




Raportin nimi		
Siipituen puristuskestävyys		
Asiakkaan nimi, yhteyshenkilö ja yhteystiedot	Asiakkaan viite	
Onnettomuustutkintakeskus Ismo Aaltonen Ratapihantie 9 00520 Helsinki	VTT-V-105149-15 Tarjous 6.2.2015 Tilaus 12.2.2015 (Hannamari Helke)	
Projektin nimi	Projektin numero/lyhytnimi	
Alumiinisen siipitukikappaleen tutkimus (nurjahduslaskelmat sekä veto- ja puristuskokeet)	105149/ OTKES_BUCKLE	
Raportin laatija(t)	Sivujen/liitesivujen lukumäärä	
Asko Talja, Päivi Karjalainen-Roikonen	7 s. + liitt. 7 s.	
Avainsanat	Raportin numero	
Jämijärvi, onnettomuus, siipituki, lujuus, tutkinta	VTT-R-00870-15	
Tiivistelmä		
<p>Tutkimus koskee onnettomuustutkintakeskuksen (OTKES) tutkintaa, joka liittyy Jämijärvellä 20.4.2014 tapahtuneeseen lento-onnettomuuteen. Tutkimus keskittyy alumiinisen siipituen veto- ja puristuskestävyyden arviointiin, joka käsittää myös siipituen poikkileikkausarvojen ja materiaalin lujuusarvojen kokeellisen määrittämisen.</p> <p>Materiaalikoekiden perusteella materiaali täyttää sille asetetut lujuusvaatimukset. Siipituen poikkileikkauksen mitoissa on hieman epäsymmetrisyyttä, mutta laskelmien perusteella sillä ei ole vaikutusta puristuskestävyyteen.</p> <p>Siipituen arvioitu puristuskestävyys on 38–48 kN (ilman varmuuskertoimia). Arvion epätarkkuus johtuu käytetyistä laskentaperusteista ja siitä, että siipituen (pituus $L \approx 2,1$ m) tarkkaa pituutta ei pystytty luotettavasti selvittämään.</p> <p>Tutkimus ei käsittele siipitukeen kohdistuvan voiman tarkkaa laskentaa. Karkean arvion perusteella siipituen puristusvoima voi kuitenkin olla lasketun puristuskestävyyden suuruusluokkaa. Luotettava arvio siipituen lujuuden riittävydestä edellyttää siipeen kohdistuvien aerodynaamisten voimien tarkkaa laskentaa.</p> <p>Tutkimuksessa arvioitiin myös siipituen alkukäyryyden vaikutusta. Tarkastelun perusteella vaikutus puristuskestävyyteen on noin 7–12 %, jos alkukäyryys on $L/400 = 5$ mm, mutta pienenee nopeasti, jos arvo on sitä suurempi.</p> <p>Englanninkielinen tiivistelmä tutkimuksesta on esitetty raportin liitteenä C.</p>		
Luottamuksellisuus	Luottamuksellinen	
Espoo 4.3.2015 Laatija	Tarkastaja	Hyväksyjä
 Asko Talja erikoistutkija	 Aslak Siljander johtava tutkija	 Eila Lehmus tutkimusalueen päällikkö
VTT:n yhteystiedot		
Asko Talja, PL 1000, 02044 VTT, asko.talja@vtt.fi, puh. 020 7222 6831		
Jakelu (asiakkaat ja VTT)		
Tilaja, (Ismo Aaltonen) VTT arkisto	1 alkuperäinen + 1 kopio 1 alkuperäinen	
<p>VTT:n nimen käyttäminen mainonnassa tai tämän raportin osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:ltä saadun kirjallisen luvan perusteella.</p>		

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
2. Siipituen mitat	3
3. Materiaaliominaisuudet	5
4. Siipituen veto- ja puristuskestävyys	6
Lähdeviitteet.....	7
Liite A: Siipituen materiaalin vetokokeet	8
Liite B: Puristus- ja vetokestävyyden laskenta	11
Liite C: Summary.....	14

1. Johdanto

Tutkimus koskee onnettomuustutkintakeskuksen (OTKES) tutkintaa, joka liittyy Jämijärvellä 20.4.2014 tapahtuneeseen lento-onnettomuuteen. Tutkimus keskittyy alumiinisen siipituen veto- ja puristuskestävyyden arviointiin, ja käsittää myös siipituen poikkileikkausarvojen ja materiaalin lujuusarvojen kokeellisen määrittämisen. Tutkimus perustuu onnettomuustutkintakeskukselta saatuun alumiiniprofiilinäytteeseen (Kuva 1). Sen materiaalia on jo aikaisemmin tutkittu VTT:llä (VTT 2014).



Kuva 1. Tutkittava siipituki ja siinä käytetyn profiilin muoto (OTKES).

