



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

RULLAMUOVAUSKONEEN RUNGON KEHITTÄMINEN

Samesor Oy

TEKIJÄ: Juho-Pekka Rönkkö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Juho-Pekka Rönkkö	
Työn nimi Rullamuovauskoneen rungon kehittäminen	
Päiväys 6.5.2015	Sivumäärä/Liitteet 45
Ohjaaja(t) lehtori Tatu Westerholm ja koulutusvastuupäällikkö Timo Lipponen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Samesor Oy / R&D Manager Jouko Turunen	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön aiheena oli PreFab-tuoteperhettä laajentavan rullamuovauskoneen rungon kehitys Samesor Oy:lle. Kehitystyö tehtiin uudentyypiseen ja esisuunniteltuun rullamuovauskoneeseen, joka tulee tuotantoon vuonna 2015. Työn tavoitteena oli selvittää FE-analyyseiden avulla koneen vaihtoehtoisten rakenneratkaisujen lujuusominaisuudet ja tuloksia hyödyntäen kehittää luonnoksia ja uusia ideoita koneen parantamiseksi valmistustekniikan, kustannusten ja lujuusominaisuuksien osalta. FE-analyyseiden suorittamiseksi työssä oli selvitettävä ja sovellettava rullamuovauksen synnyttämä monimutkainen kuormitustilanne. Rullamuovauskone oli rakenteeltaan erilainen kuin muut yrityksen valmistamat koneet, ja siksi sen lujuusominaisuuksiin haluttiin konkreettista näyttöä.</p> <p>Työn alussa tehtiin rullamuovauksen kuormituksista kirjallisuus selvitys, jonka pohjalta luotiin soveltava kuormitustilanne FE-analyyseihin. Kuormitustilanteen selvittäminen ja soveltaminen oli työn haastavin osuus. Soveltamisen luotettavuutta olisi voinut parantaa suorittamalla kokeita valmiille koneelle. Työssä suoritettuihin FE-analyyseihin käytettiin Ansys Workbench 15.0 –ohjelmaa. Analyyseillä tutkittiin eri rakenneratkaisujen ja valmistustavan vaikutusta rullamuovauskoneen lujuusominaisuuksiin. Todenmukaisten tulosten saamiseksi suoritettiin useita erilaisia analyysejä selvittämään eri mallinnustapojen vaikutuksia tuloksiin. FE-analyyseiden tuloksia hyödyntäen työssä luotiin optimoituja toteutusvaihtoehtoja rullamuovauskoneelle.</p> <p>Työssä saatiin mallinnettua rullamuovausprosessin kuormitustilanne ja selvitettyä esisuunnitellun rullamuovauskoneen lujuusominaisuudet. Tämä opinnäytetyö tuotti Samesor Oy:lle tietoa koneen lujuusominaisuuksista sekä luonnoksia, joita voi hyödyntää tuotekehityksessä sekä nyt että jatkossa.</p>	
Avainsanat rullamuovauskone, FEM, FEA, tuotekehitys	
julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Juho-Pekka Rönkkö			
Title of Thesis The Frame Development of a Roll Forming Machine			
Date	May 6, 2015	Pages/Appendices	45
Supervisor(s) Mr Tatu Westerholm, Senior Lecturer and Mr Timo Lipponen, Manager, Engineering and Technology			
Client Organisation /Partners Samesor Oy / Mr Jouko Turunen, R&D Manager			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this final year project was to develop the frame of a roll forming machine for Samesor Ltd. The development procedure was done to a completely new and predesigned roll forming machine to a product family called PreFab. The purpose was to find out what are the strength properties of different options for the structures to be used in the machine by using FE-analyses. To accomplish the FE-analyses, the complicated load situation of the roll forming process needed to be found out and applied. This thesis also includes improvements in the design.</p> <p>First, an extensive literature survey of load situation in roll forming process was done. Studying and applying the load situation was the most challenging part of this thesis. The Ansys Workbench 15.0 program was used in FE-analyses. Various analyses were performed in order to find out the most truthful way of modelling the case and different structures. The FE-results, the manufacturing techniques and expenses were used when developing the design.</p> <p>As a result of this project the load situation of roll forming process was clarified and applied. The strengths of different structure options of the predesigned machine were also clarified. This thesis also includes a few improvements in the designs.</p>			
Keywords roll forming machine, FEM, FEA, product development			
public			

ESIPUHE

Haluan kiittää Samesor Oy:n R&D Manager Jouko Turusta mahdollisuudesta tehdä haastava ja mielenkiintoinen opinnäytetyö sekä työn ohjaajaa lehtori Tatu Westerholmia asiantuntevasta ja sujuvasta ohjauksesta. Tämä opinnäytetyö oli mielekäs, motivoiva ja monella tavoin opettavainen prosessi.

Lisäksi haluan kiittää avovaimoani Hennaä pyyteettömästä tuesta ja kannustuksesta opinnäytetyön suorittamisen aikana sekä lapsiani Kasperia ja Emiliaa iloisesta ja elämänmyönteisestä läsnäolosta arjen keskellä.

Kuopiossa 6.5.2015

Juho-Pekka Rönkkö

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	8
2	TYÖN TAUSTAT	9
2.1	Työn kuvaus	9
2.2	Samesor Oy	9
2.3	PreFab-linjakonseptin rullamuovauskone	10
3	RULLAMUOVAUSTEKNIikka	11
3.1	Rullamuovauskone	12
3.2	Rullamuovausprosessin suunnittelu	14
3.2.1	Profilin suunnittelu	14
3.2.2	Muovaamisen vaiheistus	15
4	RULLAMUOVAUKSEN KUORMITUKSET	17
4.1	Lindgrenin kokeellinen tutkimus	17
4.2	Lindgrenin mallit ja soveltaminen	19
4.3	Bhattacharyyan analyttinen rullakuormituksen malli	21
5	TUOTEKEHITYS	23
5.1	Tuotekehityksen yleiset vaiheet	23
5.2	Finite Element Method	24
6	PREFAB-LINJAKONSEPTIN RULLAMUOVAUSKONEEN FE-ANALYYSIT	26
6.1	Analyyssien toteutus	26
6.1.1	3D-mallit ja Ansyksen materiaali	27
6.1.2	Elementtiverkon optimointi	29
6.1.3	Kuormitustilanteen mallintaminen	30
6.1.4	Reunaehdot	32
6.2	Analyyssien tulokset	33
6.2.1	Kuormituksesta johtuvat siirtymät	33
6.2.2	Jännitykset	36
6.3	Yhteenveto esisuunnittelun rakenteen ominaisuuksista	38
7	RULLAMUOVAUSKONEEN RUNGON KEHITTÄMINEN	40
7.1	Ensimmäinen luonnos	40
7.2	Toinen luonnos	41
7.3	Ylämuovausasemia tukeva jäykiste	42

8 YHTEENVETO.....	44
LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT	45

LYHENTEET JA MERKINNÄT

FEM	Finite Element Method
FEA	Finite Element Analysis
CAD	Computer Aided Design
R&D	Research and Development
R_{eL}	Alempi myötölujuus [MPa]
$R_{p0,2}$	0,2 % venymisraja [MPa]
θ	Taivutuskulma [Rad]
t	Ainevahvuus [mm]
s	Materiaalin myötöraja [MPa]
F_{Load}	Rullavoima [N]
T_{Torque}	Rullien vääntömomentti [Nm]
R_z	Pinnankarheuden arvo [μm]
\emptyset	Halkaisija [mm]

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään kuopiolaiselle Samesor Oy:lle ja työn aiheen antoi Samesorin R&D Manager Jouko Turunen. Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia ja konsultoida suunnitteilla olevan PreFab-tuoteperhettä laajentavan rullamuovauskoneen lujuusominaisuuksia. Kyseinen rullamuovauskone tulee tuotantoon vuonna 2015, joten työ on täten ajankohtainen.

Työn ensimmäisenä tavoitteena on selvittää rullamuovausprosessista aiheutuva kuormitus koneen runkoon ja rakenteisiin. Kuormitustietojen pohjalta työssä tehdään FE-analyysit esisuunnitellulle rullamuovauskoneelle, jotta nähdään niiden käyttäytyminen, jännitykset ja siirtymät muovausprosessin aikana. Lisäksi suunnitellaan luonnos- ja ideointitasolla uudenlaiset runko- ja rakennevaihtoehdot, joissa on optimoitu niiden lujuusominaisuuksia, valmistustekniikkaa ja kustannustehokkuutta.

Työn tärkeimpänä lopputuloksena on tarkoitus saada tuotettua luotettavaa tietoa esisuunnitellun koneen lujuusominaisuuksista, jota Samesor saa hyödynnettyä sekä tässä konseptissa että jatkossakin tuotesuunnittelussaan.

2 TYÖN TAUSTAT

2.1 Työn kuvaus

Tämän opinnäytetyön aiheena on PreFab-tuoteperhettä laajentavan rullamuovauskoneen rungon kehittäminen Samesor Oy:lle. Rullamuovauskone oli jo aiemmin esisuunniteltu, ja koska se on rakenteeltaan täysin erilainen kuin muut yrityksen rullamuovauskoneet, sen lujuusominaisuuksiin halutaan todennusta. Työhön kuuluu aluksi selvittää ja mallintaa rullamuovausprosessin kuormitukset koneeseen, joista ei ole olemassa suoraan mitään teorian tietoutta. Kuormitustilanteen todenmukainen mallintaminen tulee olemaan tämän työn suurimpia haasteita. Selvitetyt kuormitustilanteen pohjalta työssä esisuunnitelluille rakenteille suoritetaan FE-analyysit. Mahdollisia toteutustapoja on suunnitteilla kaksi erilaista ja niiden ominaisuuksia vertaillaan FE-analyysien perusteella. Analyysien avulla arvioidaan myös kotelorungon hitsisaumojen pituuksien vaikutusta rakenteen jäykkyyteen. FE-analyysien tuloksista tärkeimmät ovat siirtymien suuruus muovausrullien pinnoilla ja jännitysten sijainti sekä suuruus rakenteessa.

Työssä kehitetään luonnoksia ja ideoita rullamuovauskoneen kehittämiseksi, joissa on hyödynnetty FE-analyyseistä saatua informaatiota. Uusissa versioissa pyritään optimoimaan rakenteita kevyemmiksi, helpommiksi valmistaa ja kustannustehokkaammiksi säilyttäen kuitenkin riittävät lujuusominaisuudet. Työssä tehtäviin FE-analyysihin käytetään Ansysin Workbench 15.0 -ohjelmaa ja mekaniikkasuunnitteluun SolidWorks -ohjelmaa.

2.2 Samesor Oy

Samesor Oy on kuopiolainen ohutlevytuotteiden tuotantolinjojen valmistaja. Yritys on perustettu vuonna 1964, jolloin se tunnettiin nimellä Savon Metalli Sorvaamo ja se toimi paikallisen teollisuuden tarpeisiin. Vuonna 1969 yritys nimettiin Samesor Oy:ksi ja se alkoi keskittymään enemmän ohutlevytuotteiden tuotantolinjoihin. Samesorin tuotteita ovat nykyäänkin kokonaiset tuotantolinjat, joilla valmistetaan eritoten rakennusteollisuuden tarpeisiin kattopeltejä ja -paneeleja, useita erilaisia rakenneprofileja sekä seinä- ja verhouselementtejä. Samesor Oy:llä on vankka kokemus rullamuovauksesta. Rullamuovaus liitettynä muihin työvaiheisiin mahdollistaa käyttövalmiiden ohutlevytuotteiden valmistuksen asiakkaan tarpeisiin. Yli 50 vuoden kokemus alalla on tuottanut tietotaidon, jota korostaa esimerkiksi kattopeltituotteiden patentit sekä tuotantolinjojen tekniset innovaatiot. (Samesor Oy 2015.)

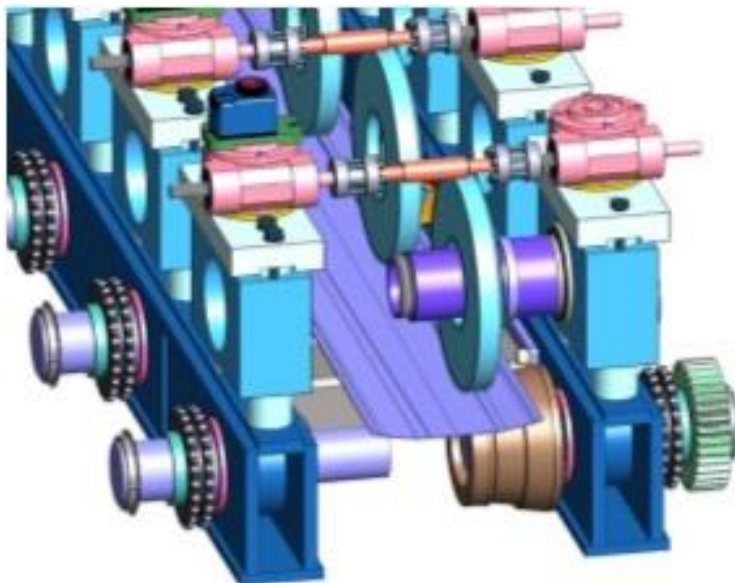
Samesorin tavoitteena on lisätä esimerkiksi kantavien rakenneprofiilien tuotantoprosessin älykkyyttä. Esimerkiksi suunnitteluohjelmalla suunniteltu talo rakennepalkkeineen integroidaan yhteen palkkeja valmistavan tuotantolinjan kanssa. Tämä edellyttää suunnittelussa käytettävien eri ohjelmistojen integroimista sekä keskenään että myös tuotantolaitteiston kanssa. Samesorin tavoitteena on myös laajentaa ja parantaa palveluaan tuotteiden elinkaaren osalta esimerkiksi huollon ja kunnossapidon kannalta. Samesor tekee myös jatkuvaa kehitystyötä tuotantolinjojen ohjaustekniikan ja automaation modernisoinnissa. (Turunen, Jouko 2015-4-16.)

2.3 PreFab-linjakonseptin rullamuovauskone

PreFab on suunnitteilla oleva konsepti, jota on alettu kehittämään maailmalla vallitsevan markkina-tarpeen pohjalta. Kyseinen konsepti on niin sanottu entry-level- rullamuovauskone, jonka säätö-mahdollisuuksia on supistettu verrattuna muihin PreFab-tuoteperheen koneisiin. Kone tulee olemaan hankintahinnaltaan huomattavasti edullisempi kuin muut koneet. Tämän segmentin koneilla on kova hinta- ja toimitusaikakilpailu markkinoilla, joten kehitettävän koneen tulee olla kustannustehokas ja läpimenoajaltaan nopea. Kyseinen rullamuovauskone on osa tuotantolinjaa, jolla on tarkoituksena valmistaa C- ja U-rakenneprofiilia ohutlevyistä, joita käytetään omakoti- ja rivitalorakentamisessa.

Rullamuovauskoneen yksittäinen muovausasema sisältää ala- ja yläakseliston muovausrullineen ja yleensä yläakseliston korkeussäädön työstettäessä eri ainevahvuuksisia materiaaleja. Lisäksi erilevyisten profiilien työstölevyettä pystytään muuttamaan esimerkiksi kiinnittämällä muovausasemat liukukiskojen päälle kiinnitettyihin levyihin. Perinteinen ratkaisu on se, että jokainen muovausasema kiinnitetään erikseen suurempaan erilliseen alarunkoon, niin että vaiheväliliä voi muuttaa ja säätöjä on enemmän.

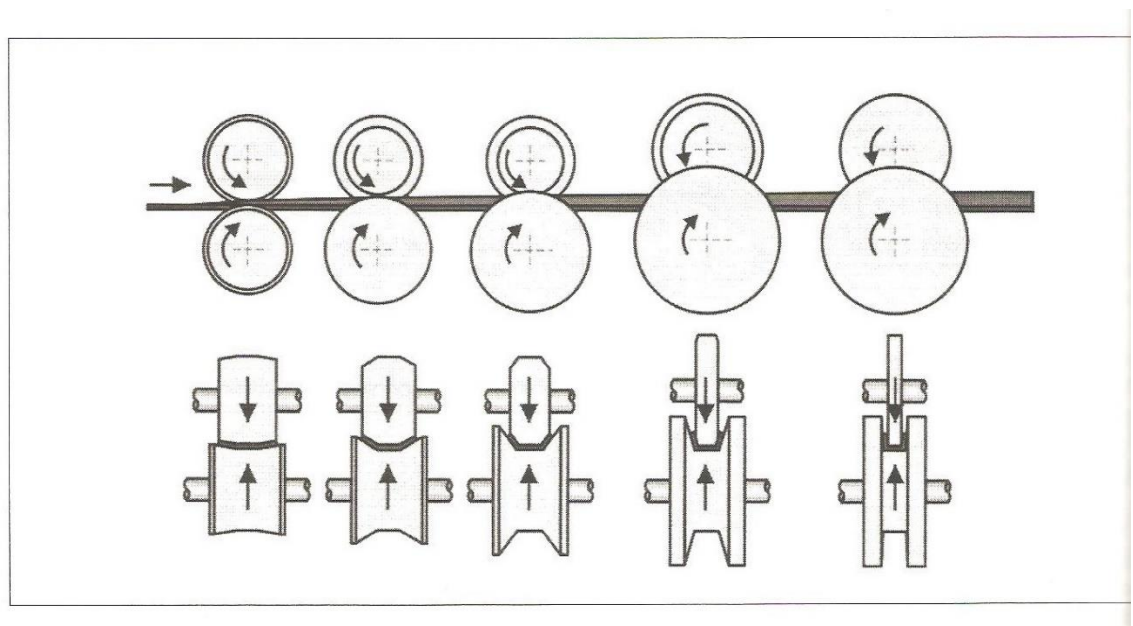
Uuden PreFab-rullamuovauskoneen esisuunniteltu runkoratkaisu on itsekantavat kotelorunkopalkit, joihin kaikki ala-akselistot kiinnitetään kiinteälle vaihevälilielle. Kotelorunko hitsattaisiin teräslevyistä. Kotelorunkoon tulee myös laakeripesät- tai holkit ala-akselistoille. Yläakselistot laakeriyksikköineen kiinnitettäisiin kotelorunkoon pystyjohteilla, ja niissä olisi korkeussäätömahdollisuus eri ainevahvuuk-sia varten. Kantava kotelorunko puolestaan tuettaisiin muutamalla telineellä, joten raskasta perin-teistä alarunkoa ei tarvittaisi ollenkaan. Esisuunniteltu rakenne on idealtaan yksinkertaisempi, hel-pompi valmistaa ja koota sekä halvempi kuin muut PreFab-tuoteperheen mallit, kuten Advanced tai Superior. PreFab-linjakonseptin rullamuovauskoneen pääty on esitetty kuvassa 1.



