

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU
Konetekniikan koulutus

Tuomas Ratinen

PUUTAVARAKAHMARIN RAKENTEEN JÄYKISTÄMINEN

Opinnäytetyö
Kesäkuu 2018



OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2018
Konetekniikan
koulutus

Tikkarinne 9
FI 80200 JOENSUU
p. (013) 260 600

Tekijä
Tuomas Ratinen

Nimeke
Puutavarakahmarin rakenteen jäykistäminen

Toimeksiantaja
Outokummun Metalli Oy

Tiivistelmä

Opinnäytetyössä tutkittiin, kuinka pystytään parantamaan Outokummun Metalli Oy:n Vahva C21 -puutavarakahmarin rakenteen kestävyyttä ja vähentämään taipumia FEM -analyysin avulla. Työssä pyrittiin mallintamaan todenmukainen rasitustilanne ja tarkastelemaan sen aiheuttamia jännityksiä ja taipumia sekä niiden keskittymiä rakenteessa.

Työ koostuu alkuperäisille ja muokatuille 3D -malleille tehdyistä lujuusanalyyseistä Creo Parametric 3.0 - ja 4.0 -ohjelmilla. Työssä pyrittiin vertaamaan muokattuja malleja alkuperäisiin ja osoittamaan parannusehdotusten toimivuus. Samalla pyrittiin huomioimaan jännityskeskittymien paikat ja niiden suuruus, koska ne vaikuttavat eniten rakenteen kestävyteen todellisessa rasittavassa kuormituksessa. Työssä painottui valmistuksen helppous ja kustannustehokkuus, sillä parannettu puutavarakoura ei saanut olla alkuperäistä huomattavasti kalliimpi valmistaa.

Alkuperäisiä malleja testatessa löydettiin useita kriittisiä pisteitä, joihin jännitykset keskittyivät. Näitä kohtia muokattiin siten, että rakenteen paino pysyi lähes samana alkuperäiseen verrattuna. Taipumia pienennettiin jäykistämällä rakennetta. Parannettu puutavarakoura ei ollut merkittävästi monimutkaisempi valmistaa, jolloin myös sen valmistuskustannukset pysyivät maltillisina.

Kieli
Suomi

Sivuja 45

Asiasanat

Puutavarakahmari, FEM-analyysi, rakenteen jäykistäminen



THESIS
June 2018
Degree Programme in Mechanical Engineering

Tikkarinne 9
FI 80200 JOENSUU
p. (013) 260 600
FINLAND

Author
Tuomas Ratinen

Title
Stiffening of Log Grapple Structure

Commissioned by
Outokummun Metalli Oy

Abstract

The subject of the thesis was to study how to improve the structure durability and reduce bending of a VAHVA C21 log grapple manufactured at Outokummun Metalli Oy by using FEM analysis. The thesis was based on modelling a real life stress situation aiming to analyze stress and bend concentrations in the structure

The thesis consists of FEM analyses made both for the original and modified 3D models of the log grapple jaws. The software used in the analysis was Creo Parametric 3.0 and 4.0. In this thesis the aim was to compare the original version of the log grapple jaws to the modified versions to confirm the benefits of modifications. At the same time, stress concentration places and magnitudes were taken into account because these are two most important factors in the structure in a real world stress situation. Modifications were implemented keeping the manufacturing properties and low cost in mind because the modified log grapple must not be too expensive to manufacture compared to the original one.

When testing the original 3D models, many critical stress points were found in the structure. These points were modified in a way that did not increase the weight very much compared to the original design. Bends were decreased by making the structure stiffer. Enhanced log grapple was not very complex in design whereupon its manufacturing costs were not too high.

Language

Finnish

Pages 45

Keywords

log grapple, FEM analysis, structure stiffness

Sisältö

Tiivistelmä	
Abstract	
1 Johdanto	5
1.1 Outokummun Metalli Oy	5
1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet.....	6
2 DFWA – Design for welding assembly	8
2.1 Lämmön vaikutuksen huomiointi suunnittelussa.....	9
2.2 Osien vähentäminen.....	13
2.3 Hitsattavien osien asemointi	14
2.4 Hitsaussaumojen toteuttaminen kokoonpanossa.....	16
2.5 Profiilit	18
2.6 Kulujen vähentäminen	19
3 Puutavarakahmarin lujuusanalyysi	20
3.1 Alkuperäinen C21-kahmari	22
3.2 Muokattu C21-kahmari	30
3.3 Creo Parametric 4.0 lujuusanalyysit	36
3.4 Johtopäätökset	43
Pohdinta.....	44
Lähteet.....	45

1 Johdanto

1.1 Outokummun Metalli Oy

Outokummun Metalli Oy on Pohjois-Karjalassa Outokummussa toimiva metsänkorjuulaitteiden valmistaja. Yritys on perustettu vuonna 1980 ja nykyään se työllistää konsernina yli 140 henkilöä, joista Outokummun Metalli Oy:n palveluksessa on 85. Outokummun Metalli Oy:n liikevaihto oli vuonna 2017 noin 17,5 miljoonaa euroa. [1]

Outokummun Metalli Oy on erikoistunut valmistamaan John Deere ja Waratah –tuotemerkeillä myytäviä harvesteripäitä, joiden rungot tehdään hitsauksen, koneistuksen, maalauksen ja kokoonpanon osalta valmiiksi yhtiön toimitiloissa. Yhtiö valmistaa myös VAHVA –tuoteperheen kuormainkouria, joita käytetään esimerkiksi metsäkoneissa. VAHVA-kahmarien rotaattorimallit sopivat erilaisiin puunkäsittelytehtäviin sekä kierrätysteollisuuden materiaalien käsittelyyn. Muita VAHVA-malleja käytetään esimerkiksi kaivinkoneissa monenlaisissa työtehtävissä, kuten purkutöissä tai putkiasennustöissä. Yhtiö valmistaa yhteensä yli 20 erilaista kahmarimallia, neljässä eri mallisarjassa. [2]

1.2 Opinnäytetyö ja sen tavoitteet

Opinnäytetyön kohteena oli Outokummun Metallin Vahva – puutavarakahmariperheen kahmarimalli C21 ja sen rakenteen lujuusominaisuuksien tarkastelu sekä parantaminen mallinnusohjelman avulla. Mallinnusohjelmana opinnäytetyössä on käytetty Creo Parametric 3.0 ja 4.0 –ohjelmistoja.

Puutavarakahmareita käytetään kaadetun ja karsitun puutavaran nostamiseksi peräkärriin tai vastaavalle kuljetusalustalle. Outokummun Metallin C21-kahmari on yksi pienimmistä malleista ja sitä käytetään usein kevyemmissä puutavaran nostotöissä, joissa työ hoidetaan esimerkiksi traktorilla, kaivinkoneella tai muulla pienemmällä kuormaimella. Kuviossa 1 on esiteltyä C26 -kahmari kuorma-auton nostopuomiin liitettynä.



Kuvio 1. VAHVA C26 -kahmari liitettynä kuorma-auton nostopuomiin. [3]

Kaivinkonekäyttöä ajatellen C21 -kahmarin lujuusominaisuuksia haluttiin parantaa sekä saada rakenteen kestämisen kannalta lisää varmuutta. Tästä

johtuen opinnäytetyössä lähdettiin tarkastelemaan nykyistä tilannetta ja tekemään käytössä oleville isommalle ja pienemmälle kahmarileualle lujuusanalyysejä. Näillä lujuusanalyyseillä pyrittiin selvittämään alkuperäiseen rakenteeseen kohdistuvat jännityskeskittymät ja taipumien määrät. Lähdetessä suunnittelemaan parannusehdotuksia kahmarin jäykkyyden parantamiseksi, yksi suunnittelun lähtökohdista oli kahmarin painon pysyminen mahdollisimman lähellä alkuperäistä mallia. Paino on pienemmälle kahmarille keskeinen suunnitteluperuste käyttötarkoituksen huomioiden. Kevyissä hydraulikka-järjestelmissä ja puomisysteemeissä kahmarin omamassa vaikuttaa merkittävästi nostokapasiteettiin ja sitä kautta tuottavuuteen. Parannetun puutavarakahmarin massan pysyessä lähellä alkuperäisen kahmarin massaa pystytään vanhat nostojärjestelmät säilyttämään ja saadaan täysi hyöty uudesta jäykemmästä kahmarista pienin kustannuksin.

Samalla kun puutavarakahmariin suunniteltiin parannuksia, täytyi mielessä pitää tuotantotekniset näkökulmat. Puutavarakahmarin parannusehdotukset tuli olla tuotannossa helposti toteutettavia, etteivät valmistuskustannukset nostaisi tuotteen loppuhintaa merkittävästi.

2 DFWA – Design for welding assembly

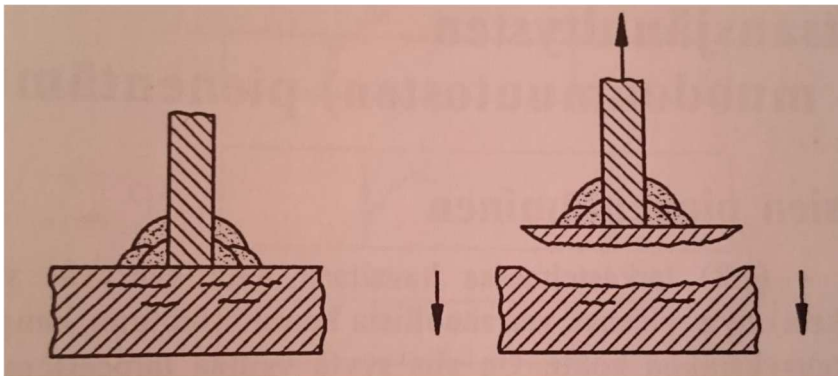
Design for welding assembly tarkoittaa hitsatun rakenteen suunnittelua, jonka lähtökohtana on yksinkertainen ja edullinen kokoonpano hitsaamalla. DFWA-menetelmä perustuu DFA (Design for assembly)-menetelmään lisäten siihen hitsaamiselle tyypilliset vaatimukset. Yksi merkittävimmistä DFA- ja DFWA-menetelmien kehittäjistä on Kalifornialainen Dr. David M. Anderson, joka on viimeisen 25 vuoden aikana opastanut yrityksiä kustannustehokkaampaan toimintamalliin, joka tähtää tehokkaaseen ja tasaiseen tuotantoon [4].

