

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma

Lentokonetekniikka

Opinnäytetyö

Jaakko Väisänen

LENTOKONEEN AMFIBIOKELLUKKEIDEN KIINNITYSRAKENTEEN  
SUUNNITTELU

Työn ohjaaja

Työn teettäjä

Tampere 2009

Yliopettaja Heikki Aalto

Tampereen ammattikorkeakoulu

# TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka

Lentokonetekniikka

Jaakko Väisänen Lentokoneen amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenteen suunnittelu

Opinnäytetyö 71 sivua + 13 liitesivua

Työn ohjaaja Yliopettaja Heikki Aalto

Työn teettäjä Tampereen ammattikorkeakoulu

Heinäkuu 2009

Hakusanat amfibiokelluke, kiinnitysrakenne, ultrakevyt lentokone

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoululla suunniteltiin ja rakennettiin opiskelijaprojektina Ikarus C42 -ultrakevyen lentokoneen amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenne kesällä 2009. Kiinnitysrakenteen suunnittelun ja asennuksen tilaaja Tampereen ammattikorkeakoululle oli kevytilmailua harrastava yksityishenkilö.

Tässä opinnäytetyössä käsitellään yleisesti amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenteen esisuunnittelua, lujuustarkastelua ja valmistusmenetelmiä. Lisäksi perehdytään myös ilmailuviranomaisen vaatimiin määräyksiin, jotka on otettava huomioon, kun ultrakevyen lentokoneeseen suunnitellaan ja asennetaan uusia rakenteita. Työ vaati paljon perehtymistä lujuuslaskentaan ja yleisten lentokonealumiinien ominaisuuksiin. Lujuuslaskentaohjelmistojen ja hyvien materiaalivalintojen avulla kiinnitysrakenteen mitoitukselta saatiin kevyt ja riittävän luja. Kun riittävän tarkka pohjatyö oli tehty ja selkeät perusteet valinnoille määritetty, oli helppo vertailla eri vaihtoehtoja ja valita niistä parhaiten soveltuva ratkaisu. Valintaan vaikuttivat muun muassa valmistuksen yksinkertaisuus, kustannukset ja painonhallinta. Kaikkien päätösten oli täytettävä ilmailuhallinnon määräykset kaikissa eri tilanteissa. Amfibiokellukkeen kiinnitysrakenteen suunnitelmasta saatiin luotettava ja käyttökelpoinen Ikarus C42 -ultrakevyen lentokoneeseen. Sitä pystytään pienin muutoksin hyödyntämään myös muissa vastaavissa lentokoneissa.

# TAMPERE UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical and Production Engineering

Aeronautical Engineering

Jaakko Väisänen

Engineering thesis

Thesis Instructor

Thesis Orderer

August 2009

Keywords

Design of the amfibio floats rig

71 pages + 13 appendices

Supervisor Heikki Aalto

Tampere University of Applied Sciences

amfibio floats, landing gear mounting, ultra light airplane

## ABSTRACT

There was a student project in Tampere University of Applied Sciences in summer 2009. In the project five aeronautical engineering students designed and assembled amfibio floats rig to Ikarus C42 ultra light airplane. This project was ordered by private person who is interested in ultra light airplanes.

In this engineering thesis the aim is generally present amfibio floats rig pre-design, strength analysis and production methods. The aim is also to find out federal air regulations. It was needed a lot of strength calculation and information about airplane aluminums in the project. Light weight and enough strength in structure were achieved with good strength calculation programs and material choices. When exact basic research had been done, the final decisions were quite easy to make. For example simple production, costs and light weight of mounting structure were affected the final decisions. All decisions had to fill federal air regulations in different situations. Design of amfibio floats rig was reliable and useful to Ikarus C42 ultra light airplane. That design can be used also in other same kind of airplanes.

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO .....	3
1 JOHDANTO .....	5
2 ULTRAKEVYET LENTOKONEET .....	6
2.1 Ultrakevyyen lentolupakirja.....	7
2.2 Ikarus C42 ja vesilentäminen.....	9
3 PROJEKTISUUNNITELMA .....	11
4 ESISUUNNITTELU .....	14
4.1 Ilmailumääräykset.....	15
4.2 Suunnittelun lähtökohdat .....	24
4.3 Ristikkorakenteen vaihtoehdot.....	24
4.4 Takakiinnityksen vaihtoehdot.....	27
4.5 Etukiinnityksen vaihtoehdot .....	33
4.6 Suunnittelun loppuasetelmat.....	35
5 LUJUUSTARKASTELU .....	37
5.1 Catia- ja FEM-mallintaminen .....	37
5.2 Kuormien jakautuminen.....	38
5.3 Laskutelineeristikon kuormitukset.....	41
5.4 Sauvojen lujuustarkastelu .....	44
5.5 Korvakkeiden lujuustarkastelu.....	52
5.6 Kiinnikkeiden lujuustarkastelu .....	56
5.7 Ruuvien kiristysmomentit.....	58
6 TULOSTEN TARKASTELU JA ARVIOINTI.....	67
LÄHDELUETTELO.....	69
LIITTEET .....	71

## Lyhenteiden ja merkkien selitykset

UL	Ultrakevyt lentokone (Ultralight Airplane)
UPL	Ultrakevyyden lentokoneen lupakirja (Ultralight Pilot License)
CAS	Kalibroitu ilmanopeus (Calibrated Airspeed)
VFR	Näkölentosäännöt (Visual Flight Rules)
EASA	Euroopan lentoturvallisuusvirasto (European Aviation Safety Agency)
FAA	Yhdysvaltain ilmailuviranomainen (Federal Aviation Administration)
FAR	Yhdysvaltain ilmailumääräykset (Federal Aviation Regulations)
FEM	Elementtimenetelmään perustuva lujuuslaskenta (Finite Element Method)
$\sigma_t$	Normaalijännitys (MPa)
$\sigma_n$	Nurjahdusjännitys (MPa)
$\lambda_n$	Hoikkuusluku
$\alpha$	Kierteen nousukulma (°)
$M$	Kiristysmomentti (Nm)
$N_{bru}$	Pintapaine (N)
$\tau$	Leikkausjännitys (MPa)

## 1 JOHDANTO

Tampereen ammattikorkeakoululla aloitettiin opiskelijaprojekti kesällä 2009. Työn tavoitteena oli valmistaa Ikarus C42 ultrakevyeen lentokoneeseen amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenne. Projektiin osallistui viisi lentokonetekniikan opiskelijaa. Työn ohessa opiskelijat suorittivat myös henkilökohtaisen harjoittelun ja opinnäytetyön.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on esitellä amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenteen suunnitteluun käytettyjä eri vaiheita ja työmenetelmiä. Opinnäytetyössä kerrotaan ilmailuviranomaisten määräyksistä, esisuunnittelusta, kiinnitysrakenteen lujuustarkastelusta ja mitoittamisesta. Eri rakennevaihtoehtojen etuja ja haittoja pohditaan kaikkien osa-alueiden kannalta. Työssä hyödynnettiin perinteisten käsilaskumenetelmien lisäksi tietokoneavusteisia mallinnus- ja lujuuslaskentamenetelmiä. Tämän opinnäytetyön lujuuslaskentaosio tehtiin yhteistyössä projektin jäsenen Matias Mattilan kanssa.

Opiskelijaprojektin tavoitteena oli toteuttaa kellukkeiden kiinnitysrakenne suunnitelman mukaisesti Ikarus C42 -lentokoneeseen. Kiinnitysrakenteen on täytettävä ilmailuhallinnon määräykset ja oltava luotettava käytössä. Tarkoituksena oli myös valmistaa konstruktiosta osa-, kokoonpano- ja asennuspiirustukset. Kiinnitysrakenteen valmistus ei ajan puutteen vuoksi onnistunut, mutta kaikki suunnitelmat toteutettiin valmistus ja kokoonpano huomioiden. Osa-, kokoonpano- ja asennuspiirustukset valmistettiin siten, että kiinnitysrakenteen valmistus myöhemmin on mahdollista myös ulkopuolisten toimesta.

## 2 ULTRAKEVYET LENTOKONEET

Ultrakevyt lentokone (UL) määritellään ilmailumääräyksen AIR M5-10 /14/ mukaisesti seuraavasti:

”Enintään kaksipaikkainen kevyt lentokone, jonka sakkausnopeus laskuasussa on enintään 65 km/h (35 knots) CAS ja jonka suurin sallittu lentoonlähtömassa ei ylitä:

- 300 kg yksipaikkaisella maalentokoneella,
- 450 kg kaksipaikkaisella maalentokoneella,
- 330 kg yksipaikkaisella vesilentokoneella tai amfibiolla,
- 495 kg kaksipaikkaisella vesilentokoneella tai amfibiolla.”

UL-lentokoneita voidaan käyttää sekä maa- että vesilentokoneena, kun toimitaan yllä mainittujen painorajojen mukaisesti. UL-lentokoneet jaetaan lentokoneen ohjaustavan mukaisesti A- ja B-luokkaan, joista A- luokan UL-lentokoneita ohjataan osittain tai kokonaan massakeskiötä muuttamalla ja B-luokan UL -lentokoneita ohjataan ohjainpintojen avulla. Kuormattavuutta yksipaikkaisella UL-lentokoneella tulee olla vähintään 175 kg ja kaksipaikkaisella vähintään 95 kg./14/ UL-lentokoneen tyhjämassaan ei kuitenkaan tarvitse sisällyttää sellaisia lisävarusteita, esimerkiksi ylimääräisiä mittari- ja radiovarustuksia, pyöränsuojia tai valoja, joita ilman kone säilyttää lentokelpoisuutensa./15/

UL- lentokoneen lujuusvaatimuksina on liikehtimiskuormituskertoimia +3,8g ja -1,5g vastaavien rajakuormien kesto. Lisäksi rakenteen tulee kestää JAR 22 -vaatimusten mukaisesti määritetyt puuskakuormat. Nämä lujuusvaatimukset eivät kuitenkaan koske tyhjämassaltaan enintään 115 kg painavia yksipaikkaisia UL- lentokoneita, joille liikehtimis- ja puuskakuormat määritetään suunnitellun käytötavan mukaisesti./14/

UL- lentokoneiden lukumäärä ja suosio harrasteilmailussa on ollut viime vuosikymmenen aikana jatkuvassa kasvussa, ja nykyisin rekisteröityjä ultrakevyitä lentokoneita on Suomessa hieman alle 300. Tämä tarkoittaa, että kaikista rekisteröidyistä ilma-aluksista ultrakevyitä lentokoneita on kolmanneksi eniten (taulukko 1).

**Taulukko 1** Suomessa rekisteröidyt ilma-alukset 2000-2008 /9/

	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Liikennekoneet	64	72	77	82	82	74	77	88	91
Lentokoneet	570	544	532	519	510	519	522	540	555
Helikopterit ja autogiroit	82	81	74	78	76	90	83	79	84
Purje- ja moottoripurjekoneet	372	374	374	378	381	386	390	402	404
Ilmaa kevyemmät ilma-alukset	58	60	63	61	60	61	59	62	64
Ultrakevyet lentokoneet	172	173	173	197	215	221	217	239	274
<b>Yhteensä</b>	<b>1318</b>	<b>1304</b>	<b>1293</b>	<b>1315</b>	<b>1324</b>	<b>1351</b>	<b>1348</b>	<b>1410</b>	<b>1472</b>

## 2.1 Ultrakevyen lentolupakirja

Lupakirjan hakijalta vaaditaan 17 vuoden ikää, sekä lääketieteellinen kelpoisuustodistus /10/. Lisäksi ilmailumääräys PEL M2-70 /12/ määrittelee tietopuoliset vaatimukset seuraavasti:

” Hakijalta vaaditaan ilmailuviranomaisen hyväksymän lentokoulutusluvan haltijan antama tietopuolinen koulutus. Hakijalta vaaditaan todistus siitä, että hän on kokeissa osoittanut ultrakevytlentäjältä vaadittavaa tiedon tasoa seuraavissa oppiaineissa:

- a) ilmailun säädökset
- b) UL-lentokonerakenteet ja moottori
- c) UL-lentokonemittarit
- d) aerodynamiikka

- e) ohjausoppi
- f) sääoppi
- g) lentosuunnistus
- h) UL-lentokoneen käyttö ja hoito, lentokäsikirja
- i) ihmisen suorituskyky ja rajoitukset
- j) lentotoimintamenetelmät.

Edellä mainittujen oppiaineiden lisäksi hakijalla on oltava rajoitetun radiopuhelimen hoitajan kelpuutus (PEL M2-92 tai PEL M2-93) tai sitä varten voimassa oleva koulutus (TRG M1-11).”

Teoriaosuuden lisäksi vaaditaan 25 lentotuntia UL-koneella, joista yksinlentoja on oltava 5 lentotuntia. Lisäksi vaaditaan myös 5 lentotuntia matkalentoina, sisältäen 150 kilometrin pituisen matkalennon yksin lennettynä. Matkalennon aikana tulee laskeutua vähintään yhdelle lentopaikalle, joka ei ole sama kuin lentoonlähtöpaikka. Lento-osuuden jälkeen suoritetaan luonnollisesti lentokoe, jossa tulee osoittaa UL-lentäjältä vaadittavaa suoritustasoa ohjausliikkeissä, niin normaalissa lennossa kuin hätätilanteissakin. Hakijan tulee myös osoittaa kykynsä noudattaa ilmaliikennepalvelun toimintaohjeita ja menetelmiä. Voimassa oleva muun luokan lentolupakirja helpottaa UPL-lupakirjan saamista. /10/

Ilmailumääräyksen OPS M2-8 /2/ mukaan ultrakevyellä lentokoneella saa lentää vain VFR-lentoja päivällä, ei jäätävissä olosuhteissa. VFR-lentoja ei ole luvallista suorittaa valvotussa ilmatilassa jos lentonäkyvyys on alle 5 km ja pilvikorkeus alle 1500 ft lennettäessä alle lentopinnan FL 100 (3050 m). Pilvistä täytyy myös pysyä erossa, pitäen etäisyyttä vaakasuoraan 1500 m ja pystysuoraan 300 m /10/. Taitolento ei myöskään ole sallittua normaaleilla UL-lentokoneilla, mutta erillisillä riittäväillä selvityksillä kone voidaan hyväksyä rajoitettuun taitolento- tai taitolentoluokkaan /11/.

## 2.2 Ikarus C42 ja vesilentäminen

Yksi yleisimmistä kevytilmailussa käytetyistä ultrakevyistä lentokoneista on Ikarus C42. Ikarus C42 (kuva 1) on moderni rinnakkain istuttava ylätasokone, jonka on valmistanut saksalainen Comco Ikarus GmbH -yritys. Comco Ikarus aloitti toimintansa jo vuonna 1976 valmistamalla riippuliitimiä. Nykyään Comco Ikarus on moderneja ja huippulaadukkaita ultrakevyitä lentokoneita tuottava yritys. /2/

Siiven kärkiväli on 9,45 metriä, siipi on valmistettu lentokonealumiinista, joka on päällystetty erittäin vahvalla kutistekankaalla. Koneen runko on valmistettu komposiitista ja sen pituus on 6,25 metriä. Kantavana osana toimii rungon pohjassa oleva iso alumiiniputki. Moottorina Ikaruksessa on nelitahtinen Rotax ULS 912 tai 912s -kevytlentokonemoottori. ULS 912 -malli kehittää 100 hevosvoimaa ja 912s -malli 80 hevosvoimaa. Ikaruksen matkalentonopeus on noin 150 km/h ja sen toimintamatka on 400–500 kilometriä. Suomesta ostettuna Ikarus maksaa noin 45 000 euroa. /1/



**Kuva 1** Ikarus C42 /1/

Ikarusta käytetään paljon koulutuksessa, ja se sopii hyvin myös vesilentoon. Ikaruksen yksi monista vahvuuksista onkin sen käytön ympärivuotisuus. Kesällä voidaan operoida vedestä ja maalta, sekä talvisin suksien avulla lumesta. Ikaruksissa käytössä olevista kellukkeista yleisimpiä ovat ilmatäytteiset Full Lotus -kellukkeet (kuva 1). Full Lotus -kellukkeilla voi operoida talvisin myös lumelta.

Kellukkeilla varustetun ultrakevyen lentokoneen lentämiseen tarvitsee varsinaisen lupakirjan lisäksi myös vesilentokelpuutuksen. Kurssi kestää muutaman lentotunnin verran ja siinä käsitellään kellukkeista aiheutuvien suoritusarvojen muuttumista, lentoonlähtöä, laskeutumista veteen ja rantautumista.

Vesilentokone on lentokone, joka nousee vedestä ja laskeutuu veteen. Koneessa on pyörien sijaan suksenkaltaiset kellukkeet tai itse koneen runko on venemäinen, jolloin kyse on lentoveneestä. Jos kellukkeissa tai rungossa on sisäänvedettävät renkaat, kyseessä on amfibiolentokone, jolla voidaan operoida vedestä ja maalta. Suomessa vesilentokoneita on käytössä melko paljon, sillä Suomessa on paljon sopivia vesistöjä, joissa koneita voidaan käyttää. Etenkin kevytlentokoneista merkittävä osa on vesikoneita, joilla voidaan laskeutua suoraan oman rantamökin laiturille. /1/

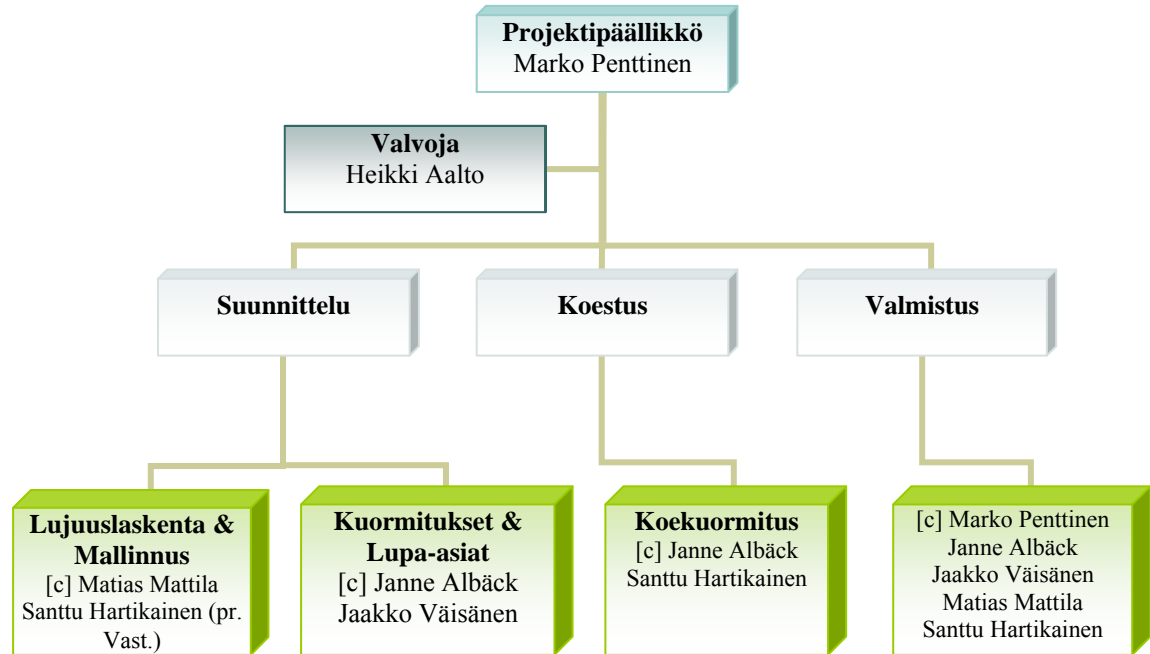
### 3 PROJEKTISUUNNITELMA

Kevytilmailun harrastaja oli hankkinut Kanadasta Puddlejumper-merkkiset amfibio-kellukkeet Ikarus C42 -ultrakevyttä lentokonetta varten. Kellukkeiden valmistajalla ei ollut valmista suunnitelmaa ja toteutusta Ikarus C 42 -konetta varten, joten lopullinen suunnittelu täytyi tehdä itse. Tästä kehittyi Tampereen ammattikorkeakoululle suunnittelu- ja asennusprojekti, jota alkoi toteuttaa viiden hengen lentokonetekniikan opiskelijoista koostuva ryhmä.