Onnettomuuskoneen suurin sallittu kokonaispaino on onnettomuustutkintakeskukselta saadun tiedon mukaan 2540 kg ja koneen kuormitusrajojen ohjekirja-arvot ovat +3,8 g ja -1,9 g (VTT 2015). Tämä tutkimus ei kuitenkaan käsittele siipitukeen aiheutuvien veto- ja puristusvoimien tarkkaa laskentaa.

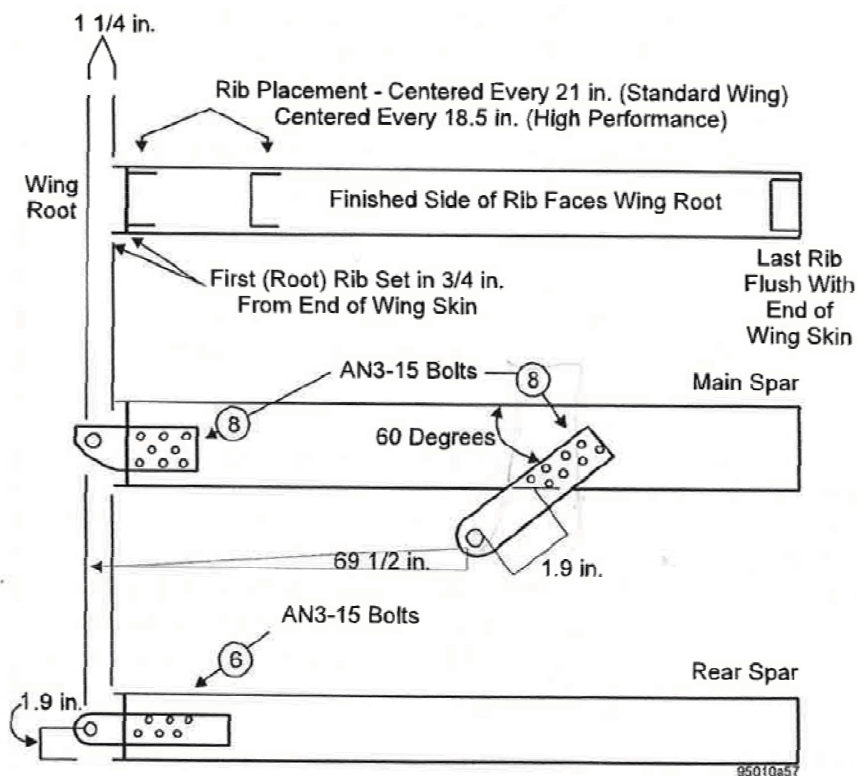
2. Siipituen mitat

Siipiprofiilin pituus on kokoonpanon yhteydessä otetun valokuvan perusteella 2092 mm (Kuva 2). Kiinnityselimissä olevaa reiän sijainti ei ole tarkasti tiedossa. Valokuvien ja vaurioituneista kiinnitysosista tehtyjen mittausten perusteella siipituen kokonaispituus on noin $2092 + 2 \times 30 \text{ mm} = 2152 \text{ mm}$. Kun käytetään ohjekirjan piirustuksessa esiintyvää etäisyyttä rungosta ($69,5 \times 25,4 \text{ mm} = 1765 \text{ mm}$) ja kaltevuutta 30 astetta¹ (Kuva 3), siipituen kiinnityspituus on 2038 mm. Jälkimmäinen arvio perustuu olettamukseen, että siiven ja vinotuen kiinnityskohdat ovat siipeen nähden samalla kohtisuoralla pystylinjalla, mitä ei ole käytössä olevien tietojen avulla pystytty varmentamaan.

¹ Valmistajan kuvassa (Kuva 3) siipituen kiinnityksen kaltevuudeksi on esitetty 60 astetta. Kyseisin kulman tulisi kuvien perusteella olla 30 astetta (vrt. valokuva, Kuva 1).

