

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus

Henri Kettunen

TERÄSRAKENTEEEN TUOTEKEHITYS

Opinnäytetyö
Syyskuu 2018

**OPINNÄYTETYÖ****Syyskuu 2018****Konetekniikan koulutus**

Tikkarinne 9

80220 JOENSUU

Tekijä

Henri Kettunen

Nimeke

Teräsrakenteen tuotekehitys

Toimeksiantaja

Metalliteollisuuden yritys

Tiivistelmä

Tärkeimmät tavoitteet tälle opinnäytetyölle olivat tutkia syvävetämisen soveltuminen kotelomaisen teräsrakennetuotteen rungolle, nykyisen 3 tunnin valmistusprosessin yksinkertaistaminen syvävetotekniikalla sekä tutkia syvävedettävää kappalekokonaisuutta kustannussäästöjen näkökulmasta.

Projekti aloitettiin tutkimalla nykyistä valmistusprosessia, jonka mukaan vaatimuslista luotiin. Esisuunnittelu ja rakenneratkaisut määritettiin syvävetotuotteita valmistavalla Meconet Oy:llä. Syvävetorakenteen rungolle mallinnettiin kaksi mallia Creo 4.0-ohjelmalla, ja niiden syvävedettävyyttä ja lujuutta analysoitiin asiaankuuluvilla ohjelmilla. Malleille suunniteltiin erilaisia hitsausliitosvaihtoehtoja menemättä kuitenkaan enempää mallintamiseen tai liitoksen lujuuden tarkasteluun. Lopuksi suoritettiin vertailu kustannuksien ja painon suhteen syvävetorakenteen ja nykyisen rakenteen välillä.

Työn lopputuloksessa päästiin asetettuihin tavoitteisiin. Nykyinen terästuote on mahdollista valmistaa syvävetämällä, mikä yksinkertaistaisi valmistusprosessia huomattavasti. Kuitenkin nykyisillä volyyymeilla valmistuskustannukset nousisivat korkeammalle syvävetomallissa kuin nykyisessä.

Kieli

suomi

Sivuja

Liitteet

Liitesivumäärä

57

0

0

Asiasanat

tuotekehitys, syväveto, prosessi, mallinnus, analysointi



THESIS

August 2018

**Degree Programme in Mechanical
Engineering**

Tikkarinne 9

80220 JOENSUU

Author

Henri Kettunen

Title

Product Development of a Steel Structure

Commissioned by

Metal industry company

Abstract

The main objectives in this thesis were to study the suitability of deep drawing on the enclosed steel structure, to simplify the current 3-hour manufacturing process with the deep drawing technology and to study the deep drawn product from cost saving perspective.

The project was started by examining the current manufacturing process according to which the requirement list was created. Pre-design and structural solutions were defined in Meconet Oy, a manufacturer of deep drawing products. For the deep drawn frame, two different models were created with the Creo 4.0 program and their drawability and strength were analyzed with relevant programs. Different kinds of weld joints were designed for the frame, but without going deeper into the modeling or the strength calculation of them. Finally, a comparison of costs and weight between the deep drawn product and the current product was carried out.

The set goals were achieved in this thesis. Product is possible to manufacture with deep drawing. Deep drawing would simplify manufacturing process considerably. However, with the current volumes, the cost of manufacturing the frame with deep drawing would rise above the cost of the current frame.

The extension of this product development project will be decided upon by the client.

Language

Finnish

Pages

Appendices

Pages of Appendices

57

0

0

Keywords

product development, deep drawing, process, designing, analyzing

Sisältö

	Tiivistelmä	
	Abstract	
1	Johdanto	5
1.1	Toimeksiantaja.....	5
1.2	Opinnäytetyö.....	5
1.3	Tutkimuskohde	5
1.4	Lähtökohdat.....	6
2	Sovellettavat menetelmät.....	7
2.1	Tuotekehitys	7
2.1.1	VDI 2221.....	7
2.2	Syväveto	9
2.2.1	Syvävedon hyödyt	12
2.2.2	Syvävedon haasteet	13
2.3	VVEH.....	16
3	Opinnäytetyön tuotekehitysprosessi	16
3.1	Tehtävänasettelu	17
3.1.1	Lähtötilanne	18
3.1.2	Valmistuksen perusteet	19
3.1.3	Vaatimuslista	21
3.2	Esisuunnittelu	23
3.2.1	Materiaalien kartoitus.....	24
3.2.2	Luonnostelu	29
3.3	Mallinnus/analyysit.....	31
3.3.1	Esimallit	31
3.3.2	Syvävetoanalyysit.....	35
3.3.3	FEM	38
3.4	Vertailu	42
3.4.1	Kustannukset.....	42
3.4.2	Paino	48
4	Lopputulos	49
5	Pohdinta.....	50
	Lähteet.....	

1 Johdanto

1.1 Toimeksiantaja

Tämän opinnäytetyön toimeksiantajana toimii kansainvälinen metallialan yritys. Salassapitosyistä toimeksiantajaa koskevia tietoja ei voitu tässä työssä kertoa.

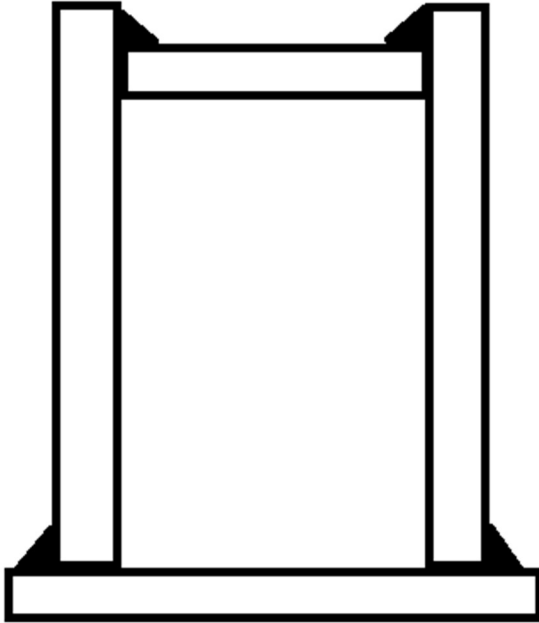
1.2 Opinnäytetyö

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin kotelomaisen teräsrakenteen tuotekehitykseen. Opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia, voiko syvävetotekniikkaa käyttää nykyisen tuotteen rungon valmistuksessa ja vertailla mahdollisen syvävedettävän mallin etuja ja haasteita nykyiseen.

Nykypäivän metalliteollisuudessa vaaditaan alhaisia tuotantokustannuksia ja yksinkertaisia sekä tilausten kasvaessa suurempaan volyymiin kykeneviä työstömenetelmiä. Näihin vaatimuksiin syvävetotekniikka voisi vastata. Syvävedossa tapahtuva muokkauslujittuminen voi mahdollistaa myös materiaalipaksuuksien pienentämisen, mikä vähentäisi rakenteen painoa.

1.3 Tutkimuskohde

Tutkimuskohteena oli suurlujuusteräslevyistä valmistettu kotelomainen rakenne. Salassapitosyistä nykyisestä rakenteesta voidaan esittää vain pääpiirteinen tuotteen sivuprofiilista luotu malli (kuva 1).



Kuva 1. Nykyinen hitsattu teräsprofiili (Kuva: Henri Kettunen).

1.4 Lähtökohdat

Työn lähtökohdana oli nykyinen valmistusmenetelmä, joka koetaan turhan epäkäytännölliseksi ja aikaa vieväksi. Nykyisessä rakenteessa on osia, joiden asettelut ja kohdistamiset ovat hankalia. Nämä tuottavat hitsauksessa virheitä, joita joudutaan korjaamaan jälkeenpäin. Syvävetotekniikan käytön tarkoituksena olisi nopeuttaa ja yksinkertaistaa tätä valmistusprosessia, mikä vähentäisi myös virheiden mahdollisuutta.

Toimeksiantajayrityksen tuotekehityksessä ja suunnittelussa yksi keskeisistä tavoitteista on kustannuksien pienentäminen ja siihen keskityttiin tässä työssä syvävedon mahdollistamalla osien ja hitsauksen vähentämisellä. Myös valmistukseen käytettävän työajan supistaminen tuottaisi säästöjä.

Nykypäivänä metalliteollisuudessa, teräsrakenteista koneissa ja laitteissa pyritään suunnittelemaan kevyempiä. Tähän keskityttiin opinnäytetyössä tutkimalla, saadaanko syvävedettävän mallin rakenteesta mahdollisesti kevyempi kuin nykyisestä.

2 Sovellettavat menetelmät

Tässä osassa esitellään opinnäytetyössä sovellettuja ja käytettyjä tutkimusmenetelmiä sekä toiminnallisen osion keskeisimmät työkalut ja työstömenetelmät. Opinnäytetyö on pääpiirteinen tutkimus ja siinä on tukeuduttu alan kirjallisuuteen.

2.1 Tuotekehitys

Yrityksen tuotekehitys ja siinä onnistuminen on yksi menestymisen merkittävimmistä edellytyksistä nykypäivänä. Yrityksen on pystyttävä huolehtimaan tuotekehityksestä jokapäiväisellä tasolla. Muussa tapauksessa tulee ennen pitkää aika, jolloin tuotteet ovat vanhentuneita, myynti vähenee ja viimein loppuu kokonaan. (Jokinen 2001, 9.)

Tuotekehityksen tehtävänä on kehittää tuotteita oman yrityksen osaamisen avulla ja markkinoilta saatavan tiedon perusteella mahdollisimman kilpailukykyisiksi, ottaen huomioon tuotannon asettamat rajoitukset. (Välimaa, Kankkunen, Lagerroos, Lehtinen 1994, 7.)

Menestyminen tuotekehityksessä pohjautuu kykyyn tunnistaa asiakkaiden odotuksia ja tarpeita sekä valmistaa tuotteita, jotka täyttävät sille asetetut vaatimukset.

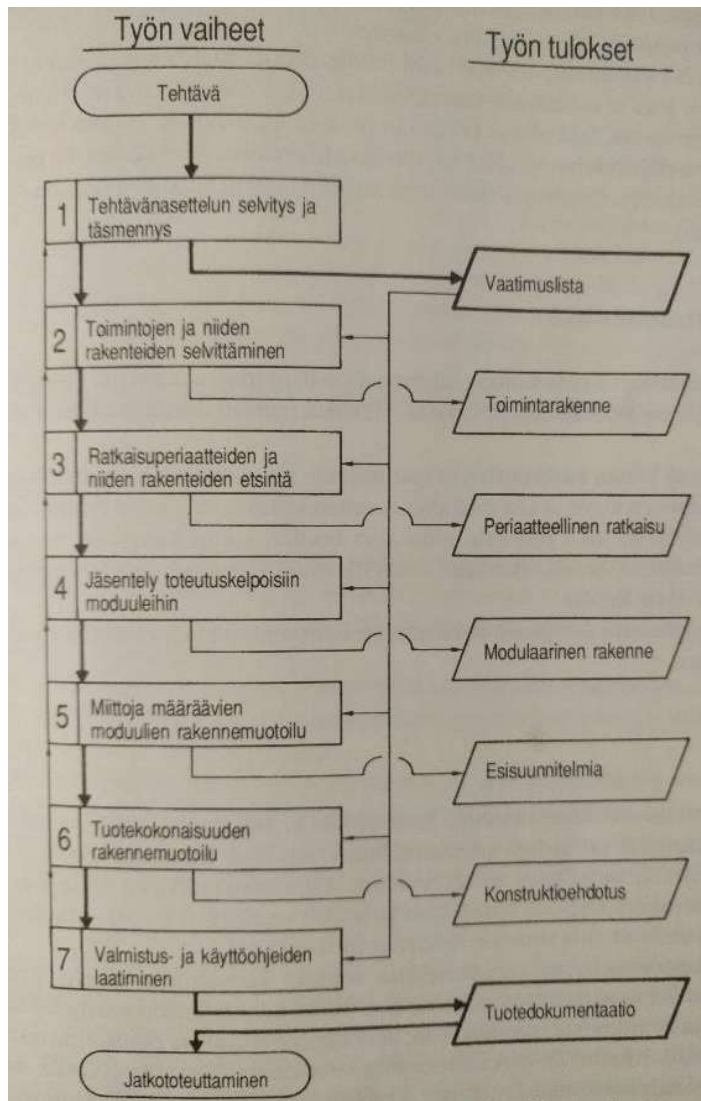
Tuotekehitystoiminnalla tarkoitetaan yksinkertaisesti sitä, että tunnettuja ratkaisuperiaatteita yhdistetään uudella, innovatiivisella tavalla tavoitteena ominaisuuksiltaan ja hinnaltaan kilpailukykyinen tuote.

2.1.1 VDI 2221

Kiristyvä kilpailu ja tuotteiden eliniän lyheneminen vaativat suurempaa panosta tuotekehitykseen, sekä halvempia ja laadultaan parempia tuotteita, joten tarve sovellettaville suunnittelumenetelmille on kasvanut. (Jokinen 2001, 10.)

Tässä opinnäytetyössä käytettiin systemaattisen suunnitteluprosessi, VDI 2221 teknisten systeemien ja tuotteiden kehittämisen ja konstruoinnin kaavaa, jonka pääkohtia tässä työssä seurataan.

VDI 2221 on vuonna 1993 päivitetty versio VDI 2222 teknisten tuotteiden luonnostelun kaavasta, joka on Saksassa 1970-luvulla kehitelty suunnittelumetodi. Se on luotu vastaamaan laajaa käyttöä eri aloilla koneenrakennuksesta aina elektroniikan kytkentöihin ja ohjelmistojen kehittelyyn saakka. Yksinkertaistettuna VDI 2221 esittää kehittelylle ja konstruoinnille etenemistavan joka seuraa seitsemää perustavanlaatuista työaskelta (kuvio 1). (Pahl & Beitz 1990, 47.)



Kuvio 1. VDI 2221 kehitystyön yleiset työaskeleet (Pahl & Beitz 1990, 47).

Kun työaskeleet yhdistetään tarvittaviin päätösaskeliin ja otetaan huomioon luonnostelun, kehittelyn ja viimeistelyn konkretisointivaiheet, saadaan aluksi karkea jako seuraavine päävaiheineen:

- | | |
|-----------------------|----------------------------------|
| – tehtävän selvittely | informaation vahvistaminen |
| – luonnostelu | periaatteen vahvistaminen |
| – kehittäminen | rakennemuodon vahvistaminen |
| – viimeistely | valmistustekniikan vahvistaminen |

(Pahl & Beitz 1990, 48).

Tuotekehityksessä tulee kuitenkin vastaan tilanteita, jolloin työaskeleita ei voida suoraan seurata tai niitä joudutaan muokkaamaan. Niin kuin Pahl ja Beitz (1990, 50) toteavat, konstruoinnin vaihteita ei voida aina tarkasti määrittää. On olemassa myös poikkeustapauksia esimerkiksi silloin, kun luonnoksesta päätettäessä tarvitaan vaikka vain pääpiirteistä tutkielmaa.