Alusta alkaen projektia tehtiin ammattimaisesti, ilmailumääräyksiä ja lentokonetekniikan vaatimuksia noudattaen. Lisää mielenkiintoa projektiin on tuonut se, että suunnitteleamme rakenne tulee lentävään lentokoneeseen. Työ tehdään ryhmässä, joten onnistunut projektin läpi vieminen on samalla osoitus ryhmässä työskentelemisen taidosta. Projekti lähti käyntiin aivan perusasioista, sillä kukaan projektin jäsenistä ei ollut aikaisemmin tämän kaltaisen projektin parissa työskennellyt. Näin ollen kaikki asiat jouduttiin alkuun opettelemaan pitemmän kaavan kautta ja näkyvää tulosta ei helposti syntynyt.

Projektissa perehdyttiin tarkasti ilmailumääräyksiin, Catia-mallintamiseen, FEM-lujuuslaskentaan ja olemassa olevien rakenteiden tarkasteluun. Kaikkeen tähän liittyi myös monta muuta osa-aluetta, kuten painonhallinta, rakenteiden testaus, vakavuus- ja suorituskykytarkastelu, korroosiovaikutuksia sekä valmistusmenetelmien suunnittelu.

Amfibio-kellukkeiden kiinnityksen suunnittelu ja valmistus jaettiin eri osioihin ja niihin määritettiin vastuuhenkilöt (kuva 2). Eri osiolle määritettiin tietyt tehtävät, ja ne tuli suorittaa sovittuun päivämäärään mennessä.



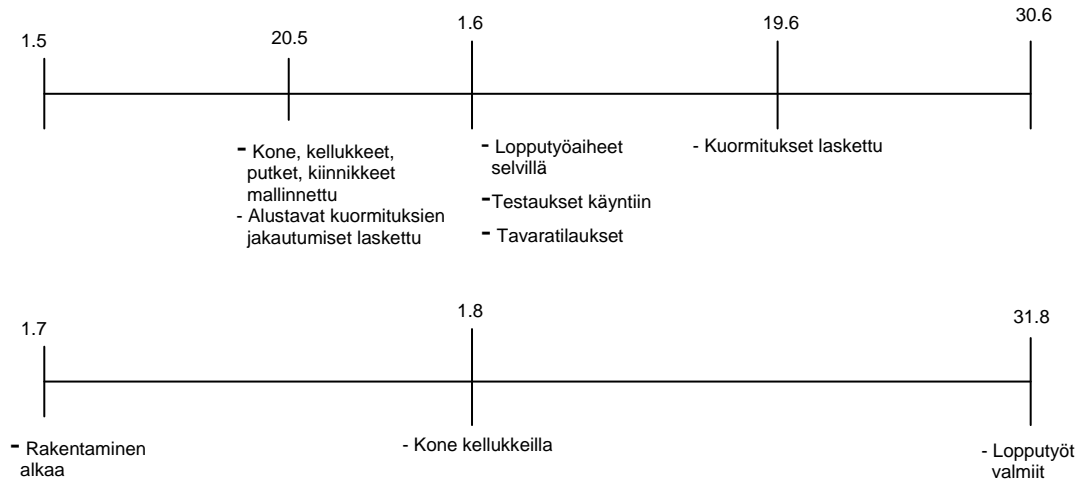
**Kuva 2** Alustava organisaatiokaavio

Lujuuslaskenta- ja mallinnusryhmän päätehtävänä oli suunnitteluvaiheessa miettiä eri konstruktioratkaisuja ja mitoittaa amfibio-kellukkeille kiinnitysrakenne. Tehtävään kuului myös lujuustarkastelu valmistajan suunnitteleuille osille, ja sen varmistaminen, että ne yhdessä kestävät suunnitellun kiinnityskonstruktion.

Kuormitus ja lupa-asiat -osion päätehtäviin kuului selvittää ilmailumääräyksien asettamat säännöt, jotka koskevat amfibio-ponttonien kiinnitystä. Ilmailusäädökset olivat tärkeä osa projektia, koska amfibio-kellukkeiden asentamiseen tarvitaan ilmailulaitokselta hyväksytty rakennuslupa, joka edellyttää toimimisen Ilmailumääräyksien mukaan.

Koestusryhmän päätehtävänä oli kuormittaa kiinnityskonstruktiota ja todeta, että konstruktioratkaisu kestää sille suunnitellut kuormat. Ennen koestusta on perehdyttävä koekuormituskoneen käyttöohjeisiin, koestuksen suunnitteluun ja lopuksi itse koekappaleiden valmistamiseen.

Alustavan aikataulun mukaan suunnitteluvaihe olisi valmis kesäkuun alussa, jolloin tarvittavat osat tilattaisiin ja lupahakemus lähetettäisiin (kuva 3). Rakentaminen aloitettaisiin heinäkuussa, jolloin siihen olisi aikaa noin kuukausi.



**Kuva 3** Alustava aikataulu

## 4 ESISUUNNITTELU

Ilmailu on tarkemmin säänneltyä ja valvottua kuin mitkään muut liikennemuodot. Ilmailu on aina ollut hyvin kansainvälistä toimintaa, ja sen helpottamiseksi eri maiden ilmailuviranomaiset ovat pyrkineet yhdenmukaistamaan tiettyjä säädöksiä. Yhdysvaltain ilmailuhallinto (FAA) ja Euroopan lentoturvallisuusvirasto (EASA) ovat määränneet ultrakevyille vesilentokoneille kaikissa eri laskeutumistilanteissa syntyvät suurimmat kuormat, jotka rakenteen täytyy kestää. Esisuunnittelu aloitettiin tutustumalla laskeutumistilanteissa syntyviin määräysten mukaisiin kuormituksiin.

Rakenne on myös todennettava vaatimusten mukaiseksi Suomen Ilmailuhallinnolle. Ilmailuhallinto hoitaa lentoturvallisuuteen ja ilmailun turvasioihin liittyvien ohjeiden ja määräysten antamisen sekä muut siviili-ilmailun viranomaistehtävät. Suomen Ilmailuhallinto voi myöntää rakennusluvan, kun lujuustarkastelut, suorituskykyarvio, kokonaispaino ja painopistelaskelmat ovat määräysten mukaiset. Määräykset täytyi todentaa Ilmailuhallinnolle lujuuslaskelmien, koekuormitusten tai käytännössä testattavien osien avulla. Tässä projektissa todensimme Ilmailuhallinnolle osien kestävyyslujuuslaskelmien ja koekuormitusten avulla. /1/

FAA on määrittänyt ilmailusäädöksiä (FAR), jotka on jaettu eri osioihin. Kaikki kellukkeisiin liittyvät säädökset määritellään osioissa 23.527 – 23.533, näiden perusteella määräysten mukaista esisuunnittelua alettiin toteuttaa. /4/

## 4.1 Ilmailumääräykset

Vesitaso- ja amfibiolentokoneet on suunniteltava kuormille, jotka ovat suurimpia mahdollisia lentokoneen laskussa ja lentoonlähdessä. Kuormat on huomioitava kaikissa käytännössä ajateltavissa asennoissa yhdelle ponttonille. Pystysuoraan vaikuttavien kuormien lisäksi on otettava huomioon myös jarrutuksessa ja sivusuunnassa vaikuttavat kuormat. /5/

Kaikki FAA:n määrittämät kaavat, joissa lasketaan kuormituksia, ovat rajakuormia, jotka ovat suurimpia sallittuja kuormia käytön aikana. Lujuustarkasteluissa käytetään suunnittelunmurtokuormaa, joka on rajakuorma kerrottuna varmuuskertoimella. Yleisesti lentokonetekniikassa käytetty varmuuskerroin on 1,5, jota myös käytettiin tämän projektin lujuustarkasteluissa. /5/

Kellukkeeseen kohdistuvat kuormitukset otetaan huomioon FAA:n mukaan seitsemässä eri tilanteessa, jotka ovat step loading, bow loading, immersed loading, step landing, bow landing, stern landing ja takeoff loading. Kaikissa eri tilanteissa syntyy erisuuruinen kuormitus ja se vaikuttaa eri kohtaan ponttonia. Laskujen yksinkertaistamiseksi kahdella ponttonilla varustetun lentokoneen, kuten tässä tapauksessa, ponttonit ajatellaan yksittäisiksi osiksi, joita kuormitetaan puolella lentokoneen painosta /4/. /5/

### Step ja bow loading

Step loading ( $L_s$ ), joka lasketaan kaavan 1 avulla, syntyy lentokoneen kiihdyttäessä vedessä. Laskettu kuorma sijaitsee  $3/4$  etäisyydellä keulasta (Bow) askelmalle (Step), kuvan 4 mukaisesti ja on kohtisuorassa ponttonin köliin nähden. /4/

Bow loading ( $L_B$ ) lasketaan myös kaavalla 1, mutta se vaikuttaa 1/4 etäisyydellä keulasta (Bow) askelmalle (Step), kuvan 4 mukaisesti ja on kohtisuorassa ponttonin köliin nähden. Bow loading syntyy kun lentokone hidastaa rullaustilanteessa vedessä. /4/

$$L_B = L_S = \frac{C_5 V_{S_0}^2 W^{2/3}}{\tan^{2/3} \beta_5 (1 + r_y^2)^{2/3}} \quad (1)$$

$L$  = Rajakuorma (lbs)

$C_5 = 0,0053$

$V_{S_0}$  = Vesilentokoneen sakkausnopeus (knots), laipat 2-asennossa ( $42^\circ$ )

$W$  = Vesilentokoneen suunniteltu laskeutumispaino (pounds)

$\beta_5$  = Ponttonin pohjan v- kulma (rad)

$r_y$  = Ponttonin vaakaetäisyys (Y-suunnassa) painopisteestä jaettuna ponttonin pyörimissäde painopisteen suhteen (roll)

Laskettaessa step ja bow loading -tilanteita kaikki muut tekijät ovat samoja paitsi ponttonin pohjan v- kulma ( $\beta_5$ ), step loadingissa  $\beta_5 = 0,42$  ja bow loadingissa  $\beta_5 = 0,31$ . Sijoittamalla arvot kaavaan 1 saadaan step loading ja bow loading -kuormat  $L_S$  ja  $L_B$ :

$$L_S = \frac{0,0053 * 35,1^2 \text{ kts} * 551,6^{2/3} \text{ lbs}}{\tan^{2/3} 0,42 * (1 + 0,2^2)^{2/3}} = 733,7 \text{ lbs}$$

josta saadaan voimaksi

$$L_S = 3,33 \text{ kN}$$

josta saadaan step loading -tilanteessa syntyvä suunnittelun murtokuorma  $1,5 \cdot L_S = 4,99 \text{ kN}$ .

$$L_B = \frac{0,0053 * 35,1^2 \text{ kts} * 551,15^{\frac{2}{3}} \text{ lbs}}{\tan^{\frac{2}{3}} 0,31 * (1 + 0,2^2)^{\frac{2}{3}}} = 905,2 \text{ lbs}$$

josta saadaan voimaksi

$$L_B = 4,11 \text{ kN}$$

josta saadaan bow loading -tilanteessa syntyvä suunnittelun murtokuorma  $1,5 \cdot L_B = 6,16 \text{ kN}$

Lujuuslaskennassa käytetään siis  $L_S = 4,99 \text{ kN}$  ja  $L_B = 6,16 \text{ kN}$ , jotka kuormittavat kellukkeita kuvan 4 mukaisesti.

### **Immersed loading**

Immersed loading on sijoitettava ponttonin läpileikkauksen keskikohtaan 1/3 etäisyydellä keulasta (Bow) askelmalle (Step). Immersed loading -tilanne syntyy kun kelluke uppoaa veden alle ja liikkuu pysty-, vaaka- ja pitkittäissuunnassa. Voimien komponentit lasketaan kaavoilla 2, 3 ja 4. Vertical tarkoittaa z-suuntaista, aft y-suuntaista ja side x-suuntaista voimaa, kuvien 4 ja 5 mukaisesti. /4/

$$\text{vertical} = \rho \cdot g \cdot V \quad (2)$$

$$\text{aft} = \frac{C_x \cdot \rho \cdot V^{\frac{2}{3}} (K \cdot V_{S_0})^2}{2} \quad (3)$$

$$\text{side} = \frac{C_r \cdot \rho \cdot V^{\frac{2}{3}} (K \cdot V_{S_0})^2}{2} \quad (4)$$

$\rho$  = Veden tiheys

$g$  = Putoamiskiihtyvyyys  $\text{ft}/\text{sec}^2$  (käytetään  $10 \text{ m}/\text{s}^2 = \text{ft}/\text{sec}^2$ )

$V$  = Ponttonin tilavuus, toisin sanoen ponttonin kantokyky

$C_x$  = Vastuskerroin, 0.133

$C_y$  = "Sivuvastus" kerroin, 0.106

$K = 0.8$ , tosin voidaan käyttää pienempää arvoa, jos voidaan esittää toteen, että ponttonit eivät missään tilanteessa voi kokonaan upota, kun lentokoneen nopeus on  $0.8 V_{S0}$

$V_{S0}$  = Vesilentokoneen sakkausnopeus (knots), laipat 2-asennossa ( $42^\circ$ )

Immersed loading -tilanteesta aiheutuvien kuormien komponentit saadaan, kun sijoitetaan arvot kaavoihin 2, 3, 4 ( $g = 9,81 \text{ m}/\text{s}^2 = 32,8 \text{ ft} / \text{s}^2$ ):

$$\begin{aligned} \text{vertical} &= 1,94 \cdot 32,8 \text{ ft} / \text{s}^2 \cdot 19,22 \text{ ft}^3 = 1223 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbs}}{\text{s}^2} = \\ &= 5,55 \text{ kN} \end{aligned}$$

josta saadaan pystysuuntainen suunnittelun murtokuorma  $5,55 \text{ kN} \cdot 1,5 = 8,32 \text{ kN}$ .

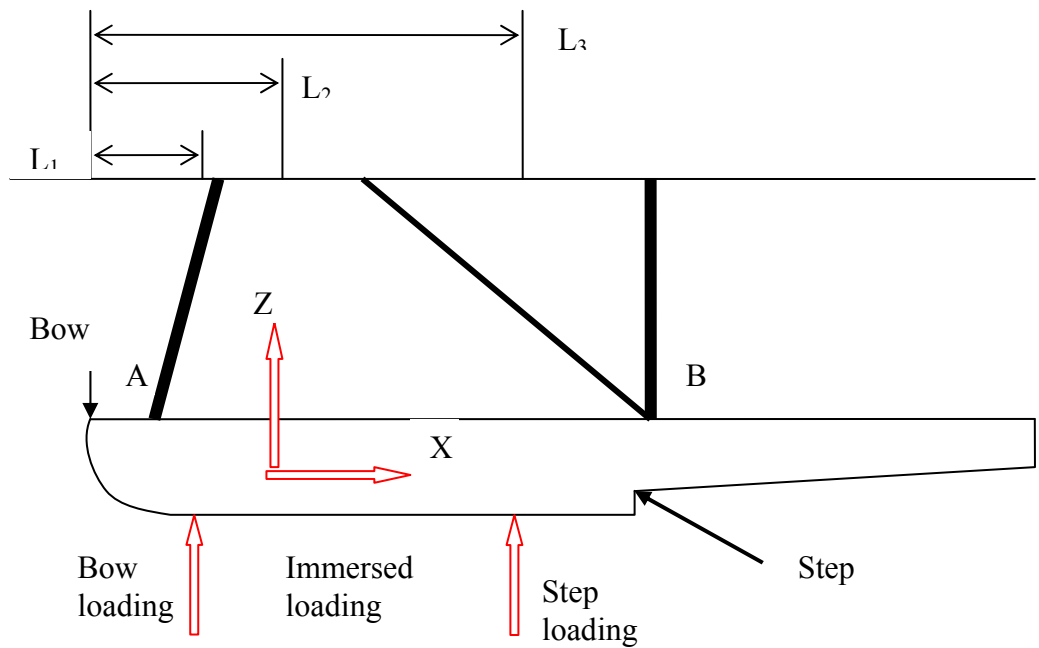
$$\begin{aligned} a_{ft} &= \frac{0,133 \cdot 1,940 \frac{\text{slugs}}{\text{ft}^3} \cdot (19,2 \text{ ft}^3)^{2/3} (0,8 \cdot 35,1 \text{ knots})^2}{2} = 729,9 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbs}}{\text{s}^2} \\ &= 3,31 \text{ kN} \end{aligned}$$

josta saadaan pitkittäissuuntainen suunnittelun murtokuorma  $3,31 \text{ kN} \cdot 1,5 = 4,97 \text{ kN}$ .

$$\begin{aligned} \text{side} &= \frac{0,106 \cdot 1,940 \frac{\text{slugs}}{\text{ft}^3} \cdot (19,2 \text{ ft}^3)^{2/3} (0,8 \cdot 35,1 \text{ knots})^2}{2} = 581,7 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbs}}{\text{s}^2} \\ &= 2,64 \text{ kN} \end{aligned}$$

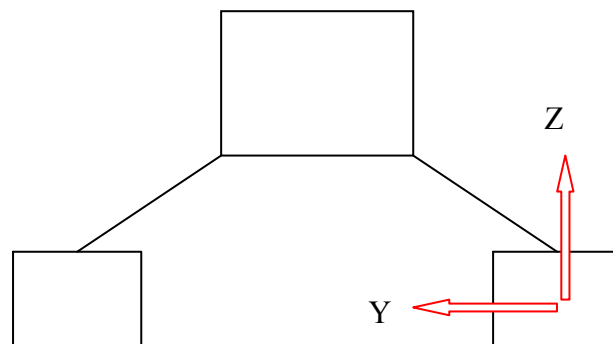
josta saadaan sivuttaissuuntainen suunnittelun murtokuorma  $2,64 \text{ kN} \cdot 1,5 = 3,96 \text{ kN}$ .

Lujuuslaskennassa käytetään siis kuormia  $5,55 \text{ kN}$ ,  $4,97 \text{ kN}$  ja  $3,96 \text{ kN}$ , jotka kuormittavat kellukkeita kuvien 4 ja 5 mukaisesti.



$L_1 = 1/4$  etäisyydellä keulasta (Bow) askelmaan päin (Step)  
 $L_2 = 1/3$  etäisyydellä keulasta askelmaan päin  
 $L_3 = 3/4$  etäisyydellä keulasta askelmaan päin

**Kuva 4** X ja Y- suuntaiset kuormituskohdat



**Kuva 5** Y ja Z-suuntaiset kuormituskohdat

### Step landing

Step landing -tilanteessa lasketaan vesikuormituskerroin ponttonin askelman (Step) kohdalle, joka syntyy laskeutumistilanteessa, kun vesikosketus tapahtuu ponttonien keskikohdalle. Vesikuormituskerroin kerrotaan lentokoneen kokonaispainolla, josta saadaan step landing -kuormitus, joka vaikuttaa kuva 6 mukaiseen kohtaan. Vesikuormituskerroin lasketaan kaavan 5 mukaisesti. /5/

$$n_w = \frac{C_1 V_{s_0}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}} \quad (5)$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 5 saadaan vesikuormituskertoimeksi step landing -tilanteessa:

$$n_w = \frac{0,012 \cdot (35,1 \text{ kts})^2}{\tan^{2/3} 0,42 \cdot (551,15 \text{ lbs})^{1/3}} = 3,09$$

$$\text{Murtokuorma} = n_w \cdot 551,15 \text{ lbs} \cdot 32,8 \text{ ft} / \text{s}^2 = 7,73 \text{ kN}$$

josta saadaan suunnittelun murtokuorma step landing -tilanteessa  $7,73 \text{ kN} \cdot 1,5 = 11,59 \text{ kN}$ .

