityksen tehdas ja pääkonttori sijaitsee Kuopiossa, jossa koneet myös valmistetaan ja huolletaan. Kuopion tehtaalla tarjotaan myös service-palveluita, jotka sisältävät muun muassa asiakasneuvonnan ja varaosamyynnin. Yhtiöllä on toimitiloja Suomessa myös Hyvinkäällä, Tampereella ja Helsingissä. (Parkkinen, 2020); (Junttan Oy, 2020)

Suurin osa Junttan Oy:n tuotteista menee vientiin, ja tämä kattaakin yrityksen liikevaihdosta yli 95%. Vientiä on yli 40 maahan. Kuopion tehdas on avattu vuonna 2008. Päämarkkina-alueita vuonna 2019 olivat Pohjois-Amerikka ja Eurooppa. (Junttan Oy, 2020)

Kolme vuotta yrityksen perustamisen jälkeen, vuonna 1979, Junttan Oy sai valmiiksi ensimmäisen hydraulisen paalutuskoneensa ja neljä vuotta sen jälkeen yritys sai valmiiksi ensimmäisen tarkoitukseen suunnitellun paalutuskoneen. Vuonna 1984 Junttan aloitti koneidensa viennin ja 90-luvulla se laajeni koskemaan laajempaa osaa Eurooppasta. 90-luvun loppupuolella Venäjältä tuli yksi merkittävimmistä markkina-alueista. (Junttan Oy, 2020)

Yritys työllistää tuotantopuolella noin 100 työntekijää ja noin 80 toimihenkilöä tuotesuunnittelun, hankinnan, tuotannon, myynnin ja hallinnon puolella. (Junttan Oy, 2020)

3.2 Solidworks

3.2.1 Esittely

Solidworks on Dassault Systèmes SOLIDWORKS Corporationin tarjoama 3D-suunnitteluohjelmisto, joka tarjoaa suunnittelun, simuloinnin, julkaisun ja datanhallinnan samassa paketissa. Yritys on perustettu joulukuussa 1993, ja sen pääkonttori sijaitsee Yhdysvaltojen Massachusettsissa, Walthamin kaupungissa. Solidworks julkaistiin marraskuussa 1995 ja se oli ensimmäinen merkittävä 3D-mallinussohjelma. Ohjelma mahdollisti insinööreille suunnittelemiensa osien ja kokonaisuuksien esittämisen aivan uudella tavalla, ja nopeammin kuin ennen. Ohjelmistolla on yli 3,2 miljoonaa käyttäjää, joihin lukeutuvat tuotesuunnittelijat ja insinöörit ympäri maailman, vaikkakaan käyttäjäkunta ei rajoitu ainoastaan näihin. (Dassault Systems, 2020)

Yrityksen markkina-alueita ovat teollisuus, lääketieteelliset, tieteelliset, koulutukselliset, teknologiset ja logistiikan toimialat. (Dassault Systems, 2020)

Solidworks on parametreihin perustuva 3D-mekaniikkasuunnitteluohjelmisto tuotekehityksen, suunnittelun ja valmistuksen tarpeisiin. Ohjelmistolla voidaan käsitellä niin yksittäisiä osia kuin myös suurempia kokoonpanoja sekä työpiirustuksia. Solidworks tarjoaa monipuoliset työkalut erilaisten osien, kuten esimerkiksi levyleikkeiden ja pintamallien, mallinnukseen. Tämän lisäksi se mahdollistaa sulautettujen sähköjärjestelmien suunnittelun ja tiimien välisen yhteistyön. Ohjelmaan voidaan myös liittää PDM-järjestelmä, jonka myötä suunnittelutietojen käsittelystä tulee helpompaa ja se parantaa tuotekehitystä eri tiimien välillä. Ohjelman simulaatiotyökaluilla suunnitellut mallit voidaan altistaa todellisiin käyttöpaikan olosuhteisiin ja näin testata tuotteen laatua jo ennen sen valmistusta ja vähentää prototyyppien kustannuksia. (Scan2CAD, 2020)

3.2.2 Solidworksin hyödyntäminen työssä

Solidworks-ohjelmistoa hyödynnettiin tämän opinnäytetyön pohjana toimineessa projektissa lujuuslaskennoissa käytettävän koneen rungon FEM-mallin rakentamisessa. Solidworksia on käytetty myös tämän opinnäytetyön aikana laskentamallin korjailuun.

3.3 Adams-ohjelmisto

3.3.1 Esittely

Työssä käytettävän Adams-ohjelmiston on kehittänyt MSC Software, joka on osa ruotsalaista Hexagon-pörssiyhtiötä. Hexagon työllistää 50 eri maassa noin 21 000 ihmistä ja sen liikevaihto on noin 3,8 miljardia euroa. MSC Software on yksi maailman johtavista simulaatio-ohjelmistoteknologiaa kehittävästä yrityksistä, joka mahdollistaa insinöörien vahvistaa ja optimoida mallinsa virtuaalisten prototyyppien avulla. Yrityksen asiakkaat käyttävät heidän ohjelmistoaan lähes kaikilla valmistuksen osa-alueilla täydentääkseen tai jopa korvaamaan fyysisen prototyypin ”rakennus ja testaus” -prosessin, joka perinteisesti on ollut tuotesuunnittelussa käytössä. (HEXAGON, 2021); (MSC Software, 2021)

MSC Software Corporation perustettiin vuonna 1963 nimellä MacNeal-Schwendler Corporation (MSC). Ensimmäinen yrityksen kehittämä rakenneanalyysiohjelmisto oli tällöin nimeltään SADSAM (Structural Analysis by Digital Simulation of Analog Methods) ja oli syvällä mukana ilmailu- ja avaruusteollisuuden yrityksissä parantaa aiempaa elementtianalyysien teknologiaa. Vuonna 1965 yritys palkittiin NASA:n myöntämällä sopimuksella mainostaa FEA-ohjelmistoaan (*Finite Element Analysis = elementtilaskenta*) Nastranina (NASA Structural Analysis). Yritys on kehittänyt monia muitakin ohjelmia CAE-sovelluksia (*Computer Aided Engineering*) varten, kuten Patran, Marc, Dytran, Fatigue ja monia muita. (MSC Software, 2021)

Yritys pyrkii ohjelmistojensa avulla auttamaan asiakasyrityksiään parantamaan tuotteidensa laatua, säästämään aikaa ja vähentämään kustannuksia, joita suunnittelusta ja tuotteiden valmistuksesta

syntyy. Lisäksi ohjelman käytöllä voidaan saada tuotteen turvallisuutta parannettua. Ohjelmilla pystyy tarkasti ja luotettavasti ennustamaan tuotteen käyttäytymistä oikeissa tilanteissa, ja näiden simulaatioiden myötä saaduilla tiedoilla insinöörit voivat suunnitella entistä innovatiivisempia tuotteita ja tehdä sen nopeasti ja kustannustehokkaasti. (MSC Software, 2021)

Yrityksen kehittämää teknologiaa voidaan hyödyntää moniin eri tarkoituksiin, kuten lineaarisiin ja epälineaarisiin elementtilaskentoihin sekä akustiikan, nesterakenteiden vuorovaikutusten, monifysiikan, optimoinnin, väsymisen ja kestävyuden, moniosaisen dynamiikan ja ohjausjärjestelmien simuloimisiin. (MSC Software, 2021)

3.3.2 Ohjelmiston hyödyntäminen työssä

Adams-ohjelmistoa on tätä opinnäytetyötä varten käytetty koneen runkoa kuormittavien voimien ja momenttien määrittämiseksi ristinivelen ja molempien sivukallistussylinterien kohdalta. Leo Pyhtinen (Junttan Oy) on tehnyt tässä työssä tutkimuksen kohteena olevasta paalutuskoneesta karkean 3D-mallin, jossa on kaikki laskennan kannalta oleelliset osat kiinni: ristinivel, sivukallistussylinterit, keili, kantasynteri, järkäle ja vinssien vaijerit. Edellä mainittujen lisäksi koneen mallissa oli ohjaamo, vastapaino sekä ylä- ja alavaunu karkeasti mallinnettuna. Mallin osalta tärkeintä kuitenkin on, että geometria on oikein, eli kaikki nivelpisteet, järkäleen, keilin ja muiden kokonaisuuksien massat ja niiden paikat ovat oikein. (Laitinen, Adams-ohjelmiston käytön esittely ja voimien määrittäminen, 2020)

Adams-ohjelmassa voimien ratkaisussa on käytössä erilaisia lisäosia, joilla voidaan tehdä muutoksia simuloinnissa tapahtuviin asioihin. Esimerkiksi ajoikkunassa (kuva 1) voidaan simuloida erilaisia tilanteita toiseen lisäosaan syötettyjen tietojen pohjalta, kuten keilin kallistusnopeus pystystä taaksepäin. Ohjelmaan voidaan myös syöttää erilaisia ajoparametrejä, joiden kautta voidaan säätää muun muassa ylävaunun suuntaa, määrittää keilin kallistusasteita, joita simuloidaan samalla kertaa, vaakapuomin ulkonemaa, yläluistin sijaintia, paalukeskiötä ja monia muita asioita. Lisäksi ohjelmalla voidaan säätää esimerkiksi tuulen aiheuttamaa kuormaa ja suuntaa (kuva 2), jotka ohjelmassa määritetään paalutuskoneita koskevan standardin määräämällä tavalla. Tuulen aiheuttama kuorma ilmoitetaan Newtonina. Ohjelmalla tehdyistä simulaatioista on mahdollista saada ohjelman laskemat kuormitusarvot selville sen generoimasta kuvaajasta, joka näyttää kuormituksen muutoksen keilin kallistuksen funktiona. Kuormituksen muutos voidaan myös simuloida jonkin muun tapahtuvan muutoksen funktioksi. (Laitinen, Adams-ohjelmiston käytön esittely ja voimien määrittäminen, 2020)

Massat | Ajoparametrit | Standardi

MAAN KALTEVUUS AKSELIIEN YMPÄRI

Ylävaunu fii z: 0
 Keili fii x: 0.0
 Keili fii y: 18.43
 Vaakapuomi y: 0.6
 Yläluisti z: 0.0
 Keili maasta: 0.0
 Kanta maasta: 0.3

Maan kaltevuus x: 0.0
 Maan kaltevuus y: 0.0

Paalu ilmassa / Paalu maassa
 Paalun pituus: 7.0
 Paalu keskio: 0.48
 Paalun massa: 0.0
 Paalun massan laskenta: Päällä / Pois
 Paalunvetovoima: 0.0
 Koysikulma: 0.0
 Nostettava massa: 1.0E-03
 Nostettavan massan korkeusasema: 4.0

Nostopisteen paikka: Nostettava massa / Näkyvässä
 x: -0.19 y: 0.5 z: 26.1
 Tolan leveys: 0.9

TUKIVOIMA PISTEET
 Kippi e x: 1.96 Kippi t x: 1.96
 Kippi e y: 2.36 Kippi t y: 2.36

OPTIOVOIMAT
 Optiovoima 1: 0.0 Käytössä
 x: 0.0 y: 3.0 z: 3.0
 Suunta: 0.0
 Optiovoima 2: 0.0 Käytössä
 x: 0.0 y: 4.0 z: 4.0
 Suunta: 0.0

LASKENTAKRITEERIT
 Vakavuuskulma: 3.5
 Paaluvinnin voima: (1.0E+05 * 1.0)
 Kantasylinteri voima: (-6.1E+05 * 1.0)
 Etukallistussylinteri voima: -4.93E+05
 Pystyyn palauttava momentti: 1.0E+04

Käytet ylävaunun pukin kautta: Käytössä
 Käysipukin kulma: 46.3

Tallenna parametrit tiedostoon

Lataa massat tiedostosta | Lataa parametrit tiedostosta

OK Apply Cancel

Kuva 1. Ajoparametrit Adamsissa. (Laitinen, 2021)

Massat | Ajoparametrit | Standardi

TUULIKUORMAT

Tuulen suunta z: 0.0

Tuulikuorma keili: 0.0 [N]
 Tuulikuorman korkeus keilissä: 0.0
 Tuulikuorma vaunu: 0.0 [N]
 Tuulivoiman korkeus vaunussa: 0.0

KIIHTYVYYS JA NOPEUS

Koneen y -suuntainen kiihtyvyys: 0.0 [m/s²]
 Koneen kääntönopeus: 0.0 [deg/s]
 Koneen kääntökiihtyvyys: 0.0 [deg/s²]

KEILI

Keilin kallistusnopeus x-akselin ympäri: 0.0 [deg/s]
 Keilin kallistuskiihtyvyys x-akselin ympäri: 0.0 [deg/s²]
 Keilin kallistusnopeus y-akselin ympäri: 0.0 [deg/s]
 Keilin kallistuskiihtyvyys y-akselin ympäri: 0.0 [deg/s²]

Tuulen suunta fii z: 180, 0, 270, 90

Kallistusnopeus
 Kallistuskiihtyvyys y
 Kääntökiihtyvyys
 Kääntönopeus
 Kiihtyvyys y

Lataa massat tiedostosta | Lataa parametrit tiedostosta

OK Apply Cancel

Kuva 2. Standardin mukaiset asetukset tuulikuormien säätämiseksi. (Laitinen, 2021)

Ohjelmaa käytetään kuormitusten ratkaisemisen lisäksi koneen stabiiliteetin tarkasteluun. Simuloi-
 malla konetta eri asennossa, eri osien muuttuvilla massoilla ja ylävaunun käännöllä tai koko koneen

kallistuksen myötä voidaan ratkaista hyvin monenlaisista tilanteista tarkkoja kuormituksia eri osien väliltä. Adams-ohjelmistoa käytetään Junttanilla pääosin paalutuskoneiden stabiiliuden tarkasteluun, mutta sillä saadaan myös ratkaistua rungon eri kohdissa vaikuttavia kuormituksia, kuten tässä opinäytetyössä. Näistä saatuja arvoja voidaan sitten hyödyntää esimerkiksi koneiden lujuuslaskelmien tekemisessä tai asiakkaita voidaan informoida ja ohjeistaa, että näiden raja-arvojen sisällä voidaan konetta käyttää turvallisesti, että kone ei esimerkiksi kaadu. Jos simulaatiotilanne on tehty sellaiseksi, että jos koneessa on jokin sellainen rajoittava tekijä, joka tekee simulointitilanteesta mahdollottoman toteuttaa, niin ohjelma pystyy kertomaan, mikä tai mitkä, koneessa toimii tilanteessa rajoittavana tekijänä. Toisinaan rajoittavia tekijöitä voi olla useampi. (Laitinen, Adams-ohjelmiston käytön esittely ja voimien määrittäminen, 2020)

Laskentojen tarkkuus on todennäköisesti staattisissa tilanteissa jonkin verran tarkempi kuin dynaamisissa tilanteissa. Staattisten tilanteiden kohdalla, jos keilissä esimerkiksi olisi 10 000 kg, niin heitto on hyvin harvoin lähellä 500 kilogrammaa. Varmuutta simulointeihin saadaan kuitenkin lisää, kun kaikki koneen osat on tuotannossa punnittu ja niitä verrataan ohjelmaan syötettyihin massoihin. Lisäksi valmiin koneen kokonaismassaa voidaan verrata simulointimallin kanssa keskenään, koska paalutuskoneet punnitaan kokonaisuudessaan vielä tehtaan pihalla. (Laitinen, Adams-ohjelmiston käytön esittely ja voimien määrittäminen, 2020)

3.4 Ansys

3.4.1 Esittely

Ansys-yritys on perustettu vuonna 1970 ja se työllistää yli 4 400 ammattilaista elementtianalyysien, laskennallisen nestedynamiikan, sähköistyksen, puolijohteiden, sulautettujen ohjelmistojen ja suunnittelun optimoinnin parissa. Yritys keskittyy tekniseen simulointiin. Yli 45 vuoden ajan se on jatkuvasti kehittänyt tekniikkaansa vastaamaan paremmin asiakkaiden muuttuvia tarpeita. Ansys kehittää, markkinoi ja tukee teknistä simulointia, joka ennakoii kuinka tuotteen muotoilut voisivat käyttäytyä oikeassa ympäristössä. (Ansys, 2020)

Ansyksen rakenteiden analysointiohjelmisto mahdollistaa monimutkaisten rakenteiden ongelmien ratkaisun ja parempien, nopeampien suunnittelupäätösten tekemisen. Elementtimenetelmän FEA:n ratkojien avulla voidaan räätälöidä ja automatisoida ratkaisuja rakennemekaniikan ongelmiin ja määrittää analysoinnissa käytettävät parametrit useammalle suunnittelutilanteelle. Ohjelmiston avulla voidaan säästää tuotekehitykseen käytettäviä resursseja, kun osien kestävyyttä voidaan testata vastaavanlaisissa olosuhteissa, kuin se tulisi oikeasti olemaan käytössä. (Ansys, 2020)

Työssä käytettiin Ansys Mechanical-simulointiohjelmistoa, joka perustuu elementtimenetelmän käyttöön ja näin ollen mahdollistaa edistyneiden epälineaaristen rasitusanalyysien tekemisen erilaisissa rakenteissa, sisältäen kattavat lineaariset dynamiikat. Ansys Mechanical on dynaaminen ympäristö, joka sisältää laajan valikoiman työkaluja mallien geometrian valmistelusta lisäfyysiikoiden yhdistämiseen saakka, mahdollistaen tarkemmat tulokset. Ansys Workbench on Mechanicalin ja kaupallisten

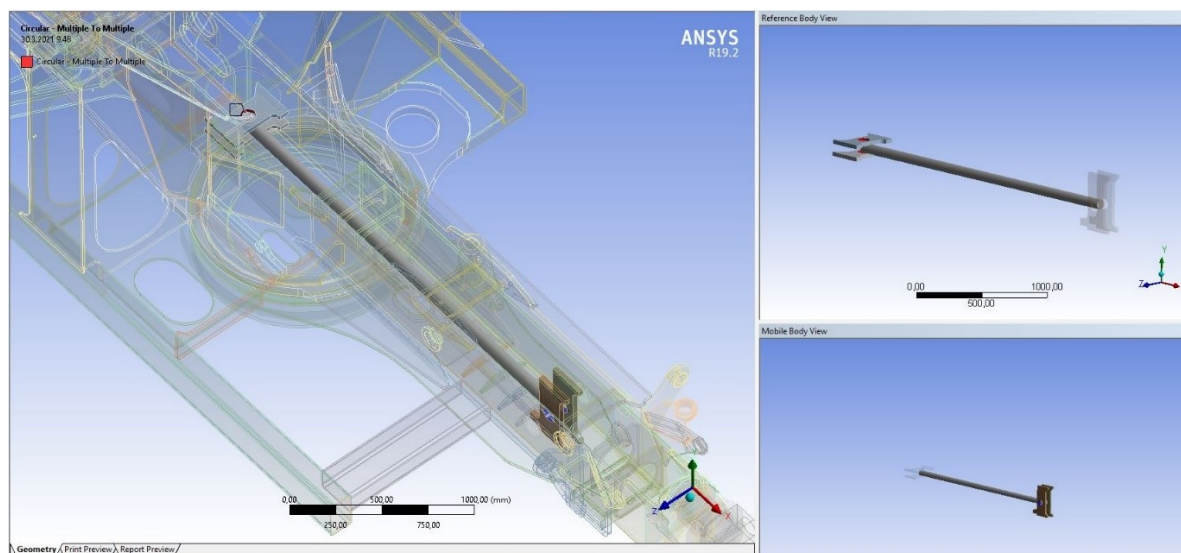
3D-suunnitteluohjelmistojen välillä toimiva ohjelmisto, jonka avulla ohjelmat saadaan kommunikoi-
maan keskenään ja esimerkiksi mallien geometrian päivitys onnistuu suoraan Mechanicalissa muuta-
malla klikkauksella. (Ansys, 2020)

3.4.2 Ohjelman käyttö työssä

Ansys Mechanical -ohjelmistoa käytettiin työssä suurimmaksi osaksi lujuuslaskentojen asetusten
määrittämiseen ja niiden suorittamiseen, mutta jossakin määrin myös pintojen välisten kontaktien
määrittämiseen. Työssä käytetty ohjelmiston versio oli 19.2 ja käytetty lisenssi Mechanical Pro. Suu-
rin osa kontakteista on määritetty 3D-suunnitteluohjelma Solidworksissä, mutta Workbenchillä lisät-
tiin muutamia kontaktipintoja, muun muassa rungon kyljissä sijaitsevien putkipalkkien välille. Näiden
putkipalkkien välinen kontakti toimi tässä tapauksessa rajoittimena sisemmän putken taipumiselle
rasituksen alla ja näin ollen esti palkin vääntymisen toisen palkin läpi, toisin kuin kuvassa 3. Koska
rungon laskentamallissa ei ole rungon ja vaakapuomin korvakoiden välillä sylinteriä, jolla vaaka-
puomin ulkonemaa säädetään, on Mechanicalissa korvakoiden välille lisätty $\varnothing 40$ mm akseli lukitse-
maan vaakapuomi paikalleen (kuva 4).



