LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone

MUISTOMERKKIHÄVITTÄJÄN JALUSTAN JÄYKISTÄMINEN VÄRÄHTELYN AIHEUTTAMAN VÄSYTTÄVÄN KUORMITUKSEN POISTAMISEKSI

ELIMINATION OF WIND CAUSED VIBRATIONS FROM PEDESTAL OF MEMORIAL FIGHTER PLANE

Lappeenrannassa 16.1.2019

Joona Toikka

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaaja: TkT Timo Björk

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Joona Toikka

Muistomerkkihävittäjän jalustan jäykistäminen värähtelyn aiheuttaman väsyttävän kuormituksen poistamiseksi

Kandidaatintyö

2019

36 sivua, 19 kuvaa, 14 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaaja: TkT Timo Björk

Hakusanat: muistomerkki, tuulikuorma, lumikuorma, ominaistaajuus, tuenta

Kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia muistomerkkihävittäjän jalustassa ilmeneviä ominaistaajuuksia ja suunnitella jalustaan muutos, jonka avulla väsyttävää kuormitusta aiheuttava värähtely saadaan poistettua. Jalustalle suoritettuja mittauksia verrattiin Femapilla luotuun ja analysoituun malliin jalustasta ja sen kannattelemasta hävittäjästä. Malli todettiin tilannetta kuvaavaksi ja ratkaisun etsimistä jatkettiin kyseistä mallia muuttamalla. Analysoitavaan malliin lisättiin myös ulkoinen lumikuorma, joka vaikeutti osaltaan ratkaisun löytämistä. Olemassa olevan jalustan profiilin muuttamisesta koituvat kustannukset todettiin liian suuriksi, joten myös ulkoisen tuennan mahdollisuutta aloitettiin tutkia. Väliaikaisen tuennan tapainen a-tuki todettiin parhaimmaksi vaihtoehdoksi kustannusten ja tavoiteltujen ominaistaajuuksien nojalla. A-tuelle suoritettiin tarvittavat lujuustarkastelut, jonka jälkeen tuesta tehtiin valmistuspiirustukset työn tilaajalle. Tilaaja tulee päättämään jalustan toteutuksesta ja pystytykseen liittyvistä käytännön järjestelyistä.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Joona Toikka

Elimination of wind caused vibrations from pedestal of memorial fighter plane

Bachelor´s thesis

2019

36 pages, 19 figures, 14 tables and 2 appendices

Examiner: D.Sc. (Tech.) Timo Björk

Supervisor: D.Sc. (Tech.) Timo Björk

Keywords: memorial, wind load, snow load, natural frequency, external support

The purpose of this Bachelor´s thesis was to examine natural frequencies occurring in memorial fighter´s pedestal and to design a modification into it for eliminating the wearing load caused by vibrations. Measurements from the pedestal were compared with analysed Femap-model from the assembly. The model was stated to represent the real situation, from this point on the search of the solution was continued by modifying the model. External snow load was applied into the model. Increased force complicated the search of the solution. The costs of modifying the profiles used in the existing pedestal were stated too high so possibility of adding an external support was examined. Supporting structure similar to the temporary support was stated as a best option based on the costs and desired natural frequencies. Necessary structural analysis for the supporting structure and conceptual designs were made for the client. Manufacturing and other arrangements in construction of the support structure are left for the client to decide.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLIT JA LYHENTEET
1 JOHDANTO 6
1.1 Toteutus ja rajaus 6
1.2 Käytettävät ohjelmat 7
2 SUORITETTUJEN MITTAUSTEN ANALYSOINTI 8
2.1 Jalustalle suoritetut mittaukset 8
2.2 Jalustan ominaistaajuuksien määrittäminen 11
3 JALUSTAAN KOHDISTUVIEN KUORMITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN 13
3.1 Tuulikuorma 13
3.1.1 Rakennekerroin 13
3.1.2 Voimakerroin 13
3.1.3 Puuskanopeuspaine 14
3.1.4 Rakenteen tuulenpaineen vaikutusala 15
3.2 Lumikuorma 16
3.2.1 Muotokerroin 16
3.2.2 Tuulensuojaisuus- ja lämpökerroin 18
3.2.3 Ominaisarvo 18
3.3 Rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset kuormitukset 19
4 SUUNNITTELUVAIHE 20
4.1 Erilaisia versiota ominaistaajuuksien kasvattamiseksi 21
4.2 Rakenteen muuttaminen tarvittavien ominaisuuksien saavuttamiseksi 25
5 TUENNAN TOTEUTUS 28
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET 34
LÄHTEET 35
LIITTEET
Liite I: Lasketa, a-tuki
Liite II: Valmistuspiirustukset

SYMBOLIT JA LYHENTEET

a	hitsin a-mitta [mm]
$A_{ref,s}$	kappaleen referenssipinta-ala lumikuormalle [m^2]
$A_{ref,w}$	kappaleen referenssipinta-ala tuulikuormalle [m^2]
C_e	tuulensuojakerroin
C_t	lämpötilakerroin
$c_e(z)$	tuulen altistuskerroin korkeudella z
c_f	tuulikuorman voimakerroin
$c_s c_d$	tuulenpaineesta ja värähtelystä johtuva rakennekerroin
E	kimmomoduuli [GPa]
F_{palkki}	yksittäiseen palkkiin kohdistuva voima [N]
F_s	lumikuorma [N]
F_w	tuulikuorma [N]
F_{weld}	hitsiin kohdistuva voima [N]
f	ominaistaajuus [Hz]
f_u	murtolujuus [MPa]
G_{yht}	kokonaisvoima [N]
I	profiilin jäyhyys [mm^4]
K	palkin tuennasta riippuva vakio nurjahduspituuden selvittämiseksi
k	jousivakio
L	palkin pituus [mm]
l_{eff}	hitsin tehollinen pituus [mm]
m	kappaleen massa [kg]
P_{cr}	kriittinen nurjahduskuorma [N]
$q_p(z)$	puuskanopeuspaine korkeudella z
s_k	maanpinnan lumikuorman ominaisarvo [kN/m^2]
v_{b0}	tuulennopeuden modifioimaton perusarvo [m/s]
v_b	tuulennopeuden perusarvo [m/s]
z_0	maastoparametri
α	katon kaltevuuskulma [°]
β_w	materiaalin lujuuskerroin
γ_{m0}	materiaalin osavarmuuskerroin
γ_{m2}	materiaalin osavarmuuskerroin hitsissä
μ_i	kappaleen muotokerroin
ρ_i	ilman tiheys [kg/m^3]

FEM	Finite Element Method
K-SIMY	Kaakkois-Suomen ilmailumuseoyhdistys ry

1 JOHDANTO

Kaakkois-Suomen ilmailumuseoyhdistys ry:n (K-SIMY) tilojen edustalle toimitettiin kesällä 2017 jalusta Folland Gnat-103 -suihkuhävittäjälle. Jalustassa ilmenneestä valmistusvirheestä johtuen hävittäjä jalustoineen pääsee värähtelemään tuulen vaikutuksesta. Pystypalkki on hitsattu väärään asentoon, jolloin jalustan painopisteen sijainti muuttuu eikä koneen massa enää kohdistu suunnitellusti kiinnityspisteeseen. Tuulen aiheuttama värähtely altistaa rakenteen poikki- ja pystypalkkien välisen hitsisauman väsyttävälle kuormitukselle. Värähtelyn jatkuessa hitsiin voi muodostua väsymisvaurioita, jotka ajan kuluessa aiheuttavat jalustan romahtamisen. Hävittäjä jalustoineen onkin väliaikaisesti tuettu ylimääräisillä tuennoilla rakenteen etuosasta.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on suunnitella jalustarakenne uudelleen joko kokonaan, vaadittavilta osin tai vahvistamalla olemassa olevaa rakennetta. Rakenteen alimmat ominaistaajuudet ovat tällä hetkellä lähellä tuulen herätetaajuutta, joka altistaa rakenteen suuriamplitudiselle värähtelylle oikeissa olosuhteissa. Ominaistaajuuksia voidaan muuttaa lisäämällä tai vähentämällä rakenteen massaa sekä muuttamalla tukirakenteen jäykkyyttä, mikä voidaan toteuttaa myös jalustan tuentojen lisäämällä. Näillä keinoilla saavutetaan tarvittava muutos ominaistaajuuksissa ja luodaan ero tuulen herätetaajuuteen. Keventäminen ei tässä tapauksessa ole mahdollista. Jalusta on jo nyt äärimmäisen kevytrakenteinen ja sen kannattelemaa hävittäjää, joka on jo riisuttu moottorista ja muista rungon sisäisistä osista, ei ole mahdollista keventää enempää. Nykytilassaan punnittu kone painaa noin 1150 kg. Vaihtoehdoiksi jalustarakenteen muuttamiselle jäävät tukirakenteiden lisääminen tai nykyisen tukirakenteen jäyhyyden kasvattaminen profiilien kokoa suurentamalla tai esimerkiksi betonilla täyttämällä.

1.1 Toteutus ja rajaus

Työ suoritetaan tutkimalla syksyllä 2017 jalustalle tehtyjä mittauksia, joita verrataan elementtimenetelmällä, Finite Element Method (FEM), suoritettuun analyysiin jalustasta. Jalustan vaatimat muutokset suunnitellaan suoritettujen mittausten ja analyysien perusteella. Työ rajataan sisältämään ominaistaajuuksien määrittämisen, jalustan muutosten suunnittelun ja valmistuspiirustuksien laatimisen. Työssä käytettävien FEM-mallien ominaisuudet ja dimensiot on määritelty aiemmin, eikä niihin koneen osalta tässä työssä puututa.

1.2 Käytettävät ohjelmat

Mittausdata käsitellään Microsoft Excel 2016-ohjelmalla muotoon, josta rakenteessa ilmenevät ominaistaajuudet on nähtävissä. Analysoitavat rakenteet mallinnetaan ja tarkastellaan Siemensin FEMAP v11.4.0:n avulla. Toteutettava rakenne mallinnetaan ja valmistuspiirustukset luodaan SolidWorks 2017 -suunnitteluohjelmalla. Rakenteeseen kohdistuvat voimat analysoidaan Mathcad 15 -laskentaohjelman avulla.

2 SUORITETTUJEN MITTAUSTEN ANALYSOINTI

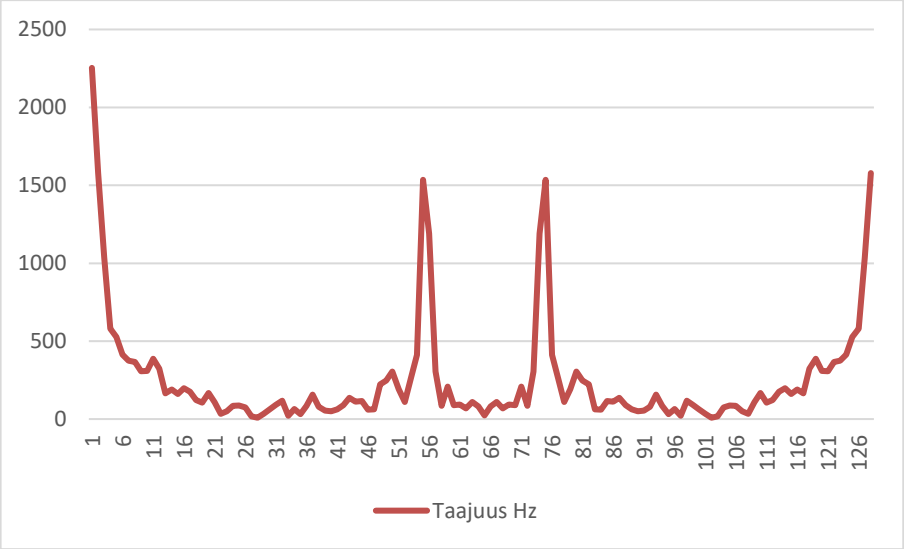
Kesällä 2017, heti jalustan toimittamisen jälkeen, huomattiin rakenteen reagoivan herkästi sille annettuun herätteeseen. Herätteen saatuaan jalusta aloittaa väsyttävää kuormitusta aiheuttavan värähtelyn. Jalustalle suoritettiin syksyllä 2017 mittauksia ominaistaajuuksien selvittämiseksi. Vertaamalla mittausten tuloksia jalustasta luodun FEM-mallin ominaistaajuuksiin voidaan varmentaa analysoitavan mallin paikkansa pitävyys ja jatkaa ongelman käsittelyä FEM-mallia muokkaamalla.

