

Ville Pöyhönen

Anodinostimen tuotekehitys

Opinnäytetyö
Materiaalitekniikan koulutusohjelma


Lokakuu 2015




MAMK

University of Applied Sciences

KUVAILULEHTI

	Opinnäytetyön päivämäärä
Tekijä(t) Ville Pöyhönen	Koulutusohjelma ja suuntautuminen Materiaalitekniikan ko.
Nimeke Anodinostimen tuotekehitys	
Tiivistelmä Opinnäytetyö tehdään Outotec oy:n Anode casting -tuotelinjan kanssa yhteistyössä. Anode casting -tuotelinja valmistaa kuparianodivalimoiden kalustoa. Työn tarkoituksena oli mitoittaa pidennetty versio nostovarresta, luoda toimiva geometria ja suorittaa lujustarkastelut, jotta rakenne on kestävä ja täyttää kestoikävaatimuksen, sekä tehdä toimeksiantajalle valmistuskuvat. Anodinostimen tehtävä on hakea anodi valumuotista ja viedä se vedellä täytettyyn jäähdytysaltaaseen. Työssä tehdyt geometria -ja liikeratatarkastelut sekä nostovarren mallinnus tehtiin Solid Works -ohjelmalla. Lujuuslaskelmat tehtiin väsyttävän kuormituksen suhteen tarkastelemalla maksimijännitys vaihteluita. Rakenteesta määritettiin sijainnit, joihin kohdistuu suurimmat jännitys vaihtelut. Nostovarren liikerata jaettiin seitsemään kulma-asemaan, jolla pyrittiin tarkastelemaan koko liikeradan aikaiset kuormitukset. Jokaiselle kulma -asemalle suoritettiin FEM-analyysi, ja analyysin tulokset kerättiin Excel-taulukoihin, joilla laskenta suoritettiin. Työssä analysoitiin alkuperäisen nostovarren geometrian mukaan pidennetty nostovarsi, josta kriittisimmät kohdat paikallistettiin. Tämän perusteella nostovarren geometriaa aloitettiin optimoimaan, jotta jännitysvaihteluita saataisiin pienemmiksi. Nostovarresta luotiin yhteensä kolme eri geometriaa, joista tulosten ja valmistettavuuden perusteella valittiin paras. Työn aikana nostovarren jännityksiä saatiin pienennettyä siten, että vaikka momenttivarsi pidentyi, päästiin varmuuskertoimia noudattaen nostovarren kestoikässä reilusti yli vaaditun. Outotec Oyj saa tämän työn perusteella vaihtoehtoisen, pidemmän nostovarren anodinostimeen, jonka avulla laitteiden keskinäisiä etäisyyksiä voidaan kasvattaa ja valimolaitteisiin kohdistuvia lämpökuormia pienentää. Lisäksi laitteiden huolto helpottuu, koska laitteiden sijoitteluun saadaan pelivaraa ja enemmän tilaa laitteiden välille.	
Asiasanat (avainsanat) Analyysi, tuotekehitys, kupari.	
Sivumäärä 20+13	Kieli Suomi
Huomautus (huomautukset liitteistä)	
Ohjaavan opettajan nimi Markku Kemppe	Opinnäytetyön toimeksiantaja Outotec Oyj Espoo

DESCRIPTION

	Date of the bachelor's thesis
Author(s) Ville Pöyhönen	Degree programme and option Material engineering
Name of the bachelor's thesis Product development of anode take off-device	
Abstract This thesis was made for Outotec Oyj's anode casting- product line. Outotec's anode casting -product line manufactures equipment for copper anode foundries. The purpose of this thesis was to create a new design of lifting arm, create a geometry which suits other foundry devices, run strength calculations to make sure that the lifetime of the structure meets its requirements and make manufacturing drawings for Outotec Reviews and 3D- modelling were made by using Solid Works software. Strength calculations were made by terms of fatiguing load, inspecting maximum variations of tension. The paths of movement were inspected in seven different positions, to get accurate results of structures loads. FEM- analyses were run in every position. Results of FEM- analyze were solved with Microsoft Excel. The most critical parts of lifting arm were localized after the first analysis, and according to results the geometry was modified. In total, three different geometries of lifting arm were created. By analyzing structure and modifying geometry, lifting arm achieved its requirements of lifetime By this thesis Outotec Oyj gets an alternative solution for lifting arm. Longer lifting arm gives more space between devices, reduces thermal loads and easier the maintenance of devices.	
Subject headings, (keywords) Analysis, product development, copper.	
Pages 20+13	Language Finnish
Remarks, notes on appendices	
Tutor Markku Kemppi	Bachelor's thesis assigned by Outotec Oyj Espoo

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	1
2	OUTOTEC OYJ COPPER ANODE CASTING	1
3	KONE-ESITTELY	1
	3.1 Take off -device	2
	3.2 Nostovarsi	4
4	VÄSYTTÄVÄ KUORMITUS	5
5	FEM-ANALYYSI	6
6	KINEMAATTISET TARKASTELUT	6
	6.1 Asemointiin vaikuttavat tekijät	7
	6.2 Liikeratojen tarkastelut	7
	6.3 Uusi asemointi	8
7	ALKUPERÄISEN RAKENTEEN ANALYSOINTI	9
8	GEOMETRIAN OPTIMOINTI JA RAKENTEEN ANALYSOINTI	10
9	VÄSYMISLASKENTA JA TULOKSET	16
10	RAKENTEEN KÄYTTÖIKÄ KUORMAA KASVATETTAESSA	17
11	VALMISTUSKUVAT	18
12	POHDINTA	18

LIITTEET

Liikeratasuunnitelman periaatekuva
Jännitys jakauman esimerkkikuva
Excel -laskelmat
Nivelvarrellisen anodinostimen periaatemalli
Lujuuslaskentaraaportti

1 JOHDANTO

Opinnäytetyö tehdään Outotec oyj:n Anode casting -tuotelinjan kanssa yhteistyössä. Anode casting -tuotelinja valmistaa kuparianodivalimoiden kaluston. Työn tarkoituksena on mitoittaa ja luoda 3D -malli pidennetystä nostovarresta anodinostimeen, suorittaa lujuustarkastelut, jotta rakenne on kestävä, sekä tehdä valmistuskuvat.

Nostovartta pidentämällä on tarkoitus saada kasvatettua valupöydän ja Anode collecting handling systemin välistä etäisyyttä, saada nostettua valupöytää suhteessa tankkiin sekä samalla optimoida nostovarren liikekulmaa pienemmäksi.

Kasvattamalla etäisyyttä tankin ja take off -devicen välillä koneiden asennus ja huolto helpottuu. Take off -devicen ja valupöydän etäisyyttä kasvattamalla saadaan pienennettyä anodeista koneisiin kohdistuvaa lämpökuormaa.

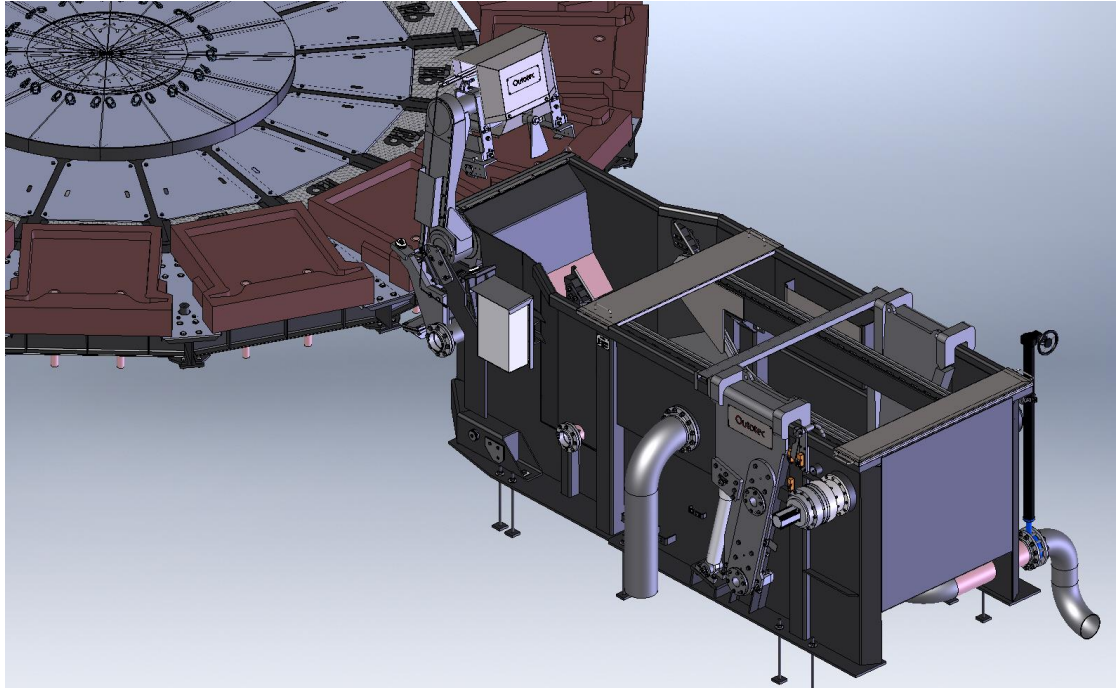
Mitoitavaksi laskennaksi muodostuu väsymislaskenta, koska kyseessä olevan nostovarren kaltaiseen rakenteeseen kohdistuessa n. 600 kg massa ja kuormituksen ollessa muuttuva-amplitudista, ei staattinen kuorma ole mitoittavana tekijänä. Nostovarren käyttöiän mitoitetaan olevan 20 vuotta. Työkierron kestäessä 12 sekuntia kuormitus-syklejä rakenteelle tulee $56 * 10^6$.

2 OUTOTEC OYJ COPPER ANODE CASTING

Outotec anode casting on vuonna 1973 perustettu tuotelinja, joka toimittaa asiakkaalle anodivalimokaluston. Outotec anode casting on toimittanut 90 anodiavalimokokonaisuutta ympäri maailmaa ja suuri osa maailman kuparituotannosta toimii Outotecin anodivalimolaitteilla. (Outotec 2015.)

3 KONE-ESITTELY

Opinnäytetyössä käsiteltävä anodinostin (take off -device) kuuluu kuparianodivalimon laitteisiin, jäähdytysaltaan yhteyteen (anode collecting & handling system). Take off -deviceen lisäksi samaan kokoonpanoon kuuluu myös front end with push-up unit (anodin muotista irrottava kone), bosh tank (allas), chain conveyor (ketjukuljetin) sekä anode bundle lifting device (anodihissi). (Kuva 1.)



KUVA 1. Anode collecting & handling system

Take off -device sijaitsee valupöydän ja altaan välissä. Anodinostin nostaa anodit valupöydältä vedellä täytettyyn altaaseen, josta anodit kulkevat ketjukuljettimella hissiin, joka nostaa anodit pois jäähdytysaltaasta.