Hitsattua rakennetta suunniteltaessa täytyy huomioida hitsien määrä, malli, niiden toteuttamiskelpoisuus sekä tarpeellisuus. Hitsaamalla kokoonpantavia osia pystytään vähentämään käyttämällä erilaisia valmiita profiileja ja taivutettuja levyosia. Kokoonpanoissa voi olla erilaatuisia ja -paksuisia metalliosia, jotka vaikuttavat kokoonpanohitsauksen suunnitteluun. Suunnittelijalla on suuri vaikutus tuotteen kustannuksiin, sillä suunnitteluvaiheessa määräytyy jopa 70 – 80% valmistuskustannuksista. [5;6]

DFWA tekee myös hitsaajan työstä mielekkäämpää, kun hitsausasennot ovat ergonomisia ja työ on samalla turvallista toteuttaa oikein suunniteltujen kiinnittimien ansiosta. Hitsaaminen on myös mielekkäämpää, kun kokoonpano on suunniteltu siten, että siihen liitettävät osat ovat helppoja asemoida kohdalleen. Väärin asemointia estetään tekemällä osiin selkeitä asemointipiirteitä tai tekemällä osista symmetrisiä. [5;6]

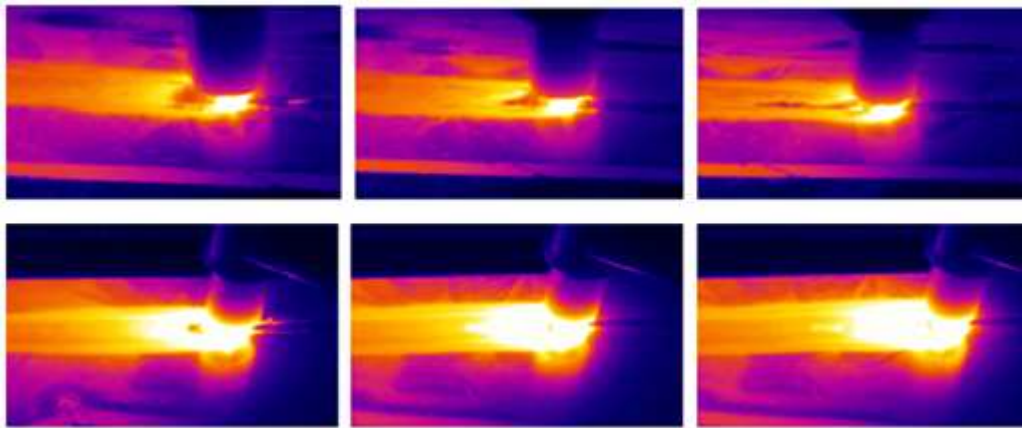
2.1 Lämmön vaikutuksen huomiointi suunnittelussa

Hitsatessa liitettäviin materiaaleihin kohdistuu hyvin rajuja lämpötilavaihteluja pienellä aikavälillä. Tämä lämpötilojen vaihtelu aiheuttaa muutoksia metallille tyypilliseen raerakenteeseen tehden siitä hauraampaa. Tyypillisiä lämmön aiheuttamia muutoksia ovat esimerkiksi erilaiset sulkeumat. Itse hitsi on liitoksena luja, mutta voimakkaiden lämpötilamuutosten aikaansaama hauraus voi saada rakenteen rikkoutumaan hitsikohdan ympäriltä sitä kuormitettaessa. Kuviossa 2 on esiteltyä lämpövaihteluiden aikaansaamaa niin sanottu lamellirepeämä. Lamellirepeämät ovat tyypillisempiä kuormitettaessa levykappaleen paksuussuunnassa olevaa hitsausaumaa.



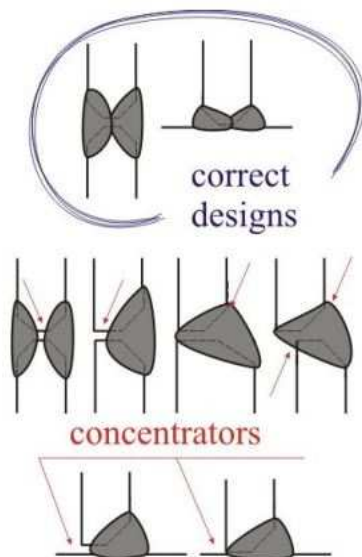
Kuvio 2. Hitsauksessa esiintyvien lämpötilamuutosten aiheuttamien sulkeumien heikentämän materiaalin paksuussuuntainen lamellirepeämä. [7]

Voimakkaat lämpötilamuutokset aiheuttavat myös hitsattavien materiaalien sisälle jännitystiloja. Nämä jännitystilat voivat olla haitallisia varsinkin ohuita levyjäisiä kappaleita liitettäessä, sillä jännitykset voivat aikaansaada koko rakenteen mittojen muuttumisen ja jopa selkeän vääntymisen. Hitseihin muodostuu näistä muutoksista johtuen jännitystiloja, jotka saattavat aiheuttaa kokoonpanon hajoamisen sitä kuormitettaessa. Kuviossa 3 on lämpökamerakuva hitsaustapah-tumassa materiaaliin syntyvistä lämpötilamuutoksista.



Kuvio 3. Hitsatessa syntyvät lämpötilamuutokset lämpökameralla kuvattuna. Lämpökamerakuvasta näkyy, kuinka voimakkaasti hitsauksessa aiheutuva lämpö johtuu liitettäviin materiaaleihin. Kuviossa kuuminta aluetta kuvaa valkoinen väri [8]

Hitsisaumoja suunniteltaessa kokoonpanoon tulee huomioon ottaa niihin aiheutuvat rasitukset. Kevyessä rasituksessa olevia kokoonpanon osia on hyödytöntä hitsata suurikokoisella hitsillä, koska samalla aiheutetaan materiaaleihin turhia lämpömuutoksia. Koska lämpölaajeneminen on lineaarista, vaikuttaa hitsiin tuodun lämmön määrä suoraan kappaleiden fyysisiin mittoihin. Hitsin koko tulisi aina mitoittaa edes jonkinlaista lujuuslaskentaa apuna käyttäen ja hitsisaumaa suunniteltaessa pyritään yleensä välttämään kuviossa 4 esitetyjä saumatyyppejä, jotka kohdistavat rasituksia kriittisiin kohtiin liitosta.



Kuvio 4. Ylempänä suositellut hitsausaumojen paikat ja alempana hitsausaumojen virheelliset paikoitukset, jotka keskittävät jännityksiä kriittisiin kohtiin saumoissa. [9]

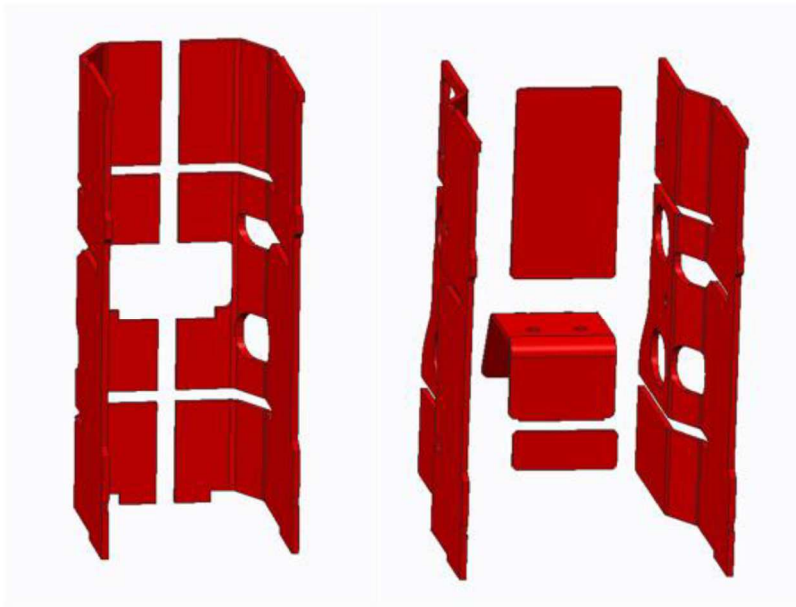
Joissakin tapauksissa hitsejä voidaan tehdä myös palkokerroksittain, jolloin osiin kohdistuvat lämpötilahuiput jäävät pienemmiksi. Palkokerroksia tehtäessä tulee kuitenkin huomioida hitsisaumojen kuroutuminen jäähtyessä, sillä käytettäessä useampia palkokerroksia, myös kuroumat muuttuvat voimakkaammiksi. Palkokerroksilla hitsistä voidaan tehdä esimerkiksi leveämpi, joka on hyödyksi jännityshuippujen keskittymisen kannalta. Terävään nurkkaan keskittyvät jännitykset pienenevät, kun hitsi on jakautunut suuremmalle alueelle. Kuviossa 5 on esiteltyä palkokerroksiin jaettu hitsaussauma.



Kuvio 5. Palkokerroksiin jaettu hitsaussauma. [10]

2.2 Osien vähentäminen

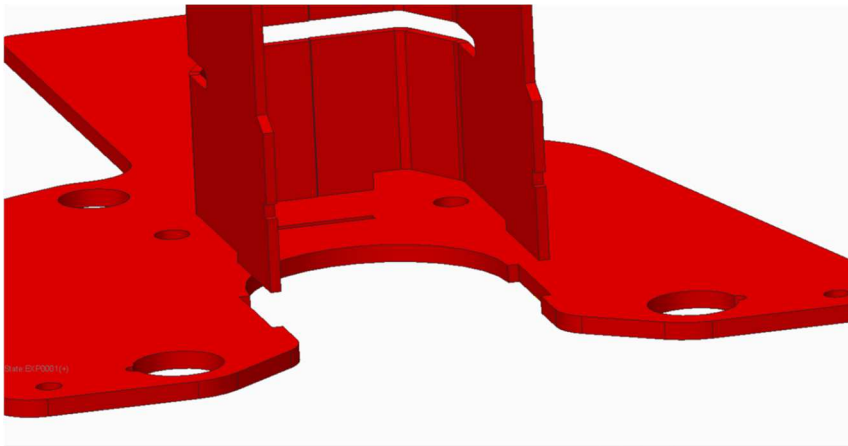
Hitsattavaa kokoonpanoa suunniteltaessa osien määrällä on suuri merkitys valmistuskustannuksiin, sillä osien lukumäärän kasvaessa kasvavat myös hitsisaumojen määrät. Kokoonpanon koostuessa monesta erillisestä hitsattavasta osasta, kuluu aikaa osien järjestelyyn ja etsimiseen työpisteellä. Myös työohjeiden seuraaminen ja hitsin valmistelu vievät pidempään, kun jokaisesta hitsaamalla liitettävästä osasta täytyy ensin selvittää hitsaustapa ja kappaleen aseointiin liittyvät tiedot. Osia pystytään vähentämään tehokkaasti esimerkiksi yhdistämällä pienempiä osia levytuotteiksi, jotka voivat olla valmiiksi särmättyjä ja koneistettuja. Isomman levytuotteen kokoonpanohitsaaminen on nopeampaa, koska aseteltavia osia on vain yksi ja yleensä myös hitsattavia saumoja on vähemmän. Kuviossa 6 on esitelty osien vähentämistä yhdistämällä pienempiä osia levytuotteeksi. [11]



Kuvio 6. Osien yhdistäminen levytuotteeksi. Oikealla alkuperäinen viiden osan kokoonpano ja vasemmalla osia yhdistelemällä tehty kahden osan hitsattava kokoonpano. [12]

2.3 Hitsattavien osien asemointi

Kokoonpanohitsauksessa aikaa kuluu muuhunkin työhön kuin pelkkään hitsaukseen. Työohjeiden ja piirustusten lukemiseen käytettävää aikaa pystytään vähentämään suunnittelemalla osat siten, että ne ovat helppoja asemoida kokoonpanoon ja että niitä ei pysty hitsaamaan väärään kohtaan tai väärin päin. Käsien hitsaamalla kiinnitettäviin osiin voidaan suunnitella esimerkiksi loviliitoksia, jotka ovat helppoja hahmottaa ja auttavat asemoinnissa. Kuviossa 7 on esimerkki loviliitoksen tekemisestä asemoinnin helpottamiseksi hitsausta varten.