Kuva 3. Rungon palkit vääntyneet rasituksen alaisena toistensa läpi. Näin voi käydä, kun osien välillä on pienikin rako ja kontakteille määritetyt rajat ovat virheelliset.



Kuva 4. Ø40 mm akseli lukitsee vaakapuomin paikalleen.

Mechanicalissa määritetään lujuuslaskennoissa käytettävät asetukset, joihin sisältyy muun muassa koordinaatistojen, kontaktien, verkon (*mesh*) sekä voimien, momenttien ja tukipisteiden määrittäminen. Lisäksi ohjelmalle kerrotaan, mitä tuloksia laskennoista halutaan selvittää. Näitä voivat olla muodonmuutos, rasitus, rasitusenergia tai linearisoitu rasitus. Tässä työssä selvitetään, kuinka suuria normaalijännityksiä (*normal stress*) liuskojen paikoilla tapahtuu keilin ollessa pystyssä ja kallistusten aikana oikealle ja vasemmalle 18,43°. Laskennoissa käytettävät asetukset käydään tarkemmin läpi luvussa 5.

3.5 nCode ICE-Flow

3.5.1 Esittely

nCode on teknisten tietojen analysointiratkaisujen johtavia tuotemerkkejä, joka on perustettu vuonna 1982. Se on keskittynyt väsymisen ja kestävyysanalysointiin. Ohjelmiston avulla asiakkaat ymmärtävät paremmin tuotteen suorituskykyä, saavat nopeutettua tuotekehitystä ja parannettua suunnittelua monella eri toimialalla. (nCode, 2020)

nCode on HBM Prenscian kehittänyt ohjelmisto, jonka tehokkuus ja helppokäyttöisyys on suoraa seurausta kehitysprosessista, asiantuntemuksesta ja perusteellisesta kokemuksesta niin kestävyysanalysoinnin, väsymisen ennustamisen, testitietojen analysoinnin ja signaalinkäsittelyn, materiaalivalintojen ja materiaalien luonteenomaisten piirteiden, kuin myös suunnittelutietojen hallinnan, vahvuuksien hallinnan ja ennustamisen saralta. (nCode, 2020)

nCoden tuotteita ovat ohjelmistot, jotka antavat tarvittavat työkalut muun muassa CAE-pohjaiseen väsymisanalyysiin, digitaaliseen signaalinkäsittelyyn, kestävyysanalyysiin, akustiikka- ja värinänalyysiin. nCode tarjoaa myös koulutusta ohjelmistojen käyttöön, kestävyysanalysoinnin periaatteisiin ja teoriaan. Lisäksi sillä on tarjota materiaalien testaukseen liittyviä palveluita, joihin kuuluu materiaalien varmennus ja niiden piirteiden luonnehdinta sekä muut erikoistestaukset. nCode tarjoaa myös konsultointipalveluita. (nCode, 2020)

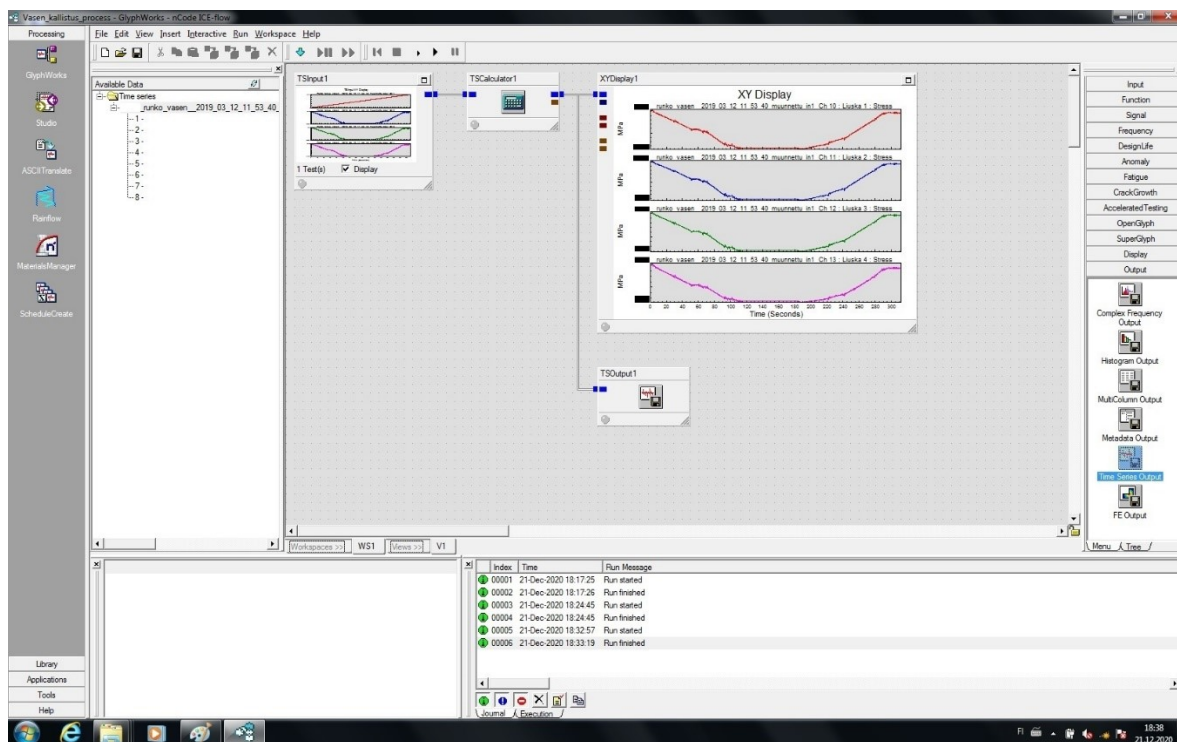
Tässä opinnäytetyössä käytetty nCoden ohjelma on ICE-flow vuodelta 2007, versioltaan 4.1. Käytössä ei siis ollut uusinta markkinoilla saatavilla olevaa versiota, joten jäljempänä mainitut ominaisuudet ja työkalut saattavat poiketa käytössä olleen version ominaisuuksista. Opinnäytetyötä tehdessä ohjelman työkaluista käytetyin oli GlyphWorks, joka on mittausdatan prosessointiin tarkoitettu ohjelmisto. Se sisältää kestävyysanalyysien tekemiseen tehokkaat työkalut esimääritellyin asetuksin. Ohjelma on suunniteltu niin, että sillä on mahdollista käsitellä suurta datamäärää samanaikaisesti ja se tarjoaa myös graafisen, prosessisuuntautuneen ympäristön, sisältäen johtavat analysointikyvyt sekä rahan että ajan säästämiseksi ympäristön kelpoisuuden ja tuotteiden validointiin. (nCode)

GlyphWorksin pääominaisuuksia ovat muun muassa kattavat analysointimenetelmät kestävyys- ja väsymisanalyysiin, jotka mahdollistavat vaurioiden laskennan ja testiprofilien luomisen; graafinen käyttöliittymä monikanavaisen datavirran käsittelyyn ja analysointiin, esimääritellyt prosessit kiihdytettyjen kestävyystestien suorittamiseen ajan- ja taajuusalueen sovelluksille, kehittyneet työkalut poikkeamien tunnistamiseen raakadatasta ja sen siivoamiseen sekä monia muita sisäänrakennettuja analysointitoimintoja ja tulosten esittämistapoja. (nCode, 2020)

Ohjelmistosta saatavia etuja ovat suuren datamäärän prosessointi monessa eri formaatissa, ajan ja rahan säästäminen nopeampien ja realististen kestävyystestien myötä, yhdenmukaisuuden ja laadun parantuminen standardoitujen analysointiprosessien kautta sekä tuottavuuden lisääntyminen, kun raakadatasta päästään suoraan valmiiseen raportointiin. Lisäksi ohjelmalla saadaan tuotettua kattava analyysi asiantuntijoille ja se on helppokäyttöinen myös satunnaisesti ohjelmaa käyttäville. (nCode, 2020)

3.5.2 Ohjelman käyttö työssä

nCode ICE-Flow -ohjelmistoa on tässä opinnäytetyössä käytetty rungon venymäliuskamittauksista saadun datan, venymien [$\mu m/m$], muuntamiseen rasituksen muotoon [MPa], ja tämän yhteydessä rasitukset on muutettu graafiseen muotoon, josta nähdään runkoon kohdistuvat rasitukset ajan funktiona.



Kuva 5. Kuva nCode ICE-Flow:n jälkikäsitteilyprosessista venymäliuskamittauksista saadulle datalle.

Jotta mittauksista saatu data venymän muodossa saatiin muutettua rasituksiksi, hyödynnettiin ICE-Flow -ohjelmiston *TSCalculatoria* (Time Series Calculator). Yksikkömuunnoksen tekemistä varten tarvitaan *TSCalculatorin* lisäksi tietää rungossa käytettävän materiaalin kimmokerroin (*engl. Young's modulus*). Kimmomoduuli kuvaa materiaalin jäykkyyttä tarkasteltavassa materiaalipisteessä ja se saadaan määritettyä kappaleeseen kohdistuvan jännityksen ja tämän aiheuttaman venymän suhteesta, kuten kaavasta 1 nähdään. Mittausdatan jälkikäsitteilyprosessia käsitellään tarkemmin luvussa 6.3. (Salmi & Pajunen, 2010, ss. 39-40)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1)$$

Kaavassa σ on jännitys ja ε venymä.

4 LASKENTAMALLIN RAKENTAMINEN

Tässä pääkappaleessa käydään lyhyesti läpi työssä käytettävän laskentamallin rakentamisen lähtötilanne ja rakennustapa sekä asioita, joita laskentamallin rakentamisessa tulisi yleisesti ottaa huomioon ja millä tavalla laskentamalli eroaa niin sanotusta tuotantomallista. Nämä asiat on esitetty tarkemmin tämän opinnäytetyön pohjana toimivassa Erikoistumisprojektissä 2:ssa.

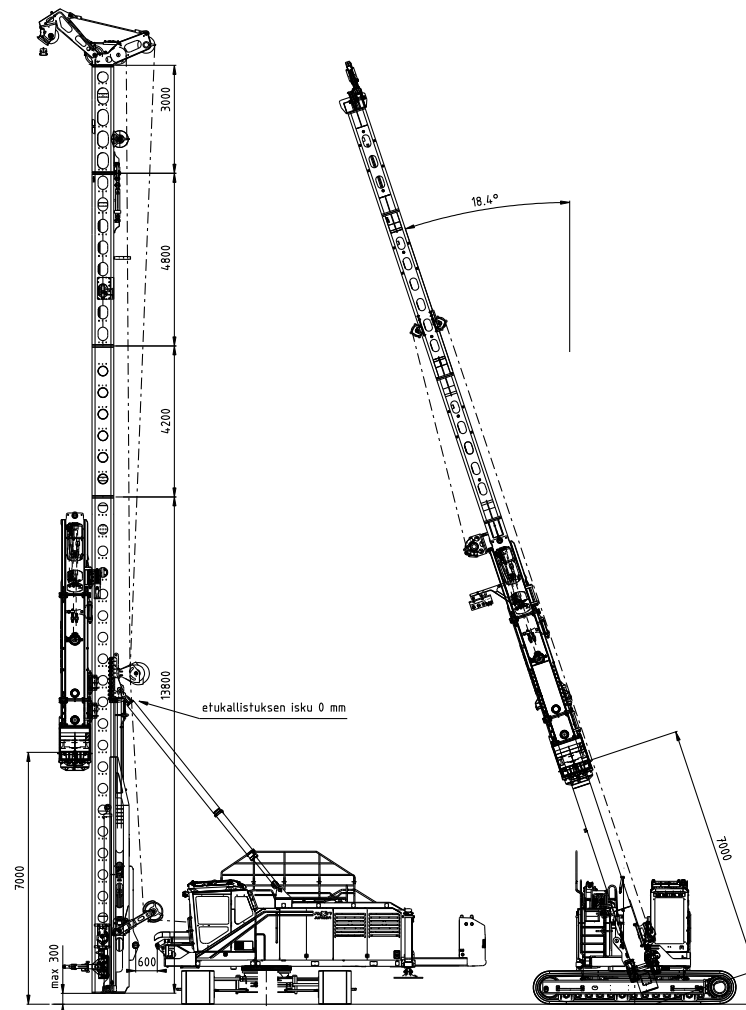
FEM-mallin rakentamisen pohjana käytettiin koneen rungon tuotantomallia, joka ei aivan täysin vastannut venymäliuskamittauksissa käytettyä runkoa. Näiden välisiä eroja oli muun muassa vaakapuomin ulos tulevan osuuden pituus, vaakapuomin säätöön liittyvä sylinteri ja kolmesta mittaustilan-

teesta johtuen ristinivelen suunta (keili pystyssä ja kallistettuna sekä oikealle että vasemmalle). Lisäksi mallista puuttui joitakin osia sen vuoksi, että Junttan Oy:ssä oli päivitetty PDM-järjestelmä ja tämän johdosta Solidworks oli menettänyt näiden osien polut. Tällaisten osien kohdalla polut etsittiin uudelleen. Suurimmaksi osaksi osien polut olivat kuitenkin säilyneet entisellään. Joitakin FEM-mallissa käytettäviä osia täytyi yksinkertaistaa, esimerkiksi kulmapyöritysten ja viisteiden osalta, jotta laskentamallille myöhemmässä vaiheessa muodostettavassa ruudukossa (*engl. mesh*) olisi mahdollisimman yhdenmukainen. Yhdenmukaistamisen myötä ruudukko saadaan koostumaan määritellyn kokoisista neliöistä, jonka myötä ruudukon laatu on parempi ja lujuuslaskentoihin kuluva aika vähenee. (Parkkinen, 2020)

FEM-mallissa käytettävät osat ovat muuten tuotantomallia vastaavia osia, mutta niistä otetaan kulmien pyöritykset ja viisteet pois. Tämä johtuu juuri siitä, että malliin muodostettava ruudukko saataisiin tehtyä mahdollisimman yhdenmukaiseksi ja vähennettyä solmujen määrää. (Parkkinen, 2020)

Laskentamallin rakentamisessa hyödynnettiin Junttan Oy:n laatiman venymäliuskamittauksen mitaussuunnitelman muistiota, josta selvisi muun muassa keilin kallistuskulma ja vaakapuomin ulkonema. Kuvasta 6 nähdään, että mittaustilanteissa järkäle on 7 metrin korkeudella maasta, vaakapuomi ulkona 600 mm, keilin osittais- ja kokonaispituus, ja (ristinivelen) kallistuskulma $18,43^\circ$ sekä vasemmalle että oikealle puolelle. Laskentamallissa ei ollut mukana keiliä, järkälettä, alasetovarusta, latvakukkoa, ohjaamoja eikä myöskään alavaunua tai muitakaan varusteita, vaan ainoastaan koneen runko.

Osittain näiden muistiosta löytyvien tietojen pohjalta Junttan Oy:n Vesa Laitinen on laskenut rungon kynkkiin ja ristiniveleen kohdistuvat voimat (taulukot 1-2).



Kuva 6. Laskentatilanteiden havainnollistamiskuva. (Junttan Oy, 2019)

Taulukko 1. Lujuuslaskennan lähtöarvoja. (Laitinen, 2020)

Sivukallistussylinterin D180/110-1400 voimat		
Hyötysuhde	Varren puoli [kN] 250 bar	Männän puoli [kN] 250 bar
1.0	398	636
0.9	358	572

Taulukko 2. Kynkkiin ja ristiniveleen kohdistuvat voimat. (Mukaillen Laitinen, 2020)

#	Kuvaus	Sivukallistussyllinterit F (o/v)	Ristinivel
01	Paalutuskoneen keili pystyssä Järkäle 12 700 kg, 7 m korkeudessa vaakapuomi 600 mm, eki = 0.0 m kanta maasta 0.3 m Staattinen	F _o = 23.9 kN F _{xo} = -3.2 kN vasemmalle F _{yo} = 17.6 kN eteen F _{zo} = 15.9 kN ylös F _v = 20.4 kN F _{xv} = 2.8 kN oikealle F _{yv} = 15.2 kN eteen F _{zv} = 13.4 kN ylös	F = 373 kN M _k = 11.5 kNm myötäp. F _x = -3.8 kN vasemmalle F _y = -156 kN taakse F _z = -339 kN alas
02	Paalutuskoneen keili kallistettuna oikealle 18.43° Järkäle 12 700 kg, 7 m korkeudessa vaakapuomi 600 mm, eki = 0.0 m kanta maasta 0.3 m Staattinen	F _o = 303 kN F _{xo} = -56.4 kN vasemmalle F _{yo} = -210 kN taakse F _{zo} = -211 kN alas F _v = 384 kN F _{xv} = 156 kN oikealle F _{yv} = 244 kN eteen F _{zv} = 252 kN ylös	F = 395 kN M _k = 110 kNm vastap. F _x = -111 kN vasemmalle F _y = -151 kN taakse F _z = -348 kN alas
03	Paalutuskoneen keili kallistettuna vasemmalle 18.43° Järkäle 12 700 kg, 7 m korkeudessa vaakapuomi 600 mm, eki = 0.0 m kanta maasta 0.3 m Staattinen'	F _o = 388 kN F _{xo} = -158 kN vasemmalle F _{yo} = 246 kN eteen F _{zo} = 254 kN ylös F _v = 306 kN F _{xv} = 57 kN oikealle F _{yv} = -212 kN taakse F _{zv} = -213 kN alas	F = 394 kN M _k = 130 kNm myötäp. F _x = 104 kN oikealle F _y = -151 kN taakse F _z = -349 kN alas

5 LUJUUSLASKENNAN SUORITTAMINEN

Tässä opinnäytetyön pääluvussa käsitellään lujuuslaskennassa käytettäviä asetuksia ja niiden vaikutuksia laskennan kestoon ja tarkkuuteen. Lisäksi käydään läpi eroja simulointimallissa laskentatilanteiden välillä ja laskelmissa käytettävien rasitusten selvittämisen prosessia.

5.1 Runkoon vaikuttavat kuormitukset

Tässä välikappaleessa käydään läpi, miten paalutuskoneen runkoa kuormittavat voimat ja momentit on selvitetty. Näihin kuormituksiin lopuksi verrataan regressioanalyysin avulla saatuja kuormitusten arvoja. Koneen rungon lujuuslaskelmissa on käytetty muita arvoja. Runkoon vaikuttavat rasitukset on selvitetty Vesa Laitisen ja Leo Pyhtisen toimesta. Tätä osiota varten saadut tiedot on saatu haastatteleamalla Vesa Laitista.