### Bow and stern landing

Bow ja stern landing -tilanteissa lentokone laskeutuu epänormaalissa asennossa ja vesikosketus tapahtuu ponttonien etu- tai takaosaan, kuvan 6 mukaisesti. Vesikuormituskertoimet ponttonin keulan (Bow) ja perän (stern) kohdille lasketaan kaavan 6 mukaisesti. /5/

$$n_w = \frac{C_1 V_{s_0}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}} \times \frac{K_1}{(1 + r_x^2)^{2/3}} \quad (6)$$

$n_w$  = Vesikuormituskerroin (veden vaikutus jaettuna vesilentokoneen painolla)

$C_1$  = Kokemusperäinen kerroin, 0,012

$V_{S0}$  = Vesilentokoneen sakkausnopeus (knots), laipat 2-asennossa (42°)

$\beta$  = Siiven ja ponttonin yläpinnan välinen kulma

$W$  = Suunniteltu vesilentokoneen laskeutumispaino

$K_1$  = Kokemusperäinen rungon aseman punnituskkerroin

$r_x$  = Ponttonin vaakaetäisyys (X-suunnassa) painopisteestä jaettuna ponttonin pyörimissäde painopisteen suhteen (pitch)

Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saadaan vesikuormituskerroin stern landing -tilanteessa:

$$n_w = \frac{0,012 \cdot (35,1 \text{ kts})^2}{\tan^{2/3} 0,40 \cdot (551,15 \text{ lbs})^{1/3}} \cdot \frac{0,8}{(1 + 0,51^2)^{2/3}} = 2,18$$

$$\text{Murtokuorma} = n_w \cdot 551.15 \text{ lbs} \cdot 32,8 \text{ ft} / \text{s}^2 = 5,47 \text{ kN}$$

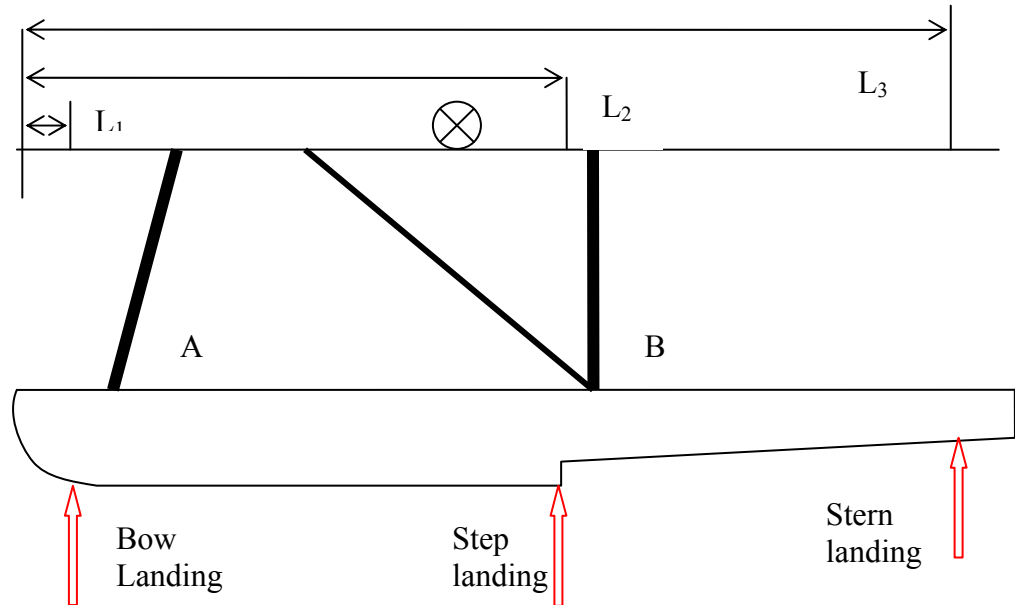
josta saadaan suunnittelun murtokuorma stern landing -tilanteessa  $5,47 \text{ kN} \cdot 1,5 = 8,21 \text{ kN}$ .

Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saadaan vesikuormituskerroin bow landing -tilanteessa:

$$n_w = \frac{0,012 \cdot (35,1 \text{ kts})^2}{\tan^{2/3} 0,31 \cdot (551,15 \text{ lbs})^{1/3}} \times \frac{0,8}{(1 + 0,7^2)^{2/3}} = 2,34$$

$$\text{Murtokuorma} = n_w \cdot 551.15 \text{ lbs} \cdot 32,8 \text{ ft} / \text{s}^2 = 5,85 \text{ kN}$$

josta saadaan suunnittelun murtokuorma bow landing tilanteessa  $5,85 \text{ kN} \cdot 1,5 = 8,77 \text{ kN}$ .



$L_1 = 426 \text{ mm}$   $L_2 = 2130 \text{ mm}$   $L_3 = 4170 \text{ mm}$

**Kuva 6** Laskeutumistilanteissa syntyvien kuormien kohdat

### Take off loading

FAA:n mukaan lentoonlähtötilanteessa pitää huomioida inertia eli jatkuvuusvoima, joka aiheuttaa alaspäin suuntautuvan kuormituksen immersed loading -kohtaan (kuva 4). Tilanteessa oletetaan, että aerodynaaminen nostovoima on 0. Inertiakuormituskerroin lasketaan kaavan 7 mukaisesti /6/:

$$n = \frac{C_{TO} V_{S1}^2}{(\tan^{2/3} \beta) W^{1/3}} \quad (7)$$

$n$  = inertian kuormituskerroin

$C_{TO}$  = kokemuseräinen kerroin, 0,004

$V_{S1}$  = vesilentokoneen sakkausnopeus (knots), laipat 2-asennossa  
(42°)

$\beta$  = siiven ja ponttonin yläpinnan välinen kulma

W = suunniteltu vesilentokoneen suurin lentoonlähtöpaino

Inertiakuormituskertoimen avulla voidaan laskea alaspäin suuntautuvan  
inertiavoiman suuruus kertomalla kaava 7 lentokoneen kokonaispainolla. /5/

$$n = \frac{0,004 \cdot (35,1kts)^2}{\tan^{2/3} 0,26 \cdot 551,15lbs^{1/3}} = 1,45$$

$$\text{Murtokuorma} = n \cdot 551.15 \text{ lbs} \cdot 32,8 \text{ ft} / \text{s}^2 = 3,62 \text{ kN}$$

Josta saadaan suunnittelun murtokuorma lentoonlähtötilanteessa  $3,62 \text{ kN} \cdot 1,5$   
 $= 5,42 \text{ kN}$ .

## 4.2 Suunnittelun lähtökohdat

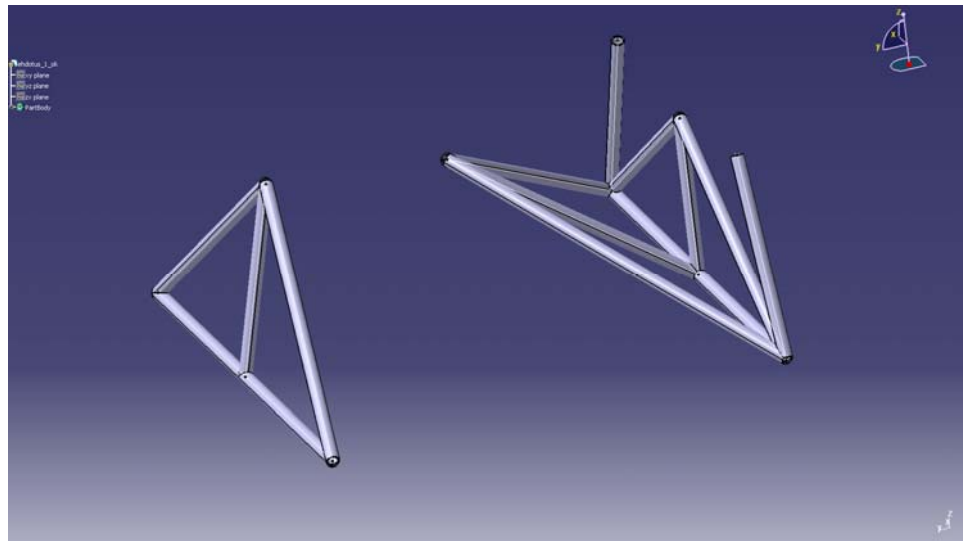
FAA:n määrittämien ilmailumääräysten pohjalta alettiin pohtia erilaisia vaihtoehtoja kiinnitysrakenteelle. Suunnittelussa täytyi huomioida paljon erilaisia näkökohtia ja tehdä niiden pohjalta toimivia ja yksinkertaisia ratkaisuja.

Kiinnitysrakenteen suunnittelussa nousi esille muutama pääkohta, joiden pohjalta suunnittelua lähdettiin toteuttamaan. Suunnittelussa oli huomioitava painonsäästö, lujuus, rakenteen säädettävyys ja kokoonpanon yksinkertaisuus. Rakenteen tuli olla myös riittävän yksinkertainen, jotta valmistettavat osat voitiin koneistaa yleisillä käsikäyttöisillä työstökoneilla. Materiaalit koneistusta varten pyrittiin hankkimaan Suomesta, jotta välttyttäisiin pitkiltä toimitusajoilta ja suurilta toimituskuluilta. Suunnittelussa oli myös huomioitava alumiinin ja teräksen välinen korroosiovaara, koska käyttöympäristö on erittäin korroosiota aiheuttava. Koko rakenteen tuli olla myös edullinen.

## 4.3 Ristikkorakenteen vaihtoehdot

Konstruktion suunnittelu aloitettiin laskutelineeristikon valinnalla ja erilaisten vaihtoehtojen tutkinnalla. Rakenteista tehtiin Catia-mallinnusohjelmalla eri vaihtoehtoja, joiden avulla niiden eroja oli helppo vertailla. Kiinnitysrakenteen suunnittelussa pyrittiin huomioimaan pääasiassa painonhallinta ja rakenteen yksinkertaisuus.

Ristikon rakennevaihtoehtoja oli yhteensä viisi, joista esimerkkinä ristikkomalli 3 (kuva 7). Tässä vaihtoehdossa pyrimme vähentämään pystysuuntaisia voimia takaristikon keskellä olevilla pystysauvoilla. Rakenteeseen oli helppoa sijoittaa sitä tukevoittavia putkia, mutta niiden vaikutus rakenteen jäykkyyteen ei kuitenkaan ollut sellainen että putkikokoa olisi voitu pienentää riittävästi painon vähentämiseksi



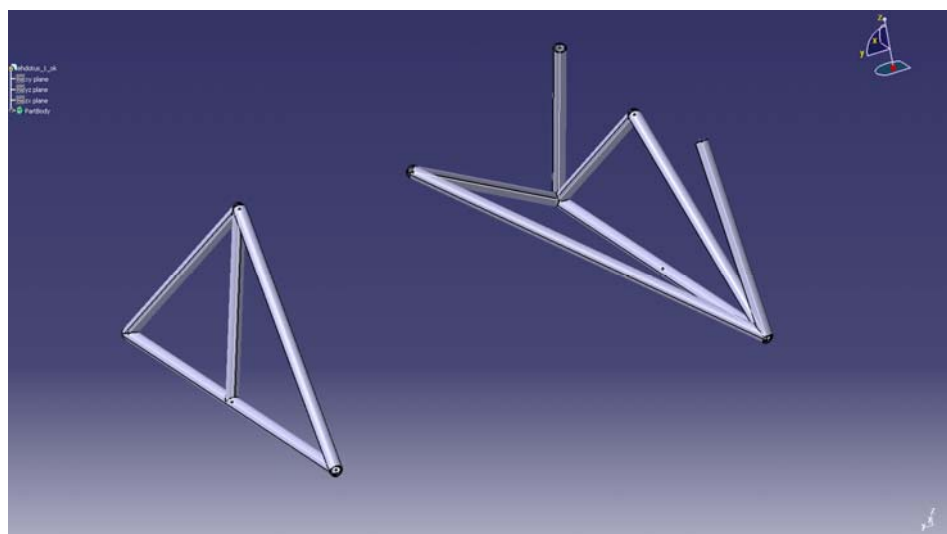
**Kuva 7** Ristikkorakenne, vaihtoehto 3

Ikaruksen laskutelinekiinnitykset asettivat rakenteelle lähtökohdat, sillä koneen alkuperäisten kiinnitysten käyttäminen oli ainoa käytettävissä oleva kiinnitysvaihtoehto. Koneen kiinnikkeisiin ei muutoksia voinut tehdä ja kaikki kuormitus suunnat oli otettava huomioon, joten päädyimme, siihen että jo yleisesti käytössä oleva ristikkorakenne on toimivin (kuva 8).



**Kuva 8** Ikaruksen ja Full Lotus -kellukkeiden käyttämä kiinnitys rakenne

Kuvassa 9 on esitetty Catia-malli valitusta kiinnitys rakenteesta. Takaristikon viistosauvat ottavat vastaan pitkittäissuuntaiset voimat, sivusuuntaiset voimat ottavat vastaan rungon keskikohtiin kiinnittyvät keskisauvat ja pystysuuntaiset voimat ottavat vastaan pystysuuntaiset sauvat.

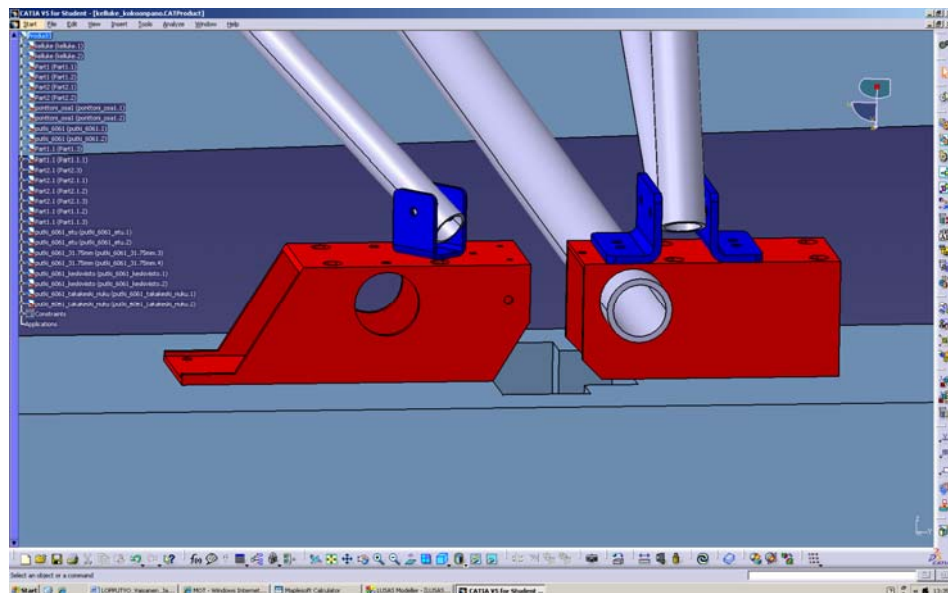


**Kuva 9** Valittu ristikkorakenne

#### 4.4 Takakiinnityksen vaihtoehdot

Ponttoneihin tulevat kiinnikkeet olivat valmistajan suunnittelemia ja materiaalina oli käytetty 6063-T5 -alumiinia. Lujuustarkastelut tehtiin LUSAS-ohjelmistolla ja todettiin, että kiinnikkeet ovat riittävän kestäviä. Sauvojen kiinnitys kiinnikkeisiin tehtiin erilaisten korvakkeiden avulla. Kiinnikkeet on esitetty punaisella ja korvakkeet sinisellä kuvassa 10.

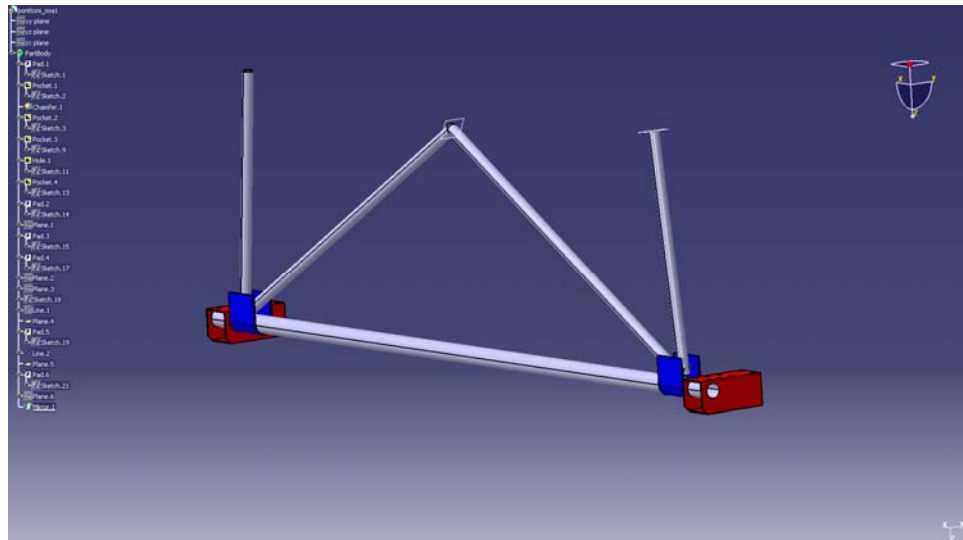
Kiinnitysrakenteen suunnittelussa tuli ottaa huomioon painonsäästö, lujuus, rakenteen säädettävyys ja kokoonpanon yksinkertaisuus. Painonsäästöön pyrittiin tarkalla mitoituksella ja hyvillä materiaalivalinnoilla, joihin päästiin tarkkojen lujuustarkasteluiden avulla. Rakenteen säädettävyys helpottaisi huomattavasti kokoonpanoa ja osien koneistamista. Rakenteen kiinnitykseen oli useita vaihtoehtoja, ja parhaimmista vaihtoehdoista tehtiin havainnollistavat Catia-mallit.



**Kuva 10** Kiinnikkeet on merkitty punaisella ja korvakkeet sinisellä

Takaristikon pystyputkien kiinnityksessä suunniteltiin käytettävän U-korvakkeita (kuva 11). Teräslevystä taivutettiin U-profiilit, joihin pystyputket ja vaakaputket kiinnitettiin ruuveilla.

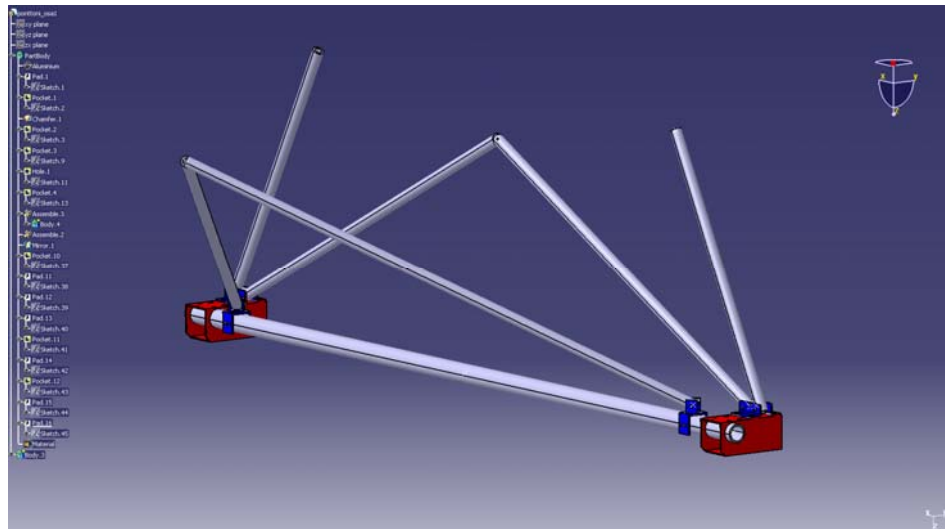
Tällä konstruktiolla siiven ja ponttonien välinen kulma olisi ollut helposti säädettävissä ja osien valmistus olisi ollut yksinkertainen. Tätä konstruktiota ei kuitenkaan valittu, koska vaakaputkeen porattavien toleranssireikien toteutus käytännössä olisi ollut vaikeaa ja reikiin kohdistuva pintapaine olisi suuri.