KUVA 1. Esisuunniteltu PreFab-linjakonseptin rullamuovauskone (Turunen 2015-01-16.)

3 RULLAMUOVAUSTEKNIikka

Rullamuovaus (roll forming tai cold roll forming) on ohutlevyille tarkoitettu muovausmenetelmä, jossa levyarkki tai kelalta syötettävä raina kulkee rullamuovauskoneen ylä- ja alamuotorullaston läpi muovautuen useiden muovausvaiheiden jälkeen haluttuun poikkileikkausmuotoon. Oleellista on, että prosessi tapahtuu yleensä huoneenlämpötilassa eli se on kylmämuovausprosessi. Muovattava levy kulkee rullamuovauskoneen läpi ilman metallin ainevahvuuden oleellisia muutoksia. Rullamuovauskone on yleensä osana laajempaa automatisoitua tuotantolinjaa, jolloin saadaan yhdistettyä useita työvaiheita ja linjalta tulee ulos valmiimpi tuote. Yhdistettäviä työvaiheita voivat olla esimerkiksi lävistys, poikittaistaivutus, hitsaus ja katkaisu. Rullamuovauksen periaatekuva on esillä kuvassa 2, jossa on viisi rullamuovausasemaa. (Mäki-Mantila 2001, 50.)



KUVA 2. Rullamuovauksen periaate (Mäki-Mantila 2001, 50.)

Rullamuovattavia materiaaleja ovat ne kaikki kylmämuovattavat metallit, jotka ovat taivutettavissa ja särmättävissä. Useimmiten rullamuovauksessa muovataan seostamattomia ja ruostumattomia teräksiä, alumiinia ja kupariseoksia. Rullamuovattavaksi käy myös pinnoitetut materiaalit, sillä menetelmä ei vahingoita materiaalin pintaa. Käytettävän materiaalin ainevahvuus on sovelluksesta riippuen välillä 0,13 - 20,0 mm ja leveys yleensä 3 - 2000 mm. Profiilin maksimipituutta ei yleensä ole rajattu, mutta minimipituus on rajattu rullamuovauskoneen ominaisuuksien, kuten vaihevälin mukaan. Vaiheväli tarkoittaa kahden peräkkäisen muovausaseman välistä etäisyyttä. Profiilin minimipituus on määritelty yleensä kolme kertaa vaihevälin pituiseksi. (Matilainen, Parviainen, Havas, Hiitelmä, Hultin 2011, 217.)

Rullamuovauksella voidaan valmistaa useita eri tuotteita. Näitä ovat esimerkiksi rakennusteollisuuden poimulevyt, kuten verhouslevyt ja kantavat poimulevyt. Esimerkki rullamuovauksella valmistettavasta tuotteesta on kuvassa 3 esitetty kattotiilijäljitelmäpelti. Lisäksi rullamuovauksella voidaan valmistaa monimuotoisia kantavia vakio- ja erikoisprofiileja, joita käytetään seinä- ja katto-orsina.

Lisäksi yleisiä tuotteita ovat reunoista profiloituneet paneelit. Rullamuovausmenetelmällä voidaan valmistaa myös mitä erilaisempia avonaisia ja suljettuja listaprofileja, joiden saumat on valmistettu muovaamalla prosessissa profiiliin mekaaninen lukkosauma tai sitten hitsaamalla sauma kiinni rullamuovauslinjaan liitettävällä hitsauslaitteistolla. (Ongelin 1986, 13 - 15.)



KUVA 3. Rullamuovaamalla valmistettu kattotiilijäljitelmä (Samesor Oy 2015.)

3.1 Rullamuovauskone

Rullamuovauskone koostuu rungosta, jonka päälle on asennettu peräkkäisiä rullamuovausasemia. Rullamuovausasema koostuu ylä- ja alamuovausrullista, joiden välistä muovattava metalli kuljeteaan. Rullien geometria määrää, minkämuotoinen profiili valmiiseen tuotteeseen syntyy. Ylä- ja alamuovausrullien välillä tulee olla riittävä puristusvoima levyn ollessa sen välissä ainakin osalla rulla-asemista, joihin levy koskee, jotta levy kulkeutuu aina eteenpäin seuraavalle muovausasemalle. Peräkkäisten rulla-asemien määrä on periaatteessa rajoittamaton, mikä mahdollistaa täten moninaisten muovausvaiheiden pohjalta laajan valmistettävien profiilien poikkileikkausvalikoiman. Useimmissa rullamuovauskoneissa rullamuovausasemia on sovelluksen mukaan 12 - 16 kpl niiden väliin ollessa yleensä 150 - 650 mm. Esimerkki rullamuovauskoneesta on kuvassa 4. (Ongelin 1986, 15.)

Rullamuovauskoneen käyttömootorina on yleensä yksi tai useampi kolmivaiheinen sähkömoottori, joita voidaan ohjata myös käyttämällä taajuusmuuttajaa jos nopeutta tarvitsee muuttaa. Käytettävien moottoreiden tehot ovat yleensä 2 - 250 kW. Voima välitetään ala- ja yläakseleille joko ketju-, hammaspyörä- tai kardaanivetoisesti. Yleisimmissä sovelluksissa sekä ala- että yläakselit ovat vetäviä. Muovattavan profiilin korkeuden mukaan akselit pyörivät joko samalla tai eri nopeudella, joten akselien välityssuhteen tulee olla vaihdettavissa. (Ongelin 1986, 18.)



KUVA 4. Rullamuovauskone Samesor Oy:n tuotantotiloissa (Samesor Oy 2015.)

Rullamuovauskoneen rungolta vaaditaan riittävää lujuutta ja jäykkyyttä, jotta rullamuovausprosessin kuormitukset eivät aiheuta liian suuria siirtymiä siihen sekä rulla-asemiin ja tästä syystä muoto- ja toleranssivirheitä muovattavaan profiiliin. Tärkeää on, että koneella voi ajaa tasalaatuista profiilia eri ainevahvuuksillakin ja että muovausprosessi on hallittavissa. Sallitut siirtymät rungossa, akselistoissa ja muovauspinoissa riippuvat täysin sovelluksesta. Runkoratkaisuja on useita, sillä rullamuovaamalla voidaan valmistaa monenlaisia tuotteita ja täten koneen vaatimuksetkin muuttuvat. Rullamuovauskoneen runko valmistetaan usein hitsaamalla erilaisista putkipalkeista. Rullamuovauskoneen runkoon kiinnitetään rullamuovausasemat, joiden välityksellä muovaamisesta aiheutuvat kuormitukset siirtyvät runkoon.

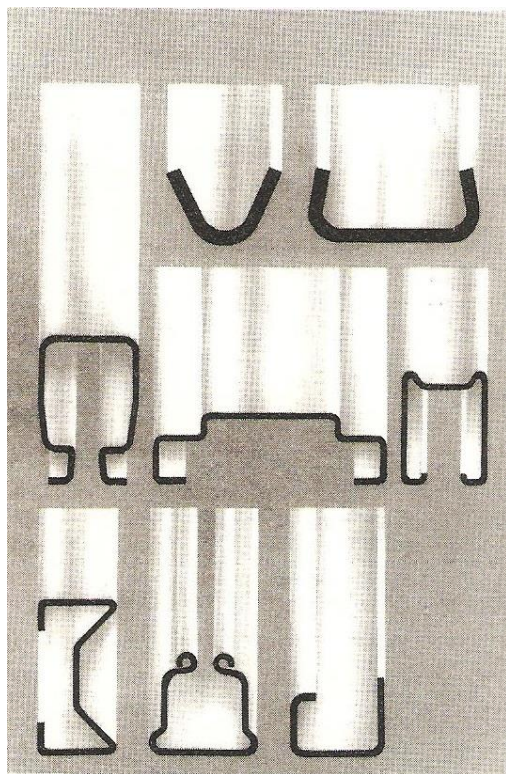
Rullamuovausasemien toteutustapoja on kaksi. Ensimmäisessä ratkaisussa rullamuovausasemat on toteutettu ulokekaulaisesti, jossa muovausrullat asennetaan vain toisesta päästä laakerilla tuetun akselin päähän. Ratkaisu soveltuu vähemmän kuormittaville kapeasta rainasta muovattaville yksinkertaisille profiileille. Etuina on sen helppo huollettavuus ja rakenteen keveys. (Ongelin 1986, 15.)

Toinen toteutustapa on tukilaakeroiduilla rulla-asemilla, jossa akseli on laakeroitu molemmista päistään. Tämä vaihtoehto pystyy valmistamaan monimutkaisetkin muodot paksummasta ja leveämmästä materiaalista. Tukilaakeroitu kone on monimutkaisempi ja työläämpi huoltaa. Tukilaakeroitun koneen työskentelylevyyttä voi muuttaa erillisten laakeriyksiköiden vuoksi. Tämän toteutustavan koneet ovat usein huomattavasti raskaampia kuin ulokekaulaiset koneet. (Ongelin 1986, 16.)

Rulla-asemien akseleille asennettavat työkalut eli muovausrullat valmistetaan eri materiaaleista. Näitä ovat esimerkiksi rakenneteräkset, työkaluteräkset, hiiletyskarkaisuteräkset ja nitrattavat erikoisteräkset. Rullia koeajetaan yleensä pehmeinä ennen lämpökäsittelyä, jonka jälkeen rullat vielä koneistetaan. Lopuksi rullien pinta hiotaan ja pinnoitettujen materiaalien muovaukseen voidaan käyttää myös rullien pintakäsittelyä kovakromausta. Eritoten vaativampiin muovausprosesseihin, kuten karkealevyjen tai lujien materiaalien muovaukseen, käytetään rullien eteen ruiskutettavia voiteluainemaisia työkalupaleen hiertymisen vähentämiseksi. (Ongelin 1986, 23 , 53.)

3.2 Rullamuovausprosessin suunnittelu

Rullamuovaustekniikalla on mahdollista valmistaa monenlaisia, juuri käyttötarkoitukseen sopivia profiileja. Muutamia esimerkkejä rullamuovauksella valmistetuista kantavista profiileista on esitetty kuvassa 5. Kun työkalujen eli muovausrullien suunnittelu ja muovaamisen vaiheistus on tehty oikein, saadaan monimutkaisiakin profiileja valmistettua yhtä helposti kuin yksinkertaisiakin. Rullamuovausprosessi on kohtalaisen monimutkainen jatkuva muovausprosessi, josta oleva tietous on pitkälti kokemusperäistä. Vasta viime vuosikymmeninä yhdessä muun 3D-tietokonesuunnittelun kehittyessä myös rullamuovausprosessia sekä työkaluja on pystytty mallintamaan ja suunnittelemaan 3D-suunnitteluohjelmistoilla. (Ongelin 1986, 39.)



KUVA 5. Esimerkkejä rullamuovauksella valmistetuista profiileista (Ongelin 1986, 14.)

3.2.1 Profiilin suunnittelu

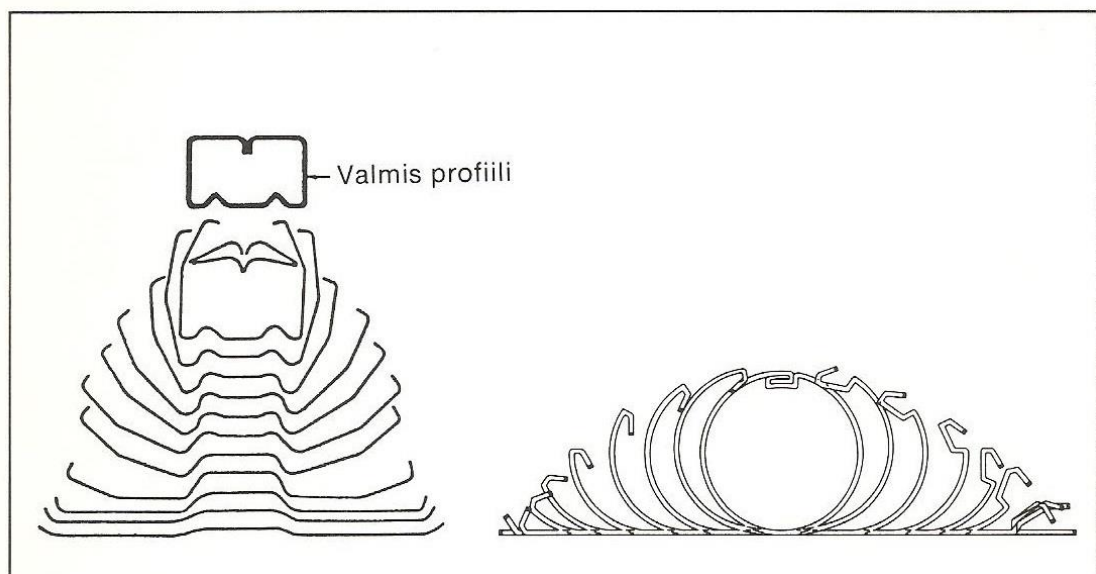
Rullamuovauksella valmistettavan profiilin suunnittelussa on otettava huomioon useita asioita. Profiilin geometria asettaa rajoitteita lujuusopillisesti, etenkin kun kyseessä on materiaalin pieni ainevahvuus ja korkeat laipat tai jos profiili sisältää laajoja, leveitä tasopintoja. Tällöin muovattava alue voi

lommahtaa, minkä vuoksi kappaleeseen syntyy muotovirheitä. Lommahdus voi syntyä taivutustapahtumassa syntyvistä jäännösjännityksistä, sillä rullamuovaustapahtuma ei ole koskaan puhdasta taivutusta esimerkiksi rullien kitkavoiman poikittaisen vedon vuoksi. Kylmämuovaus itsessään muodostaa pituussuuntaisia puristus- ja vetojännityksiä. (Ongelin 1986, 39 , 40 , 42.)

Profiilin suunnittelussa tulee ottaa huomioon myös taivutussäteiden koko. Pienet taivutussäteet kulluttavat muovausrullia nopeammin suuren pintapaineen takia, kun taas suurten taivutussäteiden takaisinjousto on suurempaa, mikä tulee huomioida muovauksen vaiheistuksissa. Takaisinjousto on kaikille kylmämuovausprosesseille ominainen ilmiö, joka aiheuttaa erilaisia muotovirheitä profiiliin. Näitä ovat esimerkiksi profiilin päiden aukeaminen, pystykaarevuus ja sivukaarevuus. Takaisinjousto vaikuttaa suuresti syntyvän profiilin mittatarkkuuteen ja sitä kompensoidaan kiinteillä tai säädettäville ylitaivutusrullilla ja niiden jälkeisillä kalibroitirullilla. Rullamuovauksen jälkeen muotovirheitä korjataan oikaisuilla. (Ongelin 1986, 40 , 50 , 51.)

3.2.2 Muovaamisen vaiheistus

Suunnittelija aloittaa muovaamisen vaiheistuksen usein valmiista profiilista. Siitä tulisi vaiheittain päätyä levitettyyn muotoon eli levyarkkiin tai -nauhaan, joka syötetään rullamuovauskoneeseen. Muovausvaiheista laaditaan yleensä niinkutsuttu Flower pattern -kuvio, joka esittää profiilin muovautumisen jokaisen vaiheen. Rullamuovattavan profiilin Flower pattern -kuvioista on esimerkkejä kuvassa 6. Rullamuovauksen vaiheistukseen vaikuttaa moni tekijä, kuten muovattava materiaali, sen paksuus ja mahdollinen pinnoitus, profiilin geometria, tuotteen toleranssivaatimukset, tuotantomäärä ja nopeus. (Ongelin 1986, 44 , 45.)



KUVA 6. Flower-pattern-kuvio (Ongelin 1986, 45.)

Muovausvaiheiden lukumäärään on kehitetty muutamia kaavoja, jotka määrittävät tarvittavat muovausvaiheet esimerkiksi joko vakiona säilyvän muovauskulman tai vakiona säilyvän taivutuskulman muutoksen mukaan. Kuten koko rullamuovausprosessi itsessään, myös muovaamisen vaiheistus

pohjautuu pitkälti kokemusperäiseen tietouteen, joskin kehittyneet tietokoneohjelmat pystyvät toimimaan avustavina työkaluina. Muovausprosessin täytyy sisältää riittävästi muovausvaiheita, jotta liian suuria kertaluonteisesti syntyviä jäännösjännityksiä ei tulisi kappaleeseen eikä materiaali rikkoutuisi. Muovaamisen vaiheistus on merkittävä myös rullamuovauskoneen ja sen työkalujen kestoiän kannalta. Muovaamisen vaiheistuksen hallinnalla on tärkeä osa syntyvän lopputuotteen laadun ja mittatarkkuuden kannalta. (Ongelin 1986, 44 - 47.)

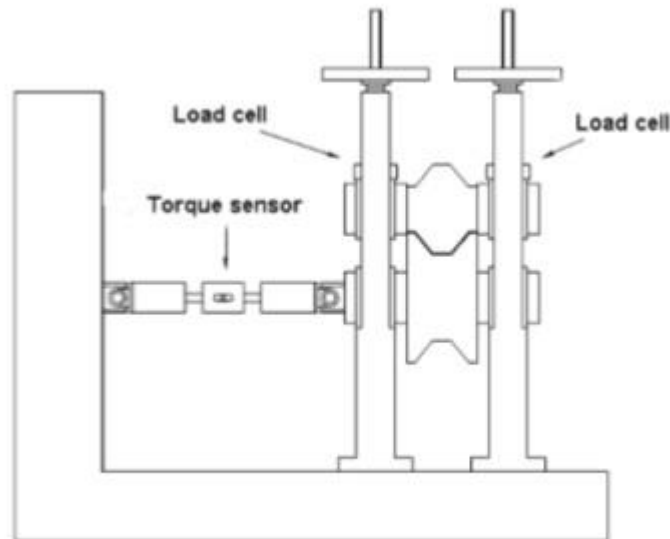
4 RULLAMUOVAUKSEN KUORMITUKSET

Tässä insinööriyössä selvitetään FEM-analyysejä käyttäen esisuunnitellun rungon ominaisuuksia ja luodaan uusia toteutusvaihtoehtoja. FEM-analyysejä varten täytyy määrittää kuormitustiedot, jotka syntyvät rullamuovausprosessissa profilia muovattaessa. Rullamuovaus on prosessi, jossa muovattavaan metalliin synnytetään vaiheittain pysyviä eli plastisia muodonmuutoksia valmistettaessa profilia. Jotta plastinen muodonmuutos alkaa tapahtua, rullamuovauksen tuottamien jännitysten tulee ylittää materiaaleille ominainen alempi myötölujuus R_{el} tai siihen verrattavissa oleva $R_{p0,2}$, joka on 0,2 %:n venymisraja. Yksinkertaistettuna rullamuovaus on eräänlaista jatkuvaa taivutusta, jonka kuormitushuiput ovat rulla-asemien kohdalla. Rullamuovausprosessiin liittyy kuitenkin monia asioita, kuten materiaalin muokkauslujittuminen muovaamisen aikana, takaisinjoustopuolien muovausvaiheiden välillä, levyn tai rullin syöttönopeus, materiaalin pituussuuntainen venyminen ja monimuotoiset puristus- ja vetojännitystilat. Nämä kaikki asiat yhdessä muodostavat vaikeasti arvioitavan kuormitus- ja muodonmuutospuolisuuden, jonka teoriaa on kirjallisuudessa käsitelty ja tutkittu vähän. Jos haluaisi tietää yksityiskohtaisesti kuormitustilanteen, tulisi se selvittää verifioidulla, jota ei tässä opinnäytetyössä kuitenkaan tehdä.