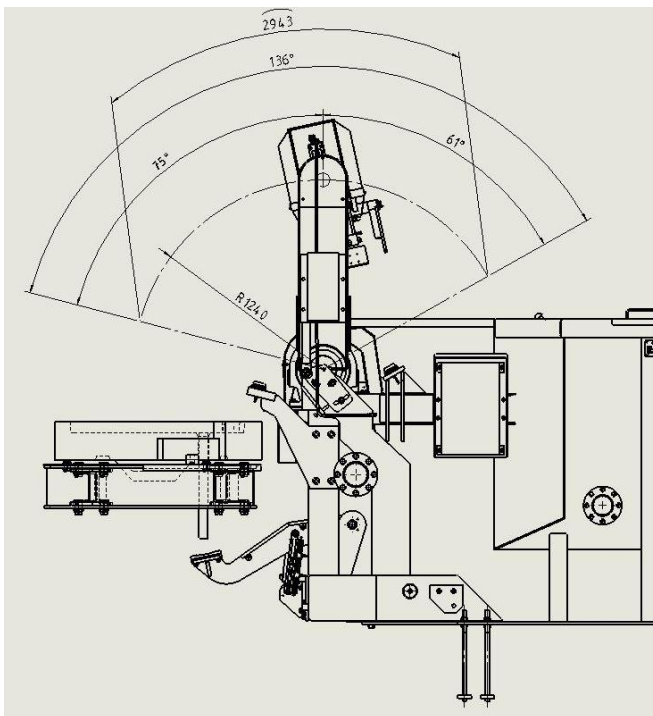
3.1 Take off -device

Take off -device on kiinnitetty front endin päälle. Front end on kiinnitetty jäähdytysaltaan etureunassa oleviin kiinnityspalkkeihin sekä altaan pohjarunkolevyyn. Molemmat kiinnitykset on toteutettu pulttiliitoksilla. Take off -deviceen päämitat ovat: 468 x 1617 x 2187. Take off -deviceen kuuluu servomoottori, vaihdelaatikko, vaihdelaatikon kiinnitysholkki, alarunko, nostovarsi, tahdistustanko sekä anodikoura. (Kuva 2.)



KUVA 2. Take off -device

Nykyinen liikekulma on 136° ja liikematka n. 2940 mm. Lattiatason ja take off -devicen kohtisuoran suhteen liikekulman jaottuu 75° valupöydän puolelle ja 61° Bosh tankin puolelle. (Kuva 3)



KUVA 3. Liikeradat

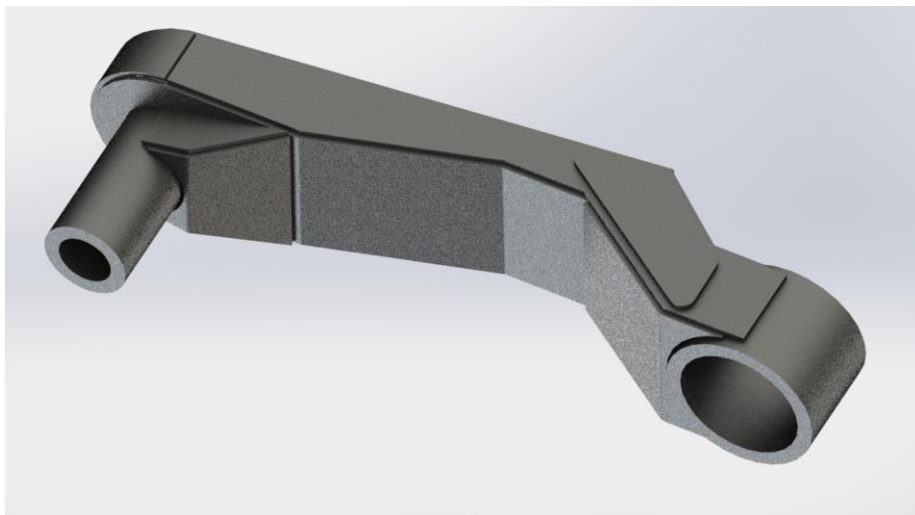
Take off -devicen liike on toteutettu sähkökäytöllä. Voimanlähteenä toimii 2 kW servomoottori. Vääntömomentti on muutettu alennusvaihteella, jonka välityssuhde on 756. Rakenteet on pääasiassa valmistettu s355 J2 -teräksestä ja liitokset toteutettu hitsiliitoksien. Nostovarsi on kiinnitetty vaihdelaatikon akselilta tulevaan holkkiin hitsaamalla molemmin puolin. Kiinnitysholkki on laakeroitu alarunkoon.

Nostovarren toiseen päähän on kiinnitetty anodikoura joka on tuettu anodikouran kiinnitystangosta laakerein nostovarren päässä olevaan putkiholkkiin, koska anodikouran kulma muuttuu liikkeen aikana. Anodikoura ajetaan valupöydän yläpuolelle hakemaan anodi. Anodikouran avaus -ja sulkumekanismi on toteutettu paineilmasylinterillä, joka on kiinnitetty anodikouraan vaakatasoon. Anodikouran korkeus on opinnäytetyöprosessissa vaikuttava tekijä.

Anodikouran kulma liikkeen aikana on määritelty tahdistustangolla. Tahdistustanko on laakeroitu anodikouran vaakaputkessa olevaan epäkeskolaippaan. Tahdistustangon toinen pää on laakeroitu front endiin. Tahdistustanko on suunniteltu olemaan koko ajan vetokuormituksessa.

3.2 Nostovarsi

Nostovarsi on valmistettu levy -ja putkiosista hitsiliitoksien. Nostovarren materiaali on pääosin s355 J2 -terästä. Nostovarren päämitat ovat: 1555 x 351 x 571 mm ja massa noin 180 kg. (Kuva 4.)



KUVA 4. Nostovarsi

Nostovarren päähän kiinnitettävän anodikouran massa on 210 kg ja anodin massa on 400 kg. Näin ollen anodikouran kiinnitystangon päähän kohdistuva maksimikuorma on 610 kg. Kuorma kohdistuu nostovarteeseen vääntönä anodikouran kiinnitystangosta. Anodikouran kiinnitystangon vääntöä aiheuttava pituus on noin 575 mm, ja tanko on tuettu kahdella laakerilla nostovarressa olevaan kiinnityspotkeen.

4 VÄSYTTÄVÄ KUORMITUS

Rakenteen väsymisellä tarkoitetaan ilmiötä, jossa kappaleeseen vaikuttava jännitys jää myötörajan alapuolelle, mutta ajan mittaan kappale kuitenkin murtuu. Rakenteen väsyminen ilmenee vain silloin, kun kappaleeseen vaikuttava rasitus on vaihtelevaa. Rasitusten jäädessä tietyn rajan alapuolelle kestää kappale kuitenkin ikuisesti. Rakenteiden väsymistä analysoitaessa joudutaan nykyäänkin useissa tilanteissa yksinkertaistamaan mallia malleja ja yhdistelemään menetelmiä. (Hietikko 2013, 159.)

Väsyttävä kuormitus voi olla vakioamplitudista tai muuttuva-amplitudista. Vakioamplitudisessa kuormituksessa jännitysvaihtelut ovat vakiot. Rakenteet, joihin kohdistuu vakioamplitudiset jännitteet, ovat yksinkertaisempia mitoitaa, kun taas muuttuva-amplitudisessa kuormituksessa jännityksen suunnan ja suuruuden muuttuessa joudutaan usein tekemään kompromisseja. (Ruukki 2011, 426 - 427.)

Kappaleen pinnanlaadulla ja olosuhteilla on suuri merkitys väsymislujuuteen. Väsymismurtumat alkavat tyypillisesti epäjatkuvuuskohdista, hitsisaumojen vierestä, lovista ja terävistä kulmista, joihin muodostuu jännityskeskittymiä. Syövyttävät olosuhteet heikentävät myös väsymislujuutta. (Koivisto ym. 2008, 26.)

Rakenteen väsymisvaurio voidaan havaita murtopinnassa olevista vuosirenkaiden näköisistä kiiltävistä urista. Rakenne murtuu hitaasti, kunnes murtuma on kasvanut tarpeeksi pitkälle rakenteeseen, eikä rakenteen jäljellä oleva pinta-ala jaksa enää kantaa kuormaa tarpeeksi. Tämän jälkeen lopullinen murtuminen tapahtuu nopeasti. (Pennala 1999, s. 11.) Väsymismurtuman ja staattisen jännityksen aiheuttamat vauriot eroavat

sitä, että väsymismurtumaan ei liity plastista muodonmuutosta. (Koivisto ym. 2008, 26.)

5 FEM-ANALYYSI

FEM eli finite element method on tietokoneella suoritettava laskentamenetelmä, jolla voidaan simuloida tilanteita lähes miltä tahansa insinööritieteiden alalta. Menetelmällä voidaan simuloida rakenteisiin kohdistuvia kuormien aiheuttamia jännityksiä, jännityksiä yhdistettynä lämpötilanvaikutukseen, lämpötilanjakautumisia, lommahduksia, värähtelymekaniikkaa, akustiikkaa, nesteiden dynamiikkaa ym. (Hietikko 2013, 169 - 170.)

Rakennettaessa laskentamalli voi kyseessä olla yksittäinen kappale tai 3D-malli kokoonpanosta. Laskettavalle kappaleelle ”verkotetaan” tietokoneohjelmalla, jossa kappaleeseen luodaan solmupisteet. Solmupistesiiirtymien avulla ohjelma laskee jännitykset kappaleesta. Kappaleelle tulee myös määrittää materiaali tai materiaalisuureet. (Hietikko 2013, 170 - 171.)

Nykyään yhä useammin kappaleet tuodaan CAD-ohjelmasta verkotettavaksi tai verkotetaan suoraan CAD-ohjelman omissa simulointiympäristöissä. Tietokoneiden käyttö onkin hyvin tehokas menetelmä, koska rakenteesta riippuen saattaisi vastaavanlaisten laskelmien tekeminen vaatia jopa satojen tuhansien yhtälöiden yhtälöryhmän ratkaisemista. (Hietikko 2013, 171 - 172.)

6 KINEMAATTISET TARKASTELUT

Työ aloitettiin mallintamalla Solid Works -ohjelmalla valmiista nostovarresta useita konfiguraatioita pidentämällä nostovarren osia skaalaamalla liikeratojen tarkastelua varten. Nostovarresta mallinnettiin konfiguraatioita pituuksille +50 mm, +100 mm, +150 mm, +200 mm ja +300 mm. Myös tahdistustangosta mallinnettiin jokaiselle eripituudelle nostovarrella kullekin pituudelle viisi eri konfiguraatiota, jotta anodikouran kulmaa pystyttiin tarkastelemaan liikkeen aikana sekä tutkimaan liikeratoja karkeasti.

Liikeratojen tarkastelu suoritettiin Solid Works -ohjelmalla pääkokoonpanon 3D-mallissa.

6.1 Asemointiin vaikuttavat tekijät

Koska kyseessä on kokonaisuus, jossa muutetaan vain yhtä komponenttia, on ilmeistä, että kokonaisuudesta löytyy tekijöitä, joihin nämä muutokset vaikuttavat ja tuovat myös mukanaan haasteita. Tässä työssä vaikuttavia tekijöitä ovat mm. turvallisuustekijät ja aikaisemmin suunnitellut koneen osat, kuten anodin nostopiste, anodikouran korkeus sekä anodin ja muotin geometria.

Turvallisuussyistä nostovarren reuna ei saa liikeratansa aikana laskeutua valumuotin yläpintaa alemmalle tasolle. Tällä pyritään estämään ajon aikaiset kolarit. Anodikouran korkeuden, anodin nostopisteen sekä nostovarren liikeratarajoitteen vuoksi voidaan valupöydän sijaintia muuttaa y-akselin suuntaan rajoitetusti nostovarren pituudesta huolimatta.