2.1 Jalustalle suoritetut mittaukset

Suoritetuissa mittauksissa rakenteen alimmat ominaistaajuudet pyrittiin selvittämään jalustaan kiinnitettyjen venymäliuskojen avulla. Rakenteelle annettiin heräte, joko jalustan suuntaisesti, kohtisuoraan koneeseen nähden tai pystysuunnassa alaspäin. Herätteenä mittauksissa käytettiin tasapainoasemaa poikkeuttavaa voimaa. Heräte aiheutettiin vetämällä jalustaa autolla ja vapauttamalla veto äkillisesti kun tavoiteltu voima saavutettiin. Pystysuuntainen värähtely saatiin aikaiseksi roikuttamalla laboratorioinsinööriä etulaskutelineestä. Venymäliuskojen avulla kerättiin data rakenteen värähtelyn aiheuttamista rasituksista jalustassa. Poikkeuttava voima saattaa rakenteen värähtelemään voiman suuntaa vastaavalla vapausasteella. Kerätylle datalle suoritetaan Fourierin analyysi, jonka avulla selvitetään rakenteen ominaistaajuudet mittausta vastaavalla vapausasteella. Mittaustulokset yhdistämällä saadaan selville rakenteessa ilmenevät ominaistaajuudet kolmella päävapausasteella, jolloin tulokset kuvaavat hyvin todellisuutta.

Jalustaan asennettujen kolmen venymäliuskan tuottama data analysoidaan käsittelemällä jokainen niistä tapauskohtaisesti erikseen Fourierin analyysin mukaan. Fourierin analyysin avulla alkuperäinen signaali muokataan taajuusmuotoon, jolloin grafiikassa näkyvät huiput ilmentävät rakenteen ominaistaajuuksia. Kuvaajaan piirtyy myös useita pienempiä huippuja, joihin vaikuttaa esimerkiksi koejärjestelyt, eikä näitä voida olettaa totuudenmukaisiksi. Huipuista parhaiten erottuvat valitaan kuvaamaan valmiissa rakenteessa esiintyviä ominaistaajuuksia. Pitkittäistä värähtelyä tutkittiin kuvan 1 mukaisesti vetämällä jalustaa autolla palkkien välisestä kulmatuennasta 300 kg:n suuruisella voimalla. Venymäliuskoilla kerätty data analysoitiin ja kyseisessä tapauksessa kaikki liuskat ilmensivät taajuuksille samat arvot. Liuskan 1 arvojen perusteella piirretty kuvaaja ilmaisee taajuudet kaikkein selvimmin, graafi esitettynä kuvassa 2.

Kuva 1. Käytetty laitteisto pitkittäissuuntaisen herätteen luomiseksi.

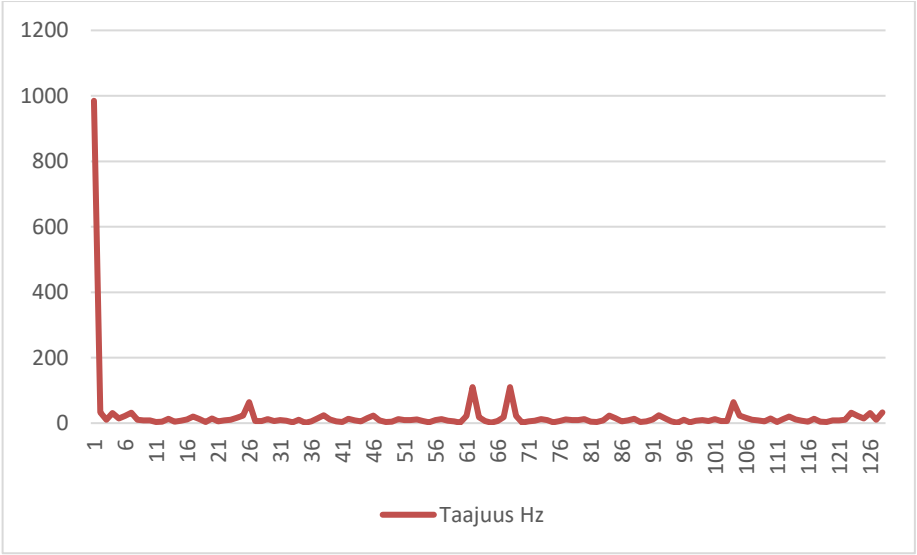


Kuva 2. Pitkittäisen värähtelyn ilmaisemat ominaistaajuudet

Poikittaisen värähtelyn ominaistaajuudet selvitettiin vastaavin keinoin. Jalustaa poikkeutettiin edellisten kokeiden tapaan vetämällä autolla etulaskutelineestä 300 kg voimalla. Tällä kertaa veto kohdistettiin kohtisuoraan poispäin koneesta. Venymäliuskoista saatiin selkeästi näkymään vain 1 Hz ominaistaajuus.

Rakenteen pystysuuntainen värähtely aiheutettiin irrottamalla noin 100 kg painoinen laboratorioinsinööri etulaskutelineestä, kuva 3. Venymäliuskojen arvoille suoritettujen Fourierin analyysien avulla saatiin selkeitä kuvaajia jalustan värähtelystä. Ensimmäisen ja toisen liuskan kuvaajat vastasivat lähes täydellisesti toisiaan. Toisen liuskan kuvaaja esitettynä kuvassa 4. Ominaistaajuuksiksi voidaan olettaa parhaiten erottuneet 1 Hz, 61 Hz ja 67 Hz.

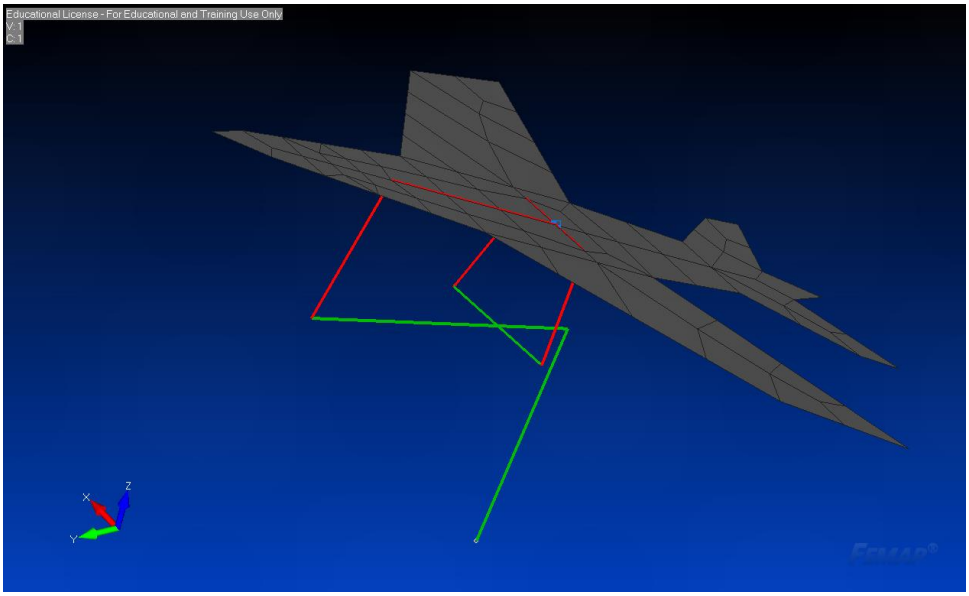
Kuva 3. Pystysuuntaisen herätteen toteutus.



Kuva 4. Pystysuuntaisen värähtelyn ominaistaajuudet

2.2 Jalustan ominaistaajuuksien määrittäminen

Rakenteen ominaistaajuudet määritetään yhdistämällä mittausten avulla saadut eri vapausasteiden ominaistaajuudet yhteen. Näitä taajuuksia verrataan Alexei Yanchukovichin luoman FEM-mallin, kuvassa 5, ominaistaajuuksiin. Malli ei huomioi jalustaan kohdistuvia ulkoisia kuormia, kuten ei myöskään rakenteelle suoritetut mittaukset. Mikäli mitatut ominaistaajuudet vastaavat analyysin rakenteelle ilmoittamia ominaistaajuuksia, voidaan Yanchukovichin FEM-malli todeta tilannetta kuvaavaksi ja jatkaa jalustan suunnittelua kyseessä olevaa mallia hyödyntäen.



Kuva 5. Yanchukovichin alkuperäinen FEM-malli nykyisestä jalustasta.

Mittausten ja FEM-mallin ominaistaajuudet esitettynä taulukossa 1. Eroavaisuudet taajuuksissa, menetelmien välillä, johtuvat muun muassa mittauksien ja graafien tulkinnan epätarkkuuksista. Selvästi mitattuja ja analysoituja taajuuksia erottaa ainoastaan mitattu 54 Hz:n ominaistaajuus, joka erottui ensimmäisissä mittauksissa selvänä huippuna. Tästä huolimatta menetelmien välillä on nähtävissä selvä yhteys. Yanchukovichin FEM-mallia voidaan käyttää jalustan uudelleensuunnittelun lähtökohtana, sillä analyysin ominaistaajuudet vastaavat rakenteesta paikan päällä mitattuja taajuuksia.

Taulukko 1. Jalustassa ilmenevät ominaistaajuudet.

Järjestys	Taajuudet, FEM-malli (Hz)	Mitatut taajuudet (Hz)
1	0,80	1,0
2	0,85	
3	1,23	
4	3,91	3,0
5	4,96	5,0
6	9,22	10,0
-	-	54,0
7	67,22	62,0
		68,0
8	111,22	75,0
9	118,41	118,0
10	126,79	126,0

3 JALUSTAAN KOHDISTUVIEN KUORMITUSTEN MÄÄRITTÄMINEN

Rakenteeseen vaikuttavien tuuli- ja lumikuormien selvittämiseksi tarkastellaan standardeja SFS-EN 1991-1-4+AC+A1 ja SFS-EN 1991-1-3+AC+A1. Tarkoituksena on todeta aiemmassa Juuso Raitilan kandidaatintyössä määritettyjen tuuli- ja lumikuormien todenmukaisuus, jotta kyseisiä arvoja voidaan käyttää FEM-mallissa tarvittavien muutosten selvittämiseksi.

3.1 Tuulikuorma

Rakenteeseen vaikuttava tuulikuorma F_w määritetään standardin SFS-EN 1991-1-4 yhtälön 5.3 mukaisesti. Yhtälössä 1 $c_s c_d$ on tarkasteltavan kappaleen rakennekerroin, c_f on rakenteen voimakerroin, $q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine nopeuspainekorkeudella z_e ja $A_{ref,w}$ rakenteen tuulenpaineen vaikutusala.

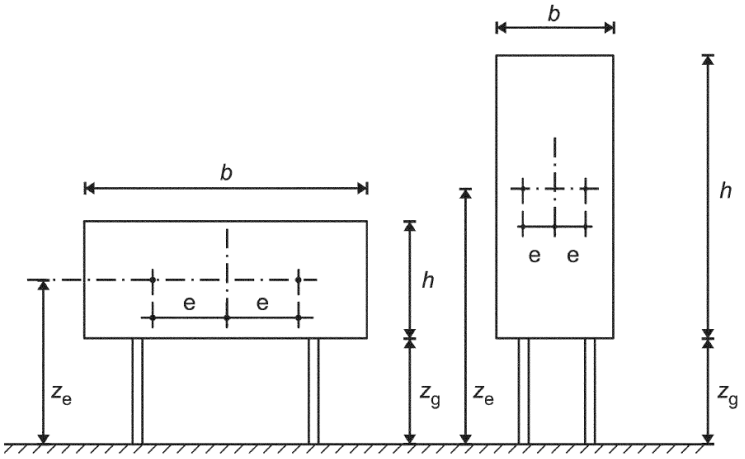
$$F_w = c_s c_d * c_f * q_p(z_e) * A_{ref,w} \tag{1}$$

3.1.1 Rakennekerroin

Rakennekertoimen $c_s c_d$ tarkoituksena on ottaa huomioon tuulikuormiin syntyvä vaikutus, joka johtuu tuulenpaineen huippuarvojen eriaikaisuudesta pinnalla c_s sekä turbulenssista aiheutuvasta rakenteen värähtelystä c_d. – – Rakennuksille, joiden korkeus on alle 15 m, voidaan rakennekertoimelle $c_s c_d$ käyttää arvoa 1. (SFS-EN 1991-1-4, s.48) Jalustan ja hävittäjän tapauksessa rakenne jää reilusti alle 15 m korkeuteen.