Paalutuskoneen runkoon kohdistuvia kuormituksia päästään ratkaisemaan, kun koneen malli on ladattu Adams View -ohjelmaan ja tiedetään, millaisissa tilanteissa konetta testataan venymäliuska-mittausten aikana. Testitilanteita varten tarvittavat tiedot löytyvät Junttan Oy:n laatimasta mittaus-suunnitelmasta, jossa kerrotaan muun muassa järkäleen etäisyys maasta, keilin kallistuskulmat, vaakapuomin ulkonema ja ylävaunun suunta suhteessa teloihin, ja monia muita tarvittavia tietoja. Ohjelmaan täytyy kuitenkin syöttää koneessa kiinni olevien kokoonpanojen massat ja painopisteet, tuuli-kuormat ja muut asiat, joista massat saadaan punnitsemalla. Osien painopisteet ovat itse ohjelmaan määritettyjä, joista Adams sitten laskee kokonaispainopisteen. Keilille painopiste saadaan laskettua excelillä, mutta ylävaunun painopiste saadaan punnituksesta kahdella vaa'alla. Simuloinneille

antaa lisävarmuutta myös se, että koko kone punnitaan koeajoja varten, jolloin simuloinneissa käytetyt massatiedot saadaan varmistettua oikeiksi. Jos massoissa tai muissa tiedoissa on suurempia eroja, tutkitaan mistä erot johtuvat.

Kun simulointia varten tarvittavat massatiedot ja ajoparametrit on syötetty oikein, niin tilanteen simulointi voidaan aloittaa. Tällöin ohjelma ajaa kaikki simuloitavaksi määritetyt tilanteet läpi ja muodostaa valittujen osien ja komponenttien välillä tapahtuvien muuttuvien kuormitusten pohjalta kuvaajan, josta nähdään kuormittavan voiman suuruus keilin kallistusasteen funktiona. Pystytilanteesta syntyvä graafi on kuitenkin suora vaakaviiva, sillä keili pidetään simuloinnin aikana paikallaan. Kuten aiemmin jo todettu, tässä työssä tarkastellaan paalutuskoneen rungon kolmeen eri pisteeseen vaikuttavia kuormituksia kolmessa eri tilanteessa, ja näin ollen tarkastellaan vain ristiniveleen sekä oikean- ja vasemmanpuoleiseen sivukallistussyliinteriin vaikuttavia kuormituksia.

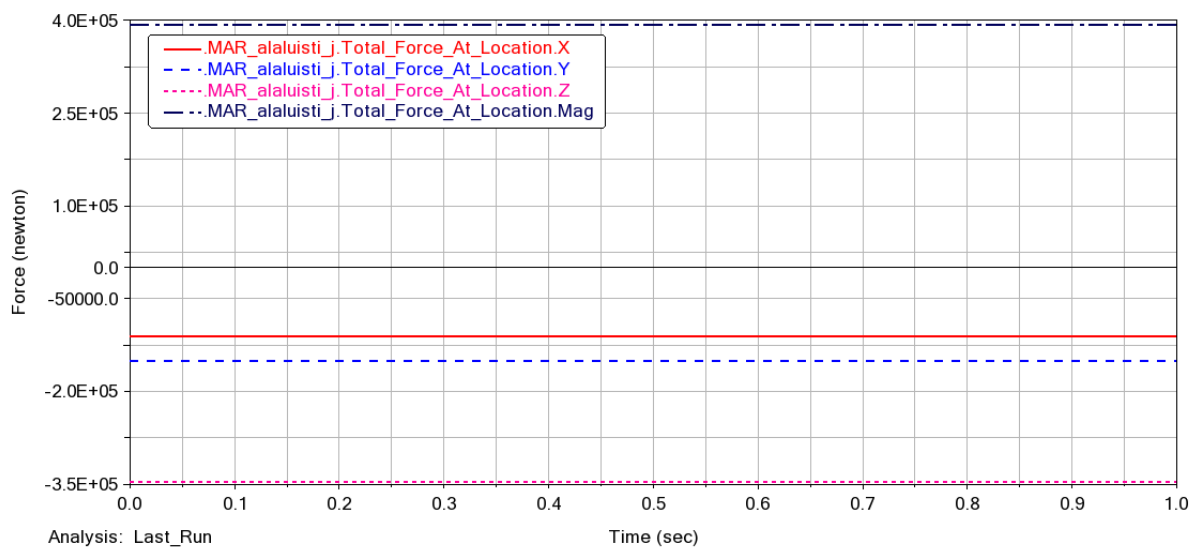
Kuvassa 7 näkyvät tiedot kuvaavat koneen rakennetta, johon saadaan syötettyä eri kokonaisuuksien (jätkäleen, keilin, alavaunun, sivusyliinterien jne.) massoja, painopisteet ja laskettua koko rakenteen massa, jota voidaan verrata jokaisen koneen punnittuun massaun, joka koeajon yhteydessä on tehty.

Massat Ajoparametrit Standardi		x	y	z
YLÄVAUNU				
Ylävaunun massa	1.93E+04	-3.75E-02	-0.7	1.7
Vastapainon massa	(5700 + 1100 + 1 * 4500 + 0 * 1900)	0.0	(-5.58 + 0 *)	1.7
Optiomassa 1	1.0E-02	-5.0E-02	-1.7	1.7
Optiomassa 2	1.0E-02	0.0	-0.8	2.5
Vaakapuomin massa	(1100 - 170)			
Ristiniveleen massa	170.0			
Jätkälevinssi massa	(1800 + 50)	-0.15	-3.36	1.6
Paaluvinssi massa	(880.0 + 50.0)	-0.15	-2.33	1.7
ALAVAUNU				
Alavaunun massa	(18000 / 3)	-3.74E-05	0.0	0.522
Oikean telan massa	(18000 / 3)			
Vasemman telan massa	(18000 / 3)			
SIVUSYLIINTERIT				
Oikean sivusyliinterin massa	(270 + 0 * 50)			
Oikean sivumännän massa	(250 + 0 * 50)			
Vasemman sivusyliinterin massa	270.0			
Vasemman sivumännän massa	250.0			
KEILI				
Keilin massa	9800.0	0.0	0.92	(16.7 - 4)
Peruskeilin massa	(2150 + 450 / 2 + 970 / 2 + 335 + 450)	0.0	0.57	2.9
Yläluistin massa	(845 + 800 / 2 + 0 * 350)	0.0	0.48	(7.2 + 0 * 0)
Alaluistin massa	(550 + 200 + 450 / 2 + 800 / 2)	0.0	0.3	3.594
Sivukairan massa	((800 + 100) * 0 + 1.0E-02)	-0.65	0.85	(21 - 4)
Optiomassa 3	1.0E-02	0.0	1.0	5.0
JÄTKÄLE				
Jätkäleen massa	(12700 * 1 + 10200 * 0)			2.7
KONEEN KOKONAISMASSA		Päivitä 8.228514E+04		
Koneen massakeskipiste	0.8736370374	0.7044148775	4.0976188288	
Tallenna massat tiedostoon				
Lataa massat tiedostosta		Lataa parametrit tiedostosta		OK Apply Cancel

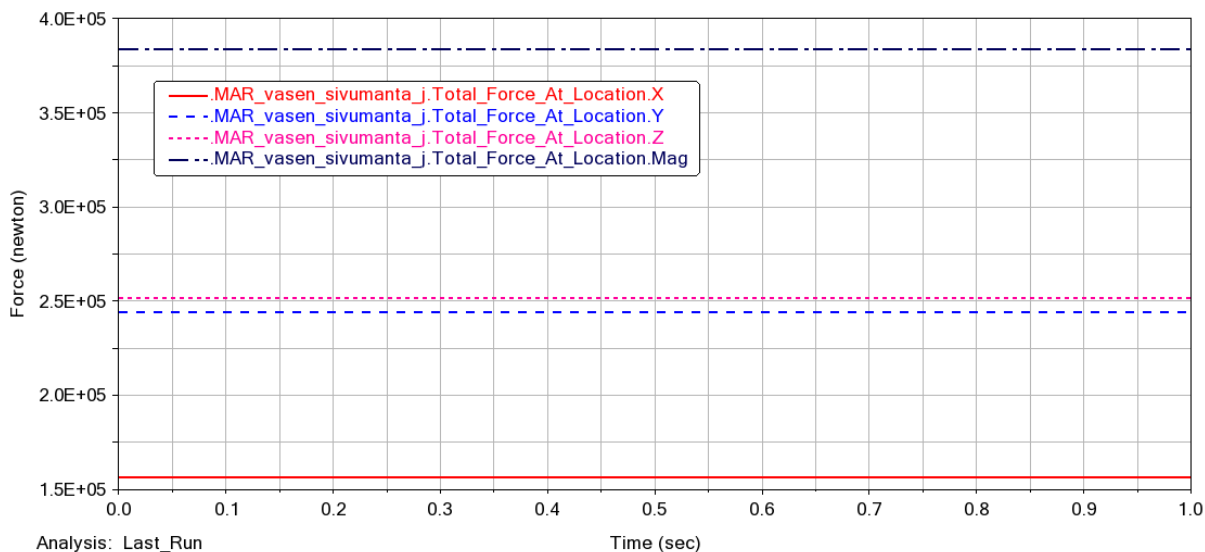
Kuva 7. Massatiedot Adams-ohjelmistossa. (Laitinen, 2021)

Simulaatioista saatavista kuormituskuvaajista (kuvat 8-10) voidaan katsoa kussakin tilanteessa vaikuttavat kuormat halutuissa pisteissä. Kuvasta 8 nähdään esimerkkinä ristiniveleen kohdistuvan kuormittavan voiman eri komponenttien suuruus newtoneina. Kuvasta 9 taas nähdään vasempaan sivukallistussyliinteriin kohdistuvat kuormitukset komponentteineen. Ristiniveleen kohdistuva mo-

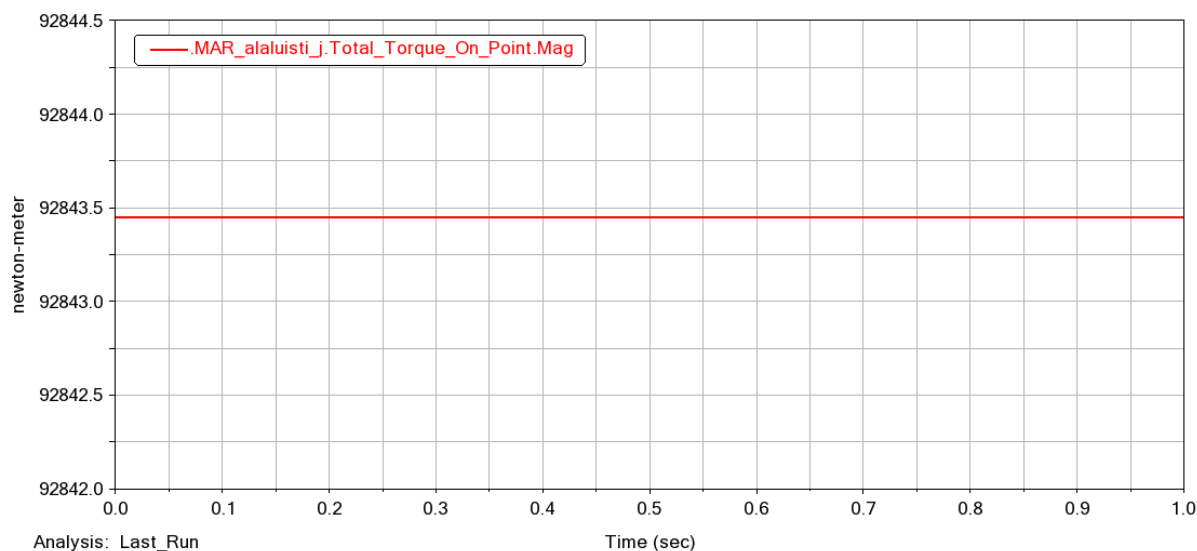
mentti taas nähdään kuvasta 10. Vastaavista kuvaajista saadaan eri koneen osiin kohdistuvia kuormituksia selvitettyä. Taulukon 2 tiedot on saatu vastaavista kuvaajista, ja niihin lopuksi verrataan regressioanalyysin avulla saatuja kuormitusten arvoja.



Kuva 8. Ristiniveleen kohdistuvat kuormitukset komponentteineen. Kuvan kuormitusten arvoja ei ole käytetty tässä työssä, vaan kuva esittää vain simuloinnista saatavien tulosten esitystavan. (Laitinen, 2021)



Kuva 9. Vasempaan sivukallistussylinteriin kohdistuvat kuormitukset komponentteineen. Kuvan kuormitusten arvoja ei ole käytetty tässä työssä, vaan kuva esittää vain simuloinnista saatavien tulosten esitystavan. (Laitinen, 2021)



Kuva 10. Ristiniveleen kohdistuva momentti newtonmetreinä. Kuvan kuormitusten arvoja ei ole käytetty tässä työssä, vaan kuva esittää vain simuloinnista saatavien tulosten esitystavan. (Laitinen, 2021)

5.2 Laskentatilanteiden valmistelu

Tässä työssä venymäliuskamittaukset on tehty kolmessa eri tilanteessa, keilin ollessa pystyssä ja kallistettuna sekä oikealle että vasemmalle $18,43^\circ$. Tällöin myös laskentatilanteita täytyy olla kolme. Näitä erottaa geometriassa vain ristiniveleen suunta, mutta kynkkiin ja ristiniveleen kohdistuvat voimat muuttuvat tilanteen mukaan. Jokaista mittaustilannetta varten tehtiin oma laskentatilanteensa, johon päivitettiin mallin geometria ristiniveleen suunnan osalta, ja runkoon vaikuttavat voimat ja momentit. Muuten tilanteissa käytettävät asetukset ovat täysin samat.

Laskentatilanteiden valmistelussa aloitettiin oletetusti helpoimmasta tilanteesta valmistella, eli tilanteesta, jossa keili on pystyssä. Tästä tilanteesta aloittaessa ei tarvitse vielä huolehtia ristiniveleen suunnasta ja voidaan testata kohtalaisen nopeasti erilaisia asetuksia, joilla lujuuslaskennat saataisiin suoritettua, ja että malli toimisi realistisella tavalla. Tässä realistisuudella tarkoitetaan sitä, että mallissa osat eivät vääntyisi toistensa läpi rasittamatta muita osia, vaan jos yksi osa vääntyisi niin paljon, että se osuu muihin osiin, niin muut osat alkaisivat rasittua mukana. Tällöin toinen osa toimisi toisen tukipisteenä rajoittaen toisen osan vääntymistä. Kun tässä tilanteessa toimivat asetukset on saatu selvitettyä, niin voidaan luottaa siihen, että ne toimivat myös seuraavissa laskentatilanteissa.

Jokaisen laskentatilanteen valmisteluihin kuuluu muun muassa geometrian, eri koordinaatistojen määrittäminen rungon tarkastelun kohteena oleviin kohtiin, automaattisten ja manuaalisesti määriteltävien kontaktien tarkastaminen ja mahdollinen lisääminen tai muokkaaminen, verkon asetusten määrittäminen, staattiseen rakenteeseen vaikuttavien rasitusten ja tukipisteiden määrittäminen sekä laskennoista kaivattavien tulosten tyyppi. Runkoon vaikuttavien rasitusten selvittämisen prosessi käytiin läpi luvussa 5.1. Seuraavaksi käydään läpi niiden sijoittaminen rungon laskentamalliin.

5.2.1 Geometria ja materiaalit

Ensimmäiseen laskentatilanteeseen laskentamalli saadaan tuotua suoraan Solidworksistä. Mallin tuonnissa välikätenä toimii Ansys Workbench, joka mahdollistaa Ansys Mechanicalin hakea laskentamalleja kaupallisista suunnitteluohjelmista suoraan. Kun ensimmäisen tilanteen laskentamalli on siinä kunnossa, että se voidaan ottaa laskentaan käyttöön, sen tuonti laskentaohjelmaan onnistuu parilla hiiren napautuksella. Mallin tuonnissa on kuitenkin huomioitava, että Solidworksissä koko mallin on oltava Resolved -tilassa, jotta kaikki siihen kuuluvat osat saadaan tuotua. Mallin tuonti Solidworksistä tapahtuu niin, että ikkunan ylä laidassa olevasta Tools -valikosta valitaan Ansys (version numero) → ANSYS Workbench.

Koska laskentatilanteita tässä työssä on kolme ja jokaisessa tilanteessa ristiniel on eri asennossa, on myös malliin tehty tilanteen vaatimat muutokset. Toisen laskentatilanteen tekemiseksi on Ansys Workbenchissä kopioitu ensimmäinen laskentatilanne asetuksineen, jonka jälkeen toinen tilanne on avattu Ansys Mechanicalissa ja geometria päivitetty sitä kautta vastaamaan Solidworksissä auki olevaa mallia. Tällä tavalla uuden tilanteen tekeminen käyttää lähtökohtaisesti ensimmäisessä tilanteessa käytössä olleita asetuksia. Toisessa tilanteessa runkoon vaikuttavat rasitukset muuttuivat, joten nämä on räätälöity uudestaan. Vastaavasti kolmas laskentatilanne on kopioitu toisesta laskentatilanteesta, geometria päivitetty ja rasitukset muutettu vastaamaan kolmatta tilannetta, kuten tehtiin toisenkin tilanteen kohdalla.

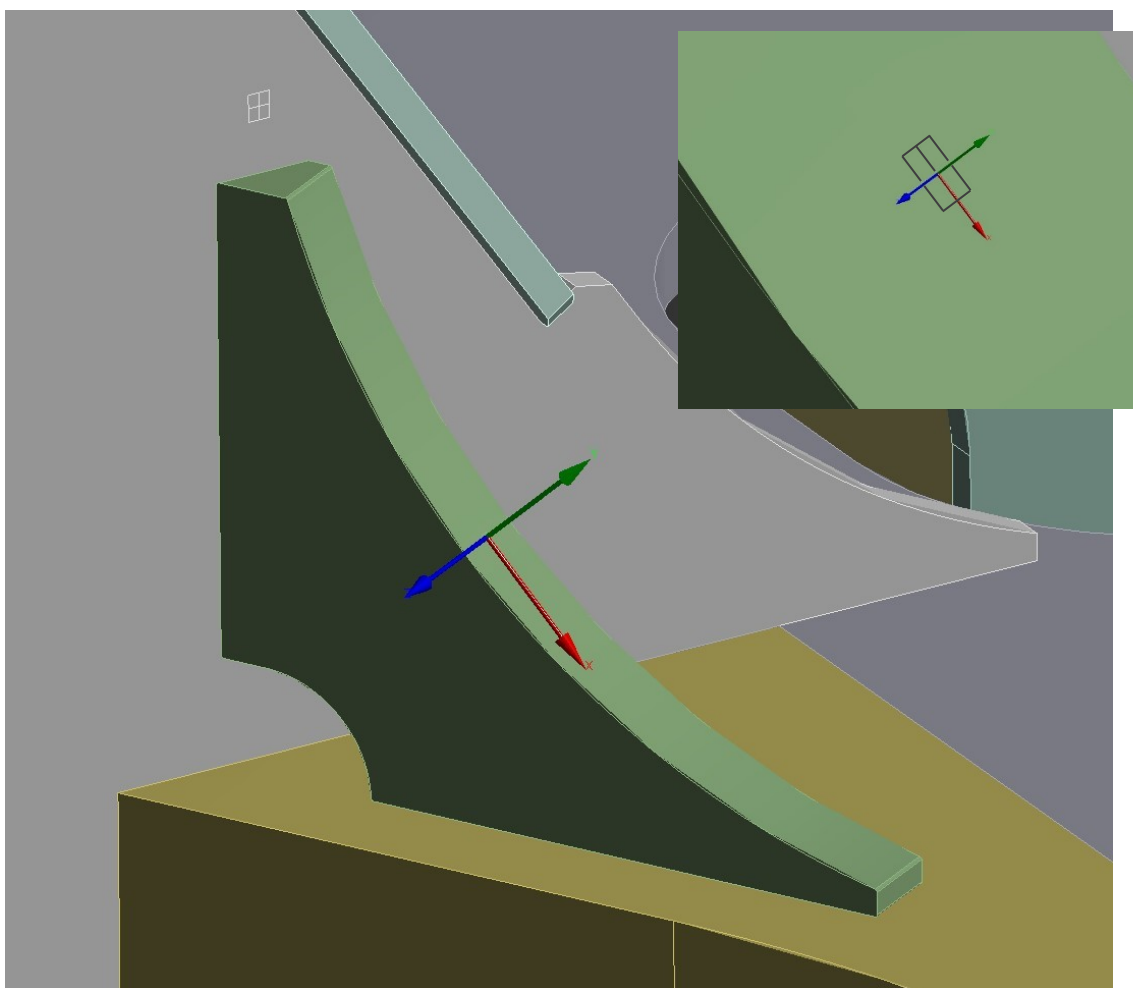
Ansys Mechanical käyttää geometriaan kuuluvien osien materiaalina rakenneterästä, jonka kimmo kerroin on 210 GPa. Materiaalin tiheys on $7,85 \cdot 10^{-6}$ kg/mm³, myötölujuus 250 MPa ja vetolujuus 460 MPa.