Nykyäänä kaikilla yrityksillä on omia tuotekehitykseen ja suunnitteluun tarkoitettuja ohjeistuksia ja malleja, jotka on sovellettu näistä kaavoista.

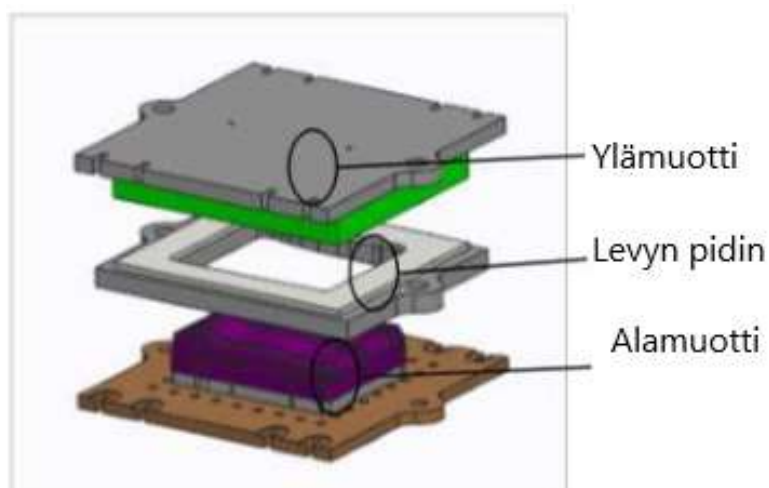
2.2 Syväveto

Syväveto on yleisimmin käytetty kylmämuovausmenetelmä muovattaessa levystä kuppimaisia ja kotelomaisia tuotteita. Kehittynyt tekniikka sekä tavoite kohti kevyempiä ja taloudellisempia teräsrakenteita on aiheuttanut kylmämuovattujen kappaleiden lisääntyneen käytön (kuva 2). Kylmämuovattujen profiilien jäykkyys ja kuormankantokyky suhteessa omapainoon ovat erinomaiset. (Teräsrakenneyhdistys 2010, 141)

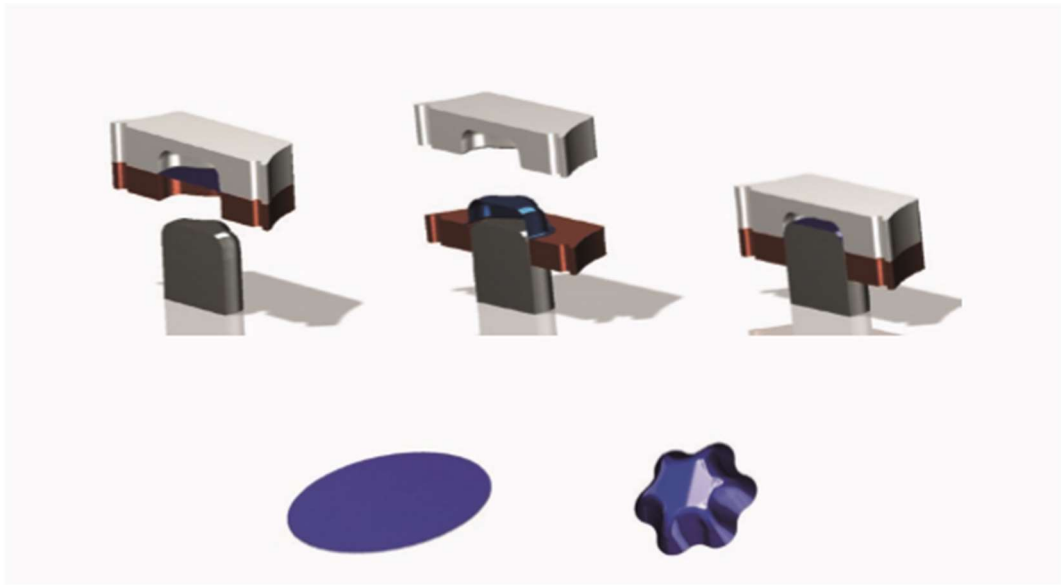


Kuva 2. Syvävetotuotteita (Kuva: Meconet Oy 2018).

Syväveto on levynmuovausmenetelmä, jossa levyaiho muokkautuu puristuksessa ja vedossa syvävetotyökalun avulla. Aihion asetetaan levynpidikkeen ja ylämuotin väliin (kuva 3), jonka jälkeen levy vedetään alamuotin yli kuppimaiseksi tuotteeksi (kuva 4). Syvävedossa materiaalinpaksuus ei juurikaan muutu, sillä materiaali pääsee koko ajan virtaamaan levynpidikkeen ja ylämuotin alta sekä muotoutumaan ala- ja ylämuotin mukaan. (Matilainen, Parviainen, Havas, Hiitelä, Hultin 2010, 220.). Kuvassa 5 on Meconet Oy:n 800 tn syväetokone.



Kuva 3. Syvävetotyökalu (Kuva: Meconet Oy 2018).



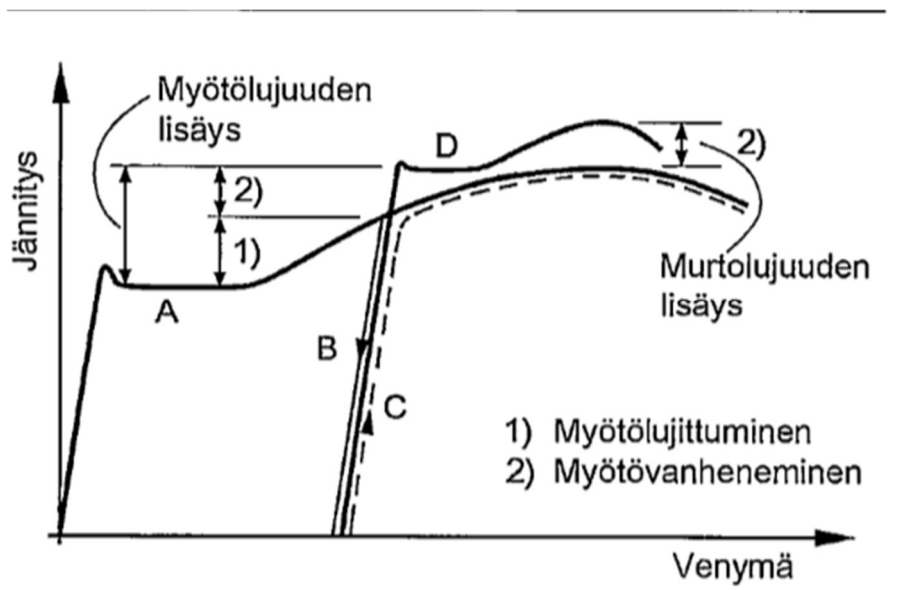
Kuva 4. Syväveto vaiheittain (Kuva: Meconet Oy 2018).



Kuva 5. Mossini 800 tn syvävetokone (Kuva: Meconet Oy 2018).

2.2.1 Syvävedon hyödyt

Syvävedo kuuluu yleisesti kylmämuovaaviin valmistustekniikoihin. Kylmämuovaavat valmistustekniikat vaikuttavat teräslevyn ominaisuuksiin. Kylmämuovaaminen nostaa materiaalin myötö- ja murtolujuutta, mutta pienentää kappaleen muodonmuutoskykyä. Ilmiöstä käytetään nimitystä muokkauslujittuminen. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 141.) Kylmämuovaamisen vaikutusta materiaaliominaisuuksiin havainnollistaa kuvio 2.



Kuvio 2. Myötölujittumisen ja myötövanhenemisen periaatteellinen vaikutus (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 142).

Muokkauslujittuminen kasvattaa kappaleen käytettävyyttä erityisesti tuotteissa ja kappaleissa, joissa vaaditaan huomattavaa lujuutta, mutta kevyttä rakennetta. Syvävedon hyödyt korostuvat suurissa volyymeissa, sillä tuotteen valmistuskustannukset laskevat tuotantomäärien kasvaessa. Kun syvävedon työkalut ja muotti on valmistettu, niin prosessi voi jatkua pienellä häiriöajalla ja ylläpidolla pitkään. (Thomasnet 2018.)

Muita syvävedon hyötyjä ovat:

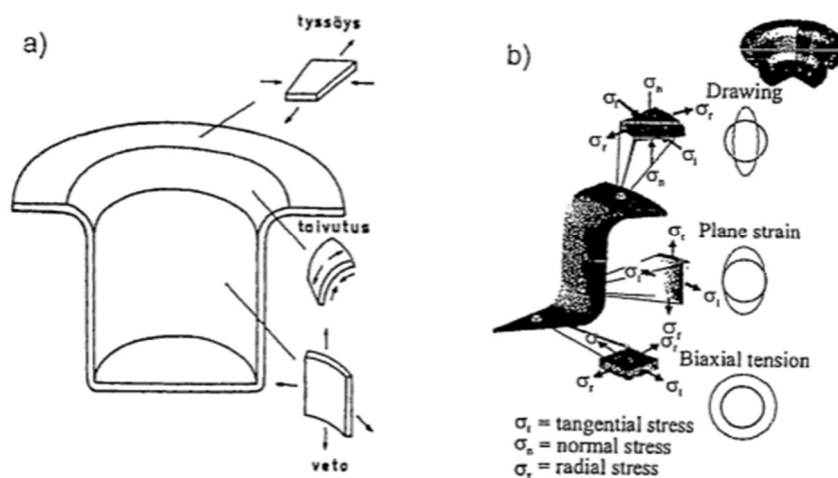
- saumattomat kappaleet: kappaleet valmistetaan yhdestä aihiolevystä
- nopeat kiertoajat: suuria määriä kappaleita helposti valmistettavissa
- monimutkaiset symmetriset geometriat: syvävedolla saadaan valmistettua poikkeuksellisen viimeistelyä ja tarkkoja kappaleita.

(Thomasnet 2018.)

2.2.2 Syvävedon haasteet

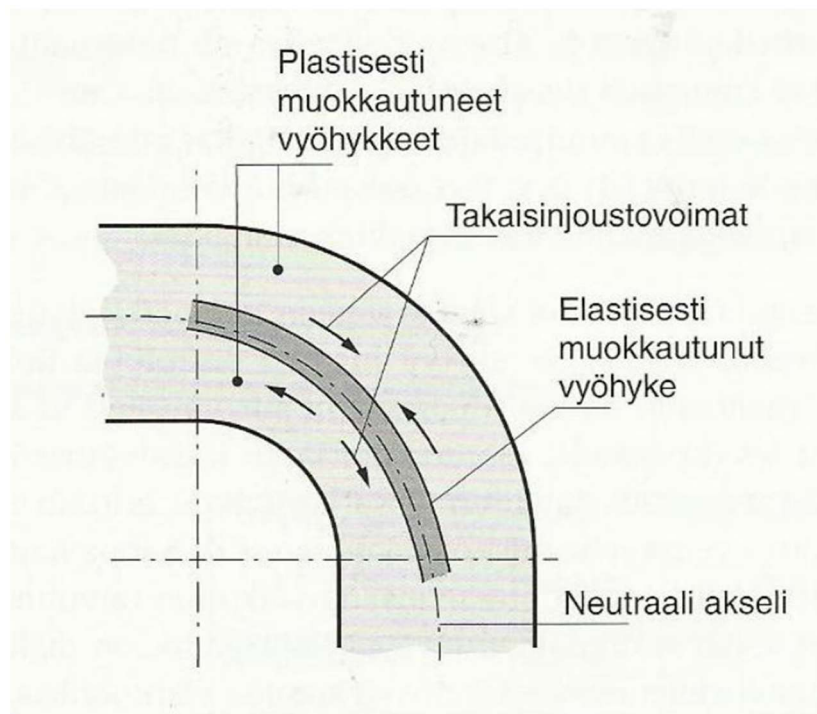
Valmistustavasta ja yleensä pienemmästä ainevahvuudesta johtuen kylmämuovatuilla rakenteilla on tiettyjä erityispiirteitä, jotka vaikuttavat suuresti rakenteen toimintaan ja jotka on otettava huomioon rakenteen suunnittelussa ja mitoituksessa.

Kappaleen jännitystila vaihtelee, kun syvävedon aikana levy joutuu tyssäntymään, taipumaan ja venymään (Kuva 6a). Jännitykset vaihtelevat vetopuristusjännityksestä (drawing) kaksiaksaaliseen jännitykseen (biaxial tension). Lisäksi muovattavan aihion seinämässä vallitsee tasomuodonmuutostila (plain strain) muotin säteen suuntaisesti (Kuva 6b). (Kivivuori, 18.)



Kuva 6. a) Syvävedossa levy tyssäntyy, taipuu ja venyy, b) levyn jännitystila vaihtelee prosessin aikana (Kuva: Kivivuori, 19).

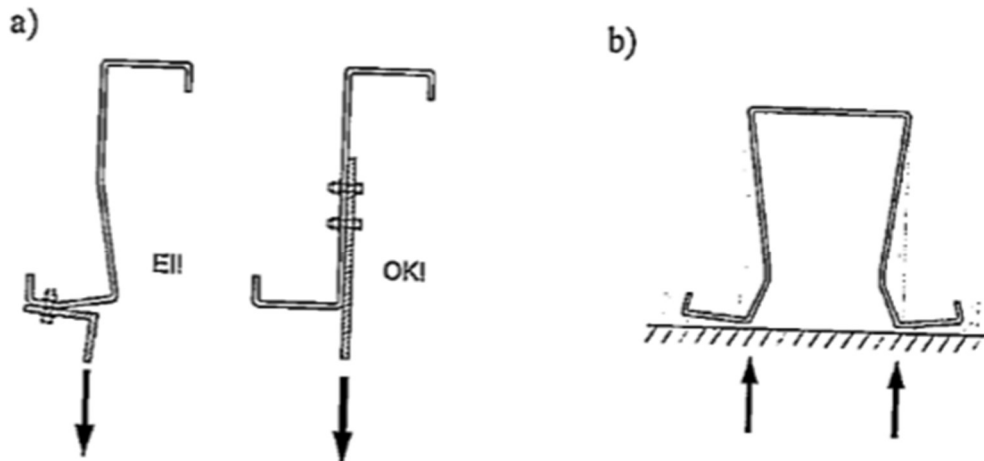
Jännitystilän vaihtelu altistaa takaisinjoustoilmille. Takaisinjoustossa taivutuksen neutraaliakselien ympärille muodostuvat elastiset vyöhykkeet pyrkivät palauttamaan taivutusta kohti alkuperäistä muotoa. Samalla pintaosiin muodostuneet plastiset vyöhykkeet aiheuttavat vastakkaisen reaktion. Aihio joustaa takaisin, kunnes sisäinen voimatasapaino on löytynyt (kuva 7). (Lepola & Makkonen 2011, 304.)



Kuva 7. Taivutuksesta syntyvä plastinen ja elastinen vyöhyke (Lepola & Makkonen 2011, 304).