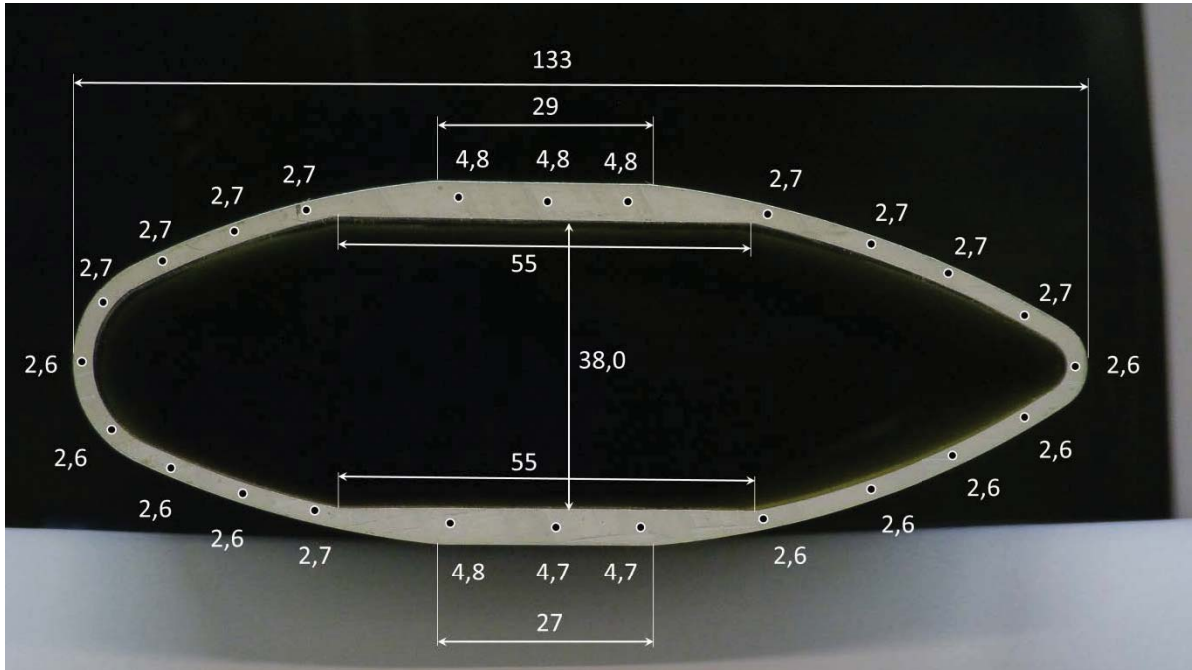


Kuva 2. Vasemmassa kuvassa näkyy siipituen alapään kiinnitys ja profiilissa esiintyvä pituusmerkintä. Oikeassa kuvassa näkyvät myös siipituen yläpään kiinnityselimet (OTKES).



Kuva 3. Siipituen kiinnityskohdan sijainti siivessä (OTKES, Assembly Manual - Comp Monster and Comp Air 6 Aircraft).

Siipituen poikkileikkausmitat ja ainepaksuudet määritettiin mittaamalla profiilin päästä. Muoto määritettiin valokuvaamalla poikkileikkauksen pää. Mittausten perusteella poikkileikkaus ei ole täysin symmetrinen, vaan alaosan ainepaksuudet ovat hieman pienemmät kuin yläreunassa (Kuva 4).



Kuva 4. Mitatut poikkileikkausarvot (mm).

Poikkileikkaus piirrettiin otetun valokuvan ja mittaustulosten mukaiseksi AutoCAD-ohjelmalla. Piirretyn poikkileikkauksen avulla laskettiin puristuskestävyyden laskennassa tarvittavat profiilin poikkileikkausarvot (Taulukko 1).

Taulukko 1. Lasketut poikkileikkaussuureet heikomman pääjäyhyysakselin suhteen.

Suure	Arvo
Pinta-ala	$A = 950,4 \text{ mm}^2$
Epäkeskisyys (etäisyys täysin symmetrisen profiilin pintakeskiöstä)	$e_N = 0,095 \text{ mm}$
Hitausmomentti	$I = 30,67 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$
Hitaussäde	$i = 17,96 \text{ mm}$
Taivutusvastus	$W = 12,89 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$

3. Materiaaliominaisuudet

Aikaisemmassa tutkimuksessa (VTT 2014) määritetyn koostumuksen ja kovuuden perusteella käyttämättömän vertailukappaleen materiaali vastaa lähinnä standardin SFS-EN-755-2 (2013) mukaista EN AW-6106 [AlMgSiMn] mukaista seosta toimitustilassa T6. Silloin ei kuitenkaan ole määritetty siipituen materiaaliominaisuuksia.

Siipituen veto- ja puristuskestävyyden arviointia varten materiaalille tehtiin kaksi täyden ainepaksuuden vetokoetta. Koesauvat otettiin pituus suunnassa profiilin ylä- ja alapinnalta ($t = 4,8/4,7$) mm. Taulukossa esitetty kimmokerroin nimellisarvo perustuu standardiin SFS-EN 1999-1-1 (2009) ja muut nimellisarvot perustuvat standardiin EN-755-2 (2013). Molemmista näytteistä määritetyt ominaisuudet ovat lähes samat (Taulukko 2). Materiaali täyttää sille asetetut vaatimukset; mitattu lujuus on huomattavasti minimiarvoa korkeampi, joskin kimmo kerroin on hieman laskentastandardissa esitettyä pienempi. Tarkemmin vetokokeet on raportoitu liitteessä A.

Taulukko 2. Siipituen materiaalin mekaaniset ominaisuudet.