Rullamuovausprosessia rullavoimien ja rullien vääntömomentin osalta on tutkinut Michael Lindgren, jonka tohtorin tutkielmaa *Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed* (2009) hyödynnetään tässä opinnäytetyössä. Lisäksi perehdytään D. Bhattacharyyan tutkimusraportin *The prediction of roll load in cold roll forming* (1987) mukaiseen rullavoimien analyttiseen malliin. Näiden tutkielmien pohjalta tässä insinööriyössä sovelletaan Lindgrenin matemaattista vertikaalisuuntaista rullavoiman mallia ja rullavääntömomenttia, joka muunnetaan levyn kulkusuunnan mukaiseksi tangentialiseksi voimaksi muovausrullan kehälle sen geometriaa mukaisesti.

4.1 Lindgrenin kokeellinen tutkimus

Michael Lindgren on kokeellisesti selvittänyt tutkimuksessaan *Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed* (2009, liite 4), kuinka suurilla rullavoimilla ja rullien vääntömomentteilla vaatii muovata seitsemän eri teräslajia U-profiiliksi. Tutkimuksessa on käytetty Eckhardt rullamuovauskonetta, jossa on kuusi muovausosaa vaihevälillä 450 mm. Konetta käyttää taajuusmuuttajalla ohjattu kolmivaiheinen 15 kW tehoinen oikosulkumoottori ja ainoastaan alarullastot ovat käytettyjä. Rullamuovauskoneeseen liitettiin voima- ja vääntömomenttianturit kuvan 7 mukaisesti. Rullavoiman pystysuuntaisen voiman mittaukseen kokeissa käytettiin Honeywell Sensotec Sensor kuorma-antureita ja rullavääntömomentin mittaukseen Bursterin vääntöanturia, joka kiinnitettiin ala-akseliin. (Lindgren 2009, 35 - 36.)



KUVA 7. Periaatekuva mittalaitteistosta (Lindgren 2009, 36.)

Lindgrenin kokeellisessa tutkimuksessa eri materiaalit muovattiin neljässä vaiheessa suorasta nauhasta 80° taivutuskulmaan. Taivutustapana tutkimuksessa oli vakiona pysyvä kaaren pituus, eli taivutussäde vaihtuu eri muovausasetemien välillä, mutta taivutuskaaren pituus pysyy vakiona. Rullamuovauskone muokkasi kahta laippaa yhtä aikaa. Muovaamattoman nauhan leveys oli 84 mm ja lopullisen, 80° kulmaan taivutetun profiilin laippojen pituus 23,3 mm, pohja 23,3 mm ja taivutussäde 5,5 mm, kun muovattiin 1,0 mm ainevahvuutta. Mittaustulokset otettiin kolme kertaa jokaiselle erilliselle taivutuskulmille nauhan muovautuessa aikavälillä 0 - 60 s, jolloin saatiin laskettua keskimääräiset staattiset kuormitustulokset. (Lindgren 2007, 45, liite 4.)

Rullavoima ja erityisesti rullien vääntömomentti riippuu paljon materiaalin ja muovausrullien välyksestä. Välykseksi säädettiin liuskamitalalla tarkastaen 10 – 15 % materiaalin paksuudesta, jotta materiaali ei puristuisi liikaa ja antaisi vääriä mittaustuloksia. Rullamuovauskoneen ensimmäinen ja viimeinen rulla-asema olivat vetäviä, eli niissä oli puristustila levyn kulkiessa koneen läpi. Kokeessa käytettiin reilusti voiteluemulsiota muovaukseen. Nauhan pinnankarheus R_z , eli matalimman ja korkeimman laakson välinen eromitta, oli $1\mu\text{m}$. Kokeessa käytetty nauhan syöttönopeus oli 9,7 m/min, joka on alhaisempi kuin yleensä tuotannossa ja vaikuttaa jonkun verran rullien kulmanopeuden kautta vääntömomentin tuloksiin. Lisäksi tutkittiin hiiliteräksiä ja ruostumattomia teräksiä. Tutkimuksessa muovatut materiaalit, ainevahvuudet ja 0,2% venymisrajat ovat esillä taulukossa 1. (Lindgren 2009, 39.)

TAULUKKO 1. Tutkimuksessa testatut materiaalit (Rönkkö 2015, pohjautuen Lindgren 2007, 45.)

Materiaali	t (mm)	$R_{p0,2}$ (MPa)
DC01	1,46	193
Docol 800DP	1,48	533
Docol 1200M	1,46	1129
Docol 1200M	1,22	1119
Hytens 1200	1,00	1018
SS2333	1,00	301
Hytens X	1,00	286

4.2 Lindgrenin mallit ja soveltaminen

Kokeellisen tutkimuksen tuloksina Lindgren sai mitattua seitsemän eri materiaalin muovauksen rullavoimat ja rullien vääntömomentit. Tulokset koskevat yksittäistä rulla-asemaa. Mittaustulosten pohjalta hän kehitti matemaattisen mallin, kuinka laskea rullamuovauksen kuormitukset, esimerkiksi taivutuskulmassa $\theta = 60^\circ$, eli kun nauha muovautuu 40° kulmasta 60° kulmaan. Tämä rullavoiman malli ilmoittaa kahden laipan taivuttamisesta yhteensä aiheutuvan voiman. Matemaattinen malli on yksinkertaistettu ja se ottaa huomioon taivutuskulman, ainevahvuuden ja materiaalin myötörajan. Kahden laipan yhtäaikaisesta taivuttamisesta ylärullaan syntyvälle rullavoimalle Lindgren johti kaavan 1, jossa rullavoima F_{Load} (N) on

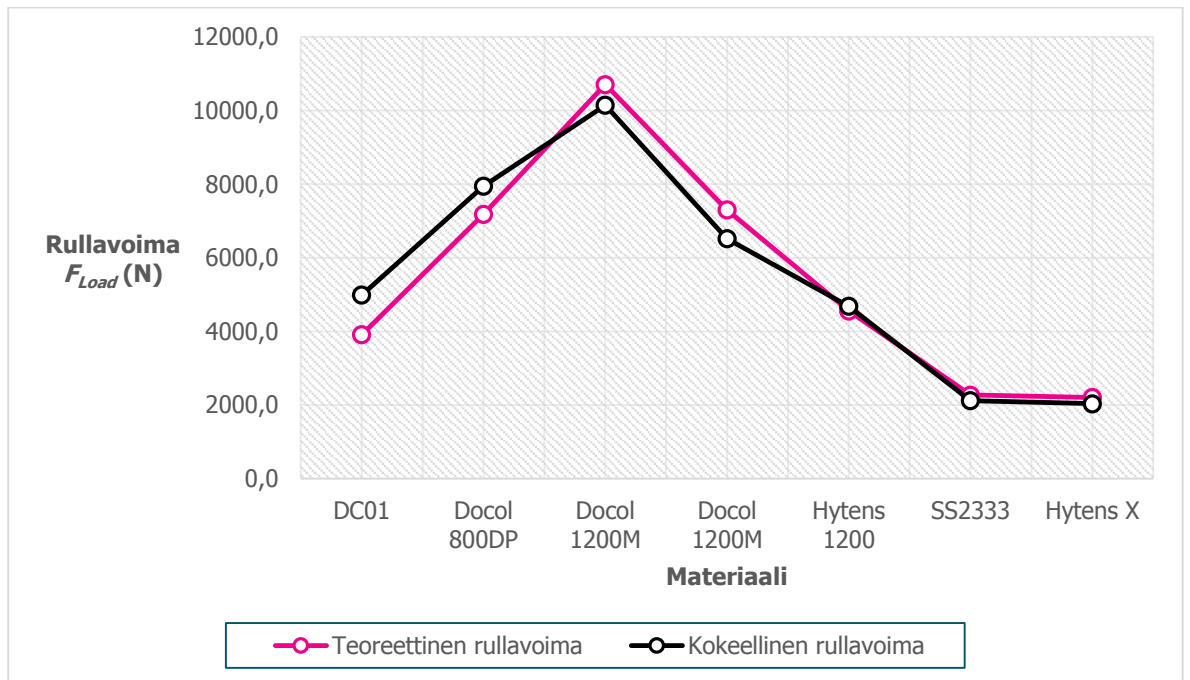
$$F_{Load} = k_1(\theta)t^{k_2}s^{k_3}. \quad (1)$$

Rullien vääntömomentille samassa tilanteessa Lindgren johti kaavan 2, jossa rullien vääntömomentti T_{Torque} (Nm) on

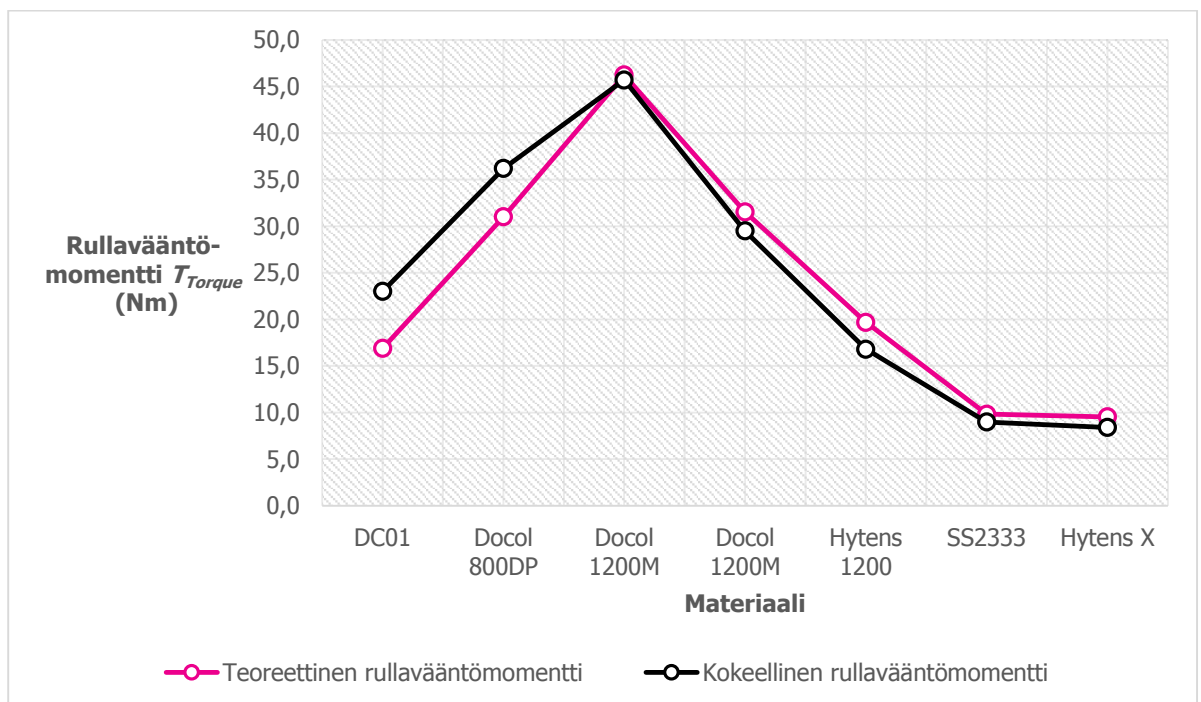
$$T_{Torque} = k_4(\theta)t^{k_5}s^{k_6}. \quad (2)$$

Kaavoissa 1 ja 2 esiintyvä t on materiaalin ainevahvuus (mm) ja s on materiaalin myötöraja tai 0,2 % venymisraja (MPa). Kaavoissa Y ja X vakiot ovat $k_1(\theta) = 88$, $k_4(\theta) = 0,38$ ja eksponentit $k_2 = k_5 = 2,1$ ja $k_3 = k_6 = 0,57$. Tutkimuksen johtopäätös oli, että kuormitustilanteen voimat ja vääntömomentit kasvavat tekijöillä $t^{2,1}$ ja $s^{0,57}$ (Lindgren 2009, 54 ; (Lindgren 2007, 45.) Yhtälöistä 1 ja 2 on tärkeää huomata niiden olevan kalibroitu siten, että annetuista lukuarvoista tulokset tulevat rullavoiman osalta Newtonineina (N) ja rullavääntömomentin osalta Newtonmetreinä (Nm), vaikka sijoitettujen arvojen yksikkötarkastelu ei anna samaa tulosta.

Tässä työssä laskettiin käytettyjen terästen rullavoimat ja rullavääntömomentit kaavojen 1 ja 2 mukaan ja vertasin niitä Lindgrenin tutkimuksessa kokeellisesti saatuihin arvoihin. Kuvio 1 näyttää, kuinka tarkasti kaavalla 1 laskettu rullavoima noudattaa kokeellisesti mitattua rullavoimaa. Kuvio 2 näyttää samanlaisen vertailun kaavan 2 tulosten perusteella saaduista rullavääntömomentin arvoista.



KUVIO 1. Teoreettisen ja kokeellisen rullavoiman vertailu (Rönkkö 2015, pohjautuen Lindgren 2009, liite 4.)



KUVIO 2. Teoreettisen ja kokeellisen rullavääntömomentin vertailu (Rönkkö 2015, pohjautuen Lindgren 2009, liite 4.)

Vertailun pohjalta voi huomata, että matemaattiset mallit on saatu hyvin vastaamaan kokeellisia tuloksia sekä rullavoimissa, että rullavääntömomenteissa. Lindgrenin mallit ovat yksinkertaistettuja ja kokeellisten tutkimusten pohjalta todennettuja ja niitä tullaan käyttämään tässä opinnäytetyössä. On toki ymmärrettävä, että mallit eivät täysin vastaa todellista kuormitustilannetta, sillä siihen sisältyy paljon muitakin muuttujia. On myös huomattava, että näitä matemaattisia malleja tulee käyttää harkiten, mikäli muovaamisen vaiheistuksessa on suuria eroja esimerkiksi taivutuskulman osalta. Lisäksi

eri materiaalien käyttäytyminen on vaihtelevaa plastisessa muodonmuutoksessa, joten kaavojen vakiot eivät välttämättä pidä paikkaansa. Matemaattisen mallin kalibroimiseksi tulisi suorittaa uusi testi oikean materiaalimallin luomiseksi.

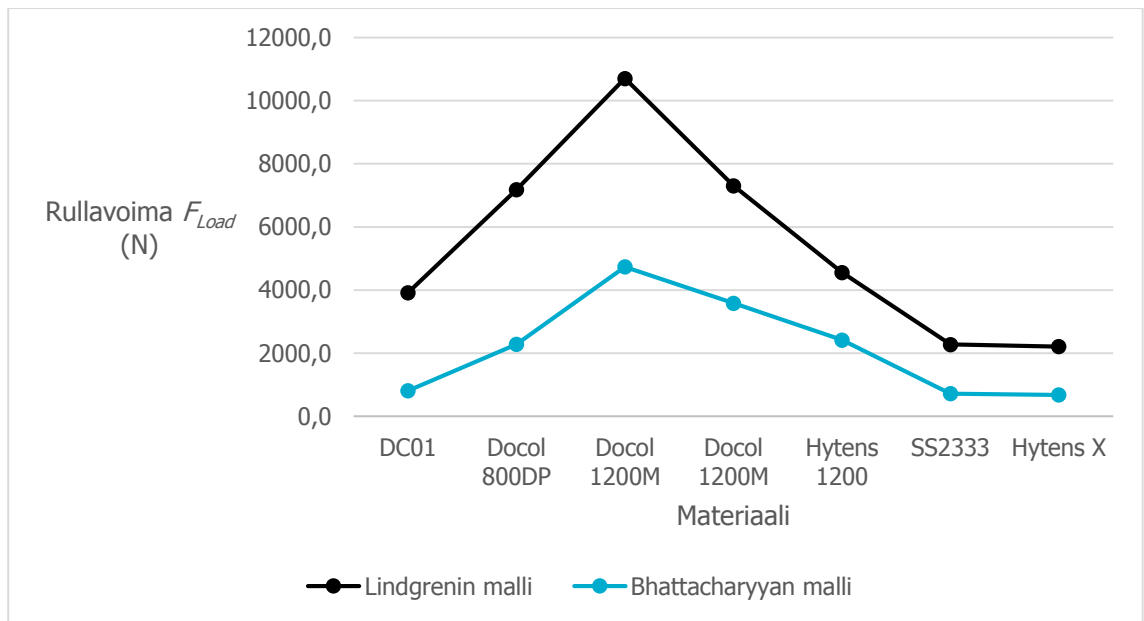
4.3 Bhattacharyyan analyttinen rullakuormituksen malli

Michael Lindgrenin tutkimuksessa *Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed* (2009, 12 - 13) on esitetty D. Bhattacharyyan tutkimuksessa *The prediction of roll load in cold roll forming* (1987, 363 - 379) johdettu matemaattinen malli yksittäisen rulla-aseman kuormasta muovattaessa U-profiilia. Malli pohjautuu plastisen työn perusteella johdettuun monimutkaiseen kaavaan, joka sisältää useita oletuksia ja yksinkertaistuksia. Bhattacharyyan matemaattinen malli sisältää kaksiosaisen kaavan, jonka ensimmäinen termi tulee profiilin taivutuksesta ja venyttämisestä. Toinen termi sisältää kuormituksen, joka syntyy profiilin taipuessa hieman alaspäin ja sen noston ennen seuraavaa rulla-asemaa. Toista termiä ei huomioida verrattessa sitä Lindgrenin kaavaan 1, sillä kaava 1 ilmoittaa vain yksittäisen rulla-aseman kuormituksen. Lisäksi toista termiä hyödynnettäessä tulisi tietää rullamuovauskoneen geometria täysin ja se, paljonko työkalu taipuisi alaspäin ennen seuraavaa rulla-asemaa todentaen tämä oikeassa muovausprosessissa. Todentaminen ei ole mahdollista, kun työn aiheena on esisuunnitteluvaiheessa oleva rullamuovauskone. Bhattacharyya johti kaavan 3 rullavoimalle F_{Load} :

$$F_{Load} = s \sqrt{\frac{2t^3\theta^3a}{3\sin^2(\theta)}} , \quad (3)$$

jossa s on materiaalin myötölujuus (MPa), θ on taivutuskulma (rad), t on materiaalin ainevahvuus (mm) ja a on taivutetun laipan pituus (mm). (Lindgren 2009, 13.)