Kuormituksen, kuten tukireaktion tai pistemäisen voiman välittäminen ohutlevyrakenteeseen on ongelmallista. Puristetuissa tasomaisissa poikkileikkausosissa on lommahdusvaara, jos kappaletta ei suunnitella oikein kuormituksen suhteen. Paikallinen kuormitus tulee pyrkiä siirtämään levyrakenteessa siten, että se mahdollisimman vähän vääristää poikkileikkauksen muotoa. Levyn tasossa ohutlevyrakenne kantaa hyvin kuormituksia, mutta kestää huonosti levyn pintaa vastaan kohtisuorasti kohdistuvia piste- tai viivakuormituksia. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 141,143.)

Paikallinen kuormitus tulee pyrkiä siirtämään levyrakenteeseen levyn tasossa vaikuttavien voimien kautta (Kuva 8a). Kuva 8b esittää tukireaktion kuormittamaa ohutlevyprofiilin tukematonta uumaa.



Kuva 8. Kuormituksen vaikutuksia: a) kuormituksen vaikutus levyn pintaan kohtisuoraan ja levyn tasossa b) tukireaktion kuormittama tukematon ohutlevyprofiili (Kuva: Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 143).

Syvävetotekniikasta johtuen profiilien poikkileikkaukset ovat avoimia, eikä kaksoissymmetristen profiilien valmistaminen ilman erillistä liittämistä onnistu. Syväveto aiheuttaa poikkileikkaukseen myös jäännösjäännityksiä, jotka voivat esimerkiksi hitsatessa vapautua ja aiheuttaa geometrisia vääristymisiä. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 141.)

Kaikkien edellä mainittujen erityispiirteiden ja haasteiden vuoksi levyrakenteiden toimintaan vaikuttavat monet vaikeasti arvioitavat tekijät. Monien osien ja varsinkin liitosten mitoitus joudutaan hyvin usein perustamaan kokeellisesti määritettyihin kestävyysarvoihin. (Teräsrakenneyhdistys ry 2010, 141.)

Vaikeasti mallinnettavasta rakenteellisesta toiminnastaan huolimatta ohutlevyrakenteiden ja syvävetokappaleiden käytännön mitoitus työ ei välttämättä vaadi syvällisempää rakenteiden mekaniikan tai mitoitusohjeiden osaamista, sillä nykyisin mitoitus ja analyysit suoritetaan tietokoneohjelmien avulla. Kuitenkin

ohutlevyrakenteiden suunnittelua helpottavat näiden rakenteiden rakenteellisen toiminnan ja mitoitusperusteiden ymmärtäminen.

2.3 VVEH

VVEH eli vakiovääristymisenergiyahypoteesi perustuu materiaalin vaurioitumiseen pisteessä, jossa vääristymisenenergiatiheys saavuttaa materiaalille ja vauriotyypille kriittisen arvon. Eli materiaali myötää, kun vääristymisenergia saavuttaa materiaalin myötörajan. VVEH, yleisimmin von Mises -vertailujännityshypoteesia pidetään erityisen hyvänä myötöhypoteesina, koska se perustuu jännitystilän leikkaavaan vaikutukseen ja koska myötäminenkin on lähinnä leikkautumisilmiötä. (Outinen & Salmi 2004, 349-350)

Kun tunnetaan materiaalin vetokokeen tulokset, niin VVEH on tarkkin tunnetuista lujushypoteeseista. Se sopii myötöhypoteesiksi erityisesti sitkeille materiaaleille kuten teräkselle, kuparille ja alumiinille, kun tarkastellaan von Mises -jännityksiä. (Outinen & Salmi 2004, 351-357)

Tässä opinnäytetyössä levyrakenteen kestävyyttä vertailtiin von Mises vertailujännityksien perusteella, jotka saatiin FEM-laskentaohjelmistolla.

3 Opinnäytetyön tuotekehitysprosessi

Tulevissa osioissa on esitelty teräsrakenteen tuotekehitysprosessin eri vaiheet. Työ jaettiin karkeasti neljään eri osaan. Eri päävaiheilla on välivaiheet, jonka mukaan työn on suunniteltu etenevän (taulukko 1). Vaiheet mukailevat systemaattisen suunnitteluprosessin VDI 2221 kaavaa.

Opinnäytetyöstä tuli pääpiirteinen, joten lopullista, parhaaksi optimoitua mallia ei tässä työssä haettu. Suunnitteluprosessissa oli varauduttu suuriinkin muutoksiin,

koska syvävedon käyttö vaativissa rakenteissa on vielä suhteellisen tuntematonta.

Työn lopputulokseksi saatiin pääpiirteinen tutkimus siitä, onko syvävetoa mahdollista käyttää rakenteen valmistuksessa ja olisiko se valmistusmenetelmänä nykyistä parempi.

Taulukko 1. Suunniteltu työn eteneminen

	Valmis	
	Kesken	
	Aloittamatta	
	Tilanne	Huom
1.Lähtötilanne		
Tehtävänasettelu		
Valmistuksen perusteet		
Ongelmakohdat		
Työstöajat		
Kustannukset		
Vaatimuslista		
2.Esisuunnittelu (Meconet)		
Syväveto muotin kustannus		
Kappalemäärä/muotti		
Syvävedettävien terästen kartoitus		
Materiaalinvalinta		
Syvävetotavan valinta		
3.Mallinnus/Analyysit		
Esimallit		
Syvävetoanalyysit		
FEM-Analyysi nykyinen		
FEM-Analyysi syväveto		
Parannukset?		
Lopullinen malli		
4.Vertailu/Lopputulos		
Hitsaukset		
Valmistusajat		
Materiaalivähennykset		
Kustannukset		
Paino		
Lopputulos		

3.1 Tehtävänasettelu

Ensimmäisessä osassa selvitettiin lähtötilanne, valmistuksen perusteet ja sen ongelmakohdat. Kun kokonaiskuva toiminnasta ja valmistusprosessista oli riittävän hyvä, laadittiin vaatimuslista syvävedettävälle mallille.

Tehtävänasettelun selvitys tarkoittaa tiedon hankintaa työn vaatimuksille ja sille määrätyille rajoituksille. Tämän tehtävän päätöksenä on vaatimuslistan laatiminen, jossa otetaan huomioon kehittämisen tarve ja seuraavat työaskeleet. (Pahl & Beitz 1990, 48.)

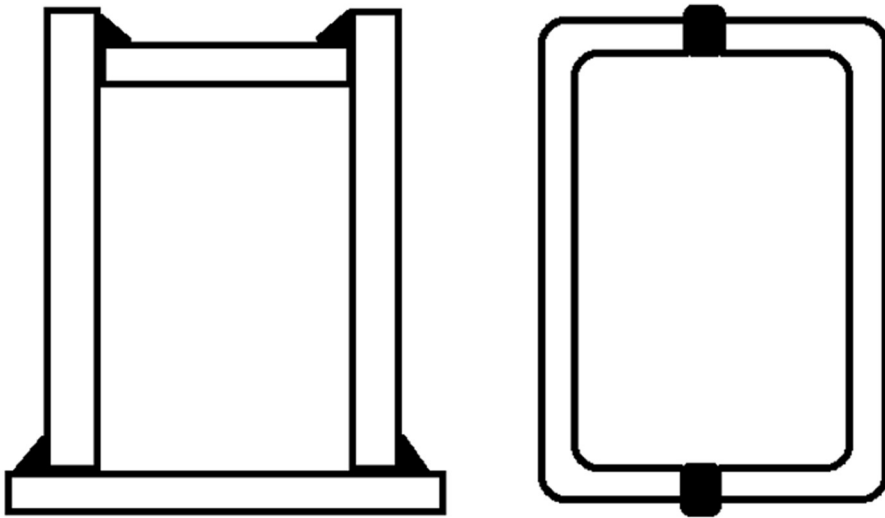
3.1.1 Lähtötilanne

Työn aloituspalaverissa määritettiin tehtävänasettelu, suunnittelun rajaukset ja työn yhteyshenkilöt.

Rakenteen päädyt haluttiin suunniteltavan sellaiseksi, että tutkimuskohteena olevasta terästuotteesta olisi mahdollista laserleikata pienempi malli.

Työstä tulisi pääpiirteinen, joten lopullista mallia ei tässä opinnäytetyössä haettu ja suunnittelun valinnat ja tulokset olisivat enemmänkin suuntaa antavia. Kuva 9 esittää ensimmäisiä hahmotelmia sivuprofiilista ja syvävetotavasta, joista työ aloitettiin. Alkuperäisessä ideassa rakenne syvävedettäisiin pitkittäin pysty akselin mukaisesti ja se kokoonpantaisi neljästä osasta.

Kyseisen rakenteen syvävetoa on tutkittu yrityksen toimesta jo vuonna 2008, mutta silloin oli tultu siihen tulokseen, että syväveto ei ole mahdollista käytetyillä teräksillä. Syvävetotekniikan ja materiaalien kehittyminen kymmenessä vuodessa antoivat mahdollisuuden aiheen uudelleen tutkimiseen.



Kuva 9. Vasemmalla nykyinen sivuprofiili, oikealla hahmoteltu syväveto (Kuva: Henri Kettunen).

3.1.2 Valmistuksen perusteet

Tehtävänasettelun jälkeen tutustuttiin nykyisen valmistuksen perusteisiin ja sen ongelmakohtiin. Nykyisestä prosessista selvitettiin myös hitsaajan ja robottihitsauslaitteen työstöajat.

Nykyinen kokonaisuus perustuu S650MC -teräslevyistä hitsattuun kotelomaiseen rakenteeseen. Teräslevyt on leikattu ja taivutettu alihankkijalla oikeaan muotoonsa ja ne saapuvat hitsauspisteelle kiteissä (kuva 10).



Kuva 10. Teräslevykitti (Kuva: Henri Kettunen).

Kiteissä on teräslevyt neljän tuotteen valmistukseen. Nykyinen rakenne valmistetaan kymmenestä eri teräslevystä. Teräslevyt asetellaan kohdistustelineeseen työohjeiden mukaisessa järjestyksessä ja ne hitsataan kiinni ennalta määritetyistä kohdista.

Teräslevyjen määrä altistaa virheille ja osien kohdistaminen on hidasta. Huomaamaton virhe voi aiheuttaa suurta korjauksen tarvetta ja näin heikentää laatua ja tuottavuutta. Paikat, joita hitsausrobotit eivät kykene hitsaamaan, ovat ahtaita ja nämä joudutaan hitsaamaan käsin.

Hitsaajan työn jälkeen runko siirretään hitsausroboteille, jossa hitsataan rakenteen kaikki pitemmät hitsit. Hitsauksessa käytetään kahta Yaskawa MA-sarjan 6-akselista hitsausrobotia, jossa on lisäksi kappaleenpyörityslaitteisto. Kappaleenpyörityslaitteisto mahdollistaa hitsauksen monissa eri asennoissa ja varmistaa robotille parhaan mahdollisen työskentelyasennon.

Yhden rakenteen valmistukseen hitsaajalle on varattu sähköisen työohjejärjestelmän mukaan 3 tuntia, josta puoli tuntia on varattu robotihitsaukseen.

3.1.3 Vaatimuslista

Vaatimuslista luotiin vaatimuksista geometrian, valmistuksen, lujuuden ja kustannusten mukaan. Vaatimukset haluttiin pitää mahdollisimman yksinkertaisina ja selkeinä, ettei yksityiskohtien suunnittelussa ja tutkimisessa mentäisi tässä työssä liian syvälle. Tämä myös palvelee paremmin pääpiirteisen tutkimuksen raameja.

Perusgeometria haluttiin pitää mahdollisimman samana, näin yksinkertaistetaan lujuusvertailun suorittamista nykyisen ja syvävedettävän mallin välillä. Kuitenkaan geometriaa ei rajattu liian tarkasti, ettei estettäisi luovaa suunnittelutyötä. Noin 10 - 200 mm muutokset geometriassa olisivat näin ollen sallittavissa.

Vaatimuslistan merkittävimmäksi osaksi muodostui valmistuksen vaatimukset. Valmistuksessa oli monia ongelmakohtia ja aikaa vieviä työvaiheita, joita haluttiin vähentää.

Vaatimuslistaan saatiin valmistuksen näkökulmasta seuraavat asiat:

- vähemmän osia
- vähemmän hitsauksia
- robottihitsaus kaikille mahdollisille hitsauksille
- osien hyvä yhteensopivuus
- osien yksinkertainen asettelu ja yhteensovitus
- ahtaiden hitsauskohtien välttäminen
- hitsaajan työn vähentäminen
- hyvä hitsattavuus nykyiseen S650MC -teräkseen.

Hyvä hitsattavuus nykyiseen S650MC -teräkseen haluttiin, koska terästuote kuuluu kokonaisuuteen, jossa käytetään kyseistä terästä.

Lujuuden suhteen vaatimukseksi haluttiin, että syvävedettävä malli kestää vähintään yhtä paljon rasituksia kuin nykyinen, Jos ohuemman profiilin syvävedettävä malli kestää samat rasitukset kuin nykyinen rakenne, niin vaatimus antaa mahdollisuuden materiaalin vähentämiselle.

Vaatimukset lujuuden suhteen olivat:

- vähimmäisvaatimuksena syvävedettävä malli kestää 6 500 kg aiheuttamat rasitukset
- toive rungon painolle < 100 kg.

Yrityksen Kustannussäästöprojekteissa ei yleensä oteta huomioon muuta kuin materiaalien ja osien hintoja. Syväveto mahdollistaa kuitenkin työvaiheiden suurenkin nopeutumisen, joten työn vaikutus kokonaiskustannuksiin voi olla huomattava.

Vaatimukset kustannusten suhteen olivat:

- Rungon osat < 200 €
- Hitsaajan työ < 86,13 € (3 tuntia)

Vaatimuslistasta laadittiin VDI 2221 -tyylinen taulukko (taulukko 2). Taulukossa määritellään vaatimukset selkeästi ja taulukkoa voi seurata helposti projektin eri vaiheissa.

Taulukko 2. Vaatimuslista.

Muutos pvm.	KV, VV, T	VAATIMUS	Tärkeys
		GEOMETRIA	
	VV	Perusgeometria pysyy samana	2
		VOIMAT	
	KV	Kestää vähintään samoja rasituksia kuin nykyinen	1
		MATERIAALI	
	VV	S650 Teräkseen hitsattava	1
		TURVALLISUUS	
	KV	Turvallinen valmistus/käyttö ei laske nykyisestä	1
		VALMISTUS	
	VV	Vähemmän osia	2
	VV	Vähemmän hitsauksia	2
	T	Robottihitsauksen hyödyntäminen	1
	VV	Rungon yksinkertainen rakenne, kokoonpantavuus	1
	T	Ahtaiden hitsauskohtien välttäminen	1
	T	Hitsaajan työn vähentäminen	1
		KÄYTTÖ	
	T	Paino < 101Kg	2
		KUSTANNUKSET	
	T	Rungon osat < 196,56€	1
	T	Työkustannukset < 86,13€	1
		TOIMITUSAIKA	
	VV	3KK aloituspäivästä	2

KV = kiinteä vaatimus, VV = vähimmäisvaatimus, T = toivomus 1-3=TÄRKEÄ-EI TÄRKEÄ

3.2 Esisuunnittelu

Toisessa osassa aloitettiin luonnostelu ja suunnittelu vaatimuslistan pohjalta, tutkittiin nykyisen materiaalin syvävedettävyys ja kartoitettiin vaihtoehtoisia materiaaleja.