Ominaisuus	Nimellisarvo	Mitattu arvo (2 koetta)
Myötöraja (0,2-raja)	$f_y = 200$ MPa (min)	$f_y = 282/282$ MPa
Vetomurtomurtolujuus	$f_u = 250$ MPa (min)	$f_u = 297/297$ MPa
Murtovenymä ($L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$)	$A = 8$ %	$A = 11,0/11,2$ %
Kimmokerroin	$E = 70$ GPa	$E = 69,1/67,1$ GPa

4. Siipituen veto- ja puristuskestävyys

Sauvan puristuskestävyys laskettiin Mathcad-ohjelmalla. Laskenta perustuu standardiin SFS-EN 1999-1-1 (2009). Lisäksi sauvan alkukäyryyden merkitystä arvioitiin lievästi käyrän sauvan puristuksen teoriaan perustuen.

Kestävyudet (ilman varmuuskertoimia) laskettiin sekä nimellisarvoihin että vetokokeista saatuun myötörajaan 282 MPa ja keskimääräiseen kimmokertoimeen 68,1 GPa perustuen (Taulukko 2). Poikkileikkaussuureet perustuvat mitattuihin arvoihin (Taulukko 1). Siipituen puristuskestävyys laskettiin käyttäen nurjahduspituutena sekä arvoa $L = 2152$ mm että $L = 2038$ mm. Laskentaperusteet ja laskentakaavat on esitetty liitteen B laskentaesimerkissä.

Tulosten perusteella (Taulukko 3) siipituen puristuskestävyys on 20–22 % ohjeen SFS-EN 1999-1-1 mukaisesta vetokestävyyydestä, kun laskenta perustuu nimellisarvoihin ja 14–16 % vetokestävyyydestä, kun laskenta perustuu mitattuihin arvoihin. Ohjeen perusteena on sauvan alkukäyryys $L/1000$, mutta ohjeen laskentaperusteissa otetaan huomioon myös muita rakenteen ja materiaalin epätäydellisyyksiä.

Alkukäyryyden $L/400$ vaikutus teoreettiseen suoran sauvan puristuskestävyyteen on vain noin 7–12 % (Taulukko 3), mutta puristuskestävyys pienenee nopeasti, jos alkukäyryys on arvoa $L/400$ suurempi. Siten poikkileikkauksen epäsymmetrisyydestä 0,1 mm (Taulukko 1) johtuva epäkeskisyyden vaikutus puristuskestävyyteen on erittäin pieni. Taipumaa voinee kuitenkin aiheuttaa myös siipituen poikittaiskuormitus. Esimerkiksi taipuma $L/400$ voi syntyä jo noin 0,9 kN tasaisesti jakautuneesta kuormasta (Liite B).

Taulukko 3. Lasketut puristuskestävyydet.

Laskentaperuste	Kestävyys (kN) nimellislujuuudella		Kestävyys (kN) mitatulla lujuuudella	
	$L = 2152$	$L = 2038$	$L = 2152$	$L = 2038$
Nurjahduspituus				
Vetokestävyys	190	190	268	268
SFS-EN 1999-1-1	38,2	42,1	38,6	42,7
Suora sauva (Euler)	45,8	51,0	44,5	49,6
$L/1600 = 1,3$ mm (alkukäyryys)	44,4	49,3	43,7	48,6
$L/800 = 2,6$ mm	43,1	47,8	42,8	47,6
$L/400 = 5,3$ mm	40,8	45,1	41,3	45,8
$L/200 = 11$ mm	37,0	40,6	38,6	42,6
$L/100 = 21$ mm	31,4	34,2	34,2	37,5

Tämä tutkimus ei käsittele siipitukeen kohdistuvan veto- ja puristusvoiman tarkkaa laskentaa. Suuruusluokkaa voidaan kuitenkin karkeasti arvioida olettamalla, että siipien nostovoiman

resultantti kohdistuu siiven ja tuen kiinnityskohtaan. Silloin koneen kuormitusrajojen ohjekirja-arvoilla siipitukeen voi aiheutua vetovoima (ilman varmuuskertoimia), joka on $3,8 \cdot 9,81 \cdot 2540 \text{ kN} / 2 / \sin 30^\circ = 94,7 \text{ kN}$ tai puristusvoima, joka on $94,7 / 2 = 47 \text{ kN}$. Arvioitu puristusvoima vastaa suurusluokaltaan laskettua puristuskestävyyttä, joka on arviointitavasta riippuen 38–48 kN (ilman varmuuskertoimia). Luotettava arvio siipituen lujuuden riittävydestä edellyttää kuitenkin siipeen kohdistuvien voimien tarkkaa laskentaa.