Kuvio 7. Loviliitokset helpottavat osien asemointia ennen hitsauksen aloittamista, ja ne myös vähentävät väärin tehdyn liitoksen mahdollisuutta. [12]

Suunniteltaessa hitsaamalla kiinnitettäviä osia täytyy pyrkiä välttämään oikea/vasenkätisyyksiä, koska ilman erityistä tarkkaavaisuutta tällaiset osat menevät helposti sekaisin ja syntyy ylimääräistä työtä ja hukkaa. Väärän kätiseksi kokoonpantu tuote voi edetä tuotannossa pitkälle seuraaviin työvaiheisiin ennen kuin virhe huomataan. Myöhään havaitun virheen korjauskustannukset voivat olla suuret, jos kokoonpanoon on ehditty jo kiinnittämään muita osia jotka estävät virheellisen työvaiheen korjauksen. Asemoinnin kannalta osista olisi hyvä tehdä symmetrisiä, mikäli mahdollista, koska silloin osa kiinnitetään todennäköisimmin oikein. Osat joita ei pystytä suunnittelemaan symmetrisiksi, tulisi tehdä mahdollisimman epäsymmetrisiä inhimillisten asemointivirheiden välttämiseksi. Selkeät yksityiskohdat ja epäsymmetrisyys ovat helppoja huomata työpisteellä ennen hitsaamisen aloitusta ja näin pystytään lähes täysin estämään osan kokoonpanohitsaaminen väärin. Huonoin tilanne kokoonpanohitsauksen kannalta on sellainen, jossa osat ovat oikea- ja vasenkätisiä sekä lähes symmetrisiä. [4;5]

Kokoonpanoa hitsaamalla suunniteltaessa hitsausrobotin käyttö voi vaikuttaa hyvältä vaihtoehdolta, mutta ennen sen käyttöönottoa tulisi selvittää robotille tyypilliset erityisvaatimukset. Robottihitsauksen etuina ovat tasainen työtahti ja hyvä laaduntuotto. Käyttö- ja ylösajokustannukset voivat joissakin tapauksissa kuitenkin olla merkittävänä esteenä hitsausrobotin hankkimiselle. Hyvä laaduntuotto rajoittuu robottihitsauksessa vain koneen itsensä tekemään työhön, eikä se näin ollen pysty havaitsemaan aiemmissa työvaiheissa tapahtuneita virheitä.

Virheellisen osan saapuessa työpisteelle työntekijä pystyy mahdollisesti erottamaan poikkeaman ja siirtämään osan syrjään toisin kuin hitsausroboti. Robottia käytettäessä tällaista jatkuvaa laaduntarkkailua on hankala toteuttaa eikä pitkälle automatisoitu hitsausrobottikaan välttämättä erota edes väärin päin varastoitua tai virheellistä osaa. Robotin nostaessa väärin varastoitua tai virheellistä osaa hitsauspisteelle voi syntyä huomattaviakin vahinkoja valmistettavalle kokoonpanolle tai itse hitsausrobotille. Hitsausrobotia käytettäessä visuaalisten asemointimerkkien käyttö vaatisi aina konenäköä, joka voi nostaa robottien hankintakustannuksia. Siksi kokoonpano tulisikin suunnitella siten, että robottihitsattavat osat

ovat helposti sijoitettavissa ja tehtävät hitsausaumat ovat suhteellisen pitkiä sekä toteutettavissa mahdollisuuksien mukaan vain yhdessä asennossa.

Kustannustehokkaan hitsauksen suorittaminen kokoonpanossa robottia apuna käyttäen vaatii korkean hitsausajan suhteen asetusajaan, sillä mikäli osien asemointiajat ja robotin asetusajat ovat pitkiä, ei hitsausrobotin käyttö ole välttämättä kannattavaa. Yksittäiset, hankalammat ja lyhyemmät hitsit kannattaa suosiolla jättää käsin hitsattaviksi, sillä robotin ohjelmoiminen tällaisiin toimenpiteisiin voi olla hyödytöntä.

2.4 Hitsausaumojen toteuttaminen kokoonpanossa

Käsin hitsattaessa rakenne tulisi suunnitella siten, että suurin osa hitseistä tapahtuu niin sanotussa jalkoasennossa. Tämä asento on helpoin toteuttaa ja yleensä se on myös ergonomisin. Jalkoasennossa hitsaaja näkee hitsikohdan ylhäältäpäin ja hitsattavat kappaleet ovat asemituna siten, että hitsisauma on horisontaalisesti. Helpommissa hitsausasunnoissa laaduntuohto on yleensä parempaa ja työajat ovat lyhyempiä.

Hitsipolttimen vaatima tila vaihtelee hitaustyypeittäin. Hitsaustavat, kuten kaasu- ja kaarihitsaus, joissa hitsiin tuotava lisäaine syötetään erikseen toisella kädellä, vaativat yleensä enemmän tilaa. Varsinkin käsin hitsatessa kotelomaiset rakenteet ovat haastavia, sillä hyvän hitsin aikaansaamiseksi poltinta pitäisi mahtua liikuttamaan oikeassa asennossa esteettömästi sauman läheisyydessä. Myös hitsattavan lisämateriaalin syöttö voi olla hankalaa kotelorakenteesta johtuen. Käsin hitsatessa kotelomainen rakenne voi myös estää työskentelykohdan näkemisen, joka tekee hitsaamisen mahdottomaksi. Hitsausrobotti pystyy tapauskohtaisesti suorittamaan hitsejä ahtaissakin paikoissa, mutta silloin robotin liikkeet on suunniteltava erittäin tarkasti. Robotin siirtyessä hitsaamaan saumaa kokoonpanon sisälle riskinä on itse robotin rungon osuminen hitsattavaan kokoonpanoon ja

tämä voi aiheuttaa vaurioita hitsausrobottiin tai kokoonpanoon. Robottihitsauksen yhteydessä käytetään usein käsin hitsausta valmistelevana työvaiheena, jossa robottihitsattavat osat kiinnitetään ja paikoitetaan ensin pienillä hitseillä.

Hitsaamalla kokoonpantavat rakenteet tulisi suunnitella siten, että ne saadaan tehokkaasti ja helposti kiinnitettyä hitsausta varten. Kiinnittimet tulisi saada paikkoihin, joissa ne tukevat rakennetta hyvin ja estävät sen vääntymisen. Oikein suunnitellut kiinnittimet estävät rakenteen plastiset muodonmuutokset heti hitsauksen päätyttyä kappaleen alkaessa jäähtyä. Kiinnittimet eivät kuitenkaan saa hankaloittaa hitsaustyötä oleellisesti, sillä se voi johtaa ergonomian huonontumiseen ja työskentelyaikojen pidentymiseen. Kiinnittimien ollessa hitsaajan tiellä on riskinä, että työpisteellä kappaleen kiinnityksestä aletaan tinkiä, joka voi lopulta johtaa työtapaturmaan.

Ohutlevyosia kokoonpantaessa hitsaamalla voidaan käyttää myös pistehitsausta, jossa ohutlevyosat puristetaan toisiaan vasten hitsauskoneen leukojen välissä ja niiden väliin johdetaan voimakas sähkövirta. Pistehitsaus on hyvä tapa kiinnittää ohutlevyosia toisiinsa, sillä siinä lämpötilamuutokset kohdistuvat vain hyvin pienille alueille, eivätkä näin ollen luo jännitystiloja materiaalien sisälle. Pistehitsausrobottia tai -konetta voidaan operoida joko manuaalisesti tai ohjelmoidusti. Manuaalisesti konetta operoidessa tulee hitsit suunnitella paikkoihin, joihin hitsauskoneella päästään helposti käsiksi, sillä jos koneen runko osuu hitsatessa muuhun kokoonpanoon, ei hitsaukseen tarvittava sähkövirta kulje pelkästään hitsauskoneen leukojen ja hitsikohdan läpi ja näin hitsi jää vajavaiseksi.

2.5 Profiilit

Erilaisia profiileja hyödyntämällä hitsattavassa kokoonpanossa pystytään kuluja pienentämään oleellisesti. Niin sanotun Andersonin lain mukaan ”never design a part you can buy out of a catalog” [5] ei koskaan tulisi kokoonpanoon suunnitella osaa, jonka voi tilata valmiina alihankkijalta. Valmista profiilia käytettäessä vältetään suunnittelukustannuksilta, jotka sisältäisivät itse osan suunnittelun, hitsaus-suunnittelun ja muun tuotantosuunnittelun liittyen hitsatun kokoonpanon valmistamiseen.

Valmiin profiilin käyttäminen vähentää myös kokoonpanoon tarvittavien työvaiheiden määrää. Erilaisten profiilien määrä tulisi kuitenkin pitää mahdollisimman pienenä, sillä tilattaessa monta pientä erää erilaisia profiileja, yksikköhinnat ovat korkeampia kuin tilattaessa yhtä profiilia suurempi erä. Suunniteltaessa putkiprofiilien käyttöä hitsatussa rakenteessa kannattaa huomioida yleiset putkiprofiilikoot sekä putkiprofiilien hitsattavuusominaisuudet. Ei-standardikokoisen putkiprofiilin käyttäminen kokoonpanossa voi maksaa moninkertaisesti verrattuna suunnitteluvaiheessa muutettuun standardikokoiseen profiiliin.

2.6 Kulujen vähentäminen

DFWA- ja DFA -menetelmien avulla pyritään kustannustehokkaampaan tuotantoon ja yksi merkittävistä keinoista on materiaalin vähentäminen kokoonpanossa. Rakenteen kuormitustyyppit tulisi olla tiedossa mahdollisimman tarkkaan, jotta pystyttäisiin suunnittelemaan riittävän tukeva, mutta ei liian järeä rakenne. Osia vähentämällä säästetään materiaalikustannuksissa, suunnittelukustannuksissa ja myös ennen kaikkea valmistuskustannuksissa. Kokoonpanon ollessa liian järeä sille tarkoitettuun käyttöön, se sisältää luultavasti turhia osia tai materiaalit ovat turhan paksuja. Ylimääräiset osat johtavat aikaisemmin mainittuun tilanteeseen, jossa hitsisaumojen määrää pyrittiin vähentämään yhdistämällä pienempiä osia kokonaisiksi levytuotteiksi. Liian paksun materiaalin käyttö johtaa painon lisääntymiseen ja sitä kautta esimerkiksi kuljetuskustannusten kasvamiseen.

Hitsatulle rakenteelle on myös määrätty erilaisia laatuvaatimuksia ja -luokkia sekä toleransseja. Hitsatussa rakenteessa tulisi käyttää mahdollisuuksien mukaan yleistoleransseja, kuten SFS-EN 13920. Muita toleransseja kokoonpanoon valitessa tulee varmistua toleroinnin tarpeellisuudesta, sillä liian tarkat toleranssit voivat johtaa valmistustapojen muuttamiseen ja nostaa sitä kautta valmistuskustannuksia merkittävästi. Laatuvaatimuksia hitsaukseen liittyen voi ilmetä esimerkiksi käytettäessä putkiprofiileja ja säiliömäisiä rakenteita.