Esisuunnittelun työvaiheet suoritettiin päivän pituisen vierailun aikana syvävetotuotteita valmistavalla Meconet Oy:llä.

Suunnitellusta työn etenemisestä poiketen muottien kustannukset ja muoteista saatavien kappalemäärien selvittäminen jouduttiin suorittamaan myöhemmin. Hinnoissa ja kappalemäärissä voi olla suurtakin vaihtelua riippuen pinnoitteesta, joten niihin vaadittiin tarkemmat mallit.

Luonnostelu on osa konstruointia, jossa tehtävän selvittelyn päättävän vaatimuslistan jälkeen määritetään rakenteeseen ratkaisuperiaatteita. Tähän

sisällytetään ongelmien tarkastelua, toimintarakenteiden laatimista ja vaikutusrakenteen luomista. Luonnostelu on ratkaisun periaatteen vahvistamista (Pahl & Beitz 1990, 48)

3.2.1 Materiaalien kartoitus

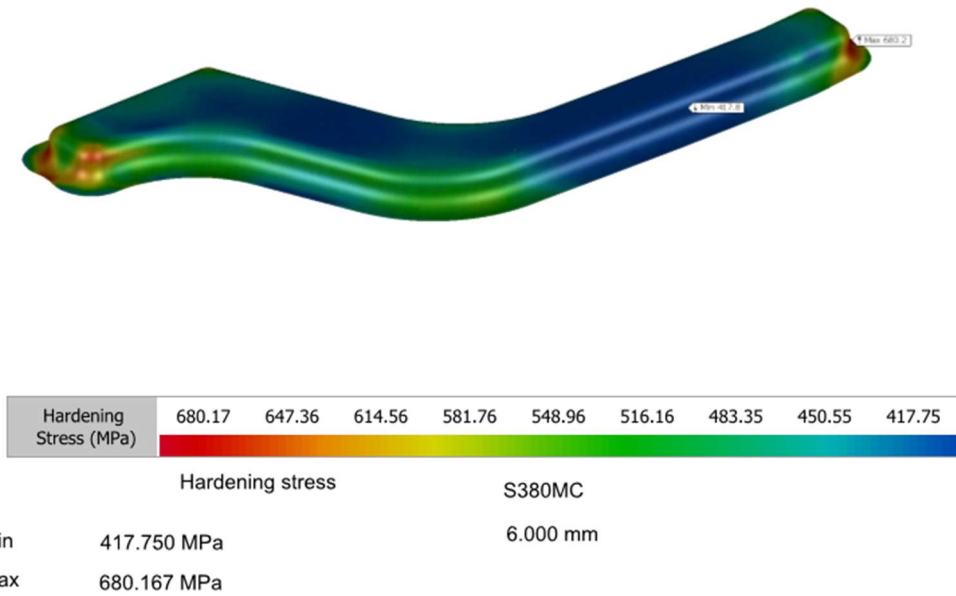
Materiaalien kartoituksella oli tarkoitus selvittää, onko nykyinen S650MC teräs syvävedettävissä sekä tutkia mahdollisia vaihtoehtoisia teräksiä. Kattavampaa materiaalinvalintaprosessia ei tässä työssä käydä läpi, koska vaatimukset rajaavat materiaalit suoraan kuumavalssattuihin teräksiin.

Vertailtaviksi materiaaleiksi valittiin yleiset kuumavalssatut S355, S460, S500 ja S700-teräkset. Nykyistä käytettyä S650 terästä ei syvävetoanalyysiohjelman materiaalikirjastossa ollut saatavilla mutta voitiin olettaa, että valitusta S700 teräksestä saadut tulokset vastaavat pääpiirteittäin S650 terästä.

Rakenteesta oli jo olemassa karkea syvävetomalli ja analyysi. Mallin teräslaatua muuttamalla sekä ajamalla analyysit uudelleen saatiin tietoa eri terästen syvävedettävyydestä ja lujittumisesta prosessin aikana. Teräksiä vertailtiin toisiinsa näiden pohjalta. Jos pienemmän myötörajan omaava teräs saadaan lujittumaan prosessin aikana nykyisen S650 teräksen myötörajaan asti, niin voidaan olettaa, että tällöin heikompi teräs kestää samoja lujuuden asettamia vaatimuksia kuin nykyinen. Tätä kautta voidaan saavuttaa haluttuja säästöjä vaihtamalla kalliimpi teräs halvempaan.

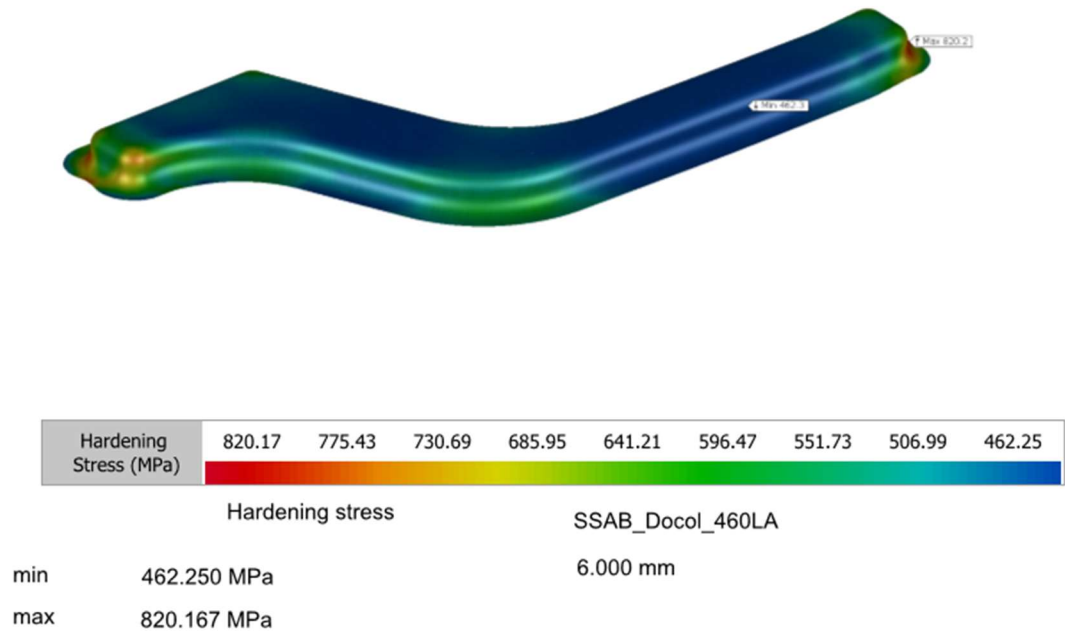
Materiaalien kartoitus oli valmiiden mallien ja analyysien ansiosta lopulta suhteellisen helppoa ja yksinkertaista. Analysointiohjelmat ovat nykypäivänä hyvinkin kehittyneitä ja ne antavat nopeasti tarkkoja tuloksia vain lähtöarvoja muuttamalla.

Tuloksista saatiin selville, että kaikki vertailtavat teräkset, mukaan lukien nykyinen S650 on syvävedettävissä, joten vertailu kohdistettiin materiaalin lujittumiseen syvävedon aikana.



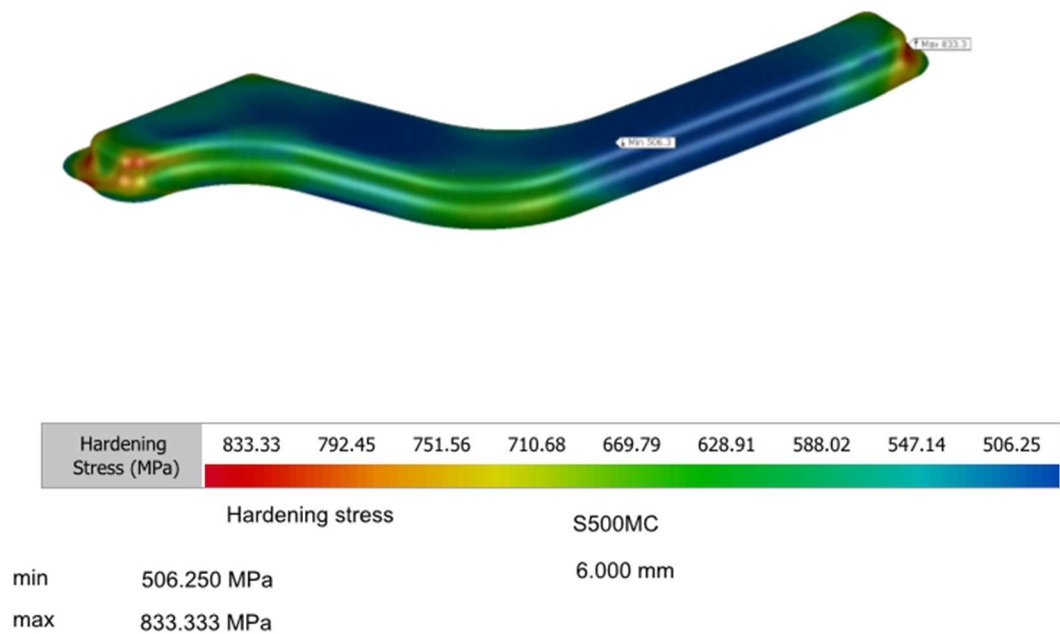
Kuva 11. S355 teräksen muokkauslujittuminen syvävedossa (Kuva: Meconet Oy).

Kuvasta 11 nähdään, että S355 teräs lujittuu parhaimmillaan 680 MPa:iin asti. Mutta vaadittu 650 MPa:n ylitys tapahtuu vain hyvin rajoitetulla alueella ja suurin osa pinta-alasta lujittuu alle vaaditun määrän. Näin voidaan todeta, että malliin täytyisi luoda paljon vahvikemuotoja varsinkin kriittisille alueille.



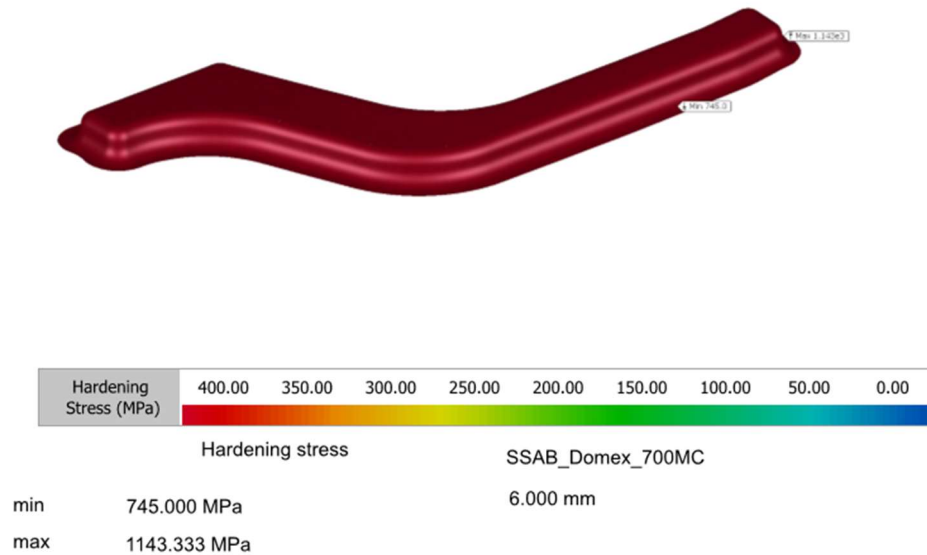
Kuva 12. S460 teräksen muokkauslujittuminen syvävedossa (Kuva: Meconet Oy).

Kuvasta 12 nähdään, että S460 teräs lujittuu tietyillä muodoilla 820 MPa:iin asti ja kriittisissäkin kohdissa päästään lähelle haluttua arvoa. Kappaleeseen luotaisiin vahvikemuotoja mutta kuitenkin mallinnusosuus ja optimointi rasituksille pysyisi kohtuullisena, joten S460 teräs on varteenotettavampi vaihtoehto kuin S355.



Kuva 13. S500 teräksen muokkauslujittuminen syvävedossa (Kuva: Meconet Oy).

S500 teräs (kuva 13) lujittuu tietyissä kohdissa 833 MPa:iin asti ja kriittisissä kohdissakin muokkauslujittuminen nostaa myötörajan yli vaaditun 650 MPa:n. Kappaleeseen ei ole tarvetta luoda vahvikemuotoja mutta S500 teräksen kohdalla pitää ottaa huomioon materiaalin samankaltaisuus nykyisen S650 teräksen kanssa. Lähes samaa teräslaatua ei ole kannattavaa vaihtaa, jos nykyinenkin S650 teräs on syvävedettävissä.



Kuva 14. S700 teräksen muokkauslujittuminen syvävedossa (Kuva: Meconet Oy).

Aiemmin määritettynä S650 terästä vastaava S700 teräs (kuva 14) lujittuu tietyissä kohdissa yli 1000 MPa:n ja kappaleen minimilujittuminenkin on yli 650MPa. Tämän perusteella voidaan olettaa, että S650 teräksen muokkauslujittumisessa päästään lähelle 1000 MPa.

Materiaalinkartoituksessa tiedusteltiin sopivaa teräslaatua myös suoraan materiaalintoimittajalta. Sopiva vaihtoehto löytyi paljon autoteollisuudessa käytetystä SSAB460 LaserPlus teräksestä. Teräs on helpommin muokattavissa kuin nykyiset käytetyt rakenneteräkset, muokkauslujittuminen olisi samankaltainen jo analysoidun S460 teräksen kanssa ja se vastaisi kaikkiin materiaalivaatimuksiin. SSAB460 LaserPlus olisi myös 60 € halvempi per tonni kuin nykyinen S650.

Taulukko 3. Vertailtavat materiaalit.

Syvävedettävät kuumavalssatut teräkset			
Teräs	Hyödyt	Ongelmat/Haasteet	Lopputulos
S355	Halvin. Paras muokattavuus	Joudutaan tekemään paljon vahvikemuotoja	Suunnittelu ja optimointi vie liikaa aikaa. Rajataan pois
SSAB460MC LaserPlus	60€ halvempi per tonni. Hyvin muokattavissa suhteessa lujuuteen	Joitakin vahvikemuotoja mallinnettava	Suunnittelutyö pysyy kohtuullisena. Vaihtoehto nykyiselle teräkselle
S500	Vastaa lähelle nykyistä terästä	Onko kannattavaa vaihtaa lähes samaan teräkseen	Muutosprosessista ei saada haluttua hyötyä irti. Rajataan pois
S650	Materiaalia ei tarvitse vaihtaa	Syvävetoprosessia joudutaan optimoimaan eniten	Nykyinen teräs syvävedettävissä.

Vaihtoehtoista tehtiin yksinkertainen taulukko (taulukko 3). Taulukkoon listattiin teräkset, niiden hyödyt ja ongelmat/haasteet.