Lähdeviitteet

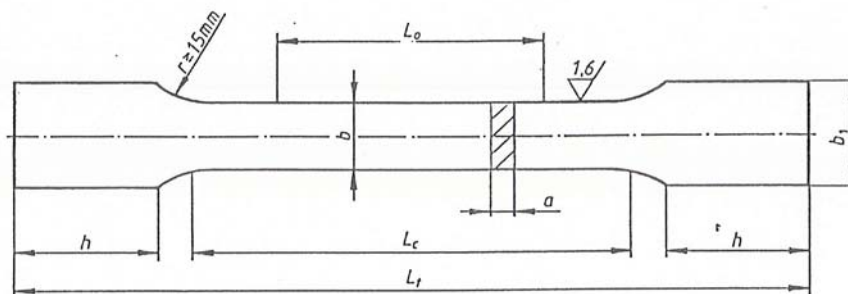
- SFS-EN 1999-1-1. 2009. Eurokoodi 9. Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Rakenteita koskevat yleiset säännöt.
- SFS-EN 755-2. 2013. Alumiini ja alumiiniseokset. Pursotetut tangot, putket ja profiilit. Osa 2: mekaaniset ominaisuudet.
- VTT. 2014. Alumiinisen siipituen (Comp Air 8, OH-XDZ) alapään materiaalin ja murtumisen tutkimus. Tutkimusselostus nro VTT-S-03437-14.
- VTT. 2015. Jämijärven hyppykoneen (Comp Air 8, OH-XDZ) siipituen laskennalliset stabiiliteettitarkastelut (nurjahdustarkastelu ja jäyhyyksien määrittäminen kyseisen sauvan poikkipintaprofiilille). Kokousmuistio 28.1.2015.

Liite A: Siipituen materiaalin vetokokeet

Päivi Karjalainen-Roikonen

Koesauvat ja kokeiden suoritus

Siipituen referenssipalan materiaalin vetokokeet tehtiin standardin EN ISO 6892-1 *“Metallic materials – Tensile testing – Part 1 RT”* mukaisesti huoneenlämpötilassa siipituen referenssipalan ylä- ja alapinnalle. Kimmokerroin arvioitiin kuormittamalla koesauvoja lineaarisella alueella kolme kertaa ja laskemalla niistä keskiarvo. Vetokokeissa käytettiin täyden ainepaksuuden kiilaistukkasauvoja, joiden vartalon leveys oli 12 mm ja mittapituus lyhyen suhdesauvan mukainen (kuva 1).



Paksuus ¹⁾		Leveys ²⁾	Suhdesauvat				Alku- mittapituus L ₀ =200 mm		b ₁	h
a alaraja	yläraja		L ₀ =5,65 √S ₀	L ₀ =11,3 √S ₀	L _c	L _t	L _c	L _t		
3	7,5	12	75	170	125	220	220	315	17	40
5	12	20	120	240	205	325	230	350	27	50
9	32 ³⁾	32	240	400	420	580	260	420	40	70

a = täysi ainepaksuus, n. 4,8 mm, b = 12 mm, L₀ = 42,9 mm, L_t = 180 mm, h = 50 mm

Kuva 1. Vetokokeissa käytetty koesauva: a = täysi ainepaksuus, n. 4,8 mm, b = 12 mm, L₀ = n. 42,9 mm, h = 50 mm.

Koesauvat irrotettiin siipituen referenssipalan lovetusta päästä profiilin ylä- ja alapinnalta, leveyssuunnassa keskeltä, tasaisen ainevahvuuden alueelta pitkittäissuuntaan. Yläpinnalta irrotettu vetokoesauva merkittiin tunnuksella SY ja alapinnalta irrotettu vetokoesauva tunnuksella SA. Skemaattinen kuva irrotuksesta on esitetty kuvassa 2.



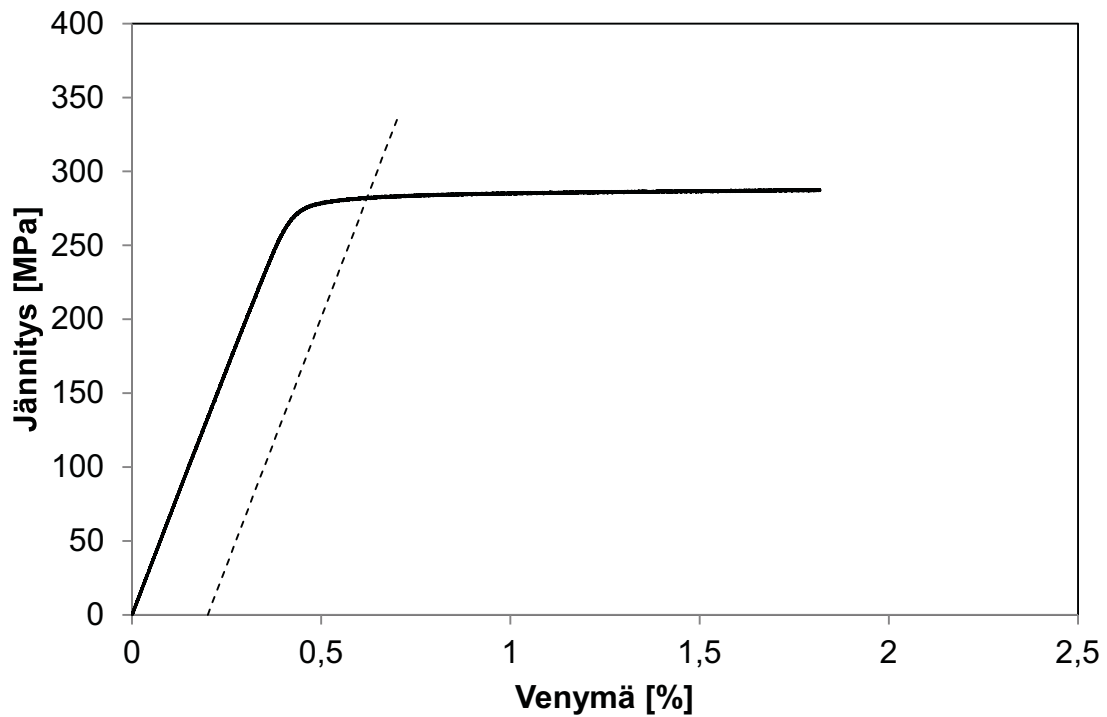
Kuva 2. Skemaattinen irrotuskuva: vetokoesauvat (yhteensä 2 kpl) irrotettiin pitkittäissuunnassa siipituen referenssipalan ylä- ja alapinnalta.