5.2.2 Koordinaatistot

FEM-mallissa on geometrian mukana tuoma, niin sanottu globaali koordinaattijärjestelmä, joka sijaitsee kyseisen kokoonpanon nollakohdassa, *origossa*. Malliin on kuitenkin lisätty oma paikalliskoordinaatistonsa ristinielulle ja muihin tarkastelun kohteena oleviin pisteisiin. Jokaisessa laskentatilanteessa ristinielulle tehdyn paikalliskoordinaatiston Y-akseli osoittaa suoraan ylös.

Koordinaatistojen lisäyksen yhteydessä on huomioitava, että liuskojen paikat on merkitty FEM-mallin osan pintaan niin, että pistettä ympäröi neljä ruutua, joiden risteävä kohta on tarkasteltava piste. Kun koordinaatistoja määritettiin näihin pisteisiin, koordinaatiston akseleista vähintään yhden oli oltava samansuuntainen kuin jokin pistettä ympäröivän ruudukon reuna, kuvan 11 mukaisesti. Paikallinen koordinaatisto tulee lisätä liuskojen pisteisiin, jotta laskentojen tuloksista voidaan saada selville pisteeseen kohdistuvan jännityksen suunta. Jännitysten suunta taas kertoo, että onko jännitys pisteessä vetoa vai puristusta. Pisteeseen laskettavan normaalijännityksen asetuksissa on pisteeseen muodostettu paikalliskoordinaatisto kuitenkin valittava käytettäväksi koordinaattisysteemiksi, jotta ohjelma voi kertoa pisteessä jännityksen suunnan.

Venymäliuskojen paikkoihin lisättävä koordinaatisto määritetään niin, että lisättävän koordinaatiston X-akseli on liuskan suuntainen. Kun jokaiseen liuskan pisteeseen valitaan lisättävästä paikallisesta koordinaatistosta sama akseli, niin tämä vähentää laskentoihin määritettävien voimien ja niiden suuntien määrittämisessä tapahtuvia virheitä. Tasaisella pinnalla koordinaatiston asetuksista on valittu koordinaatiston sijainniksi venymäliuskalle tehdyn ruudukon keskipiste ja käännettäväksi akseliksi X-akseli. Akselin suunta on määritetty pistetyökalun avulla ruudukon ulompia pisteitä käyttäen niin, että valitut pisteet ovat suoraan liuskan kohdalla sen ylä- ja alapuolella, liuskan suuntaisesti. Jos pinta, jolle liuska on asennettu, on kaareva tai muuten epätasainen, niin koordinaatisto sijoitetaan samalla tavalla liuskalle tehdyn ruudukon keskipisteeseen. Erona tällaisessa tilanteessa tasaiseen pintaan sijoitettuun venymäliuskaan on se, että koordinaatiston X-akseli on saatava liuskan pisteeseen sen tangentin suuntaisesti. Koordinaatiston X-akselin suuntaus onnistuu samalla tavalla kuin tasaisellakin pinnalla, kunhan venymäliuskan suunta on otettu huomioon, kun liuskan paikka on merkitty laskentamalliin Solidworksissä tai muussa mallinnusohjelmassa.



Kuva 11. Koordinaatiston määrittäminen pisteisiin. Kaarevilla pinnoilla paikalliskoordinaatisto määritetään liuskan suuntaisesti tangenttina.

5.2.3 Kontaktit

Laskentamalliin on lisätty muutamia kontakteja manuaalisesti ohjelmaan tuonnin jälkeen, koska mallissa on muutamia paikkoja, joissa osien välillä on pieni rako. Jos esimerkiksi rungton molemmilla laidoilla olevien putkipalkkien välille ei olisi lisätty kontaktia manuaalisesti, niin nämä osat olisivat taipuneet toistensa lävitse, kuten nähdään kuvassa 3. Kontakteja jouduttiin siis lisäämään vastapainoon liittyviin osiin, jotta malli toimisi oikein rasituksen alaisena ja laskennoista saataisiin tarkempia tuloksia. Vaikka työssä tarkemman tarkastelun kohteena ovat vaakapuomi ja kynkät, on kuitenkin tärkeää, että runko saadaan näiden kontaktien avulla käyttäytymään kaikissa rasitustilanteissa mahdollisimman realistisesti, koska sillä on suoraan vaikutusta venymäliuskamittausten tulosten skaalautumiseen koskemaan koko runkoa.

Solidworksistä Ansykseen tuodussa mallissa oli tässä työssä vajaat 2 000 kontaktia, jotka on tullut mallin tuonnin yhteydessä Ansykseen. Tässä työssä kuitenkin poistettiin kaikki automaattisesti mallin mukana tulleet kontaktit ja nämä korvattiin Ansyksessä tehdyllä automaattisella kontaktien määrityksellä. Kontaktien määrä väheni näin huomattavasti. Nämä kontaktit olivat kaikki bonded-liitoksia, eikä kitkallisia liitoksia käytetty tässä työssä lainkaan.

Kontakteissa myös huomioitava seikka on, että jos lujuuslaskelmista saatavia tuloksia on tarkoitus verrata venymäliuskamittauksista saatuihin tuloksiin, niin bondedeiksi tehtyjä liitoksia kannattaa välttää, varsinkin jos mitattava piste on lähellä kyseistä liitosta. Vaikka venymäliuskamittauksia ei olisi-kaan vastaavasta tilanteesta tehty, niin näitä liitoksia on siitä huolimatta hyvä välttää, kun mittauspiste on lähellä. Sellaiset paikat, joihin mittauspisteitä on tarkoitus sijoittaa ja lähellä on useampia osia liitettynä yhteen, tulisi mallintaa tarkemmin, hitsausliitoksia myöten. Jos FEM-malli olisi vain yksi osa, niin tämä poistaa mahdollisuuden käyttää laskennoissa muita kontaktityyppejä kuin bonded-liitoksia, eli esimerkiksi kitkallisia liitoksia ei voisi käyttää.

5.2.4 Verkko

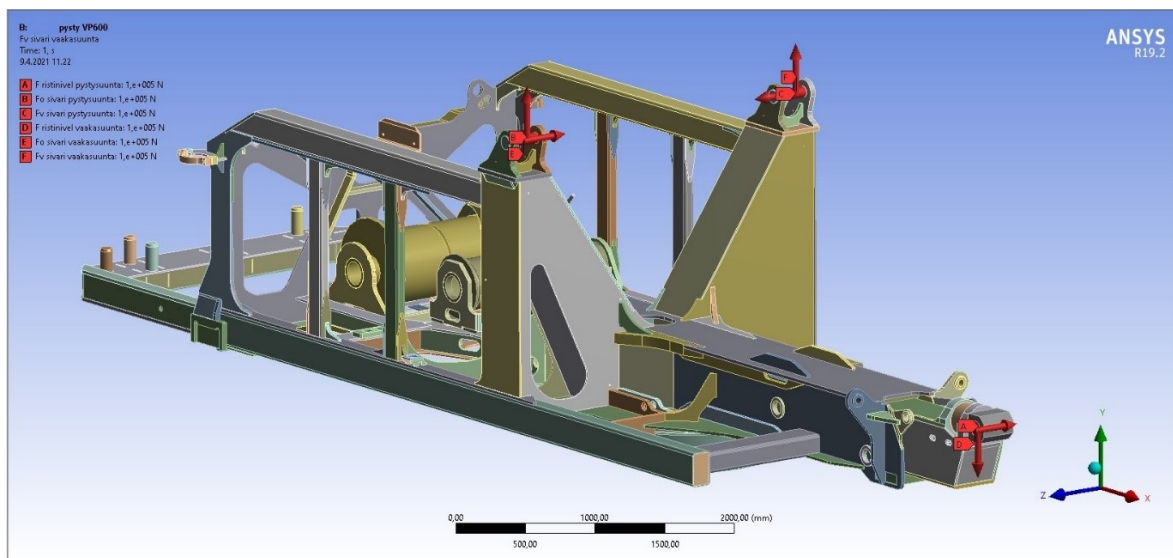
Paalutuskoneen rungton laskentamalliin on generoitu verkko niin, että suurimpaan osaan rungosta on käytetty verkon elementtikokona 10 mm. Tiheämpää verkkoa, elementtikooltaan 6 mm, on käytetty sellaisissa osissa, joihin venymäliuskat olivat kiinnitettynä, tai muuten ovat olleet näiden liuskosten lähetyvillä. Lisäksi niihin pisteisiin, joihin venymäliuskat olivat asennettu, on tehty 6 millimetrin verkkoakin tiheämpi verkko, elementtikooltaan 1 mm. Tämä verkko on kuitenkin tehty niin, että se ulottuu vain liuskoille merkityistä pisteistä säteeltään 30 mm päähän, jonka sisällä tämä 1 mm:n elementtiverkko vaikuttaa. Tämän myötä voidaan saada tarkempia tuloksia lujuuslaskennoista niiltä alueilta, kuin katsotaan tämän työn puitteissa olevan merkityksellistä.

Verkon koolla on merkittävä vaikutus siihen, kuinka kauan lujuuslaskentojen tekemiseen kuluu aikaa. Mitä tarkempia tuloksia laskennoista halutaan saada, sitä tiheämmällä verkolla ne on suoritettava. Tässä työssä on juuri siitä syystä jätetty suurin osa rungosta hieman harvemmalle verkon

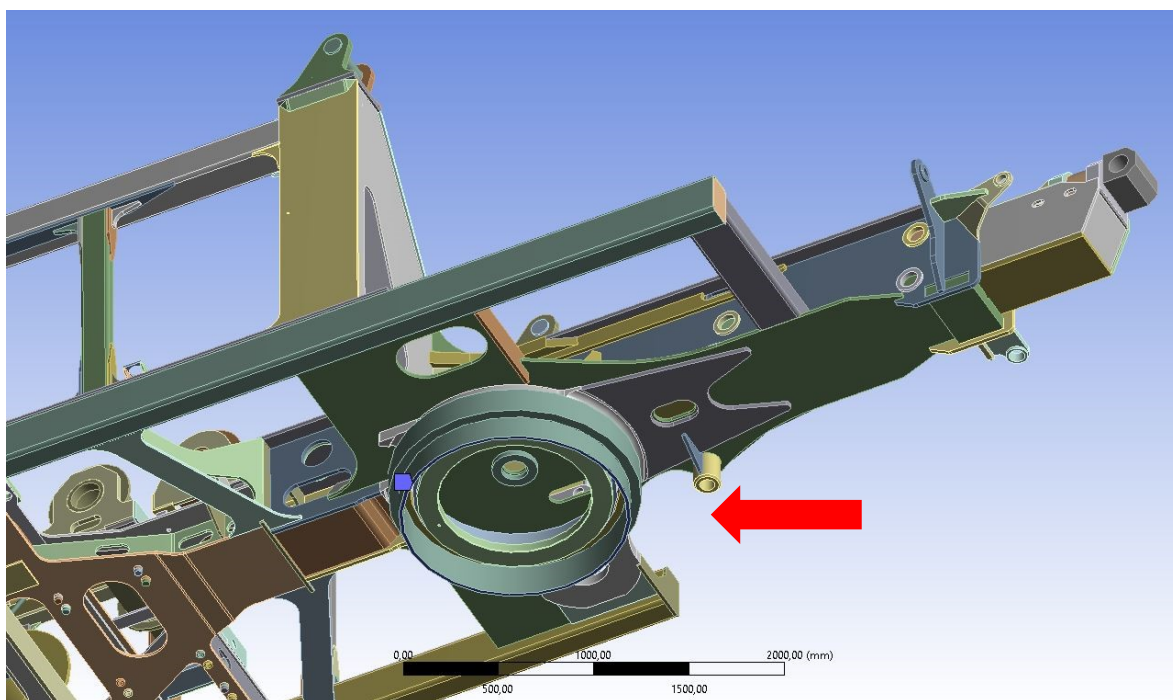
koolle, jotta saataisiin laskentoihin käytettävää aikaa supistettua ja kohdistettua huomio lähemmäs niitä alueita, joita halutaan tarkemmin tarkastella.

5.2.5 Rakenteeseen vaikuttavat rasitukset ja analyysin asetukset

Lujuuslaskennoissa rungon rakenne on tuettu yhdestä pisteestä, joka säilyy jokaisessa laskentatilanteessa samana. Tämä tukipiste on kääntökehän alapinta, joka on alin pinta käytettävässä rakenteessa ja sen keskipiste on hieman kynkkien etupuolella. Paalutuskoneen runkoon on lisätty rasituksia yhteensä kolmeen eri kohtaan (kuvat 12-13). Ristinivelen lisäksi molempiin kynkkiin on määritetty kuormittavat voimat komponentein.



Kuva 12. Paalutuskoneen runkoon vaikuttavat rasitukset.



Kuva 13. Rungon tukipiste - kääntökehän alin pinta.

Runkoon vaikuttavat voimat on jaettu jokaisessa kuormituspisteessä sekä pysty- että vaakasuuntaiseen voimaan. Vaakasuuntaiset voimat on määritetty Z-akselin myötäisesti (X-akseli jätetty pois) ja voiman suunta tällä akselilla on valittu taulukon 2 suuntien mukaan.

Ristiniveleen vaikuttavat kuormitukset on määritetty vaikuttamaan sen sisäpintaan. Kallistustilanteissa momentti on säilytetty pystytilanteen tapaan Y-akselin suuntaisena, jotta se vastaa voimien komponentteja, jotka ovat Y- ja Z-akselin suuntaisia.

Runkoon kohdistuvien kuormitusten määrä on pyritty saamaan vastaamaan venymäliuskojen yhteenlaskettua gridien määrää. Liuskojen määrä on ollut kolme, mutta mittauksissa on ollut käytössä kahden tyyppisiä liuskoja, 1 kpl yhden gridin liuskoja ja 2 kappaletta kolmen gridin liuskoja. Näin ollen runkoa kuormittavia voimia tulisi olla saman verran kuin liuskoissa on gridejä, eli 7 kappaletta. Kuormittavia voimia on kuitenkin vain 6, kun voimat on jaettu jokaisessa kuormituspisteessä pysty- ja vaakasuuntaisiin komponentteihin. Vaakasuuntaisia komponentteja oli vain yhden akselin suuntaisesti. Laskennoissa voimien arvona on käytetty 100 kN ja ristiniveleen momenttina 100 kNm.

5.2.6 Laskennoilta haettavat tulokset

Tässä työssä laskennoilta haetaan tuloksia normaalijännityksistä, joita runkoa kuormittavat voimat aiheuttavat venymäliuskoille valittuihin pisteisiin. Työssä selvitetään myös rungossa venymäliuskojen pisteisiin kohdistuvat rasitukset ilman mittausten aikana tapahtuvia kuormituksia, jolloin saadaan selville, kuinka paljon runko kohdistaa itse itsensä jännityksiä. Runkoon kohdistuu liuskojen paikkoihin jännityksiä, vaikka siihen ei vaikuttaisi keilin, vastapainon, vinssin tai muiden ulkoisten tekijöiden aiheuttamia kuormituksia. Runko on siis itsessään jännityksen alaisena ilman ulkoisia tekijöitä, ja tässä työssä pyritään selvittämään niin rungon itse itsensä kohdistamat jännitykset kuin myös ulkoisten tekijöiden aiheuttamat lisäjännitykset. Jotta rungossa itsessään olevat jännitykset saadaan selville, on selvitettävä, missä tilanteessa ennen venymäliuskamittausten aloitusta liuskojen venymien arvot on nollattu ja simuloitava vastaava tilanne Ansyskellä. Tehdystä mittaussuunnitelmasta ja siitä, että liuskojen arvot on nollattu ennen jokaista mittausta, voidaan päätellä, että liuskojen arvot olisi nollattu keilin ollessa pystyssä. Kallistustilanteiden mittaukset aloitettiin keilin ollessa pystyssä ja edettiin rauhallisesti kallistaen sekä oikealle että vasemmalle puolelle.

Työssä haetaan Ansysistä käyttäen tuloksia venymäliuskojen mittauspisteissä tapahtuvista jännityksistä. Lujuuslaskelmista on tarkoitus saada tulokset niin, että niistä voidaan erottaa veto- ja puristusjännitys toisistaan. Lisäksi selvitetään kunkin runkoon vaikuttavan kuormituksen yksittäinen vaikutus rungon niihin kohtiin, joissa venymäliuska on asennettu. Kunkin kuormituksen aiheuttamat rasitukset kussakin mittaustilanteessa taulukoidaan regressioanalyysiä varten.

5.3 Haasteet laskentojen suorittamisessa

Lujuuslaskelmien tekemisessä Ansyskellä oli pieniä haasteita sopivien asetusten löytämisen kanssa ja lisäksi tämän työn pohjana toimineessa Erikoistumisprojekti 2:ssa tehdystä rungon mallista oli jää-

nyt liuskojen ja muiden tarkasteltavien kohtien paikat merkitsemättä, niin näitä on jouduttu merkitsemään tämän työn aikana. Paikkojen merkitseminen kuitenkin johti siihen, että rungon osien väliset matet (liitokset) olivat kadottaneet pintoja, jotka olisi liitettävä yhteen. Tämä johtui siitä, että Split line -toiminnolla osan valittu pinta jakautuu useampaan osaan, eikä Solidworks tämän vuoksi tiedä, minkä osan pinnasta tulisi olla liitettynä toisen osan pintaan. Osien välisiä kontakteja on näin ollen jouduttu jonkin verran korjailemaan.