Valumuotissa olevan työntäpän sijainti määrittää anodin poistokulman muotista. Tämä puolestaan määrittää tietyt ehdot anodikouran kulmalle anodin nostovaiheessa. Nämä tekijät muodostavat rajoitteet valupöydän x-askelin suuntaiselle siirtämiselle.

6.2 Liikeratojen tarkastelut

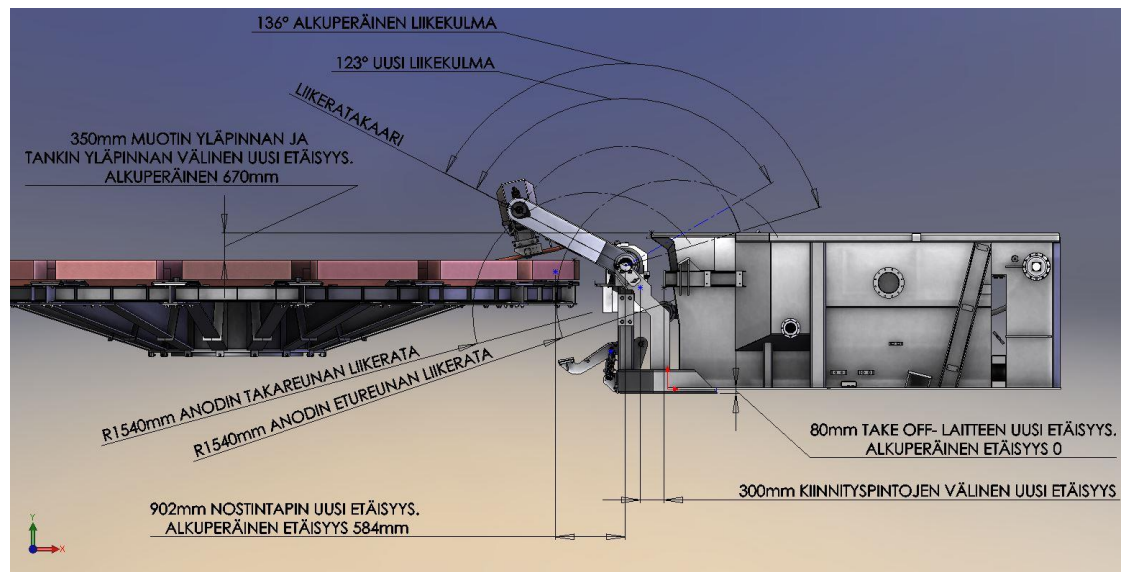
Liikeratojen tarkastelu aloitettiin asettamalla muokattu nostovarsi alkuperäisen nostovarren tilalle Anode collecting & handling system -pääkokoonpanoon, jossa muu koneympäristö oli jo valmiina 3D-muodossa. Liikeratojen tarkasteluun tarpeettomia komponentteja jätettiin tässä vaiheessa mallista pois, jotta 3D-mallin liikuttelu näytöllä toimisi paremmin. Nostovarresta ja tahdistustangosta tehtyjen konfiguraatioiden johdosta, kaikki liiketarkastelut pystyttiin suorittamaan samalla 3D-mallilla.

Laitteiden keskinäisiä etäisyyksiä aloitettiin optimoimaan asemoimalla bosh tank, valupöytä ja take off -device samaan tasoon z-akselin suhteen. Take off -device ja valupöytä asemoitiin distance mateilla x ja y-akselin suhteen, jotta laitteiden etäisyydet ovat helposti muokattavissa, mutta laitteet pysyvät kuitenkin paikallaan liikuteltävien komponenttien liikeratoja tarkasteltaessa.

Laitteiden etäisyydet asetettiin seuraaviin lähtöarvoihin: Front end/take off -kokoonpano bosh tankista 400 mm valupöydän suuntaan kiinnityspintojen suhteen. Valupöydän etureunan ja front end/take off -kokoonpanon välinen etäisyys kasvatettiin mittaan 400 mm. Muutosta alkuperäiseen sijaintiin on noin 200 mm. Valupöydän yläpinta nostettiin Bosh-tankin yläpinnan tasolle, joka on alkuperäistä sijaintia noin 500 mm ylempanä.

6.3 Uusi asemointi

Kun koneet oli sijoitettu uusille etäisyyksille, aloitettiin sijaintien hienosäätäminen eripituisille nostovarsille. Tarkastelujen jälkeen varren pituudeksi valittiin 1540 mm, joka on alkuperäistä nostovartta 300 mm pidempi. Tankin ja take off -devicen etäisyys kasvaa 300 mm sekä valupöydän ja take off -devicen etäisyys kasvaa 320 mm. Tankkia pudotetaan alaspäin valupöydän suhteen 320 mm. Liikekulma pienenee 13° . (Kuva 5.)



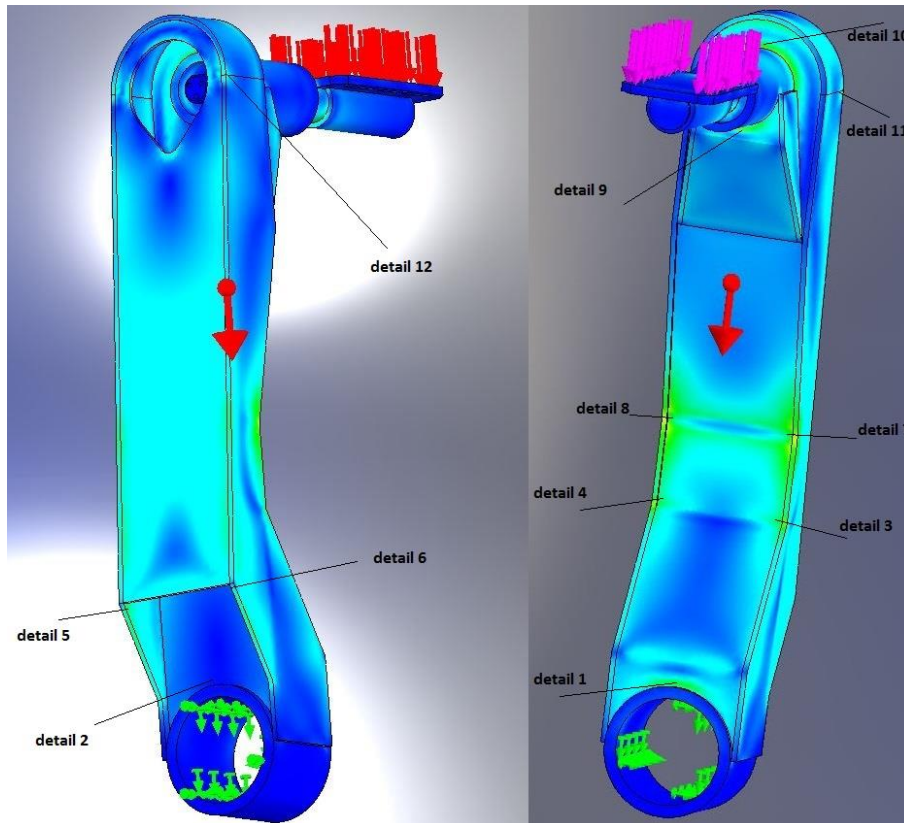
KUVA 5. Uudet sijainnit ja liikeradat

Kun laitteiden sijainnit ja liikekulma oli hienosäädetty, aloitettiin nostoprosessin nostotyön kokonaiseiston jaottelu liikematkan mukaisesti. Liikeaikojen selvittäminen tuli kyseeseen, koska anodin massasta aiheutuu erillinen kiihtyvyyden aiheuttama kuormitus. Liikematkan, liikeajan sekä liikenopeuden avulla saatiin selvitettyä kiihtyvyydet. Suunnitelman periaatekuva liikekulmien kulma-asemoista kiihdytyksissä liitteessä 1.

7 ALKUPERÄISEN RAKENTEEN ANALYSOINTI

Nostovarren uuden 3D-mallin luonnissa pyrittiin pitämään alkuperäinen geometria hyvin samana, jotta tulokset olisi vertailtavissa alkuperäisen geometrian ja mahdollisesti muokatun geometrian välillä. Koska tankin geometria määrittää nostovarren geometriaa, mallinnus aloitettiin nostovarren laipoista. Loput osat mallinnettiin laippojen geometriaa hyödyntäen. Anodikouran kiinnitysholkille sekä nostovarren kiinnitysholkille ei tehty muutoksia. Tässä vaiheessa nostovarren palkkirakenteen laipat suunnitellaan valmistettavaksi 10 mm paksusta teräksestä ja uumat 12 mm paksusta teräksestä

Kun nostovarren pituus oli päätetty, alkuperäisen geometrian mukaan pidennetylle nostovarrelle suoritettiin FEM-analyysit seitsemässä eri kulma-asennossa. Anodikouran ja anodin massa kohdistettiin anodikouran kiinnityslaippaan kuvan 6 osoittamalla tavalla. Solid works -malleihin rakennettiin nostovarren kulman muutos anodikouran kiinnityslaipan kulmaa muuttamalla. Analyysissä nostovarren kiinnityspisteiksi lukittiin alaholkin reunat, joista todellisuudessakin nostovarren kiinnitys tapahtuu. Rakenteen analyysissä käytettiin elementtityyppinä solid- elementtejä. Tuloksista tarkasteltiin suurimpien jännitysten sijainnit ja suuruudet. Tarkastelukohtien sijainnit on ilmaistu kuvassa. (Kuva 6.)

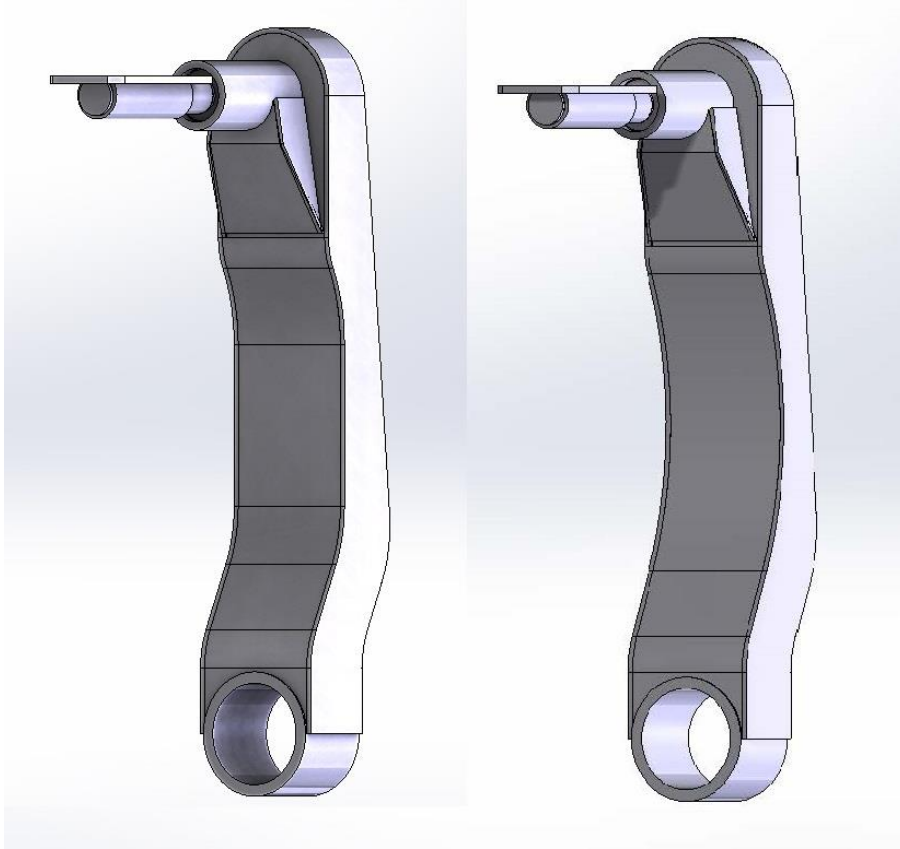


KUVA 6. Tarkastelukohtien sijainnit

Suurimmat jännitykset löytyivät taivutuksista, joissa säde oli pienin ja kulma jyrkin. Jännityskeskittymien perusteella mallista valittiin tarkastelukohtat, joita muokkaamalla jännitysvaihteluita pyrittiin pienentämään.