**Kuva 11** Takaristikko U-korvakeilla

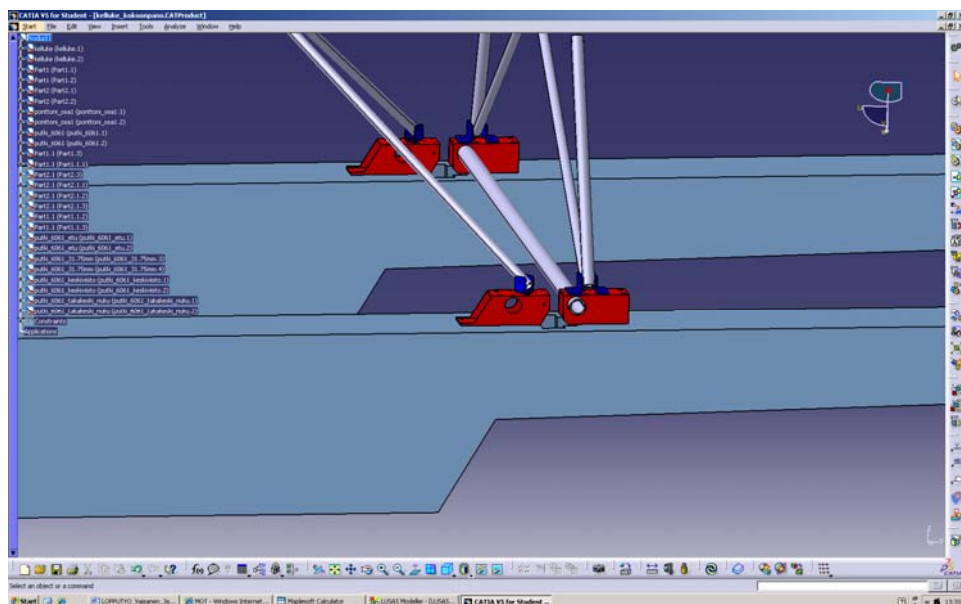
Vaakaputken reikien pintapainetta vähentämiseksi suunniteltiin käytettävän L-korvakeita. Takimmaisiet putket voitiin kiinnittää yhteiseen korvakeeseen, sillä ne ovat lentokoneen pitkittäissuunnassa keskenään samansuuntaisia. L-korvakeet kiinnitettiin alkuperäisten kiinnikkeiden päälle (kuva 12). L-korvakeet olisivat edullisia ja helppo valmistaa teräksestä. Niiden kiinnityskohtaa voitiin myös säätää helposti, jolloin painopisteen hallinta olisi helpottunut.

Viistosauvat kiinnitettiin kahdella U-korvakeella, jotka hitsattaisiin yhteen ja kiinnitettiin ruuvilla vaakaputkeen. Luovuimme kahden U-profiilin käytöstä, koska yhteen hitsatut osat eivät olisi sallineet minkäänlaista säädettävyyttä.



**Kuva 12** Pystysauvat kiinnitetty L-korvakkeilla ja viistosauvat 2xU-korvakkeilla

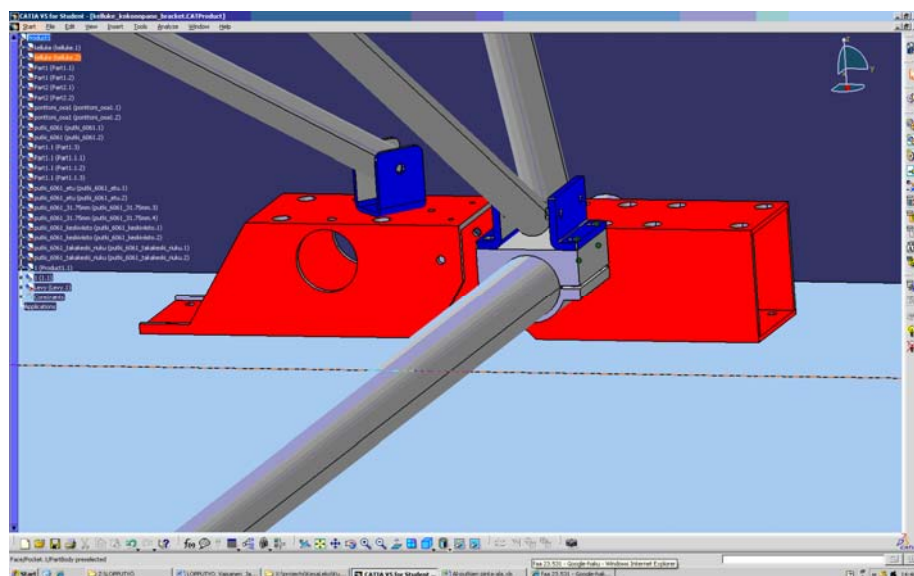
Rakennetta muokattiin ja viistoputkien korvakkeet siirrettiin keskikiinnikkeisiin (kuva 13). Näin välttyttiin hitsisaumojen tekemiseltä ja vaakaputkiin ei tarvinnut tehdä reikiä. Myös viistoputken korvakkeen rakenteesta saatiin näin yksinkertaisempi ja sen kulma oli säädettävissä kiinnitysruuvien avulla.



**Kuva 13** Pystyputket kiinnitetty L-korvakkeilla ja viistoputket U-korvakkeilla

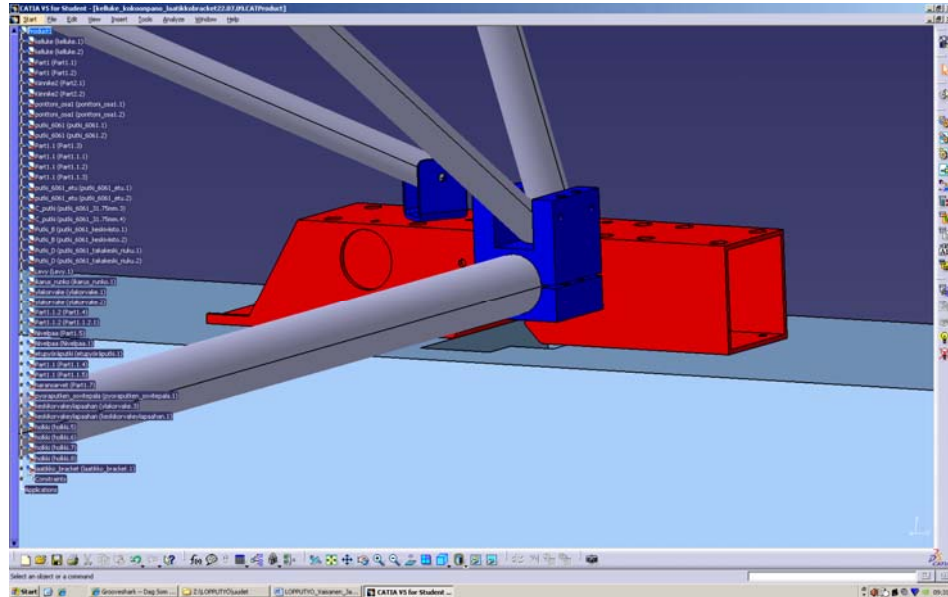
Kuvan 13 mukainen kiinnitys on kuitenkin säädettävyyden kannalta todella huono. Lentokoneen ja ponttonien välinen kulma on määritetty viiteen asteeseen, ja sen tarkka mittaaminen ja säätäminen aiheuttivat sen, että takaristikon rakennetta oli muutettava säädettäväksi. Kulman säätö tapahtuu jo asennusvaiheessa. Päälaskutelineet on kiinnitettävä ponttonien vaakaputkeen, jolloin koneen keulaa nostamalla siiven ja ponttonien välinen kulma voidaan mitata ja säätää oikeaksi. Säädettävyys helpottaisi koneistuksen ja asennuksen vaatimia toleransseja, mutta kustannukset nousisivat hieman. Ilman säädettävää takakiinnitystä rakennetta olisi kuitenkin lähes mahdotonta asentaa oikeaan kulmaan.

Takaristikossa päädyttiin säädettävään kannattimeen, jossa pystysauvat ovat L-korvakkeilla kiinni (kuva 14). Kannatin ja korvakkeet kiristettiin kiristysliitoksella vaakaputkeen neljän ruuvin avulla. Vaakaputkeen tuleva kiinnike on painon säästämiseksi kannattavaa valmistaa alumiinista, jolloin kiinnikkeen ja teräksisen L- kappaleiden välille syntyi galvaanisen korroosion vaara.



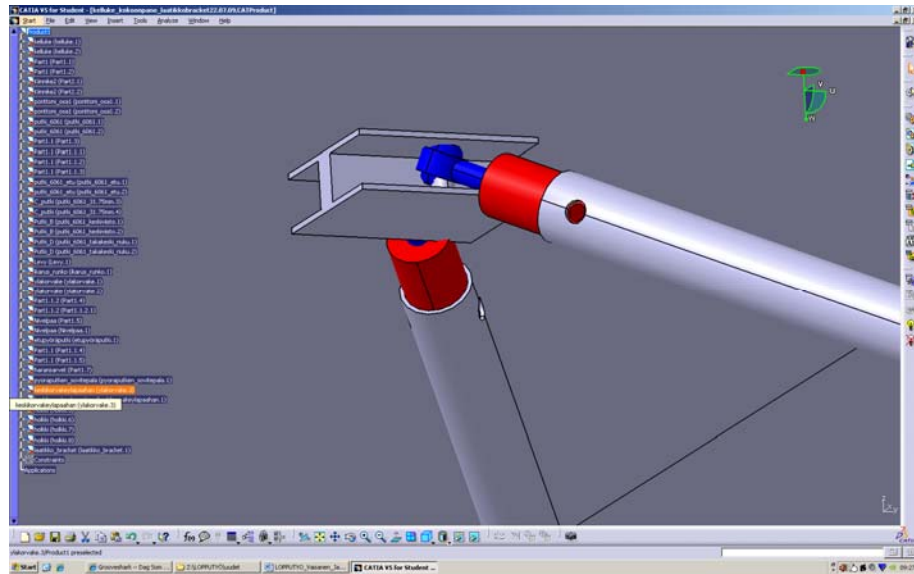
**Kuva 14** Kannattimen päälle kiinnittyvät takaputket

Korvakkeet päätettiin koneistaa suoraan kannattimeen, jolloin valmistus yksinkertaistui ja korroosiovaaraa ei ollut. Näin saavutettiin myös tarvittava säädettävyys (kuva 15).



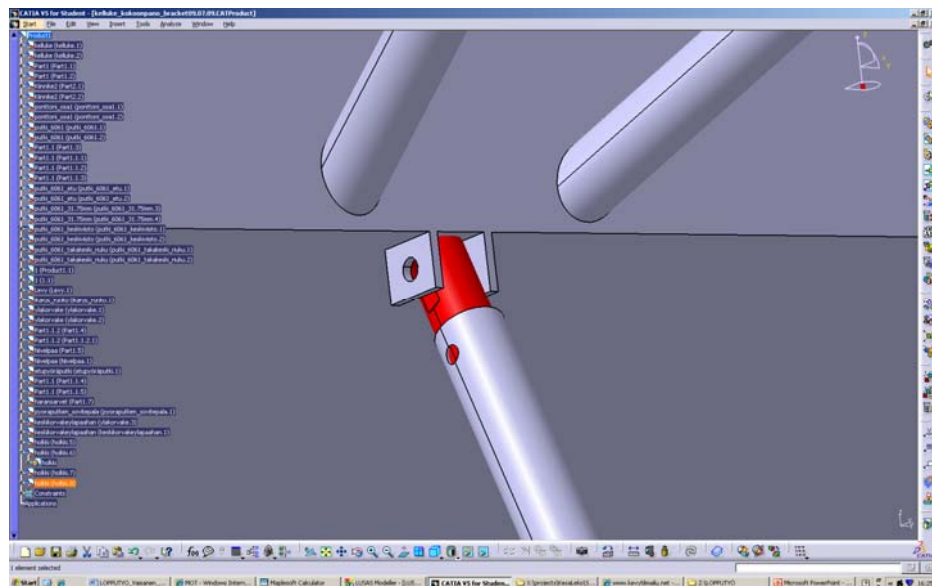
**Kuva 15** Yksinkertaistettu kannattimen rakenne

Sauvojen kiinnitys koneen korvakkeisiin toteutettiin erilaisten sovitekappaleiden avulla. Kiinnitysrakenteen suunnittelukriteerinä oli lähinnä koneessa olevat korvakkeet. Rakenteen säädettävyyden takia ja kokoonpanon helpottamiseksi viistosauvojen yläpään kiinnitykset eivät voi olla kiinteitä ruuviliitoksia. Yläpäät kiinnitettiin lentokoneen korvakkeisiin nivelpäillä, jotka sallivat sauvan ja korvakkeen olevan eri kulmassa. Putket kiinnitettiin nivelpäihin soviteholkkien avulla, ja holkeissa oleva kierreosa salli pituussuuntaisen säädön (kuva 16). Nivelpään tahaton kiertyminen estettiin lukitusmutterin avulla.



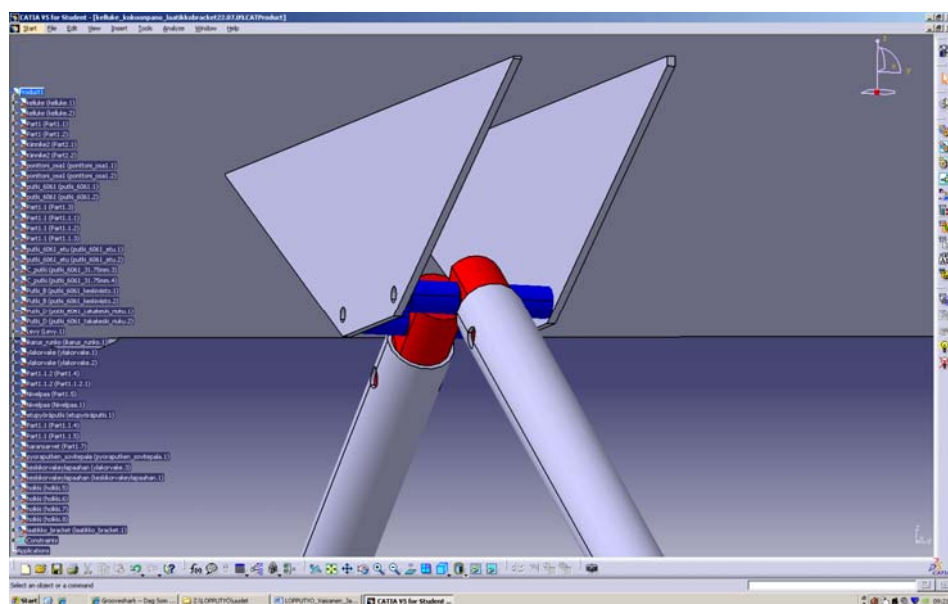
**Kuva 16** Viistosauvan kiinnitys koneen korvakkeeseen säädettävällä nivelpäällä

Takaristikossa olevien pystysauvojen yläpäihin sorvattiin kavennusholkki, jotta se olisi sopiva koneen korvakkeeseen (kuva 17). Sovite oli edullista valmistamaa 6063-T5 alumiinitangosta, johon jyrättiin kavennus molemmille puolille.



**Kuva 17** Pystysauvojen yläpään sovitekappale

Koneen keskikorvakkeet ovat niin etäällä toisistaan, että kiinnitykseen on tehtävä T-kappale. Suuren välin takia kiinnitysruuville tuli suuri taivutus, joten kappaleen on oltava riittävän jäykkä, jotta kiinnitysruuville ei syntyisi taivuttavaa voimaa. Kiinnitys oli helppo toteuttaa yhtenäisellä T-kappaleella, mutta sen valmistus oli monimutkaista. Taivutus oli estettävä paksuseinämaisillä holkeilla, jotka aiheuttivat taivutuksen sijaan vetojännityksen kiinnitysruuville (kuva 18).

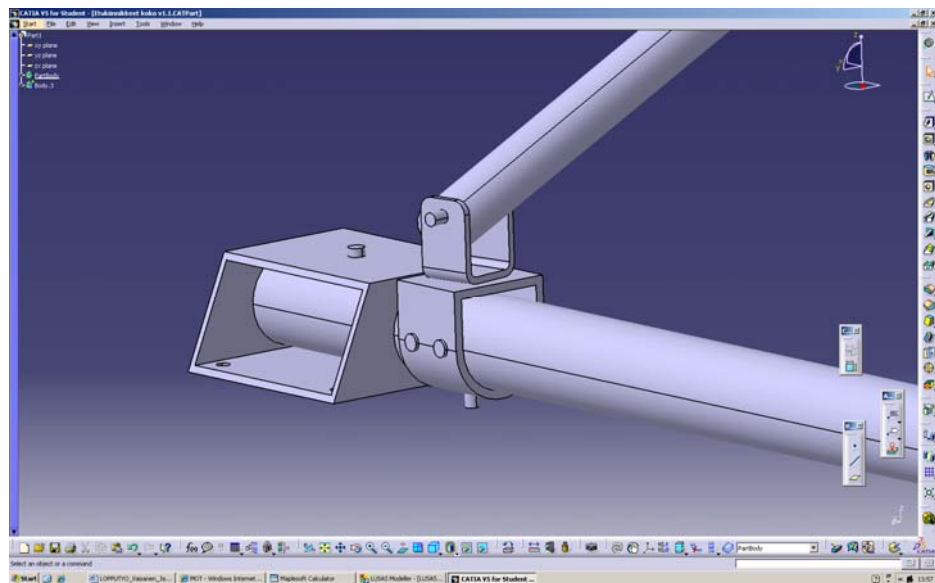


**Kuva 18** Keskisauvojen kiinnitys koneen korvakkeeseen

#### 4.5 Etukiinnityksen vaihtoehdot

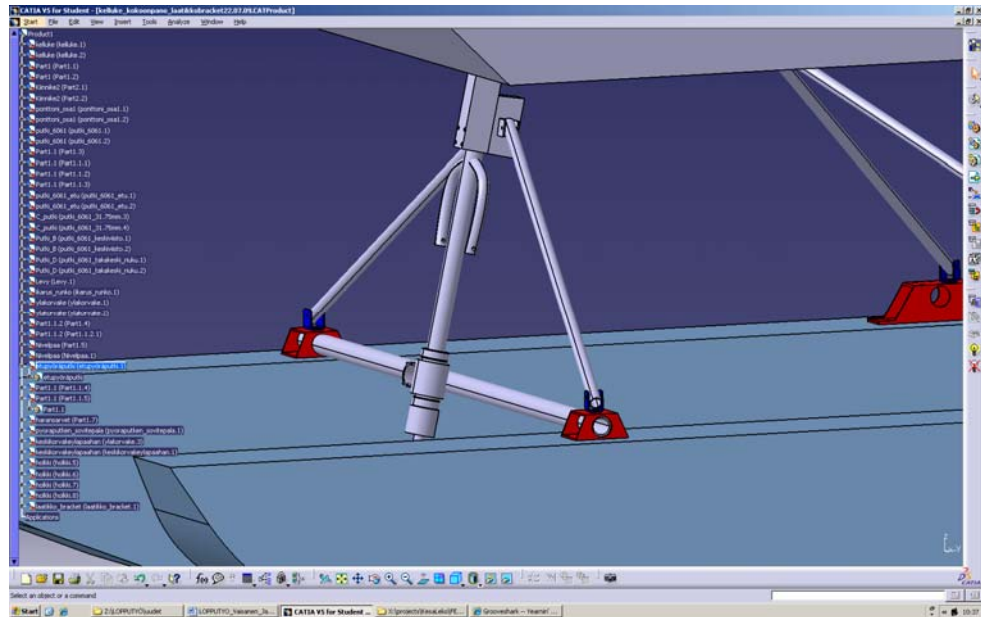
Valmistaja oli suunnitellut eturistikossa käytettävät kiinnikkeet, korvakkeet ja uuden ohjattavan etulaskutelineen. Uusi etulaskuteline kiinnitettiin yläpäästä väliholkilla vanhaan telineeseen ja keskeltä etummaiseen vaakaputkeen, jolloin nokkapyörän ohjattavuus säilyi. Vaihtoehtona oli myös, että uusi nokkapyörä asennettaisiin alkuperäisen tilalle, mutta se konstruktio olisi edellyttänyt liian suuria koneen keulatilan purkutoimenpiteitä.

Valmistajan suunnitelmien mukaan eturistikon viistosauvojen kiinnitys tehtäisiin kiinnikkeen päälle tulevalla korvakeella. Sitä ei kuitenkaan pystyisi säätämään, ja sauvojen koneistaminen olisi todella tarkkaa. Kiinnittämällä korvakkeet vaakasauvaan kuvan 19 mukaisesti, etutelineen korkeutta ja viistoputkien kulmaa voitiin säätää siirtämällä korvakkeita putken suuntaisesti.