3.1.2 Voimakerroin

Aiemmassa kandidaatintyössä voimakerroin määritettiin käyttämällä ilmoituskilpeä verukkeena jalustan päälle kiinnitettävälle koneelle. Voimakerroin määritetään nyt vastaavin oletuksin. Voimakertoimen arvo c_f ilmoituskilvelle, joka on maasta korkeudella $z_g > h/4$, on 1,8 (SFS-EN 1991-1-4, s.108). Jalustan pystypalkin korkeus on 2,50 m ja koneen korkeus 2,93 m, joten ehto täyttyy. (http://www.flugzeuginfo.net) Tapaus esitettynä kuvassa 6.



HUOM. 1 Nopeuspainekorkeus: $z_e = z_g + h/2$

HUOM. 2 Tuulikuorman vaikutusala: $A_{ref} = b \cdot h$

Kuva 6. Ilmoituskilpiä koskevat mitat (SFS-EN 1991-1-4 kuva 7.21, s.110)

3.1.3 Puuskanopeuspaine

Standardin SFS-EN 1991-1-4 yhtälö 4.8 esittää puuskanopeuspaineelle $q_p(z)$ seuraavan lausekkeen. Yhtälössä 2 $c_e(z)$ on altistuskerroin ja q_b nopeuspaineen perusarvo, joka määritetään yhtälön 3 mukaisesti, missä ρ_i on ilman tiheys.

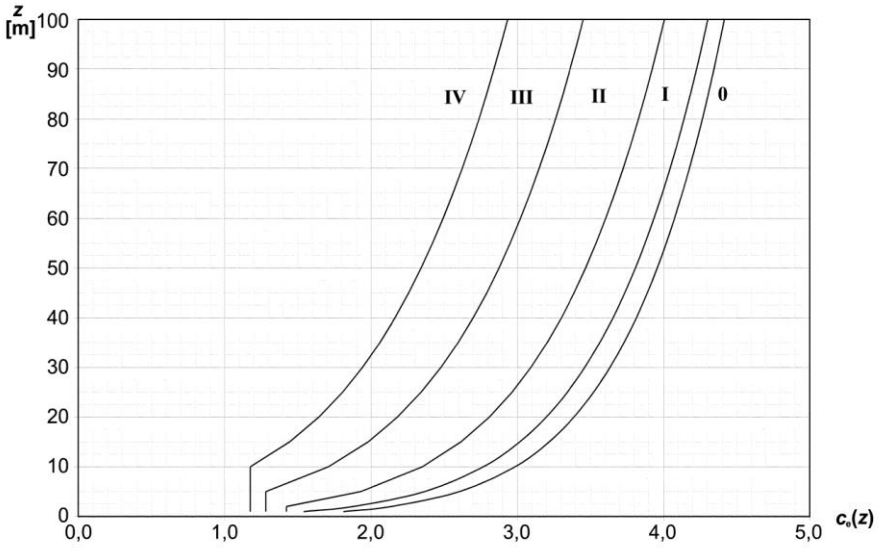
$$q_p(z) = (1 + 7 * I_v(z) * \frac{1}{2} * \rho * v_m^2(z) = c_e(z) * q_b \quad (2)$$

$$q_b = \frac{1}{2} * \rho_i * v_b^2 \quad (3)$$

Altistuskerroin $c_e(z)$ määritetään standardin taulukon 4.1 ja kuvan 4.2 mukaan. Käytetään maastoluokkaa 2, jalusta sijaitsee tontilla lähellä lentokenttää ja suoralta tuulelta sitä suojaa rakennukset sekä puusto. Taulukosta 2 saadaan z_0:n arvoksi 0,05 m ja edelleen kuvan 7 avulla altistuskertoimeksi 1,6.

Taulukko 2. Maastoluokat ja maastoparametrit (SFS-EN 1991-1-4 taulukko 4.1, s.36)

Maastoluokka		z_0 m	z_{min} m
0	Avomeri tai merelle avoin rannikko	0,003	1
I	Järvet tai tasanko, jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä	0,01	1
II	Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus	0,05	2
III	Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)	0,3	5
IV	Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m	1,0	10
HUOM. Liitekohdassa A.1 on kuvia maastoluokista.			



Kuva 7. Altistuskertoimen $c_e(z)$ kuvaajia eri maastoluokkien arvoilla (SFS-EN 1991-1-4 kuva 4.2, s.40)

Nopeuspainetta määrittäessä käytetään ilman tiheydelle arvoa ρ_i = 1,25 kg/m^3. Tuulennopeuden perusarvona v_b käytetään tuulennopeuden modifioimatonta perusarvoa, joka on Suomessa $v_{b,0}$ = 21 m/s. Arvo pätee koko maan meri- ja tunturialueilla. (Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4/A1:2010 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat, 2010, s.2)

3.1.4 Rakenteen tuulenpaineen vaikutusala

Tuulenpaineen vaikutusala, $A_{ref,w}$, lasketaan koneen siiville ylhäältä katsottuna. Pinta-ala on todellista vaikutusalaa huomattavasti suurempi sillä kone on lähempänä vaakatasoa ja näin ollen tuuli vaikuttaa koneeseen huomattavasti pienemmällä pinta-alalla. Kyseessä on kuitenkin aerodynaamisilta ominaisuuksiltaan lentäväksi suunniteltu kappale, joten esimerkiksi koneen etupuolelta tuleva tuuli aiheuttaa nousukulmaan asetetuissa siivissä nosteen, joka lisää tuulen vaikutusta. Suureksi arvioitu pinta-ala lisää varmuutta tuloksiin ja helpottaa laskentaa. Koneen siipien pinta-ala ja näin ollen $A_{ref,w}$ on 16.3 m^2. (http://www.flugzeuginfo.net)

3.2 Lumikuorma

Jalustaan vaikuttava lumikuorma määritetään normaaleissa olosuhteissa. Lumikuorman arvo s määritettiin standardin SFS-EN 1991-1-3 yhtälön 5.1 mukaisesti. Yhtälössä 4 μ_i on kappaleen muotokerroin, C_e tuulensuojakerroin, C_t lämpötilakerroin ja s_k maanpinnan lumikuorman ominaisarvo.

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k \tag{4}$$

Lumikuorman jalustaan aiheuttama voima määritetään yhtälöllä 5, jossa $A_{ref,s}$ on kappaleen kokonaispinta-ala ylhäältä katsottuna. Tuulikuormaa määritettäessä käytettiin vaikutuspinta-alana siipien kokonaispinta-alaa, lumikuorman laskennassa huomioidaan myös koneen rungon vaikutus, joka arvioidaan noin 4 m^2 suuruiseksi. Kokonaispinta-ala $A_{ref,s}$ on hävittäjän tapauksessa 20,3 m^2.

$$F_s = s * A_{ref,s} \tag{5}$$

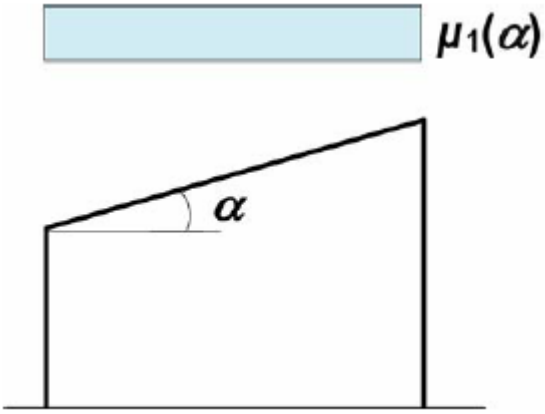
3.2.1 Muotokerroin

Muotokertoimen μ_i määrittämiseksi koneen siivet oletetaan pulpettikatoksi ja runko kaarikatoksi kuten Raitilan kandidaatintyössä. Pulpettikattojen yhteydessä käytettävä lumikuorman muotokerroin μ_1 (α) esitetään taulukossa 3 sekä kuormituskaaviokuvassa. Taulukossa 3 esitetyt arvot ovat voimassa, kun lunta ei estetä liukumasta katolta. Jos katolla on lumieste tai muu liukumiseste tai jos katon alaräystäällä on kaide, niin lumikuorman muotokertoimelle käytetään vähintään arvoa 0,8. Kuvan 8 mukaista kuormituskaaviota käytetään sekä kinostumattoman lumen että kinostuneen lumen kuormituskaaviona ellei paikallisten/erityisten olosuhteiden takia kinostuneen lumen kuormituskaaviota ole toisin määritelty. (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, s.32)

Taulukko 3. Lumikuorman muotokertoimet (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, kaava 5.2, s.32)

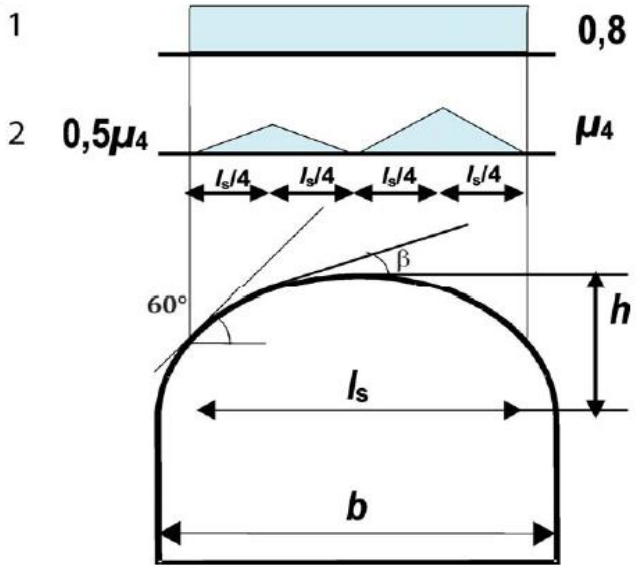
Katon kaltevuuskulma α	0° ≤ α ≤ 30°	30° < α < 60°	α ≥ 60°
$\mu_1(\alpha)$	$\mu_1(0°) \geq 0{,}8$	$\mu_1(0°)\frac{(60° - \alpha)}{30°}$	0,0
$\mu_2(\alpha)$	0,8	$0{,}8\frac{(60° - \alpha)}{30°}$	0,0
$\mu_3(\alpha)$	0,8 + 0,8 α/30°	1,6	–

HUOM. Muotokertoimen $\mu_1(0°)$ arvo voidaan määritellä kansallisessa liitteessä. Suositusarvo on $\mu_1(0°) = 0{,}8$



Kuva 8. Pulpettikaton lumikuorman muotokerroin (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, kuva 5.1, s.32)

Koneen runko oletetaan kaarikatoksi, joka vastaa puoliympyrää. Lumikuorma oletetaan kinostumattomaksi. Käytettävä kuormituskaavio esitetään kuvassa 9 tapauksena 1 (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, s.38). Lumikuorman muotokertoimeksi saadaan koko hävittäjälle yhdistetysti 0,8.



Kuva 9. Kaarikaton lumikuormakertoimet (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, kuva 5.5, s.38)

3.2.2 Tuulensuojaisuus- ja lämpökerroin

Jalustan tapauksessa tuulensuojakerroin C_e on helppo määrittää. Standardissa esitetään taulukko 4, jonka avulla kerroin määritetään. Jalusta sijaitsee K-SIMY:n tontilla Lappeenrannan lentokentän laidalla. Ympäristö on laakeaa, joten taulukon perusteella tuulensuojakertoimen arvoksi määritetään 0,8.

Taulukko 4. Eri maastotyyppien vaikutus tuulensuojakertoimeen (SFS-EN 1991-1-3 +AC+A1, taulukko 5.1, s.30)

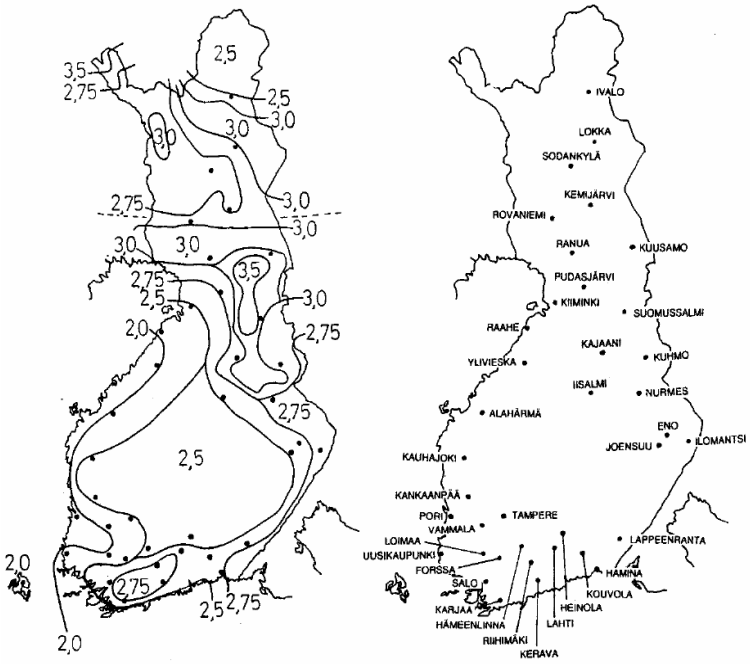
Maastotyyppi	C_e
Tuulinen[a]	0,8
Normaali[b]	1,0
Suojainen[c]	1,2

[a] *Tuulinen maasto*: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän.
[b] *Normaali maasto*: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta.
[c] *Suojainen maasto*: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.