Lisäksi joidenkin osien välillä oli kolmen millimetrin väli, jonka myötä nämä osat eivät rajoita toistensa vääntymistä lujuuslaskelmissa, vaan vääntyvät toistensa läpi. Tätä varten Ansys Mechanicalista oli etsittävä asetus, jolla tämä osien vääntyminen toistensa läpi saataisiin lopetettua. Tämä saatiin lopulta korjattua, kun pintojen välille lisättiin Bonded -kontakti. Tämän itse tehdyn kontaktin myötä Ansys tekee tälle liitokselle oman kontaktiryhmänsä, jonka asetuksista vaihdettiin Tolerance Type Slider:sta Value:ksi, ja tämän alta löytyvään Tolerance Value asetettiin neljään millimetriin. Kun tolerance valueksi oli määritelty 3 mm, joka oli osien välisen raon koko, osat vääntyivät edelleen laskentojen tuloksena toistensa läpi. Tämän vuoksi arvoksi laitettiin lopulta 4 mm. Tämä arvo määrittelee käytännössä sen, miltä etäisyydeltä ohjelma voi liittää osia yhteen, eli tämä tavallaan poistaa osien välisen raon ja näin ollen toinen osa toimii tukipisteinä estäen vääntymisen. Jos osien välillä on esimerkiksi 2 mm:n rako ja asetuksen raja-arvoksi on asetettu 2 mm, niin ohjelma käsittelee näitä osia kuin ne olisivat yhdessä, ilman rakoa. Mutta koska näissä laskentatilanteissa arvo on yhden millimetrin suurempi kuin todellinen osien väli, runko on todennäköisesti tältä osin jonkin verran jäykempi. Jäykkyyden lisääntymisen ei kuitenkaan pitäisi vaikuttaa merkittävästi laskentojen tarkkuuteen, koska rungon tarkastelun kohteina olevat pisteet ovat reilun 3,5 metrin päässä tästä.

Ensimmäisten kallistustilanteiden yhteydessä laskennat epäonnistuivat useaan otteeseen, koska ristiniveleen ei ollut vielä määritetty omaa koordinaatistoaan ja ristinivel oli käännetty $18,43^\circ$ tilannetta vastaavaan suuntaan. Tässä vaiheessa ajattelin, että vika liittyisi laskentojen asetuksiin, koska siihen kohdistuvat voimat oli muiden rasitusten tapaan määritetty X-, Y- ja Z-komponentein ja tästä syystä ei tarvitsisi määritellä koordinaatistoa erikseen ristinivelelle. Viimeisimmissä laskelmissa sille kuitenkin määritettiin oma koordinaatistonsa ja se käännettiin tilanteen vaatimalla tavalla, eli oikealle kallistettuna Y-akseli olisi käännetty samaan kulmaan keilin kanssa. Samalla tavoin vasemman kallistuksen kohdalla. Koordinaatiston määrittämisen jälkeen laskennat onnistuivat niin, että ristinivel oli käännetty. Ensimmäiset laskelmat oli tehty jokaisessa tilanteessa niin, että ristinivel oli asennossa, jossa keili olisi pystyssä.

Lopullisten laskelmien saanti on viivästynyt työssä useaan otteeseen, sillä olin työn alusta lähtien käsittänyt, että laskennat suoritetaan Vesa Laitisen selvittämällä kuormituksilla samanaikaisesti, eli jokainen kuorma vaikuttaisi runkoon samaan aikaan kussakin mittaustilanteessa. Voimat oli määritetty niille kuuluviin paikkoihin X-, Y- ja Z-komponentein, mutta koska venymäliuskojen gridien määrä mittauksissa oli niin vähäinen (3) suhteessa runkoa kuormittavien voimien ja momenttien komponenttien yhteismäärään nähden, niin regressioanalyysillä saatavista tuloksista ei välttämättä saada lopulta niin tarkkoja. Runkoa kuormittavista voimista pudotettiin yksi komponentti pois, jotta

kuormitusten komponenttien määrä olisi sama kuin liuskojen gridien yhteenlaskettu määrä. Lisäksi lopulta jouduttiin jättämään myös momentti kokonaan pois.

Kun kuormittavien voimien yksittäisten komponenttien aiheuttamaa jännitystä on selvitetty venymäliuskojen pisteisiin yksitellen, on välillä käytetty niin pientä voimaa, että sillä ei ole käytännössä vaikutusta. Liian pienen voiman lisäksi runkoon oli epähuomiossa jäänyt vaikuttamaan Maan vetovoima samaan aikaan. Näiden yhdistelmä aiheutti sen, että laskentojen tuloksina mittauspisteisiin kohdistuvat jännitykset olivat poikkeuksetta samat, vain desimaaleissa oli pieniä eroja.

6 VENYMÄLIUSKAMITTAUSTEN VALMISTELU JA SUORITTAMINEN

Tässä opinnäytetyön pääkappaleessa käsitellään, miten venymäliuskoille valitut mittauspisteet on valittu, miten tarkasteltava kappale on valmisteltava anturien kiinnittämistä varten niin, että anturit pysyvät kunnolla kiinni mittauspisteissä ja samalla ovat suojassa mittaukseen vaikuttavilta eri tekijöiltä, kuten ilmankosteudelta, lämpötilavaihteluilta ja muilta mahdollisia häiriöitä aiheuttavilta tekijöiltä.

6.1 Mittausten valmistelu

Ennen kuin venymäliuska-antureita voidaan asentaa mittauspisteisiin, tulee pisteiden olla puhtaat liasta, rasvoista ja muista partikkeleista ja aineista. Pintojen puhdistaminen on erityisen tärkeää venymäliuskamittauksia ajatellen, sillä pienet partikkelit, rasvat ja muut epäpuhtaudet antureiden ympäristössä rasituksen alaisena voivat vaikuttaa mittaustuloksiin. Mittauspisteiden puhdistukseen käytettiin kemiallisesti puhtaita puhdistusaineita, joilla pyrittiin varmistamaan, että pinnasta saadaan irti kaikki mahdollinen rasva ja muut epäpuhtaudet. (Parkkinen, 2020); (HBM, 2020)

Mittauspisteiden puhdistukseen käytettiin RMS1-puhdistusainetta, joka poistaa tavallisimmat epäpuhtaudet. Kun kohta oli puhdistettu RMS1:llä hyvin, niin kohta hiottiin ja puhdistettiin toistamiseen samaa ainetta käyttäen. Tämän jälkeen kohta hiottiin hiekkapaperilla, jonka karkeus oli 180, ja käytiin alue vielä kertaalleen läpi RMS1:llä. Kolmannen puhdistuskerran jälkeen ensimmäisen venymäliuska-anturin pystyi liimaamaan paikalleen. (Parkkinen, 2020); (HBM, 2018)

Liimauksessa käytettiin HBM:n Z70-liimaa, joka on nopeasti kovettuva ja nimenomaisesti suunniteltu erityistä tarkkuutta vaativiin mittauksiin, kuten venymäliuskamittauksiin. Jos antureiden liimaukselle on ollut epäsuotuisat olosuhteet, kuten alhainen ilmankosteus tai alhainen lämpötila, niin liimauksessa on voitu käyttää BCY01-kovettumisen kiihdyttäjää, joka tulisi laittaa noin minuuttia ennen Z70-liiman käyttöä ja levittämistä suoraan liimattavalle pinnalle. Kun liima on levitetty, tulisi anturin olla peukalon paineen alaisena puoli minuuttia 30 °C:n, minuutin 20 °C:n tai 10 minuuttia 5 °C:n lämpötilassa. Antureiden liimauksessa liuskaan kohdistettiin reilun kahden minuutin ajan painetta peukalolla. (Parkkinen, 2020); (HBM, 2020)

Venymäliuskan liimauksen jälkeen mittauspiste peiteltiin SG250-silikonilla, joka suojaa liuskaa vedeltä ja antaa vähäisen mekaanisen suojan. Tämän jälkeen liuska peitettiin ABM75 -alumiinikalvolla, joka antaa lisäsuojaa vedeltä ja öljyltä. Kalvo on 0,05 mm paksu ja sen pinnalla on 3 mm paksu kerros muovailtavaa kittiä. Tämä varmistaa nopean ja helpon mittauspisteen suojauksen. ABM75 painetaan käsin mittauspisteeseen. Lopullisen suojan kosteudelta antaa SG250-silikoni, jolla ABM75:n reumat tiivistetään. (HBM, 2018); (Parkkinen, 2020)

”HBM suoritti venymäliuskoille herkkyytestin, jossa mitattiin mittausvirheen määrää. Testin kesto oli noin yksi minuutti. Hyväksyttävissä oleva herkkyyden virhe on pienempi kuin 20 µm/m, ja testissä suurin virhe jäi alle 5 µm/m. (HBM, 2018)”(Parkkinen, 2020)

6.2 Mittauksen suorittaminen

Tässä välikappaleessa käsitellään koneen kokoonpanoa ja asettelua mittausten aikana, sekä mittaus-tilanteiden kestoa ja koneen asettelun muuttumista eri tilanteiden välillä. Seuraavia välikappaleita varten on haastateltu mittauksia suorittanutta Jyri Niinistöä, HBM Finlandilta / Hottinger Brüel & Kjaer GmbH:lta sekä opinnäytetyön ohjaajina toimivia Jarkko Vainikaista ja Tatu Silvastia. Osa mainituista tiedoista on löytynyt mittaussuunnitelmasta.

6.2.1 Mittauskokoonpano

Mittaukset suoritettiin Junttan Oy:n takapihalla koeajopaikalla niin, että kone oli koeajolaatalla sidottuna. Käytetyn koneen kokoonpanossa keilin pituus oli 13,8 + 4,2 + 4,8 + 3 metriä, eli yhteensä 25,8 metriä. Tämän lisäksi keilin päässä oli latvakukko. Koneessa oli kiinni alasetovarustus, mutta alaseto ei kuitenkaan ollut käytössä. Koneessa oli tällöin kiinni SHK5/7 -jätkäle, jonka toimituspaino on noin 12 700 kg. Köydet kulkivat peruskeilissä olevan köysipyörästä kautta. Jätkäle ajettiin mittausten ajaksi 7 metrin korkeuteen sivukallistussylinterien paineita tarkkaillen. Etäisyys maasta on mitattu jätkäleen paalupesästä. Sallittu maksimipaine oli 320 baria. (Junttan Oy, 2019)

Ensimmäisessä mittaustilanteessa, eli keilin ollessa pystyssä, ylävaunu oli poikittain työleveydessä oleviin teloihin nähden, jolloin kone on tukevampi, kuin jos ylävaunu olisi pidetty samansuuntaisena telojen kanssa, vaakapuomin ollessa ulkona 600 mm. Vastapaino pidettiin niin ulkona, kuin mahdollista.

Toisessa ja kolmannessa mittaustilanteessa, eli oikean- ja vasemmanpuoleisen kallistuksen kohdalla ensimmäisessä tilanteessa mainitut jätkäleen etäisyys maasta, koneen ylävaunun kulma telien suhteen, ja muut tiedot pitävät muuten paikkaansa, mutta mittausten alkaessa keiliä aletaan kallistamaan kunkin mittaustilanteen mukaiseen suuntaan, 18,43 asteen verran. Koneen asettelua havainnollistaa hyvin kuva 6. Etukallistuksen isku oli kallistustilanteissa minimissä.

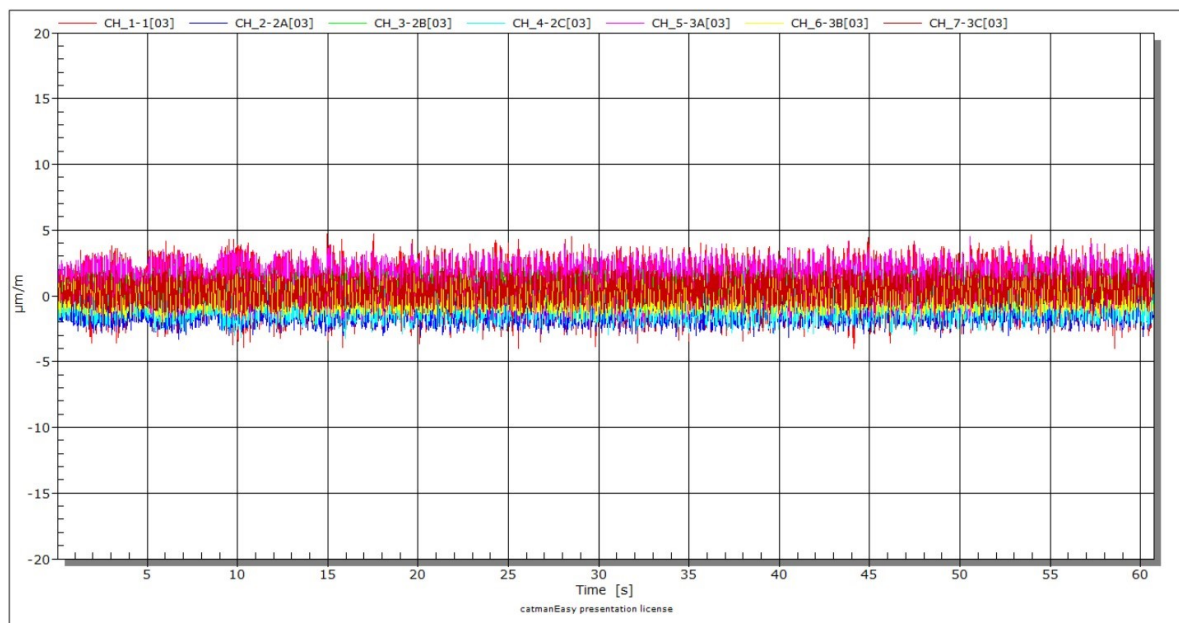
6.2.2 Mittausten tiedot ja mittausten suoritus

Tässä välikappaleessa käsitellään muun muassa mittausten kestoa, lämpötilakompensaation tarvetta, venymäliuskojen kalibroinnin tarvetta ja venymäliuskojen mittaamien venymien arvojen nollasta.

Mittauksiin käytetty aika vaihteli tilanteen mukaan niin, että pystytilanteen kesto oli noin yksi minuutti, oikean ja vasemman kallistuksen noin viisi minuuttia. Mittauksissa käytetyt liuskat olivat valmistusprosessin yhteydessä lämpötilakompensoitu vastaamaan terästä, mutta käytännössä tämä on vain suuntaa antava kompensaatio. Mittauksissa oli alun perin huomioitu, että lämpötilakompensaatiota ei tarvitse muutoin tehdä mittausten lyhyen keston vuoksi. Materiaalin lämpötila ei ehdi juuri muuttua mittausten aikana. Yksittäisellä liuskalla ei myöskään ole mahdollista saada hyvää lämpötilakompensaatiota, vaan se vaatisi vähintään toisen liuskan. (Junttan Oy, 2019); (Niinistö, 2021)

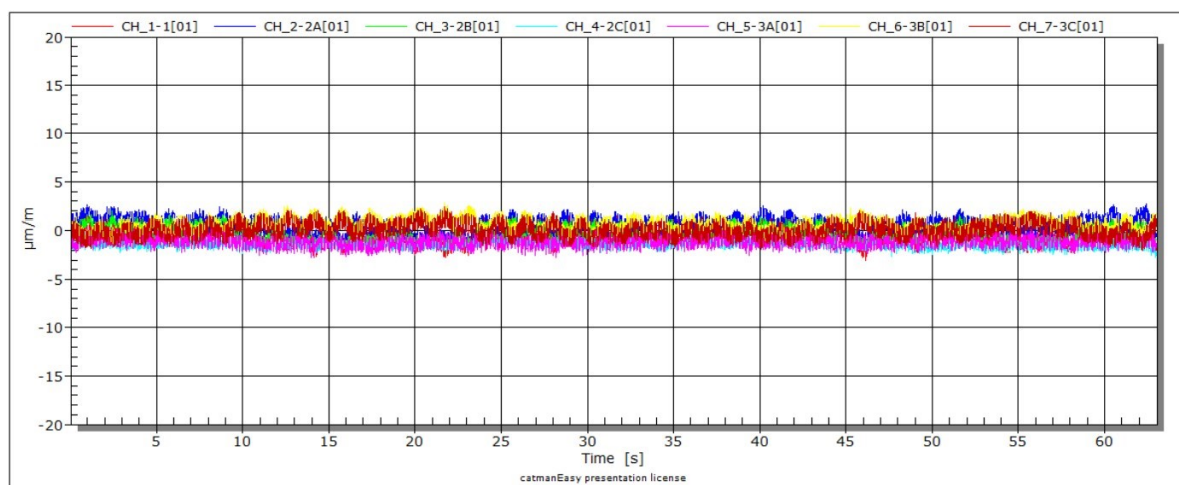
Kussakin mittaustilanteessa kyseessä oli staattinen tilanne siltä osin, että kone pysyi mittausten aikana paikallaan. Ainoastaan kallistustilanteissa keiliä kallistettiin mittausten aikana rauhallisesti kunkin tilanteen mukaiseen suuntaan. Saavutettuaan $18,43^\circ$:n kulman, keili pysäytettiin kyseiseen asentoon noin 30 sekunnin ajaksi, jonka jälkeen keiliä alettiin kallistamaan takaisin pystyyn ja mittaus lopetettiin. Jokaisen mittauksen aikana on myös nauhoitettu sivukallistussyilintereiden paineita, jotta niissä tapahtuvien painemuutosten myötä voidaan tarkastella, miten runkoon kohdistuvat kuormitukset muuttuvat paineiden vaihteluiden seurauksena. (Junttan Oy, 2019)

Venymäliuska-antureiden asennuksen yhteydessä, vielä koneen ollessa tuotannossa, liuskoille tehtiin nollapisteen virhetesti (*engl. zero drift test*), jolla tarkoitetaan olosuhteiden muutoksesta tapahtuvaa anturin ulostulon poikkeamaa nollasta, kun mitattava suure on nolla. Testin avulla todennettiin, että mikään ei aiheuta mittauksiin merkittäviä poikkeuksia. Testin tulokset nähtävillä kuvassa 14. Mittauspäivänä tämä testi toistettiin ja tulokset vastasivat ensimmäisen testin tuloksia, nollapisteen virhe jäi molemmilla kerroilla alle $5 \mu\text{m}/\text{m}$, eli reilusti alle hyväksyttävänä rajana pidetyn $20 \mu\text{m}/\text{m}$. Mittauksissa ei siis ollut odotettavissa häiriöitä, jotka vaikuttaisivat mittausten onnistumiseen ja tarkkuuteen merkittävässä määrin. (HBM, 2018); (Ketola, 2015, s. 25)



Kuva 14. Nollapisteen virhetesti liuskojen asennuspäivältä. (HBM, 2018)

Kuvassa 15 mittauspäivänä tehty nollapisteen virhetesti.