Materiaalinkartoituksessa päästiin haluttuun lopputulokseen. Nykyinen teräs S650MC on syvävedettävissä ja lisäksi sille löydettiin samoihin vaatimuksiin vastaava, halvempi vaihtoehto: SSAB460 LaserPlus. Lopputulokseen ei valittu vain yhtä teräslaatua. Tiedossa on, että suunnittelussa voi tapahtua suuriakin muutoksia. Siksi on kannattavampaa antaa pääpiirteiselle tutkimukselle enemmänkin hyviä vaihtoehtoja kuin yksi määritetty materiaali, jonka mukaan edettäisiin.

3.2.2 Luonnostelu

Luonnostelu aloitettiin tarkastelemalla syvävetotapaa rungolle. Alkuperäisen hahmotelman mukaan rakenne syvävedettäisiin pitkittäin pysty akselin mukaisesti ja siinä olisi 4 osaa (kuva 10), jotka syvävedettäisiin kahdella muotilla. Syvävedon ja voimien jakautumisen kannalta tämä olisi myös paras vaihtoehto.

Syväveto antaa mahdollisuuksia monille eri muodoille. Muodot antavat kappaleelle lisää jäykkyyttä kuin myös ulkonäköä.



Kuva 15. Kappaleeseen luonnosteltu muoto (Kuva: Meconet Oy).

Syvävetoanalyysiohjelmalla on mahdollista luoda kappaleen pintaan yksinkertaisia vahvikemuotoja (kuva 15). Sisäpuolelle kaartuva muoto toisi kappaleelle ulkonäköä ja lujittuminen saataisiin kohdistettua oikeisiin kohtiin. Syvävedossa levyn pidikkeistä syntyvä laippa on mahdollista ja suositeltavaa käyttää hyödyksi. Laipat hyödyntämällä saataisiin kappaleelle lisää taivutusjäykkyyttä. Mahdollisuutta aihion repeytymiseen prosessin aikana pienennetään käyttämällä kaikkien kaarien r-mittana levynpaksuus *4.

Esimallin muotovaihtoehdot ja perusteet määritettiin vaatimuslistan pohjalta Meconetilla. Luonnostelu viimeisteltiin toimeksiantajayrityksellä. Kappale on suhteellisen yksinkertainen ja helposti mallinnettavissa, joten lopulliseen muotoon voitiin vielä tehdä suuriakin muutoksia työn loppupuolella, jos se nähtiin tarpeelliseksi.

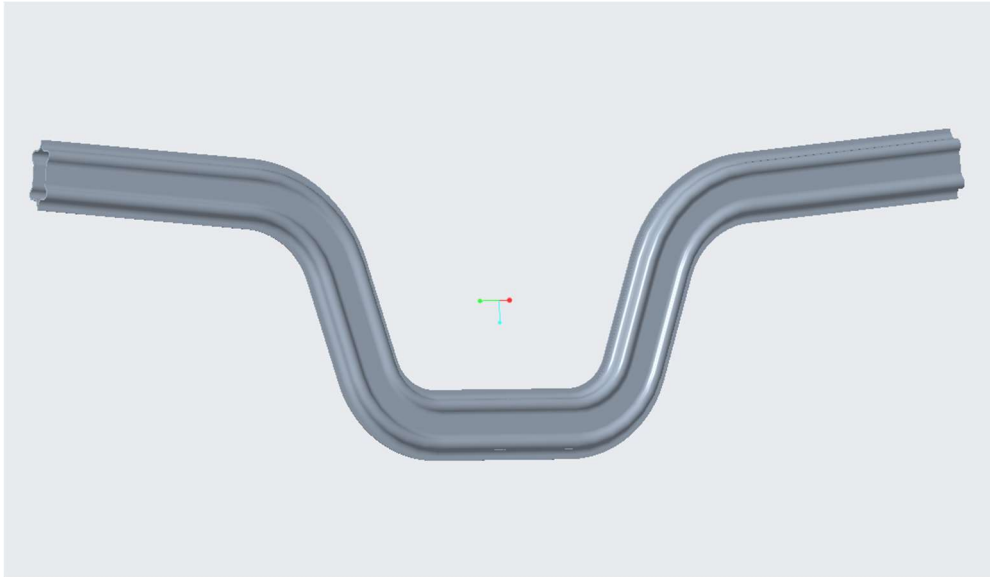
3.3 Mallinnus/analyysit

Kolmannessa osassa kehiteltiin ja luotiin esimalleja Creo -mallinnusohjelmalla eri muodoilla ja ainepaksuuksilla geometrinen vaatimusten rajoissa. Mallit lähetettiin Meconet Oy:lle, jossa niiden syvävedettävyys analysoitiin. Kokoonpantu runko analysoitiin FEM-lujuuslaskentaohjelmalla, määritettiin rakenteen kriittisimmät pisteet ja selvitettiin tarve parannuksille.

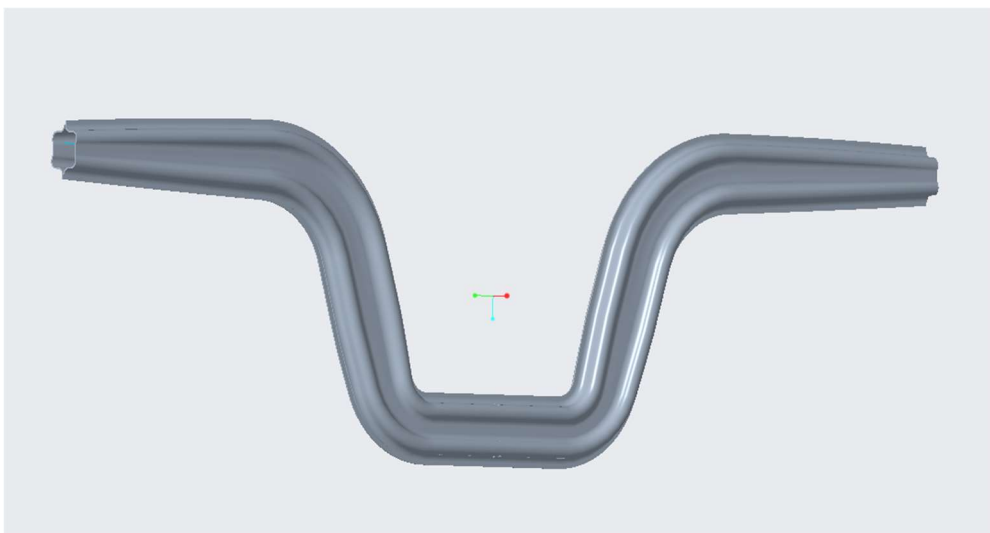
Kehittelyyn konstruoinnin osana kuuluu teknisten tuotteiden kokoonpanorakenteen suunnittelua yksikäsitteisesti teknisten ja taloudellisten näkökulmien mukaan. Kehittely on ratkaisun rakennemuodon vahvistamista. Usein kehittäessä edetään samanaikaisesti erilaisien mittakaavaisten ehdotusten mukaan, jotta päästäisiin eri vaihtoehtojen etuihin ja haittoihin. (Pahl & Beitz 1990, 49.)

3.3.1 Esimallit

Meconetilla määritettyjen perusteiden pohjalta aloitettiin mallinnus. Alkuperäinen syvävetomalli oli otettu suoraan nykyisen rakenteen ulkomittojen pohjalta. Syvävedossa syntyvät laipat kasvattivat kuitenkin rungon koon kohtuuttoman suureksi, joten rakenne suunniteltiin kokonaan uudelleen. Osat mallinnettiin Creo Parametric 4.0 -mallinnusohjelmalla.

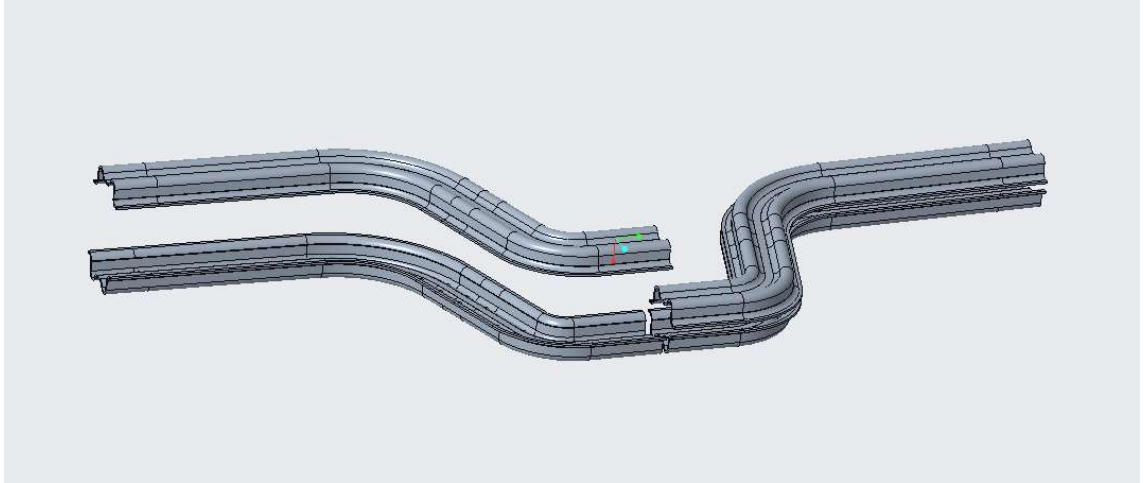


Kuva 16. Sweep -malli (Kuva: Henri Kettunen).



Kuva 17. Swept blend -malli (Kuva: Henri Kettunen).

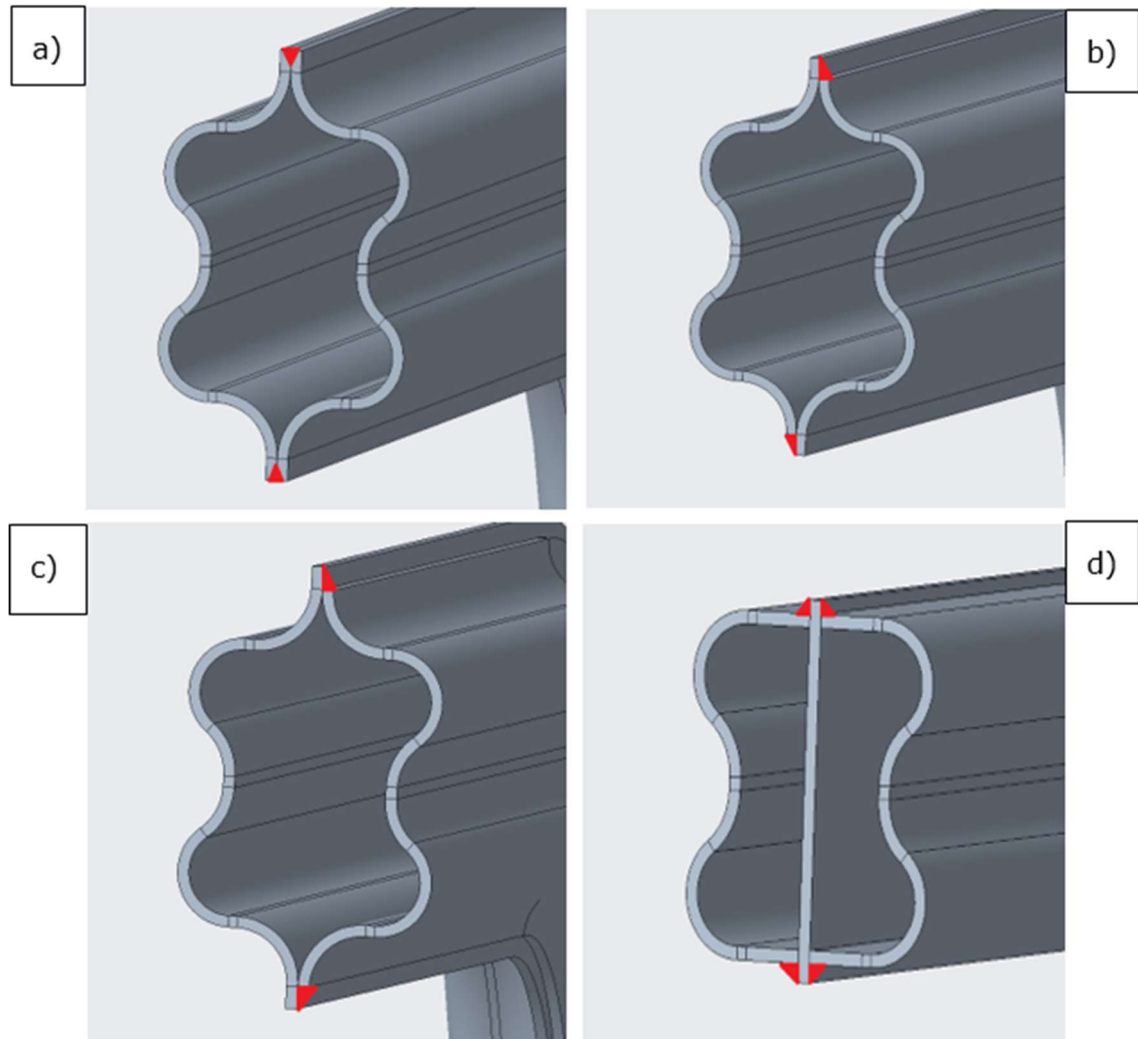
Teräsrakenteesta mallinnettiin kaksi kokoonpanomallia pienin eroavaisuuksin. Ensimmäisen mallin osat luotiin sweep -tyylillä (kuva 16), jolloin poikkileikkauksen profiili pysyy samana koko pituudelta. Toiset osat mallinnettiin swept blendillä (kuva 17), jolla rakenne saatiin mukailemaan enemmän nykyisiä muotoja. Molemmissa malleissa haluttiin säilyttää sisäänpäin kaartuva pinnan muotoilu jäykkyyden ja ulkonäön lisäämiseksi. Terästuotteet olisivat näissä malleissa laserleikattavissa helposti kapeammaksi.



Kuva 18. Suunniteltu liittäminen (Kuva: Henri Kettunen).

Tuotteessa olisi 4 osaa ja osat liitettäisiin hitsaamalla liitoskohdasta koko matkalta molemmin puolin (kuva 18). Liitoskohdalle tehtiin muutamia vaihtoehtoja. Liitoksen hitsin kestävyys ei otettu tässä työssä kantaa. Kun vaihtoehtoja oli tarkasteltu, niin FEM-analyseissa oletettiin, että optimaalinen liittämistapa oli saavutettu ja teräsrakennetta voitiin ajatella yhtenä profiilina. Todennäköisesti liitoksen hitsaus on koko rakenteen kriittisin kohta, jonka tarkasteluun ja tutkimiseen joudutaan käyttämään paljon aikaa myöhemmin.

Mallit vastaisivat hyvin valmistuksen vaatimuksiin. Neljästä osasta kokoonpantu tuote olisi jo päällisin puolin tarkasteltuna huomattavasti yksinkertaisempi valmistaa ja kokoonpanna. Mallin liitos toteutettaisiin yhdellä saumalla, joka olisi myös robottihitsattavissa, joten voitiin ajatella, että hitsaukseen käytettävä aika puolittuisi. Rungon hitsauksessa ei olisi myöskään ahtaita tai hankalia hitsauskohtia.