3 Puutavarakahmarin lujuusanalyysi

Tietokoneavusteista lujuuslaskentaa hyödynnetään esimerkiksi erilaisten rakenteiden kuormituskestävyyden ja jouston arviointiin. Näitä analyysejä kutsutaan nimellä FEM-analyysi. FEM-analyyseillä pystytään saamaan tarkkoja tuloksia nopeasti tilanteissa, joissa käsin laskenta olisi vaikeaa tai jopa mahdotonta. Analyytit ovat aina ennusteluontoisia, joten poikkeamia realistiseen testaukseen voi syntyä paljonkin.

Poikkeamia voivat aiheuttaa esimerkiksi kuormitus- tai tuentatapa, koska rakenteita testatessa täytyy usein tehdä kompromisseja, jotta välttyttäisiin ylimääräiseltä työltä ja lisäkuluilta. Analyysiä suunniteltaessa tulisikin aina miettiä yhteyttä realistiseen testaamiseen, esimerkiksi testipenkissä, jotta välttyttäisiin turhilta testauksilta.

Lujuusanalyysiä tehdessä aloitetaan yleensä verkottamalla kappale, eli ohjelma jakaa kappaleen pieniin osiin, yleisimmin tetroihiin, joiden avulla lujuusanalyysi pystytään suorittamaan. Nämä verkotukset ovat avainasemassa laskennan tarkkuuden kannalta, koska harvaan verkotetussa kappaleessa kriittiset kohdat saattavat jäädä piiloon. Verkotusta on syytä tihentää asteittain, jotta pystytään havaitsemaan kohdat, joissa verkotuksen tihennyksestä voisi olla tulosten kannalta hyötyä. Koko kokoonpanoa tai sen osaa ei kannata verkottaa yhtä tiheästi, sillä tämä johtaa usein laskennan muuttumiseen raskaaksi ja aikaa vieväksi. Yleisesti ottaen verkotusta tulisi tihentää rakenteen muutoskohdissa, saumakohdissa, liitoksissa sekä terävissä nurkissa.

Lujuusanalyysiä varten 3D-malleista täytyy poistaa esimerkiksi kaikki kokoonpanohitsausta varten suunnitellut raot ja välykset, koska ne aiheuttaisivat analyysin epäonnistumisen. Osille ja kokoonpanoille on myös määritettävä materiaalitiedot, joita ohjelma käyttää jännitysten ja siirtymien arviointiin.

Creo Parametric -ohjelmistolla tehtäviin staattisiin analyyseihin käytetään yleensä Single-Pass -laskentatapaa tai varmempien tulosten saamiseksi Multi-Pass -laskentatapaa. Näiden laskentatapojen ero on lujuuslaskelmien

laskentakierrosten määrässä. Multi-Pass-laskentatapaa käytettäessä ohjelma laskee rakenteeseen kohdistuvat jännitykset ja siirtymät tarkemmin käyttämällä tarvittaessa korkeampia polynomiasteita, jonka johdosta tulokset ovat luotettavampia.

Usein staattisten lujuusanalyysien teko aloitetaan Single-Pass -laskentatavalla sen nopeuden vuoksi. Kun kokoonpanoa tai osaa on muutettu tarpeeksi ja SPA-analyysillä on saatu johdonmukaisia tuloksia, voidaan sen jälkeen ajaa MPA-analyysi tulosten varmistamiseksi.

Puutavarakahmari koostuu kahdesta leuasta, isommasta ja pienemmästä. Pienempi leuka menee isomman sisälle linkkuun, kun kahmari suljetaan tyhjänä. Lujuusanalyysien tuloksista puhuttaessa isommalla kahmarileualla tarkoitetaan ulompaa ja pienemmällä kahmarileualla sisempää leukaa. Kahmarileuolle ajetuissa analyyseissä verkotusta on tihennetty koneiden laskentatehojen puitteissa ja analyysit on suoritettu kummallekin leualle erikseen laskennan nopeuttamiseksi. Analyysien tuloksissa jännityskes-kittymistä puhuttaessa jännityksellä tarkoitetaan Von Mises -jännitystä ja jännityksen yksikkönä on MPa. Kuviossa 8 on myynnissä oleva vastaava VAHVA-tuoteperheen kahmari

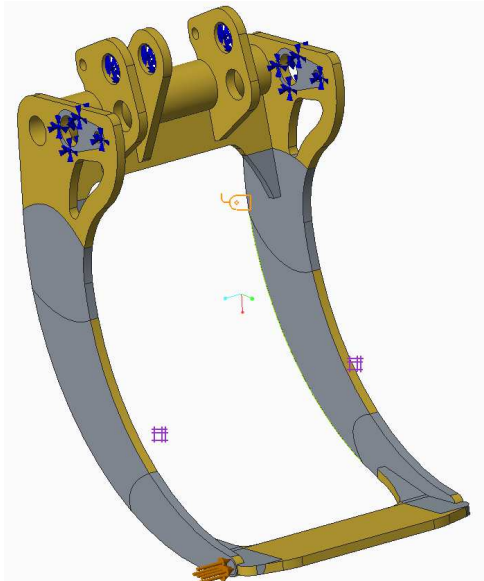


Kuvio 8. Vahva C26-kahmari. [3]

3.1 Alkuperäinen C21-kahmari

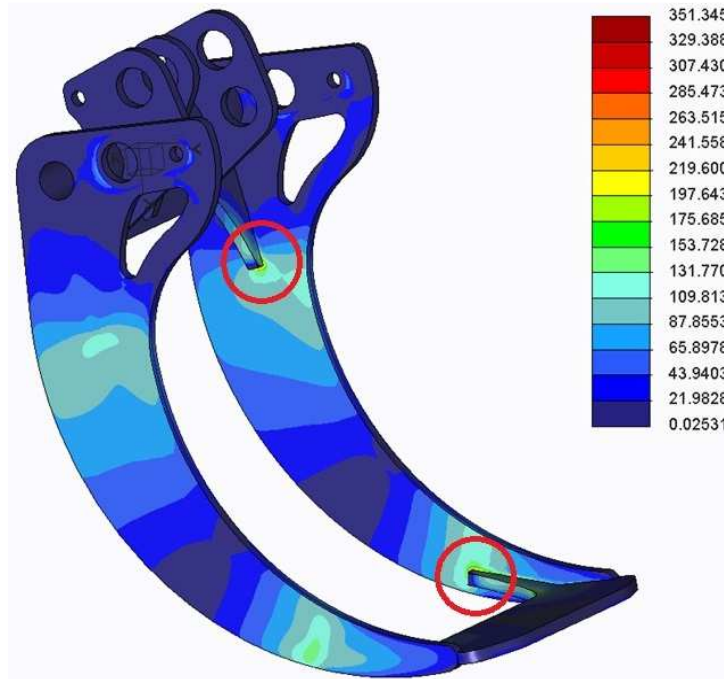
Outokummun Metalli Oy toimitti alkuperäisten kahmarileukojen 3D -mallit IGES-muodossa, koska oppilaitoksella käytössä ollut Creo Parametric 3.0 -versio ei tue ollenkaan Outokummun Metalli Oy:llä käytössä olevaa Creo Parametric 4.0 -versiota. Toiseen muotoon muuttaminen aiheutti kuitenkin sen, että kokoonpanossa olevista osista hävisivät kaikki mittapiirteet eli yksittäisten osien muokkaaminen niiden mittoja muuttamalla oli mahdotonta. Osat olivat kuitenkin jollakin tasolla muokattavissa, joten niistä poistettiin esimerkiksi kokoonpanohitsausta varten suunnitellut raot, jotka hitsin täyteaine olisi hitsatessa täyttänyt.

Alkuperäisille kahmarileuoille suunniteltiin sopiva kuormitustilanne, jolla pystyttäisiin löytämään ne paikat rakenteesta, joihin jännitykset keskittyvät. Verkotuksia tihennettiin alussa 20 mm ja myöhemmin kriittisissä kohdissa lisää. Kuviossa 9 näkyvät alkuperäisen mallin tuennat ja kuormitukset lujuusanalyysiä varten. Tuenta pyrittiin toteuttamaan siten, että se olisi mahdollisimman lähellä todellista tilannetta, mutta kuitenkin riittävän yksinkertainen nopeamman analyysin ajoajan vuoksi.



Kuvio 9. Kahmarileuan tuenta ja kuormitustapa ensimmäisissä analyyseissä. 3 kN sivuttainen kuormitus. Pienempi leuka tuettiin samalla tavalla analyyysiä varten.

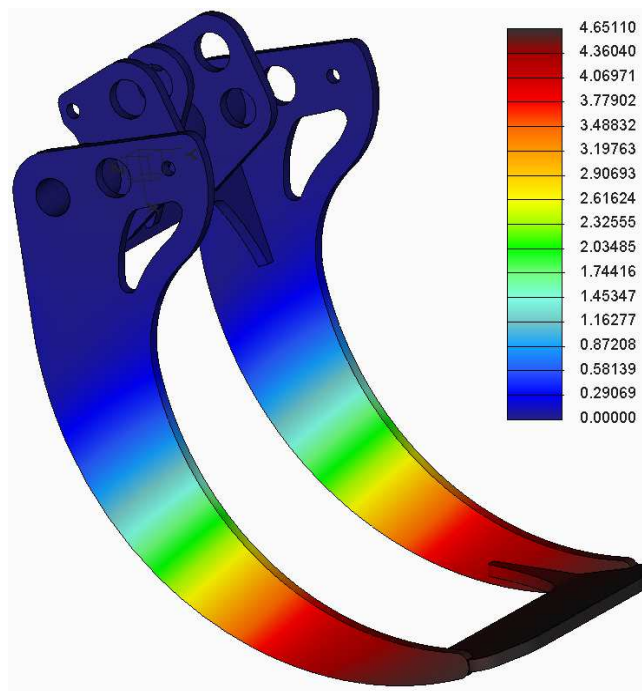
Ensimmäinen lujuusanalyysi ajettiin harvalla, 20 mm verkotuksella kriittisten kohtien löytämiseksi. Kuviossa 10 on esitettyä alkuperäisen isomman leuan jännityskeskittymät.



Kuvio 10. Alkuperäisen isomman kahmarileuan lujuusanalyysin jännityskeskittymät.

Jännityshuiput, suurimmillaan noin 350 MPa, sijoittuvat ylätukilevyn ja huulilevyn nurkkiin. Jännityskeskittymät syntyivät odotettuihin paikkoihin, sillä sivuttaiskuormitusta vastustava tuenta on lähes ainoastaan ylätukilevyn ja huulilevyn nurkissa.