Lämpökerroin ottaa huomioon katoissa ilmenevät suuret lämpöhäviöt. Jalustan tapauksessa lämpöhäviöitä ei ole. Lämpökertoimen C_t avulla otetaan huomioon kattojen lumikuorman pienennys lämpöhäviön aiheuttaman sulamisen johdosta, kun lämmönläpäisevyys on suuri (>1 W/m^{2}K), erityisesti eräillä lasikatteisilla katoilla (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, s.30). Muissa tapauksissa käytetään arvoa 1,0

3.2.3 Ominaisarvo

Lumikuorman ominaisarvo s_k määritetään ympäristöministeriön asetuksen avulla. Lumikuorman ominaisarvot maan pinnalla Suomessa esitetään alla olevassa kuvassa 10. Arvot ovat kN/m^2. (Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-3 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat Osa 1-3: Lumikuormat, 2007, s.2) Lappeenrannan alueella lumikuorman ominaisarvo on 2,5 kN/m^2.



Kuva 10. Lumen ominaisarvot maan pinnalla Suomessa. (Ympäristöministeriön asetus Eurocode-standardien soveltamisesta talonrakentamisessa, 2007, s.2)

3.3 Rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset kuormitukset

Edellä esitettyjen kaavojen avulla määritettiin jalustaan kohdistuvat kuormat. Tuulikuorman selvittämiseen käytetty kaava erosi Raitilan käyttämästä kaavasta vaikuttamatta kuitenkaan lopullisiin tuloksiin. Kuormien suuruudet esitettynä taulukossa 5. Lumikuorma on rakenteeseen kohdistuvista ulkoisista kuormista määrittävä ja se tullaan lisäämään myös FEM-malliin jalustan muutoksia analysoitaessa. Lumikuorman laskennallinen voima vastaa noin 3310 kg:n massaa, joka vaikuttaa koko hävittäjän yläpuolisella pinta-alalla.

Taulukko 5. Jalustaan kohdistuvat ulkoiset kuormat.

Kuormitus	Tuulikuorma	Lumikuorma
Vaikuttava voima	12940N	32480N

4 SUUNNITTELUVAIHE

Rakenteen ominaistaajuudet ovat määriteltävissä yhtälöstä 6. Kaavassa m on kappaleen massa. Massassa voidaan ottaa huomioon myös rakenteeseen vaikuttavat ulkoiset kuormat, jalustan tapauksessa lumikuorma. Rakenteen jousivakioon k voidaan vaikuttaa valitun palkin profiilia ja samalla jäyhyyttä kasvattamalla. Jousivakiota voidaan muokata myös jäykistämällä profiilia esimerkiksi lisäämällä massaa sen sisälle. Profiilin laminoinnilla voidaan vaikuttaa palkin kimmomoduuliin ja kasvattaa jousivakiota. Tuennan muuttaminen, harustukset tai ulkoinen lisätuki ovat myös vaihtoehtoja jousivakion kasvattamiselle. Kuten jo aiemmin mainittiin hävittäjää itsessään ei ole mahdollista keventää. Vaihtoehdoiksi korkeampien ominaistaajuuksien saavuttamiselle jää jalustassa käytettyjen profiilien kasvattaminen jäyhyyden kasvattamiseksi tai tukirakenteiden lisääminen jalustaan.

$$f = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{m}{k}} \tag{6}$$

Varsinainen jalustan korjausten suunnittelu aloitetaan paneutumalla jo olemassa olevaan Alexei Yanchukovichin FEM-malliin. Malli oletetaan todenmukaiseksi, sillä mallille tehty analyysi ja jalustalle suoritetut mittaukset tukevat toisiaan. Rakenteeseen tarvittavien muokkausten selvittämistä jatketaan vastaavan FEM-mallin muutoksia tutkimalla, tällä kertaa malli ottaa huomioon myös hävittäjään vaikuttavan lumikuorman. Alin ominaistaajuus pyritään nostamaan 3-4 Hz:n välille. Tavoitellun kasvun jälkeen voidaan olettaa ominaistaajuuksien ja tuulen herätetaajuuksien välisen eron olevan tarpeeksi suuri, jotta väsyttävää kuormitusta aiheuttavalta värähtelyltä vältytään. Lumikuorma huomioituna jalustan ominaistaajuudet laskevat taulukon 6 mukaisesti.

Taulukko 6. Laskennallisen lumikuorman vaikutus ilmeneviin ominaistaajuuksiin.

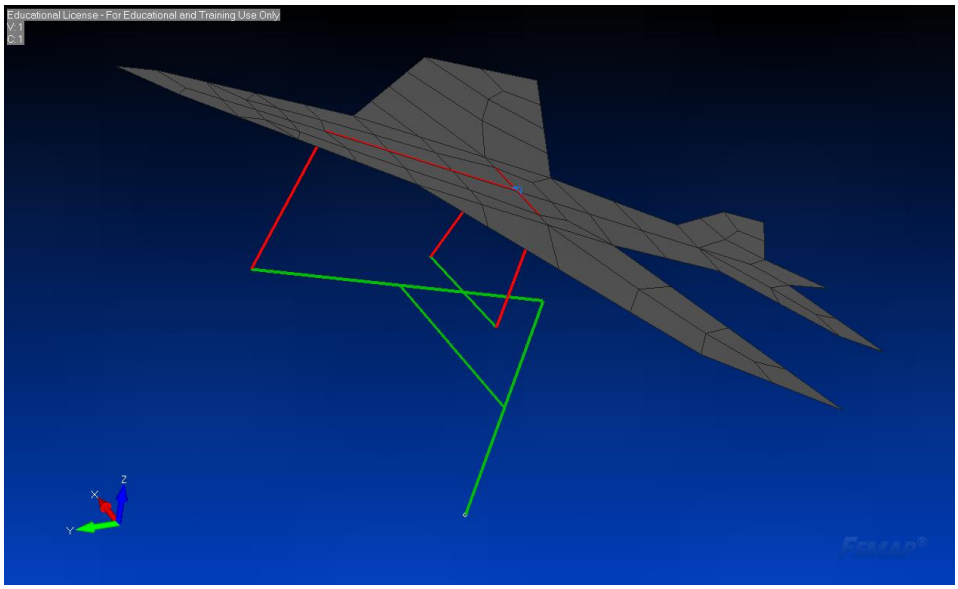
Järjestys	Taajuudet, ei lumikuormaa (Hz)	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	0,80	0,45
2	0,85	0,48
3	1,23	0,60
4	3,91	2,29
5	4,96	2,51
6	9,22	4,87
7	67,22	66,78
8	111,22	109,12
9	118,41	117,88
10	126,79	123,95

4.1 Erilaisia versiota ominaistaajuuksien kasvattamiseksi

Jalustaa tehtävät muutokset halutaan pitää mahdollisimman pieninä, mikäli se vain on mahdollista. Ensimmäisessä versiossa jalustaa muokataan lisäämällä diagonaali pysty- ja poikkipalkkien välille. Lisätty diagonaalituki on profiililtaan vastaava rakenteen palkkien kanssa, 120 x 120 x 6 mm. Tarkoituksena on selvittää, pystytäänkö olemassa olevaa rakennetta parantamaan minimaalisilla muokkauksilla. Ominaistaajuudet eivät kuitenkaan kasva huomattavasti ja lumikuorma huomioituna vasta neljäs ominaistaajuus ylittää 3,0 Hz:ä, taulukko 7. Tueta havainnollistettu kuvassa 11.

Taulukko 7. Diagonaalituen vaikutus ominaistaajuuksiin.

Järjestys	Taajuudet, ei lumikuormaa (Hz)	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	1,02	0,53
2	1,03	0,58
3	1,46	0,70
4	6,06	3,04
5	6,65	3,78
6	15,12	7,31
7	63,79	62,04
8	94,54	92,35
9	94,59	99,62
10	131,85	135,60

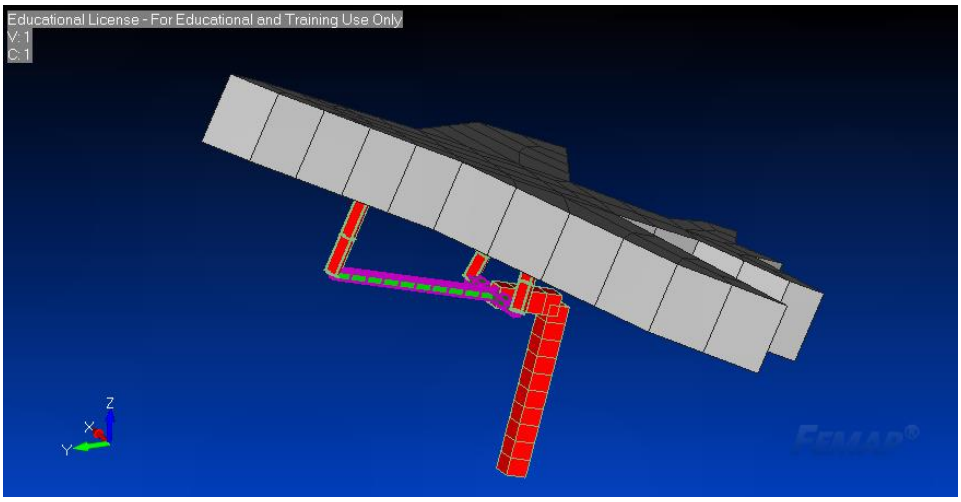


Kuva 11. Rakenteeseen lisätty diagonaalituki.

Seuraavana ratkaisumahdollisuutena muutetaan pystypalkin profiilia, samalla myös hävittäjän takalaskutelineiden ja pystypalkin välinen osuus korvattiin vastaavalla putkipalkilla. Kuvassa 12 esitetyssä mallissa palkkien profiiliksi muutettiin 300 x 300 x 12 mm. Ominaistaajuudet nousivat huomattavasti diagonaalituella vahvistettuun malliin verrattuna, muuttuneet taajuudet taulukossa 8.

Taulukko 8. Pystypalkin profiilin kasvattamisen vaikutus ominaistaajuuksiin.

Järjestys	Taajuudet, ei lumikuormaa (Hz)	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	2,70	1,64
2	4,08	2,17
3	5,33	2,63
4	12,05	6,63
5	17,38	9,34
6	25,81	14,56
7	85,59	86,66
8	122,24	117,89
9	143,59	132,95
10	180,71	171,95

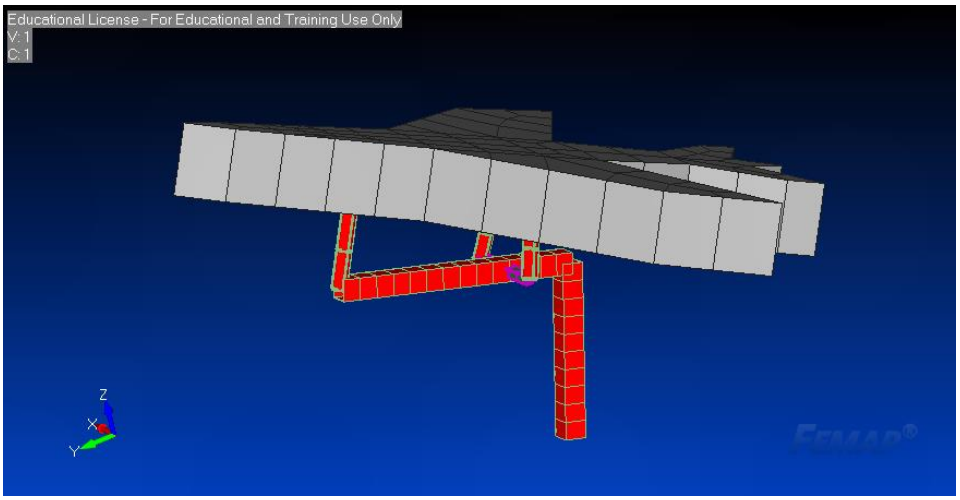


Kuva 12. Pystypalkki ja osa poikkipalkkia korvattu 300 x 300 x 12 mm putkipalkilla.