8 GEOMETRIAN OPTIMOINTI JA RAKENTEN ANALYSOINTI

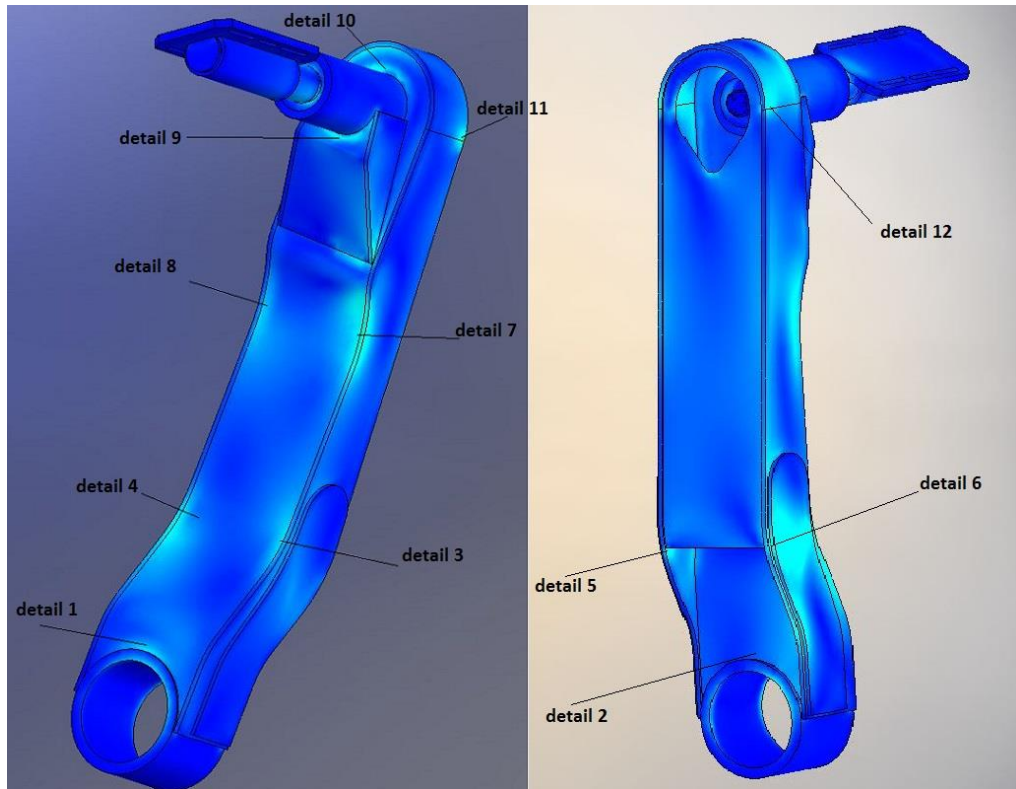
Nostovarren kokoonpanomallista luotiin kaksi muokattua geometriaa, joissa jännityskeskittymien jyrkät kulmat pyöristettiin. Toisessa mallissa kulmat pyöristettiin vain paikallisesti, ylä- ja alataitoksien kohdalta molemmin puolin nostovartta. Toisessa mallissa tehtiin kaari koko matkalle sisäpuolelle ja ulkopuolen pyöristykset paikallisesti. Molemmista malleista tehtiin FEM-analyysit seitsemässä eri kulma-asennossa, joiden pohjalta analysoitiin parempi rakenne jatkotoimenpiteisiin. Tuennat ja voimat kohdistettiin samalla tavalla, kuin analysoitaessa alkuperäistä geometriaa. Elementtityyppinä käytettiin solid -elementtejä (Kuva 7.)



KUVA 7. Vertailtavat nostovarret

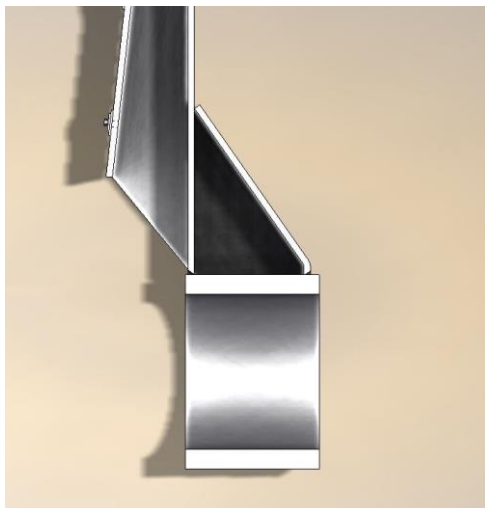
Nostovarsi, jonka geometriassa tankin puoleinen sivu oli koko matkalta kaareva, osoitettiin FEM-analyysissä muodostavan suuremmat paikalliset jännitykset kaaren keski-kohtaan. Tämä itsessään jo riitti toisen geometrian valintaan, koska väsyttävässä kuormituksessa juuri paikalliset jännityshuiput ovat tyypillisesti kohtia, joista särön kasvu alkaa. Lisäksi kappaleen vaikea valmistettavuus muodostui merkittäväksi tekijäksi ja kyseinen geometria hylättiin.

Jatkotarkasteluihin valittiin palkki, jonka geometriassa terävät kulmat oli pyöristetty paikallisesti. Kappaleelle suoritettiin FEM-analyysit, joista etsittiin jännityshuiput. Nostovarren kaarenmuotoisen päätylaipan liitoskohta sekä nostovarren alapäässä oleva avoin kohta, josta tahdistustanko tuodaan front endiin kiinni, kasasi ympärilleen muita kohtia reilusti suurempia jännityksiä. Kaarilaipan liitosta päätettiin olla muuttamatta ennen väsymislaskennan tuloksia. Tahdistustangon läpiviennin kohdalla olevan aukon sivuvahvikkeet jätettiin myös pois ennen väsymislaskentaa. Tarkastelukohtien sijainnit on ilmaistu kuvassa. (Kuva 8.)



KUVA 8. Tarkastelukohtien sijainnit

Nostovarressa olevan tankin puoleisen sivun geometrian poiketessa alkuperäisestä geometriasta jouduttiin muutoksia tekemään myös sisäpuolen uumana toimivaan osaan. Kun alkuperäisessä palkissa geometria oli suunniteltu siten, että palkin uuma kulki suoraan nostovarren kiinnitysholkkiin kiinni ja tankin puoleiseen sivuun vahvikekomponentti tehtiin erillisestä palasta, mitoitettiin uudessa nostovarressa uuma kulkemaan yhtenä kappaleena tankin puoleiseen sivuun ja sisäpuolen vahvikekomponentti erillisestä kappaleesta. (Kuva 9.)



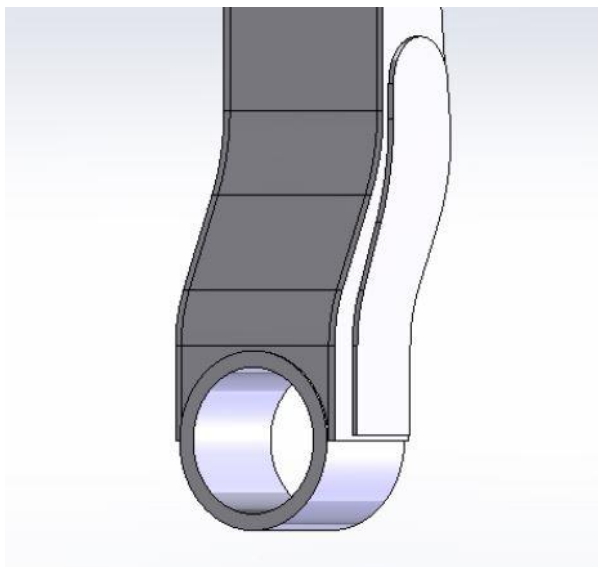
KUVA 9. Alaholkin tuennan alkuperäinen geometria

Sisäpuolen vahvikekomponentti mallinnettiin alun perin kulkemaan samaa linjaa uuman pisimmän sivun kanssa alapuolen kiinnitysholkkiin asti. Koska tämä geometria osoittautui FEM-analyysissä kasaavan jännityksiä, päätettiin vahvikkeen geometriaan muuttaa taivutus, jolla vahvike tuotiin lähemmäksi kiinnitysholkin ulkoreunaa. (Kuva 10.)



KUVA 10. Alaholkin tuennan uusi geometria

FEM-analyysin tuloksien myötä tahdistustangon läpiviennin molemmin puolin oleviin rakenteen sivulevyihin päätettiin laittaa vahvikekomponentit, kuten on myös alkuperäisessä nostovarressa. Uuden nostovarren geometrian muutoksen johdosta vahvikekomponentit piti myös muotoilla uudelle geometrialle. (Kuva 11.)

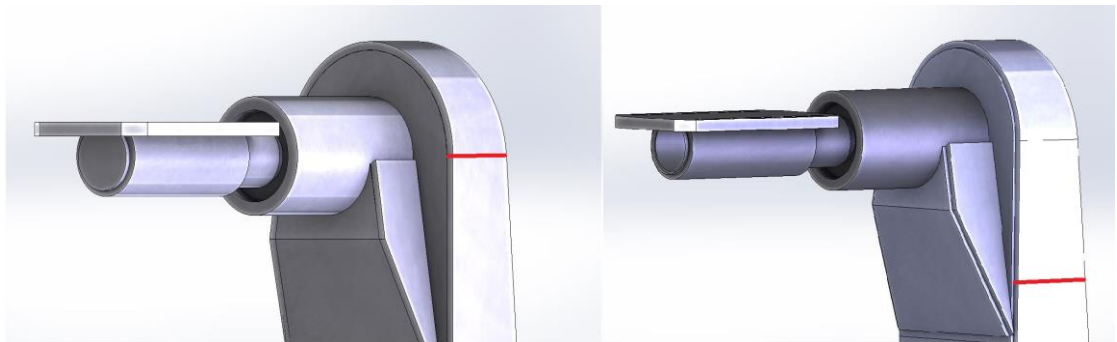


KUVA 11. Vahvikekomponentit

Ensimmäisestä FEM-analyysistä saaduista tuloksista selvitettiin rakenteen käyttöikä sekä rakenteen heikoimmat kohdat. 12 mm paksusta levystä valmistettu palkki ei täyttänyt kestoikävaatimusta kahden detaljin osalta. Detaljeihin 11 ja 12 kohdistuvat jännitysvaihtelut muodostuvat liian suuriksi poikittaishitsille, jonka väsymislukka, $\Delta\sigma = 56 \text{ N/mm}^2$.