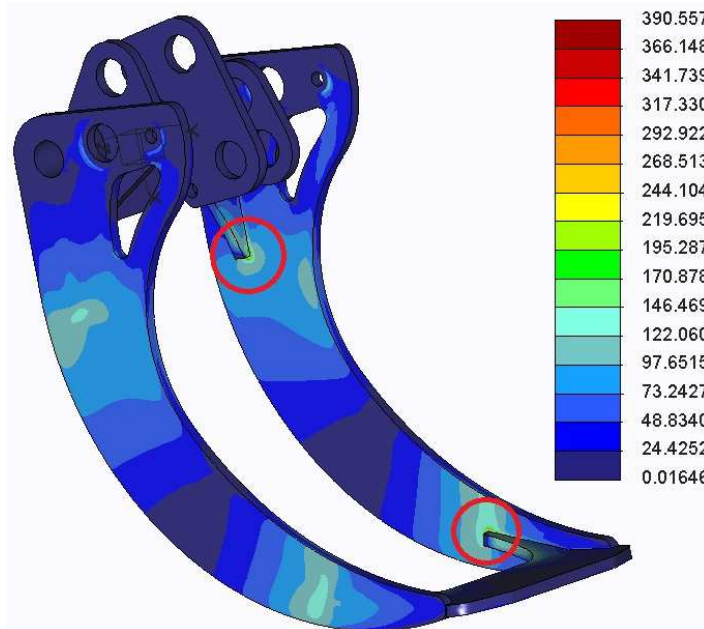
Toinen oleellinen tarkasteltava asia analyysien tuloksissa oli taipumat. Leukoja haluttiin muokata jäykemmiksi, jotta ne eivät todellisissa kuormitustilanteissa vääntyisi toimintakelvottomiksi. Kuviossa 11 on esiteltyä isompaan kahmarileukaan syntyneet taipumat sivuttaisen kuormituksen seurauksena.



Kuvio 11. Alkuperäiseen isompaan kahmarileukaan syntyneet taipumat.

Taipumat syntyivät kuormitustilante huomioiden odotettuihin paikkoihin ja ne olivat enimmillään noin 4,65 mm.

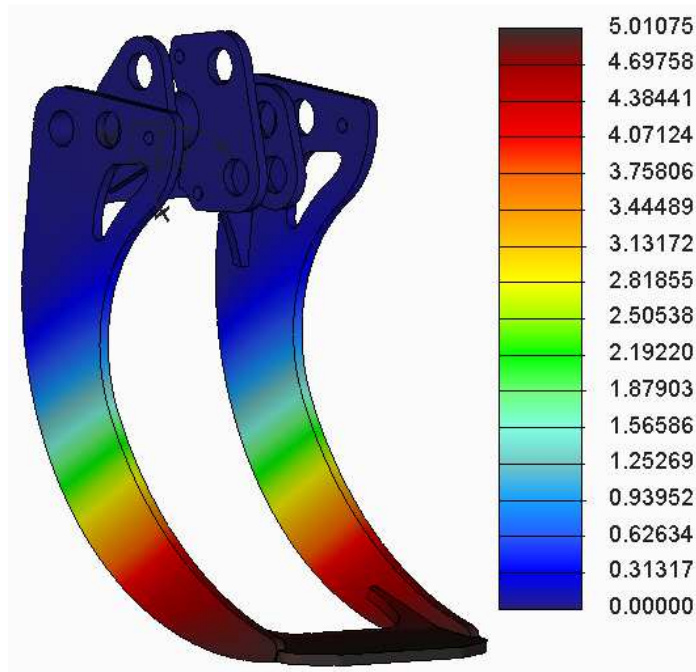
Pienemmälle leualle ajettiin samanlainen analyysi jännityskeskittymien löytämiseksi. Kuviossa 12 on esitelty jännityshuippujen keskittyminen pienemmän kahmarileukaan karkealla verkotuksella tehdyssä lujuusanalyysissä.



Kuvio 12. Alkuperäisen pienemmän kahmarileuan jännityskeskittymät.

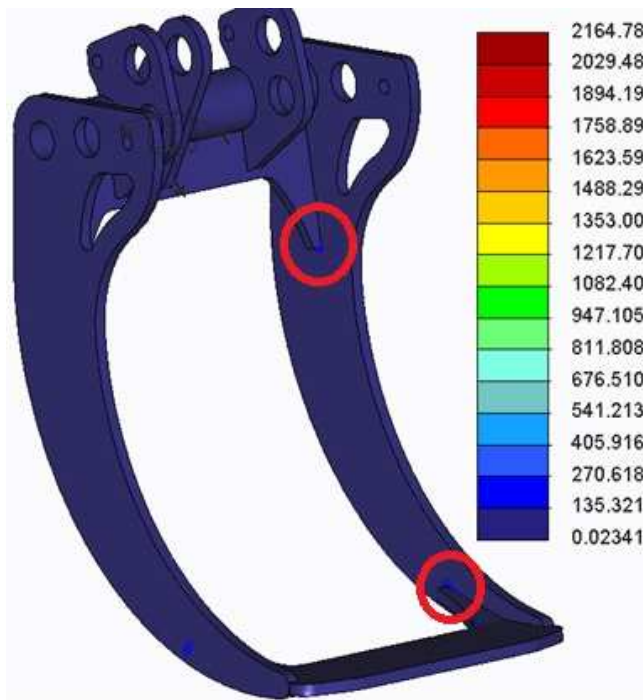
Jännityskeskittymät kohdistuivat samoihin kohtiin kuin isommassakin leuassa. Jännitykset olivat arvoiltaan hieman suurempia, jopa 390 MPa. Jännityskeskittymät syntyivät huulilevyn ja ylätukilevyn nurkkiin samalla tavalla kuin isommalle kahmarileuallekin tehdyssä lujuusanalyysissä.

Koska pienempi leuka on isompaa leukaa kapeampi, se taipuu kuormituksessa enemmän, jolloin taipumat ovat odotetusti suurempia. Kuviossa 13 on esiteltyä pienemmän kahmarileuan taipumat.



Kuvio 13. Pienemmän alkuperäisen kahmarileuan taipumat. Huulilevyn kärjen kohdalla taipuma oli 5 mm.

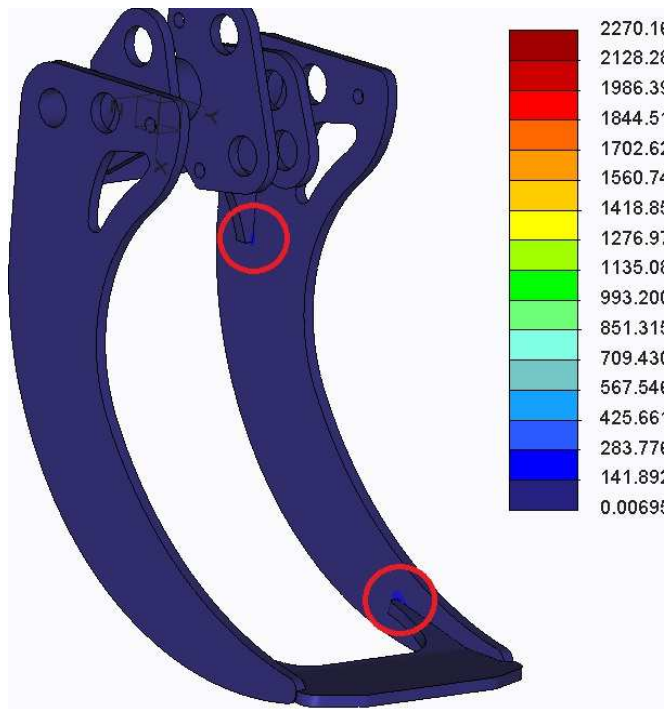
Ensimmäisten analyysien perusteella verkotusta pystyttiin tihentämään kriittisimmissä kohdissa. Kuviossa 14 on esiteltyä jännityskeskittymien paikat alkuperäisessä isommassa kahmarileuassa, kun verkotusta on tihennetty kriittisissä saumoissa 1 mm kokoon.



Kuvio 14. Isomman alkuperäisen kahmarileuan jännityskeskittymät saumoissa tihennetyllä 1 mm verkotuksella.

MPA -analyysi antoi tulokseksi huomattavan suuret, jopa kuusinkertaiset jännityshuiput verrattuna aiempaan analyysiin. Suuremmat jännityshuiput johtuvat verkotuksen tihennyksistä kriittisissä kohdissa. Taipumat pysyivät saman suuruisina kuin alkuperäisessäkin analyysissä, sillä ne eivät ole riippuvaisia verkotuksen tihennyksistä.

Pienemmälle kahmarileualle toteutettiin samanlainen verkotuksen tihennys 1mm kokoon kriittisimmissä kohdissa. Kuviossa 15 on esitelty jännityshuippujen suuruudet pienemmässä alkuperäisessä kahmarileuassa tihennetyllä verkotuksella.



Kuvio 15. Jännityshuippujen suuruudet 1 mm tihennetyllä verkotuksella pienemmän kahmarileuan kriittisissä kohdissa.

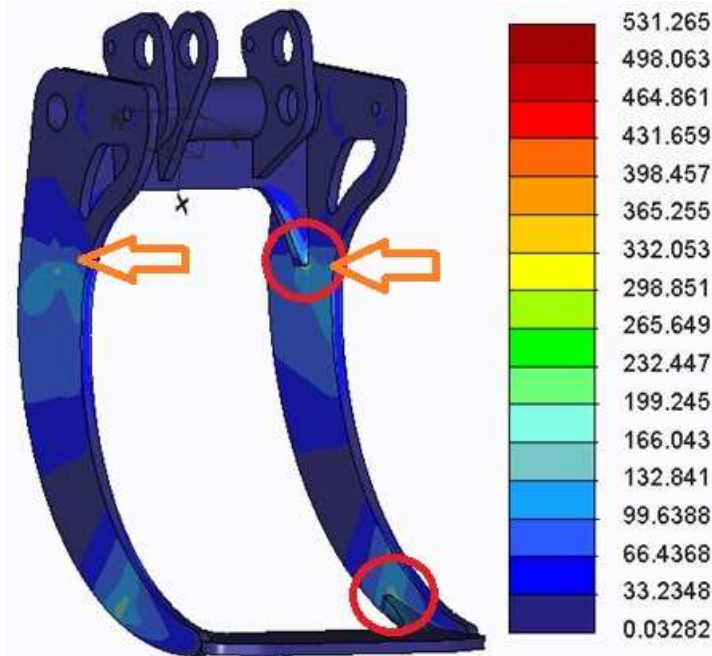
Pienemmänkin kahmarileuan kohdalla jännityshuippujen suuruudet moninkertaistuivat tiheämmällä 1 mm verkotuksella. Taipumat pysyivät samansuuruisina ensimmäiseen analyysiin verrattuna, niiden ollessa jälleen 5 mm luokkaa.

3.2 Muokattu C21-kahmari

Creo Parametric 3.0-ohjelmistolla kahmareita pystyttiin jollakin tasolla muokkaamaan parannusideoiden mukaan. 3D-mallinnusohjelman eri versioiden yhteensopimattomuuden vuoksi kappaleiden mittapiirteet hävisivät tiedostomuotoa muutettaessa. Tästä mittapiirteiden menetyksestä johtuen muokkauksia täytyi tehdä hieman soveltaen ja poikkeavalla tavalla.

Outokummun Metalli Oy toimitti särmätyt 3D-mallit, joissa isompaa leukaa oli hieman levitetty ja pienempää kavennettu huulilevyä kohden. Aikaisempien kokemusten perusteella he halusivat näitä muokkauksia testattavan muiden parannusideoiden ohessa.