Kuva 22. Osien liitosvaihtoehdot, a) tasamittaiset laipat b) eripituiset laipat c) toispuolinen hitsaus d) laipaton liitos (Kuva: Henri Kettunen).

Ensimmäisessä vaihtoehdossa (kuva 22a) osien laipat ovat yhtä pitkät ja liitos hitsattaisiin esimerkiksi V-hitsillä. Laippojen ollessa yhtä pitkät, voimat jakautuisivat tasaisemmin ja kuormitus siirtyisi levyrakenteeseen levyn tasossa.

Toisessa vaihtoehdossa (kuva 22b) laipat eivät ole tasossa vaan limittäin. Näin liitos saataisiin hitsattua yksinkertaisella pienahitsauksella. Tässä liitoksessa on haasteena levyn paksuus. Onko mahdollista saada laipan pätyyn tarpeeksi kestävää ja paksua hitsausta? Nykyään rakenteen pienahitsauksissa käytetyn a4 hitsin z-mitta on 5.65 mm niin levyn paksuuden pitäisi olla vähintään tuon mitan. Z-mitta on lisäksi teoreettinen. Todellisuudessa hitsin sulamisen jälkeen mitta voi olla vielä suurempikin. Siksi levyn paksuuden pitäisi olla tässä tapauksessa

vähintään 6 mm. Jos haluttaisiin käyttää 4 mm levyä niin hitsin pitäisi olla niinkin pieni kuin a2. c-vaihtoehdossa hyödyt ja haasteet ovat samat.

Neljäs vaihtoehto (kuva 22d) mallinnettiin laipattomana. Syvävetokappaleiden väliin tulisi ylimääräinen levy. Hitsaus olisi yksinkertaisemmin suunniteltavissa ja sen kestävyys helpommin todettavissa. Ylimääräinen levy kuitenkin lisäisi rungon osamäärän neljästä kuuteen ja rakennetta jouduttaisiin hitsaamaan enemmän. Myös syvävedon kaikkia hyötyjä ei otettaisi irti, kun laipat jouduttaisiin rajaamaan pois.

Liitoksien tarkastelun myöhemmässä vaiheessa tuli ilmi, että a-vaihtoehdon hitsaus (kuva 22a) ei onnistuisi ilman optista railonseurantalaitteistoa.

Nykyinen railonseuranta perustuu hitsausarvoihin ja niiden muutokseen. Vapaalangan pituuden muutos vaikuttaa hitsausvirtaan ja tätä arvoa seuraamalla saadaan seurattua railon keskikohtaa tietyissä raja-arvoissa. (Jääskeläinen 2015, 13.)

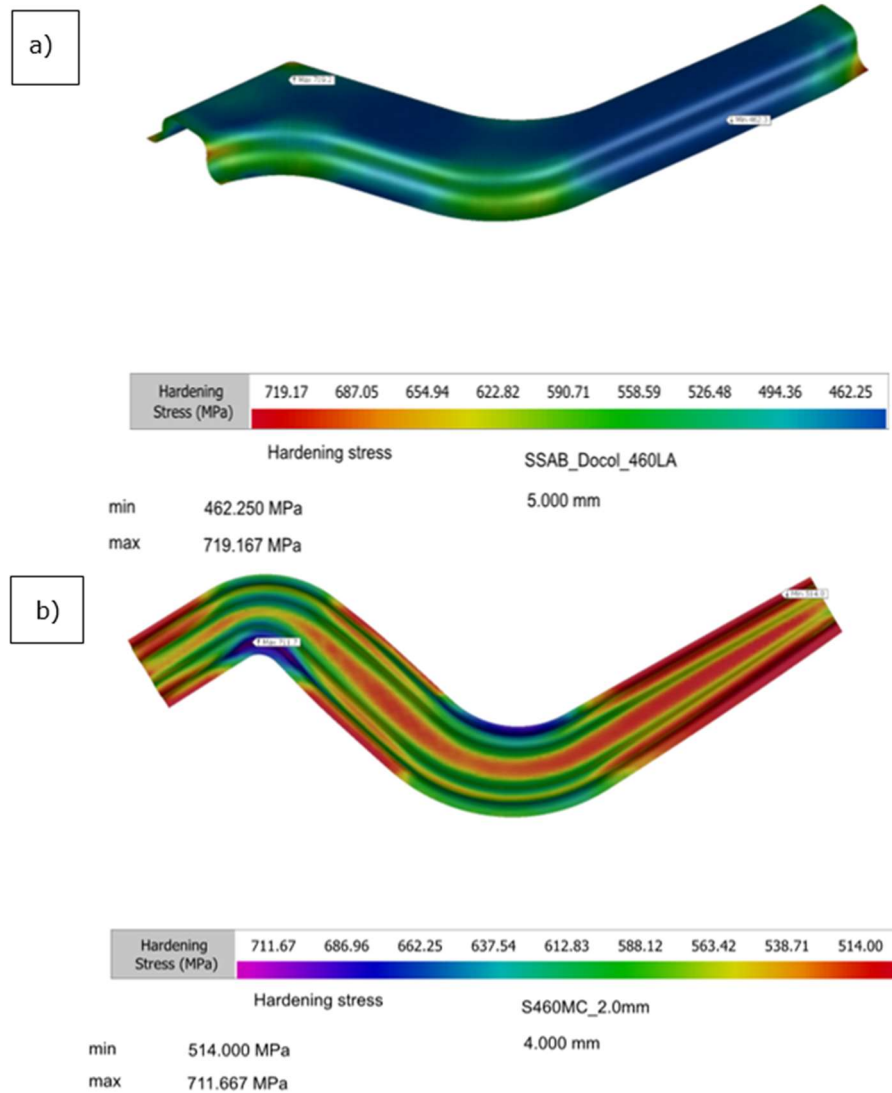
Nykyinen railonseuranta tarvitsee siis toimiakseen levyjen kulman (pienahitsi) jota pitkin robotin on mahdollista seurata hitsausarvojen muutoksia.

Optinen railonseuranta perustuu laseriin, fotodiodimatriisiin ja optiikkaan, jolla pystyy seuraamaan hyvinkin tarkasti erilaisia ja eri kokoisia railoja. Optinen railonseurannassa on nopeampi paikkahaku, laajemmat käyttömahdollisuudet, pienempi virhemahdollisuus ja se olisi myös huomattavasti tarkempi kuin nykyinen järjestelmä. (Jääskeläinen 2015, 15,17.)

Yhden optisen railonseurantalaitteiston hintataso liikkuu 20 000 \$ - 100 000 \$ välillä, joten se vaatisi suuren investoinnin. Laitteistolla olisi kuitenkin laajasti käyttöä eri hitsaustilanteissa.

3.3.2 Syvävetoanalyysit

Suunniteltujen uusien mallien välillä ei lopulta geometrisesti ollut suuria eroja. Kun niiden syvävedettävyys ja lujittuminen olivat samankaltaista, niin tarkempaa tarkastelua ei tarvittu. Uusilla syvävetoanalyyseilla oli tarkoitus tarkastella muotojen vaikutusta osien lujittumisessa sekä takaisinjousto.

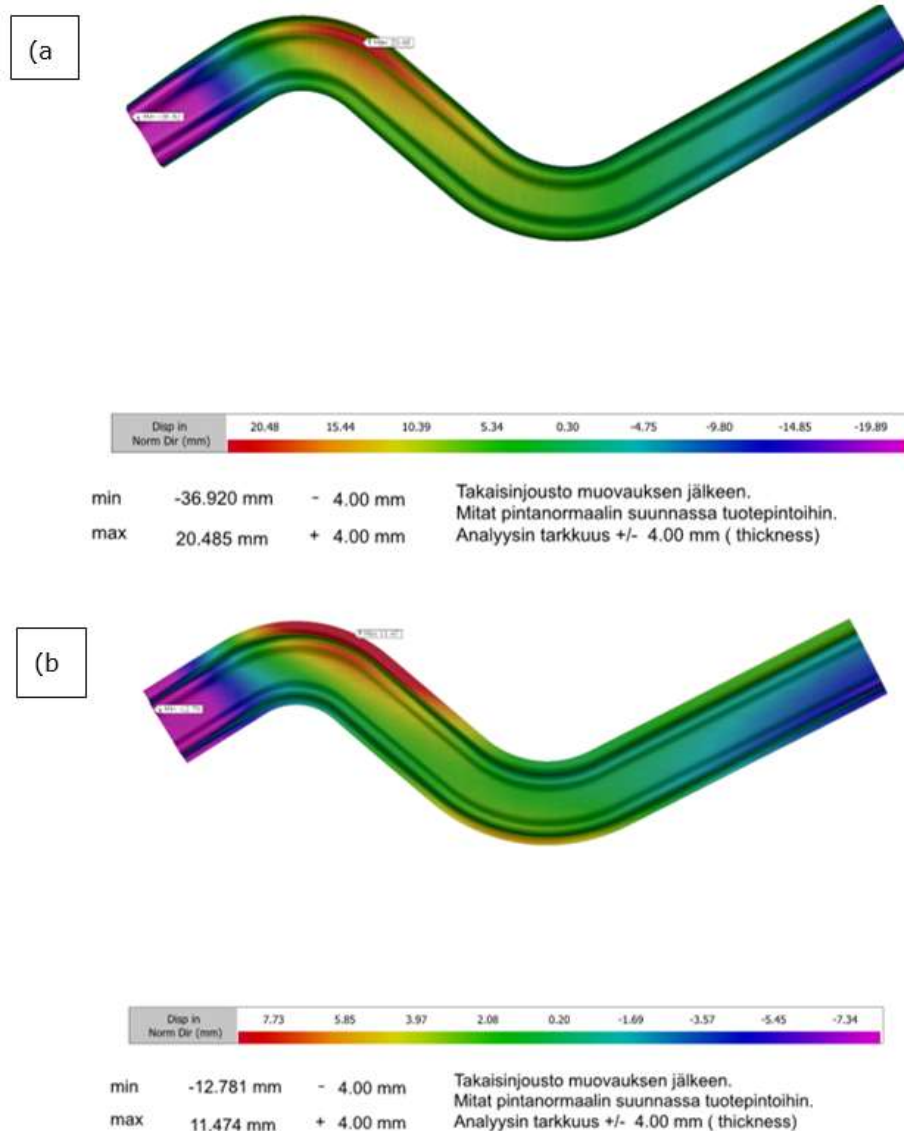


Kuva 23. Muotojen vaikutus kappaleen muokkauslujittumiseen: a) malli ilman lisämuotoja b) malli lisämuodoilla (Kuva: Meconet Oy).

Kuvasta 23 nähdään muotojen vaikutusta osan muokkauslujittumiseen. Kappaleeseen suunniteltu sisälle päin kaartuva muotoilu kuvassa 23b ei niinkään lisää maksimilujittumista, mutta lujittuminen saadaan vaikuttamaan huomattavasti laajemmalle alueelle, jolloin rakenteesta saadaan kestävämpi.

Syvävedon jälkeen syntyvää takaisinjoustoä vertailtiin laipallisen ja laipattoman mallin välillä. Kyseinen ilmiö voi jälkepäin vaikuttaa merkittävästi hitsattavuuteen ja kokoonpantavuuteen, joten se on huomioitava myöhemmin lopullisen liitostavan suunnittelussa. Takaisinjoustoä suuruuteen vaikuttaa levyn

paksuus, teräksen lujuus ja taivutuksen paikka. Levynpaksuuden pienentyessä takaisinjouston vaikutus kasvaa.



Kuva 24. Takaisinjouston vaikutus kappaleeseen: a) laipaton malli b) laipallinen malli (Kuva: Meconet Oy).

Kuvassa 24 on takaisinjouston vaikutusalueet sekä negatiivinen ja positiivinen jousto pintanormaalien suunnassa syvävedon jälkeen. Analyyseista nähdään, että laipan mallintaminen kappaleeseen (kuva 24b) vähentää merkittävästi takaisinjouston vaikutusta vertailtaessa laipattomaan malliin (kuva 24a). Näin ollen laippa tekee kappaleesta huomattavasti helpomman hitsattavan.

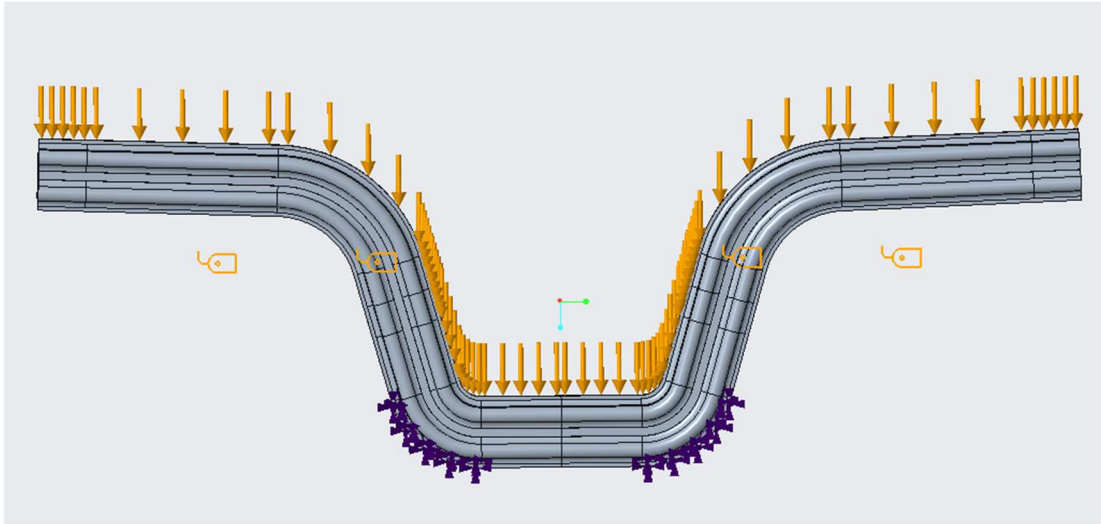
Taulukko 4. Mallien takaisinjoustorajat.

Laipallinen	Min	Max
S4mm S700MC	-12,7mm	11,47mm
S4mm S460MC	-13mm	9,3mm
S6mm S700MC	-10,9mm	8,7mm
S6mm S460MC	-7mm	5,6mm
Laipaton	Min	Max
S4mm S700MC	-36,9mm	20,4mm
S4mm S460MC	-26mm	14,7mm
S6mm S700MC	-32mm	17,3mm
S6mm S460MC	-20,2mm	10mm

Takaisinjoustoarvoista luotiin yksinkertainen taulukko (taulukko 4), josta nähdään, kuinka laippa, teräs ja materiaalinpaksuus vaikuttavat ilmiöön. Takaisinjousto on mahdollista vähentää lisämuodoilla, jotta saavutettaisiin parempi hitsattavuus. Kuitenkin mallien välinen ero on niin suuri, että tämän tarkastelun perusteella laipattoman mallin suunnittelua ei suositella.