Kuva 15. Nollapisteen virhetesti mittauspäivältä. (HBM, 2018)

Liuskosten mitaamat venymien arvot nollattiin liuskosten asennuksen yhteydessä ja vielä mittauspäivänä ennen jokaista mittausta Junttan Oy:n mittaussuunnitelman mukaisesti. Kun liuskosten asennuspäivänä nollatut venymien arvot vähennetään mittauspäivänä tehdyn ensimmäisen nollauksen arvoista, saadaan selville venymissä tapahtuneet erot mittauspäivän venymiin. (HBM, 2018); (Niinistö, 2021)

6.3 Mittausdatan jälkikäsittely

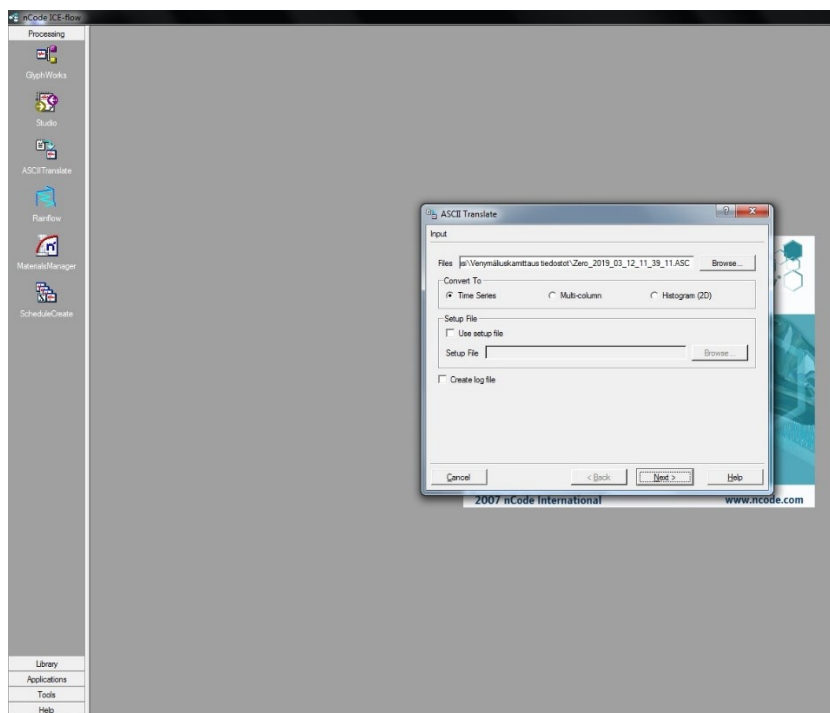
Venymäliuskamittausten myötä kolmelta venymäliuskalta on saatu raakadataa kahdeksalta eri kanavalta, mutta näiden kanavien data ei ole vielä siltään käyttökelpoista, että runkoon kohdistuvia rasi-

tuksia voisi suoraan alkaa vertailemaan lujuuslaskennoista saatuihin tuloksiin. Kunkin mittaustilanteen osalta näiden kahdeksan kanavan kohdalla tarvitaan hieman jälkikäsitelyä. Huomioitavaa kuitenkin on, että ensimmäiseltä kanavalta saatu data kertoo vain ja ainoastaan mittauksen keston sekunteina. Loput seitsemän kanavaa kertoo raakadatan kuormitusten sijaan mittauspisteissä sijainneen liuskan gridien kohdalta rakenteessa tapahtuvan venymän. Kanavien lukumäärä johtuu siitä, että käytössä oli kahdenlaista venymäliuskaa: yhdessä liuskassa oli vain yksi gridi, ja kahdessa muussa, samanlaisissa rosette-liuskoissa, gridejä oli kolme, jotka mittasivat venymää kolmeen eri suuntaan: 0° (liuskan suuntaisesti), 45° ja 90° kulmassa. Jokainen näistä grideistä muodostaa oman kanavansa, jolta raakadataa saadaan.

Koska kanavilta saatu raakadata on eri formaatissa kuin Ansyksen lujuuslaskennoista saadut tulokset, on dataa jälkikäsiteltävä nCode ICE-Flow -ohjelmistolla. Raakadata muiden kuin ensimmäisen kanavan osalta on venymän muodossa, jonka yksikkö on $\mu m/m$. Tästä syystä loppujen seitsemän kanavan osalta yksikkö on täytynyt muuttua jännityksiksi (*MPa*). ICE-Flow -ohjelmalla voidaan käsitellä useamman kanavan dataa samanaikaisesti, joka tekee muunnoksesta nopean prosessin.

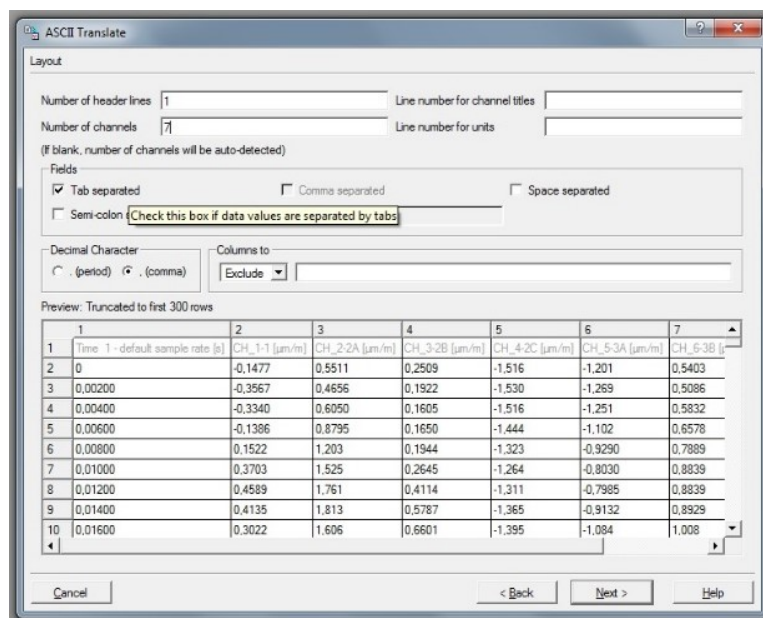
HBM Finlandin suorittamien venymäliuskamittausten data on saatu tätä työtä varten useammassa eri formaatissa. Formaateja (tiedostomuotoja) olivat muun muassa .ASC, .BIN, .TST, .TSX ja .XLSX. Mitään näissä formateissa olevia tiedostoja ei päästä käsittelemään suoraan nCode ICE-Flow -ohjelmistolla, vaan jokin näistä tiedostoista täytyy kääntää sellaiseen tiedostomuotoon, jonka ohjelma kykenee lukemaan. Excel-tiedostoa on mahdollista käyttää venymien muuttamisessa jännityksiksi, mutta kätevämmän muunto onnistuu ICE-Flow:lla. Tätä työtä tehdessä käytössä oli kuitenkin vanha versio ohjelmistosta, joten uudemmissa versioissa saattaa olla laajempi tuki eri tiedostomuodoille ja niiden myötä tulokset voivat olla luettavissa. Uudemmallakin versiolla tulokset täytyy muuttaa venymistä jännityksiksi.

Datan muuttamiseksi ohjelmalle luettavaan muotoon käytetään ohjelmasta löytyvää prosessointityökalua ASCIITranslate (kuva 16), jolla toimitettu .ASC-muotoinen datatiedosto voidaan muuttaa .DAC-tiedostomuotoon. Jokaisen mittaustilanteen .ASC-tiedostot täytyy muuttaa yksitellen *Time Seriesiksi*.



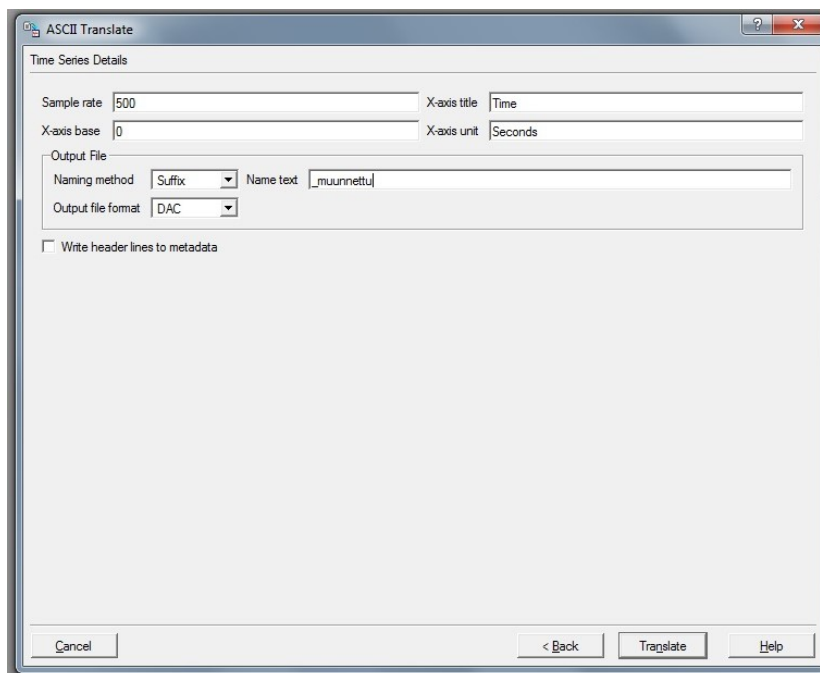
Kuva 16. ASCIITranslate-prossointityökalu, jolla .ASC-tiedostomuodossa oleva data voidaan muuttaa ohjelmalle luettavaan muotoon.

Seuraavassa vaiheessa (kuva 17) ohjelmalle kerrotaan, kuinka monta otsikkoriviä ja kanavia on käytössä. Tässä työssä otsikkorivejä on yksi ja kanavia 8. Valitaan esikatseluikkunassa näkyvien alueiden arvoissa desimaalien erotteluun pilkku ja valitaan sarakkeiden erotteluun *Tab separated*.



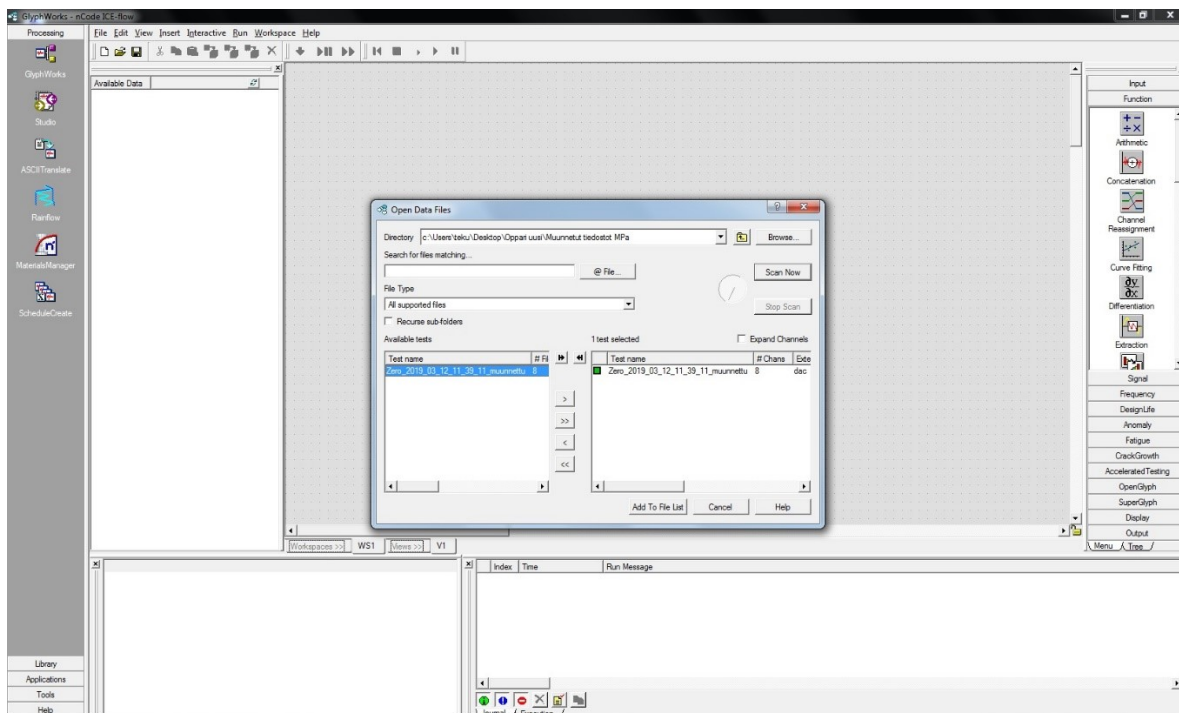
Kuva 17. ASCIITranslaten seuraava sivu, jolla valitaan otsikkorivien ja kanavien lukumäärä.

Mittauksissa käytetty näytetaajuus oli 500 Hz, jolloin mittauksista saadaan sekunnin aikana 500 veynän arvoa kultakin liuskan gridiltä, eli kaikkiaan $500 \times 7 = 3\,500$ arvoa/sekunti. X-akselin arvot lähtevät nolasta sekunnista, joten valitaan X-axis base:ksi 0. Muunnetun tiedoston nimeä voidaan muokata etu- tai takaliittein, jotta muunnetut tiedostot erottuvat muuntamattomista, ja tiedostomuodoksi valitaan .DAC (kuva 18).



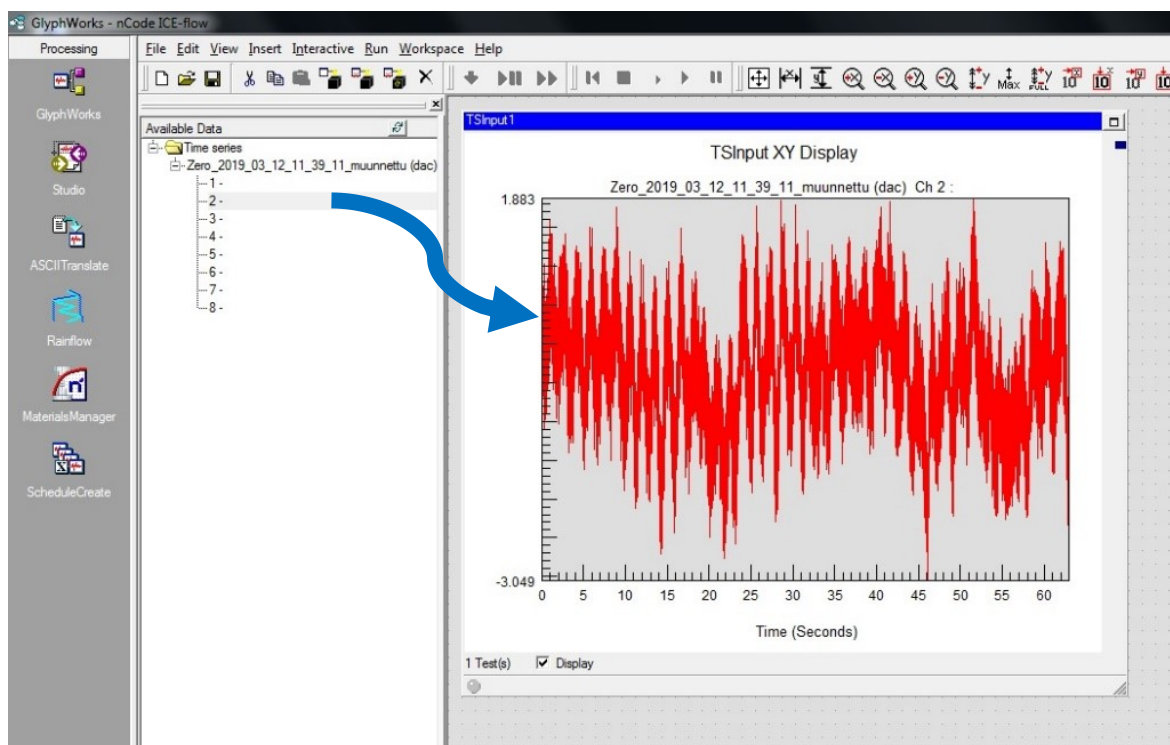
Kuva 18. ASCIITranslaten ikkuna, jossa ohjelmalle kerrotaan näytetaajuus ja X-akselin lähtöarvo.

Tarvittavien tietojen antamisen jälkeen ohjelma kääntää aiemmin valitun tiedoston sille luettavaan muotoon, ja kun tämä on tehty, niin data saadaan myös visuaalisesti tarkasteltavaksi GlyphWorks:ssä ja venymät voidaan muuttaa jännityyksiksi. ICE-Flow:n vasemmasta reunasta valitaan GlyphWorks, jonne tuodaan muunnellut .DAC-tiedostot (kuva 19).



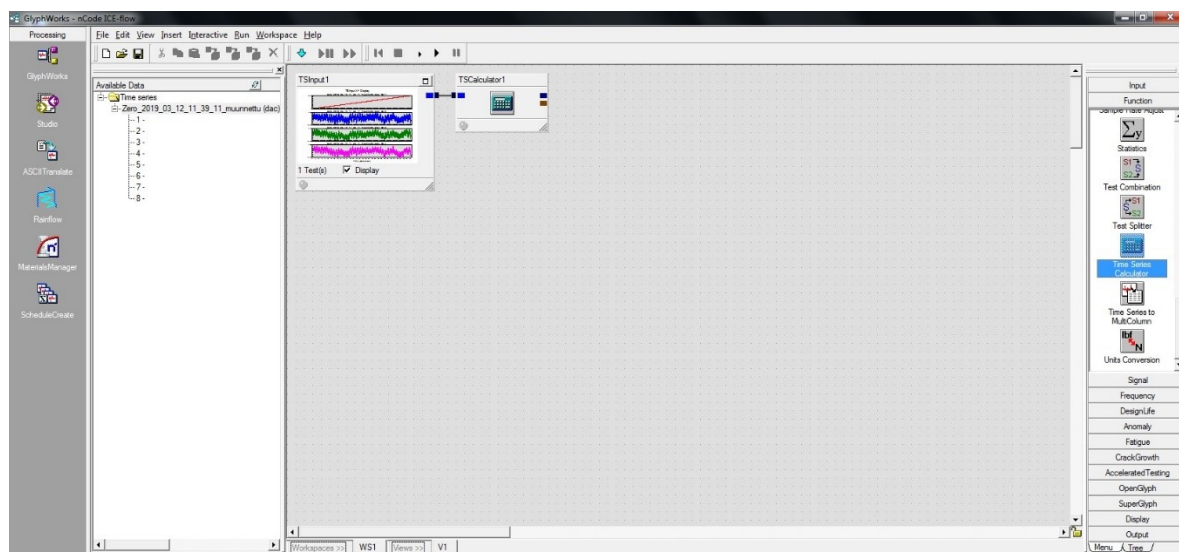
Kuva 19. Muunnellun datatiedoston tuonti GlyphWorks-ohjelmaan.

Näiden tiedostojen sisältämä data listautuu ohjelman vasemmassa reunassa olevaan *Available Data* -tilaan (kuva 20), josta oikealla puolella olevalle työtasolle voidaan vetää koko tiedoston sisältämä data kerralla, tai vain osia siitä.



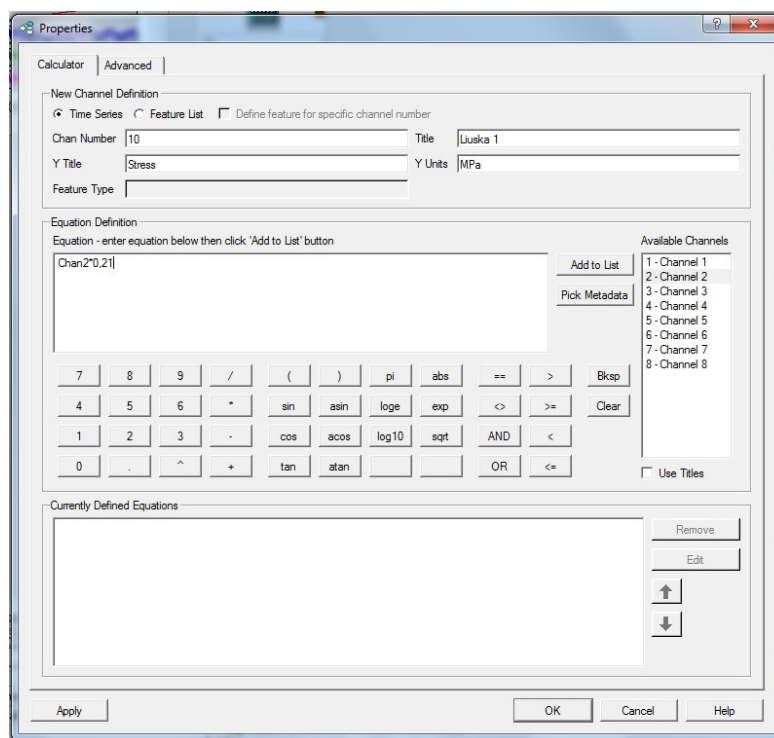
Kuva 20. Mittausdata puunäkymänä ja yhden kanavan data vietyinä työtasolle.

Tässä työssä mittauksista saatu data tuotiin kokonaisuudessaan työtasolle, eli kaikilta kanavilta saatu data kerralla, yhdestä mittaustilanteesta kerrallaan. Kuvassa 21 nähdään esimerkiksi kaikki data, joka on saatu tilanteesta, jossa keili on ollut pystyssä. Lisäksi siihen on liitetty ohjelman oikeasta reunasta löytyvästä Function-valikosta *Time Series Calculator*, jota käytetään mittausdatan yksikkömuunnosten tekemisessä.