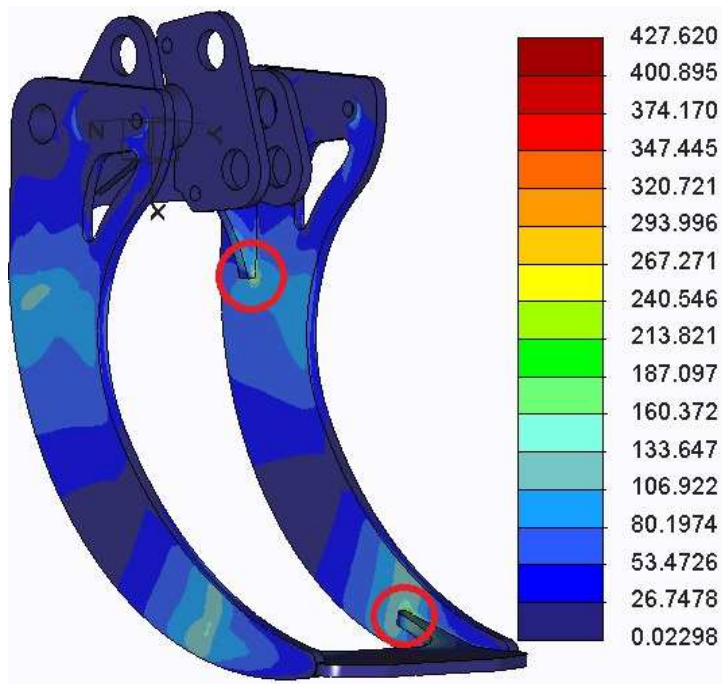
Kuviossa 16 on esiteltyä särmätty isompi kahmarileuka, jolle on ajettu alustava lujuusanalyysi 20 mm verkotuksella.



Kuvio 16. Isommalle taivutetulle kahmarileualle tehty lujuusanalyysi. Leuan kylkiä on taivutettu nuolten osoittamista kohdista muutaman asteen verran ulospäin. Jännityshuiput on merkitty kuvioon punaisilla ympyröillä.

Analyysin tulosta verratessa aiempaan suoraan kahmarileukaan todettiin, että taivutus lisää jännitysten huippuarvoja ja siksi tätä parannusideaa ei jatkettu. Taipumat kasvoivat myös hieman alkuperäiseen verrattuna.

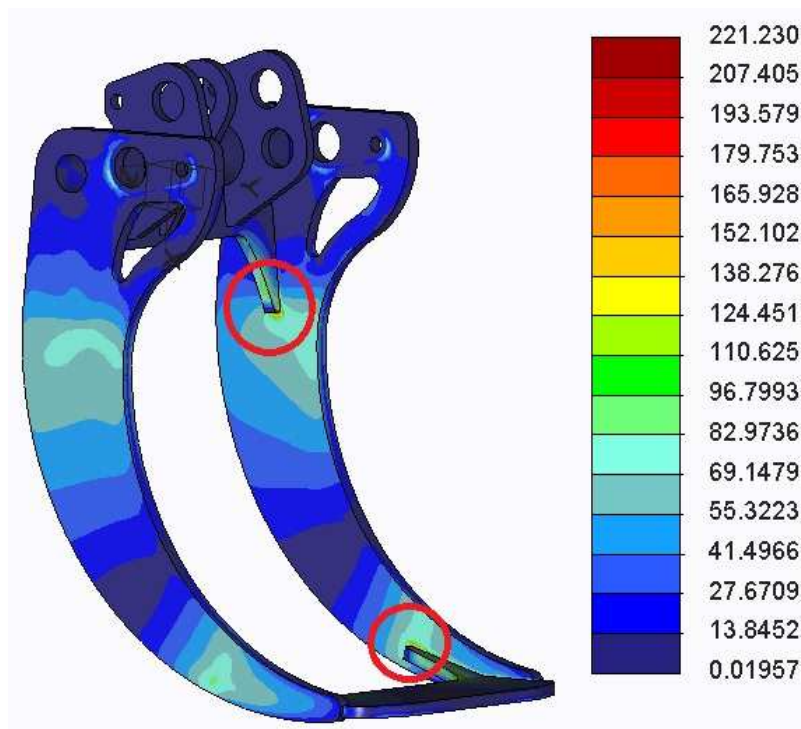
Pienemmälle taivutetulle kahmarileualle suoritettiin 20 mm verkotuksella samanlainen analyysi kuin isommalle leualle. Kuviossa 17 on esiteltyä lujuusanalyysin tulokset huippujännitysten osalta pienemmässä taivutetussa kahmarileuassa.



Kuvio 17. Pienemmän taivutetun kahmarileuan lujuusanalyysin tulokset huippujännitysten osalta. Jännityshuippujen paikat on merkitty kuvioon punaisilla ympyröillä.

Pienemmän taivutetun kahmarileuan kohdalla tilanne oli sama eli jännityshuiput olivat isompia kuin alkuperäisessä 3D-mallissa. Taipumat pysyivät pienemmällä taivutetulla kahmarileualla lähes saman suuruisina kuin alkuperäisessäkin.

Yksi suunnitelluista parannuksista oli materiaalin paksuntaminen isommassa kahmarileuassa. Alkuperäisiä kahmarin kylkiä paksunnettiin analyysiä varten 3 mm, koska seuraava yleinen levypaksuus oli 15 mm. Kuviossa 18 on esiteltyä jännityshuippujen arvot ja paikat isommassa vahvistetussa kahmarileuassa.

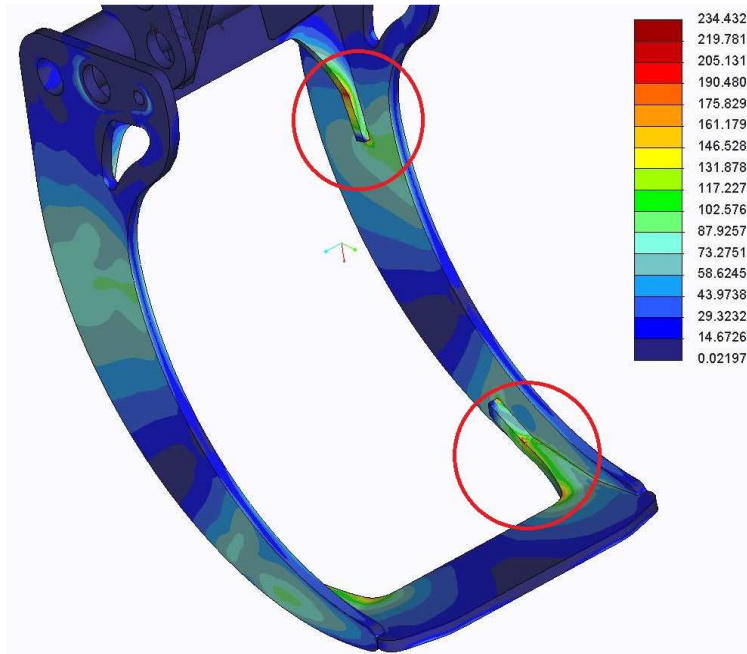


Kuvio 18. Vahvistettu isompi kahmarileuka. Jännityshuippujen paikat on merkitty kuvioon punaisilla ympyröillä.

Isomman leuan kylkien paksuntaminen pienensi jännityshuippuja noin 130 MPa, mutta samalla leuan paino kasvoi 4 kg. Materiaalin paksuntaminen myös pienensi taipumia noin 1,8 mm.

Jännityshuippujen keskittyttyä kaikissa alkuperäisissä ja muokatuissa kahmarileuoissa ylätukilevyn ja huulilevyn nurkkiin, näihin kohtiin lähdettiin suunnittelemaan jännityksiä pienentäviä jatkeita. Jatkeet olivat helposti tuotannossa toteutettavia ja ne eivät lisänneet rakenteen painoa merkittävästi.

Kuviossa 19 on esiteltyä jännityskeskittymien paikoittuminen isomman muokatun kahmarileuan 3D-mallissa ja niiden suuruudet. Nopeampaa alustavaa analyysiä varten verkotus oli tihennetty 20 mm tarkkuuteen.



Kuvio 19. 50mm jatkeilla muokattu isompi kahmarileuka. Jatkeet on merkitty kuvioon punaisilla ympyröillä. Jatkeet lisättiin molempiin päihin keskitukilevyä ja huulilevyä.

Jatkeiden lisääminen pienensi jännityshuippuja noin 120 MPa alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna. Taipumiin jatkeilla oli melko pieni vaikutus, sillä ne pienensivät taipumia vain 0,8 mm. Tulosten varmistamiseksi isommalle muokatulle kahmarileualle tehtiin samanlainen 1 mm verkotuksen tihennys kriittisissä saumakohtissa. Tiheämmällä verkotuksella jännityshuippujen arvoiksi saatiin suurimmillaan 1450 MPa. Alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna jännityshuiput olivat pienentyneet noin 710 MPa.

Pienemmälle kahmarileualle suunniteltiin keskituki käyttämällä 5 mm seinämävahvuista ainesputkea. Keskituen päätarkoituksena oli pienentää taipumia, mutta samalla tasata jännityshuippuja. Kuviossa 20 on esiteltyä ainesputkella tuetulle pienemmälle kahmarileualle tehty lujuusanalyysi 20 mm verkotuksella.

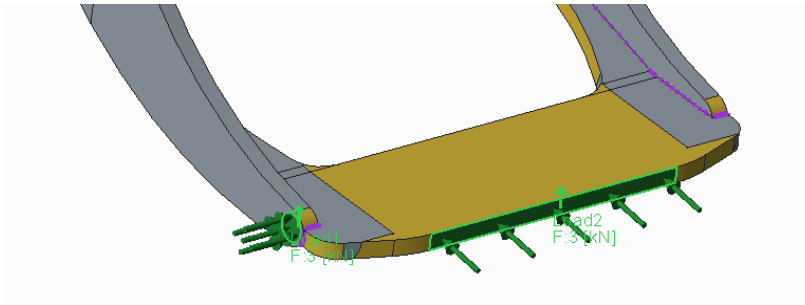


Kuvio 20. Ainesputkella tuetun pienemmän kahmarileuan jännityskeskittymät.

Suurimmat jännitykset jakautuivat aikaisempien kohtien lisäksi ainesputken liitoskohtiin. Jännitykset olivat suuruudeltaan 300 MPa luokkaa eli ne pienenevät noin 70 MPa alkuperäiseen verrattuna.