**Kuva 19** Eturistikon viistosauvojen kiinnitys vaakasauvaan

Viistosauvat päätettiin kiinnittää valmistajan suunnittelemissa U-korvakeilla ja kiinnikkeillä (kuva 20), koska U-korvakeiden kiinnitys kiinnikkeisiin ruuveilla oli yksinkertaisinta ja edullisinta. Näin välttyttiin monimutkaisen korvakkeen valmistamiselta, ja vaakaputkeen ei tarvinnut porata heikentäviä reikiä. Käyttämällä alkuperäisiä korvakkeita saatiin valmistuskustannuksia ja valmistusaikaa saatiin laskettua. Jos koelentojen jälkeen ilmeni säädön tarvetta eturistikossa, viistosauvat vaihdettaisiin kokonaan uusiin.

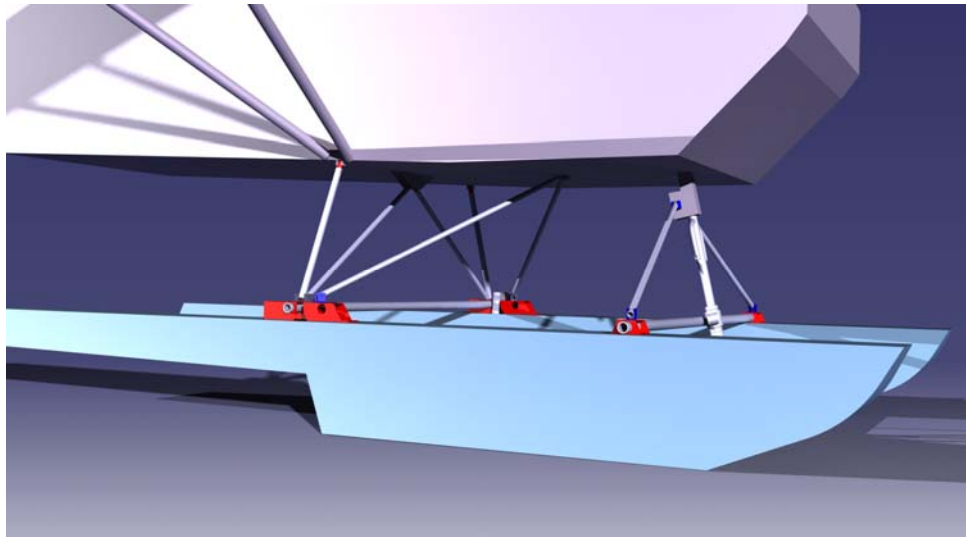


Kuva 20 Eturistikon kiinnitysratkaisu

#### 4.6 Suunnittelun loppuasetelmat

Esisuunnittelussa täytyi huomioida paljon erilaisia näkökohtia ja tehdä niiden pohjalta toimivia ja yksinkertaisia ratkaisuja. Esisuunnittelussa saavutettiin kaikki suunnittelun lähtökohdissa asetetut vaatimukset. Osat pystyttiin koneistamaan yleisellä työpajalla, materiaalit koneistusta varten hankittiin Suomesta, korroosiovaara ei ollut suuri ja rakenne oli riittävän yksinkertainen kokoonpanoa varten. Amfibiokellukkeen kiinnitysrakenteesta saatiin myös kokonaisuudessaan edullinen.

Huolellisen esisuunnittelun jälkeen lopullinen konstruktio alkoi hahmottua ja jokaiselle mahdollisesti käytettävälle rakenteen osalle tehtiin lujuuslaskelmat, jolloin voitiin selvittää, millaisella mitoituksella suunniteltu rakenne tai yksittäinen osa on riittävän kestävä. Lopullinen kiinnitys rakenne on esitetty kuvassa 21.



**Kuva 21** Esisuunnittelussa saavutettu lopullinen konstruktio

## 5 LUJUUSTARKASTELU

### 5.1 Catia- ja FEM – mallintaminen

Piirustuksia tehdään nykyään pääasiassa tietokoneavusteisilla ohjelmilla, kappale mallinnetaan kolmiulotteeseen maailmaan ja sen pohjalta projisoidaan kappaleiden konepiirustukset. Tässä projektissa hyödynnettiin yleisesti lentokonetekniikassa käytössä olevaa Catia- mallinnusohjelmaa, joka on Ranskalaisen Dassault Systèmes'n valmistama. Osien mallintamisen jälkeen pystyttiin tekemään myös kokoonpanoja eri vaihtoehtoista, joista oli helppo havaita eri konstruktioiden edut ja haitat.

Osia mallinnettiin Catia -mallinnusohjelmalla, josta osat siirrettiin FEM-lujuustarkastelua varten LUSAS-ohjelmistoon. FEM-lyhenne tulee sanoista Finite Element Method. LUSAS on englantilainen lujuuslaskentaohjelmisto, joka hyödyntää lujuuslaskennassa osittaisdifferentiaaliyhtälöryhmän likimääräistä ratkaisua. Menetelmä perustuu tietokoneisiin, jotka tekevät mahdolliseksi suurten numerolaskumäärien käsittelyn kohtuullisessa ajassa /6/. Kaikille laskutelineistikon osille tehtiin yksilöllinen lujuustarkastelu.

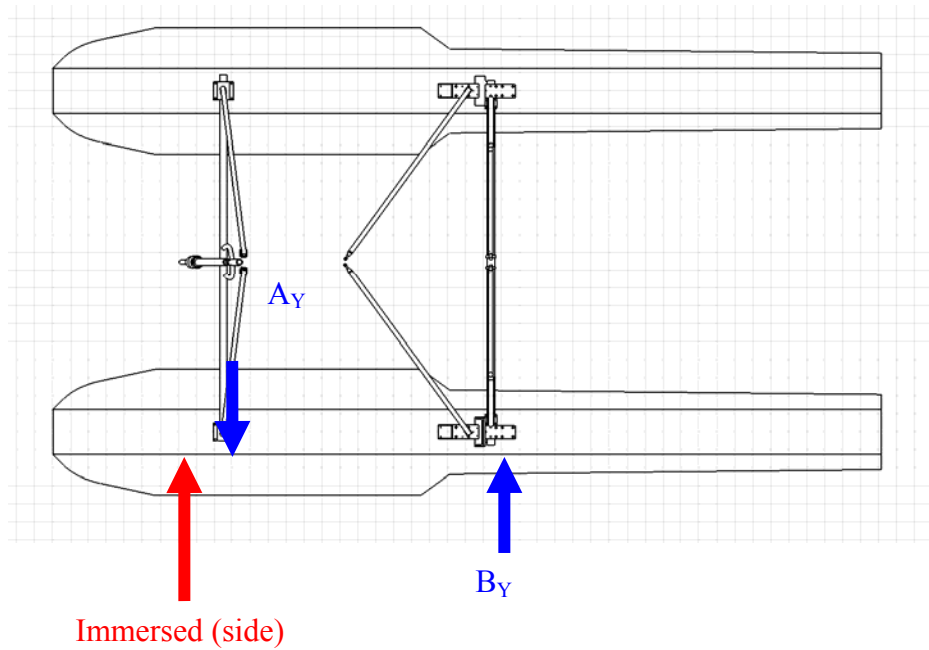
Lujuuslaskuja lasketaan pääosin tietokoneohjelmien avulla, mutta yksikertaisten laskujen tekeminen on kuitenkin nopeampaa tehdä perinteisillä käsilaskumenetelmillä. Tämän projektin ruuvien leikkausjännitykset, ruuvien kiristysmomenttien, reikien pintapaineen ja sauvojen nurjahdusjännitysten tarkastelut on tehty käsilaskumenetelmin. Ilman hyviä tietokoneohjelmistoja tarkkojen mallien ja lujuuslaskujen tekeminen monimutkaisista rakenteista olisi lähes mahdotonta. Monimutkaisissa rakenteissa lujuustarkastelut olisivat paisuneet kohtuuttoman suuriksi laskettaessa käsin.

## 5.2 Kuormien jakautuminen

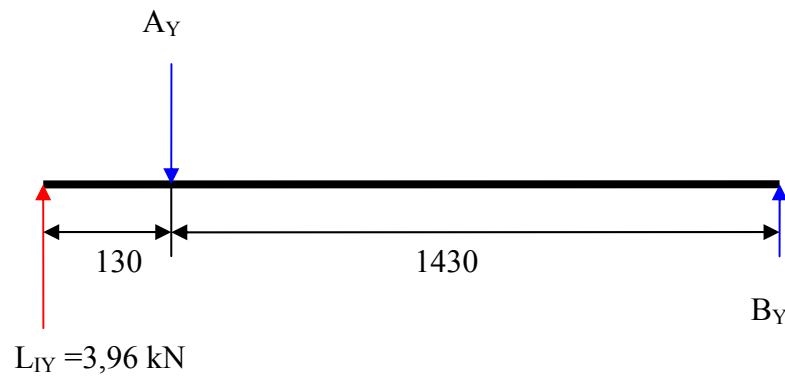
Ilmailumääräysten mukaiset kuormitukset jakaantuvat kellukkeen etu- ja takakiinnikkeille riippuen kuormittavan voiman suuruudesta ja kohdasta. Statiikan avulla suurimmat kuormitukset saadaan laskettua kullekin kellukkeen kiinnikkeelle. Kellukkeen etummainen kiinnike nimetään A-kiinnikkeeksi ja takimmainen B-kiinnikkeeksi. Kuormitustilanteissa käytetään kuormitusten x-, y- ja z-komponentteja, ja jokainen suunta lasketaan omana kuormitustilanteena.

Ainoastaan immersed loading -tilanne aiheuttaa sivu- ja pitkittäissuuntaisia komponentteja. Suurimmat komponentit ovat sivusuunnassa  $L_{IY} = 3,96$  kN ja pitkittäissuunnassa  $L_{IX} = 4,97$  kN. Oletetaan, että takaristikon viistosauvat ottavat kaikki pitkittäissuuntaiset voimat, koska ne ovat ainoat sauvat jotka ovat riittävän saman suuntaisia vaikuttavaan voimaan nähden.

Kuvan 22 mukaisen sivusuuntaisen voiman jakautuminen etu- ja takakiinnikkeille saatiin laskettua statiikan avulla. Kuormittavan voiman ja vastavoimien täytyy olla yhtä suuret, jotta kuormitustilanne pysyy tasapainossa. Sivusuuntainen kuormitus vaikuttaa 130 mm etukiinnikkeen etupuolella, ja takakiinnike on 1430 mm päässä etukiinnikkeestä (kuva 23).



**Kuva 22** Kellukkeisiin vaikuttavan sivusuuntaisen voiman sijainti



**Kuva 23** Sivusuuntaisen voiman jakautuminen etu- ja takakiinnikkeille

Tästä voitiin laskea momentti A-kiinnikkeen suhteen, jolloin saadaan ratkaistua B-kiinnikkeelle aiheutuva voima.

Momentti A-kiinnikkeen suhteen:

$$3,96 \text{ kN} \cdot 130 \text{ mm} + B_Y \cdot 1430 \text{ mm} = 0$$

$$B_Y = \frac{-3,96 \text{ kN} * 130 \text{ mm}}{1430 \text{ mm}} = -0,36 \text{ kN}$$

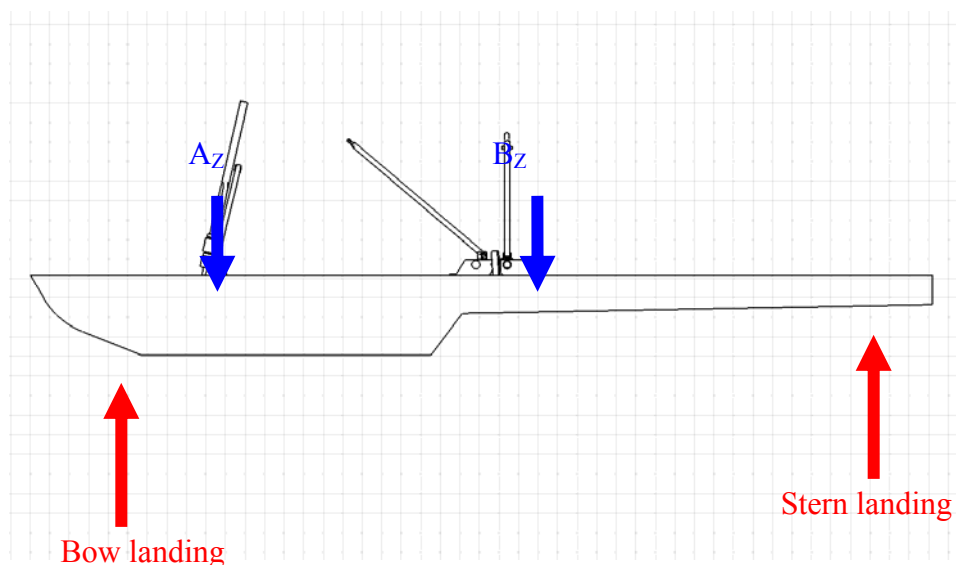
A-kiinnikkeeseen vaikuttava voima saatiin tasapainoyhtälöstä:

$$3,96 \text{ kN} + 0,36 \text{ kN} - A_Y = 0$$

$$A_Y = 3,96 \text{ kN} + 0,36 \text{ kN} = 4,32 \text{ kN}$$

Näin ollen suurimmat etu- ja takakiinnikkeisiin sivusuunnassa vaikuttavat voimat olivat  $A_Y = 4,32 \text{ kN}$  ja  $B_Y = -0,36 \text{ kN}$ .

Statiikan avulla saatiin laskettua myös pystysuuntaisten voimien jakautuminen etu- ja takakiinnikkeille eri tilanteissa (kuva 24). Suurin kuormitus Bow landing -tilanteessa syntyi A-kiinnikkeelle, jolloin  $A_Z = 11,2 \text{ kN}$  ja B-kiinnikkeelle Stern landing -tilanteessa, jolloin  $B_Z = 18,3 \text{ kN}$ .



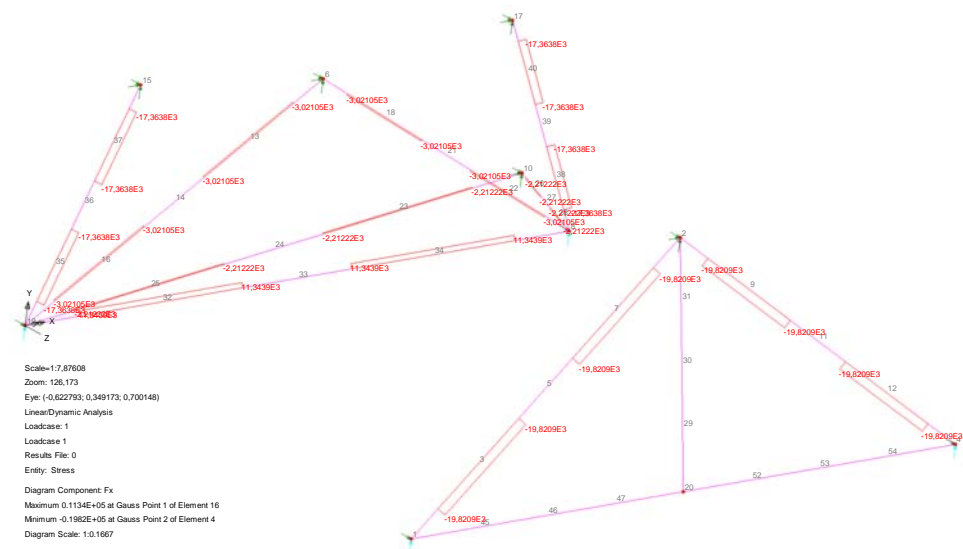
**Kuva 24** Kellukkeisiin vaikuttavien pystysuuntaisten voimien sijainti

### 5.3 Laskutelineeristikon kuormitukset

Laskutelineeristikkoo kuormitettiin kuhunkin kiinnikkeeseen tulevalla suurimmalla määräysten mukaisella kuormituksella. Sauvoihin kohdistuvia normaalivoimia laskettiin LUSAS-ohjelmistoon tehdyn mallin avulla. Valittu ristikkorakenne mallinnettiin pisteiden ja viivojen avulla, jotka mallintavat laskutelineeristikkoon tulevia putkia. LUSAS-malli tuettiin koneen korvakkeiden kohdalta, ja kuormitukset määritettiin kuhunkin kiinnikkeeseen. Ristikkomallia kuormitettiin kaikista kuormitussuunnista erikseen, sivu-, pysty- ja pitkittäissuunnassa.

LUSAS-mallista saatiin sauvoissa vaikuttavat normaalivoimat, joiden perusteella määritettiin putkien koot. Normaalivoimista saatiin myös laskettua kiinnikkeisiin ja korvakkeisiin vaikuttavien voimakomponenttien suuruudet, jolloin niitä voitiin tarkastella yksittäisinä kappaleina.

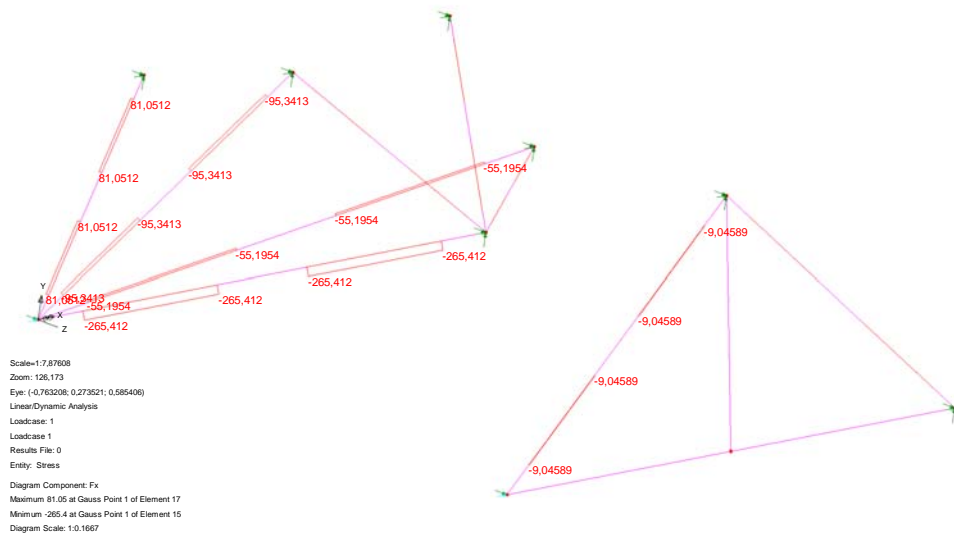
Kuvassa 25 ristikkoo on kuormitettu pystysuuntaisesti, etukiinnikettä 11,2 kN ja takakiinnikettä 18,3 kN voimalla.



**Kuva 25** Pystysuuntaisesta kuormituksesta aiheutuvat sauvojen normaalivoimat

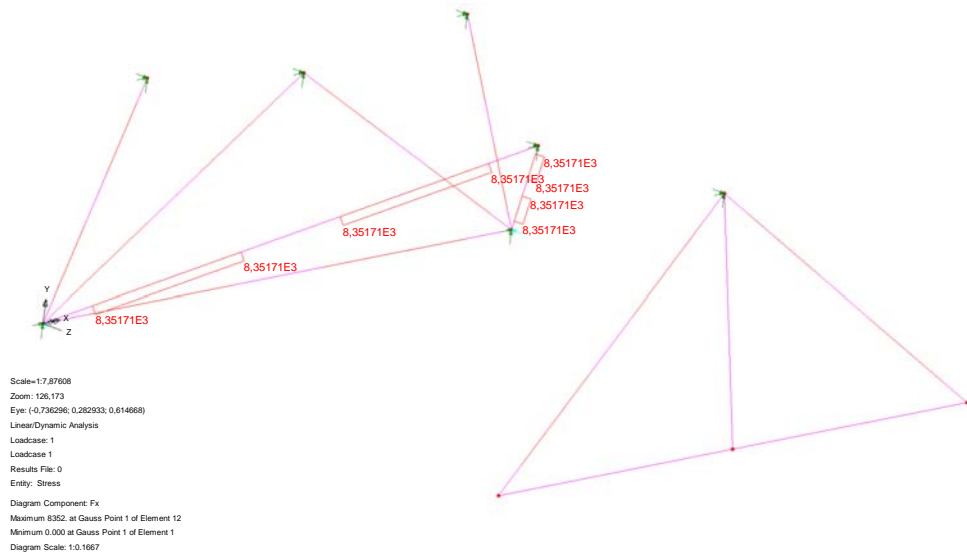
Pystysuuntainen kuormitus aiheuttaa eturistikon viistoasuvoille 19,8 kN normaalivoiman. Takaristikon vaakasauvalle se aiheuttaa 11,3 kN, pystysauvoille 17,4 kN, keskisauvoille 3,2 kN ja viistosauvoille 2,2 kN normaalivoiman. Eturistikon vaakasauva on taivutuspalkki ja siihen syntyi 15,9 kN normaalivoima. Vaakasauvan taipumasta johtuen eturistikon pystysauvaan kohdistuvat voimat olivat vähäiset.