Tämän analyttisen mallin kaavalla 3 lasketut rullavoimat jäivät alhaisemmiksi kuin Lindgrenin kaavalla 1 lasketut arvot. Kuviossa 3 on esitetty vertailu rullavoimista matemaattisten mallien pohjalta. Bhattacharyyan analyttistä mallia rullavoimasta ei sovelleta tässä opinnäytetyössä, koska se on monimutkaisempi ja toinen termi sisältää muuttujia, joita ei voi vielä määrittää. Lindgrenin kaavat ovat paljon helpommin sovellettavissa tähän opinnäytetyöhön.



KUVIO 3. Lindgrenin ja Bhattacharyyan matemaattisten mallien vertailu (Rönkkö 2015, pohjautuen Lindgren 2009, 12 - 13, liite 4.)

5 TUOTEKEHITYS

Tuotekehitys on prosessi, jonka tarkoituksena on tuottaa uusia tuotteita tai halutunlaisia ja hyödynnettäviä asioita nykyiseen tuotteeseen. Tuotekehitystä tehdään jatkuvasti, jotta tuotteiden kilpailukyky, valmistettavuus, kustannustehokkuus, laatu ja elinkaari kehittyisivät. Tuotekehitykseen on lukemattomia keinoja, menetelmiä, ajattelumalleja ja apuvälineitä, joita voi käyttää apuna pyrkiessä täyttämään sille asetetut tavoitteet. Osa näistä keinoista on puhtaasti tuotteen teknisten ratkaisujen parantamiseen käytettyjä keinoja, mutta osa on myös aatteelliselle puolelle tarkoitettuja, kuten tuotekehitysprosessin läpivientiin tarkoitettuja keinoja. Usein tuotekehitystarpeen taustalla on jokin konkreettinen ongelma olemassaolevassa tuotteessa, johon haetaan parannusta.

5.1 Tuotekehityksen yleiset vaiheet

Tuotekehitys on prosessi, joka alkaa asetetun tehtävän suunnittelusta ja määrittämisestä. Siihen voi kuulua myös markkina-analyysijä sekä yhtiön tilanteen kartoitusta. Alussa selvitetään tuotekehitykselle saatavat resurssit eli esimerkiksi työvoima, työtilat, tietotaito ja taloudellinen tilanne. Sitten luodaan tuotteelle vaatimusluettelo, joka kertoo mitä tuotteen tulee olla ja asettaa reunaehdot suunnittelulle. Se voi sisältää monia erilaisia vaatimuksia, kuten teknisiä, visuaalisia, taloudellisia ja eettisiä. Näitä vaatimuksia pidetään suunnittelun spesifikaatioina. (Pahl, Beitz, Feldhusen, Grote 2007, 130.)

Seuraavaksi keskitytään tuotekehitystarpeen taustalla olevien ongelmien tai tarpeiden määrittämiseen. Kun ne ovat tiedossa, voidaan vaatimusluettelo noudattaen kehittää ratkaisuja ja luonnoksia. Ratkaisujen kehittämiseen voi saada suuntaa antavia ideoita esimerkiksi aivorihellä tai benchmarkaamalla eli selvittämällä onko vastaavaa tehty aikaisemmin ja miten se on tehty. Eri luonnosten joukosta tulee valita yksi kehitettävä periaateratkaisu eli konsepti. Periaateratkaisun valintakeinoja on useita. Yhtenä keinona voi olla esimerkiksi pisteyttää vaatimusluettelon ominaisuudet tärkeyden mukaan erisuuruksilla kertoimilla ja vertailla eri luonnosten saamia yhteispisteitä. (Pahl ym. 2007, 130.)

Konseptin pohjalta luodaan eri vaihtoehtoja, joissa suunnitellaan tuotteen rakenne ja materiaalivalinnat ja voidaan tehdä esimerkiksi matemaattisia tai tietokoneavusteisia simulaatioita tuotteen ominaisuuksista. Vaihtoehtoista tulee valita yksi jatkoon kehitettävä versio, jonka valintaan voi käyttää samoja keinoja kun konseptin valintaan. Tämä kaikki tulee suorittaa vaatimusluettelo huomioiden. Valinnan jälkeen tuotteella on alustava ulkoasu, rakenne ja ominaisuudet. Määritettyyn ja viimeistelyyn tuotteeseen päästään kun on tutkittu ja eliminoitu tuotteen heikot kohdat, tarkastettu virheet, optimoitu valmistustekniikka ja tekniset yksityiskohdat sekä minimoitu kustannukset. Tämän vaiheen jälkeen voidaan luoda varaosaluettelot ja osa- sekä kokoonpanopiirrustukset sekä muut dokumentit ennen tuotteen tuotantoa. Tuotekehitysprosessiin voi kuulua myös tuotteen logistiikan huomioiminen sekä käyttöohjeiden tekeminen. Näiden vaiheiden jälkeen tuotekehitysprosessin ratkaisu on saavutettu. (Pahl ym. 2007, 130.)

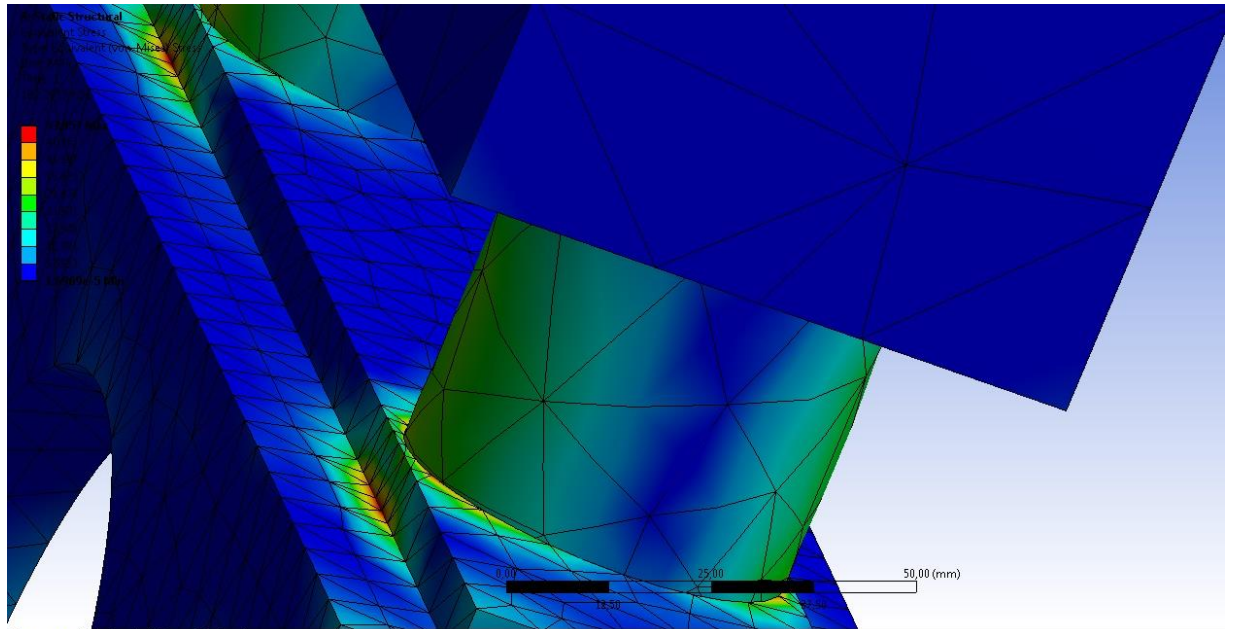
5.2 Finite Element Method

Tuotekehityksen työkaluina voidaan käyttää useita menetelmiä. Yksi näistä on FEM, joka tulee sanoista Finite Element Method, eli vapaasti suomennettuna äärellisten elementtien menetelmä. Se on numeerinen analysointitekniikka, joka tuottaa ratkaisuja ja tietoa erilaisiin ilmiöihin. FEM on työkalu, joka kehitettiin alun perin lentokoneiden runkojen jännitysten tutkimiseen, mutta sillä voidaan nykyään yhdessä FEM:iin perustuvien tietokoneohjelmien avustuksella tutkia muun muassa rakenteiden jännityksiä, siirtymiä, muodonmuutoksia, lämpösäteilyä, virtauksia ja värähtelyä. Elementtimenetelmää hyväksikäyttäen tietokoneella ratkaistuja analyysejä nimitetään FE-analyyseiksi tai lyhennettynä FEA. Nykyisten tietokoneiden tehokkuuden ansiosta FEM-menetelmään pohjautuvat ohjelmistot pystyvät ratkaisemaan monimutkaisiakin analyysejä nopeastikin, joten siitä on tullut hyvin yleinen työkalu suunnittelijoille. Suosituimpia kaupallisesti saatavia FEM-ohjelmistoja ovat muun muassa Ansys, Abaqus, Rasna ja MSC/Nastran. Nämä edellä mainitut ohjelmistot ovat täysiverisiä analysointiohjelmistoja, mutta myös mekaniikkasuunnitteluohjelmistoissa liitännäisinä toimivat kevytohjelmat pystyvät suorittamaan yksinkertaisimpia FEM-analyysejä. (Huebner, Dewhirst, Smith, Byrom 2001, 3, 14.)

Elementtimenetelmä perustuu tutkittavan rakenteen jakamiseen lukuisiin osiin. Näitä osia nimitetään elementeiksi, joita on lukuisia erityyppisiä eri käyttötarkoituksiin. Elementit yhdistyvät toisiinsa pisteissä, joita nimitetään solmuiksi. Ratkaisemalla yksittäisen elementin käyttäytyminen kuormituksessa päästään koko rakenne läpikäyden lopullisiin tuloksiin. Elementtityypin mukaan, solmupisteet siirtävät eri tavalla esimerkiksi siirtymiä ja kuormituksia, mikä tulee ottaa huomioon analyysiä tehtäessä. Eri elementtityyppien yhdistelmissä tulee ymmärtää niiden väliset vapausasteet. Käsinlaskien on mahdollista suorittaa elementtimenetelmällä analyysi vaikkapa yksinkertaisesta ristikkorakenteesta, mutta se muodostuu nopeasti hyvin työlääksi ja aikaavieväksi elementtimenetelmään kuuluvan matriisilaskennan vuoksi. (Westerholm 2015.)

Tietokoneohjelmistoilla tehtävät FE-analyytit perustuvat FEM:n, mekaniikan, statiikan, lujuusopin, dynamiikan ja matematiikan lainalaisuuksiin. Esimerkki rakenteen jännitysten tutkimisen tuloksista FE-analyyssillä on esillä kuvassa 8, jossa eri värit ilmaisevat jännitysten eri suuruuksia. Mekaanisen FE-analyysin suoritus menee pääpiirteissään niin, että analyysejä varten muodostetaan rakenteesta 3D-malli mekaniikkasuunnitteluohjelmalla. Sen jälkeen FEM-ohjelmistoilla luodaan siihen eri elementtityypeistä koostuva elementtiverkko, jonka ominaisuuksia, kuten esimerkiksi tiheyttä voi paikallisesti suurentaa tarkempien tuloksien saamiseksi. Tämän jälkeen analyysiin syötetään tiedot, kuten rakenteen materiaali, kuormitukset ja reunaehdot. Halutut tulokset luetaan huomioiden asetetut reunaehdot sekä analyyssin mallintamisessa mahdollisesti syntyneet virheet. FEM-ohjelmistojen tuottamat analyytit saa suoritettua näennäisen helposti ja on olemassa vaara, että niihin luotetaan liikaa. FE-analyysi on aina rajalliseen tarkkuuteen yltävä menetelmä, joka ammattitaitoisesti ja suurella kokemuksella hyödynnettynä voi tuottaa melko lähellekin todellisuutta vastaavia tuloksia. FE-analyyssin tulosten todenmukaisuuteen vaikuttavia tärkeimpiä tekijöitä ovat:

- kuormitustilanteen mallintaminen
- reunaehtojen mallintaminen
- rakenteen mallintaminen
- elementtiverkon asianmukainen käyttö. (Westerholm 2015.)



KUVA 8. Esimerkki yksityiskohdasta FE-analyysissä (Rönkkö 2015.)

6 PREFAB-LINJAKONSEPTIN RULLAMUOVAUSKONEEN FE-ANALYYSIT

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli tutkia esisuunnitellusta rullamuovauskoneesta seuraavia asioita hyödyntäen työssä selvitettyä rullamuovauksen kuormitusmallia:

- Miten esisuunniteltu rullamuovauskoneen runko ja muovausasemat käyttäytyvät kuormitustilanteessa, eli kun sillä muovataan levyä.
- Vertailla rakenteen ominaisuuksia, jos yläakseli on tukilaakeroitu molemmista päistään tai että yläakseli on vain ulokekaulaisesti laakeroitu.
- Tutkia, kuinka pienahitsausseamien pituudet vaikuttavat koneen ominaisuuksiin kuormitustilanteessa (jatkuva hitsausseama verrattuna katkonaiseen).
- Kuinka paljon siirtymiä ylä- ja alarullaan syntyy muovattaessa profiilia.
- Selvittää rakenteessa esiintyvien jännitysten suuruusluokka ja sijainti kuormituksen alaisena.

Rullamuovausrullien välisen siirtymän suuruus vaikuttaa suoraan valmistuvan profiilin geometriaan ja toleranssiin, joten se on tärkeä selvittää. Jännitysten sijainnin ja suuruuksien tietoa hyödynnetään, kun kehitetään uusi vaihtoehto rullamuovauskoneen rungon rakenteelle. Rullamuovausprosessista aiheutuva kuormitustilanne mallinnettiin analyyseihin soveltaen Lindgrenin tutkimuksessa johdettuja matemaattisia malleja, kaavoja 1 ja 2. Työssä käytettiin rullamuovauskoneen 3D-mallintamiseen SolidWorks-ohjelmistoa. FE-analyysejä tehtiin kahdeksalle eri 3D-mallinnukselle, jotta pystyttiin vertailemaan, miten rakenteen mallintamistapa vaikuttaa FE-analyyseiden lopputuloksiin. FE-analyysejä tehtiin Ansysin Workbench 15.0 -ohjelmalla.

6.1 Analyyseiden toteutus

Tässä työssä tehtiin kahdeksan analyysiä, joiden pohjalta rakenteita tutkittiin. Analyyseiden vertailu tehtiin eri rakennemallien mukaan kahdessa ryhmässä:

- Kummankin akselien ulokekaulaiset rakenteet (analyysejä 1 - 4)
- Yläakselien tukilaakeroidut rakenteet (analyysejä 5 - 8).

Analyyseiden kuormitusehdot ja reunaehdot olivat identtisiä. Näin ollen vertailu voitiin ryhmien sisällä suorittaa ja arvioida, miten mallinnustavat ja rakenteet eroavat ominaisuuksiltaan. Oikean rullamuovauskoneen kotelorunko pienahitsataan eri ainevahvuuksista teräslevyistä, mutta analyyseissä 1 ja 5 on kokeiltu yhdestä osasta mallinnettua solidia kotelorunkoa ja sen vaikutusta tuloksiin. Kaikissa analyyseissä ala-akselit olivat ulokekaulaisesti laakeroituja.

Toteutetuissa analyyseissä olivat rakenteet, joissa:

1. Yläakseli oli ulokekaulaisesti laakeroitu ja kotelorunko yhdestä osasta solidina
2. Yläakseli oli ulokekaulaisesti laakeroitu ja kotelorunko teräslevyistä

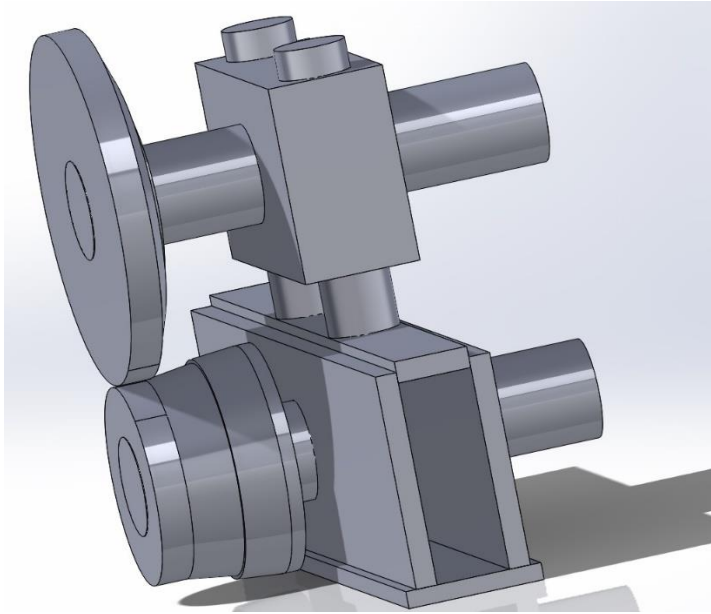
3. Yläakseli oli ulokekaulaisesti laakeroitu, kotelorunko oli teräslevyistä sekä pienahitsit mallinnettuna koko kotelorungon pituudelta
4. Yläakseli oli ulokekaulaisesti laakeroitu, kotelorunko oli teräslevyistä sekä pienahitsit katkonaisesti hitsatusti mallinnettuna
5. Yläakseli oli tukilaakeroitu ja kotelorunko oli yhtä solidia
6. Yläakseli oli tukilaakeroitu ja kotelorunko oli teräslevyistä
7. Yläakseli oli tukilaakeroitu, kotelorunko teräslevyistä sekä pienahitsit mallinnettuna koko kotelorungon pituudelta
8. Yläakseli oli tukilaakeroitu, kotelorunko teräslevyistä sekä pienahitsit katkonaisesti hitsatusti mallinnettuna.

6.1.1 3D-mallit ja Ansyksen materiaali

FE-analyysijä varten mallinnettiin kahdeksan erilaista 3D-mallia rakenteista. Työssä tutkittavien asioiden selvittämiseksi ei tarvinnut mallintaa runkoa täydeltä pituudeltaan vaan tarkastella yksittäistä rullamuovausvaihetta, jota kuormitetaan eniten. Yksittäisen rullamuovausvaiheen analyysin tulosten pohjalta pystyisi kehittämään vaihtoehtoisia ratkaisua. 3D-mallien geometriaan liittyvät dokumentit työhön saatiin Samesor Oy:ltä.