Mikäli koko nykyinen poikkipalkki korvattaan pystypalkin kanssa samalla 300 x 300 x 12 mm profiililla ja aiemmasta jalustasta hyödynnettäväksi jää ainoastaan hävittäjän kiinnityspisteet ja takalaskutelineiden välinen palkki, saadaan rakennetta jäykistettyä huomattavasti. Lumikuorma huomioon otettuna jalustan alimmat ominaistaajuudet nousevat yli 2,30 Hz:iin. Ominaistaajuudet tapaukselle esitettynä taulukossa 9 ja rakenne kuvassa 13.

Taulukko 9. Ominaistaajuudet 300 x 300 x 12 mm profiilille.

Järjestys	Taajuudet, ei lumikuormaa (Hz)	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	4,15	2,38
2	4,30	2,56
3	6,22	3,07
4	16,36	9,59
5	18,93	10,59
6	24,99	14,64
7	117,94	116,21
8	154,70	148,44
9	233,57	223,71
10	252,55	232,87

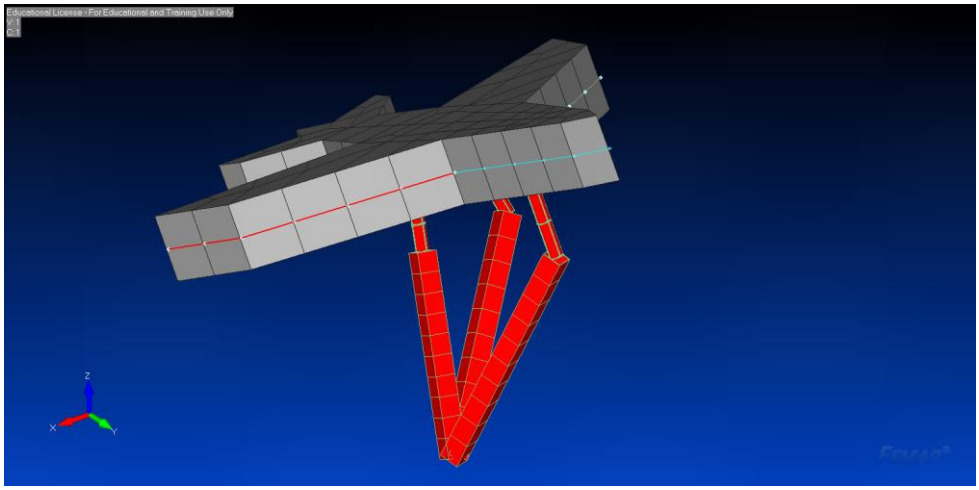


Kuva 13. Molemmat palkit korvattu 300 x 300 x 12 mm putkipalkilla.

Aiemmassa aihetta käsitelleessä kandidaatintyössä esiteltiin koneen jalustalle vaihtoehtoinen luonnos, jota ei kuitenkaan valittu lopulliseksi rakenteeksi. Luonnoksessa hävittäjä tuetaan jokaisesta laskutelineestä erillisellä putkipalkilla, jotka yhdistyvät betonianturaan pultattavassa levyssä toisiinsa. (Raitila 2016, s.15) Kyseisen luonnoksen etuna on koneen massan jakautuminen kolmelle palkille, joka samalla jäykistää rakennetta. Luonnoksesta päätettiin luoda myös FEM-malli aiempien tapaan. Palkkien profiiliksi valittiin 300 x 300 x 10 mm, muuttuneesta rakenteesta johtuen pienempikin profiili todennäköisesti riittäisi kasvattamaan ominaistaajuuksia. Palkkien pituuksia muokattiin nykyiseen jalustaan verrattuna huomattavasti. Palkkien pituudet analysoidussa mallissa olivat 3; 3,4 ja 3,7 metriä. Jalustalle nostettu kone nousee huomattavasti korkeammalla kuin korjausta vaativan jalustan kanssa. Taulukossa 10 FEM-analyysin tuottamat ominaistaajuudet kyseiselle toteutukselle, lumikuorma huomioituna. Luonnoksen mukainen jalusta analysoituna kuvassa 14.

Taulukko 10. Kolmihaaraisen jalustan ominaistaajuudet.

Järjestys	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	4,88
2	5,55
3	6,83
4	62,92
5	71,60
6	121,18
7	133,62
8	134,45
9	145,06
10	145,59



Kuva 14. Hävittäjä tuettuna jokaisesta laskutelineestä.

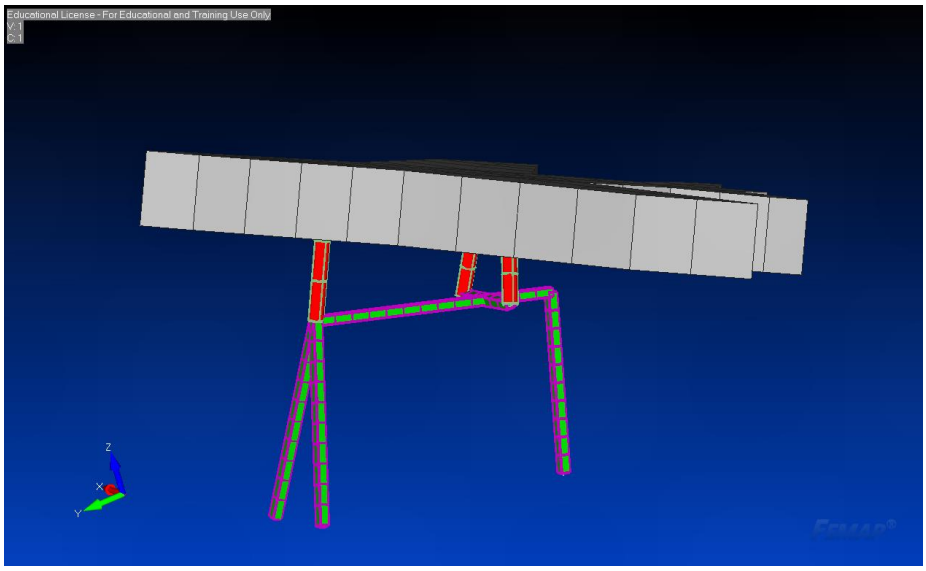
4.2 Rakenteen muuttaminen tarvittavien ominaisuuksien saavuttamiseksi

Alkuperäinen jalusta haluttiin kevytrakenteiseksi K-SIMY:n toimesta hävittäjän nousukiidon korostamiseksi. Käytettävien putkipalkkien profiilin kasvaminen tuhoaa osaltaan tämän vaikutelman mutta suuremmaksi ongelmakohdaksi muodostuu korjauksien vaatima rahasumma. Mikäli jalustaa uusitaan suurilta osin on hävittäjä nostettava pois jalustalta muutostöiden ajaksi. Yhdistyksen puheenjohtaja ilmaisi jäsenistön haluttomuuden koneen irrottamiseen ja mainitsi samalla mahdollisuudesta toteuttaa tarvittava korjaus rakenteelle tukemalla nykyistä jalustaa väliaikaisen tukirakenteen tapaan.

Analysoitavaa FEM-mallia muokataan lisäämällä siihen väliaikaista tuentaa vastaava a-tuki, olemassa olevan jalustan etuosaan kuvan 15 mukaisesti. Jalustan etuosaan lisätty tuki muutti ominaistaajuuksia taulukon 11 kuvaamalla tavalla. Mikäli tuenta toteutetaan kuvan mukaisesti, on paikalle valettava toinen betoniantura tuen kiinnittämiseksi maahan.

Taulukko 11. A-tuen vaikutus ominaistaajuuksiin.

Järjestys	Taajuudet, ei lumikuormaa (Hz)	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	2,92	1,42
2	5,95	2,88
3	6,83	3,64
4	7,77	4,46
5	65,43	24,30
6	69,48	66,79
7	96,90	73,10
8	105,32	107,12
9	105,60	107,13
10	106,42	107,26

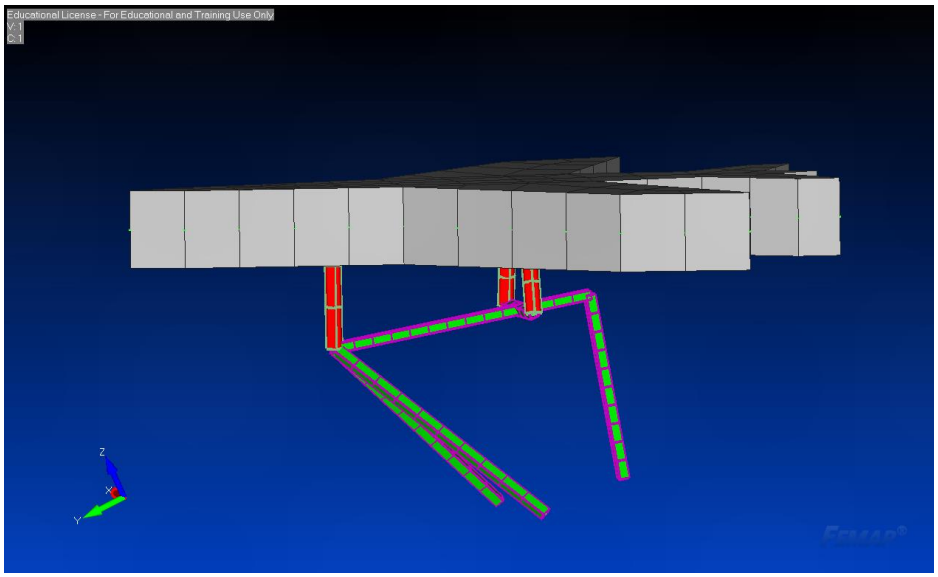


Kuva 15. Väliaikaista tuentaa vastaava rakenne, 120 x 120 x 6 mm.

Vaihtoehtoisesti tuenta on mahdollista suorittaa myös nykyisen anturan etunurkista etulaskutelineen alapuolelle. Toteutus on huomattavasti näyttävämpi, mutta tavoitellut korkeat ominaistaajuudet jäävät a-tukeen verrattuna alhaisemmiksi. Tapaus on mallinnettuna kuvassa 16 ja ominaistaajuuksien muutos kuvattuna taulukossa 12.

Taulukko 12. Nykyisestä anturasta suoritetun tuennan vaikutukset.

Järjestys	Taajuudet, ei lumikuormaa (Hz)	Taajuudet, lumikuorman kanssa (Hz)
1	2,17	1,08
2	3,19	1,77
3	5,74	2,85
4	8,19	4,40
5	48,69	28,14
6	67,10	65,48
7	68,94	66,77
8	69,08	69,08
9	69,67	69,16
10	73,06	69,71



Kuva 16. Tuenta nykyiseen betonianturaan.

5 TUENNAN TOTEUTUS

Toteutettavaksi tuennaksi valikoitui kuvaa 15 vastaava a-tuki. Valintaan vaikuttavia seikkoja olivat tuennan asennuksen helppous ja korkeammat ominaistaajuudet kuin olemassa olevaan anturaan toteutettavassa vaihtoehdossa. Tuennan asennuksen yhteydessä kone ja nykyinen jalusta eivät tarvitse muutoksia. Analyysien perusteella toteutettava tuenta nostaa rakenteen alimmat ominaistaajuudet lähelle tavoiteltua noin 3 Hz:n minimiä. Taajuudet ovat kuvattuna taulukossa 10. Ilman lumikuormaa alin ominaistaajuus on 2,92 Hz ja laskennallinen lumikuorma huomioon otettuna rakenteen toinen ominaistaajuus on 2,88 Hz. Tärkeää on kuitenkin ottaa huomioon, että ääritapauksessa pakkautunut lumi laskee ensimmäisen ominaistaajuuden jälleen lähelle tuulen herätettä, 1 Hz:ä. Hävittäjä aerodynaamisena kappaleena vähentää lumen pakkautumista, mutta mahdollinen pakkautunut lumi on poistettava koneen päältä rakennetta väsyttävän kuormituksen välttämiseksi. Mikäli jalustaa halutaan jäykistää edelleen tai värähtelyä koetaan yhä tuen lisäämisen jälkeen, voidaan alkuperäinen jalusta täyttää betonilla. Taulukossa 13 esitetään betonoinnin vaikutukset a-tuen lisänä. Analysoitaessa käytettiin erikoislujan betonin arvoja: tiheys 4000 kg/m^3, Poissonin luku 0,2 ja kimmomoduuli 40 GPa. Betonointia ei kannata suorittaa normaalilla betonilla, sillä sen avulla ominaistaajuuksia ei saada nostettua merkittävästi.