Tulokset

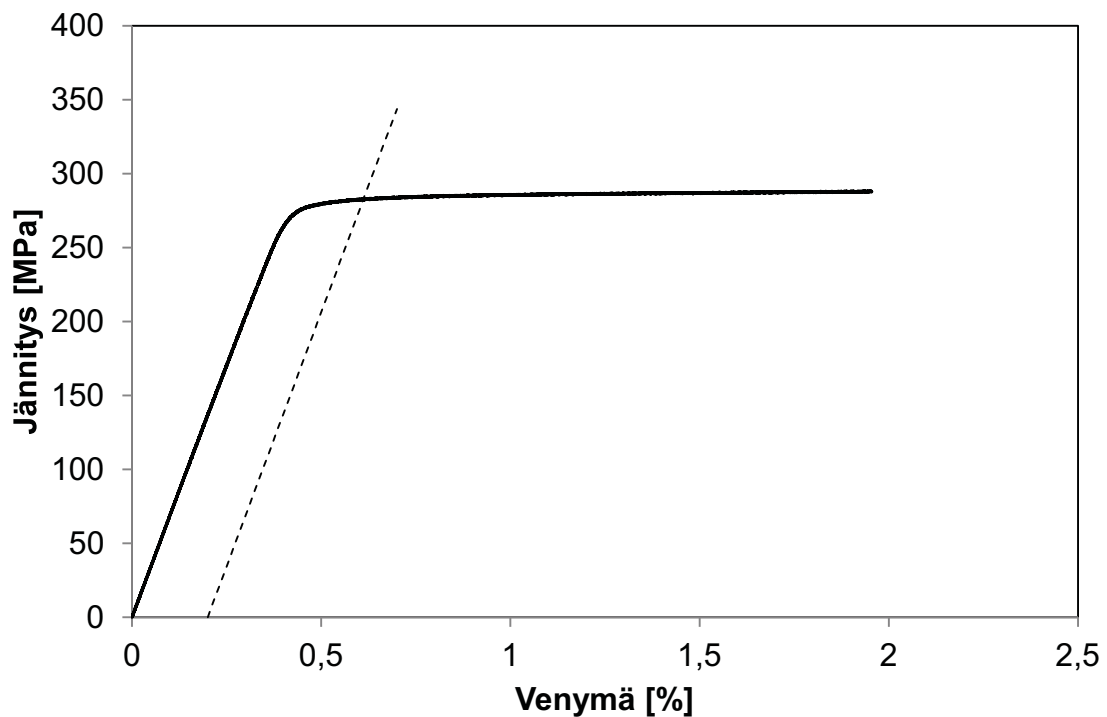
Vetokokeiden tulokset on esitetty taulukossa 1. Siipituen referenssipalan materiaali täyttää standardin SFS-EN 755-2 materiaalille EN AW-6106 T6 asettamat vaatimukset. Vetokokeissa määritettyjen jännitys-venymä-käyrien alkuosat on esitetty kuvissa 3 ja 4.

Taulukko 1. Siipituen materiaalin, EN AW-6106 T6, vetokokeiden tulokset verrattuna standardin SFS-EN 755-2 vaatimuksiin.

Koesauvan paikka, tunniste, koesauvan mitat/ standardivaatimus	Myötöraja $R_{p0.2}$ [MPa]		Murtolujuus R_m [MPa]		Murtovenymä A [%]	Arvioitu kimmokerroin E [GPa]
	min.	max.	min.	max.	min.	
siipituen alapinta SA	282		297		11,0	69,1
siipituen yläpinta SY	282		297		11,2	67,1
SFS-EN 755-2 vaatimus	min.	max.	min.	max.	min.	
	200		250		8	



Kuva 3. Siipituen referenssipalan yläpinnan materiaalin jännitys-venymäkäyrän alkuosa huoneenlämpötilassa yksiakselisessa vetokokeessa määritettynä (koe 1).



