

KARELIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikka

Kari Hirvonen

VETOTANGOLLA VAHVISTETUN PALKIN MITOITUS

Opinnäytetyö  
Lokakuu 2018



**OPINNÄYTETYÖ**  
**Lokakuu 2018**  
**Rakennustekniikka**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU

Tekijä(t)  
Kari Hirvonen

Nimeke  
Vetotangolla vahvistetun palkin mitoitus

Toimeksiantaja  
Bino-hankkeet

**Tiivistelmä**

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin liittorakenteita, toisin sanoen rakenteita, jotka on koottu kahdesta tai useammasta eri osasta. Opinnäytetyössä käytiin läpi yleisimpiä liittorakenteita, mitä ne ovat ja kuinka niitä hyödynnetään rakentamisessa. Tarkemmin tutustutaan puurakenteiseen vetotangolla vahvistettuun palkkiin. Opinnäytetyö esittelee puurakenteiseen vetotangolla vahvistetun palkin rakenteen, toimintaperiaatteen sekä laskennallisen mitoituksen.

Opinnäytetyössä perehdyttiin puurakenteiseen vetotangolla vahvistetun liimapalkin rakenteeseen, ominaisuuksiin sekä liitoksiin. Tutkielmassa käydään läpi palkin mitoitus eurokoodin ohjeiden mukaan puu- ja teräsrakenteiden osalta sekä tarkastetaan palkin muodonmuutokset FEM-analyysi ohjelmalla.

Opinnäytetyötä varten valmistettiin koekappale puurakenteisesta vetotangolla vahvistetusta liimapuupalkista, joka testattiin Karelian ammattikorkeakoulun laboratoriossa. Tuloksia verrattiin yksinkertaisen liimapuupalkin ja vahvistetun palkin laskennallisiin tuloksiin.

Kieli	Sivuja	34
suomi	Liitteet	3
	Liitesivumäärä	3

**Asiasanat**

puurakenteet, teräsrakenteet, eurokoodi, liittorakenteet



**THESIS**  
**October 2018**  
**Degree Programme in Construction Engineering**

Karjalankatu 3  
80200 JOENSUU

Author (s)  
Kari Hirvonen

Title  
Design of the reinforced beam

Commissioned by  
Bino-projects

**Abstract**

In this thesis composite structures were studied, in other words structures, which are made from two or more different parts. This thesis presents composite structures, what they are and how they are used in construction. Reinforced beam was studied more closely in this research. The thesis presents the structure of a timber beam reinforced by a steel bar, its working principle and dimensioning.

In this thesis a wooden glue beam reinforced by steel bar, its structure, features and joints were studied. This study presents the dimensioning of the beam according to the instructions of Eurocode, which includes timber and steel structures and examines the deformation of the beam by FEM analytical program.

The prototype from wooden glue beam reinforced by steel bar was made and it was tested in the laboratory of Karelia university of applied sciences. Results from this test were compared to the results of calculations from both simple beam and reinforced beam.

Language

Finnish

Pages 34

Appendices 3

Pages of Appendices 3

**Keywords**

wooden structures, steel structures, Eurocode, featured structures

## Sisältö

1	Johdanto .....	5
2	Liittorakenteet .....	5
2.1	Liittorakenteiden suunnittelu .....	5
2.2	Puurakenteet .....	6
2.3	Teräsrakenteet.....	6
2.4	Esijännitetyt puurakenteet .....	7
2.5	Puurakenteinen vetotangolla vahvistettu palkki .....	8
2.6	Puurakenteisen vetotangolla vahvistetun palkin liitokset .....	9
2.7	Vahvistetun palkin stabiliteetti.....	9
3	Vetotangolla vahvistetun palkin mitoitus .....	10
3.1	Suunnitteluperusteet.....	10
3.2	Lähtötiedot.....	11
3.3	Palkin puristuskestävyys.....	12
3.4	Palkin taivutuskestävyys poikkileikkauksen y- ja z-suunnassa .....	13
3.5	Palkin yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys .....	13
3.6	Palkin leikkauskestävyys .....	16
3.7	Palkin kiepahdus (yläpinta).....	16
3.8	Palkin kiepahdus (alapinta).....	18
3.9	Palkin tukipinnat.....	18
3.10	Puristussauvojen eli vertikaalien puristuskestävyys.....	19
3.11	Vetotankojen mitoitus .....	20
3.12	Vahvistetun palkin taipuma .....	21
3.13	Vahvistetun palkin palomitoitus.....	22
4	Vetotangolla vahvistetun palkin testaus .....	24
4.1	Laitteisto .....	24
4.2	Palkin kokoaminen.....	25
4.3	Testaus .....	27
4.4	Tulokset .....	28
5	Yhteenveto.....	29
5.1	Tutkimustyön lopputulos .....	29
5.2	Puun ja teräksen liittorakenteiden tulevaisuus .....	30
	Lähteet.....	31