Taulukko 13. Alkuperäisen tuen betonoinnin vaikutus a-tuen lisänä.

Järjestys	Taajuudet, lumikuorma + alkuperäisen rakenteen betonointi (Hz)
1	1,55
2	3,05
3	3,93
4	4,72
5	23,55
6	43,35
7	64,46
8	77,83
9	80,22
10	82,72

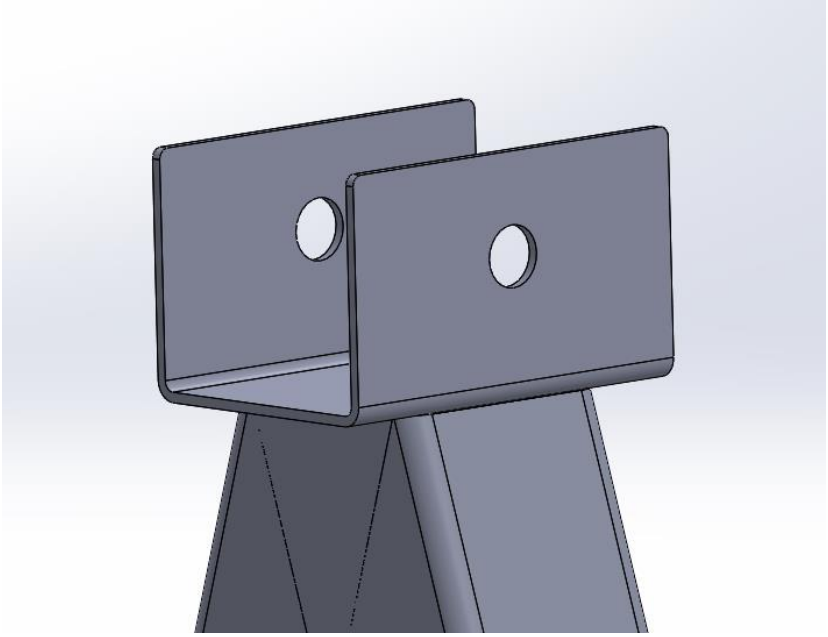
Alkuperäistä jalustaa suunniteltaessa hävittäjän massaksi punnittiin noin 1150 kg, etulaskutelineelle kohdistuva osuus tästä on noin 60 kg. Toteutettavan tuennan staattisessa mitoituksessa käytetään koneen massasta ja laskennallista lumikuormasta johtuvaa voimaa määrittävänä tekijänä rakenteelle. Etulaskutelineeseen kohdistuva voima redusoidaan samassa suhteessa koneen oman massan vaikutuksen kanssa. Tuessa tullaan käyttämään samaa 120 x 120 x 6 mm putkipalkkia kuin alkuperäisessä jalustassa. Palkkeihin kohdistuva voima selvitetään yhtälön 7 avulla. Voiman ollessa pienempi kuin yhtälöllä 8 selvitetty palkin nurjahduskuorma, voidaan rakenteen olettaa kestävän siihen staattisesti kohdistuvat voimat.

$$F_{palkki} = \frac{G_{yht}}{2 * sin\alpha} \tag{7}$$

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{(K * L)^2} \tag{8}$$

G_{yht} on koneen etulaskutelineelle kohdistuva voima laskennallinen lumikuorma huomioituna, α on tukevien palkkien kulma y-akseliin verrattuna, E on kimmomoduuli, I on käytettävän profiilin jäyhyys, K on kerroin palkin nurjahduspituuden selvittämiseksi a-tuen tapauksessa 1 ja L käytettävän palkin pituus. Yhtälöistä yhteen palkkiin kohdistuvaksi voimaksi F_{palkki} saatiin 3733 N, palkin nurjahduskuorman P_{cr} ollessa 1,038e12 N. Vertailtavien arvojen eron ollessa yli kymmenkertainen todetaan käytettävän profiilin kestävän siihen kohdistuvan staattisen kuormituksen ilman lisätarkasteluja.

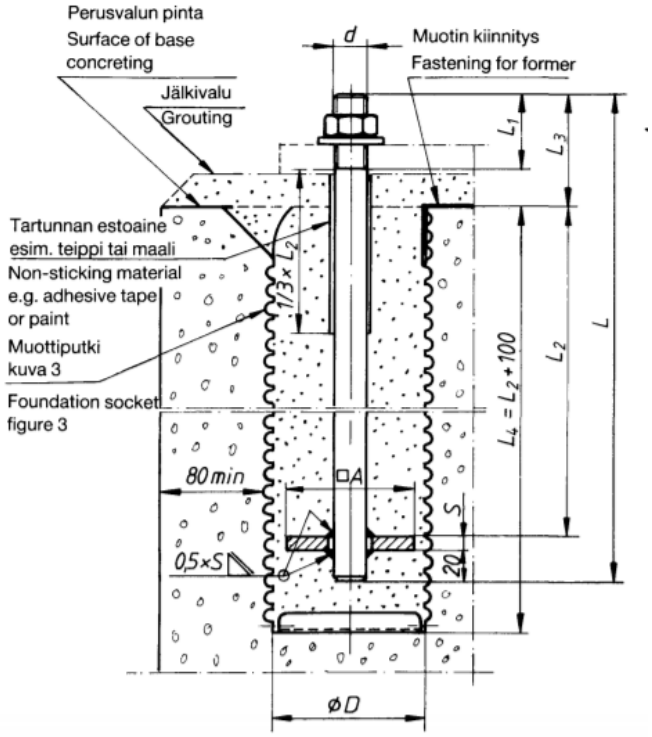
Nykyisessä jalustassa koneen etulaskutelineen kiinnitys on toteutettu pulttiliitoksella poikkipalkin etuosaan. A-tuki tullaan liittämään alkuperäiseen jalustaan saman pulttiliitoksen avulla. Kuvassa 17 havainnollistettuna a-tuen yläosa. Kiinnitys toteutetaan 200 mm pitkällä 140 x 140 x 5 mm putkipalkilla, josta leikataan yläsivu pois. Palkkiin porataan 30 mm reiät, jotta tuki saadaan liitettyä etulaskutelineen kiinnityskappaleen kanssa samalla pulttiliitoksella alkuperäiseen jalustaan. A-tuen leveydeksi haluttiin noin 2000 mm ja väliaikaisesta tuennasta etulaskutelineen mitattiin olevan noin 3100 mm korkeudella maasta. A-tuki hahmoteltiin näiden mittojen ympärille. Kuvassa 18 hahmotelma a-tuesta.



Kuva 17. A-tuen kiinnitys jalustaan.

Kuva 18. A-tuki kokonaisuudessaan

Tuen perustukseen tullaan käyttämään K-SIMY:ltä löytyviä teräsbetonipaaluja kyljelleen sijoitettuna valettavan betonianturan sijasta. Lumikuorma huomioituna molempiin putkipalkkeihin kohdistuu 3733 N staattinen voima, joka jaetaan neljälle perustusruuville. Yhteen perustusruuviin kohdistuu 933 N voima, joka on reilusti pienempi kuin standardin SFS 4632 määrittämä staattinen voima M10-kierteiselle perustusruuville. Standardin mukaan M10-kierteiselle perustusruuville riittää 220 mm pituus, joka helpottaa asennusta teräsbetonipaaluun. Kuvassa 19 ja taulukossa 14 esitettynä perustusruuvin oikea asennustapa ja käytettävältä ruuvilta vaadittavat mitat. Tuki tullaan kiinnittämään paaluun poikkipalkkiin hitsattujen 10 mm paksujen levyjen välityksellä. Levyihin porataan 12 mm reiät, jotta asennus M10-kierteisillä perustusruuveilla onnistuu.



Kuva 19. Perustusruuvin asennustapa (SFS 4632, kuva 1, s.3)

Taulukko 14. Perustusruuveilta vaadittavat mitat. (SFS 4632, taulukko 1, s.4)

Ruuvi Bolt						Vaihtoehtoiset aksiaali-kuormitukset Alternative axial load max		Esikiristys Pretensioning max	
d	*L* mm	L_1 mm	L_2 min mm	*A* mm	*S* mm	F_{staatt} kN	F_{dyn} kN	Momentti Torque M_e Nm	Voima Force F_e kN
M10	220 280	40	100	50	12	8,9	5,6	21,3	11,6
M12	250 350	50	120	60	12	13,1	8,5	35,4	16,9
M16	300 400	60	170	70	14	24,3	15,7	89,8	31,4
M20	350 450 550	70	220	80	14	35,5	23,1	174,5	49,0
M24	400 500 600	80	260	100	20	51,1	33,2	301,9	70,6
M30	500 600 700	120	310	120	25	81,3	52,8	559,2	112,2
M36	Määritetään piirustuk-sessa/Shall be defined drawing	120	400	140	30	118,0	76,7	1 048	163,4
M42		140	450	170	35	152,0	98,8	1 695	226,8
M48		160	550	200	35	199,1	129,4	2 486	290,4
M56		180	640	220	40	274,3	178,3	3 949	406,4

A-tuen hitseihin kohdistuu huomattavasti pienempiä voimia kuin alkuperäisessä rakenteessa, joten a-mitan määrittämiseksi voidaan käyttää yksinkertaistettua laskentakaavaa. Hitsiin kohdistuvien voimien resultantin oletetaan aiheuttavan hitsin laskentapoikkipintaan aina pelkkää leikkausta riippumatta voimaresultantin ja hitsin todellisesta suunnasta. Menetelmän etuna on, että hitsiin kohdistuvan voimaresultantin suuntaa ei tarvitse tuntea, koska näin laskien se ei vaikuta hitsin kestävyyden mitoitusarvoon. Riittää, että tunnetaan hitsiin kohdistuvan voimaresultantin suuruus. Yhtälöllä 9 voidaan määrittää tarvittava a-mitta yksipuoleiselle pienahitsille varmalle puolella yksinkertaistaen.

$$a \geq \frac{\sqrt{3} * \beta_w * \gamma_{M0} * \gamma_{M2} * |F_{weld}|}{l_{eff} * f_u} \tag{9}$$

Kaavassa β_w on lujuuskerroin, γ_{M2} ja γ_{M0} ovat kestävyyden osavarmuuslukuja, F_{weld} on hitsiin kohdistuva voima, l_{eff} on hitsin tehollinen pituus ja f_u on materiaalin nimellinen murtolujuus. Tuessa käytettävät 120 x 120 x 6 mm putkipalkit ovat materiaaliltaan S355-terästä, jolloin f_u = 510 MPa, $\beta_w = 0{,}9$ ja $l_{eff} = 120$ mm. Osavarmuusluvuille käytetään arvoja

γ_{M0} = 1,00 ja γ_{M2} = 1,25 (SFS-EN 1993-1-3 + AC, s.12). Hitsiin kohdistuva voima F_{weld} = 3733 N, jonka aiheuttaa palkkeihin koneen massa ja laskennallinen lumikuorma. Yksinkertaistetulla kaavalla a-mitaksi saadaan 0,12 mm, pienuus johtuu jo aiemmin todetusta a-tukeen kohdistuvien voimien pienuudesta. Tuessa käytetäänkin siis hitseille samaa 7 mm a-mittaa, joka todettiin toimivaksi alkuperäisessä jalustassa. Kaikki a-tukeen liittyvä laskenta liitteessä I. Valmistuspiirustukset tuen toteuttamiseksi liitteessä II.

6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä suunniteltiin a-tuki aiemmin K-SIMY:lle toteutetun Folland Gnat-103 -hävittäjän jalustan jäykistämiseksi, jotta tuulen herätteestä aiheutuva väsyttävä kuormitus saadaan poistettua. Työ suoritettiin tarkastelemalla jalustalle suoritettuja mittauksia, joista Fourierin analyysin avulla todennettiin ilmenevät ominaistaajuudet. Mittausten avulla selvitettyjä ominaistaajuuksia verrattiin muistomerkistä tehtyyn FEM-malliin, jotta malli voitiin todeta tilannetta kuvaavaksi. Jalustan muutosten analysointia jatkettiin FEM-mallia muokkaamalla. Analysoimalla eri malleja todettiin, ettei jalustaa voida muokata haluttujen ominaistaajuuksien saavuttamiseksi ilman koneen poistamista sen päältä. K-SIMY:n jäsenistö suostui vaihtoehtoon, jossa olemassa oleva jalusta tuetaan hävittäjän etulaskutelineen kiinnityspisteestä ulkoisella tuennalla uuteen anturaan muistomerkin etupuolella.