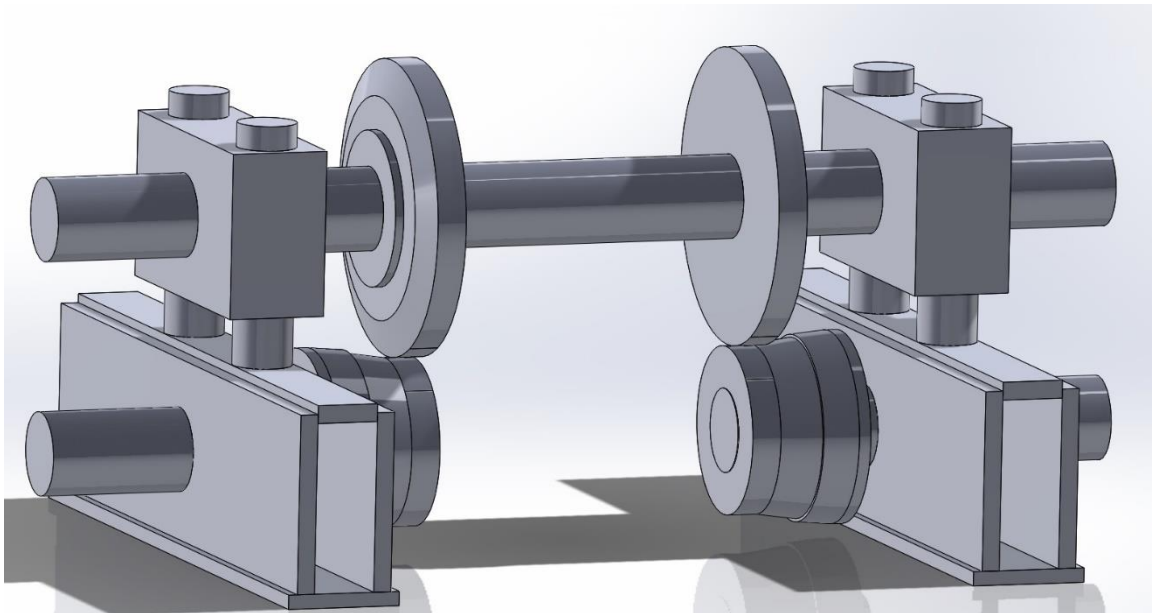
Pelkän kotelorungon mallintaminen onnistui pintaelementeillä, jolloin siihen sai muodostettua tiheän ja jouhevan elementtiverkon Ansyksen simuloinnissa. Koko rakenteen mallintaminen pintaelementeillä ei kuitenkaan tuonut elementtiverkkoon haluttua jouhevuuutta esimerkiksi akseleiden vuoksi, joten 3D-mallinnuksessa päädyttiin käyttämään solidielementtejä. Analyysijä varten rakenteen geometriaa kannatti yksinkertaistaa, joten esimerkiksi akseleiden olakkeita, voimansiirron hammasrattaita ja kiilauria ei ollut tarpeen mallintaa. Myöskään ylämuovausaseman korkeussäätöön liittyviä komponentteja ei ollut tarpeen mallintaa. Kotelorunkoa mallinnettiin tarkoituksella pidemmäksi kuin vaiheväli koneessa oli, jotta siirtymät kappaleen tuennan jälkeen tulisivat esille.

Ulokekaulaisesti laakeroitun koneen 3D-mallit sisälsivät toisen puolen kotelorungon, yläaseman, pystyjohteet, akselit, kummatkin muovausrullat sekä analyysissä 3 ja 4 pienahitsausseamat. Toista puolta ei tarvinnut mallintaa sen symmetrisyyden vuoksi. Esimerkki analyysissä 2 käytetystä 3D-mallista on esillä kuvassa 9.



KUVA 9. 3D-malli, jota käytettiin analyysissä 2 (Rönkkö 2015.)

Tukilaakeroitujen koneiden 3D-mallit sisälsivät kummankin puolen kotelorungon, yläasemat, pystyjohteet, akselit, kummatkin muovausrullat sekä analyyseissä 7 ja 8 pienahitsausaummat. Näissä mal-
leissa on mallinnettu toinenkin puoli tukilaakeroidun yläakselin vuoksi. Ala-akselit ovat näissä mal-
leissa lyhyitä ulokekaulaisesti laakeroituja akseleita. Kuva analyysissä 6 käytetystä 3D-mallista on
esillä kuvassa 10.



KUVA 10. 3D-malli, jota käytettiin analyysissä 6 (Rönkkö 2015.)

3D-mallien osat kasattiin kokoonpanoiksi ja tallennettiin lopulta part.-tiedostomuotoon, jotta niiden siirtäminen Ansysiin olisi mahdollisimman helppoa. Ansys lukee eri osista kasatun kokoonpanon ja luo automaattisesti osien väliset kontaktit. Näiden kontaktien mukaan rakenne käyttäytyy kuormi-
tuksessa. Automaattinen kontaktien luonti perustuu osien välisien rajapintojen etäisyyksiin ja on
säädetävissä. Riippuen analyysistä näitä kontakteja täytyi manuaalisesti muokata vastaamaan to-
dellista tilannetta. Jokaisesta analyysistä täytyi poistaa kontaktit, jotka syntyivät muovausrullien vä-

liin. Analyysissä 1 ja 5 solidi yhdestä osasta mallinnettu kotelorunko käyttäytyi oikein. Analyysissä 2 ja 6 ohjelma teki automaattisesti oikeat kontaktit teräslevyjen välille ja rakenne käyttäytyi oikein kuormituksessa. Analyysissä 3 - 4 ja 7 - 8, joissa oli pienahitsausaumot, täytyi kaikkien teräslevyjen pintojen keskinäiset kontaktit poistaa ja jättää jäljelle vain pienahitsien kosketuspintojen kontaktit niihin. Näin rakenne käyttäytyi oikein ja siitä saatiin todenmukaisimmin tulkittua kuinka se käyttäytyy hitsattuna.

Kaikkiin 3D-malleihin mallinnettiin Split-line-toimintoa hyödyntäen oletetut levyarkin kosketuspinnat rulliin, joihin pystysuuntaiset voimat voitiin määrittää FE-analyysia tehtäessä. Muovausrullien pintaan mallinnettiin lisäksi Split-Line-toiminnolla akselin suuntainen viiva, josta saatiin haluttu Y-suuntainen siirtymä tuloksiin. Lisäksi kotelorungon pohjaan mallinnettiin rungon tuentaa vastaavat suorakulmiot projektoina Split-Line-toiminnolla kappaleen tukemiseksi FE-analyysissä.

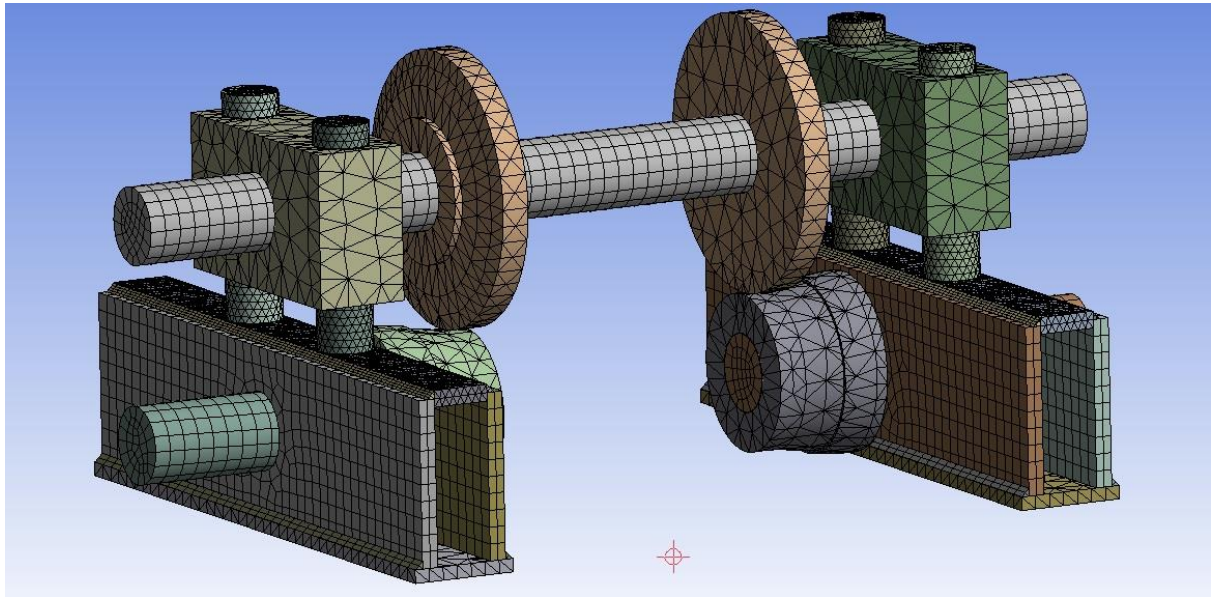
Analyysien tuloksiin vaikuttaa luonnollisesti myös siinä käytettävä rakenteen materiaali. Rulla-muovauskoneen runko tullaan valmistamaan S355-rakenneteräksestä. Ansyksen materiaalikirjastossa on valmiina yksi rakenneteräs, jonka myötö- ja murtolujuudet piti päivittää Engineer Datan kautta vastamaan S355-ominaisuuksia. Muutettuja parametreja olivat veto-puristusmyötölujuus ja murtolujuus. Tämä valittu Ansyksen Structural Steel -materiaali soveltuu käytettäväksi lineaarisiin analyysihin, joka on tässä kyseessä. Materiaalin valinta ja ominaisuuksien muokkaus on tärkeä osa realististen tulosten saamiseksi analyysistä.

6.1.2 Elementtiverkon optimointi

Elementtiverkko luotiin Mesh-toiminnolla ja aluksi ohjelman annettiin luoda automaattinen verkko rakenteeseen. Tämän analyysin tärkein tieto oli saada siirtymien suuruus tietoon muovausrullien muovauspintojen kohdalta. Siirtymiä tutkittaessa elementtiverkon tiheyden ei tarvitse olla paikallisesti tiheämpää, vaan samanlaiset tulokset saadaan aikaan vakioitiheyksisellä elementtiverkolla. Paikallisten jännitysten tutkiminen kuului myös tähän työhön siltä osin, että suurimpien jännitysten sijainti ja suuruus saataisiin selville.

Ohjelmassa on kaksi eri lisenssiä. Ensimmäinen lisenssi asettaa rajoitteita analyysin elementtiverkon solmujen ja elementtien lukumäärälle. Työssä käytettiin kuitenkin toista lisenssiä, jossa ei ollut rajoitteita solmujen ja elementtien lukumäärän suhteen. Esimerkkinä elementtiverkon optimoinnista on analyysi 7. Tässä analyysissä ohjelma generoi automaattisilla asetuksilla elementtiverkon, jossa oli noin 10200 elementtiä ja noin 28000 solmua. Elementtiverkkoa kokeiltiin tihentää asettamalla manuaalisesti yhden elementin kooksi 15 mm kauttaaltaan, sekä tarkentamalla tiheyttä pystyjohteiden, yläteräslevyn ja kahden ylähitsin osalta niin, että elementin koko oli 7,5 mm. Nämä olivat suurimpien jännitysten alaisina rakenteessa. Tällöin elementtien lukumäärä kasvoi 78000:een solmujen lukumäärän olessa noin 164000. Elementtiverkon tihentäminen toi tarkkuutta lähinnä jännitysten suuruuksiin. Vertailua tehtiin myös muilla elementtien kooilla. Tiheämmän verkon käyttäminen oli perusteltua, kun analyysin laskenta-aikakaan ei merkittävästi kasvanut muutoksella. Esimerkki analyysissä

7 käytetystä tiheämmästä elementtiverkosta on kuvassa 11. Samalla periaatteella tihennettyä elementtiverkkoa käytettiin jokaisessa analyysissä 1 - 8.



KUVA 11. Manuaalisesti tihennetty elementtiverkko rakenteessa (Rönkkö 2015.)

6.1.3 Kuormitustilanteen mallintaminen

Kuormitustilanteen mallinnuksessa hyödynnettiin kaavoja 1 ja 2, joilla saatiin selville rullavoimat ja rullavääntömomentit. On tärkeää huomata, että kaavat on kalibroitu siten, että yksikkötarkastelu ei päde. Suurin kuormitus rakenteeseen tulee, kun muovataan materiaalia, jonka ainevahvuus t on 2,0 mm ja $R_{p0,2}$ on 420 MPa. Kaikkein kuormittavin muovausvaihe arvioitiin ja se valittiin suurimman taivutuskulman mukaan. Muovattavan rakenneprofiilin Flower pattern -kuvion perusteella suurin yksittäinen taivutuskulma oli noin 16° , jolloin kaavalla 1 laskettava rullavoima oli sovellettavissa Ansys:n analyysiin. Rullamuovauskone taivuttaa levyä kahta laippaa ylöspäin samaan aikaan, joten yläakseleihin syntyvä rullavoima F_{Load} lasketaan pohjautuen kaavaan 1 ja se on yhteensä

$$F_{Load} = k_1(\theta)t^{k_2}s^{k_3} \quad (3)$$

$$F_{Load} = 88 * 2,0\text{mm}^{2,1} * 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}^{0,57} = 11800,427 \text{ N} \approx 11800 \text{ N}.$$

Yhden akselin rullien rullakohtainen rullavoima F_{Rulla} lasketaan kaavalla 4 ja se on siis $F_{Load}/2$.

$$F_{Rulla} = \frac{F_{Load}}{2} = \frac{11800,427 \text{ N}}{2} = 5900,2135 \text{ N} \approx 5900 \text{ N}. \quad (4)$$

Newtonin voiman ja vastavoiman laista seuraa, että yhtä suuri rullavoima syntyy myös alamuovausrullaan, kun levyä rullamuovataan. Rullavoimat kohdistettiin 3D-malliin piirrettyihin rullan kosketustasoihin ja ne mallinettiin käyttäen Force -toimintoa.

Lindgrenin kaavalla 2 laskettu vääntömomentti kertoo vaadittavan ala-akselin vääntömomentin, joka vaaditaan levyn kuljettamiseksi eteenpäin muovattaessa. Vääntömomentti hammaspyörältä välitetään akselin kautta muovausrullille. Tutkittavassa rullamuovauskoneessa on melkein jokaisessa muovausvaiheessa myös yläakselilla veto, joten tilanteen yksinkertaistamiseksi oletetaan, että vääntömomentti jakaantuu tasan ylä- ja ala-akseleille. Näin ollen rullavääntömomentti T_{Torque} on akseli-kohtaisesti $T_{Torque} / 2$. Ylä ja ala-akselin rullavääntömomentin T_{Torque} arvo tässä kuormitustilanteessa on

$$\begin{aligned} T_{Torque} &= k_4(\theta)t^{k_5}s^{k_6} \\ &= 0,38 \cdot 2,0 \text{mm}^{2,1} \cdot 420 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}^{0,57} = 50,956 \text{ Nm} \approx 51 \text{ Nm}. \end{aligned} \quad (5)$$

Lisäksi oletetaan, että vääntö jakautuu akseli-kohtaisesti tasan kummallekin muovausrullalle. Rullavääntömomentti muutettiin analyysiä varten rullien kehälle tangentialiseksi kehävoimaksi $F_{Kehä}$ (N), joka lasketaan käyttämällä kaavaa 6

$$F_{Kehä} = \frac{T_{Torque}}{\frac{4}{r}}, \quad (6)$$

jossa r on muovausrullan säde (m). Kaavalla 6 saadaan laskettua yksittäisen muovausrullan kehällä vaikuttava voima, joka riippuu muovausrullan säteen koosta. Ylärullan kehällä vaikuttava tangentialinen kehävoima $F_{Kehä_{ylä}}$ saadaan yhtälöstä 7 sijoittamalla ylärullan säde $r_{ylä}$ yhtälöön 6 r :n paikalle:

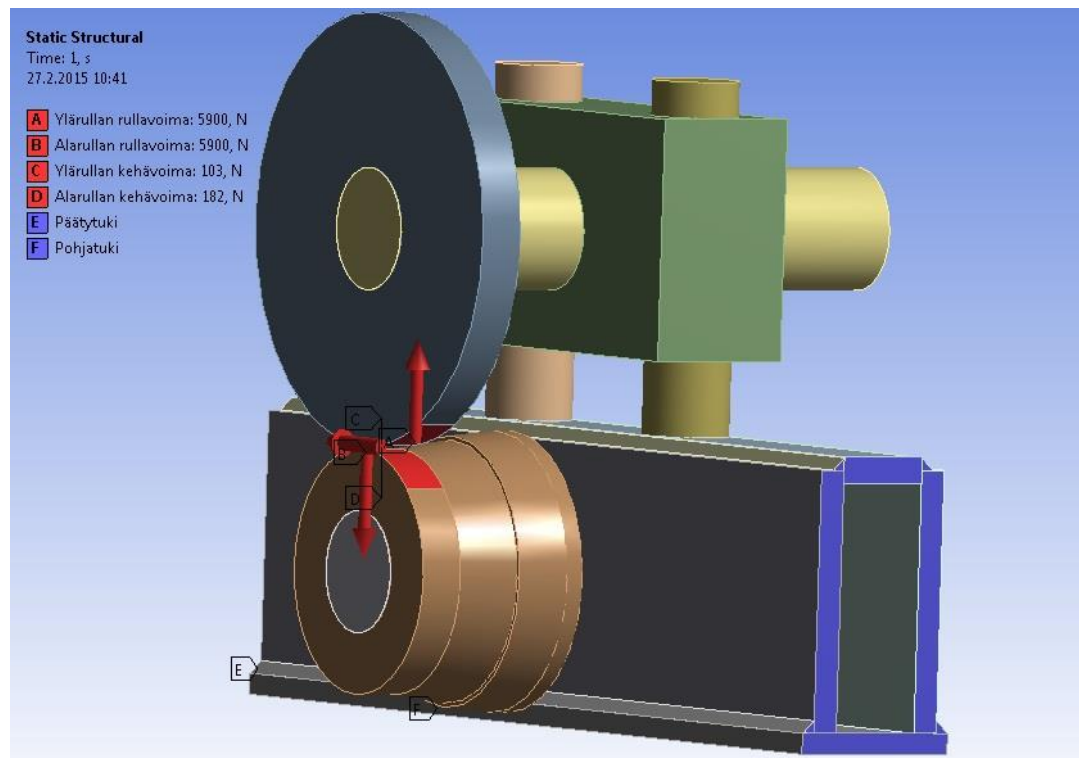
$$F_{Kehä_{ylä}} = \frac{T_{Torque}}{\frac{4}{r_{ylä}}} = \frac{50,956 \text{ Nm}}{\frac{4}{0,1235 \text{ m}}} = 103,149 \text{ N} \approx 103 \text{ N}. \quad (7)$$

Vastaavasti alarullan kehällä vaikuttava tangentialinen kehävoima $F_{Kehä_{ala}}$ saadaan yhtälöstä 8 sijoittamalla alarullan säde r_{ala} yhtälöön 6 r :n paikalle:

$$F_{Kehä_{ala}} = \frac{T_{Torque}}{\frac{4}{r_{ala}}} = \frac{50,956 \text{ Nm}}{\frac{4}{0,070 \text{ m}}} = 181,985 \text{ N} \approx 182 \text{ N}. \quad (8)$$