### Liitteet

Liite 1	Kuvat palkista testauksen jälkeen
Liite 2	Palkin alustavat suunnitelmat
Liite 3	Liimapuun lujuusominaisuudet sekä palkkien rasitukset ja palomitoituksen tulos

# **1 Johdanto**

Tässä opinnäytetyössä tutkin puun ja teräksen välistä liittorakennetta, joka ei ole vielä niin yleistynyt Suomen rakennustuotannossa, kuten useammin käytetyt puusta ja betonista tai teräksestä ja betonista valmistetut liittorakenteet. Puu on kevyt, kestävä ja taloudellinen materiaali, mutta se ei kestä taivutusta, jolloin taipuma tulee monesti mitoittavaksi tekijäksi, eikä näin ollen päästä pitkiin jänneväleihin kovin helposti. Puusta pystytään tekemään arkkitehtuurisesti näyttäviä ja esteettisiä rakenteita, joten sitä halutaan käyttää myös rungon materiaalina. Tämä johtaa liittorakenteiden käyttöön, jos puusta halutaan tehdä suurempia rakennuksia ja rakenteita kuten halleja tai siltoja. Puurakenteisiin liitetään teräsrakenteet, jotka tunnetaan suurista lujuuksistaan, joten sillä saadaan vahvistettua puurakenteita merkittävästi.

Tämän opinnäytetyön päätutkimuskohde oli puurakenteinen vetotangolla vahvistettu palkki. Tutkielmassani käyn läpi myös yleisesti liittorakenteita sekä syitä miksi niihin päädytään ja mitä etua tai haittaa niiden käytöstä voi olla. Lopuksi suoritin Karelian ammattikorkeakoulun tiloissa testauksen vetotangolla vahvistetulle palkille voidakseni vertailla laskentapohjan tuloksia testauksesta saatuihin tuloksiin.

## **2 Liittorakenteet**

### **2.1 Liittorakenteiden suunnittelu**

Liittorakenteella tarkoitetaan rakennetta, joka on valmistettu kahdesta osasta ja ne on yhdistetty toimivaksi rakenteeksi. Rakenteen osat voivat olla valmistettuja samasta materiaalista, kuten esimerkiksi ontelolaattaväli pohja, jonka päälle valetaan pintabetonilaatta. Toinen vaihtoehto on käyttää kahta eri materiaalia, kuten tässä opinnäytetyössä tarkasteltavassa vetotangolla vahvistetussa palkissa käytetään puuta ja terästä. Liittorakenne pyritään suunnittelemaan

molempien materiaalien hyviä ominaisuuksia tehokkaasti ja taloudellisesti hyödyntäen. Tähän ratkaisuun voidaan päätyä, jos haluttua rakennetta ei saada toteutettua järkevästi yhtä materiaalia hyödyntäen.

## **2.2 Puurakenteet**

Puu on Suomessa suuri ja tärkeä luonnonvara sekä sitä on käytetty rakentamisessa jo pitkään. Puun osuus rakentamisesta on Suomessa noin 40 % ja sillä on hyvät edellytykset nousta suurempaan suosioon rakennusteollisuudessa. Puurakenteet ovat pitkäkestoisia, josta osoituksena on myös Suomen vanhin puurakennus Tarsian aitta, joka sijaitsee Kihniössä ja se on rakennettu vuonna 1441 (Puuinfo 2018).