Ongelmaa aloitettiin ratkaisemaan siirtämällä nostovarren takalevyä hieman syvemmälle nostovarren sisälle, jolla pyrittiin saamaan levyosia kauemmaksi maksimijännitysvaihteluista. Tällöin myös hitseihin kohdistuisi pienempi jännitys, koska maksimijännitykset kohdistuvat levyosien reunoihin. Takalevy sijaitsi alun perin nostovarren takareunan tasalla ja muutoksen jälkeen sijainniksi asemoitui 12 mm palkkirakenteen sisäpuolelle uumaksi.

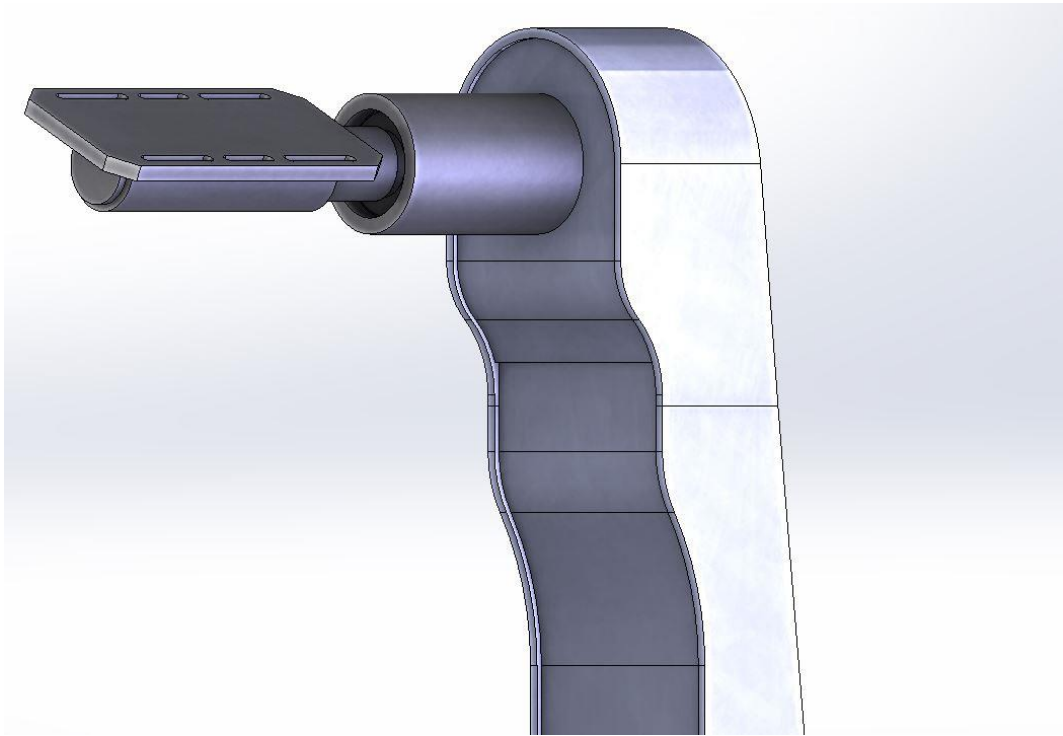
Takalevyn sijainnin muutos pienensi jännitysvaihteluita, mutta ei itsessään riittänyt tuomaan rakenteen poikittaishitseille riittävää käyttöikää. Alkuperäisessä nostovarressa poikittaishitsi sijaitsee anodikouran kiinnityspotken symmetria-akselilla, johon kohdistuu suurimmat jännitysvaihtelut. Poikittaishitsi päätettiin siirtää pois kiinnityspotken symmetrialinjalta. Hitsiä siirrettiin alaspäin pidentämällä kaariraudan sivuja 240 mm. Tämän jälkeen rakenteelle suoritettiin FEM-analyysit. Hitsausseaman sijainnin muutos merkitty kuvaan punaisella. (Kuva 12.)



KUVA 12. Kaariraudan rakennemuutokset vertailussa

FEM-analyysin tuloksista havaittiin jännityskeskittymien muodostuvan edelleen putken symmetrialinjalle ja poikittaishitsin kohdalla esiintyvät jännitysvaihtelut eivät enää muodosta laitteen käyttöään kannalta merkittäviä vaihteluita. Symmetrialinjalle jäävän poikittaishitsin väsymislukon ollessa 100 N/mm^2 ei myöskään kyseisen hitsin jännitysvaihtelut nouse liian suureksi.

Edellä mainitun kaarirakenteen muutoksen myötä havaittiin anodikouran kiinnityspotken jäykisteen muutosmahdollisuus, jolla voitaisiin vähentää nostovarten tarvittavien komponenttien lukumäärää. Vaikka rakenne täytti jo vaaditun kestoiän, päätettiin kaariraudan korkeutta vielä kasvattaa ja muuttaa rakennetta siten, että anodikouran kiinnityspotki kiinnitettäisiin kahteen levyosaan ympärähitsaamalla. Tämä toisi muutoksen alkuperäiseen geometriaan nähden siten, että anodikouran kiinnityspotki olisi tuettu kahdella levyrakenteelle myös yläpuolelta, aikaisemman yhden tuennan sijaan. Komponenttien lukumäärä myös vähenisi neljästä komponentista kahteen komponenttiin. Lisäksi nostovarren yläpäästä voitaisiin madaltaa tällä rakennemuutoksella. (Kuva 13.)



KUVA 13. Yläkaaren geometria -ja rakennemuutokset

Muutetulle geometrialle suoritettiin FEM-analyysi ja tuloksien myötä tehtiin väsymislaskenta. Rakenne täytti kestoikävaatimuksen 20 vuotta, mutta tulokset alkuperäiseen tuentaan nähden eivät parantuneet. Rakenteen yläpään madaltamisen johdosta vääntövarsi kuormittavaan kohtaan on pidempi. Voidaan olettaa tämän olevan syy siihen, että kestoikä ei pidentynyt. Laskennan Excel -taulukot liitteessä 3.

9 VÄSYMISLASKENTA JA TULOKSET

Dynaamisesti kuormitettujen rakenteiden suunnittelussa rakenteen kestoikä määritetään maksimijännitysvaihteluiden perusteella. Hitsattujen rakennekohtien kuormituskertojen lukumäärällinen kesto määritetään kaavalla:

$$\left(\frac{\Delta\sigma c}{\Delta\sigma_{\max}}\right)^3 * 2 * 10^6 \quad (1)$$

Jossa:

$\Delta\sigma c$ on standardin määrittämä väsymisluokka kullekin liitostyypille, $\Delta\sigma_{\max}$ on maksimijännitysvaihtelut ja $2 * 10^6$ on kaavan vakio.

Solid Works -mallien FEM-analyysien tulokset tuotiin Excel-taulukkoon, jolla suoritettiin rakenteen kestoikälaskelma. Kunkin detaljin kohdalta kerättiin jännityksien lueumat seitsemässä eri kulma-asennossa. Opinnäytetyössä käytetystä analysointimenetelmästä on esitetty esimerkki rakenteen heikoimman kohdan, detaljin 9 vasemman puolen jännitysvaihtelut. Täydet Excel-taulukot lisätty liitteisiin. (Kuva 14.)

DETAIL 9 VASEN								VÄSYMISLUOKKA						
ANGLE	-75	-43	-25	0	25	43	58	$\Delta\sigma c$	36					
Nmm	19	19	19	15	12	11	9		KESTOIKÄ SYKLIÄ		t1 (syklimäärä vuodessa)			
$\Delta\sigma_{\max}$	10,2							Ndet1	8,79E+07	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	33	VUOTTA

KUVA 14. Jännitysvaihtelut detaili 9 vasen

Taulukko tehtiin laskemaan maksimijännitysvaihtelut kunkin kulma-aseman jännityksien väliltä, laskemaan jännitysvaihteluiden perusteella rakenteen kestoikä sykleinä ja vertaamaan syklikestoikää laitteelle halutun kokonaiskestoian aikana kertyvän syklimäärän suhteen. Tästä määrittyi kestoikä vuosina.

Väsymistarkasteluissa tulee myös suorittaa tietyn vaurionsietoperiaatteen mukaiset luotettavuustarkastelut, joissa maksimijännitysvaihteluille asetetaan tietty ainesosavarmuusluku vaurionseurauksista riippuen. Mitoitusperiaatteet taulukon 1 mukaisesti.

TAULUKKO 1. Ainesosavarmuusluvut (SFS EN 1993-1-9)

Aineosavarmuuslukujen suositeltavat arvot väsytyksmitoituksessa

Luotettavuustarkastelu	Vaurion seuraukset	
	Pienet	Suuret
Vaurionsietoperiaate	1,00	1,15
Varman kestämisen periaate	1,15	1,35

Standardin EN-1993-1-10 vaurionsietoperiaatteen mukaan mitoitettaessa varmuusluku käytetään kerrointa 1, mikäli vaurion seuraukset ovat pienet. Mikäli vaurion seuraukset ovat suuret, käytetään kerrointa 1.15. Vaurionsietoperiaatteen mukaan mitoitettaessa tulee huomioida, että rakenteelle muodostuu pakolliset määräaikaistarkastukset, jossa tulee löytää ja korjata mahdolliset säröt ennen murtumaa.

Varman kestämisen periaatteen mukaan mitoitettaessa pienille vaurionseurauksille käytetään kerrointa 1.15 ja suurille vaurionseurauksille kerrointa 1.35. Varman kestämisen periaatetta sovelletaan tilanteessa, jossa yhdessä rakenneosassa muodostuneet paikalliset säröt voivat johtaa nopeasti rakenneosan tai rakenteen murtumiseen (SFS EN 1993-1-9.)

Väsymislaskennassa huomioitiin nopeuden muutoksesta aiheutuva keskeiskiihtyvyys ja tangentinsuuntainen kiihtyvyys. Kiihtyvyydet huomioitiin jokaisessa sijainnin muutoksessa erillisessä FEM-analyysissä molempiin suuntiin ilman varsinaista kuormaa ja g:tä. Analyysit kiihtyvyyksien ja kuormien suhteen erotettiin kahteen eri osaan, jotta FEM-analyysin tulos ei vääristyisi, kun nostovarsi alkaa jarruttamaan pysähdyspaikkaa varten ja kiihtyvyyden suunta muuttuu vastakkaiseksi. Opinnäytetyössä tehdyissä laskelmissa käytettiin varmuuskerrointa 1. Taulukot laskelmista liitteessä 2.

10 RAKENTEEN KÄYTTÖIKÄ KUORMAA KASVATETTAESSA

Opinnäytetyöprossin aikana yrityksen edustaja ilmaisi toiveen saada tietää nostovarren käyttöikä, mikäli kuormaa kasvatetaan ja mitä kohtia nostovarressa tulisi silloin vahvistaa, mikäli käyttöikä ei täyty. Tämä osio ei ota kantaa tarvittaviin rakennemuutoksiin, vaan ainoastaan tietoon siitä, mitkä kohdat rakenteessa ovat kriittisimmät suuremmalla kuormituksella.