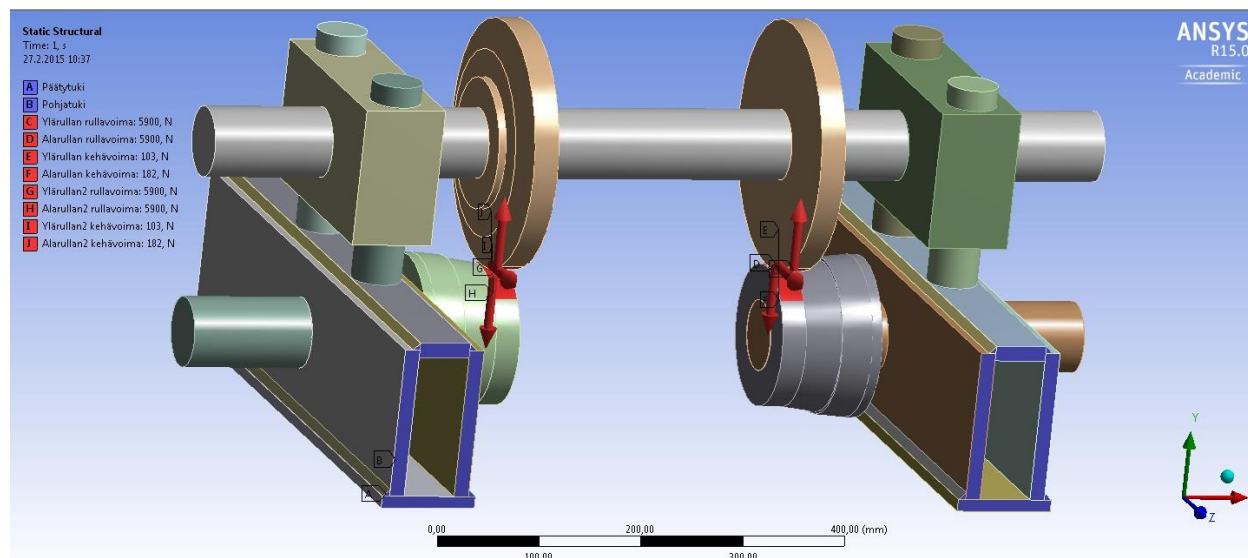
Rullavääntömomentin kautta syntyneet kehävoimat $F_{Kehä_{ylä}}$ ja $F_{Kehä_{ala}}$ mallinnettiin Ansyskessä käyttämällä Remote-Force -toimintoa. Tämä toiminto synnyttää momentin myös rakenteeseen toisin kuin pelkkä Force -toiminto. Ylärullan kehällä vaikuttava kehävoima kohdistuu ylälaakeroinnin pesään ja alarullan kehällä vaikuttava kehävoima kotelorungossa olevaan laakeripesään. Tukilaakeroiduissa malleissa kehävoimat kohdistuvat luonnollisesti kummankin puolen laakeripesiin. Esimerkki analyysin 3 kuormitustilanteesta on esitetty kuvassa 12, jossa havainnollistetaan rulliin kohdistuvat rullavoimat ja kehällä olevat kehävoimat. On huomattava, että kuvassa 12 on kaksi kehävoimaa, mutta ne ovat lähes päällekkäin (kuvassa nuolet C ja D). Kehävoimien kohteet eivät näy kuvassa punaisella koros-

tetulla, sillä ne ovat laakeripesien sisällä. Voimien määrityksen apuna simuloinnissa käytettiin apu-koordinaatistoja ja voimien suuruus sekä suunta määriteltiin X-, Y- ja Z-komponenttien avulla.



KUVA 12. Kuormitustilanne ja reunaehdot analyysissä 3 (Rönkkö 2015.)

Kuvassa 13 on esitetty analyysin 7 kuormitustilanne, kun kyseessä on tukilaakeroitu kone, johon on mallinnettu pienahitsit ja jonka kotelorunko koostuu teräslevyistä.



KUVA 13. Kuormitustilanne ja reunaehdot analyysissä 7 (Rönkkö 2015.)

6.1.4 Reunaehdot

Analyysin reunaehto- ja tukiehdotusten mallintamisessa oli huomioitava useita asioita. Analysoitu rakenne oli yksittäinen rullamuovausvaihe rungon keskellä. Kun tarkastellaan yksittäistä rulla-asemaa, se voidaan

kuvitella jäykästi tuetuksi kummastakin päästään osana kokonaista kotelorunkoa. Kahden pitkittäisen kotelorunkopalkin välissä on 4 - 6 poikittaista tukea, joilla kotelorunkopalkit pysyvät paikallaan toisiinsa nähden. Koko rakenne puolestaan on ilmassa maasta neljällä telineellä puolittain, jotka on kiinnitetty kotelorunkoon. Rakenteeseen kuuluu myös yläosien yläpuolella kulkeva voimansiirtokseli, joka mahdollistaa toisen ylämuovausaseman korkeussirron samanaikaisesti toisen puolen kanssa. Tämän ei katsottu juurikaan jäykistävän rakennetta, sillä siinä on joustavat kumikytkimet.

Analyysin lopullisiksi reunaehdoiksi muodostui ratkaisu, jossa kotelorungon päädyt ovat jäykästi tuetut sekä kotelorungon pohja on jäykästi tuettu siihen piirrettyjen suorakulmioiden alueelta. Näillä reunaehdoilla rullamuovauskoneen malli näytti käyttäytyvän todenmukaisesti, joten sitä käytettiin kaikissa analyyseissä 1 - 8. Reunaehdot ovat esillä kuvissa 12 ja 13.

6.2 Analyysien tulokset

Analyyseistä selvisivät rakenteeseen syntyvät siirtymät ja jännitykset kuormituksessa. 8 erilaista analyysiä tehtiin selvittämään mallinnustapojen ja rakenneratkaisujen eroavaisuuksia. Vertailu eri analyyseiden tulosten välillä on esitetty taulukossa 2. Vertailtaessa kotelorunkoa, joka mallinnettiin solidina ja kotelorunkoa, joka mallinnettiin teräslevyistä, ei tuloksissa ollut juuri eroavaisuuksia. Johtopäätöksenä voidaan siis pitää, että tässä sovelluksessa yksinkertaisempi mallinnus rungon osalta toisi riittävän luotettavat tulokset. Kuitenkin kaikkein todenmukaisimmin käyttäytyivät analyytit 3 - 4 ja 7 - 8, jossa oli mallinnettu hitsaukset. Jos vastaavanlaista kotelorunkoa tutkittaisiin FE-analyysillä, tämä tutkimus toimisi suuntaviivana kuinka mallintaa rakenteet.

TAULUKKO 2. Vertailu analyyseiden tulosten välillä (Rönkkö 2015.)

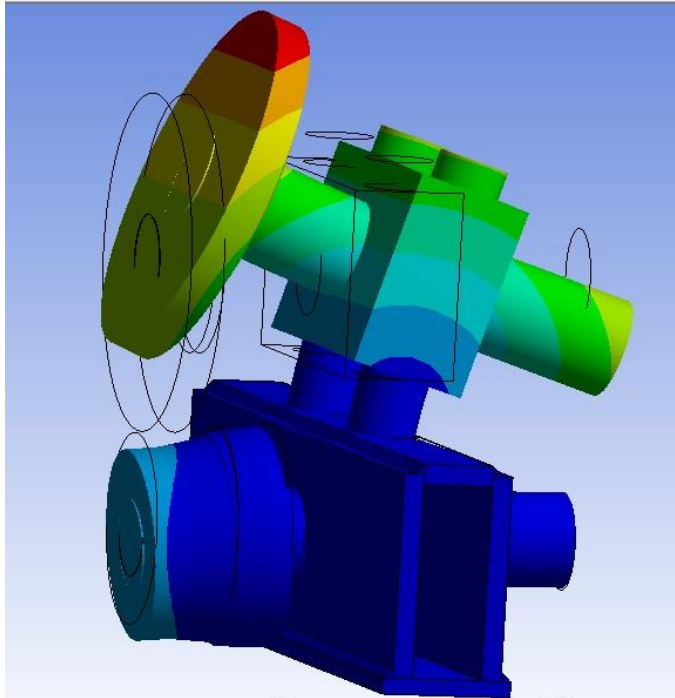
Analyyssi	Suurin kokonaissiirtymä (mm)	Von Mises vertailujännitys (MPa)	Ylärullan viivan Y-siirtymä (mm)	Alarullan viivan Y-siirtymä (mm)	Yht. Y-siirtymä viivalla (mm)
1	0,2190	64,67	0,1371	-0,0272	0,1643
2	0,2180	68,95	0,1366	-0,0269	0,1635
3	0,2210	116,10	0,1386	-0,0272	0,1658
4	0,2216	108,58	0,1391	-0,0276	0,1667
5	0,0493	22,40	0,0373	-0,0359	0,0732
6	0,0499	24,36	0,0379	-0,0359	0,0738
7	0,0495	33,89	0,0375	-0,0389	0,0764
8	0,0514	64,65	0,0389	-0,0416	0,0805

6.2.1 Kuormituksesta johtuvat siirtymät

Analyysien tärkein tieto oli saada tuloksia siirtymistä. Siirtymiä tutkittiin muovausrullien pinnoille piirretyistä viivoista, jotka sijaitsevat levyä muovaavissa pinnoissa sekä kokonaissiirtymien että Y-suuntaisten siirtymien osalta. Siirtymät eivät muodostuneet suuriksi edes ulokekaulaisesti laakeroidussa rakenteessa suurimman kokonaissiirtymän ollessa noin 0,22 mm. On huomioitava, että siirtymiä syntyy lisää myös komponenttien välyksistä johtuen, kuten pienestä laakerivälyksestä ja pystyjohteiden korkeussäädön komponenttien välyksistä. Pystyjohteiden korkeussäädön välitys kontrol-

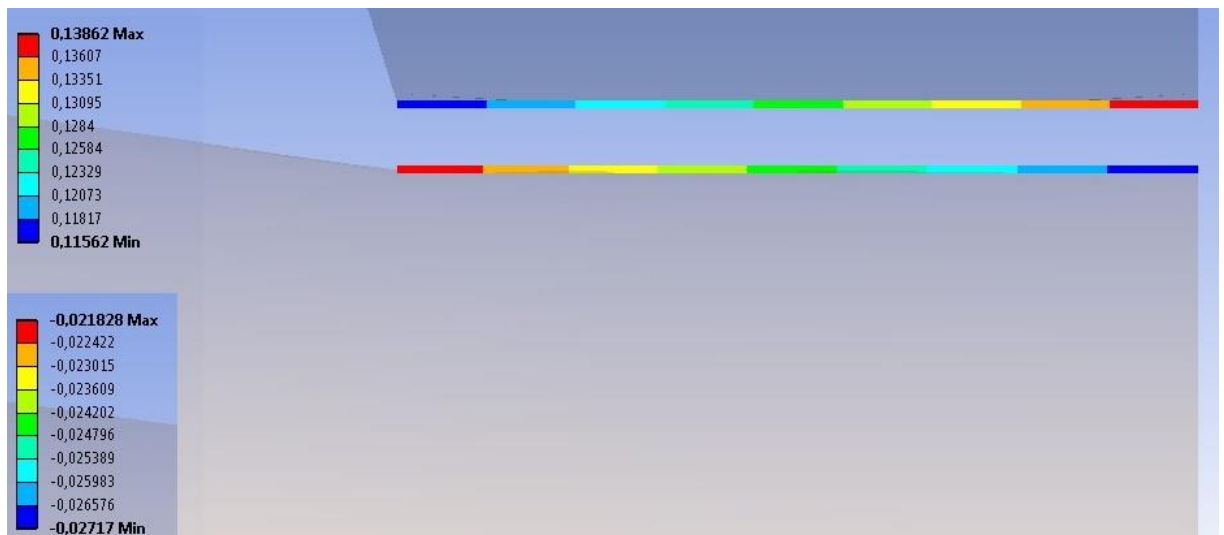
loidaan rullamuovauskoneen kokoonpanovaiheessa säätämällä jännityksen alaisena ennakkoa muovausosaman sijaintiin.

Kotelorunko itsessään on jäykkä, eikä juuri koe muodonmuutosta kuormituksessa. Siirtymät ylämuovausrullassa syntyvät pääosin pystyjohteiden taipuman, sekä akselin taipuman yhteisvaikutuksesta. Alamuovausrullan muovauspinta siirtyy vähemmän ollessaan jäykemmässä kotelorungossa, jolloin taipuma on lähes yksinomaan akselin taipumista. Muodonmuutos 4600 -kertaisena on esitetty kuvassa 14, jossa näkyy myös havainnollistavasti rakenteen rautalankamalli.



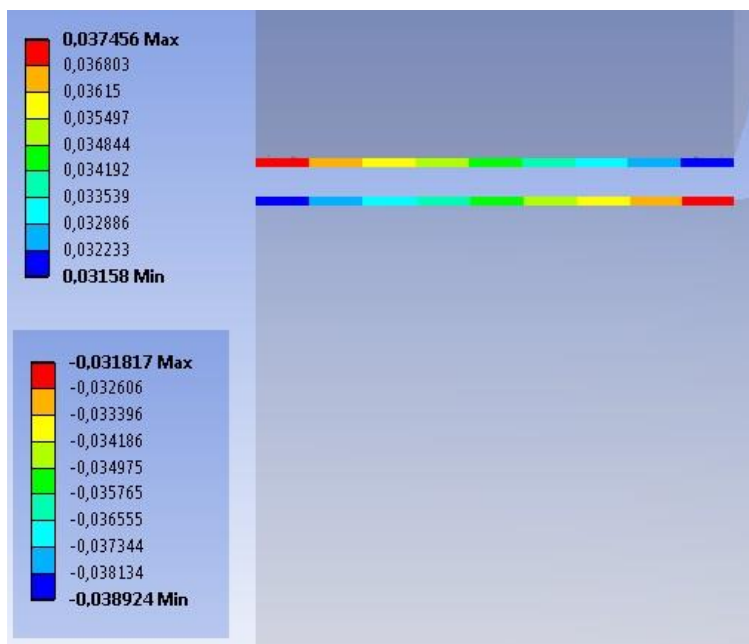
KUVA 14. Analyysin 3. muodonmuutokset 4600 -kertaisena (Rönkkö 2015.)

Kun yläakseli oli vain ulokekaulaisesti laakeroitu, ylärullassa esiintyvät kokonaiisiirtymät olivat yli nelinkertaiset verrattuna tukilaakeroituun vaihtoehtoon. Tarkasteltaessa Y-suuntaisia siirtymiä, yhteenlasketut siirtymät olivat tukilaakeroidussa mallissa noin puolet ulokekaulaisen mallin siirtymistä muovauspinnoilla. Ulokekaulainen yläakselin rakenne on helpompi taipumaan myös levyn kulkemissuuntaan, eli Z-suuntaan, kuin tukilaakeroitu yläakseli. Suurimmat siirtymät tulivat rullavoimien suunnassa, eli Y-suunnassa. Muovausrullien väli on 2,0 mm ja kuvassa 15 on esitetty muovausrullien välisen Y-siirtymän muutos. Alarullan muutos on negatiiviseen suuntaan Y-akselia, johon liittyy kuvan 15 alempi tietokenttä.



KUVA 15. Analyysin 3 muovausrullien muovauspintojen välinen Y-siirtymä (Rönkkö 2015.)

Tutkittaessa muovauspinoilta tukilaakeroidulla yläakselilla olevan rullamuovauskoneen Y-siirtymiä ne olivat noin puolet ulokekaulaisesti laakeroidun koneen siirtymistä. Analyysin 7 tuloksista muovausrullien pinnoissa olevat Y-siirtymät ovat esillä kuvassa 16. Tukilaakeroitu kone on siis jämäkkä ja profiilin valmistus olisi helppo kontrolloida.

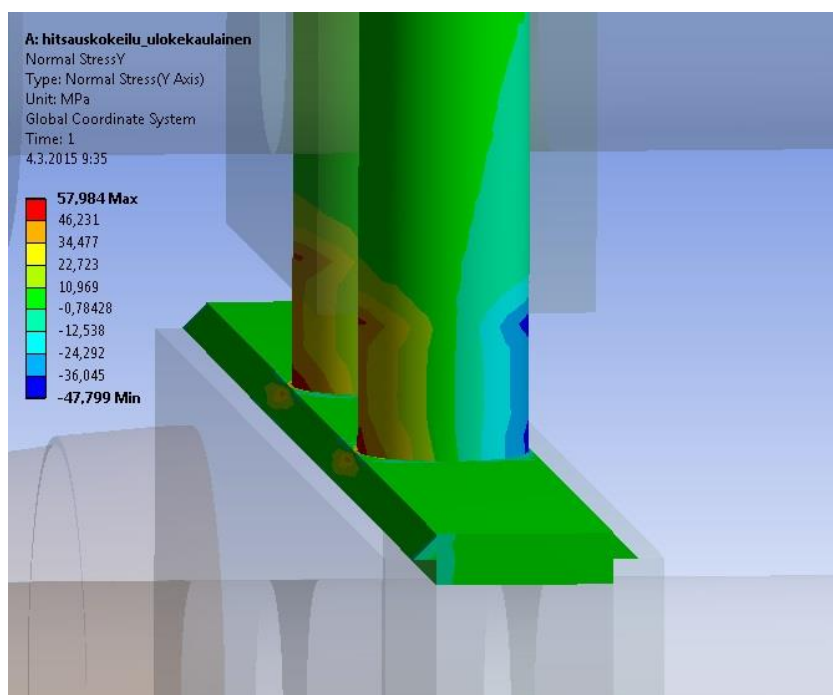


KUVA 16. Analyysin 7 muovausrullien välinen Y-siirtymä (Rönkkö 2015.)

Kotelorunko mallinnettiin analyyseissä 3 - 4 ja 7 - 8 katkonaisesti hitsatuksi siten, että pystyjohteen alapuolella oli pituudeltaan 350 mm ja a-mitaltaan 5 mm pienahitsit. Muissa saumoissa oli katkohitsattu siten, että sauma oli 50 mm pituinen ja väli 50 mm. FE-analyyseiden tulosten perusteella siirtymissä ei tapahtunut huomattavaa muutosta katkonaisen ja täyspitkän hitsauksen välillä. Jos pystyjohteen kohdalla hitsi ei olisi ollut riittävän pitkältä matkalta yhtenäinen, tämä olisi kasvattanut siirtymiä ja jännityshuippuja alueelle. Vertailu tehtiin analyyseiden 3 ja 4 välillä sekä 7 ja 8 välillä.