Toteutettava a-tuki tullaan valmistamaan samasta 120 x 120 x 6 mm putkipalkista, josta alkuperäinenkin jalusta toteutettiin. Koneen ja mahdollisen pakkautuneen lumen massasta aiheutuvaa voimaa verrattiin palkin nurjahdusvoimaan ja todettiin valitun profiilin ja materiaalin soveltuvan käytettäväksi valmistettavassa tuessa. Hitsin a-mitta selvitettiin yksinkertaistetulla kaavalla ja käytettäväksi arvoksi saatiin 7 mm. Samaa a-mittaa käytetään kaikissa a-tuen hitseissä. Jalustan anturointiin käytetään K-SIMY:ltä löytyviä teräsbetonipaaluja, paaluihin kiinnitettävät perustusruuvit mitoitettiin myös työssä. Perustusruuveihin kohdistuvat voimat ovat huomattavan pieniä, joten voidaan käyttää M10-kierteisiä ruuveja. Kyseinen ruuvikoko helpottaa asennusta teräsbetonipaaluihin ja määrittää samalla tuen alapalkkiin kiinnitettäviin laattoihin suoritettavien porausten koon.

A-tuesta laadittiin valmistuspiirustukset, jotka luovutetaan työn tilaajalle. K-SIMY:lle jää päätettäväksi tuennan toteuttava taho ja muut mahdolliset toimenpiteet tuen liittämiseksi osaksi hävittäjän jalustaa. Tuki tulee jäykistämään olemassa olevaa rakenne ja nostamaan sen alimmat ominaistaajuudet tuulen herätettä korkeammalle, jolloin väsyttävää kuormitusta aiheuttavasta värähtelystä päästään eroon. Lisättävä tuki yhdessä alkuperäisen jalustan kanssa tulee kannattelemaan hävittäjää sille varatulla paikalla ilmailuyhdistyksen tilojen edustalla vuosikymmeniä, johon kaikki osapuolet voivat olla tyytyväisiä. Muistomerkin päälle kasaantuvaa lumikuormaa kannattaa tarkkailla ja poistaa jos jäätä tai paakkuuntuvaa lunta kertyy merkittävästi koneen päälle.

LÄHTEET

Folland Gnat -suihkuhävittäjän ulkomitat. [Flugzeuginfo.net www-sivut] Viitattu 4.7.2018. Saatavissa: http://www.flugzeuginfo.net/acdata_php/acdata_gnat_en.php

Ongelin, J. & Valkonen, I. 2012. Rakenneputket EN 1993 -käsikirja. Keuruu, Otavan Kirjapaino Oy, Rautaruukki Oyj. 688 s. Viitattu 28.9.2018. Saatavissa PDF-tiedostona: https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf

Raitila, J. 2016. Muistomerkkihävittäjän jalustan suunnittelu. Lappeenranta, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Kone. 37 s.

SFS 4632. 1993. Laiteperustukset. Perustusruuvi. Tyyppi A. 5. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry. 5 s.

SFS-EN 1991-1-3 + AC + A1. 2015. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 81 s.

SFS-EN 1991-1-4 + AC + A1. 2011. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuorma. 2. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 254 s.

SFS-EN 1993-1-3 +AC. 2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 127 s.

Ympäristöministeriön asetus Eurocode -standardien soveltamisesta talonrakentamisessa annetun asetuksen muuttamisesta. 2010. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4/A1:2010 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat. Helsinki: Ympäristöministeriö. 5 s. Viitattu 6.7.2018. Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.eurocodes.fi/1991/1991-1-4/NA%20SFS-EN1991-1-4-YM-2011.pdf

Ympäristöministeriön asetus Eurocode -standardien soveltamisesta talonrakentamisessa. 2007. Kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-3 Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat Osa 1-3: Lumikuormat. Helsinki: Ympäristöministeriö. 7 s. Viitattu 6.7.2018.
Saatavissa PDF-tiedostona: http://www.eurocodes.fi/1991/1991-1-3/NA%20SFS-EN1991-1-3-YM.pdf

Tuulikuorma

$CsCd := 1 \qquad Cf := 1.8 \qquad Qpz := 1.6 \cdot 0.5 \cdot 1.25 \frac{kg}{m^3} \cdot \left(21 \frac{m}{s}\right)^2 = 441\ Pa$

$Arefw := 16.3 m^2$

$Fw := CsCd \cdot Cf \cdot Qpz \cdot Arefw = 1.294 \times 10^4\ N$

Lumikuorma

$\mu i := 0.8 \qquad Ce := 0.8 \qquad Ct := 1.0 \qquad Sk := 2.5 \frac{kN}{m^2}$

$Arefs := 20.3 m^2$

$Fs := \mu i \cdot Ce \cdot Ct \cdot Sk \cdot Arefs = 3.248 \times 10^4\ N$

A-tuki, staattinen kuormitus

$m_{etu} := 60 \ kg \qquad m_{koko} := 1150 \ kg \qquad g_1 := 9.807 \ \frac{m}{s^2}$

$m_{suhde} := \frac{m_{etu}}{m_{koko}} = 0.052$

$G_{etu} := m_{etu} \cdot g_1 = 588.42 \ N$

$G_{lumi} := 32480$

$G_{yht} := G_{etu} + \left(G_{lumi} \cdot m_{suhde}\right) = 2.283 \times 10^3 \ N$

$a := \operatorname{asin}\left(\frac{1000}{3270}\right) = 17.807 \cdot deg$

F.y=0 -G.yht+2S.1(sin(a))=0

$S_1 := \frac{G_{yht}}{2 \cdot \sin(a)} = 3.733 \times 10^3 \ N$

Lasketaan palkkien nurjahtuskuormat (RHS120x120x6)

$E := 210000 \ MPa \qquad f_y := 355 \ MPa$

$I := 5622000000000 \ mm^4$

Palkin molemmissa päissä on kiinteä liitos

$K := 1 \qquad L := 3350 \ mm \qquad A := 2643 \ mm^2$

$P_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} = 1.038 \times 10^{12} \ N$

P.cr on suurempi, kuin S.1 ... Toimii

Perustusruuvien mitoitus

Tuki tullaan liittämään perustuksiin kahdella kiinnityslevyllä.
Molemmat levyt kiinnitetään neljällä perustusruuvilla, joihin kohdistuu voima F.staattinen.

$$F_{staattinen} := \frac{S_1}{4} = 933.188 \quad N$$

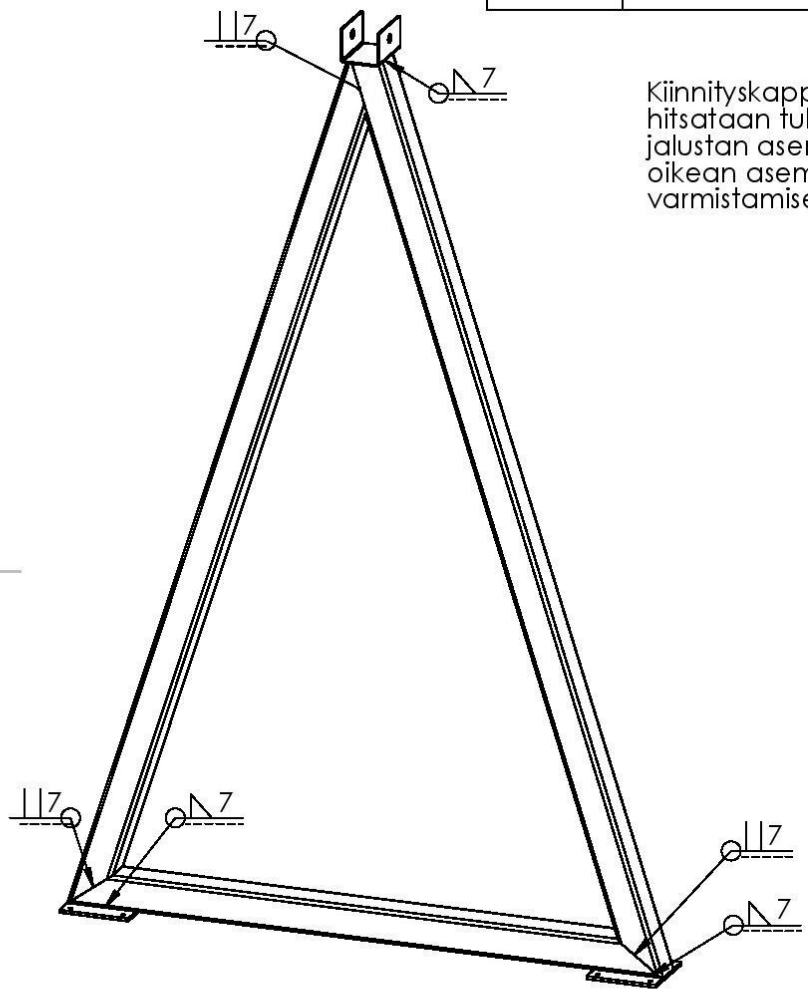
A-mitan määritys

$\beta_w := 0.9$ $F_{weld} := 3733\ N$ $f_u := 510\ MPa$

$\gamma_{m0} := 1.00$ $\gamma_{m2} := 1.25$ $l_{eff} := 120\ mm$

$$a_{mitta} := \frac{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{m0} \cdot \gamma_{m2} \cdot |F_{weld}|}{l_{eff} \cdot f_u} = 0.119 \quad mm$$

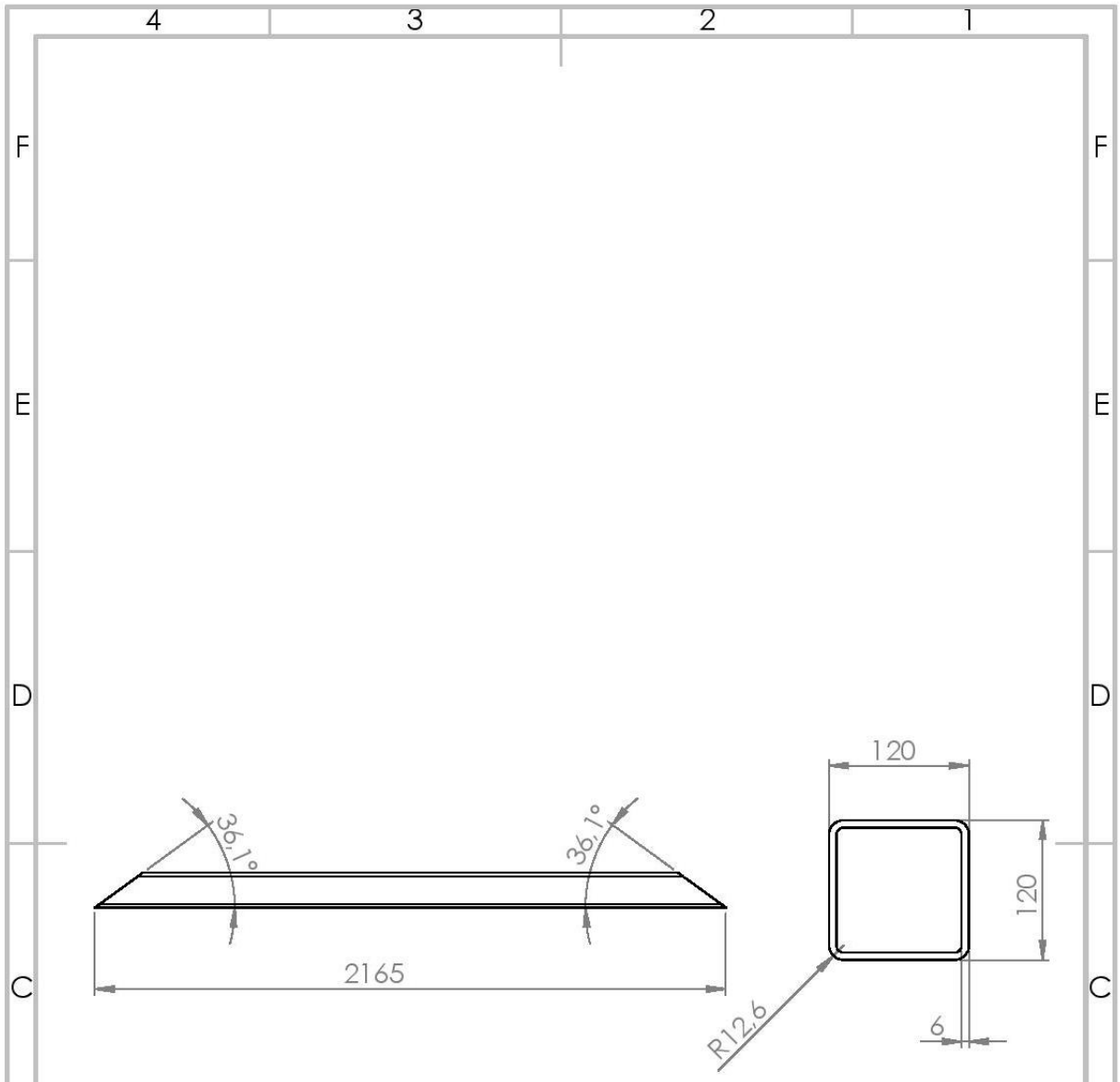
ITEM NO.	DESCRIPTION	QTY.
1	alapalkki	1
2	palkki vasen	1
3	palkki oikea	1
4	kiinnityskappale	1
5	laatta	2



Kiinnityskappale hitsataan tukeen jalustan asennusvaiheessa oikean asemoinnin varmistamiseksi.