Kuvassa 26 ristikko on kuormitettu sivuttaissuuntaisesti, etukiinnikettä 4,32 kN ja takakiinnikettä 0,36 kN voimalla.



**Kuva 26** Sivuttaissuuntaisesta kuormituksesta aiheutuvat sauvojen normaalivoimat

Sivuttaissuuntainen kuormitus aiheuttaa eturistikon viistoasuvoille 9 N normaalivoiman. Takaristikon vaakasauvalle 265 N, pystysauvoille 81 N, keskisauvoille 95 N ja viistosauvoille 55 N normaalivoiman. Eturistikon vaakasauvaan syntyi 4,30 kN normaalivoima.



**Kuva 27** Pitkittäissuuntaisesta kuormituksesta aiheutuvat sauvojen normaalivoimat

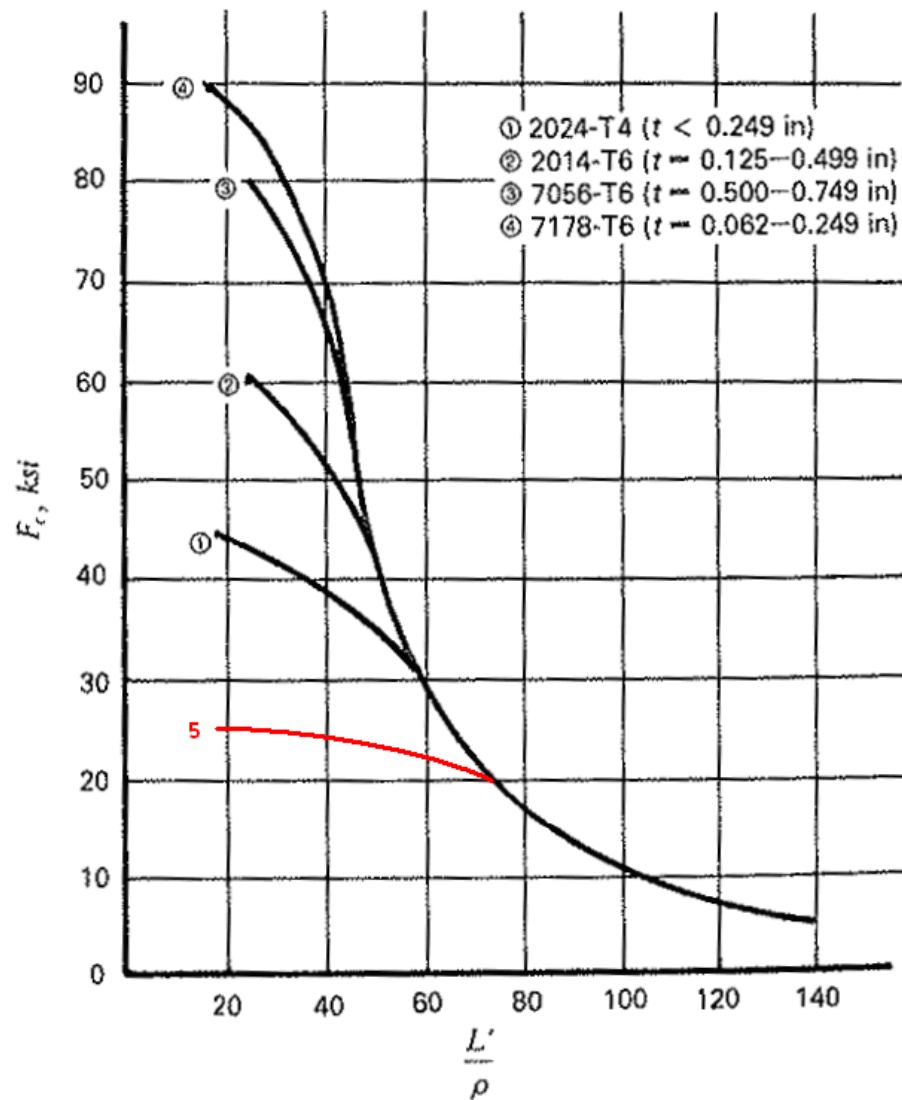
Pitkittäissuuntaisen kuormituksen sauvoille aiheuttamia normaalivoimia tarkastellessa ristikköä kuormitettiin 4,9 kN voimalla (kuva 27), jolloin viistosauvoihin syntyi 8,4 kN normaalivoima.

Tarkasteluissa havaittiin, että suurimmat normaalivoimat syntyivät pystysuuntaisten kuormitusten vaikutuksesta. Eturistikkoa kuormittavan voiman suuruus oli pienempi, mutta rakenteesta johtuen suurin normaalivoima syntyi eturistikoon. Takaristikossa sauvoja oli enemmän, jolloin voima jakautui tasaisemmin. Eturistikon viistosauvoille syntyi 19,8 kN ja takaristikon pystysauvoille syntyi 17,4 kN normaalivoimat. Näitä normaalivoimia käytettiin mitoituskriteerinä putkien kokoja valittaessa. Takaristikon keski- ja viistosauvojen mitoitus kriteerinä käytettiin viistosauvoille syntyvää suurinta kuormitusta 8,4 kN.

## 5.4 Sauvojen lujuustarkastelu

Ristikon lujuuslaskennassa tarkasteltiin rakenteeseen kohdistuvia voimia elementtimenetelmällä LUSAS-ohjelmistoa käyttäen. Rakenteiden raja-arvot lasketaan lujuusopin peruskaavoilla. Sauvojen lujuuslaskennassa tarkastelun kohteina olivat putkien nurjahdusvoimien laskenta ja korvakekiinnitysten reikien pintapaineen laskenta. Nurjahdusvoimien laskennan yhteydessä tarkasteltiin, tapahtuuko putken nurjahdus elastisesti palautuen alkuperäiseen muotoonsa kuormituksen poistuttua vai plastisesti aiheuttaen putkeen pysyvän muodonmuutoksen. Kiinnitysreikien pintapaineen kesto havaittiin putkien lujuustarkastelussa kriittisemmäksi kuin putkien nurjahdus.

Aksiaalisesti keskeisesti kuormitetun suoran sauvan suora tasapainomuoto kuormitusta hitaasti lisättäessä muuttuu tietyllä kuormituksen arvolla stabiilista labiiliksi, eli vakaasta horjuvaksi. Tätä kuormitusarvoa sanotaan kriittiseksi kuormitukseksi tai nurjahduskuormitukseksi. Laskuissa pyritään karkeasti ottamaan huomioon sauvan mahdollinen esikaarevuus, puristuksen pieni epäkeskisyys ja pienillä hoikkuusluvun arvoilla myös esijännitykset. Kuvassa 28 on esitetty alumiinien nurjahdusjännitys  $\sigma_n$  hoikkuusluvun  $\lambda_n$  funktiona. Kuvaajasta selviää hoikkuusluvun perusteella, tapahtuuko nurjahdus elastisesti vai plastisesti. Näin saadun fiktiivisen kriittisen jännityksen suhteen tehdään mitoitus. /18/



**Kuva 28** Nurjahdusjännitys  $\sigma_n$  hoikkuusluvun  $\lambda_n$  funktiona yleisimmille alumiini seoksille /16/

Projektissa käytettävän 6036-T5 alumiiniseoksen nurjahduskäyrää ei ole esitetty kuvassa 28, joten se täytyi arvioida materiaalin murtorajan ja hoikkuusluvun avulla. Murtoraja 6063-T5 alumiinille on 175 MPa (25 ksi), ja nurjahduskäyrä yhdistyy Eulerin nurjahdusteorian mukaiseen käyrään materiaalin myötörajan perusteella lasketulla hoikkuusluvulla. Hoikkuusluku lasketaan kaavan 1 avulla /17/,

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{\sigma_n}} \quad (1)$$

jossa E = materiaalin kimmokerroin

$\sigma_n$  = materiaalin murtoraja

Sijoittamalla arvot kaavaa 1 saadaan hoikkuusluvuksi:

$$\lambda_n = \sqrt{\frac{\pi^2 70000MPa}{140MPa}} = 70,2$$

6063-T5 alumiinin nurjahdus muuttuu kimmoiseksi, kun hoikkuusluku ylittää arvon 70.

## Etusauvat

Suurin jännitys kohdistuu kuormitusten jakautumisen mukaan eturistikon viistosauvalle, jonka nurjahdusjännitys lasketaan kaavalla (4) /17/.

Nurjahdusjännityksen laskemiseksi täytyi ensin selvittää putken neliömomenti, neliösäde (2) /17/ ja hoikkuusluku (3) /17/.

Neliömomenti lasketaan kaavan 1 avulla /19/,

$$I = \frac{\pi D^4}{32} \left(1 - \left(\frac{d}{D}\right)^4\right) \quad (1)$$

jossa d = putken sisähalkaisija

D = putken ulkohalkaisija

Neliösäde lasketaan kaavan 2 avulla /17/,

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (2)$$

jossa A = poikkileikkauksen pinta-ala

I = neliömomentti

Hoikkuusluku lasketaan kaavan 3 avulla /17/,

$$\lambda_n = \frac{L_n}{i} \quad (3)$$

jossa  $L_n$  = putken nurjahduspituus (jonka kerroin Euler:n 2.

nurjahdustapauksen mukaisesti on 1 /18/)

i = putken poikkileikkauksen neliösäde

Nurjahdusjännitys lasketaan kaavan 4 avulla /17/,

$$\sigma_n = \frac{\pi^2 E}{\lambda_n^2} \quad (4)$$

jossa E = materiaalin kimmokerroin

$\lambda$  = sauvan hoikkuusluku

Valmistaja on suunnitellut eturistikon viistosauvoina käytettävän 25,4 mm ulkohalkaisijaltaan olevia 6061-T6 alumiini putkia. Valmistaja on mitoittanut sauvat määräysten mukaisesti, ja niiden lujuus on riittävä.

Nurjahdusjännityksen avulla saamme selville sauvan nurjahdusvoiman, ja sitä voidaan verrata määräysten mukaisiin kuormituksiin. Sijoittamalla arvot kaavaan 1 saadaan sauvan neliömomentti:

$$I = \frac{\pi 25,4^4}{32} \left(1 - \left(\frac{22,2}{25,4}\right)^4\right) = 17018 \text{ mm}^4$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 2 saadaan sauvan neliösäde:

$$i = \sqrt{\frac{17018 \text{ mm}^4}{(\pi \cdot 12,7^2) - (\pi \cdot 11,1^2) \text{ mm}^2}} = 11,9 \text{ mm}$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 3 saadaan sauvan hoikkuusluku:

$$\lambda_n = \frac{1194 \text{ mm}}{11,9 \text{ mm}} = 100,3$$

Sijoittamalla arvot kaavaan 4 saadaan sauvan nurjahdusjännitys:

$$\sigma_n = \frac{\pi^2 \cdot 70000 \text{ MPa}}{100,3^2} = 68,67 \text{ MPa}$$

Kellukevalmistajan käyttämien putkien nurjahdusvoimaksi saadaan hoikkuusluvun avulla lasketun nurjahdusjännityksen perusteella 8240 N. Tällä nurjahdusvoimalla nurjahdus tapahtuu elastisella alueella (kuva 28), jolloin sauva palaa alkuperäiseen muotoonsa kuormituksen poistuttua.

Kuormitusten jakautumisen mukaan etusauvoille syntyy laskettua nurjahdusvoimaa suurempi normaalivoima. Valmistajan käyttämiä putkia voidaan tästä huolimatta käyttää rakenteessa valmistajan ilmoittaman kokemusperäisen tiedon perusteella /12/. Kellukkeiden valmistajan mukaan kaikki kuormitukset eivät vaikuta viistosauvoihin, vaan ne jakautuvat osittain runkoon /12/.

## Takaristikon pystysauvat

Takaristikon sauvojen lukumäärästä johtuen jännitykset jäävät alhaisemmaksi kuin etusauvojen jännitykset. Takaristikossa kuormitus jakautuu sauvoille siten, että suurin kuormitus kohdistuu uloimmille pystysauvoille.

Pystysauvoiksi valittiin ulkohalkaisijaltaan 30 mm putki, jonka seinämävahvuus on 3 mm. Putkien materiaalina on 6063-T5 -alumiini.

Pystysauvojen hoikkuusluku lasketaan kaavan 3 avulla /17/. Sijoittamalla arvot kaavaan 3 saadaan hoikkuusluvuksi  $\lambda_n = 44,613$ . Nurjahdus on kimmoton, kun hoikkuusluku on alle 70, ja nurjahdusjännitykseksi voidaan todeta kuvan 28 perusteella 165 MPa. Nurjahdusvoimaksi saadaan kuvan 28 mukaisen nurjahdusjännityksen perusteella 41,9 kN.

Nurjahdusjännitys ei osoittaudu tässä tilanteessa ratkaisevaksi tekijäksi lujuuden kannalta, sillä takaputkille syntyvä normaalivoima on kuormitusten jakautumisen mukaisesti 17,4 kN. Tässä tapauksessa lujuustarkastelu tehdään korvakkeen kiinnitysreikien pintapaineen keston perustuen.

Putket on valmistettu 6063-T5 –alumiiniseoksesta, ja ne on kiinnitetty korvakeeseen M4 ja M8-ruuveilla. Kiinnitysreikiin kuormitustilanteessa kohdistuva pintapaine lasketaan kaavan (5) /20/ mukaan,

$$N_{bru} = k_{br} \cdot \sigma_{tux} A_{br} \quad (5)$$

jossa  $N_{bru}$  = pintapaine- ja leikkausmurtokuorma

$k_{br}$  = pintapaine- ja leikkauskuorma kerroin

$\sigma_{tux}$  = materiaalin murtoraja

$A_{br}$  = reikien projisoitu pinta-ala (D\*t)

Sijoittamalla arvot kaavaa 5 saadaan kiinnitysreikiin kohdistuva pintapaine. Pintapaine- ja leikkauskuorma kerroin  $k_{br}$  saadaan lähteen /20/ kuvaajasta, jolloin  $k_{br} = 1,6$ . 6063-T5 alumiinin murtoraja  $\sigma_{tux} = 175 \text{ MPa}$  /7/.

$$N_{bru} = 1,6 \cdot 175 \text{ MPa} \cdot 2 \cdot 36 \text{ mm}^2 = 20160 \text{ N}$$

Kuormitusten jakautumisen mukaan takasauvoille syntyy 17,4 kN normaalivoima, ja alumiinin murtoraja saavutetaan laskelman mukaisesti 20,16 kN normaalivoimalla, jolloin reikien pintapaineen kesto on riittävä.

Kiinnitysreikien lujuuslaskennassa ei tarvitse ottaa huomioon putken leikkautumisteorian mukaista mitoitusta, sillä reiän sijainti putken reunasta on riittävä.

### **Takaristikon keski- ja viistosauvat**

Takaristikon keskisauvoille syntyy pystysuuntaisessa kuormituksessa 3,2 kN normaalivoima ja pitkittäissuuntainen kuormitus aiheuttaa viistosauvoihin 8,4 kN normaalivoiman. Rakenteen yksinkertaistamiseksi keski- ja viistosauvat tehdään samasta putkesta. Mitoituskriteerinä käytetään 8,4 kN normaalivoimaa.

Viistosauvaan aiheutuva nurjahdusjännitys lasketaan kaavan (4) avulla. Viistosauvojen neliömomentti (1)  $I = 15351,5 \text{ mm}^4$ , neliösäde (2)  $i = 11,8 \text{ mm}$ , hoikkuusluku (3)  $\lambda_n = 88,4$  ja nurjahdusjännitys:

$$\sigma_n = \frac{\pi^2 70000 \text{ MPa}}{88,4^2} = 88,4 \text{ MPa}$$

Viistosauvojen kestävä nurjahdusjännitys on 88,4 MPa. Sauva kestää 9,7 kN normaalivoiman, joka on mitoituskriteerin mukainen. Tällä nurjahdusvoimalla nurjahdus tapahtuu elastisella alueella (kuva 28), jolloin sauva palaa alkuperäiseen muotoonsa kuormituksen poistuttua.

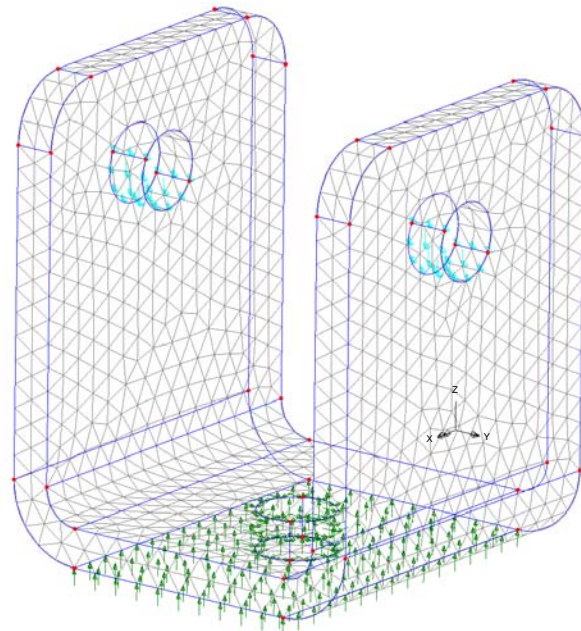
Viistosauvojen pintapaine on myös tarkasteltava. Putkien materiaali on 6063-T5 alumiinia, jonka ulkohalkaisija on  $D=25$  mm ja seinämävahvuus  $t=1,5$  mm. Kiinnitykseen käytetään M8-ruuvia. Kiinnitysreikiin kohdistuva pintapaine lasketaan kaavan (5) /20/ mukaan:

$$N_{bru} = 1,6 \cdot 175 \text{MPa} \cdot 12 \text{mm}^2 \cdot 2 = 12600 \text{N}$$

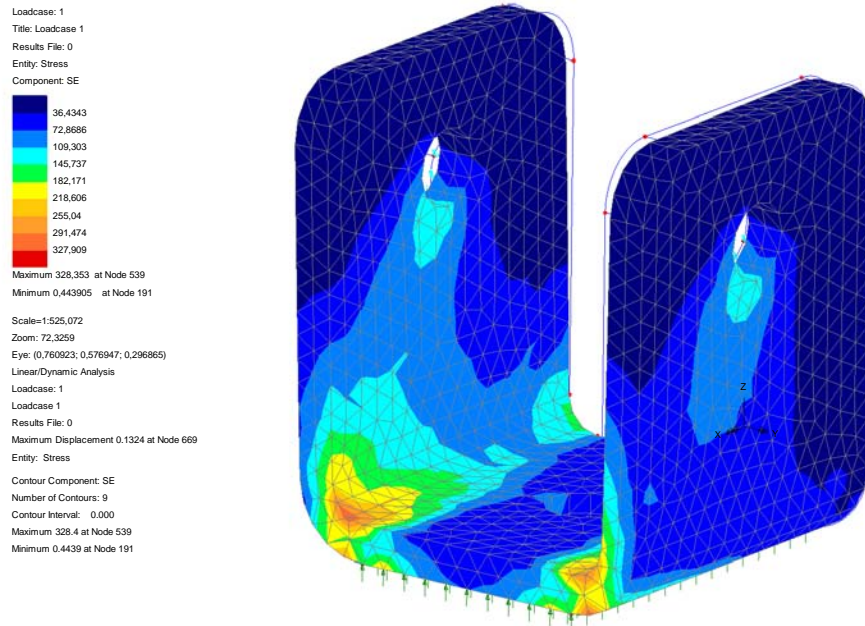
Sauvaan vaikuttaa 8,4 kN normaalivoima ja reikien pintapaineen kesto vastaa 12,6 kN normaalivoimaa, jolloin M8-ruuvia voidaan käyttää.