3.3.3 FEM

FEM-analysoinnissa tuli ilmi paljon vaikeuksia, jotka hankaloittivat analyysien tekemistä. Syvävedon muokkauslujittumista ei ole mahdollista siirtää syvävetoanalysointityökalusta lujuuslaskentaohjelmaan ja tietokoneen tehottomuudesta johtuen analyysit jouduttiin suorittamaan harvemmalla verkotuksella, jota ei suositeltaisi ohutlevyjä analysoidessa. Näin tuloksissa voi olla epätarkkuutta. Analyyseilla oli kuitenkin tarkoitus vain vertailla rasituksia nykyisen mallin ja syvävetopankon välillä, joten staattinen vertailu suoritettiin kohdissa, jossa se oli mahdollista.



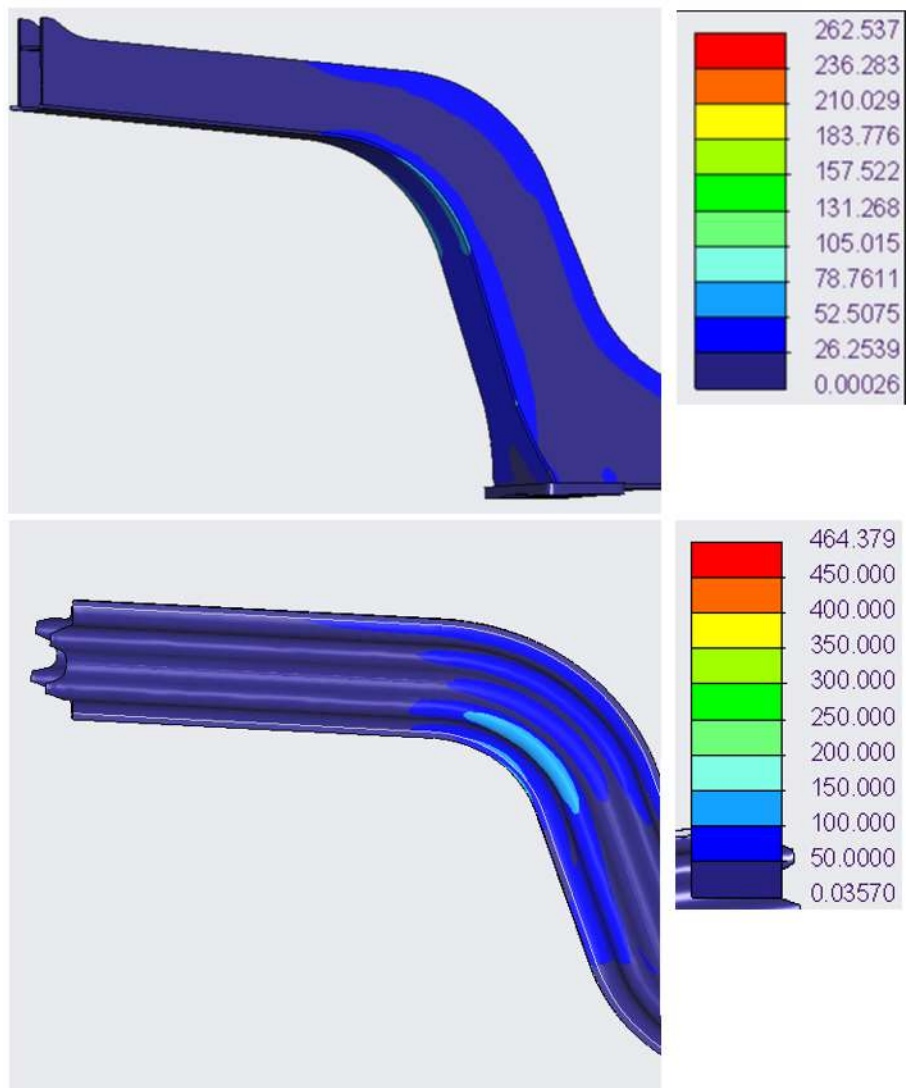
Kuva 25. Tuenta ja voimat (Kuva: Henri Kettunen).

Runko tuettiin alareunasta kohdasta, johon kiinnityspisteet tulisivat (kuva 25). Rungon on suunniteltu kestävän 6 500 kg eli noin 64 000 N aiheuttamat jännitykset.

Rakenteen jäykkä tuenta aiheutti tuennan reunassa singulariteetin eli jännityksen mikä kasvaa äärettömän suureksi (kuva 26), joten tuennan osalta jännityksiä ei vertailtu vaan vertailussa keskityttiin rakenteen varteen. Työssä ei ollut tarkoitus suunnitella kiinnityspisteitä, joten tuentakin mahdollisesti muuttuu vielä myöhemmin.

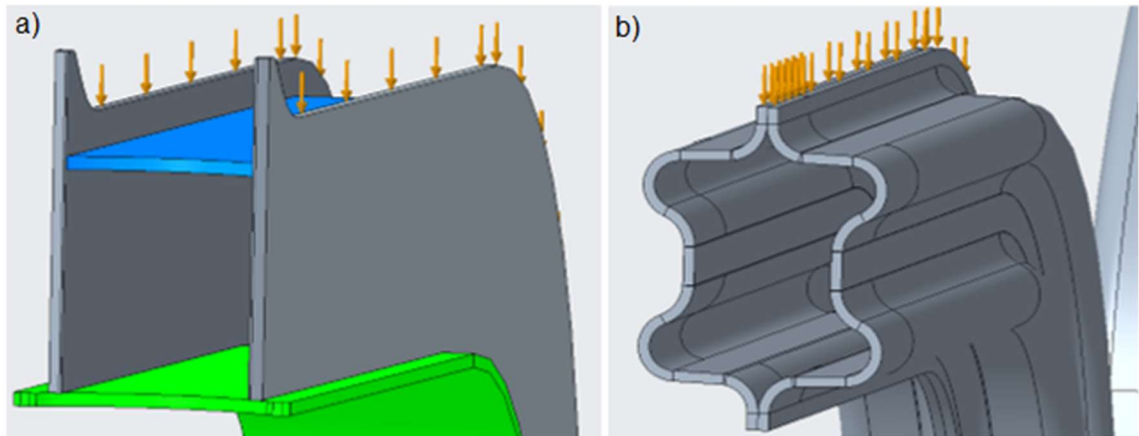


Kuva 26. Tuennasta johtuva singulariteetti, eli ääretön jännitys (Kuva: Henri Kettunen).



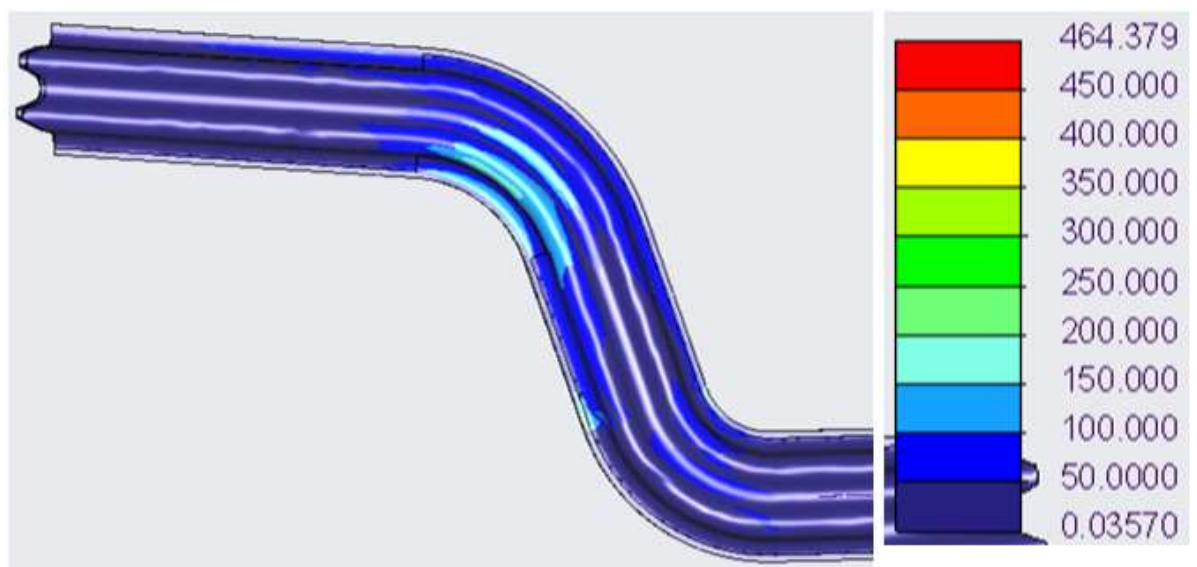
Kuva 27. Varren von Mises -jännitysarvot (Kuva: Henri Kettunen).

Analyysit suoritettiin nykyisellä S650 teräksellä ja levynpaksuudella 6 mm. Analyysi antoi von Mises -vertailujännityksen arvoiksi nykyiselle mallille 80 MPa ja syvävetomallille 150 MPa (kuva 27). Syvävetorakenteen suuremmat jännitykset syntyvät voimien jakautumisesta rakenteeseen. Kuvasta 29a nähdään kuinka nykyisessä rakenteessa voimat kohdistuvat kahdelle erillään olevalle tasolle ja ne kulkeutuvat levyn tason mukaan. Syvävetomallissa voimat kulkeutuvat pinnan muotojen mukaan ja ne pyrkivät vääristämään poikkileikkausta (kuva 29b).



Kuva 29. Voimien jakautuminen rakenteissa: a) kahdessa levyn tasossa b) pinnan muotojen mukaan (Kuva: Henri Kettunen).

Kuitenkin syvävetorakenteeseen syntyvät suuremmat jännitykset jäävät reilusti alle 650 MPa:n myötörajan. Väsymisenkin kannalta rakenteen voidaan katsoa kestävän, jos ajatellaan, että hyvä väsymisenkestävyys saavutetaan kolmasosalla myötörajasta. Tarkastelussa on myös otettava huomioon syvävedon muokkauslujittuminen, joka nostaa myötörajaa rakenteen kaaren kohdalta tässä tapauksessa yli 800 MPa:n.



Kuva 30. Von Mises jännitysarvot 5 mm levyntuoleuden mallissa (Kuva: Henri Kettunen).

Ohuempaan levyyn ja S460 teräkseen siirtyminen on mahdollista teoriassa. Kevyempään rakenteeseen syntyy suuremmat jännitykset (kuva 30) väsymistä ajatellen, mutta kuitenkin kuvan 200 MPa:n jännitys jää alle kolmasosan muokkauslujittumisessa syntyvästä 700 MPa:n myötörajusta.

FEM-analysointi saatiin vaikeuksista huolimatta suoritettua. Aiemmin mainituista syistä johtuen tulokset ovat hyvinkin karkeita ja virheellisiä, joten laajempi ja tarkempi analysointi pitää suorittaa, jos suunnittelua jatketaan. Tämän FEM-tarkastelun lopputuloksena voidaan kuitenkin todeta, että tässä työssä suunniteltuun malliin kohdistuisi suurempia rasituksia varren alueelle kuin nykyiseen. Syvävedon muokkauslujittumisella rakenteesta saadaan kuitenkin kriittisiltä kohdilta yhtä luja tai lujempi kuin nykyisestä.

FEM-analyysillä oli tarkoitus myös tutkia voimien aiheuttamaa taipumaa. Muokkauslujittuminen kuitenkin pienentää kappaleen muodonmuutoskykyä ja aiemmin mainittuna lujittumista ei voi toteuttaa FEM-ohjelmalla. Tulokset eivät olisi johdonmukaisia ja yksiselitteisiä, joten taipuman tuloksia ei työssä tarkastella.

Rakenteeseen kohdistuvat rasitukset voivat olla hyvinkin ennalta arvaamattomia ja vaihtelevia. On mahdollista, että varmistus rakenteen kestävydestä saadaan vasta prototyypillä testipenkissä, jonka rasitustesti vastaa tiettyä tuntimäärää oikeassa käytössä.

3.4 Vertailu

Neljännessä osassa lopulliselle mallille laskettiin kustannukset, karkeat työstöajat ja paino, joita vertaillaan nykyiseen malliin.

3.4.1 Kustannukset

Syvävetomallin kustannukset koostuvat osakustannuksista ja muottikustannuksista, jotka saatiin budjettitarjouskyselyllä. Tarkkoja

hitsauskustannuksia ja työkustannuksia syvävetomallille ei voitu vielä projektin tässä vaiheessa laskea vaan ne ovat suurimmalta osin arvioita.

Nykyiset osakustannukset ovat 200 €. Osakustannukset syvävetomallin eri materiaalinpaksuuksille ja valituille teräksille ovat:

S460MC LaserPlus 4 mm: 220 €

S460MC LaserPlus 6 mm: 296 €

S650MC 4 mm: 268 €

S650MC 6 mm: 356 €

(Siltanen 2018).

Kustannuksista nähdään jo nyt, että toivottuja kustannussäästöjä ei saada aikaan pelkistä osista ja jos syväveto halutaan toteuttaa nykyisellä teräksellä ja materiaalinpaksuudella osakustannukset nousevat huomattavasti. Yhden muotin kustannusten arvioitiin asettuvan 50 000 € ja 100 000 € välille. Laskuissa muotin hintana käytettiin 75 000 €. Muotteja rakenteen valmistukseen tarvitaan tässä tapauksessa 2 kappaletta.

Hitsausainekustannuksiksi laskettiin lisäaineen eli hitsauslangan hinta. Suojakaasun hinnan vaikutus hitsauskustannuksiin on yleensäkin niin vähäinen, ettei sitä näissä laskelmissa huomioida.

Lisäainelangan kustannukset nykyiselle mallille laskettiin piirustuksista saatavilla hitsausmerkinnöistä. Kaavoissa käytettiin hitsauksen pituutta ja poikkimittaa. Hitsauslangan tiheytenä käytettiin teräksen tiheyttä. Hitsauksessa syntyvät roiskeet ja hukka vaikuttavat hyötysuhteeseen, joka otetaan huomioon jakamalla saatu tulos 0,95:llä, eli hitsauksessa syntyisi 5% hukkaa.

Tulokseksi saatiin hitsauksen massa kiloina. Kaavat ovat teoreettisia eli ne eivät ota huomioon kutistumista tai hitsin kupua.