Rakenteen käyttöiän voidaan todeta määrittävän heikoimman detaljin mukaan. Rakenteen heikoin kohta löytyy detaljin 9 vasemmalta puolelta, eli anodikouran kiinnityspotken vierestä vahvikekomponentin pinnalta, jossa käyttöikä on 33 vuotta. Seuraavaksi heikoin kohta rakenteesta löytyy detaljin 9 keskikohdasta, jossa käyttöikä on 49 vuotta. Ylipäättään rakenteen heikoimmat kohdat voidaan todeta löytyvän detaljien 9 ja 10 alueilta pois lukien detaljin 10 keskikohta. Näitä kohtia rakenteessa siis tulee vahvistaa, mikäli rakenteen kestoikää kuormitus syklien lukumäärän suhteen halutaan kasvattaa.

Koska kyseessä on lineaarinen rakenne, käyttöiän muutos kuormaa kasvatettaessa selvitetiin laskennallisesti lisäämällä jännityksiä kertomalla maksimijännitysvaihtelu alkuperäisen ja uuden kuorman osamäärällä. Toisin sanoen mikäli kuormaa kasvatetaan 100 kg:lla, toimii maksimijännitysvaihteluiden kertoimena

$$500 \text{ kg}/400 \text{ kg} = 1,25$$

Käyttöikä vuosina laskettiin varmuuskertoimella 1 ja uusina kuormina käytettiin arvoja 500 kg ja 600 kg. Laskelmien perusteella rakenteen maksimikuormaksi käyttöiälle 20 vuotta määrittäyty 475 kg. Kasvattamalla kuormaa 500 kg käyttöikäksi määrittäyty 17 vuotta ja kuormalla 600 kg käyttöikäksi jää vielä 10 vuotta. Kuorman 600 kg tapauksessa rakenteessa on 2 detaljikohtaa, jotka eivät täytä kestoikävaatimusta. Taulukot laskelmista liitteessä 2.

11 VALMISTUSKUVAT

Opinnäytetyöprosessin alussa toimeksiantajan kanssa sovittiin, että nostovarresta toimitetaan valmistuskuvat sekä hitsauskuvat. Valmiskuvat tehtiin Solid Works -ohjelmalla 3D-mallien pohjalta. Hitsausaumat mitoitetaan ainevahvuuden mukaan, koska kuormittavana menetelmänä tarkasteltiin väsyttävä kuormitus. Valmistuskuvat toimitettiin suoraan toimeksiantajalle.

12 POHDINTA

Mielestäni opinnäytetyössä päästiin hyvin tavoitteisiin. Rakenteelle suunniteltiin yksittäisten osien muutoksia, joilla nostovarsi saatiin kestäväksi halutulle käyttöiälle, momenttivarren pidennettyä ja kuormitussyklimäärän ja -nopeuden kasvettua. Liikekulmaa saatiin pienennettyä sekä tankin, Front endin ja altaan keskinäisiä etäisyyksiä kasvatettua. Opinnäytetyön aikana sivuprojektina keksittyjä kehitysideoita on listattuna seuraavissa kappaleissa.

Nivelvarsimalli servomootorilla. Opinnäytetyön aikana mallinnettiin nivelvarrellinen malli nostovarresta. Nostovarren liike tulisi toteuttaa kahdella servomootorilla, joista toinen säätelisi nostovarren osaa 2 ja toinen anodikouran kulmaa. Nivelvarrellisella mallilla kulmien muutokset ainoastaan tahdistustankoa käyttämällä ei olisi mahdollista. Lisäksi servomootoreilla toteutetulla liikkeellä pystyttäisiin nostovarren liikettä säätämään eri variaatioille. Kyseisen nivelvarrellisen nostovarren periaatemalli on osoitettu liitteessä 11.

Myös alkuperäisen geometrian mukaisella nostovarrella anodikouran kulman muutoksella liikkeen aikana pystyttäisiin saamaan etäisyyttä vielä suuremmaksi. Nämä muutokset voisi toteuttaa servomootorilla ja sähkösylinterillä. Anodikouran syvyyttä kasvattamalla voitaisiin saada laitteiden keskinäisiä etäisyyksiä suuremmiksi, liikekulmaa pienemmäksi sekä liikematkaa lyhemmäksi.

Push-up unit voitaisiin mahdollisesti korvata kokonaan sijoittamalla ramppi valupöydän alapuolelle. Näin ollen voitaisiin anodin korotus muotista suorittaa valupöydän pyörimisliikkeellä. Työnnintappiin asennettaisiin rengas alapuolelle ja valupöydän alle tehtäisiin ramppi, jota pitkin ajamalla anodin nosto tapahtuisi.

Opinnäytetyön osiossa ”geometrian optimointi” käsitelty yläkaaren geometria -ja rakennemuutokset -mukaisen mallin kehittäminen voisi myös tuoda palkkiin lisää kestoikää. Palkin yläpään korkeutta voisi hyvinkin kasvattaa koska opinnäytetyössä käsitellyn muokatun palkin kyseisen kohdan korkeus on nykyistä palkkia 68 mm matalampi. Kyseisessä kohdassa on rakenteen pienin kestoikä.

LÄHTEET

Hietikko, Esa 2013. Palkki, Lujuuslaskennan perusteet. Helsinki: BoD – Books on Demand.

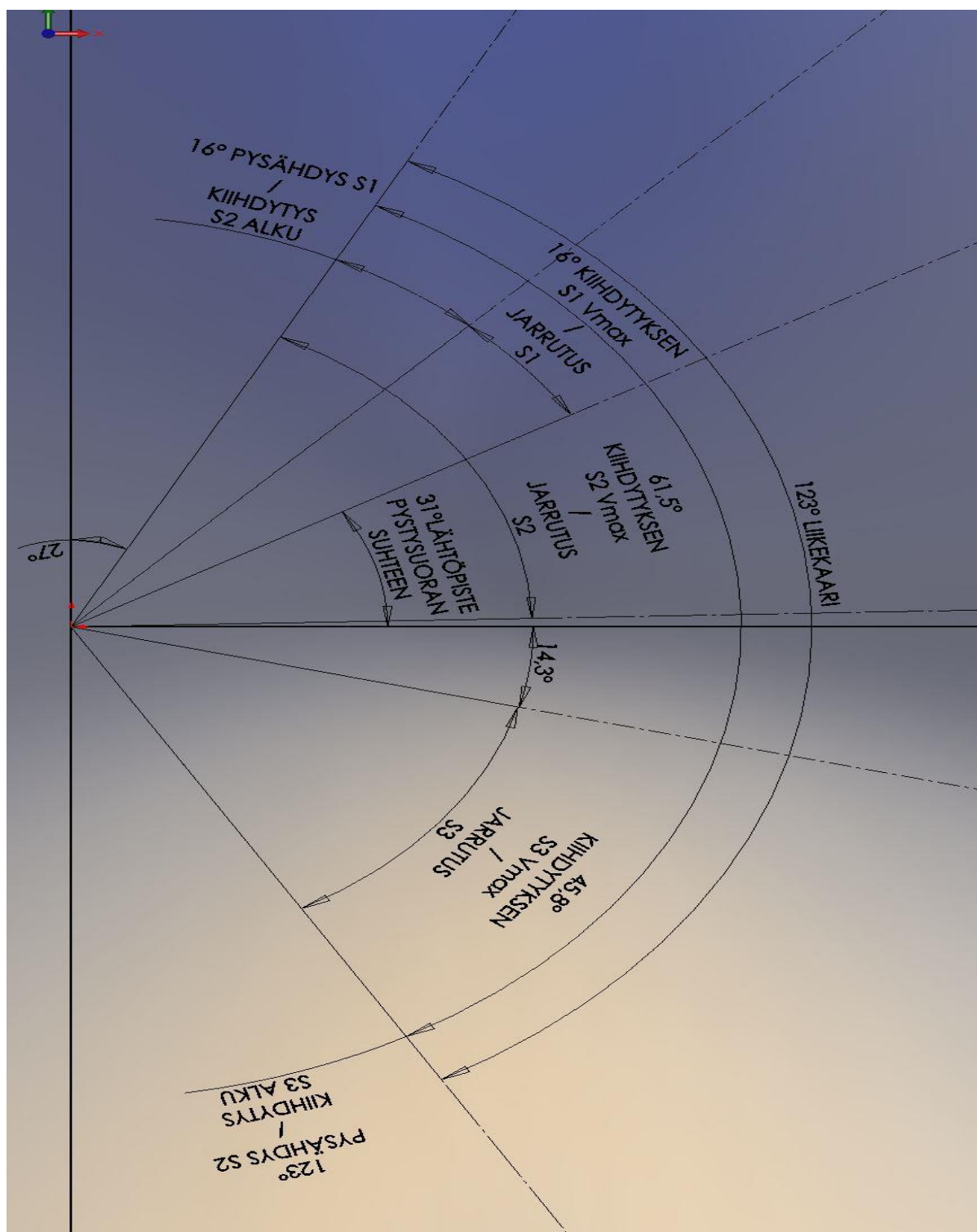
Koivisto ym. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Prima Oy

Pennala, Erkki 1999. Lujuusopin perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy

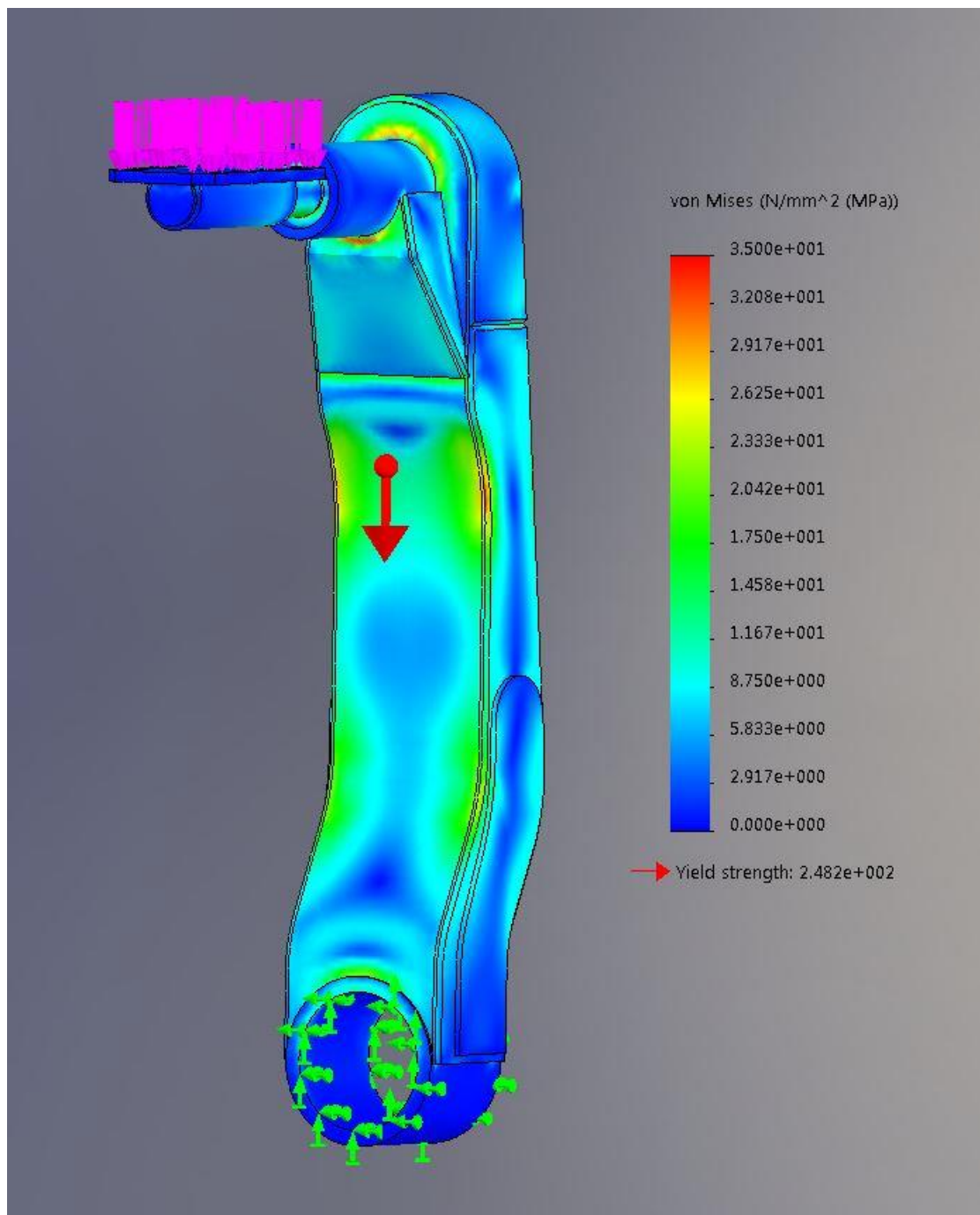
Ruukki 2011. Hitsatut profiilit. PDF-dokumentti. http://software.ruukki.com/Hand-books+and+Guides/Ruukki-Hitsatut-Profiilit-Kasikirja-2010_PDF-versio.pdf. Päivitetty 8.2.2011. Luettu 1.9.2015