Nykyaikaiset puurakenteet ovat myös paloturvallisia ja ne kantavat hyvin myös onnettomuustilanteissa, tarvittaessa ilman palosuojaustakin, mutta silloin rakenteen dimensiot kasvavat suuriksi. Puuta suositaan usein konserttisaleja tai auditorioita suunnitellessa sisäverhousmateriaaleissa sen hyvien akustisten ominaisuuksien vuoksi. Puurakentaminen on ekologista, koska puu on uusiutuva luonnonvara ja puurakenteet varastoivat ilmasta hiilidioksidia itseensä näin alentaen ilman saastepitoisuuksia. Puulla on hyvät puristus- ja vetolujuusominaisuudet suhteessa sen omaan painoonsa, joten sillä saadaan aikaan kestäviä, mutta suhteellisen kevyitä rakenteita.

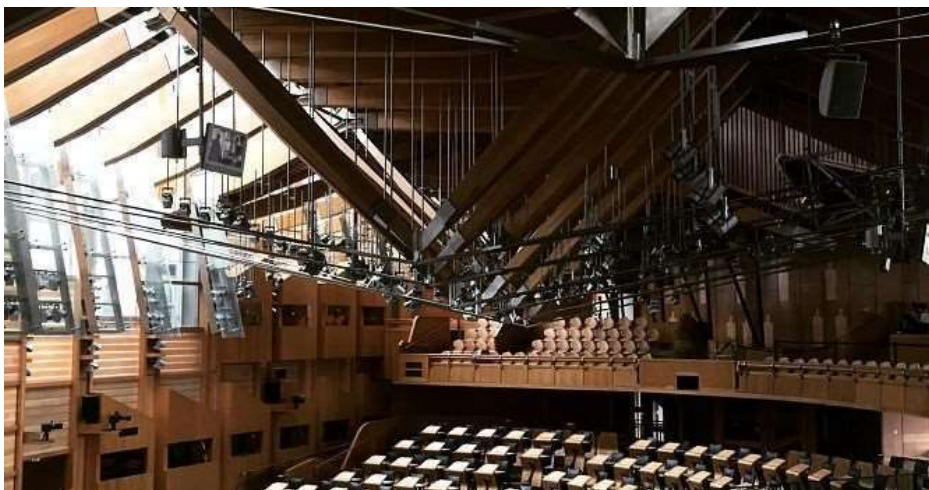
## **2.3 Teräsrakenteet**

Teräs on tärkeä osa Suomen rakennusteollisuutta, etenkin teollisuus- ja tuotantorakennuksissa. Kaikista Suomeen rakennettavista rakennuksista noin 20% tehdään teräsrunkoisina. Teräs erottuu selkeästi muista rakennusmateriaaleista kuten puusta ja betonista sen huomattavasti suuremmalla vetolujuudella. Teräs on painoonsa nähden luja rakennusmateriaali.

Teräksestä saa helposti tehtyä yksinkertaisia rakenneratkaisuja, jotka on helppo asentaa ja koota työmaalla rungoksi. Teräksen huonoja puolia ovat kalliit valmistuskustannukset ja huonoissa olosuhteissa teräs alkaa helposti ruostumaan. Tätä voidaan ehkäistä korroosionesto- ja suojamenetelmillä kuten kuumasinkityksellä, mikä taas lisää valmistuskustannuksia entisestään. Teräs kestää huonosti palotilanteessa, koska teräksen lämpenemine aiheuttaa teräkselle nopeasti lujuusominaisuuksien heikkenemisen. Teräsrakenteille käytettyjä palonsuojausmenetelmiä ovat muun muassa betonointi, rakenteelliset ratkaisut ja palonsuojausmaalit- ja levyt. Betonoinnissa esimerkiksi teräspilari betonoidaan ympäriinsä, joka suojaa siten pilaria palolta. Rakenteellisessa ratkaisussa esimerkiksi välipohjapalkkien suojaksi tehdään alaslaskettu kattorakenne suojaamaan palkkeja palolta. (Jarkko Johansson)