## 5.5 Korvakkeiden lujuustarkastelu

Etukorvakkeiden (kuva 30) lujuuslaskenta aloitettiin laskemalla Puddlejumper-rakennussarjan korvakeratkaisun lujuutta etusauvan nurjahdusvoiman perusteella lasketuilla kuormituskomponenteilla. Kuormituksen suunta on eturistikon viistosauvan suunta ja sen suuruus on 8,2 kN. Kuormituksesta laskettiin voimakomponentit pysty- ja pitkittäissuunnassa mallin kuormitusta varten. Korvakkeen materiaaliksi määritettiin ruostumaton teräs, jonka myötöraja on 355 MPa. Laskentaa varten mallille määritettiin epäsäännöllisistä tetraedrin muotoisista elementeistä koostuva TH4-elementtiverkko (kuva 29). Korvake tuettiin aitoa kuormitustilannetta vastaavasti. Kappaleen pohja esti pystysuuntaisen liikkeen ja kiinnitysruuvin reikä esti sivu- ja pitkittäissuuntaisen liikkeen. Kuvassa 29 kuormitukset on esitetty sinisillä nuolilla ja tuenta vihreillä nuolilla.



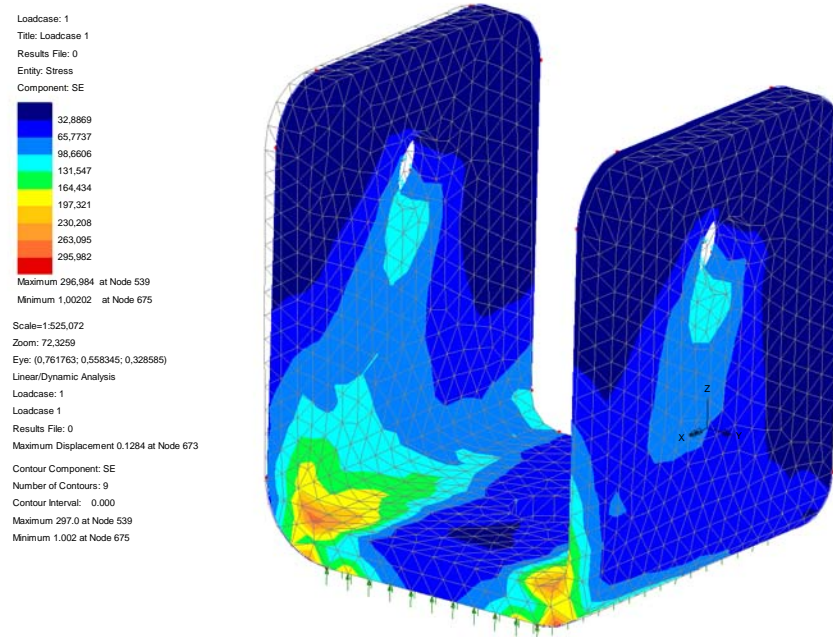
**Kuva XX** Etukorvakkeen TH4 -elementtiverkko



**Kuva 30** Etukorvakkeen jännitykset 8,2 kN resultanttikuormituksella

LUSAS mallinnus tuotti odotetun tuloksen rakenteen kestävydestä, ja kriittisimmäksi kohteeksi havaittiin korvakkeen kulmat ja pyöristyssäteet. Suurin siirtymä tapahtui korvakkeen yläosassa ja sen suuruus oli 0,13 mm, joten sen merkitys on rakenteen kannalta olematon. Syntynyt jännityshuippu oli suuruudeltaan 328 MPa ja materiaalin myötöraja on 355 MPa, joten korvakkeita voidaan käyttää valitussa rakenteessa.

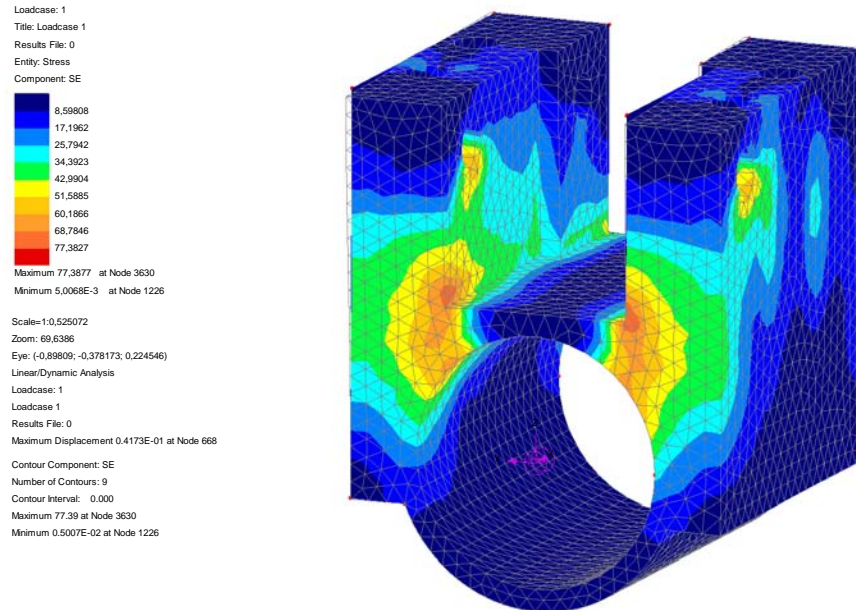
Keskikorvakkeiden (kuva 31) lujuustarkastelu toteutettiin samoin kuin etukorvakkeiden. Korvaketta kuormitettiin FAA:n määrittämällä kuormituksilla, jotka aiheuttivat takaristikon viistosauvaan 8,4 kN normaalivoiman.



**Kuva 31** Keskikorvakkeen jännitykset 8,4 kN resultanttkuormituksella

Keskikorvakkeen rakenne on samankaltainen kuin etukorvakkeen, jolloin jännityshuiput kohdistuvat sekä etu- että keskikorvakkeissa samoille alueille. Suurin siirtymä keskikorvakkeessa on 0,12 mm ja alareunan pyöristyksissä sijaitseva jännityshuippu on 297 MPa. Korvakkeen materiaalina päätettiin käyttää terästä (S355) sen hyvän saatavuuden ja työstettävyyden vuoksi.

Takaputkien kiinnitysratkaisuksi valittu ”bracket”-kannake mitoitettiin putkien päiden liikkumisvaran ja kiinnitysreikien etäisyyden rajoittamiin mittoihin eli niin pieneksi kuin mahdollista, minkä jälkeen sen lujuus todennettiin elementtimenetelmällä. Kannakkeesta tehtyä LUSAS-mallia kuormitettiin FAA:n määräysten mukaisista kuormituksista lasketuilla voimakomponenteilla.



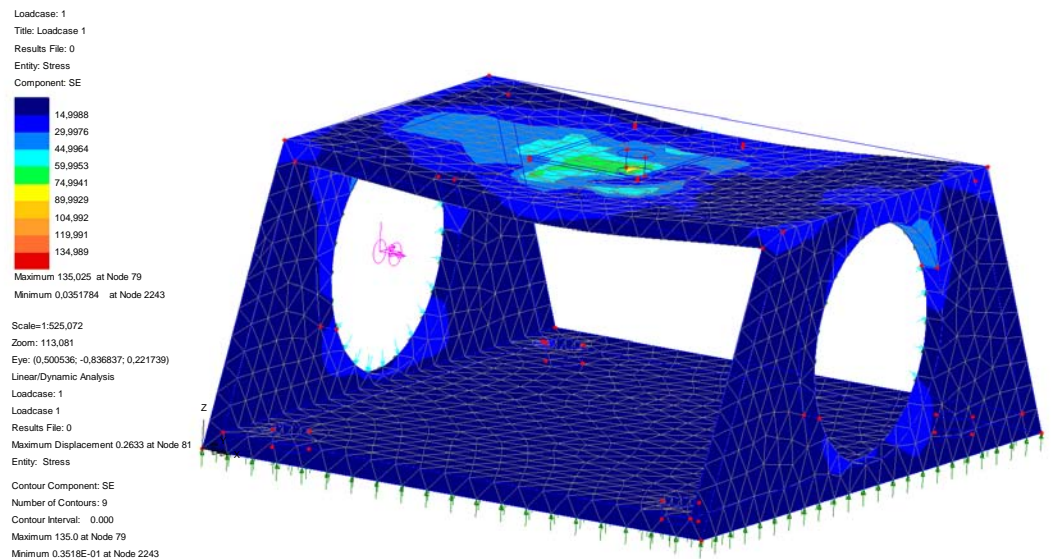
**Kuva 32** Takaputkien kiinnityksen jännitykset FAA:n määräysten mukaisilla resultanttikuormituksilla

LUSAS-mallissa kaikkien akselien suuntaiset tuennat määritettiin takakiinnikkeen kiinnitysreiälle ja kuormitukset putkien kiinnitysreiälle. Jännityshuiput syntyvät pienisäteisiin pyörityksiin ja suurin jännitys on suuruudeltaan 77 MPa. Materiaaliksi valittiin jännityshuipun perusteella helposti saatavilla oleva 6063-T5 -alumiiniseos, jonka myötöraja on 140 MPa.

## 5.6 Kiinnikkeiden lujustarkastelu

Kiinnikkeiden lujustarkastelu oli myös tarpeen, sillä osa kuormituksista jakautuu niiden varaan. Etu- ja keskikiinnikkeissä putket tukeutuvat korvakkeiden välityksellä suoraan kiinnikkeisiin, jolloin kuormitukset jakautuvat myös kiinnikkeille. Vaakaputkille tulevat kuormitukset johtuvat etu- ja takakiinnikkeissä sijaitseville putkien kiinnityskohdille. Korvakkeiden materiaali on valmistajan antamien tietojen mukaan 6063-T5 alumiinia /13/, jonka myötöraja on 140 MPa /8/.

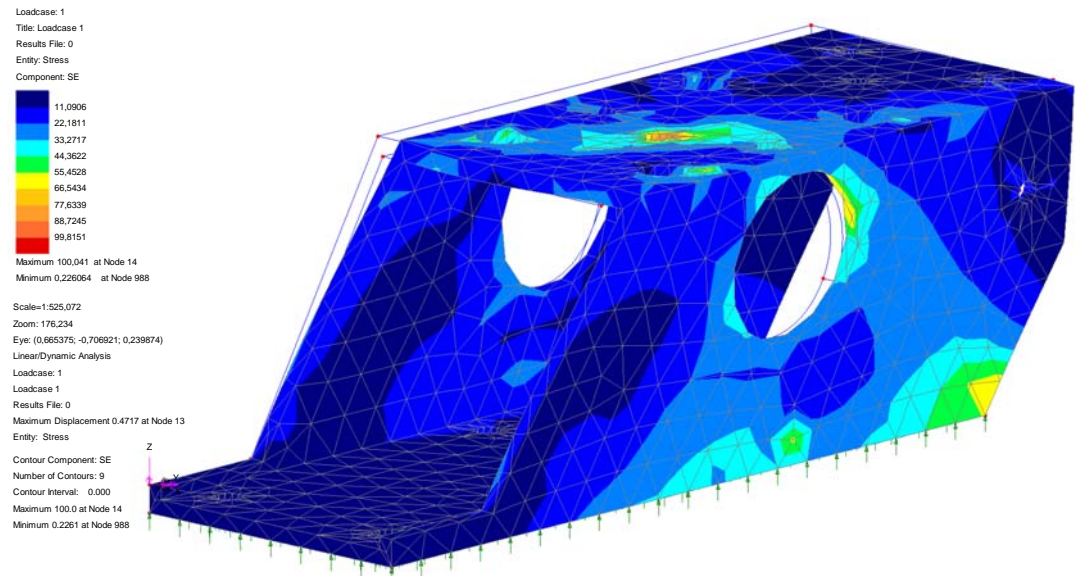
Etukiinnikkeestä tehtyä LUSAS-mallia (kuva 33) kuormitettiin etukorvakkeelle syntyvillä voimakomponenteilla, joiden resultanttivoima on 8,2 kN.



**Kuva 33** Etukiinnityksen jännitykset 8,2 kN resultanttikuormituksella

Etukiinnikkeelle muodostuva jännityshuippu on suuruudeltaan 135 MPa ja se sijoittuu korvakkeen kiinnityskohtaan. Kuvassa 33 havainnollisesti esitetty kiinnikkeen yläpinnan keskialueen siirtymä on suuruudeltaan 0,26 mm. Siirtymät ja jännitykset ovat rakenteen ja materiaalin sallimissa rajoissa.

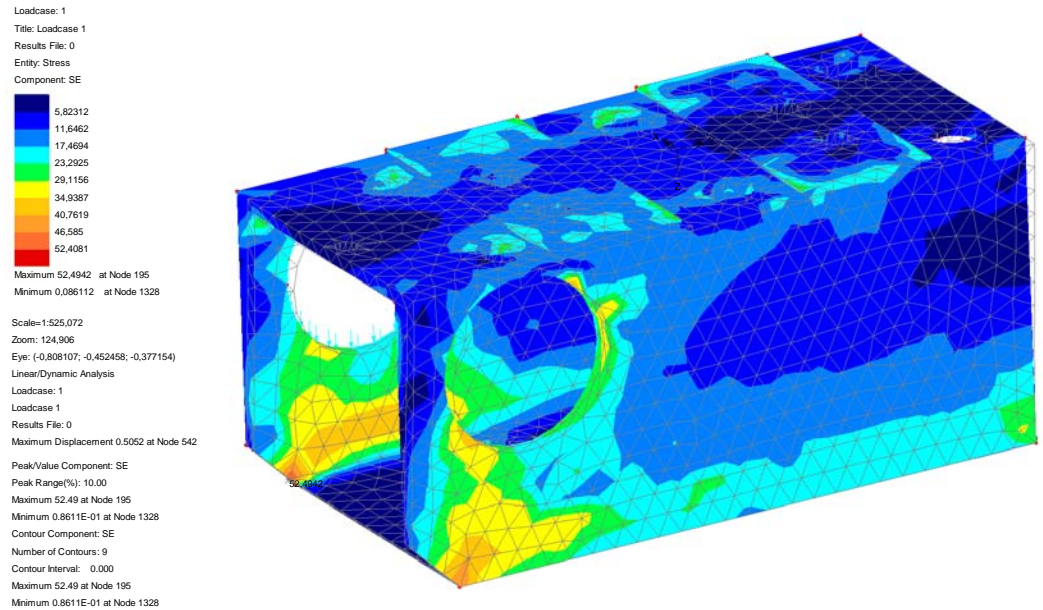
Keskikiinnikkeestä tehtyä LUSAS-mallia (kuva 34) kuormitettiin keskikorvakkeelle syntyvillä FAA:n määräysten mukaisilla voimakomponenteilla, joiden resultanttivoima on 8,4 kN.



**Kuva 34** Keskikiinnikkeen jännitykset FAA:n määräysten mukaisella resultanttikuormituksella 8,4 kN

Keskikiinnikkeelle syntyvä jännityshuippu on suuruudeltaan 100 MPa ja se sijoittuu keskikorvakkeen kiinnityskohtaan. Sivuttaissuunnassa vaikuttava voima on suuruudeltaan 7,4 kN, joka aiheuttaa kiinnikkeelle 0,49 mm sivuttaissuuntaisen siirtymän. Siirtymä on suuri muiden kiinnikkeiden siirtymiin nähden, mutta sillä ei ole vaikutusta rakenteeseen kokonaisuutena.

Takakiinnikkeestä tehtyä LUSAS-mallia (kuva 35) kuormitettiin FAA:n määräysten mukaisilla voimakomponenteilla. Takakiinnikkeissä sijaitsevan vaakaputken läpiviennin reunaa kuormittavat kannattimelta tulevat pystysuuntaiset voimat. Vaakaputken kiinnitysreikiä kuormittavaa pystysuuntaisessa kuormitustilanteessa vaakaputken muodostuva normaalivoima.



**Kuva 34** Takakiinnikkeen jännitykset FAA:n määräyksien mukaisilla resultantti kuormituksilla

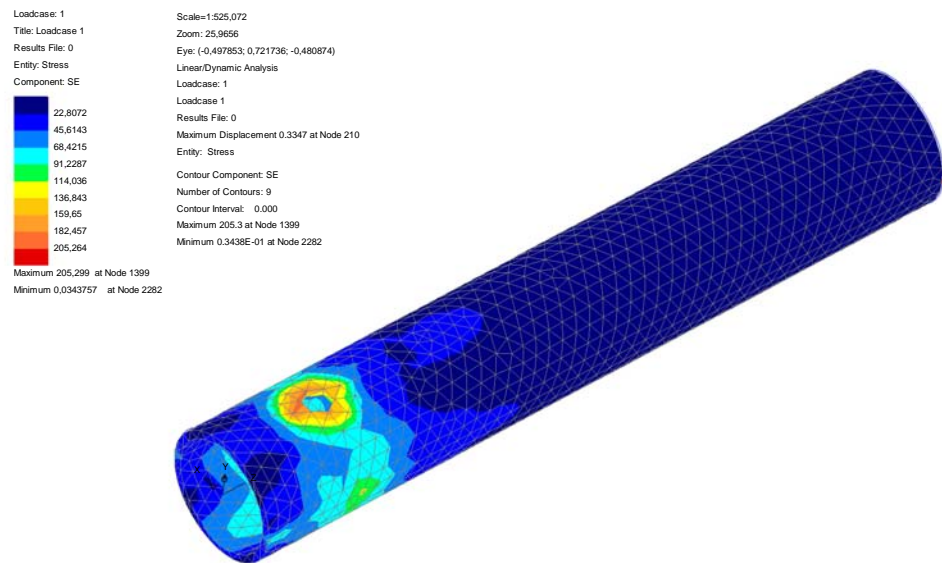
Takakiinnikkeelle muodostuva jännityshuippu on suuruudeltaan 53 MPa ja se sijoittuu vaakaputken läpiviennin kohtaan. Kiinnike kallistuu ja yläreunan siirtymän suuruus on 0,5 mm. Siirtymät ja jännitykset ovat rakenteen ja materiaalin sallimissa rajoissa.

## 5.7 Ruuvien kiristysmomentit

### Putkien kiinnitys korvakkeisiin

Ruuvien kiristysmomentin tarkastelu aloitettiin kuormittamalla kiinnitettävän putken kiinnityskohtaa LUSAS:lla. Suurin sallittu kiristysmomentti lasketaan siten, että putken litistymistä ei tapahdu.

Takaristikossa käytettävien viistoputkien kiinnitykseen käytettiin ruostumattomasta teräksestä valmistettua M8-ruuvia. Kiinnityskohtaa kuormitettiin voimalla, jonka aiheuttama jännitys oli n. 90 % alumiiniputken myötörajasta. 4 kN kuormituksella alumiiniputken jännitys oli tällöin 206 MPa (kuva 35).



**Kuva 35** Kiinnitysreiän jännitys 4 kN aksiaalisella kuormituksella

Kiristysmomentti voidaan laskea, kun tiedetään ruuville muodostuva normaalivoima, ruuvin kylkihalkaisija, kitkakerroin ja kierteen nousukulma. Tässä tapauksessa aksiaalisena voimana käytettiin voimaa, jolla putken jännitys ei ylitä 90 % myötörajasta. Tällöin ruuvin normaalivoima on 4 kN.