Outotec 2015. Copper anode casting. Www –dokumentti. <http://www.outotec.com/en/Products--services/Non-ferrous-metals-processing/Copper/Anode-casting/>. Päivitetty 21.9.2015. Luettu 22.9.2015

SFS EN 1993-1-9. EUROCODE 3: TERÄSRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. OSA 1-9: VÄSYMINEN. Helsinki: Suomen Standardoimisliitto SFS. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä



Jännitysjaakauman esimerkkikuva



LIITE 3(1) FEM -analyysin tulokset

JÄNNITYKSET Uusi geometria. 400kg anodi										t1 (syklimäärä vuodessa)					
DETAIL 1										VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	80						
N/mm	30	30	28	29	28	28	26								
Δσmax		3,8						Ndet	1,87E+10	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	7101	VUOTTA	
DETAIL 2															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	80						
N/mm	9	11	11	6	6	6	6								
Δσmax		5,9						Ndet	4,99E+09	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	1897	VUOTTA	
DETAIL 3															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	100						
N/mm	22	23	24	24	22	21	20								
Δσmax		3,6						Ndet	4,29E+10	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	16312	VUOTTA	
DETAIL 4															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	100						
N/mm	20	21	23	24	23	23	22								
Δσmax		3,4						Ndet	5,09E+10	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	19363	VUOTTA	
DETAIL 5															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	100						
N/mm	18	21	19	18	16	17	15								
Δσmax		5,9						Ndet	9,74E+09	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	3706	VUOTTA	
DETAIL 6															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	100						
N/mm	19	19	18	17	17	19	19								
Δσmax		2,1						Ndet	2,16E+11	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	82176	VUOTTA	
DETAIL 7															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	100						
N/mm	17	18	22	24	27	27	26								
Δσmax		10,1						Ndet	1,94E+09	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	739	VUOTTA	
DETAIL 8															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	100						
N/mm	25	30	30	29	22	19	17								
Δσmax		13,3						Ndet	8,50E+08	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	323	VUOTTA	
DETAIL 9															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	36						
N/mm	23	17	28	30	28	26	22								
Δσmax		19						Ndet	4,25E+07	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	16	VUOTTA	EI TÄYTTÄ VAATIMUKSIA
DETAIL 9 VASEN															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	36						
N/mm	18	20	18	16	12	12	10								
Δσmax		10,1						Ndet	9,06E+07	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	34	VUOTTA	
DETAIL 9 OIKEA															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	36						
N/mm	13	13	14	16	16	15	14								
Δσmax		5,6						Ndet	5,31E+08	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	202	VUOTTA	
DETAIL 10 VASEN															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	36						
N/mm	22	11	16	15	28	26	20								
Δσmax		16,5						Ndet	2,08E+07	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	8	VUOTTA	EI TÄYTTÄ VAATIMUKSIA
DETAIL 10 OIKEA															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	36						
N/mm	25	20	12	15	14	9	10								
Δσmax		18,6						Ndet	1,45E+07	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	6	VUOTTA	EI TÄYTTÄ VAATIMUKSIA
DETAIL 10															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	36						
N/mm	6	8	11	11	9	8	5								
Δσmax		6,4						Ndet	3,56E+08	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	135	VUOTTA	EI TÄYTTÄ VAATIMUKSIA
DETAIL 11															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	56						
N/mm	24	16	8	11	26	30	30								
Δσmax		26,2						Ndet	1,95E+07	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	7	VUOTTA	EI TÄYTTÄ VAATIMUKSIA
DETAIL 12															
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Aoc	56						
N/mm	34	31	23	11	8	16	16								
Δσmax		25,8						Ndet	2,05E+07	SVKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	8	VUOTTA	EI TÄYTTÄ VAATIMUKSIA

LIITE 3(2) FEM -analyysin tulokset

JÄNNITYKSET Uusi geometria. Vahvistettu. 400kg anodi											t1 (syklimäärä vuodessa)					
DETAIL 1											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		80						
N/mm	24	24	23	23	21	23	22			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		3,3						Ndet		2,85E+10	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	10843	VUOTTA	
DETAIL 2											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		80						
N/mm	9	11	10	6	7	7	8			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		4,9						Ndet		8,70E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	3312	VUOTTA	
DETAIL 3											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		100						
N/mm	14	17	17	19	19	17	15			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		5,2						Ndet		1,34E+10	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	5112	VUOTTA	
DETAIL 4											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		100						
N/mm	21	16	16	19	20	16	19			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		5,5						Ndet		1,20E+10	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	4574	VUOTTA	
DETAIL 5											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		100						
N/mm	17	17	16	17	26	28	25			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		11,6						Ndet		1,22E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	463	VUOTTA	
DETAIL 6											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		100						
N/mm	28	29	26	17	13	20	18			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		15,7						Ndet		5,17E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	197	VUOTTA	
DETAIL 7											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		100						
N/mm	18	19	20	24	25	26	21			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		8,4						Ndet		3,37E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	1284	VUOTTA	
DETAIL 8											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		100						
N/mm	24	22	22	24	20	18	13			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		10,8						Ndet		1,59E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	604	VUOTTA	
DETAIL 9											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		36						
N/mm	24	26	28	29	28	26	20			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		9						Ndet		1,28E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	49	VUOTTA	
DETAIL 9 VASEN											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		36						
N/mm	19	19	19	15	12	11	9			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		10,2						Ndet		8,79E+07	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	33	VUOTTA	
DETAIL 9 OIKEA											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		36						
N/mm	13	12	13	15	15	18	15			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		6,6						Ndet		3,25E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	124	VUOTTA	
DETAIL 10 VASEN											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		36						
N/mm	10	12	13	15	14	16	11			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		6,4						Ndet		3,56E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	135	VUOTTA	
DETAIL 10 OIKEA											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		36						
N/mm	16	16	15	10	12	9	7			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		8,9						Ndet		1,32E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	50	VUOTTA	
DETAIL 10											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		36						
N/mm	9	10	9	6	10	8	7			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		4,2						Ndet		1,26E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	479	VUOTTA	
DETAIL 11											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		56						
N/mm	33	30	15	10	29	31	21			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		22,9						Ndet		2,92E+07	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	11	VUOTTA	EI TÄYTÄ VAATIMUKSIA
DETAIL 12											VÄSYMISLUOKKA					
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δoc		56						
N/mm	21	40	29	11	16	22	29			KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δmax		29,17						Ndet		1,42E+07	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	5	VUOTTA	EI TÄYTÄ VAATIMUKSIA

LIITE 3(3) FEM -analyysin tulokset

JÄNNITYKSET. Uusi geometria. Vahvistettu. Yläkaaren geometriamuutokset. 400kg anodi

t1 (syklimäärä
vuodessa)

DETAIL	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δσc	VÄSYMISLUOKKA	KESTOIKÄ SYKLIÄ	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ		VUOTTA
DETAIL 1									80						
N/mm	24	24	23	23	21	23	22		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		3,3						Ndet	2,85E+10					10843	
DETAIL 2									80						
N/mm	9	11	10	6	7	7	8		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		4,9						Ndet	8,70E+09					3312	
DETAIL 3									100						
N/mm	14	17	17	19	19	17	15		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		5,3						Ndet	1,34E+10					5112	
DETAIL 4									100						
N/mm	21	16	16	19	20	16	19		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		5,5						Ndet	1,20E+10					4574	
DETAIL 5									100						
N/mm	17	17	16	17	26	28	25		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		11,8						Ndet	1,22E+09					463	
DETAIL 6									100						
N/mm	28	29	26	17	13	20	18		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		15,7						Ndet	5,17E+08					197	
DETAIL 7									100						
N/mm	18	19	20	24	25	26	21		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		8,4						Ndet	3,37E+09					1284	
DETAIL 8									100						
N/mm	24	22	22	24	20	18	13		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		10,8						Ndet	1,59E+09					604	
DETAIL 9									36						
N/mm	24	26	28	29	28	26	20		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		9						Ndet	1,28E+08					49	
DETAIL 9 VASEN									36						
N/mm	19	19	19	15	12	11	9		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		10,2						Ndet	8,79E+07					33	
DETAIL 9 OIKEA									36						
N/mm	13	12	13	15	18	18	15		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		6,6						Ndet	3,25E+08					124	
DETAIL 10 VASEN									36						
N/mm	10	12	13	15	14	16	11		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		6,4						Ndet	3,56E+08					135	
DETAIL 10 OIKEA									36						
N/mm	16	16	15	10	12	9	7		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		8,9						Ndet	1,32E+08					50	
DETAIL 10									36						
N/mm	9	10	9	6	10	8	7		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		4,2						Ndet	1,26E+09					479	
DETAILIKOHDAT MUUTETTU HITSISAUMOJEN KOHDALLE															
DETAIL 11									56						
N/mm	8	8	10	10	16	14	12		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		7,69						Ndet	7,72E+08					294	
DETAILIKOHDAT MUUTETTU HITSISAUMOJEN KOHDALLE															
DETAIL 12									56						
N/mm	14	16	15	11	12	9	8		KESTOIKÄ SYKLIÄ						
Δσmax		7,99						Ndet	6,89E+08					262	