Kuva 21. Yhden mittaustilanteen data tuotuna työtasolle. Dataikkunaan on liitetty Time Series Calculator, jolla yksikkömuunnokset saadaan tehtyä kaikkiin kanaviin kerralla.

Time Series Calculatorin asetuksissa (kuva 22) käydään jokaisen kanavan osalta läpi uuden kanavan numero ja otsikko, sekä Y-akselin otsikko ja tämän yksikkö.



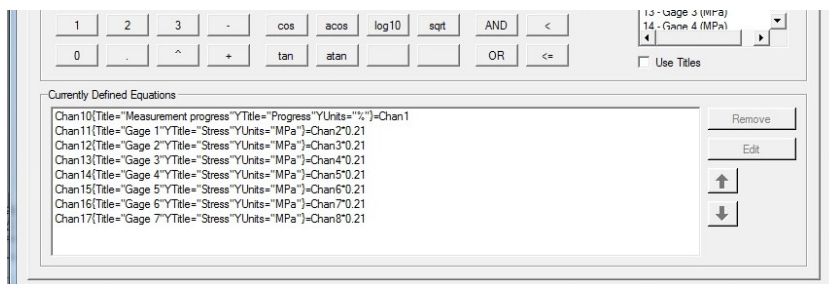
Kuva 22. Time Series Calculatorin asetukset.

Tässä kanavan 2 datalle annetaan uudeksi kanavan numeroksi 11, otsikoksi Liuska 1, Y-akselin otsikoksi Stress ja akselin yksiköksi MPa. *Equation Definition* -alueelle kirjoitetaan kanavakohtaisesti jokaisen kanavan yksikkömuunnokset niin, että *Available Channels* -kohdasta valitaan kerrallaan yksi kanava, jonka jälkeen *Equation Definition* -kohtaan kirjoitetaan yksikkömuunnoksen tekävä kaava 2, esimerkkinä kanava 2, joka on ensimmäinen venymiä mittaava kanava:

$$\text{Chan11}\{\text{Title}=\text{"Gage 1"}\text{YTitle}=\text{"Stress"}\text{YUnits}=\text{"MPa"}\}=\text{Chan2}*0.21 \quad (2)$$

Kaavassa *Chan11* viittaa itse annettuun kanavan numeroon,
Title on itse annettu kanavan otsikko,
YTitle on itse annettu Y-akselin otsikko,
YUnits on itse annettu yksikkö Y-akselille.

Loppuosa kaavasta on kanavalta saatujen arvojen kertominen materiaalin kimmokertoimella, joka yksikkömuunnoksessa on 210 GPa, mutta koska tulokset halutaan megapascalina, kerrotaan kanavan arvot 0,21:llä. Ensimmäinen kanava käydään myös läpi, vaikka se sisältää vain mittauksen kes- ton eikä venymää, koska muuten tämän kanavan data ei kulje Time Series Calculatorin läpi eteen- päin. Tämän kanavan arvoa ei kuitenkaan kerrota millään luvulla, vaan se lisätään siltään *Currently Defined Equations* -listaan (kuva 23).



Kuva 23. Kanavien yksikkömuunnoksista koostuva lista, josta saadaan graafiset tulokset jännityksinä ajan funktiona.

Seuraavaksi TSCalculatoriin on yhdistetty oikeanpuoleisen valikon Display-valikon alta XY Display ja Output-valikon alta Time Series Output, kuten kuvassa 5. XY Display näyttää venymien muunnetyt arvot jännityksinä ajan funktiona ja TSOuput ajaa jokaisen kanavan datan omaan .DAC-tiedostoonsa, kun prosessi suoritetaan.

7 VENYMÄLIUSKAMITTAUKSEN SKAALAUUS KOKO RUNKOON

Tässä luvussa käsitellään mahdollisuutta skaalata venymäliuskamittauksesta saadut arvot kattamaan koko paalutuskoneen rungon. Tarkoituksena on siis selvittää, voisiko venymäliuskamittauksesta näistä kolmesta mittauspisteestä saatujen arvojen avulla selvittää mistä tahansa rungon pisteestä rasitukset niin, että tästä pisteestä saisi venymäliuskan antaman arvon, jos kyseisessä kohdassa liuska olisi. Mahdollisuutta skaalata tuloksia koskemaan koko runkoa pohditaan regressioanalyysin kautta.

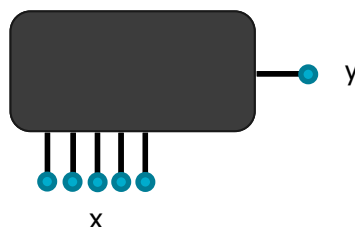
7.1 Tulosten vertailutapa

Tulosten vertailussa tullaan käyttämään regressioanalyysiä, jota yleensä käytetään, kun kuormitusjärjestelmä ja rakenne ovat monimutkaisia. Regressioanalyysi perustuu parametrien arviointiin, jotka ovat prosessille ominaisia. Käytettävän laskentamallin tulisi olla rakennettu rungon rakennetietoihin perustuen, koska pääajatuksena on, että rakenne toimisi samalla tavoin, kuin datan keräämisen aikana. Tämän metodin avulla arvioidaan runkoon kohdistuvia kuormituksia, lujuuslaskelmien kautta venymäliuskojen mittauspisteeseen kohdistuvia jännityksiä apuna käyttäen. Näitä arvoja tarvitaan jäykkyydsmatriisin selvittämiseksi. Regressioanalyysi on tiedettä, joka perustuu pitkälti tilastomatematiikkaan ja soveltuu useiden virhearviointien tekemiseen. Tässä työssä sitä kuitenkin sovelletaan tulosten tuottamiseen. Menetelmä perustuu pienimmän neliösumman menetelmään, jota käytetään, kun rakenne ja kuormitusjärjestelmä on monimutkaisia. (Westerholm, 2000, s. 37)

7.2 Regressioanalyysi

7.2.1 Tilastomalli

Regressioanalyysiä varten täytyy kuitenkin määritellä niin sanottu musta laatikko -tilastomalli (kuva 24), joka arvioi lähtöarvoja y , kun tuloarvot x ovat tiedossa.



Kuva 24. Black Box -tilastollinen prosessi.

Tilastomalli mustalle laatikolle

$$y = X\beta \quad (3)$$

jossa y on havaittu arvo
 X on tunnettu kerrointaulukko
 β on tuntematon parametrivektori.

Pienimmän neliösumman menetelmällä tarkoitetaan tuntemattoman parametrivektorin β määrittämistä niin, että mallin ehdottaman y -vektorin ja havaitun y -vektorin välinen etäisyys toisistaan on mahdollisimman pieni. (Westerholm, 2000, ss. 37-38)

Pienin neliöarvio $\hat{\beta}$ tuntemattomalle parametrivektorille β on

$$\hat{\beta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (4)$$

Jos matriisi $X^T X$ ei käänny, täytyy käyttää niin sanottua yleistettyä käänteistä G :tä. G on yleistetty käänteinen X , jos $XGX = X$. Tässä tapauksessa ratkaisun yhtälö (3) on muotoa

$$\beta = Gy \quad (5)$$

Yhtä tietyllä tapaa määritettyä yleistettyä käänteistä kutsutaan niin Moore-Penrosen käänteiseksi kuin myös pseudokäänteiseksi. Matlab-ohjelmassa tämä voidaan suorittaa komennolla *pinv*. (Westerholm, 2000, ss. 37-38)

7.2.2 Regressioanalyysimenetelmä kuormitusten tunnistuksessa

Koska paalutuskoneen runko ja siihen vaikuttavat kuormitukset ovat niin monimutkaisia, tarvitaan työssä regressioanalyysiä kuormien arviointiin. Lähtökohtaisesti venymäliuskamittauksissa liuskojen sijoitukset olisi tullut suunnitella niin, että siinä olisi huomioitu regressioanalyysin tarpeet, joita ovat muun muassa:

- Tärkein asia on, että kaikki merkittävät kuormat on otettu huomioon, eikä muilla voimilla ole vaikutusta venymäliuskoihin, tai ainakin liuskojen tulisi reagoida siihen huonosti.
- Ideaalitulanteessa yksi liuska reagoisi vain yhteen kuormittavaan voimaan, mutta tämä on useimmiten käytännössä mahdotonta järjestää.
- Kun venymäliuskojen paikkoja mietitään, tulisi huomioida, että eri kuormitukset voivat saada erilaisen vaikutuksen aikaan eri paikoissa. Tämä tarkoittaisi siis sitä, että liuskojen tulisi olla eri etäisyyksillä kuormittavista voimista ja momenteista, varsinkin silloin, kun voima ja momentti vaikuttaa samaan aikaan.
- Suuria jännitysvaihteluita ei saisi olla venymäliuskan paikan lähetyvillä, koska jos jännityskenttä muuttuu rajusti liuskan lähellä, voivat liuskat antaa vääriä tuloksia sen sijoituksen vuoksi.
- Liuskat olisi hyvä sijoittaa kauas vaikuttavista voimista, koska tämä vähentää mittausvirhettä, joka aiheutuu mallinnetuista voimista. Oikeat kuormitukset käyttäytyvät eri tavoin kuin malleissa. (Westerholm, 2000, ss. 44-46)

Regressioanalyysin avulla kuormitusten määrittäminen

Tässä tapauksessa regressioanalyysissä tilastollisen prosessin tuntematon parametrivektori on tuntemattomien kuormitusten vektori ja havainnoidut satunnaisvektorit ovat venymäliuskojen arvoja. FEM-analyysia käyttäen rungolle on tehty mielivaltainen kuormitustilanne, jossa kuormittavana voimana on ollut 100 kN, ja momenttina 100 kNm. FEM-analyysista (lujuuslaskennasta) saatavien jännitysten arvoja kustakin mittauspisteestä käytetään "venymäliuskojen arvojen" lukemiseksi. (Westerholm, 2000, ss. 38, 46)

Kun koneen rungosta on tehty kutakin venymäliuskamittauksen tilannetta vastaavat lujuuslaskelmat niin, että yhden kuormituksen aiheuttamat jännitykset venymäliuskojen mittauspisteisiin on laskettu kerrallaan, tehdään näistä tilanteista omat taulukkonsa, jossa jokaisen liuskan pisteen jännityksen arvot on kirjattu kuormittavan voiman alle. Kuormittavista voimista saadaan muodostettua kuormitusmatriisi L ,

$$L = \begin{bmatrix} L_{1,1} & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & L_{i,j} \end{bmatrix},$$

jossa $L_{i,j}$ on kuormituksen komponentti i kuormitustapauksessa j .

Jännitysmatriisi \mathbf{s} saadaan tehtyä FEM-mallista saaduilla jännityksen arvoilla käyttämällä kuormitusmatriisia \mathbf{L} .

$$\mathbf{s} = \begin{bmatrix} \sigma_{1,1} & \cdots & \sigma_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sigma_{i,1} & \cdots & \sigma_{i,j} \end{bmatrix},$$

jossa $\sigma_{i,j}$ on jännitys liuskassa i kuormitustapauksen j vaikuttaessa.

Kun edellä mainitusta L -matriisista otetaan käänteismatriisi L^{-1} ja kerrotaan se matriisilla \mathbf{s} , saadaan muodostettua kerroinmatriisi \mathbf{K} .

$$\mathbf{K} = \mathbf{sL}^{-1} \quad (6)$$

Venymäliuskamittauksista saadaan koneelta mitattua dataa eri tilanteista, ja näistä tilanteista tiedetään kuormituksen suunta α ja etäisyys r . Nämä venymäliuskojen arvot määritetään matriisissa \mathbf{S} .

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{1,1} & \cdots & S_{1,l} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{k,1} & \cdots & S_{k,l} \end{bmatrix},$$

jossa $S_{k,l}$ on jännityksen arvo liuskassa k mittaustilanteessa l .

Kuormitusten tunnistamiseksi ratkaistaan seuraavasta yhtälöstä \mathbf{F} , joka on tulosmatriisi, joka pyritään ratkaisemaan.

$$\mathbf{S} = \mathbf{KF} \quad (7)$$

Muodostetaan kerroinmatriisista \mathbf{K} käänteismatriisi \mathbf{H} ja käytetään sitä tulosmatriisin \mathbf{F} ratkaisemiseksi.

$$\mathbf{F} = \mathbf{HS} \quad (8)$$

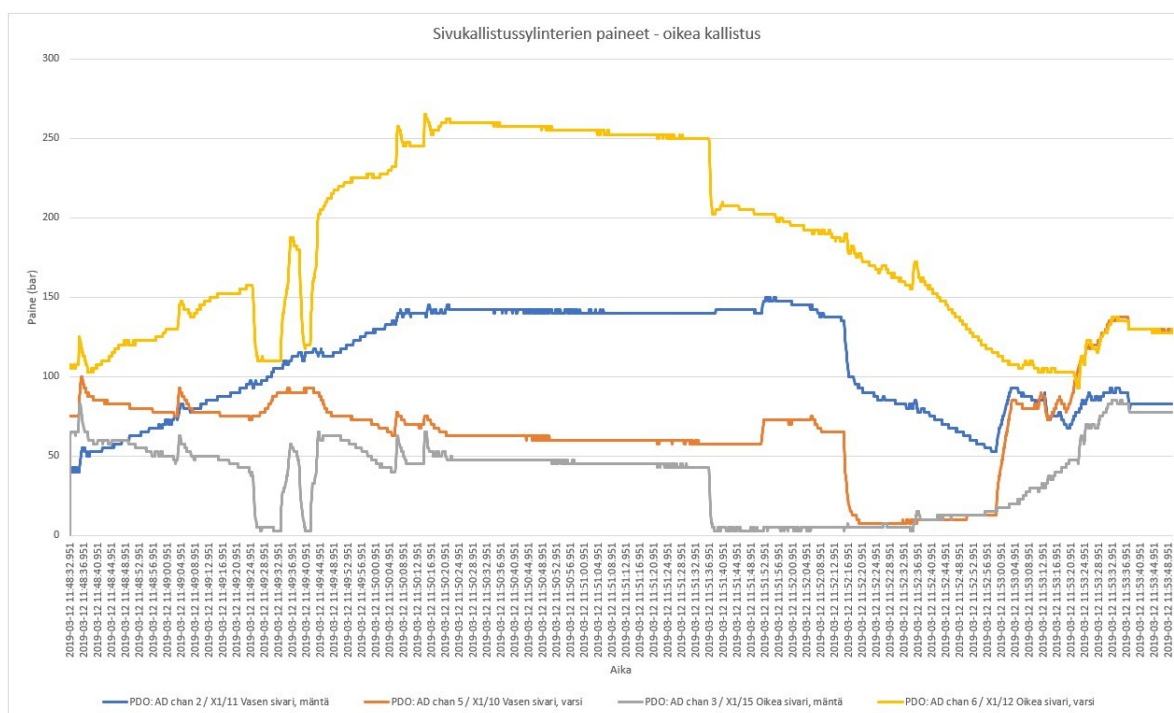
Tulosmatriisiksi saadaan

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} F_{1,1} & \cdots & F_{1,j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ F_{i,1} & \cdots & F_{i,j} \end{bmatrix},$$

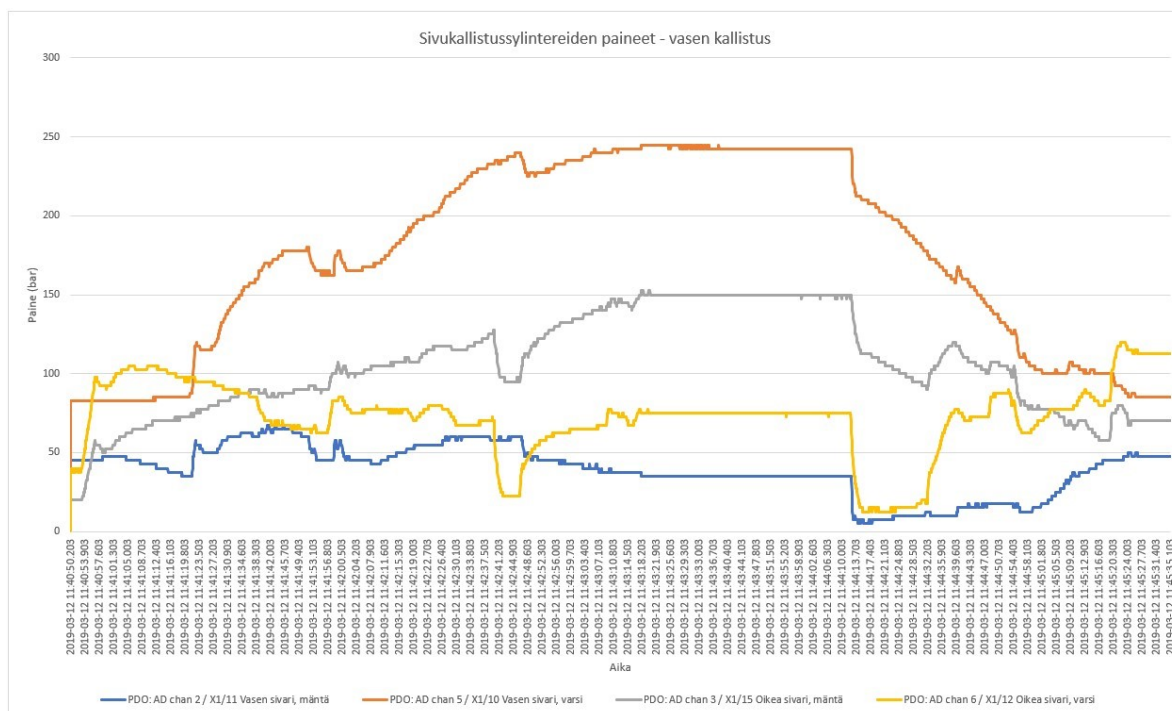
jossa $F_{i,j}$ on kuormittavan voiman komponentti i tilanteessa j . (Westerholm, 2000, ss. 38-40)

8 MITTAUSTULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä opinnäytetyön kappaleessa analysoidaan paalutuskoneen rungosta tehtyjen venymäliuskamittausten ja regressioanalyysin avulla Ansyksen lujuuslaskelmista saatuja tuloksia ja selvitetään, miten hyvin näiden väliset tulokset vastaavat toisiaan. Jos näillä menetelmillä saadut tulokset vastaavat hyvin toisiaan, voidaan lujuuslaskennoista saatavia tuloksia pitää vahvana merkinä siitä, että vaikka työssä käytetty FEM-malli onkin ollut kokoonpano, eikä hitsisaumoinen mallinnettu yksittäinen osa, voidaan lopulta laskennoista saatuihin tuloksiin luottaa, vaikka malli ei ollutkaan ideaalitulanteen mukainen. Analyysissä pyritään myös huomioimaan kallistustilanteissa mitatut sivukallistussylinterien paineet. Kuvassa 25 nähdään oikeanpuoleisen kallistuksen aikaiset sivukallistussylinterien paineet ja kuvassa 26 vastaavasti vasemmanpuoleisen kallistuksen aikaiset paineet.



Kuva 25. Oikean kallistustilanteen aikaan mitatut sivukallistussylinterien paineet.



Kuva 26. Vasemman kallistustilanteen aikaan mitatut sivukallistussylinterien paineet.