## 2.4 Esijännitetyt puurakenteet

Esijännitetyllä ja jäykistetyllä puurakenteella tarkoitetaan rakennetta, jonka runkomateriaalina toimii puu, mutta sitä on vahvistettu teräsosilla, eli on puun ja teräksen liittorakenne. Esijännitetty ja jäykistetty rakenne eroavat toisistaan niin, että esijännitettyssä ratkaisussa teräsosalla esimerkiksi tangolla tai vaijerilla saadaan rakenteeseen esikoroitusta alkutilanteeseen nähden. Tämä rakenneratkaisu on stabiilimpi kuin jäykistetty vaihtoehto, mutta hankalampi toteuttaa käytännössä. (Kuva 1)

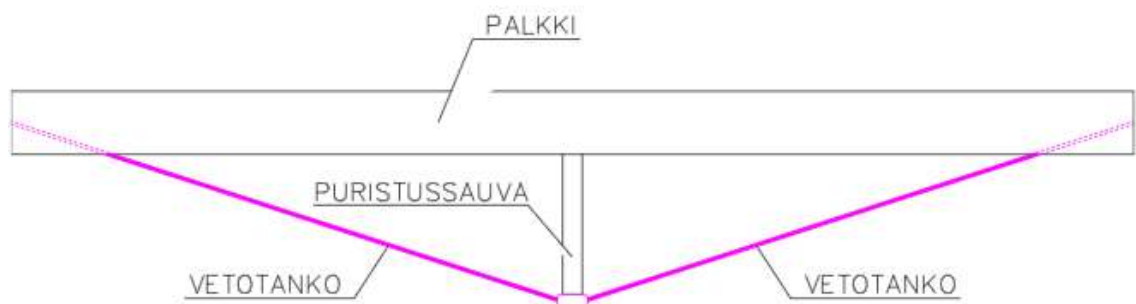


Kuva 1. Skotlannin parlamenttitalo. (Advisor.Travel)

Näitä rakenneratkaisuja voidaan käyttää siltarakenteena puusilloissa sekä kattokannattajina ja pilareina esimerkiksi korkeissa ja laaja-alaisissa hallirakennuksissa. Tällä ratkaisulla päästään pidempiin jänneväleihin kuin pelkästään puurakenteilla, mikä taas mahdollistaa suuremmankin hallin rakentamisen puurunkoisena. Puurakenteilla halliin saadaan kevyemmät rakenteet kuin esimerkiksi teräsrakenteilla ja se on myös taloudellisempi vaihtoehto. Rakenteiden jäykistys sopii vaihtoehdoksi myös vanhojen rakenteiden vahvistamiseen korjaus- ja saneerauskohteissa. Puusta saadaan tehtyä arkkitehtuurisesti näyttäviä sekä esteettisiä rakennuksia ja siltoja.

## 2.5 Puurakenteinen vetotangolla vahvistettu palkki

Vetotangolla vahvistettu eli jäykistetty palkki tarkoittaa palkkia, jota on vahvistettu vetotangolla. Vetotanko voidaan sijoittaa palkin sisälle tai kiinnittää palkin alapuolelle. Jälkimmäisessä tapauksessa tanko kiinnitetään palkin päihin sekä tuetaan palkkiin erillisten vertikaalitukien avulla. (Kuva 2)



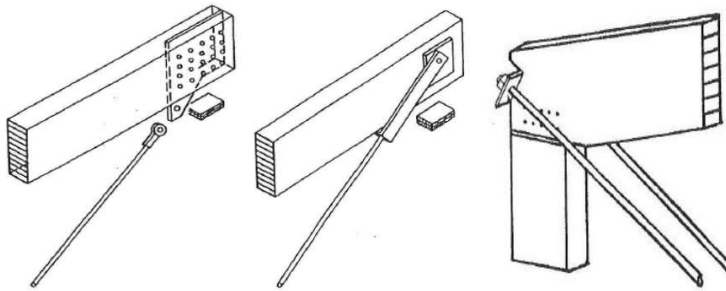
Kuva 2. Vetotangolla vahvistetun palkin yksinkertaistettu rakenne (Puuinfo).