Kuva 4. Siipituen referenssipalan alapinnan materiaalin jännitys-venymäkäyrän alkuosa huoneenlämpötilassa yksiakselisessa vetokokeessa määritettynä (koe 2).

Liite B: Puristus- ja vetokestävyyden laskenta

Asko Talja

Laskentamenetelmät

1. SFS-EN 1999-1-1: 2009. Eurokoodi 9. Alumiinirakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Rakenteita koskevat yleiset säännöt
2. Lievästi käyrän sauvan puristus-taivutuksen yleinen teoria

Lähtötiedot

Kimmokerroin	$E := 70000 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Pinta-ala	$A := 950.4 \cdot \text{mm}^2$
Myötöraja (0,2-raja)	$f_y := 200 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	Hitausmomentti	$I := 30.67 \cdot 10^4 \cdot \text{mm}^4$
Nurjahduspituus	$L_{\text{eff}} := 2038 \cdot \text{mm}$	Reunaetäisyys	$e_G := 23.8 \cdot \text{mm}$
Osavarmuusluku	$\gamma_{M1} := 1.0$ (huom. suunnittelussa suositellaan arvoksi 1,1)	Taivutusvastus	$W := \frac{I}{e_G} = 12.89 \cdot 10^3 \cdot \text{mm}^3$
		Hitaussäde	$i := \sqrt{\frac{I}{A}} = 17.96 \cdot \text{mm}$

1. SFS-EN 1999-1-1: Alumiinirakenteiden suunnittelu

$$\sigma_E := \frac{\pi^2 \cdot E}{\left(\frac{L}{i}\right)^2} = 53.678 \cdot \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \quad \lambda := \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_E}} = 1.930 \quad \frac{\sigma_E}{f_y} = 0.268$$

Nurjahduskäyrä 2, sillä EN AW-6106 on luokan B materiaali

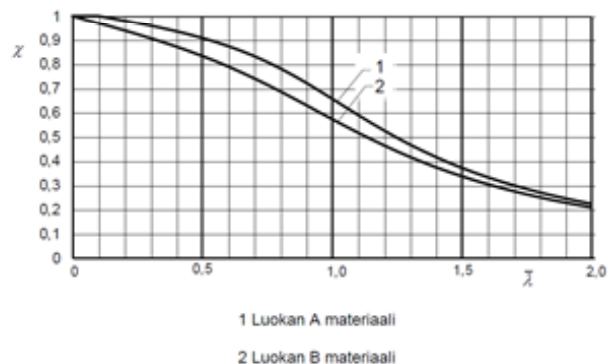
$$\alpha := 0.32 \quad \lambda_0 := 0.00$$

$$\phi := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha \cdot (\lambda - \lambda_0) + \lambda^2 \right] = 2.672$$

$$\chi := \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} = 0.221$$

$$\text{Vetokestävyys} \quad N_t := \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M1}} = 190.1 \cdot \text{kN}$$

$$\text{Puristuskestävyys} \quad N_c := \frac{\chi \cdot N_t}{\gamma_{M1}} = 42.06 \cdot \text{kN}$$



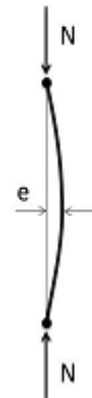
Kuva 6.11 Pienennystekijä χ taivutusnurjahduksessa

2. Lievästi käyrän sauvan puristus-taivutuksen yleinen teoria

Tarkastellaan siniaallon puolikkaan muotoista alkutaipuma, jonka amplitudi (puristusvoiman N epäkeskisyyttä) on e .

Syntyvä taivutusjännitys $\sigma_b := \frac{N \cdot \frac{e}{W}}{1 - \frac{N}{N_E}} \quad N_E := A \cdot \sigma_E = 51.02 \cdot \text{kN}$

Tarkasteltavat alkukäyrydet $j := 0..4 \quad e_j := \frac{L}{1600} \cdot 2^j$



$e_j =$	$\frac{L}{e_j} =$
1.274	1600
2.548	800
5.095	400
10.190	200
20.380	100

$$\sigma(N, e_j) := \frac{N}{A} + \frac{\frac{N \cdot e_j}{W}}{1 - \frac{N}{N_E}} - f_y$$

$$N_{e,c_j} := \text{root}(\sigma(N, e_j), N, 0, 0.9999 \cdot N_E)$$

$$\sigma_{n_j} := \frac{N_{e,c_j}}{A} \quad \sigma_{b_j} := \frac{\frac{N_{e,c_j} \cdot e_j}{W}}{1 - \frac{N_{e,c_j}}{N_E}}$$

$N_{e,c_j} =$	$\frac{N_{e,c_j}}{N_t} =$	$\frac{N_{e,c_j}}{N_E} =$	$1 - \frac{N_{e,c_j}}{N_E} =$	$\frac{N_{e,c_j} \cdot e_j}{W} =$
49.34	0.260	0.967	0.033	4.9
47.80	0.251	0.937	0.063	9.4
45.06	0.237	0.883	0.117	17.8
40.60	0.214	0.796	0.204	32.1
34.20	0.180	0.670	0.330	54.1