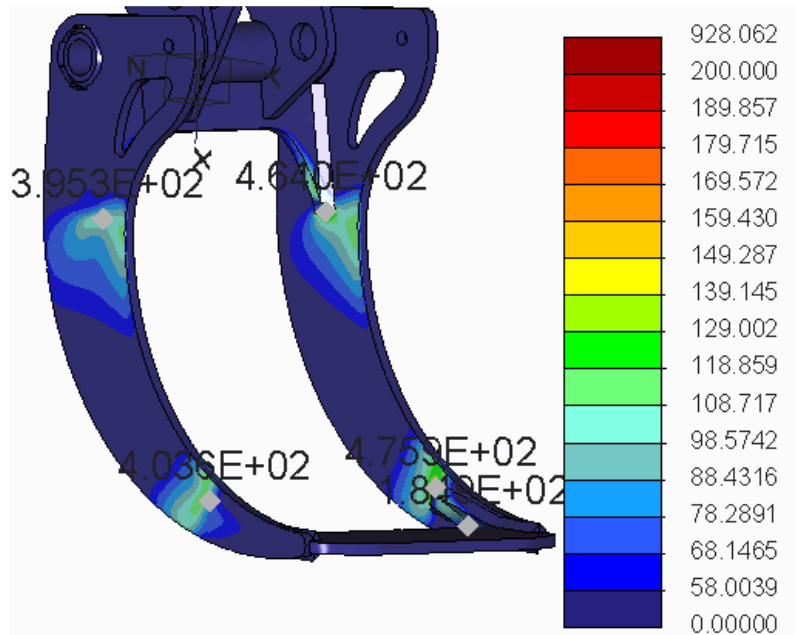
3.3 Creo Parametric 4.0 lujuusanalyysit

Kahmarileuoille päästiin suunnittelemaan ja mallintamaan parempia muokkauksehdotuksia, kun käyttöön saatiin Outokummun Metalli Oy:n kanssa yhtenevä Creo Parametric 4.0-versio. 4.0-versiolla kokoonpanot aukesivat normaalisti ja osien yksittäisiä mittapiirteitä pystyttiin muokkaamaan. Kahmarileukoihin pystyttiin mallintamaan hitsisaumat, jotka muuttivat hieman lujuusanalyysien tuloksia. Hitsisaumat mallinnettiin yksinkertaisesti, että ne eivät muuttaisi analyysin ajoa liian raskaaksi käytössä oleville koneille. Kuormitustapaa muutettiin todenmukaisempien tulosten saamiseksi. Uudessa kuormitustavassa 3 kN sivuttaiskuormituksen lisäksi leukaan laitettiin vaikuttamaan 3 kN kuorma huulilevyn päähän. Kuviossa 21 on esiteltyä kuormitustapa, jota käytettiin lujuusanalyyseissä Creo Parametric 4.0-ohjelmistolla muokatuille osille.



Kuvio 21. Uusi kuormitustapa analyysijä varten Creo Parametric 4.0 -ohjelmistolla muokatuille osille. 3 kN kuormitukset sivusta ja huulilevyn päästä.

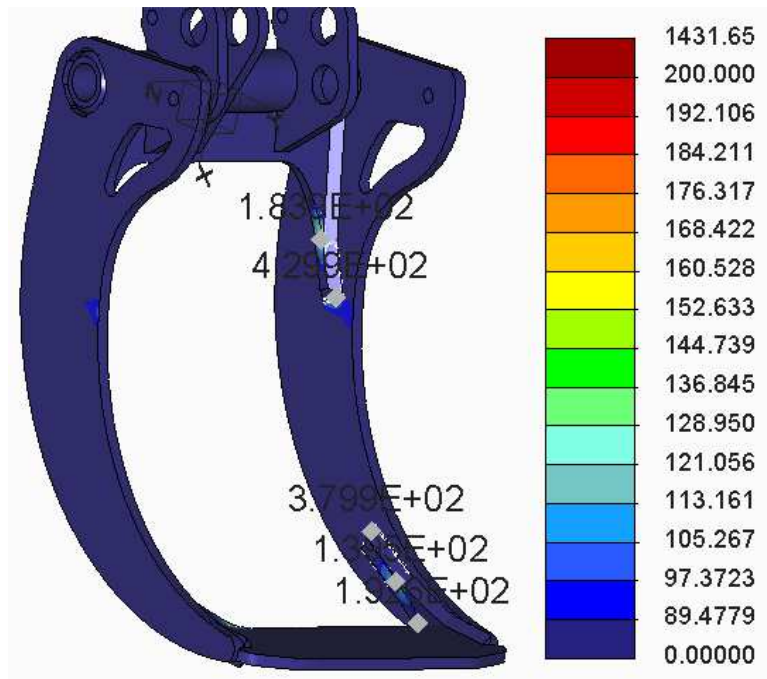
Isommalle alkuperäiselle kahmarileualle ajettiin SPA-lujuusanalyysi, jossa käytettiin uutta kuormitustapaa ja tihennettyä verkotusta. Verkotus oli säädetty yleisesti 20 mm suuruuteen, hitsisaumojen pinnoilla 5 mm suuruuteen ja kriittisimmissä osissa hitsisaumaa 2 mm suuruuteen. Kuviossa 22 on esiteltyä isommalle kahmarileualle ajettun lujuusanalyysin tulokset jännityskeskittymien osalta.



Kuvio 22. Isompaan muokattuun kahmarileukaan syntyneet jännityskeskittymät tihennetyllä verkotuksella.

Jännityskeskittymät olivat suuruusluokaltaan samanlaisia kuin aikaisemmissakin analyyseissä. Suurimmat jännitykset ilmestyivät myös samoihin kohtiin kuin Creo Parametric 3.0 -ohjelmistolla tehdyissä analyyseissä. Jännitykset huulilevyn ja ylätukilevyn nurkissa olivat suurimmillaan 400 – 480 MPa. Alkuperäisen isomman kahmarileuan taipuma oli 3,7 mm.

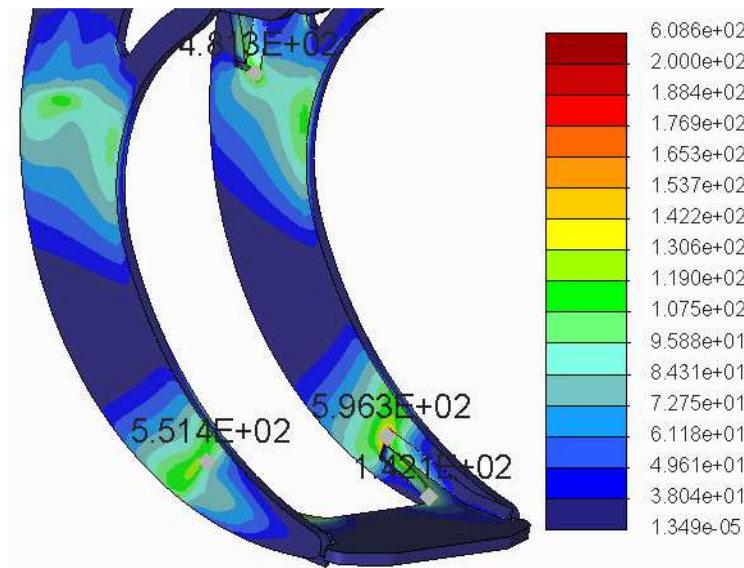
Isommalle kahmarileualle suunnitellut 50 mm jatkeet huulilevyn ja ylätukilevyn nurkkiin mallinnettiin Creo Parametric 4.0 -ohjelmistolla. Ylätukilevyn ja huulilevyn jatkeita taivutettiin 10 astetta kahmarileukojen sulkeutumisen helpottamiseksi, sillä suorat jatkeet olisivat saattaneet osua pienempään leukaan suljettaessa tyhjää kouraa. Ohjelmistoversion yhteensopivuus Outokummun Metallin Oy:n käyttämän version kanssa teki mallintamisesta yksinkertaisempaa ja muutokset pystyttiin toteuttamaan helpommin. 3D-mallissa verkotusta tihennettiin samalla tavalla kuin alkuperäisenkin leuan kohdalla. Kuviossa 23 on esiteltyä ison muokatun kahmarileuan lujuusanalyysin tulokset jännityskeskittymien osalta.



Kuvio 23. Isompaan muokattuun kahmarileukaan syntyneet jännityskeskittymät.

Isommassa muokatussa kahmarileuassa jännityskeskittymät olivat kriittisimmässä kohdissa suuruudeltaan 380 – 430 MPa, joka on noin 50 MPa vähemmän kuin alkuperäisessä tilanteessa. Alkuperäiseen tilanteeseen verrattuna taipumat pienenivät arvosta 3,7 mm arvoon 2,9 mm

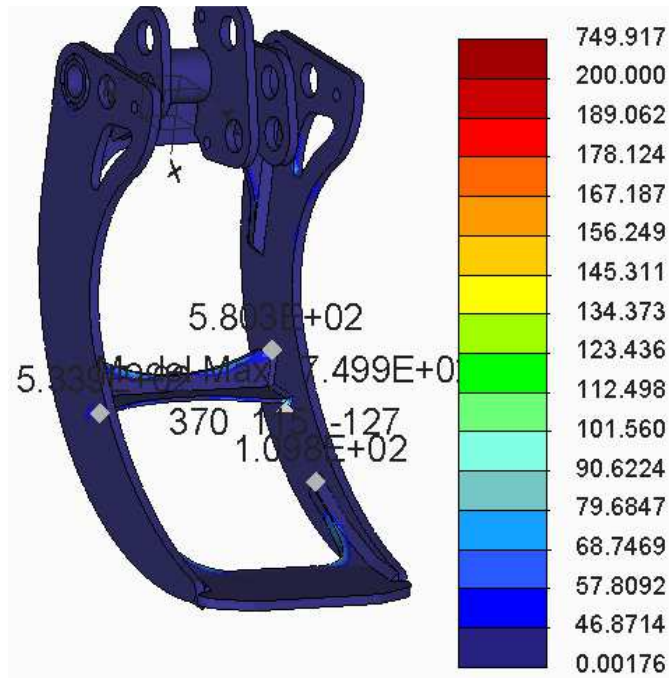
Pienemmälle alkuperäiselle kahmarileualle ajettiin SPA-analyysi, jossa verkosta oli tihennetty 20 mm suuruuteen ja hitsisaumojen pinnalla 5 mm suuruuteen sekä kriittisimmissä saumoissa 2 mm suuruuteen. Kuviossa 24 on esiteltyä lujuusanalyysin tulokset jännityskeskittymien osalta pienemmässä kahmarileuassa.



Kuvio 24. Pienemmälle kahmarileualle ajettun SPA-analyysin tulokset jännityskeskittymien osalta. Jännityskeskittymät näkyvät rakenteessa vihreällä, keltaisella ja punaisella.

Pienempään alkuperäiseen kahmarileukaan syntyi suurimmillaan 550 – 600 MPa:n jännityksiä, jotka keskittyivät aiempien analyysien osoittamiin kohtiin. Uudella kuormitustavalla pienempi alkuperäinen kahmarileuka taipui 4,3 mm.

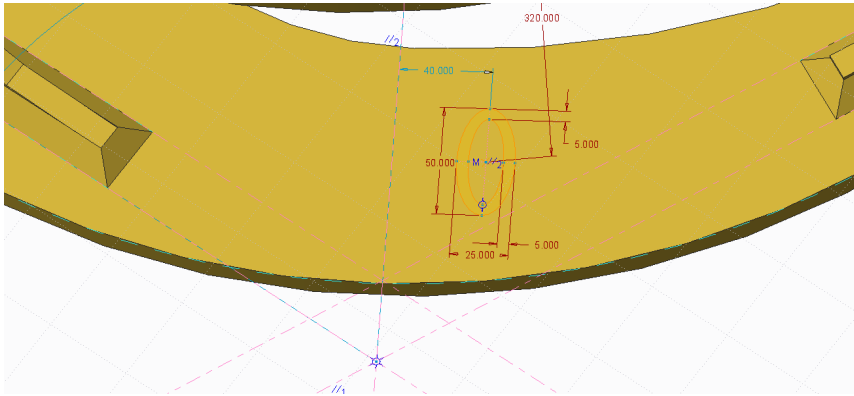
Pienemmälle kahmarileualle mallinnettiin samanlainen kevennetty keskituki kuin Creo Parametric 3.0 -ohjelmistolla tehdyissä analyyseissä. Verkotusta tihennettiin yleisesti 20 mm tarkkuuteen, hitsisaumojen pinnoilla 5 mm tarkkuuteen ja kriittisimmissä saumakohtissa 2 mm tarkkuuteen. Kuviossa 25 on esiteltyä analyyseihin tulokset jännityskeskittymien osalta pienemmälle tuetulle kahmarileualle.