Vahvistetun palkin toiminta perustuu vetotangon ja vertikaalien aiheuttamaan ulkoisen kuormituksen vastavoimaan palkin alapintaan. Kuormituksesta johtuen palkki alkaa taipumaan, jolloin vetotanko alkaa myötämään aiheuttaen vertikaalien puristumisen palkin alapintaa vasten. Tämä kumoaa osittain palkkiin kohdistuvaa ulkoista kuormitusta, minkä seurauksen palkin taipuma on pienempi kuin vastaavassa tapauksessa vahvistamattomalla palkilla. ( Rami Ylä-Pöntinen)

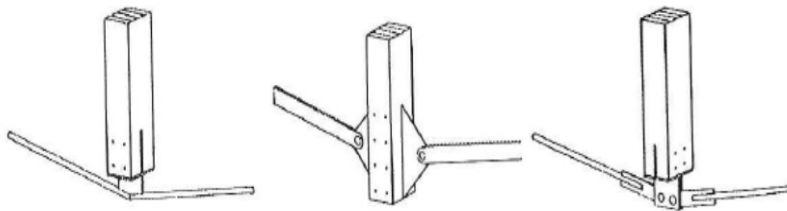


## 2.6 Puurakenteisen vetotangolla vahvistetun palkin liitokset

Liitokset ovat tärkeässä osassa rakentamisessa ja ne tulevat hyvin usein mitoittavaksi tekijäksi rakenteita suunniteltaessa. Vahvistetun palkin liitokset tulee suunnitella yleisten suunnitteluperiaatteiden mukaan (Kuva 3 ja Kuva 4). Rakenteen tulee olla suunniteltu siten, että ne kestävät niille tulevat rasitukset ja ne ovat toteutettavissa mahdollisimman yksinkertaisesti, jotta vältettäisiin virheet niin suunnittelussa kuin toteutuksessa.



Kuva 3. Vahvistetun palkin tavallisimmat tukiliitokset (Puuinfo).



Kuva 4. Vertikaalin ja vetotangon liitoksia (Puuinfo)

## 2.7 Vahvistetun palkin stabiileetti

Rakenteen stabiilius ja jäykistäminen on huomioitava aina jo rakenteen suunnitteluvaiheesta lähtien. Suunnitelmien toimivuus on varmistettava myös rakenteen valmistuksessa sekä asennusvaiheessa, jos rakenteen toimivuutta ei varmisteta, voi seurauksena olla, että rakenne on virheellinen ja sen lujuusominaisuudet ovat suunniteltua heikommat. Tämä voi johtaa rakenteiden pettämiseen käyttöönoton jälkeen.

Vahvistetun palkin mitoituksessa on kaksi stabiliteetti ongelmaa. Ensimmäinen on palkin kiepahdus ja nurjahtaminen. Nämä ongelmat hoituvat vertikaalitukien avulla ja asia voidaan tarkastaa laskennalla, joka käydään läpi tutkimuksen edetessä. Toinen ongelma on vertikaalitukien kiepahtaminen. Tämä on mahdollista estää tukemalla vertikaalit poikittaissuunnassa tai sitten vaijerin tai vetotangon riittävällä jännittämisellä, jotta se puristaisi vertikaalit riittävän tiukasti palkkia vasten. (Rami Ylä-Pöntinen)

### 3 Vetotangolla vahvistetun palkin mitoitus

#### 3.1 Suunnitteluperusteet

Laskenta tapahtuu Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelusta löytyvien vaatimusten mukaan (Eurokoodi 5 osa 1-1, luku 2.1). Standardin EN1990:2002 luvun 2 perusvaatimusten katsotaan puurakenteiden kohdalla täyttyvän, kun rajatilamitoitukseen käytetään standardia EN 1990:2002, kuormien ja niiden yhdistelmät määritetään standardin EN 1991 mukaan ja kestävyys ja säilyvyyden osalta noudatetaan standardia EN 1995.