Pienahitsauksen massan kaava on:

$$Wv = Lw * a^2 * 7,85 * 10^{-6}$$

jossa Wv = hitsin massa [kg]

Lw = hitsin pituus [mm]

a = pienahitsin a -mitta

$7,85 * 10^{-6}$ = teräksen tiheys

(Haapio 2012, 35).

$$Wv = 13975 \text{ mm} * 4^2 * 7,85 * 10^{-6} = \frac{1,755 \text{ kg}}{0,95} = 1,84 \text{ kg}$$

$$Wv = 460 \text{ mm} * 5^2 * 7,85 * 10^{-6} = \frac{0,09 \text{ kg}}{0,95} = 0,095 \text{ kg}$$

$$Wv = 150 \text{ mm} * 3^2 * 7,85 * 10^{-6} = \frac{0,01 \text{ kg}}{0,95} = 0,011 \text{ kg}$$

Täysi V -hitsauksen massan kaava on:

$$Wv = Lw * b^2 * \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) * 7,85 * 10^{-6}$$

jossa Wv = hitsin massa [kg]

Lw = hitsin pituus [mm]

b = hitsin syvyys mitta [mm]

α = viistettyjen reunojen välinen kulma [°]

$7,85 * 10^{-6}$ = teräksen tiheys

(Haapio 2012, 36).

$$Wv = 1092 \text{ mm} * 6^2 * \tan\left(\frac{60^\circ}{2}\right) * 7,85 * 10^{-6} = \frac{0,178 \text{ kg}}{0,95} = 0,187 \text{ kg}$$

Puoli V -hitsauksen massan kaava on:

$$Wv = Lw * (b^2 * \tan \alpha) / 2 * 7,85 * 10^{-6}$$

jossa Wv = hitsin massa [kg]

Lw = hitsin pituus [mm]

b = hitsin syvyys mitta [mm]

α = viistettyjen reunojen välinen kulma [°]

$7,85 * 10^{-6}$ = teräksen tiheys

(Haapio 2012, 36).

$$Wv = 260 \text{ mm} * 6^2 * \tan 60^\circ * 7,85 * 10^{-6} = \frac{0,043}{0,95} = 0,046 \text{ kg}$$

Alle 100 mm pituiset hitsit vaikuttaisivat niin vähäisesti lopputulokseen, että niitä ei näissä laskuissa huomioitu. Yhteensä nykyiseen malliin käytetään 2,2 kg lisäainelankaa. Kun lisäainelangan kilohinta on 1,62 €/kg niin käytetyn langan hinnaksi tulee noin 4 €/runko.

Syvävetomallille lopullista liitoshitsausta ei tässä työssä valittu ja hitsaustavan mahdolliset muutokset voivat vaikuttaa hitsin määrään merkittävästi. Vertailun vuoksi rakenteelle kuitenkin laskettiin lisäainelangasta johtuvat hitsauskulut kahdelle liitoshitsaustavalle: Täysi V -hitsi 6 mm hitsin syvyydellä sekä pienahitsi a4 -mitalla. Hitsaukset laskettiin aiemmin käytetyillä täysi V -hitsauksen ja pienahitsauksen kaavoilla.

Täysi V -hitsauksen massa ja kustannus kaava on:

$$Wv = 7072 \text{ mm} * 6^2 * \tan\left(\frac{60^\circ}{2}\right) * 7,85 * 10^{-6} = \frac{1,15 \text{ kg}}{0,95} = 1,21 \text{ kg} = 1,96 \text{ €}$$

Pienahitsauksen massa ja kustannus kaava on:

$$Wv = 7072 \text{ mm} * 4^2 * (7,85 * 10^{-6}) = \frac{0,88 \text{ kg}}{0,95} = 0,93 \text{ kg} = 1,5 \text{ €}$$

Tuloksien perusteella voitiin katsoa hitsauskustannusten puolittuvan.

Hitsaajan nykyinen tuntityön hinta on 27,71 €, eli kun nykyistä mallia valmistetaan 3 tuntia, niin rakenteen työkustannukseksi tulee 86,13€. Kymmenestä osasta valmistettavaan malliin verrattuna syvävetomallin runko valmistetaan neljästä, joten voitiin karkeasti arvioida, että valmistusaika puolittuisi. Näin ollen syvävetomallin työkustannukseksi tulisi 45 €.

Kaikista selvitetystä kustannuksista luotiin Excel -taulukot 5 ja 6, joissa on esitetty rakenteen hinta työkustannuksineen, arvioitu vuosittainen menekki ja kuoletusaika. Kuoletusajalla tarkoitetaan aikaa jonka kyseinen malli olisi käytössä. Lisäksi syvävetomallin hinnassa huomioitiin muottikustannukset.

Taulukko 5. Nykyisen rakenteen vuosittaiset kustannukset.

Nykyiset hinnat		
€/vuosi	menekki /vuosi	Hinta (Osat+Hitsaus+Työ)
802 732,00 €	2800	286,69 €
802 732,00 €		

Taulukko 6. Syvävetomallin vuosittaiset kustannukset.

Syvävedon arvio (SSAB460LaserPlus 4mm)							
	yht. €/vuosi	(hinta+työkalukustannukset)	Työkalukust. per yksikköhinta (kuoletusaika huomioituna)	Työkalukust. jaettuna kuoletusvuosille	Työkalukustannukset	€/vuosi	Hinta (Osat+Hitsaus+Työ)
Syvävetomalli	766 350,00 €	273,70 €	6,70 €	18 750,00 €	150 000,00 €	747 600,00 €	267,00 €
yht.	766 350,00 €						
Erotus	-36 382,00 €						
Meconetin työkalukustannusten kuoletusaika (Vuotta)			8				
							Osat 220,00 €
							Hitsaus (lanka) 2,00 €
							Työ (Nykyinen hinta) 45,00 €

Käyttämällä S460MC LaserPlus terästä 4 mm levynpaksuudella saataisiin vuosittaiseksi säästöksi noin 36 000 €. Samalla Excel -taulukolla laskettiin myös muille vaihtoehdoille vuosittaiset kustannukset (taulukko 7).

Taulukko 7. Syvävetomallien vuosittaiset kustannukset ja muutos nykyiseen.

Vaihtoehtojen vuosittaiset kustannukset		
Teräs ja levynpaksuus	€/vuosi	Muutos/vuosi
S460MC LaserPlus 4mm	766 635,00 €	-36 382,00€
S460MC LaserPlus 6mm	979 150,00 €	+176 418€
S650MC 4mm	900 750,00 €	+98 018€
S650MC 6mm	1 147 150,00 €	+344 418€

Syvävedon yksi keskeisimmistä eduista oli volyymeissa. Kun valmistusmäärät kasvavat niin säästökin kasvaa. Haittapuolena on vaikutus päinvastaiseen suuntaan, jos tuotteen osien hinnat ovat korkeammat kuin alkuperäisen. Tässä tapauksessa säästöä saataisiin vain S460MC LaserPlus terästä ja 4 mm levynpaksuutta käytettäessä.

Kustannusvertailun lopputulosta voi pitää yllättävänä. Melkein kaikkien syvävetovaihtoehtojen hinnat nousisivat korkeammiksi kuin nykyisen.

Näistä tuloksista voidaan todeta kaksi asiaa:

1. Vaikka volyyymi on suurehko tällaisille rakenteille yrityksen tasolla, niin se ei vielä riitä alentamaan osien hintaa tarpeeksi.
2. Nykyinen malli on osien kannalta saatu optimoitua kustannustehokkaaksi

Vaikka kustannukset kasvavatkin muissa kuin S460MC LaserPlus 4 mm levynpaksuuden mallissa, niin syvävedon tuominen valmistukseen vaikuttaisi positiivisesti koko prosessiin. Siirtyminen kymmenestä osasta neljään helpottaisi hitsaajan työtä huomattavasti, virheitten mahdollisuus pienentyisi ja kokonaisuudessaan rakenne olisi paljon yksinkertaisempi.

3.4.2 Paino

Nykyinen runko painaa 100 kg. Syvävedetyn mallin paino saatiin selville jo aiemmin käytetyllä syvävetoanalyysiohjelmalla.

Syvävetomallin painoksi saatiin:

Levynpaksuus	Paino	Muutos koko rakenteeseen
4 mm	50 kg	-200 kg
6 mm	80 kg	-80 kg

Muutoksesta nähdään, että syväveto käyttää materiaalin tehokkaasti kappaleeseen. Työssä mallinnetulla syvävetorakenteella on siis mahdollista saavuttaa huomattavaakin painonvähennystä.

4 Lopputulos

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli ennen kaikkea tiedon lisääminen syvävetotekniikan käytön mahdollisuuksista suurta lujuutta vaativissa rakenteissa. Siihen tavoitteeseen lopputuloksen perusteella päästiin.

Syväveto oli yritykselle tekniikkana jo tuttu ja nykyiselle mallille oli tehty alustavia syvävetoanalyyssejä 10 vuotta aiemmin. Tekniikan riittämättömyys ja osittain resurssipulasta johtuen tutkimista ei silloin viety eteenpäin.

Tekniikan ja terästen kehittyminen mahdollistaa kuumavalssattujen suurlujuusterästen syvävedon jopa 8 mm materiaalinpaksuuteen asti. Kappaleille voidaan mallintaa paljon vahvikemuotoja jotka vaikuttavat merkittävästi muokkauslujittumiseen ja rakenteen lujuuteen. Syvävedolla voidaan valmistaa yksinkertaisempia, saumattomia rakenteita jotka ovat kuormankantokyvyltään erinomaisia. Lujuutta vaativien syvävetokappaleiden suunnittelussa on kuitenkin otettava huomioon monia työssä esiteltyjä syvävedon erityispiirteitä jotka vaikuttavat kappaleiden hitsattavuuteen ja kokoonpantavuuteen.

Syvävetomallin laajemman lujuustarkastelun suorittaminen on yksi keskeisimmistä asioista joka pitää suorittaa, jos tätä tuotekehitysprojektia viedään eteenpäin. Varsinkin liitoshitsauksen suunnitteluun ja lujuuslaskentaan on käytettävä aikaa.

Syvävedolla saadaan vähennettyä merkittävästi kappaleitten kohdistamiseen ja hitsaamiseen käytettyä työaika. Rungon osien vähentyessä kymmenestä neljään pienennetään hitsaajan työmäärää ja yksinkertaistetaan prosessia. Arvioituna hitsaajan työ voi vähentyä jopa puoleen nykyisestä. Tarkempia valmistusaikoja on tässä vaiheessa tuotekehitysprojektia kuitenkin vaikea selvittää. Arviot perustuvat Meconet Oy:n ja hitsausinsinöörien aiempaan kokemukseen.

Kustannukset vähenevät volyymien kasvaessa. Nykyinen volyymi ei tällä hetkellä kuitenkaan vielä riitä osien halvempaan hintaan. Kustannussäästöjä saadaan saavutettua aiemmin todettuna vain yhdellä teräslaadulla ja materiaalinpaksuudella. Jos rakenteeseen suunniteltaisiin muita osia syvävedettäväksi runkoon kiinni, olisi mahdollisuus kustannussäästöihin

suurempi. Tämän opinnäytetyön perusteella tätä tuotekehitystä vietäisiin tämän jälkeen eteenpäin jonakin muuna kuin kustannussäästöprojektina.

Opinnäytetyön lisätoiveena oli tarkastella, saadaanko syvävedetystä rakenteesta kevyempi kuin nykyisestä. Syvävetotekniikkaa käyttämällä loppurakenteesta on mahdollista valmistaa kevyempi.

Lopputuloksen yhteenvedona tästä opinnäytetyöstä saa hyvän yleiskuvan kyseisen rakenteen syvävedosta, sen haasteista ja mahdollisuuksista. Työssä on eri vaihtoehtoja erilaisille ratkaisuperiaatteille. Opinnäytetyö seuraa pääpiirteisen tutkimuksen raameja menemättä kuitenkin suunnitteluun syvemmälle.

5 Pohdinta

Toiminnallisen osion oli tarkoitus valmistua kolmessa kuukaudessa. Siitä kuitenkin viivästyttiin viikolla erinäisten teknisten ongelmien ja haasteiden vuoksi. Opinnäytetyön lopputulokseen olen kuitenkin kokonaisuudessaan tyytyväinen ja toimeksiantajan laatimiin tavoitteisiin päästiin. Pohjatietoa tällaisten rakenteiden syvävetoon oli yrityksellä vähän ja uskon, että tällä opinnäytetyöllä siihen tarvittavaa lisätietoa saadaan.

Olisin toivonut saavani sisällytettyä työhön tarkempaa ja laajempaa tietoa aiheesta ja mahdollisesti myös tutkia enemmän liitoshitsaustapaa. Työn tulosten kuitenkin odotettiin valmistuvan kolmessa kuukaudessa, joten tämän laajempaan ja hyödynnettävämpään tutkimukseen olisi vaadittu huomattavasti enemmän aikaa. Tätä opinnäytetyötä voidaan pitää ns. ”pintaraapaisuna” tuotekehitysprojektista, joka kuitenkin antaa yritykselle hyvän pohjan projektin jatkamiseen, jos tutkimista halutaan viedä eteenpäin.

Oman oppimisen kannalta työ oli juuri oikeanlainen ja aihealue hyvin kiinnostava. Opinnäytetyön alussa annettiin tarpeeksi pohjatietoa työn aloittamiseksi ja ohjeistusta, mihin suuntaan opinnäytetyötä kannattaa lähteä viemään. Muuten työn etenemisessä ja tutkimusosiossa oli hyvinkin vapaat kädet. Projektin aikana pääsin tutustumaan tuotekehityksen eri osa-alueisiin, valmistustekniikkoihin sekä toimimaan eri yhteys henkilöiden ja tahojen kanssa. Työn tulokset esiteltiin

suunnittelun kuukausikokouksessa, josta saatu palaute oli hyvää ja kannustavaa. Ymmärrys koneenrakennuksesta, sekä tuotekehitysprojektien etenemistä kasvoi merkittävästi ja uskon, että tämä opinnäytetyö antaa hyvän pohjan itselleni tulevaisuutta ajatellen.

Lähteet

- Haapio, J. 2012. Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach. Tampere University of Technology. Doctor of science in technology. Thesis.
[https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/featurebased-costing-method-for-skeletal-steel-structures-based-on-the-process-approach\(4f86b2e5-d1a3-4c01-8c8e-dc1fcc292f38\).html](https://tutcris.tut.fi/portal/fi/publications/featurebased-costing-method-for-skeletal-steel-structures-based-on-the-process-approach(4f86b2e5-d1a3-4c01-8c8e-dc1fcc292f38).html). 15.8.2018.
- Jokinen, T. 1987. Tuotekehitys 500. Helsinki: Otatieto Oy.
- Jääskeläinen, J. 2015. Optinen railonseuranta ja -haku robottihitsauksessa. Karelia ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö.
http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/89483/Jaaskelainen_Janne.pdf?sequence=1&isAllowed=y. 3.8.2018.
- Kivivuori, S. 2003. Mak-65.146 Materiaalien muokkaus ja muovaus. Espoo: Teknillinen Korkeakoulu.
- Lepola, P. & Makkonen, M. 2011. Hitsaustekniikat ja teräsrakenteet. Helsinki: WSOYpro
- Outinen, H. & Salmi, T. 2004. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus Oy.
- Pahl, G. & Beitz, W. 1986. Koneensuunnitteluoppi. Helsinki: Metalliteollisuuden Kustannus Oy.
- Siltanen, J. 2018. Budjettitarjouskysely. 1500987@edu.karelia.fi. 29.6.2018
- Teräsrakenneyhdistys ry. 2010. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Helsinki: Teräsrakenneyhdistys ry.
- Thomasnet. 2018. Deep-drawing. Thomas Publishing Company.
<https://www.thomasnet.com/articles/custom-manufacturing-fabricating/deep-drawing>. 26.7.2018.
- Välimaa, V., Kankkunen, M., Lagerroos, O. & Lehtinen, M. 1994. Tuotekehitys, asiakastarpeesta tuotteeksi. Helsinki: Painatuskeskus Oy