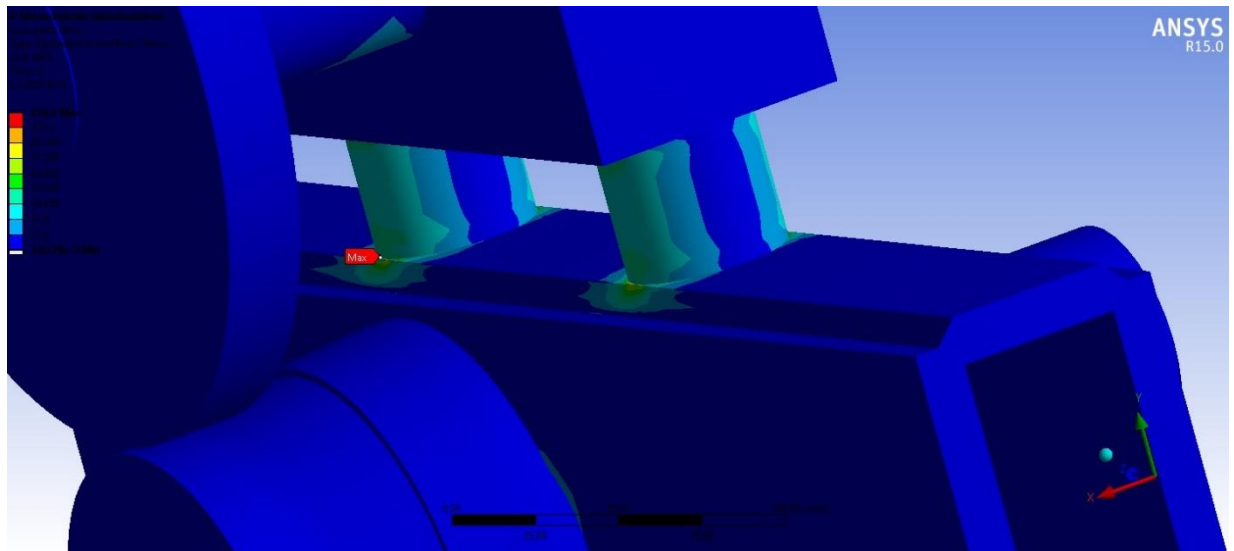
6.2.2 Jännitykset

Pystyjohteisiin syntyy kuormitustilanteessa puolittain veto- ja puristusjännityksiä. Pystyjohteiden ja yläteräslevyn välinen liitos sekä ylimmät hitsaussaumamat ovat rakenteen rasitetuimpia kohtia. Pystyjohteiden halkaisija \varnothing on 50 mm ja niissä on myös M36-kierre johteen alaosassa. Tarkasteltaessa ulokekaulaisesti laakeroidun koneen pystyjohteiden suuntaisia normaalijännityksiä suurimman vetojännityksen arvo on noin 58 MPa ja suurin puristusjännitys on noin 48 MPa. Normaalijännitykset eivät ole kriittisiä. Kuva 17 esittää pystyjohteiden normaalijännitykset. Kuvasta on piilotettu muut osat kuin pystyjohteet, yläteräslevy ja pienahitsit. Tukilaakeroidun koneen pystyjohteiden normaalijännitykset ovat luonnollisesti pienemmät, jossa suurin vetojännitys oli noin 20 MPa ja puristusjännitys oli noin 16 MPa. Nämäkin jännitykset eivät ole kriittisiä.



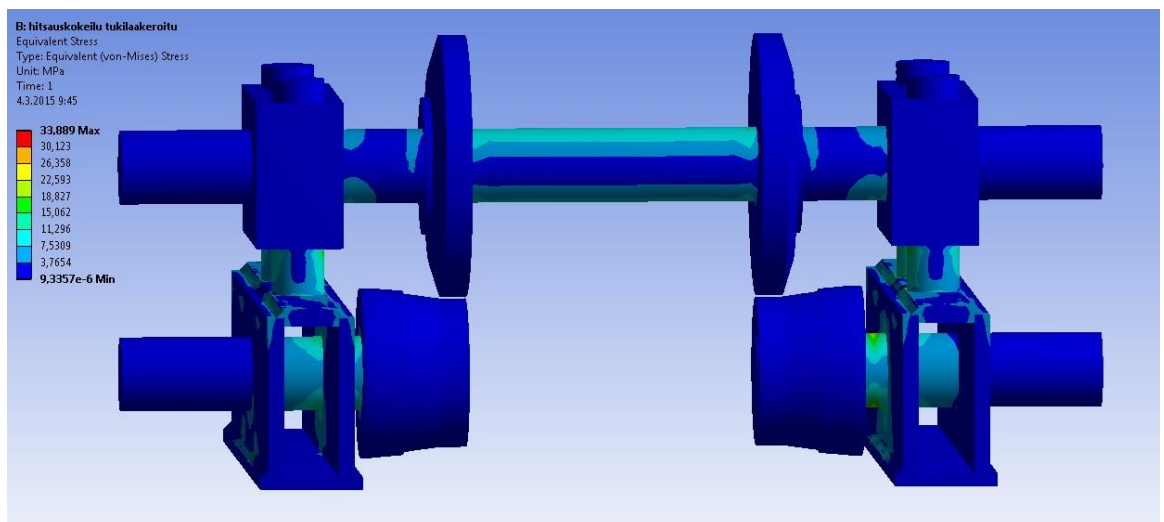
KUVA 17. Normaalijännitykset analyysissä 3 (Rönkkö 2015.)

Von Mises-vertailujännitykset ovat arvoltaan suurempia kuin normaalijännitykset ja niiden sijainti on pystyjohteiden ja yläteräslevyn välisessä liitoksessa. Myös ylempien pienahitsaussaumojen jännitykset ovat paikallisesti suuria juuri pystyjohteiden kohdalla. Suurin Von Mises-vertailujännitys on analyysissä kolme, jonka suuruus on noin 116 MPa. Kyseessä on ulokekaulaisesti laakeroitu kone, jonka jännityksistä on kuva 18. Tämä jännitys alkaa olemaan jo kohtalaisen suuri, joskin materiaalin myötörajan ollessa 355 MPa ei vielä kriittinen. Ylempien hitsisaumojen suurin Von Mises-vertailujännitys oli noin 82 MPa.

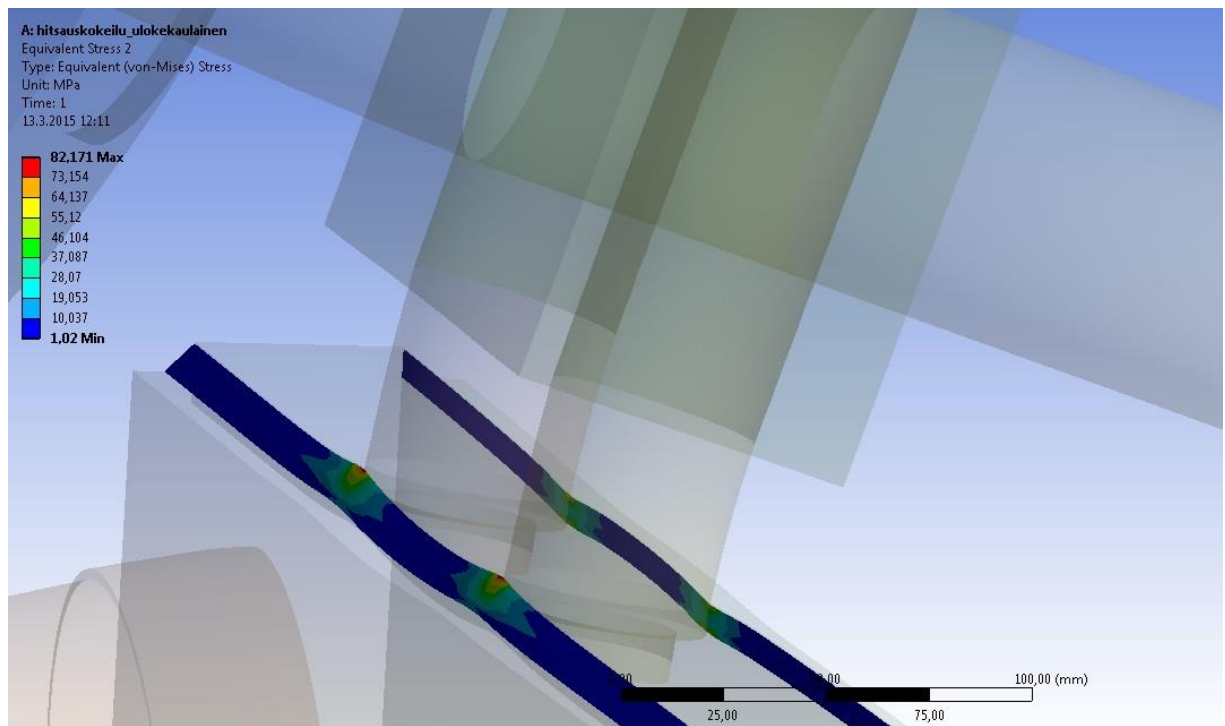


KUVA 18. Von Mises-vertailujännitykset ulokekaulaisessa rakenteessa (Rönkkö 2015.)

Tukilaakeroitu rakenne jäykistää koneen yläosia huomattavasti ja jännitykset jakaantuvat tasaisesti. Täyspituisena hitsatun tukilaakeroitun koneen suurin jännitys on noin 34 MPa, joka ei ole kriittinen. Kuvassa 19 näkyy, kuinka jännitykset jakautuvat rakenteessa kuormitustilanteessa. Katkonaisesti hitsattuna analyysi antaa suurimman jännityksen aavistuksen liioiteltuna hitsien yksinkertaisesta ja todenmukaisuudesta poikkeavasta mallintamisesta johtuen. Tämä arvo oli noin 65 MPa. Kuvassa 20 on esitetty hitsien Von Mises-vertailujännitykset ulokekaulaisesti laakeroitun rakenneratkaisun osalta.



KUVA 19. Von Mises-vertailujännitykset tukilaakeroitussa rakenteessa (Rönkkö 2015.)



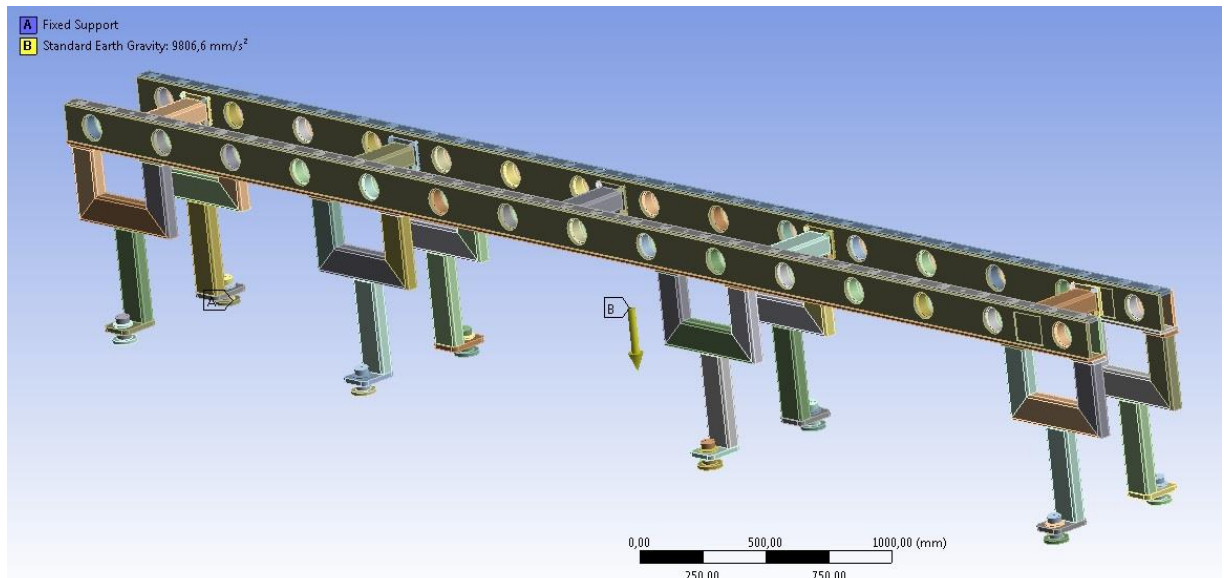
KUVA 20. Von Mises-vertailujännitykset pienahitseissa rakenteen kriittisessä kohdassa (Rönkkö 2015.)

6.3 Yhteenveto esisuunnitellun rakenteen ominaisuuksista

Työssä tarkasteltiin yhden muovausvaiheen ominaisuuksia. Esisuunniteltu rakenne on kummallakin tavalla toteutettuna jäykkä. Kokonaissiirtymät kuormitustilanteessa jäivät pieniksi jopa ulokekaulaisesti laakeroidulla yläakselilla. Tukilaakeroitu yläakseli jäykistää rakennetta huomattavasti ja saa muovausrullien väliset siirtymät lähes olemattomiin. Kotelorunkopalkkien väliset tuennat jäykistävät kokonaisen rungon kiertymisen. Jos yläakselit ovat ulokekaulaisesti laakeroituja, näiden tuentojen merkitys kasvaa huomattavasti. Akselit on mitoitettu ja käytössä todettu toimivaksi raskaammin kuormitetun Advanced-koneen pohjalta, joten niiden kestävyys ei ole kyseenalaistettua tässä soveluksessa.

Rakenteen kriittisin kohta on yläteräslevy ja siihen liittyvä pystyjohte. Sinne syntyvät suurimmat jännitykset ja pystyjohteiden taipuma aiheuttaa pääosin muovausrullien väliset siirtymät. Rakenteen pystyy hitsaamaan myös katkonaisesti hitsattuna, kunhan saumaa on riittävän pitkälti yhtenäisenä pystyjohteiden alla. Tämä vähentää myös rakenteen hitsausmuodonmuutoksia verrattuna täysmittaisesti hitsattuun rakenteeseen. Hitsausten jännityksiä ja kestoikä olisi hyvä laskea käsin, mutta sitä ei tässä opinnäytetyössä tehdä, sillä rakenne ja kuormitustilanne ovat kohtalaisen monimutkaisia.

Työssä tehtiin myös FE-analysit koneen rungon käyttäytymisestä oman painon vaikutuksesta sekä nostettaessa sitä esimerkiksi hallinosturilla. Oma paino ei tuonut runkoon niin suuria siirtymiä, että se vaikeuttaisi kokoonpanovaiheessa muovausvaiheiden linjaamista ja näin ollen esisuunniteltu tuenta olisi riittävä. Siirtymät olivat suurimmillaan noin sadasosamillejä, joten itsekantava runko toimisi siis hyvin. Rungon nosto esimerkiksi kokoonpanovaiheessa neljästä pisteestä taivuttaa konetta suurimmillaan vain 0,66 mm. Kuvassa 21 on esillä koneen runko ja sen tuenta.



KUVA 21. Rullamuovauskoneen esisuunniteltu runko ja tuennat (Rönkkö 2015.)

Esisuunnitellun rakenteen mekaaniset ominaisuudet todennettiin FE-analyysin avulla myös ulokkekalaisesti laakeroidulla rakenteella. Siirtymät sekä jännitykset eivät kasvaneet liian suuriksi ja näin ollen uudessa toteutusvaihtoehdossa on mahdollisuus optimoida rakennetta esimerkiksi keveämmäksi. Kattavasti toteutetut analyysit toivat halutut tulokset tietoon, joita pystyi hyödyntämään tehdessä päätöksiä koneen rakenneratkaisuista.

FE-analyysien tuloksiin tulee aina suhtautua kriittisesti, myös tässä tapauksessa, jossa kuormitustilanne ei ole yksiselitteinen ja kuormituksen mallintaminen on vaikeaa. Kuormitustilanteen todentamiseksi olisi hienoa tehdä kokeet ensimmäisen kyseisen rullamuovauskoneen valmistumisen jälkeen, jotta huomaisi kuinka lähelle todellisuutta teoria kuormituksesta yltää.

7 RULLAMUOVAUSKONEEN RUNGON KEHITTÄMINEN

Tämän insinööriyön tavoitteena oli tarjota myös ideoita ja luonnoksia esisuunnitellun PreFab linja-konseptin rullamuovauskoneen koteloringon kehittämiseksi. Suunnittelu toteutetaan luonnostelu- ja ideointitasolla. Toteutusvaihtoehtojen luomisessa sovelletaan tuotekehitysprosessin vaiheita ja menetelmiä kuten FE-analyysien tuloksia. Rullamuovauskoneelta edellytetään tasalaatuisuutta ja hyvää kestävyyttä. Sen takia lujuusominaisuuksien ei tule välttämättä olla loppuun asti optimoituja vaan sellaisia, että ne takaavat varmuuden tasalaatuisten tuotteiden tuottamiseen. Kuitenkin mahdolliset säästöt materiaalissa ja täten painossa ovat tavoiteltavia, kunhan se ei vie koneen luotettavuutta. Uudella vaihtoehdolla tulee olla hyvä valmistettavuus sekä sen tulee olla kustannustehokas.

Rullamuovauskoneen rungon kehittämisessä päädyin kahteen eri vaihtoehtoon. Ensimmäinen vaihtoehto oli optimoida esisuunniteltua runkoa esimerkiksi ainevahvuuksien muutoksilla. Toinen vaihtoehto oli korvata hitsattu koteloringopalkki valmiilla, riittävän paksuseinäisellä putkipalkilla. Lisäksi työssä esitellään ylämuovausasemia tukeva jäykiste, jota voi soveltaa kumpaankin luonnokseen.