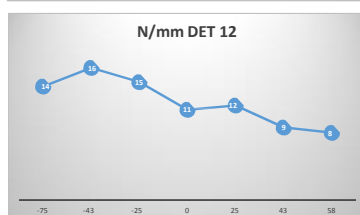
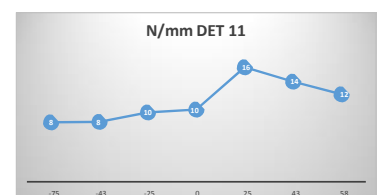
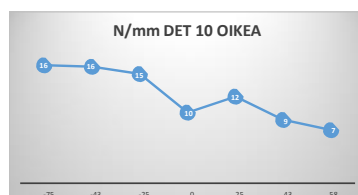
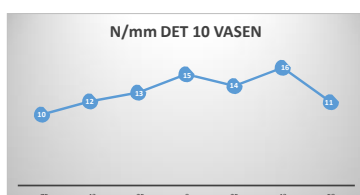
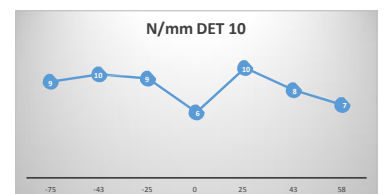
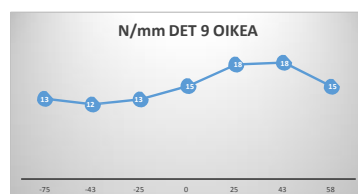
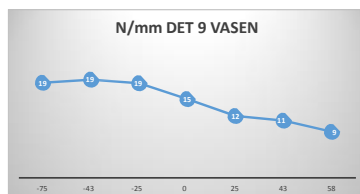
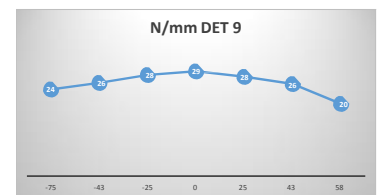
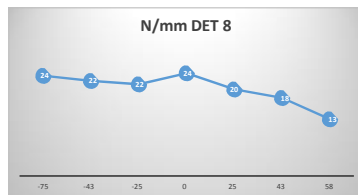
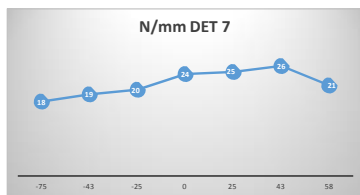
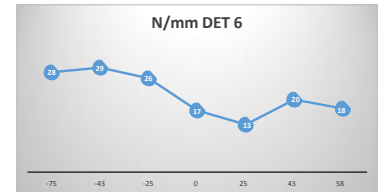
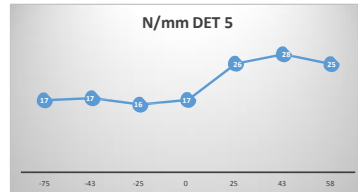
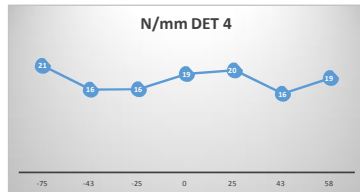
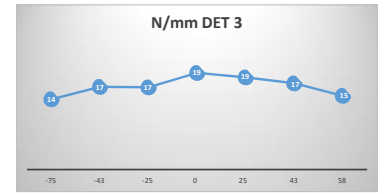
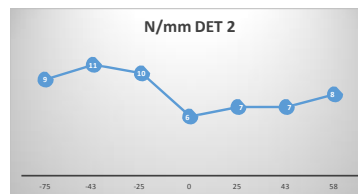
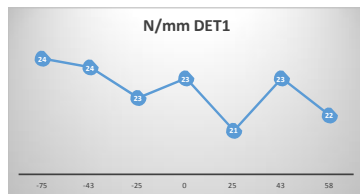
LIITE 3(4) FEM -analyysin tulokset

DETALJIKOHTAISET JÄNNITYSVAIHTELUT KAAVIOINA

TAULUKKO: JÄNNITYKSET. Uusi geometria. Vahvistettu. Yläkaaren geometriamuutokset. 400kg anodi

x-akselilla kulma-asema

y-akselilla jännitys

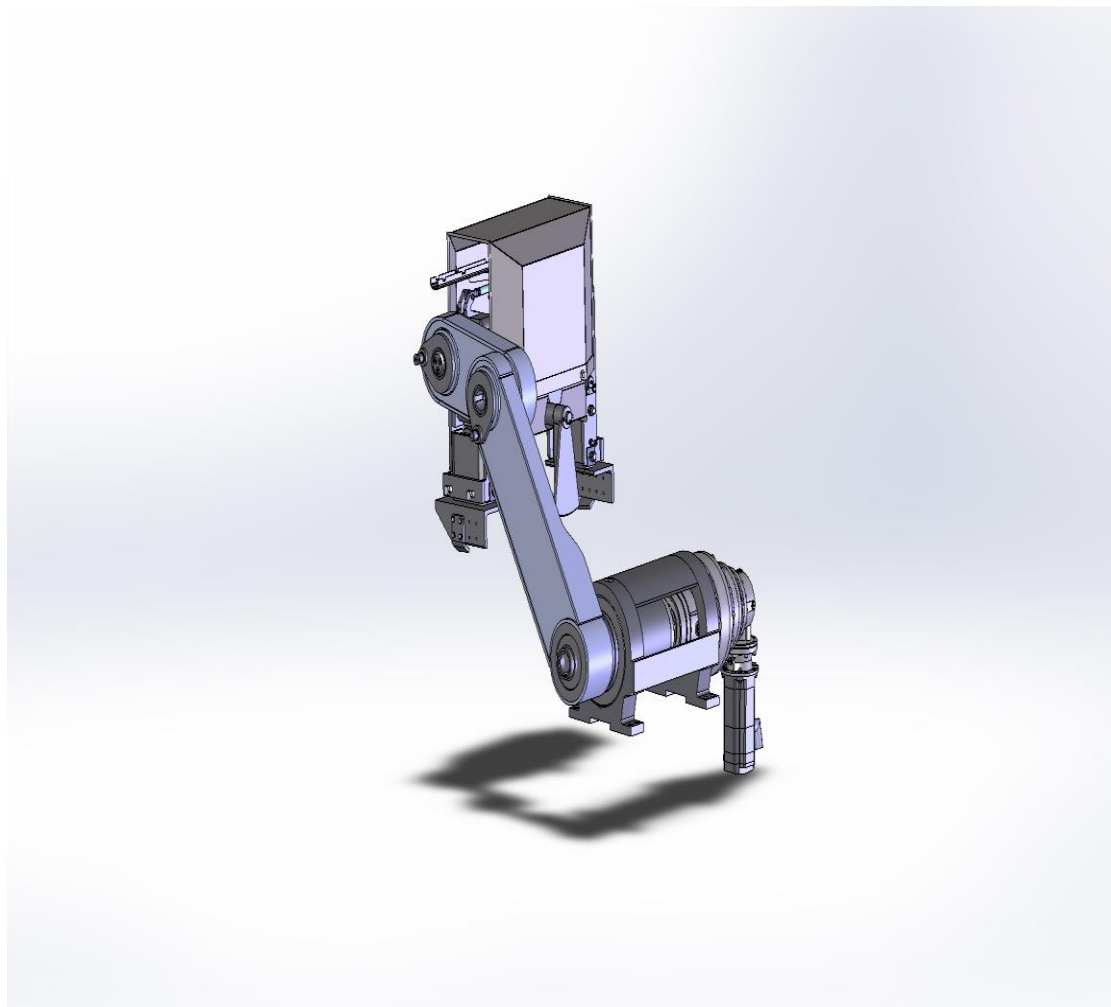


LIITE 3(5) FEM -analyysin tulokset

JÄNNITYKSET. Uusi geometria. Vahvistettu. Yläkaaren geometria ja rakennemuutokset. 400kg anodi

DETAIL 1										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		80									
N/mm	24	24	23	23	21	23	22			KESTOIKÄ SYKLIÄ	t1 (syklimäärä vuodessa)								
Δomax		3,3						Ndet		2,85E+10	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	10843	VUOTTA				
DETAIL 2										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		80									
N/mm	9	11	10	6	7	7	8			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		4,9						Ndet		8,70E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	3312	VUOTTA				
DETAIL 3										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		100									
N/mm	14	17	17	19	19	17	15			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		5,3						Ndet		1,34E+10	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	5112	VUOTTA				
DETAIL 4										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		100									
N/mm	21	16	16	19	20	16	19			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		5,5						Ndet		1,20E+10	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	4574	VUOTTA				
DETAIL 5										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		100									
N/mm	17	17	16	17	26	28	25			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		11,8						Ndet		1,22E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	463	VUOTTA				
DETAIL 6										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		100									
N/mm	28	29	26	17	13	20	18			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		15,7						Ndet		5,17E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	197	VUOTTA				
DETAIL 7										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		100									
N/mm	18	19	20	24	25	26	21			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		8,4						Ndet		3,37E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	1284	VUOTTA				
DETAIL 8										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		100									
N/mm	24	22	22	24	20	18	13			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		10,8						Ndet		1,59E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	604	VUOTTA				
DETAIL 9										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		36									
N/mm	19	23	27	26	27	24	17			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		10,12						Ndet		9,00E+07	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	34	VUOTTA				
DETAIL 9 VASEN										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		36									
N/mm	22	23	26	15	14	16	16			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		12,034						Ndet		5,35E+07	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	20	VUOTTA				
DETAIL 9 OIKEA										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		36									
N/mm	19	13	14	14	19	21	17			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		7,23						Ndet		2,47E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	94	VUOTTA				
DETAIL 10 VASEN										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		36									
N/mm	13	12	12	13	12	16	11			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		4,456						Ndet		1,05E+09	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	401	VUOTTA				
DETAIL 10 OIKEA										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		36									
N/mm	15	17	16	8	12	9	9			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		8,844						Ndet		1,35E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	51	VUOTTA				
DETAIL 10										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		36									
N/mm	11	14	16	10	16	12	9			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		7,355						Ndet		2,35E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	89	VUOTTA				
DETAIL 11										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		56									
N/mm	8	12	14	13	16	13	10			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		8,392						Ndet		5,94E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	226	VUOTTA				
DETAIL 12										VÄSYMISLUOKKA									
	-75	-43	-25	0	25	43	58	Δcc		56									
N/mm	11	16	16	12	14	10	6			KESTOIKÄ SYKLIÄ									
Δomax		10,251						Ndet		3,26E+08	SYKLIÄ	2628000	KESTOIKÄ	124	VUOTTA				

Nivelvarrellisen anodinostimen periaatemalli



Lujuuslaskentaraportti

Lujuuslaskentaraportti

Tämä raportti koskee opinnäyteprojektiä, jonka tarkoituksena oli suunnitella pidentetty nostovarssi anode take off- deviceen

Lujuuslaskentaraportti on suoritettu kuvannukselle nostovaralle. Lujuustarkastelut on suoritettu kuvan ilmoittamien detailien kohdalta väsyttävän kuormituksen suhteen hitsiliitoksille.

Laskenta on suoritettu standardin SFS-EN 1993-1-9 mukaan.

Laitteen kuormana on käytetty anodimassaa 400kg ja varmuuskertointa 1.

Laskennassa on huomioitu sykliaikana 12s, kestoikävaatimuksena 20v ja kuormituskerroten lukumääränä 52560000 sykliä

Analyysi on suoritettu seitsenessä kulma-asennossa, jotta koko työkalu olisi analysoitu.

Nostovarren kuormituksissa on huomioitu kiilittyvydet erillisessä analyysissä molempiin suuntiin.

Nostovarren kiinnityskohta analyysissä oli alaholkkin putken sisäkulma. Osoitettu kuvassa vihreällä värillä.

Tarkemmat tiedot laskelmista löytyy tämän excel -tiedoston taulukosta 3. MAX. PALK.JÄNN.SUMM.

nostovarssi on valmistettu S355 J2- teräksistä.