Mainittakoon tässä vaiheessa, että työssä on jouduttu jättämään kallistustilanteiden välisten lujuuslaskelmien ja venymäliuskamittausten tulokset vertailematta. Tämä johtuu siitä, että Ansyksen lujuuslaskelmista on jouduttu jättämään ristiniveleen aiheutuva momentti kokonaan pois, jotta kuormituskomponenttien yhteismäärä on saatu vastaamaan venymäliuskojen gridien määrää. Keilin ollessa pystyssä ristiniveleen kohdistuva momentti ei ole niin merkittävässä osassa laskelmia, kun momentin suuruutta vertaa runkoon kohdistuviin voimien komponentteihin, jotka voivat ovat jopa 10-30 -kertaisia. Kallistustilanteissa momentti taas on samaa suuruusluokkaa kuormittavien voimien komponenttien kanssa, joten sen merkittävyys tulosten tarkastelussakin on suuremmassa roolissa. Kun momentti on jouduttu kokonaan jättämään laskuista pois, niin tämän vaikutus tulosten tarkkuuteen on niin merkittävä, että lujuuslaskelmien ja venymäliuskamittausten tulosten tarkastelu näiden tilanteiden välillä ei ole järkevää. Tästä syystä työssä tullaan lopulta keskittymään vain pystytilanteesta saatujen tulosten analysointiin.

Regressioanalyysin avulla saaduissa tuloksissa voi esiintyä normaalia enemmän epätarkkuutta, koska tuloksia verrataan vain kolmen todellisen liuskan ja kolmen toiselle puolelle runkoa peilattujen liuskojen arvoihin. Tulosten epätarkkuus johtuu siitä, että venymäliuskoja oli runkoon kiinnitettynä mittauksia varten vain kolme kappaletta. Regressioanalyysiä varten liuskoja olisi voinut olla enemmänkin, jotta ne olisivat kattaneet suuremman osan rungosta ja lujuuslaskelmista saatuihin tuloksiin verrattavia arvoja olisi lopulta ollut enemmän. Kolmellakin liuskalla voi päästä kohtuullisen tarkkoihin tuloksiin, mutta liuskojen sijainnit ja lujuuslaskelmien tekeminen olisi tullut suunnitella paremmin esimerkiksi laskentatilanteiden ja kuormitusten komponenttien osalta. Mittaussuunnitelmaa tehdessä olisi ollut hyvä miettiä tarkemmin liuskojen gridien yhteenlaskettu määrä ja rungon eri kohtiin kohdistuvien kuormitusten komponenttien määrä, jotta molempia olisi ollut yhtä monta. Kun näiden määrä on eri, niin lujuuslaskelmia tehdessä täytyy huomioida määrien poikkeavuus niin, että selvitetään, mikä kuormitus aiheuttaa olemattoman vähän kuormitusta ja olisi näin vähemmän tärkeässä

roolissa regressioanalyysin kannalta. Ideaalitulanteessa kukin venymäliuska reagoisi vahvasti vain yhteen runkoa kuormittavaan voimaan, mutta tämä on yleensä käytännössä mahdotonta saavuttaa isompien työkoneiden kohdalla.

Lisäksi on huomioitava, että kun momentti on jätetty pois, niin myös pystytilanteen tuloksissa voi olla jonkin verran eroavaisuuksia tämän myötä. Pystytilanteen ero momentin puuttuessa on kuitenkin merkittävästi pienempi, koska se on 10-13 kertaa pienempi. Omat haasteensa on pystytilanteenkin tulosten analysointiin antanut se, että kaikki liuskat ovat olleet vain rungon yhdellä puolella. Regressioanalyysiä varten rungon toiselle puolelle on niin sanotusti peilattu liuskojen 1-3 paikat ja laskettu näille Ansyksellä vastaavat tulokset. Näitä käytetään muiden jännitysten arvojen tapaan matriisien muodostamisessa, joiden avulla ratkaistaan runkoon kohdistuvia kuormituksia.

Regressioanalyysin avulla selvitettyt kuormitukset eivät lopulta vastanneet missään mittaustilanteessa millään tapaa simuloinneista saatuja kuormituksia, vaan näiden erot olivat moninkertaiset. Koska minkään mittaustilanteen tulokset eivät vastanneet toisiaan, voidaan tästä vetää johtopäätös, että tällä tavalla suoritettujen venymäliuskamittausten tuloksia ja lujuuslaskelmien tuloksia ei voida luotettavasti vertailla.

Tulosten suurta eroa selittää osaltaan se, että venymäliuskamittausten suunnittelussa ei ollut huomioitu regressioanalyysin tarpeita. Siinä vaiheessa, kun mittauksia on suunniteltu, ei kuitenkaan oltu vielä tietoisia regressioanalyysin käytöstä tulosten vertailussa, joten sitä ei ole pystytty ottamaan huomioon. Toinen tuloksia selittävä tekijä on käytettyjen liuskojen määrä. Kun liuskoja olisi ollut enemmän ja ne olisi sijoitettu kattamaan suurempi osa rungosta, niin olisi saatu enemmän liuskojen arvoja ja tällöin pieni heitto yksittäisen liuskan arvossa ei vaikuttaisi lopputuloksiin kovin merkittävästi.

9 YHTEENVETO

Opinnäytetyön tavoitteena oli saada vertailtua venymäliuskamittauksista ja Ansyksen lujuuslaskelmista saatuja tuloksia regressioanalyysin avulla, ja vertailun tuloksista riippuen pyrkiä varmistamaan, että Junttan Oy voi luottaa nykyisellä laskentatavallaan saatuihin lujuuslaskelmien tuloksiin, eli käyttämällä laskennoissa kokoonpanoa, joka on räätälöity FEM-laskentaa varten. FEM-mallista on tällöin poistettu muun muassa nurkkapyöritykset, jonka myötä malliin tehtävä verkko olisi yhdenmukainen mahdollisimman monesta kohdasta ja laskentoihin käytettävää aikaa saataisiin vähennettyä.

FEM-malliin jouduttiin useampaan otteeseen tekemään muutoksia, kuten lisäämään venymäliuskojen paikat ja määrittämään ristinivelen ulos tulevan osan pituus. Koska venymäliuskojen paikat oli jäänyt mallintamatta työn pohjana toimineessa Erikoistumisprojekti 2:ssa, ne oli lisättävä malliin tämän työn aikana. Tästä kuitenkin koitui vielä lisätöitä, koska Split line-työkalulla tehdyt liuskojen paikat jakavat pinnat useampaan alueeseen ja kokoonpanossa tämä johtaa siihen, että mallissa käytetyt kontaktit menevät sekaisin, kun ohjelma ei enää tiedä, mitkä osien pinnat täytyy yhdistää. Nämä täytyi siis määrittellä uudelleen. Onkin siis suositeltavaa rakentaa FEM-malli yhdeksi osaksi, vaikka

tähän kuluiakin enemmän aikaa kuin kokoonpanon muokkaamiseen niin, että sitä voisi käyttää FEM-mallina. Mallissa tulisi myös olla hitsisaumat mallinnettuna. Vaikka tällaisen mallin rakentaminen vaa- tiikin jonkin verran aikaa, niin tämä kuitenkin säästää lopulta aikaa, koska samaa mallia pystyisi käyttämään muissa tutkimuksissa ja työtä säästyisi merkittävästi, kun kokoonpanossa käytettävät kontaktit eivät mene sekaisin liuskojen siirtelyn tai niiden poiston myötä.

Työssä oli alun perin tarkoitus vertailla Ansyksen lujuuslaskennoista ja venymäliuskamittauksista saatuja tuloksia suoraan toisiinsa, regressioanalyysin lisäksi, mutta koska malliin jouduttiin tekemään useampaan kertaan muutoksia ja laskea Ansyksellä uudet tulokset useampaan kertaan, niin tähän ei ollut enää aikaa. Tämä vertailutapa voisi olla hyvä aihe tutkittavaksi toisessa opinnäytetyössä, jossa myös venymäliuskamittaukset suoritettaisiin eri tavalla. Jos aihe ei vielä paisu liian laajaksi, niin tutkimukseen voisi ottaa mukaan myös regressioanalyysin ja katsoa, miten lähelle tulokset saataisiin sillä kertaa. Eli voisi tutkia, löytyykö venymäliuskamittausten ja lujuuslaskelmien tuloksista simuloinnista saaduilla kuormituksilla jokin tietyn suuruinen määrällinen ero, esimerkiksi 20 MPa, tai onko mahdollisesti jonkin tietyn kertoimen suuruinen ero, kuten esimerkiksi 1,4. Tällöin voisi mahdollisesti saada selville mistä tahansa rungon kohdasta niin sanotun venymäliuskan mittaaman arvon. Tämä ei kuitenkaan kertoisi, onko kyseisessä kohdassa tapahtuva jännitys vetoa vai puristusta, vaan se selviäisi regressioanalyysin avulla.

Opinnäytetyö on ollut hyvin opettavainen monelta osin. Venymäliuskamittauksista on työssä oppinut paljon uutta, vaikka itse mittausten tekeminen ei kuulunut työhön. Työn aikana kuitenkin tuli selvitettyä monenlaisia asioita venymäliuskoista ja uutta on opittu muun muassa siitä, että mitä asioita tällaista työtä varten tehtävää venymäliuskamittausta suunnitellessa tulisi ottaa huomioon, ja jos tuloksia on tarkoitus vertailla lujuuslaskelmien tuloksiin, niin miten tämä vaikuttaa mittausten suunnitteluun. Työn tulosten aikaansaamiseksi on myös tutustuttu itselle uuteen analysointimenetelmään ja saatu kokemusta laajemman projektin vetämisestä ja siihen liittyvästä raportoinnista.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- Ansys. (8. 10. 2020). *About Ansys*. Haettu 8. 10. 2020 osoitteesta Ansys: <https://www.ansys.com/about-ansys>
- Ansys. (3. 12. 2020). *Ansys Mechanical*. Haettu 3. 12. 2020 osoitteesta Ansys Mechanical - Finite Element Analysis (FEA) Software: <https://www.ansys.com/products/structures/ansys-mechanical>
- Dassault Systems. (21. 9. 2020). Haettu 21. 9. 2020 osoitteesta https://www.solidworks.com/sw/183_ENU_HTML.htm
- HBM. (2018).
- HBM. (10. 12. 2020). *Cleaning Agents for Strain Gauge Measuring Points*. Haettu 10. 12. 2020 osoitteesta HBM: <https://www.hbm.com/en/4628/strain-gauge-cleaning-material/>
- HBM. (10. 12. 2020). *Z70: Cold Curing Superglue for Experimental Tests, and for Sensors Without High Accuracy Requirements*. Haettu 10. 12. 2020 osoitteesta HBM: <https://www.hbm.com/en/2962/z70-a-single-component-cold-curing-adhesive/>
- HEXAGON. (1. 4. 2021). *About Us*. Noudettu osoitteesta <https://hexagon.com/about>
- Junttan Oy. (2019). *Venymäliuskamittauksen mittaussuunnitelma*. Kuopio.
- Junttan Oy. (24. 9. 2020). Yritysesittely opiskelijaryhmille. Haettu 24. 9. 2020
- Ketola, A.-P. (2015). *Automaattisen testausjärjestelmän käyttöönotto tietyille hydraulilaitteille*. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto.
- Laitinen, V. (1. 4. 2020). Adams-ohjelmiston käytön esittely ja voimien määrittäminen. (S. Parkkinen, Haastattelija)
- Laitinen, V. (2020). *Paalutuskoneen ylävaunun kuormitus venymäliuska*. Kuopio.
- Laitinen, V. (7. 4. 2021). (S. Parkkinen, Haastattelija) Kuopio.
- MSC Software. (1. 4. 2021). *About*. Noudettu osoitteesta <https://www.mscsoftware.com/About-MSC-Software>
- Mukaillen Laitinen, V. (2020). *Paalutuskoneen ylävaunun kuormitus venymäliuska*.
- nCode. (22. 10. 2020). *About*. Haettu 22. 10. 2020 osoitteesta The leading brand for engineering data analysis solutions: <https://www.ncode.com/about>
- nCode. (3. 11. 2020). *Test data processing and durability analysis*. Haettu 3. 11. 2020 osoitteesta <https://www.ncode.com/products/ncode-glyphworks-signal-processing-and-durability-analysis>
- Niinistö, J. (helmikuu 2021). Sähköpostikeskustelu.
- Parkkinen, S. (2020). *Erikoistumisprojekti 2*. Kuopio.
- Salmi, T.;& Pajunen, S. (2010). *Lujuusoppi*. Tampere: Pressus Oy.
- Scan2CAD. (9. 10. 2020). *A Brief History of SolidWorks*. Haettu 9. 10. 2020 osoitteesta <https://www.scan2cad.com/cad/solidworks-history/>
- Westerholm, T. (2000). *Measurement of Operating Loads in Forwarder Use (maisterin tutkielma)*. Tampere.

LIITE 1. VENYMÄLIUSKAMITTAUSTEN SUUNNITTELU OTTAEN HUOMIOON REGRESSIOANALYYYSIN TARPEET

Venymäliuskamittausten suunnittelu on jo itsessään varsin työläs prosessi, mutta jos venymäliuskamittauksista saatuja tuloksia halutaan verrata laskentamallin avulla suoritettujen lujuuslaskelmien tuloksiin, tulee suunnittelusta entistä haastavampaa. Varsinkin, jos tuloksissa käytetään regressioanalyysiä, niin huomioitavia asioita tulee sitäkin enemmän.

Mittausten suunnittelussa tulisi lähteä liikkeelle siitä, että selvitetään esimerkiksi Adams-ohjelmistoa käyttäen, kaikki kokonaisuudessa vaikuttavat kuormitukset komponentteineen. Tästä saadaan selville kuormittavien komponenttien yhteismäärä, joka voidaan sovittaa venymäliuskojen lukumäärään. Näiden kuormittavien voimien komponenttien ja momenttien yhteenlasketun lukumäärän tulisi vastata venymäliuskojen gridien lukumäärää. Kun nämä on otettu jo heti alussa huomioon, niin regressioanalyysin tekeminen helpottuu huomattavasti. Tämän jälkeen voidaan FEM:iä apuna käyttäen alkaa tutkimaan sopivia paikkoja venymäliuskoille. FEM-mallina ei kannata käyttää kokoonpanoa, joka on vain kopioitu ja hieman muokattu kulmapyöristysten tai muiden ominaisuuksien osalta, vaan tästä kokonaisuudesta kannattaa rakentaa oma mallinsa, joka koostuu vain yhdestä osasta. Tällaisen rakentamiseen kuluu oma aikansa, mutta jos mallia on mahdollista käyttää useamman venymäliuskamittauksen kohdalla, joissa tutkitaan eri asioita, niin tämä tulee lopulta säästämään aikaa. Kun mallia käytetään useampien venymäliuskamittausten ja lujuuslaskelmien tulosten vertailuun, liuskojen paikat todennäköisesti muuttuvat ja nämä muutokset täytyy tehdä myös käytettävään FEM-malliin. Jos käytössä olisi kokoonpanosta tehty malli, niin liuskojen paikkoja muutettaessa, tai vain lisätessä, kokoonpanon matet täytyy määritellä uudestaan niiden pintojen osalta, joihin liuskoja sijoitetaan. Yhdestä osasta koostuvassa mallissa näin ei pääse käymään, kun mateja ei ole käytössä.

FEM:in avulla pyritään selvittämään liuskoille sopivimpia paikkoja ja kulma, johon liuskat tulisi asettaa. Liuskoille asetettavien paikkojen ei tulisi olla siellä, missä tapahtuu kaikkein suurimmat jännitykset, vaan ne olisi hyvä saada asetettua niin, että yksi liuska reagoisi hyvin vain yhteen kuormitukseen ja ne olisi hyvä saada sijoitettua kauas kuormittavista voimista. Paikkojen arviointia varten on hyvä tehdä FEM:llä eri kuormitustapauksia katsoen, että mihin paikkoihin mikäkin voima vaikuttaa. Eli kokeillaan jollakin tietyn suuruusella voimalla, esimerkiksi 10 tai 100 kN, yksi voiman komponentti kerrallaan rasittaa tutkittavaa kokonaisuutta ja selvitetään nämä paikat, joissa jännityksiä ilmenee. Jos näissä paikoissa ei ole tiedossa mihin suuntaan jännitykset tapahtuvat niin tämä on otettava venymäliuskan valinnassa jälkeenpäin huomioon. Venymäliuskojen paikkoja mietittäessä olisi myös pyrittävä ottamaan huomioon, että koska eri kuormitukset vaikuttavat eri paikkoihin eri tavoin, olisi liuskojen kuitenkin oltava eri etäisyyksillä kuormituksista. Varsinkin tapauksissa, joissa voima ja momentti vaikuttavat samaan aikaan.

Kun kuormitusten määrä ja liuskojen paikat on saatu selvitettyä, voidaan FEM-malliin mallintaa liuskojen paikat niin, että Split line-työkalulla tehdyt ruudukot olisivat jokaisen liuskan gridin suuntaisesti

niin, että näiden gridien kulmat jakaisivat yhden pisteen, joka on venymäliuskalle valittu mittauspiste.

Kun venymäliuskoille on saatu selvitettyä sopivat paikat ja valittu tarkoitukseen sopivat venymäliuskat, voidaan tutkittava rakenne valmistella venymäliuskojen asennusta varten, asentaa liuskat ja suorittaa mittaukset.

Ansyksen lujuuslaskelmia varten on määritettävä sopivat asetukset ja valittava jokin tietyn suuruinen voima, jolla laskennat tehdään. Jokaiseen liuskan paikkaan on määritettävä paikalliskoordinaatisto niin, että esimerkiksi X-akseli olisi aina liuskan suuntaisesti. Rakenteeseen kohdistuvien kuormitusten vaikutukset on laskettava jokainen voiman komponentti ja momentti erillään toisistaan, eli jokaisessa laskennassa olisi vaikuttamassa vain yksi voiman komponentti tai momentti kerrallaan. Tällä tavoin saadaan selville, kuinka paljon jännitystä kukin kuormitus aiheuttaa kunkin liuskan kohdalla. Laskennoista saadut jännitysten arvot on hyvä merkata esimerkiksi Excel-tilukkaan niin, että sarakkeilla on voiman komponentit ja momentti vierekkäin, ja riveillä liuskojen arvot. Laskennat kannattaa suorittaa niin, että aiemmat tulokset säilyvät, jotta mahdollisia korjauksia on vielä mahdollista tehdä ilman, että kaikki asetukset täytyy määritellä uudestaan.

Venymäliuskamittausten tulokset voidaan muuntaa jännityksiksi nCode ICE-Flow -ohjelmistolla tai vaikka Excelissä. Venymien arvot kerrotaan mitatun rakenteen materiaalin kimmokertoimella. Jotta jännitys saadaan MPa-muodossa GPa:n sijaan, kerrottava arvo on $E \cdot 10^{-3}$ -muotoa. Regressioanalyysiä varten tarvitaan jokaiselta kanavalta suurin jännityksen arvo, joka voi olla +/- -merkinen. Tämä saadaan helpoiten selville Excel-tiedostoista komennoin $=MAX(...)$ ja $=MIN(...)$.

Seuraavaksi voidaan tehdä regressioanalyysi. Sen vaiheet on kuvattu raportin kappaleessa 7.2.2. Analyysin valmistuttua tuloksia voidaan vertailla esimerkiksi Adams -ohjelmalla saatuihin kuormitusten arvoihin, jotka on saatu simuloimalla.

Jos tutkittava kohde olisi yksinkertainen kappale, niin tälle voisi mahdollisuuksien mukaan tehdä referenssimittauksia, jossa kuormitetaan jollakin yksittäisellä voimalla kerrallaan, jonka suuruus ja suunta todella on tiedossa. Tällä tavalla voidaan saada tietoon liuskojen kohdalla tapahtuvat todelliset jännitykset ja samalla tunnetaan kappaletta kuormittava voima. Tällöin regressioanalyysiä varten ei tarvitsisi FEM-mallia lainkaan, koska kuormittava voima on tiedossa, ja venymäliuskamittauksista saadaan liuskojen kohdalla tapahtuvat jännitykset. Suurissa työkoneissa tällainen ei kuitenkaan ole mahdollista, mutta yksinkertaisemmilla rakenteilla voi olla.