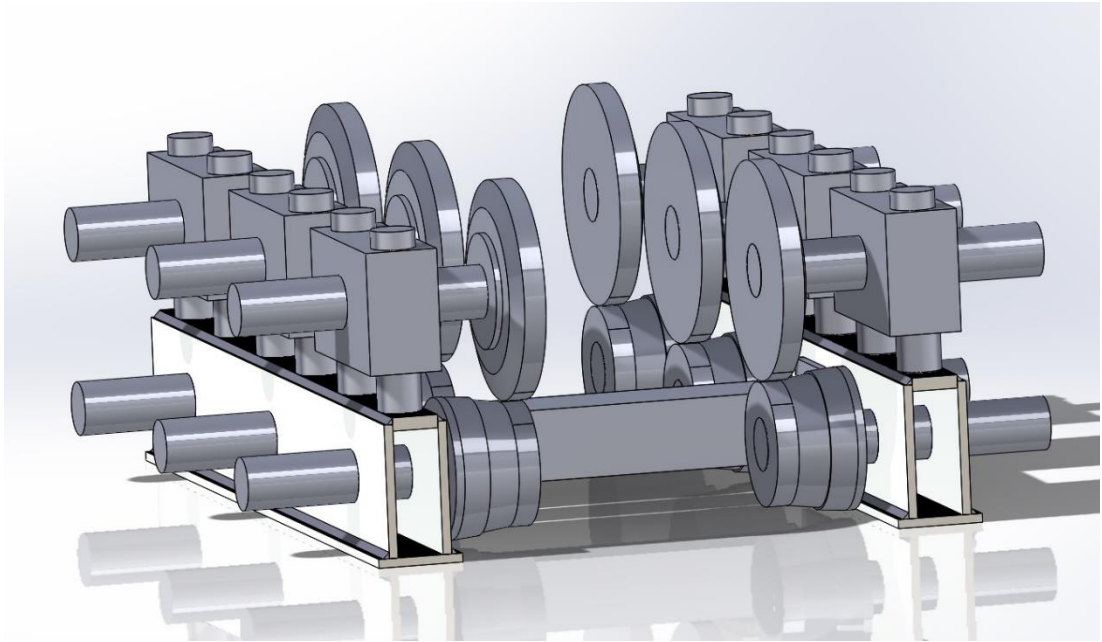
7.1 Ensimmäinen luonnos

Ensimmäisessä luonnoksessa optimoitiin esisuunniteltua runkoa ainevahvuuksien osalta sopivista paikoista kuten koteloringon teräslevyistä ja akseleista. Ainevahvuudet koteloringon teräslevyissä vaihdettiin 15 mm:stä 10 mm:iin ja akselien pienintä halkaisija 70 mm:stä 60 mm:iin. Pystyjohteita sekä yläteräslevyä ei muutettu, sillä ne olivat kriittiset komponentit. Näitä ei kuitenkaan tarvinnut mitoitaa suuremmaksi, sillä niiden ominaisuudet olivat riittävät. Vaihtoehto tangosta tehdylle pystyjohteelle olisi ollut paksuseinämainen putki, jonka ulkohalkaisija olisi pitänyt olla jonkun verran suurempi kuin umpinaisen tangon. Sopivan kokoisella putkella olisi saanut samat ominaisuudet kuin tangollakin, mutta sen kiinnittäminen yläteräslevyyn olisi täytynyt suorittaa esimerkiksi hitsaamalla, jolloin kokoonpantavuus kierteellä kiinnitettävään sekä upotuksella olevaan tankoon verrattuna olisi ollut huonompi. Kuvassa 22 on mallinnettu 3 peräkkäistä muovausasemaa optimoiduilla rakenteilla.

Rullamuovauskone on kokonaisuudessaan noin 6,0 m pitkä ja sen koteloringon hitsaaminen teräslevyistä riittävän suoraan vaatii ammattitaitoa ja kokemusta. Hitsaamisesta syntyviä muodonmuutoksia ovat erinäiset kutistumat, kiertymät, kulmavetäytyvät ja kaareutumiset. Näitä voidaan ehkäistä muun muassa vähentämällä lämmöntuontia, katkohitsaamalla, oikealla hitsausjärjestyksellä, sopivalta hitsin a-mitalla sekä muodonmuutosennakoilla. Katkohitsaus ei heikennä FE-analyysien tulosten perusteella juurikaan rakenteen lujuusominaisuuksia ja olisi täten vartenotettava vaihtoehto. (Lepola ja Makkonen 1998, 452 – 455.)

Ensimmäinen luonnos on kevyempi pienempien ainevahvuuksien ansiosta kuin esisuunniteltu runko. Luonnoksen runko on noin 150 kg kevyempi kuin esisuunniteltu runko ja myös materiaalikustannukset pienenevät. Laakereiden kiinnitys koteloringoon onnistuu erillisellä laakeriputkella kuten alkupeiräisessä suunnitelmassakin. Akseleiden halkaisijoiden pienentäminen tulisi tarkistaa myös käsinlasien tai suunnitteluohjelmalla, mutta sitä ei tässä työssä suoriteta. Tälle luonnokselle tehdystä FE-

analyysin tuloksista selvisi optimoidun rakenteen lujuusominaisuudet, jotka olivat melkein yhtä hyvät kuin alkuperäisellä rakenteella. Pienemmilläkin ainevahvuuksilla rakenteen ominaisuudet ovat riittävät, jotta muovaustapahtuma olisi helposti kontrolloitavissa. Vertailu on esitetty taulukossa 3.



KUVA 22. Ensimmäinen luonnos, johon on mallinnettu 3 muovausvaihetta (Rönkkö 2015.)

TAULUKKO 3. Lujuusominaisuuksien vertailu alkuperäisen ja luonnoksien välillä (Rönkkö 2015.)

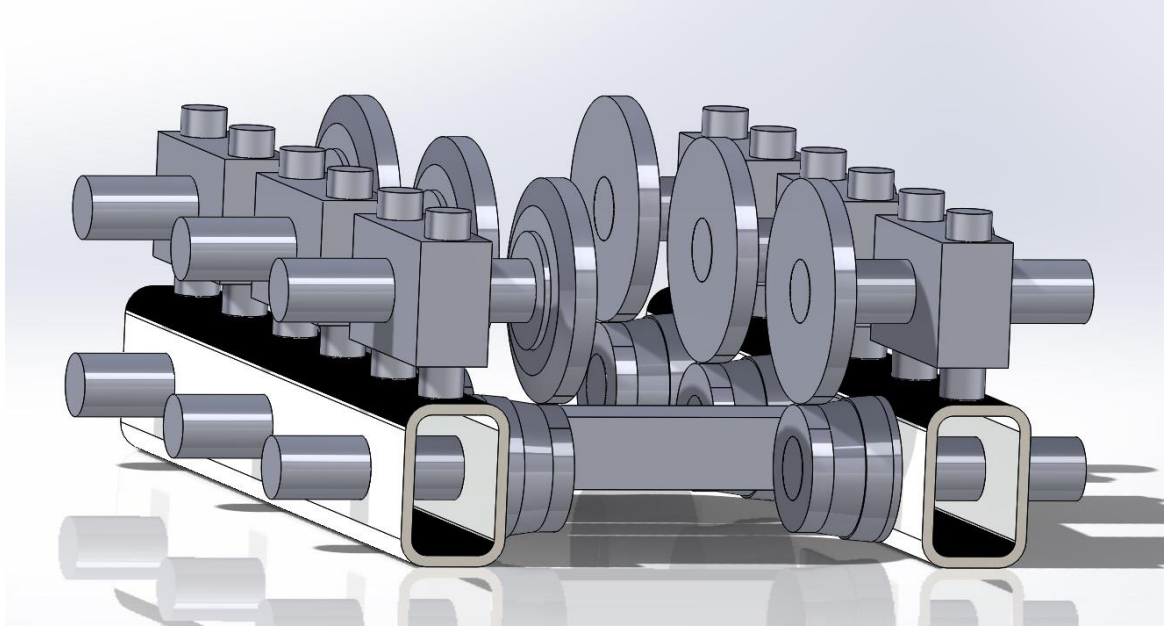
Analyysi	Suurin kokonais- siirtymä (mm)	Von Mises vertailujän- nitys (MPa)	Yht. Y-siirtymä viival- la (mm)
Alkuperäinen	0,2210	116,10	0,1658
Luonnos 1	0,2488	111,07	0,2106
Putkipalkki 180x100x10 mm	0,2918	126,34	0,2013
Putkipalk- ki180x120x12,5 mm	0,2635	98,73	0,1791

7.2 Toinen luonnos

Toisessa luonnoksessa kotelorunkopalkki korvattaisiin valmiilla suorakaiteenmuotoisella rakenneputkipalkilla. Esimerkiksi Ruukilla on tarjota eri lujuuksisia EN 10219 standardin mukaisia rakenneputkia, joista sopivia kokoja tähän sovellukseen olisivat esimerkiksi 180x100x10 mm sekä 180x120x12,5 mm (Rautaruukki Oyj, 2014). Nämä koot ovat lähellä esisuunnitellun kotelorungon ulkomittoja. Käyttämällä valmista putkipalkkia välttyttäisiin kokonaan hitsaukselta ja sen tuomilta lisäkustannuksilta. Putkipalkilla on tietyt valmistustoleranssit, joka teettäisi koneistustarvetta esimerkiksi tasopintojen yhtenäistämiseksi eri muovausvaiheissa. Koneistuksen määrää ja kustannuksia on vaikea arvioida kotelorunkoiseen vaihtoehtoon verrattuna. Työkustannukset pienenevät hitsauksen osalta tässä luonnoksessa, koska sitä ei tarvitse suorittaa rungon osalta lainkaan.

Painonsäästö on pienemmällä putkipalkin koolla (180x100x10 mm) rungon osalta noin 140 kg, mutta suuremmalla putkipalkilla olematon. Pienempikokoisessa putkipalkissa pystyjohteiden kiinnitys on

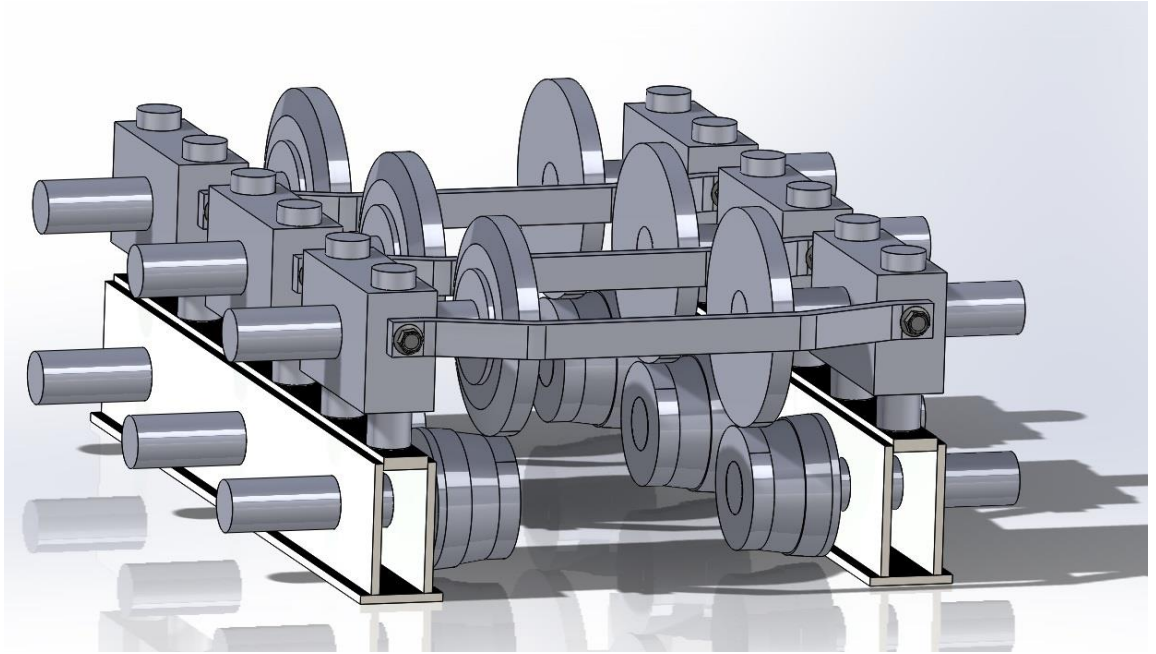
10 mm ainevahvuuden takia hivenen haasteellinen. Jos kierrereikä ei riittäisi, yhtenä vaihtoehtona olisi pidentää pystyjohteet palkin pohjaan asti tehtyyn matalaan upotukseen tai suunnitella joku erillinen hitsattu lisäholkki putkipalkin yläpintaan, johon pystyjohteet kiinnitettäisiin tukevammin. Kuvassa 23 on mallinnus putkipalkein toteutetusta rungosta.



KUVA 23. Luonnos putkipalkekirunkoisesta rullamuovauskoneesta (Rönkkö 2015.)

7.3 Ylämuovausasemia tukeva jäykiste

Pystyjohteiden taipumista voisi estää suunnittelemalla yläasemat yhteen liittävän jäykisteen. Sen voisi toteuttaa esimerkiksi teräslevystä särmättävästä osasta, joka kiinnitettäisiin pulteilla yläasemiin. Särmäys asettaa osan ainevahvuudelle ylärajan särmäyskoneesta riippuen 15 - 20 mm, joka toisi jo riittävän jäykistyksen. Jäykisteellä on suurin hyöty silloin kun yläakselit ovat ulokekaulaisesti laakeroituja, jolloin jäykiste tukisi yläosan rakenteita. Jäykisteen sijoittelussa tulisi huomioida levyn muovaamisen vaiheistus, että profiili mahtuu muovautumaan eri muovausvaiheissa. FE-analyysillä kokeiltu jäykiste toi noin 15 % pienemmät siirtymät muovausrullien pinnoille kuin ilman jäykistettä kun kyseessä oli ensimmäinen luonnos. Jäykiste toisi siirtymät ensimmäisessä luonnoksessa alkuperäisen tasolle. On huomattava, että mallinnuksesta poiketen yläasemien päällä on myös korkeussäädön komponentit. Kuvassa 24 on luonnos rullamuovauskoneen kolmesta muovausvaiheesta jäykisteiden kanssa. Jäykisteitä kehittämällä voisi muita osia saada optimoituja enemmän. Jäykisteitä voisi soveltaa myös putkipalkein toteutettuun luonnokseen.



KUVA 24. Luonnos rullamuovauskoneesta jäykisteiden kanssa (Rönkkö 2015.)

8 YHTEENVETO

Tämä työssä selvitettiin rullamuovausprosessin kuormitukset ja sovellettiin tähän rullamuovauskoneeseen. Kuormitustilanne on todellisuudessa monimutkainen, mutta se saatiin mallinnettua tämän opinnäytetyön FE-analyyseihin kohtalaisen yksinkertaisesti mutta silti todenmukaisesti. Kuormitustilanteen mallinnukseen käytetty lähde oli luotettava, kokeellisesti todennettu sekä julkaistu alan tiedejulkaisuissa. Työssä tehtiin useita erilaisia analyysejä selvittämään mahdollisimman todenmukaisesti rakenteiden lujuusominaisuudet ja analyysien tietoutta jaettiin Samesor Oy:n tuotekehityksen tueksi. Erilaisten mallinnustapojen tutkiminen loi pohjan vastaavanlaisten kotelorakenteiden FE-analyysien suoraviivaiseksi toteuttamiseksi. Tämän opinnäytetyön tuloksina saatiin selville eri rakenneratkaisujen lujuusominaisuudet ja niiden eroavaisuudet. Lisäksi työssä tuotettiin luonnoksia rullamuovauskoneen rungon kehittämiseksi pohjautuen muun muassa FE-analyysien tuloksiin.

Tämän opinnäytetyön tulokset avasivat FE-analyysien kautta Samesor Oy:lle katsauksen uuden konseptin rullamuovauskoneen lujuusominaisuuksiin jo suunnitteluvaiheessa. Työn tuottamien tietojen pohjalta tehtiin päätöksiä koneen rakenneratkaisuksi. Työn tuoma informaatio oli hyödyllistä tuotekehitykselle sekä nyt että jatkossa. Työ tarjosi myös rullamuovausprosessin kuormitustilanteen mallin, jota voi soveltaa tietyin ehdoin myös erimallisten rullamuovauskoneiden osien mitoituksessa.

Opinnäytetyö syvensi tekijän FEM-osaamista ja opetti paljon rullamuovaustekniikasta. Työ alkoi haasteellisesti laajalla kirjallisuusselvityksellä kuormitustilanteesta, josta ei ole olemassa juuri mitään tietoa. Hienoa olisi, jos rullamuovauskoneen valmistuttua kuormitustilanne voitaisiin todentaa erilaisin mittauksin ja verrata mallinnuksen todenmukaisuutta. Tämä voisi olla laajuudeltaan sopiva työ opinnäytetyöksi.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

BHATTACHARYYA, D., SMITH, P.D., THADAKAMALLA, S.K., COLLINS, L.F. 1987. The prediction of roll load in cold roll forming. Journal of Mechanical Working Technology. Tutkimusraportti. Journal of Mechanical Working Technology, 9(2):181-191, Mars 1984.

HUEBNER, Kenneth, DEWHIRST, Donald, SMITH, Douglas ja BYROM Ted 2001. The finite element method for engineers. 4. painos. New York: A Wiley-Interscience Publication.

LEPOLA, Pertti ja MAKKONEN, Matti 1998. Hitsaus ja teräsrakenteet, Helsinki: WSOY – kirjapainoyksikkö.

LINDGREN, Michael 2007. Experimental investigations of the roll load and roll torque when high strength steel is roll formed. Material Science, Dalarna University Borlänge. Tutkimusraportti.

[Viitattu 2015-02-14.] Saatavissa:

http://pure.ltu.se/portal/files/3434689/Lindgren_2007_rollforming_load_torque

LINDGREN, Michael 2009. Experimental and Computational Investigation of the Roll Forming Process. Luleå University of technology. Division of material mechanics. Tohtorin tutkielma. [Viitattu 2015-02-14.] Saatavissa: http://pure.ltu.se/portal/files/3340038/Michael_Lindgren_DOC2009.pdf

MATILAINEN, Jorma, PARVIAINEN, Miikka, HAVAS, Taru, HIITELÄ, Erja ja HULTIN, Sami 2011. Ohutlevy tuotteiden suunnittelijan käsikirja. Tampere: Tammerprint Oy.

MÄKI-MANTILA, Jani. 2001. MET Tekninen tiedotus. Ohutlevyjen taivutus ja muovaus. Helsinki: Yleisjäljennös Oy.

ONGELIN, Petri. 1986. MET Tekninen tiedotus 24/86 Rullamuovaus. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.

PAHL, Gerhard, BEITZ, Wolfgang, FELDHUSEN, Jörg, GROTE, Karl-Heinrich 2007. Engineering Design - A systematic approach. 3. painos. Lontoo: Springer-Verlag London Limited.

RAUTARUUKKI Oyj 2014. Yrityksen internet-sivusto. [Viitattu 2015-04-01.] Saatavissa:

<http://www.ruukki.fi/Teras/Rakenneputket/Suorakaiteenmuotoiset-rakenneputket/Suorakaiteenmuotoiset-S235-S460-mukaiset-EN-10219-rakenneputket>

SAMESOR Oy 2015. Yrityksen internet-sivusto. [Viitattu 2015-01-27.] Saatavissa:

<http://samesor.fi/company>

SAMESOR Oy 2015. Yrityksen kuvatiekanta. [Kuva-arkisto] [Viitattu 2015-03-16.]

TURUNEN, Jouko 2015-04-23. R&D Manager. [Haastattelu.] Kuopio: Samesor Oy.

TURUNEN, Jouko 2015-01-16. R&D Manager. [Sähköpostiviesti] Vastaanottaja: Juho-Pekka Rönkkö. Samesor päättötyöaihe_Vaihepukin koteloringon lujuustarkastelu_20150116 [Pdf.-dokumentti]

WESTERHOLM, Tatu 2015. Kurssimateriaali EKA0052 FEM-kurssi. [Verkkoaineisto]. Sijainti: Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulun Moodle [Verkko-oppimisympäristö].