Kuvio 25. Pienemmän tuetun kahmarileuan jännityskeskittymät.

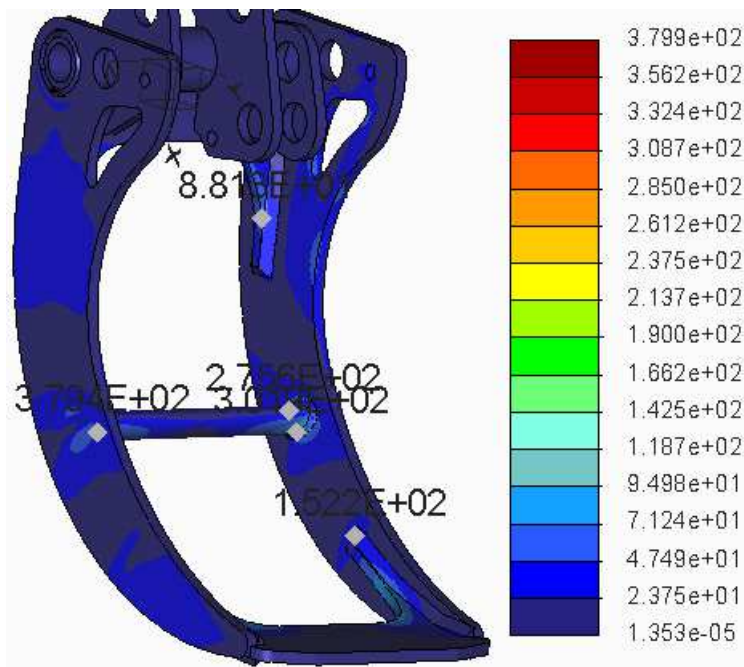
Tuetussa pienemmässä kahmarileuassa jännitykset keskittyivät keskituen nurkkiin, ja ne olivat suuruudeltaan 540 – 750 MPa. Keskituen avoin profiili keskitti jännitykset hitsisauman nurkkiin, mutta vähenti jännityksiä huulilevyn ja ylätukilevyn nurkissa. Taipumat pienentyivät alkuperäiseen verrattuna 2,85 mm.

Palaverissa Outokummun Metalli Oy:n edustajien kanssa päätettiin tarkastella vielä tilanne, jossa pienempi kahmarileuka olisi tuettu ellipsillä ainesputkella. Ellipsi putki olisi helpompi hitsata, joka helpottaisi kokoonpanon suunnittelua. Kuviossa 26 on esiteltyä ellipsin ainesputken paikoitus kokoonpanossa.



Kuvio 26. Ellipsin ainesputken paikoitus kokoonpanossa.

Ellipsillä ainesputkella tuetulle pienemmälle kahmarileualle tehtiin analyysiä varten verkotuksen tihennys, jossa hitsien pinnoilla verkotus oli säädetty 5 mm tarkkuuteen, kriittisimmissä saumoissa 2 mm tarkkuuteen ja muissa kohdissa yleisesti 20 mm tarkkuuteen. Kuviossa 27 on esiteltyä ellipsillä ainesputkella tuetulle pienemmälle kahmarileualle tehty lujuusanalyysi jännityskeskittymien osalta.



Kuvio 27. Ellipsillä ainesputkella tuettu pienempi kahmarileuka ja sen jännityskeskittymät.

Jännityskeskittymät olivat 275 – 380 MPa eli huippujännitykset pienenevät alkuperäiseen nähden jopa 200 MPa ja jännityskeskittymien paikat siirtyivät huulilevyn nurkista keskituen nurkkiin. Taipumat pienenevät ellipsiputkella tuetussa pienemmässä kahmarileuassa 2,6 mm.

3.4 Johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli vähentää rakenteen taipumia ja jännityshuippuja ja tulosten perusteella tähän tavoitteeseen päästiin. Molempiin leukoihin suunnitellut ylätukilevyn ja huulilevyn jatkeet pienensivät ja tasasivat jännityskeskittymiä. Isossa leuassa paras kehityssuunta oli leukojen sivulevyjen materiaalipaksuuden nostaminen. Tämä muutos lisää kuitenkin leuan painoa noin 4 kg, mutta sillä saadaan tasattua jännityskeskittymät todella hyvin. Isomman leuan taivuttaminen ei analyysien tulosten perusteella ollut kannattava kehityssuunta, sillä se keskitti jännitykset erityisesti huulilevyn kapeisiin nurkkiin. Taivutetun ison leuan etu on sen hieman parempi vääntöjäykkyys ja myös mahdolliset taipumat voisivat olla suurempia, koska välys leukojen välissä on suurempi.

Pienempään leukaan suunnitellut ylätukilevyn ja huulilevyn jatkeet paransivat tilannetta hieman, mutta keskituen käyttäminen jäykisti rakennetta selvästi parhaiten. Samalla kuitenkin rakenteen jäykistyminen näkyi keskituen nurkissa suurina jännityspiikkeinä. Nämä jännityspiikit olivat avoimella profiililla olevaa keskitukea käytettäessä huomattavan suuria, mutta suljettuun profiiliin vaihdettaessa ne pienivät oleellisesti. Avoimella profiililla olevaa keskitukea kokeiltiin käännellä eri asentoihin, mutta sillä ei ollut suurta vaikutusta. Myös eri mallisia avoimia profiileja kokeiltiin analyyseissä, mutta jännityskeskittymät syntyivät aina profiilin päätynurkkiin ja muihin teräviin nurkkiin.

Tulosten yhteenvetona paras tilanne kahmarileukojen jäykkyyden kannalta olisi valmistaa pienempi kahmarileuka keskituella ja keskituen olisi analyysien mukaan kannattavinta olla suljettu profiili, kuten pyöreä tai ellipsi ainesputki. Isomman leuan jäykkyyttä pystyttäisiin parantamaan helpoiten paksuntamalla materiaalia leukojen sivulevyissä 12 mm paksuudesta 15 mm paksuuteen. Pienempänä muokkauksena molempiin leukoihin olisi hyvä toteuttaa ylätukilevyn ja huulilevyn nurkkien 50 mm jatkeet.

Pohdinta

Lujuusanalyysien tekemisessä Creo Parametric 4.0-ohjelmalla ilmeni ongelmia, jotka johtuivat kokoonpanon tekotavasta ja osien paikoituksesta. Muutamissa kohdissa oli hitsausta varten suunniteltuja rakoja ja niistä johtuen analyysit eivät menneet läpi. Creo Parametric 4.0-ohjelman käyttöönotossa ilmeni myös odottamattomia lisenssiongelmiä, joiden takia aikataulu venyi useammalla viikolla. Ongelmien ratkettua lujuusanalyysien tulokset olivat odotusten mukaisia ja vertailukelpoisia Creo Parametric 3.0-ohjelmistolla ajettuihin analyyseihin. Muutamissa analyyseissä leuan kyljen ja huulilevyn välisessä liitoksessa kuormituksen kohdalla syntyi todella suuria, jopa yli 1000 MPa jännityksiä, mutta nämä jännityspiikit johtuivat todennäköisesti mallinnustavasta koska niitä ei esiintynyt kaikissa analyyseissä.

Tätä opinnäytetyötä pystyttäisiin tehtyjen analyyssien pohjalta jatkamaan testausvaiheella, jossa alkuperäisiä ja parannettuja leukoja testattaisiin testipenkissä ja niiden kestävyyttä analysoitaisiin venymäliuskamittauksen avulla. Opinnäytetyön tulokset ovat vertailukelpoisia muihin Outokummun Metalli Oy:lle tehtyihin kahmarileukojen lujuustarkasteluun liittyviin opinnäytetöihin. Omasta mielestäni opinnäytetyölle asetettuihin tavoitteisiin päästiin ja kahmarileukoihin saatiin suunniteltua jäykkyyttä parantavia muutoksia, jotka eivät olleet kuitenkaan kovin monimutkaisia tai kalliita toteuttaa tuotannossa.

Opinnäytetyötä tehdessä opin paljon uusia asioita tietokoneavusteiseen lujuuslaskentaan liittyen. Opin myös käyttämään Creo Parametric 4.0 -ohjelmistoa ja sain paljon uutta tietoa lujuusanalyysin tekemiseen ja hitsattavien rakenteiden suunnitteluun liittyen.

Lähteet

1. Outokummun Metalli Oy. 2018. Internetsivusto. <http://www.outokummunmetalli.fi/yritys>. 18.4.2018
2. Outokummun Metalli Oy. 2018. Internetsivusto. <http://www.outokummunmetalli.fi/tuotteet>. 18.4.2018
3. Koneosapalvelu Oy. 2018. Internetsivusto. <http://koneosapalvelu.fi/tuotteet/vahva-kahmarit-kuormainkourat-2/c-mallit>. 18.4.2018
4. Anderson, D. Design for manufacturability. [verkkodokumentti] 2018. [Viitattu 20.4.2018] Saatavissa: <http://www.design4manufacturability.com/index.htm>.
5. Anderson, D. Design for manufacturability. [verkkodokumentti] 2018. [Viitattu 20.4.2018] Saatavissa: http://www.design4manufacturability.com/DFM_article.htm.
6. Anderson, D. Design for manufacturability. [verkkodokumentti] 2018. [Viitattu 20.4.2018] Saatavissa: <http://www.design4manufacturability.com/steel-reduction-workshop.htm>.
7. Niemi, E & Kemppi, J. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. Painatuskeskus. Helsinki. 1993
8. SAMK automaation tutkimusryhmä. [verkkodokumentti] 2014. [Viitattu 20.4.2018] Saatavissa: <http://automaatio.samk.fi/?p=682>
9. Examples of weld design and stress concentrators in welds. Wikipedia. 2015. [Viitattu 20.4.2018] Saatavissa: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:StressConcentrationWelds.JPG>
10. Hitsausvalokuva. 2018. [Viitattu 20.4.2018] Saatavissa: <http://www.hechopati.info/hitsaus-valokuva/>
11. Piironen, T. Teräsrakenteiden suunnitteluohjeita parempaan valmistettavuuteen. Julkaisutoiminta. Savonia-ammattikorkeakoulu. Kuopio. 2013.
12. Hassinen, A. Energiapuuharvesterin valmistuskustannusten alentaminen. Opinnäytetyö. Karelia Ammattikorkeakoulu. Kone- ja tuotantotekniikka. Joensuu. 2015. 38 s.