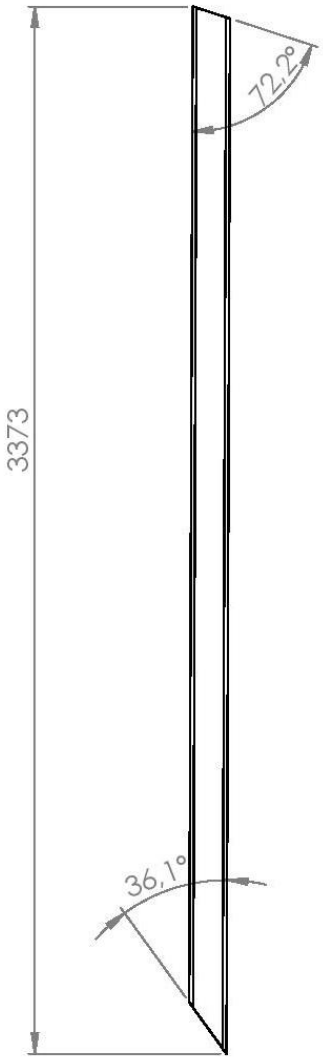
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN	J. Toikka		6.11.2018			A-tuki	
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.	A4
				WEIGHT:		SCALE:1:50	SHEET 1 OF 1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



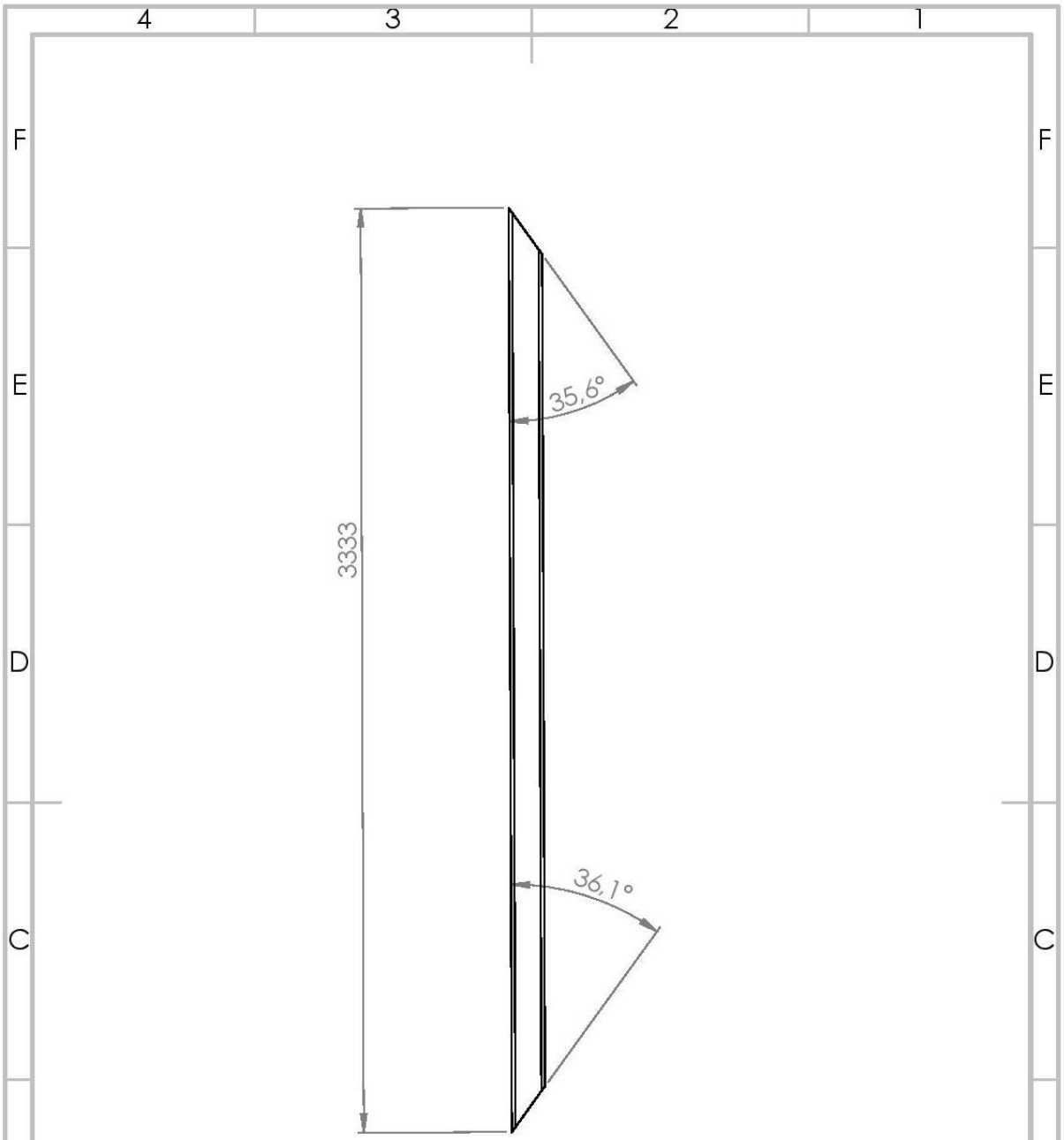
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE		TITLE:		
DRAWN	J. Toikka		6.11.2018		alapalkki		
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:	DWG NO.	A4	
					1		
				WEIGHT:	SCALE:1:50	SHEET 1 OF 1	

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



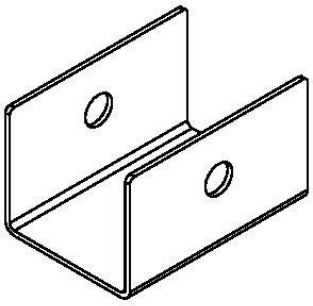
UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN	J. Taikka		6.11.2018			palkki vasen	
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO.	A4
						2	
				WEIGHT:		SCALE:1:50	SHEET 1 OF 1

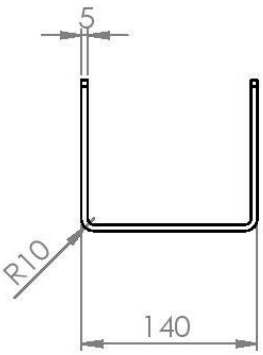
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

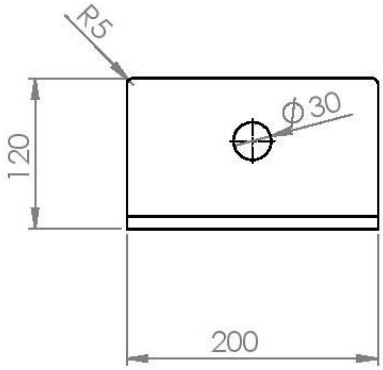


UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:		FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES		DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN	J. Toikka		6.11.2018			palkki oikea	
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO. 3	A4
				WEIGHT:		SCALE:1:50	SHEET 1 OF 1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



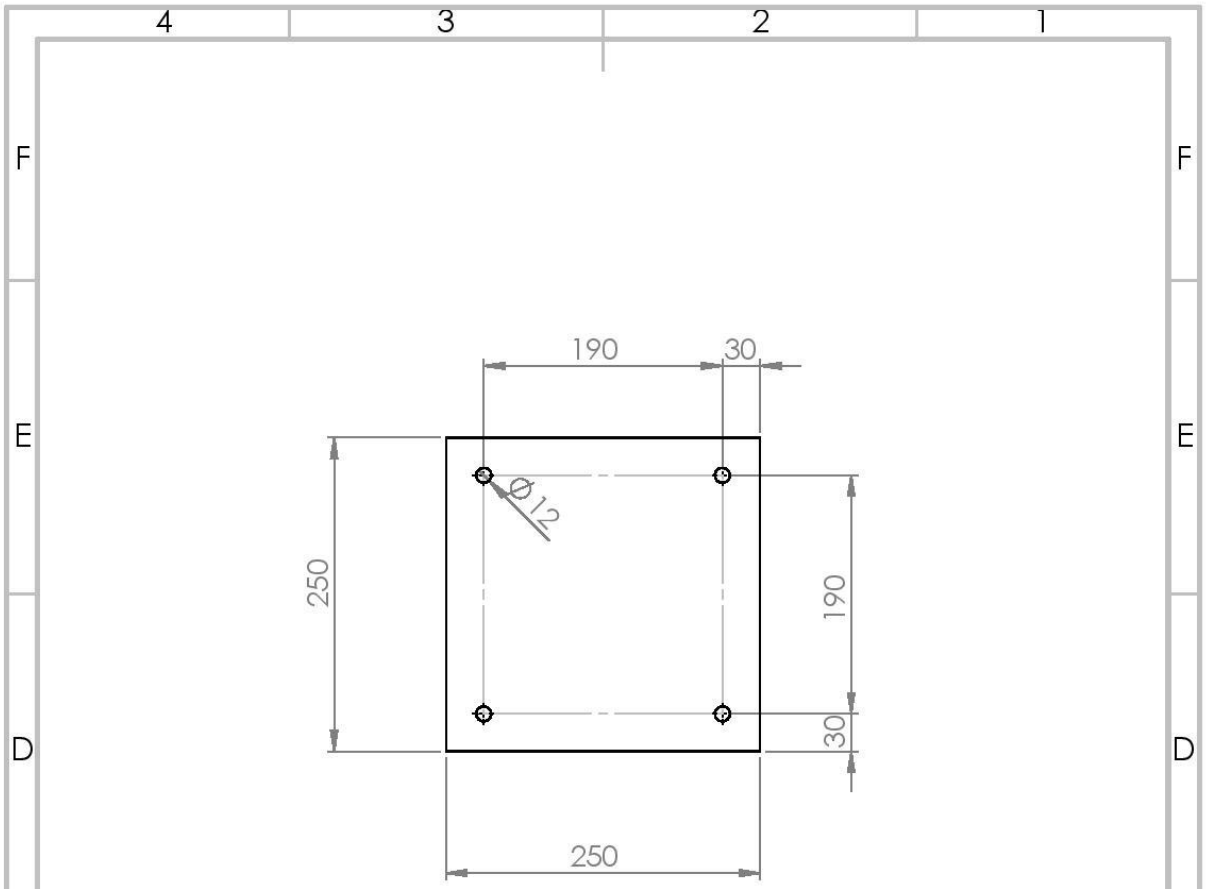




30mm reikä porataan paikan päällä,
joten sen sijaintia ei mitoiteta.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION	
	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE: kiinnityskappale		
DRAWN	J. Taikka		6.11.2018			
CHK'D						
APPV'D						
MFG						
Q.A.				MATERIAL:	DWG NO. 4	A4
				WEIGHT:	SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS SURFACE FINISH: TOLERANCES: LINEAR: ANGULAR:	FINISH:		DEBURR AND BREAK SHARP EDGES	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION		
	NAME	SIGNATURE	DATE			TITLE:	
DRAWN	J.Taikka		6.11.2018			laatta	
CHK'D							
APPV'D							
MFG							
Q.A				MATERIAL:		DWG NO. 5	A4
				WEIGHT:		SCALE:1:5	SHEET 1 OF 1

SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.