Käyttämällä kaavaa 6 saadaan suurin sallittu kiristysmomentti /21/,

$$M = rF \tan(\theta_s + \alpha) \quad (6)$$

jossa  $r$  = kierteen kylkihalkaisija

$F$  = normaalivoima

$\theta_s$  = kitkakerroin

$\alpha$  = kierteen nousukulma

Kierteen nousukulma saadaan laskettua kaavalla (7) /21/,

$$\tan \alpha = \frac{p}{2\pi r} \quad (7)$$

jossa  $p$  = nousu

Sijoittamalla arvot kaavaan 7 saadaan M8-ruuvien nousukulma:

$$\alpha = \frac{0,001m}{2 \cdot \pi \cdot 0,003m} = 0,053rad = 3,04^\circ$$

Kitkakerroin  $\theta_s = 0,16$  saadaan lähteen /22/ taulukosta. Laskemalla kaavalla (6) saadaan kiristysmomentiksi:

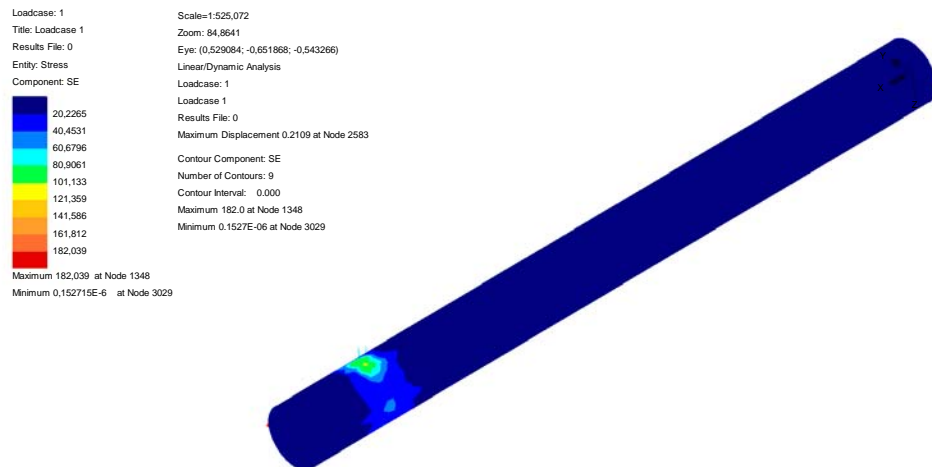
$$M = 0,003m \cdot 4000N \tan(\arctan(0,16) + 3,04) = 2,58Nm$$

Tällöin suurimmaksi sallituksi kiinnityspulttien kiristysmomentiksi tulee 2,58 Nm. M8-ruuvien kiristysmomentiksi lähteen /22/ taulukon mukaan annetaan ohjearvoksi 17 – 25 Nm, joka on mitoitettu siten, että ruuville syntynyt jännitys on 90 % ruuvien myötörajasta. Tällä menetelmällä laskettu kiristysmomentti ei aiheuta muodonmuutosta putkeen. Kiristysmomentti on kuitenkin liian pieni verrattaessa sitä ohjearvoon.

Putken seinämän litistymisen on estettävä täytepalalla. Alumiinisen täytepalan puristuslujuus on niin suuri, että ruuvi voidaan nyt kiristää lähteen /22/ antamaan ohjearvoon. Täytepala valmistetaan 6063-T5 alumiinista sen keveyden ja helpon työstettävyyden vuoksi.

### Vaakaputkien kiinnitys

Takaristikon vaakaputkien kiinnitysruuvit tulevat vaakaputkien läpi, jolloin suurin sallittu kiristysmomentti lasketaan putken litistymisen perusteella, kuten edellisessä kohdassa. Vaakaputken ulkohalkaisija  $D=42$  mm ja seinämävahvuus  $t=4,3$  mm, kiinnitykseen käytetään 5/16” ruuveja. Suurimmaksi sallituksi voimaksi vaakaputkille saadaan LUSAS:n avulla 8 kN (kuva 36), jolloin jännitys on 182 MPa.



**Kuva 36** Kiinnitysreiän jännitys 8 kN aksiaalisella kuormituksella

5/16” ruuville kierteen nousukulma saadaan laskettua kaavasta 7:

$$\alpha = \frac{0,0014m}{2 \cdot \pi \cdot 0,0038m} = 0,059rad = 3,36^\circ$$

Laskemalla kaavalla 6 saadaan kiristysmomentiksi:

$$M = 0,0038m \cdot 8000N \tan(\arctan(0,16) + 3,36) = 6,71Nm$$

Suurimmaksi sallituksi vaakaputkien 5/16” kiinnitysruuvien kiristysmomentiksi tulee 6,71 Nm.

Etu- ja keskikorvakkeiden kiinnityksessä 5/16” ruuveilla voidaan käyttää suurinta sallittua kiristysmomenttia, koska korvake kiristetään suoraan kiinnikkeeseen. Etu- ja keskikorvakkeiden suurimmaksi sallituksi kiristysmomentiksi saadaan lähteen /24/ taulukon mukaan 15,2–19,6 Nm. Takakannattimessa käytettävien M8-ruuvien suurin sallittu kiristysmomentti on lähteen /22/ taulukon mukaan 17 – 25 Nm.

### **Kiinnikkeiden kiinnitys kellukkeisiin**

Kiinnikkeiden kiinnityksessä ponttoneihin kiristysmomenttien laskennan kriteerinä on kellukkeen komposiitista koostuvan sandwich-rakenteen pintapaineen kesto. Komposiittikerrosten välissä on 10 mm balsaydin. Ydin on valmistettu tiheästä balsasta, jolloin sen puristuslujuus syihin nähden on 12 MPa /8/.

Kiinnityksessä käytettävien aluslevyjen säde  $r = 15$  mm ja kiinnitykseen käytetään 1/4” ruuveja. Käyttämällä kaavaa 8 saadaan suurin sallittu puristusvoima /23/, jolla balsaydin ei litisty.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (8)$$

jossa  $\sigma$  = jännitys

F = puristusvoima

A = pinta-ala

Sijoittamalla arvot kaavaan 8 saadaan suurin sallittu puristusvoima:

$$F = 12MPa \cdot (\pi \cdot 15^2) = 8482N$$

Laskemalla kaavoilla 6 ja 7 saadaan suurimmaksi sallituksi kiristysmomentiksi:

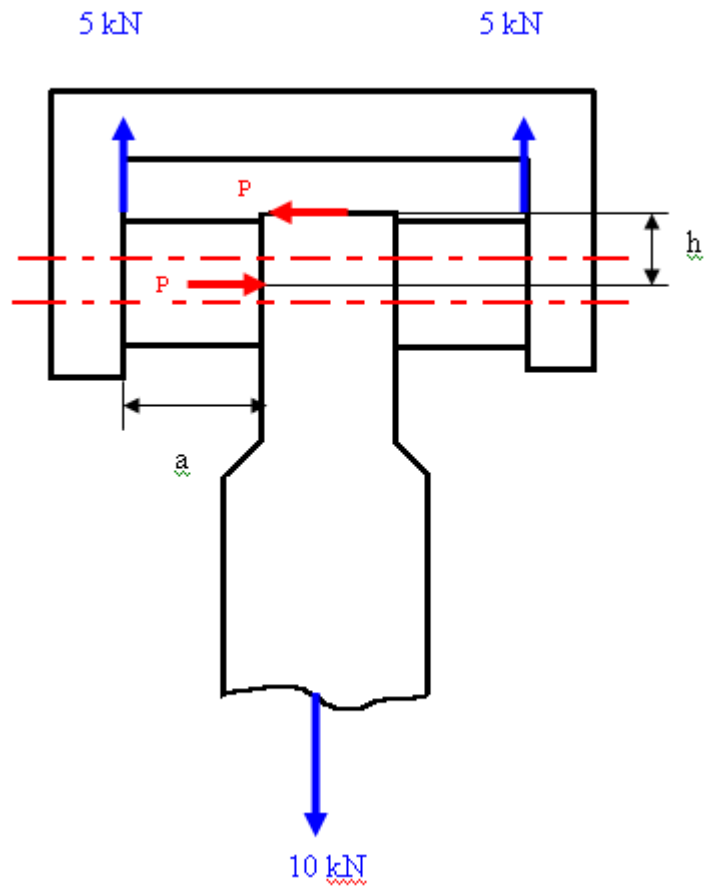
$$\alpha = \frac{0,0014m}{2 \cdot \pi \cdot 0,003m} = 0,074rad = 4,24^\circ$$

$$M = 0,003m \cdot 8482N \tan(\arctan(0,16) + 4,24^\circ) = 6,1Nm$$

Laskussa ei ole huomioitu, että 30 mm aluslevyt jakavat voimaa komposiittirakenteen pintalevyihin, jolloin pintapaine jakautuu todellisuudessa suuremmalle pinta-alalle. Pintapaineen jakautuessa suuremmalle alueelle voidaan käyttää ohjearvon mukaista kiristysmomenttia 7,2 Nm /25/.

### **Takaristikon keskiputkien kiinnitys**

Keskiputkien kiinnityksessä lentokoneen kiinnityskorvakkeen kiinnitysväli (55 mm) on suurempi kuin putken kiinnitysosien halkaisija (18 mm). Kiinnityksessä käytetään paksuseinäisiä holkkeja, jotka keskittävät putken kiinnityskorvakkeen väliin (kuva 37). Paksuseinäinen holkki vähentää kiinnitysruuvinä käytettävän M8 ruuvien taivutusta.



**Kuva 37** Takaristikon keskiputkien yläpäähän kiinnitys 10 kN kuormituksella

Ruuville muodostuva jännitys lasketaan leikkausjännityksen ja taivutusmomentin aiheuttaman normaalijännityksen avulla yhdistettynä jännityksenä. Muodonvääristymisteorian mukainen yhdistetty jännitys lasketaan kaavalla 9 /25/. Ennen yhdistetyn jännityksen laskemista selvitetään ruuville muodostuva leikkausjännitys kaavalla 11 ja normaalijännitys kaavalla 10 /24/.

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2} \quad (9)$$

$$\sigma_i = \frac{P}{A} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{Q}{A} \quad (11)$$

Taivutusmomentti M8-ruuville käytettäessä mitoiltaan  $D=12$  mm ja  $d=8$  mm  
holkkia:

$$M=5 \text{ kN} \cdot a$$

$$M=5000 \text{ N} \cdot 18 \text{ mm} = 90000 \text{ Nmm}$$

Taivutusmomentin  $M$  avulla voidaan laskea ruuville kuormitustilanteessa  
syntyvä normaalivoima:

$$M=P \cdot h$$

$$90000 \text{ Nmm} = P \cdot 6 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow P= 15000 \text{ N}$$

Ruuvien normaali jännitys kuormitustilanteessa lasketaan kaavalla 10:

$$\sigma_t = \frac{15000 \text{ N}}{50,3 \text{ mm}^2} = 298 \text{ MPa}$$

Ruuvien leikkausjännitys lasketaan kaavalla 11:

$$\tau = \frac{5000 \text{ N}}{50,3 \text{ mm}^2} = 99,5 \text{ MPa}$$

Ruuville muodostuva yhdistetty jännitys lasketaan kaavalla 9:

$$\sigma_i = \sqrt{298^2 + 3 \cdot 99,5^2} = 345 \text{MPa}$$

Ruuvien kiristysmomenttia laskettaessa täytyy ottaa huomioon kuormitustilanteessa syntyvä yhdistetty jännitys. Kiinnityksessä käytetään ISO 3506 -standardin mukaista M8-ruuvia, jonka myötöraja on 600 MPa. Ruuville muodostuva suurin jännitys saa olla 90 % myötörajasta (540 MPa), jolloin kiristysmomentin aiheuttama normaalijännitys saa olla 195 MPa.

Kiristysmomentin ruuville aiheuttama normaalivoima voidaan laskea kaavasta 10 johdetulla kaavalla:

$$P = 195 \text{MPa} \cdot (\pi \cdot 4^2) = 9802 \text{N}$$

Laskemalla kaavoilla 6 ja 7 saadaan suurimmaksi sallituksi kiristysmomentiksi

$$\alpha = \frac{0,00125 \text{m}}{2 \cdot \pi \cdot 0,004 \text{m}} = 0,049 \text{rad} = 2,85^\circ$$

$$M = 0,004 \text{m} \cdot 9802 \text{N} \tan(\arctan(0,16) + 2,85^\circ) = 8,3 \text{Nm}$$

Kiristysmomentti on ohjearvoihin nähden liian pieni, mutta lukkomutteria käytettäessä sitä voidaan pitää riittävänä. Halkaisijaltaan isomman ruuvien käyttäminen ei ole mahdollista, sillä koneen korvakkeen reikiä ei voida suurentaa.

## 6 TULOSTEN TARKASTELU JA ARVIOINTI

Tässä opinnäytetyössä käsiteltiin pääasiassa ilmailumääräysten mukaisia kuormituksia, niiden aiheuttamia voimia suunniteltuun laskutelineistikkoon ja kiinnitysrakenteen lujuustarkastelua. Saatuja tuloksia voidaan pitää luotettavina ja käyttökelpoisina, koska ne tehtiin ammattimaisesti, ilmailumääräyksiä ja lentokonetekniikan vaatimuksia noudattaen. Projektia valvoi paljon lentokonetekniikan suunnittelutyötä tehnyt lentokonetekniikan yliopettaja, Heikki Aalto.

Laskennallisesti kaikkien osien lujuuden todentaminen ei aina ollut mahdollista, kuten eturistikon suunnittelussa, jolloin oli tyydyttävä käyttämään kokemusperäistä tietoa. Kokemusperäisten arvioiden ja saatujen laskelmien sekä vertailemalla muihin vastaaviin rakenteisiin kiinnitysrakenteesta saatiin toimiva ja luontevan näköinen. Kiinnitysrakenne täytti myös kaikki ilmailumääräyksiä mukaiset lujuusvaatimukset.

Suunnittelutyötä tehtiin yhdessä ja sen hyvä toteutuminen vaati paljon kaikilta yhteistyökykyä ja kärsivällisyyttä. Henkilökohtaisen osaamisen ja tietotaidon jakaminen muille projektin jäsenille oli perusedellytys projektin jatkuvaan etenemiseen. Viikoittain pidettiin yhteisiä suunnittelupalavereita ja projektin edistymistä ja työvaiheita esiteltiin myös viikoittain projektin valvojalle. Päivittäiset työtehtävät tehtiin kahden hengen työryhmissä, jotka työskentelivät parhaalla katsomallaan tavallaan. Vähäisen suunnittelukokemuksen vuoksi projektin alussa näkyvää tulosta ei syntynyt helposti, mutta kokonaisuuden alkaessa hamottua suunnittelusta saatiin tehokasta ja johdonmukaisempaa.

Projektipäälliköllä on suuri vastuu projektin etenemisen kannalta. Projektipäällikön on pystyttävä hahmottamaan projektin kokonaiskuva ja ohjalla tarvittavat työtehtävät tasaisesti kaikille projektin jäsenille. Saatuja ratkaisuja täytyy pohtia yhdessä kaikkien kesken, jotta asia käsitellään kaikkien osa-alueiden kannalta. Tarkkojen lujuuslaskelmien tekeminen liian aikaisessa vaiheessa on turhaa, koska konstruktion muutokset vaikuttavat suuresti lopulliseen mitoitukseen. Konstruktio on ”jäädettävä” ja vasta sen jälkeen voidaan alkaa mitoittaa rakennetta tarkasti.

Kaikkia projektin tavoitteita ei kuitenkaan saavutettu, mutta saatuja amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenteen suunnitelmia Ikarus C42 -lentokoneeseen voidaan käyttää ja ne ovat onnistuneet. Niitä pystytään pienin muutoksin hyödyntämään myös muissa vastaavissa lentokoneissa. Uskon, että tulevaisuudessa kiinnitysrakenne tullaan valmistamaan ja tästä suunnitteluprojektista oppineena seuraavan projektin aloittaminen työelämässä on varmasti helpompaa.

## LÄHDELUETTELO

### Sähköiset lähteet

- 1 Kevytilmailu Ry [www-sivu]. [viitattu 22.7.2009]  
Saatavissa: [www.kevytilmailu.net](http://www.kevytilmailu.net)
- 2 Comco Ikarus GmbH [www-sivu]. [viitattu 23.7.2009]  
Saatavissa: <http://www.comco-ikarus.de/>
- 3 Jarkope Oy [www-sivu]. [viitattu 2.7.2009] Saatavissa:  
<http://www.jarkope.fi/?page=5&cat=6&id=11>
- 4 FAR Part 23 Sec 23.527 Hull and main float load factors [www-sivu].  
[viitattu 7.7.2009] Saatavissa: <http://rgl.faa.dov>
- 5 FAR Part 23 Sec 23.529 Hull and main float landing conditions [www-sivu].  
[viitattu 9.7.2009] Saatavissa: <http://rgl.faa.dov>
- 6 FAR Part 23 Sec 23.531 Hull and main float takeoff condition [www-sivu].  
[viitattu 20.6.2009] Saatavissa: <http://rgl.faa.dov>
- 6 Elementtimenetelmän perusteet [www- sivu]. [viitattu 23.7.2009]  
Saatavissa [www.amk.fi/material](http://www.amk.fi/material)
- 7 Extrusion aluminium alloy EN AW 6063-T5 [www- sivu]. [viitattu 24.7.2009]  
Saatavissa [www.metra.it/inglese/prodotti\\_industriali](http://www.metra.it/inglese/prodotti_industriali)
- 8 Solurakenteet [www-sivu]. [viitattu 26.6.2009] Saatavissa:  
[http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv\\_4\\_5\\_5.php](http://www.ims.tut.fi/vmv/2004/vmv_4_5_5.php)
- 9 Ilmailuhallinto [www- sivu]. [Viitattu 14.7.2009]  
Saatavissa: <http://www.ilmailuhallinto.fi>
- 10 Ilmailuhallinto, ilmailumääräys PEL M2-70 [www- sivu]. [Viitattu 14.7.2009]  
Saatavissa: [http://www.ilmailuhallinto.fi/files/lth/imt-pel-m/pem2\\_70.pdf](http://www.ilmailuhallinto.fi/files/lth/imt-pel-m/pem2_70.pdf)
- 11 Suomalaisten ultrakeveiden lentokoneiden huoltokäsikirja [www- sivu].  
[Viitattu 14.7.2009] Saatavissa: <http://www.civilaviationauthority.fi/files>

## **Painamattomat lähteet**

- 12 Patrick Vinet, Puddlejumper floats, [sähköpostiviesti]. [viitattu 29.6.2009]
- 13 Patrick Vinet, Puddlejumper floats, [sähköpostiviesti]. [viitattu 19.6.2009]

## **Painetut lähteet**

- 14 Ilmailumääräys AIR M5-10 26.1.2004 Ultrakevyiden lentokoneiden lentokelpoisuus, valmistus, rekisteröinti ja huolto
- 15 Ilmailumääräys AIR M5-10 Soveltamisohje N:o 9 m2 1.9.2004
- 16 Niu, Michael C.Y., Airframe structural design, Hong Kong commilit press Ltd. 1988. 126 s.
- 17 Outinen, Hannu – Salmi, Tapio, Lujuusopin perusteet. Pressus Oy. Tampere 2004. 291 s.
- 18 Outinen, Hannu – Salmi, Tapio, Lujuusopin perusteet. Pressus Oy. Tampere 2004. 289 s.
- 19 Valtanen, Esko, Tekniikan Taulukkokirja.Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 2008. 416 s.
- 20 Niu, Michael C. Y., Airframe Stress Analysis and sizing. Hong Kong Bonmilit Press Ltd, 2001. 220 s.
- 21 Bedford, Anthony – Fowler, Wallace, Engineering Mechanic Static. Uppers Saddle River. New Jersey 2008. 452 s.
- 22 Valtanen, Esko, Tekniikan Taulukkokirja.Gummerus Kirjapaino Oy. Jyväskylä 2008. 575 s.
- 23 Valmet L-90 TP Redigo Huolto-ohjekirja, 91-10-03. Tuumaisten ruuvien kiristysmomentit. 18.12.1995. 7 s.
- 24 Tekniikan Taulukkokirja, Valtanen, Esko, 16. painos, Genesis-kirjat Oy, Jyväskylä 2008, 439 s.
- 25 Tekniikan Taulukkokirja, Valtanen, Esko, 16. painos, Genesis-kirjat Oy, Jyväskylä 2008, 455 s.

## **LIITTEET**

- 1 Piirustusluettelo
- 2 Amfibiokellukkeiden kiinnitysrakenteen piirustukset