Puristusjännitys

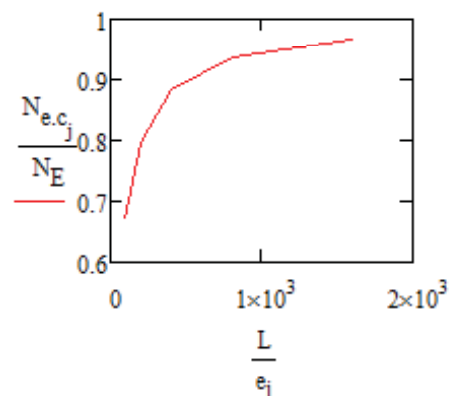
$$\sigma_{n_j} =$$

51.9
50.3
47.4
42.7
36.0

Taivutusjännitys

$$\sigma_{b_j} =$$

148.1
149.7
152.6
157.3
164.0



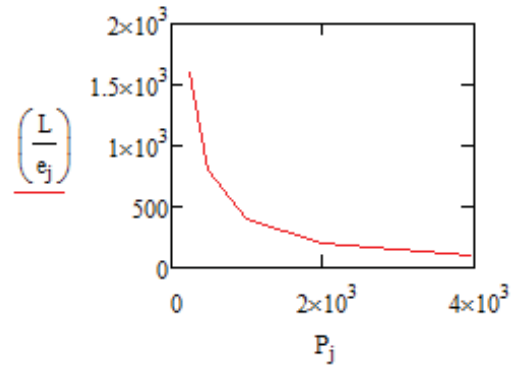
Taipuma siipituen poikittaiskuormasta

Tasaisesti kuormitetun palkin taipuma

$$f := \frac{5}{384} \cdot \frac{PL^3}{EI} = \alpha \cdot e_j$$

$$P_j := \frac{384}{5} \cdot \frac{E \cdot I}{L^3} \cdot e_j$$

$e_j =$	$\frac{L}{e_j} =$	$P_j =$
1.274 ·mm	1600	0.248 ·kN
2.548	800	0.496
5.095	400	0.992
10.190	200	1.985
20.380	100	3.970



Liite C: Summary

The research concerns an air accident at Jämijärvi, which took place on the 20th April 2014, and which is under investigation by the Safety Investigation Authority (SIA, Finland). This report is focused on the determination of tension and compression resistance of an aluminum wing support. It also covers the calculation of cross-section properties and testing of the material.

Based on the material tests the material fulfils the strength requirements of standard SFS-EN 755-2 (2013). Based on the measured cross-section dimensions, the profile is slightly asymmetric, but this does not affect the compression resistance of the wing support.

The estimated compression resistance of the wing support is 38–48 kN (without any safety factors). The uncertainty in the estimation is affected by the used calculation basis (SFS-EN 1999-1-1 (2009) or Euler buckling with eccentricity, Table 1) and uncertainty in wing support length ($L \approx 2.1$ m).

The study does not consider the exact calculation of the compression force of the wing support. A rough estimate based on negative acceleration -1.9g shows that the compression force of the support may be same order of magnitude as the calculated compression resistance. However, a reliable estimate of adequate strength of the support requires exact calculation of aerodynamic wing forces.

In addition the initial imperfection of half sine wave shaped was studied. The effect of the initial imperfection on the compression resistance is about 7–12%, if the initial curvature is $L/400 = 5$ mm, but decreases rapidly if the imperfection is greater.

Table 1. Calculated compression resistances.

Calculation basis	Resistance (kN) Nominal strength		Resistance (kN) Tested strength	
	$L = 2152$	$L = 2038$	$L = 2152$	$L = 2038$
Buckling length				
Tension resistance	190	190	268	268
SFS-EN 1999-1-1	38.2	42.1	38.6	42.7
Straight rod (Euler)	45.8	51.0	44.5	49.6
$L/1600 = 1.3$ mm (initial imperfection)	44.4	49.3	43.7	48.6
$L/800 = 2.6$ mm	43.1	47.8	42.8	47.6
$L/400 = 5.3$ mm	40.8	45.1	41.3	45.8
$L/200 = 11$ mm	37.0	40.6	38.6	42.6
$L/100 = 21$ mm	31.4	34.2	34.2	37.5

References

SFS-EN 1999-1-1. 2009. Eurocode 9. Design of aluminium structures. Part 1-1: General structural rules.

SFS-EN 755-2. 2013. Aluminium and aluminium alloys. Extruded rod/bar. tube and profiles. Part 2: Mechanical properties.

VTT. 2014. The lower end of aluminium wing support (Comp Air 8. OH-XDZ): investigation of material grade and fracture surface. Research report No. VTT-S-03437-14.