Kuormien aikaluokitus määritetään rakenteen käyttöiän aikana vaikuttavan kuorman avulla (Taulukko 1). Aikaluokan valintaan vaikuttaa kuormituksen laatu ja sen kesto. Määrittäminen tapahtuu Eurokoodista (Eurokoodi 5 osa 1-1, luku 2.3) löytyvän taulukon avulla. Tässä tutkielmassa kuormituksen aikaluokka on keskipitkä, eli rakennetta kuormittaa palkin oman painon lisäksi esimerkiksi hyötykuorma, jonka vaikutusajan kertymän suuruusluokka on 1 viikko – 6 kuukautta.

Taulukko 1. Kuorman aikaluokka

Kuorman aikaluokka	Ominaiskuorman vaikutusajan kertymän suuruusluokka
Pysyvä	yli 10 vuotta
Pitkäaikainen	6 kuukautta – 10 vuotta
Keskipitkä	1 viikko – 6 kuukautta
Lyhytaikainen	alle yksi viikko
Hetkellinen	

Rakenteen materiaalin ominaisuudet vaikuttavat laskentaan sekä siinä käytettäviin lujuusominaisuuden ominaisarvoihin. Materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuudet otetaan huomioon seuraavasti:

$$X_d = k_{mod} * \frac{X_k}{\gamma_M}$$

missä:

- $X_d$  on materiaalin lujuusominaisuuden ominaisarvo
- $k_{mod}$  on muunnoskerroin, jolla huomioidaan kuorman keston ja kosteuden vaikutus
- $X_k$  on materiaalin lujuusominaisuuden mitoitusarvo
- $\gamma_M$  on materiaalin jäykkyys- ja kestävyysominaisuuden osavarmuusluku (Taulukko 2)

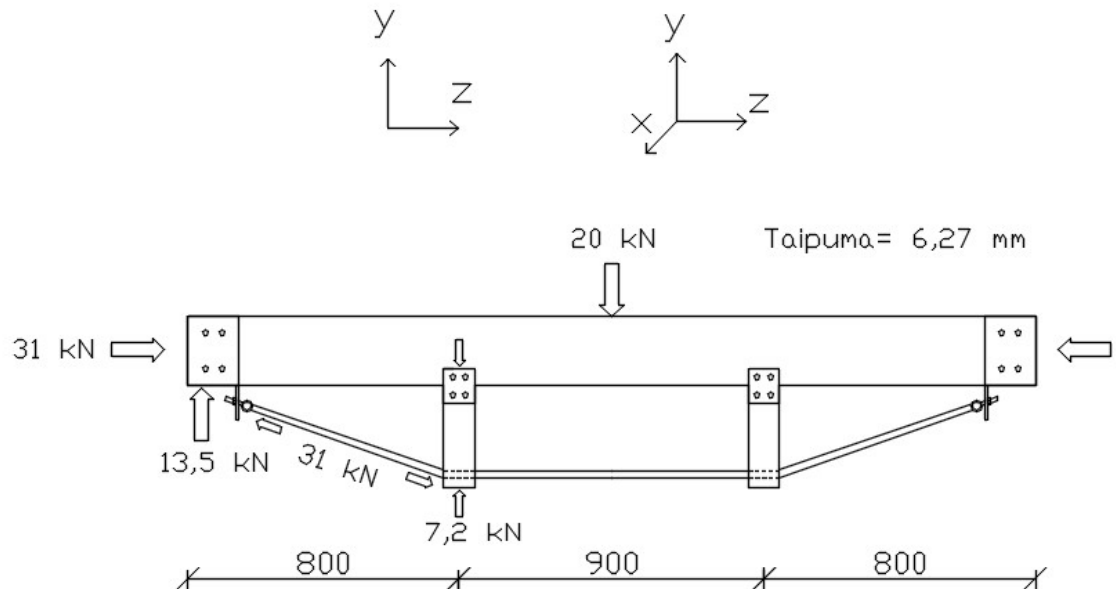
Taulukko 2. Osavarmuusluvut materiaaleittain (Eurokoodi 5 osa 1-1, luku 3), palkin rasitukset. (Eurokoodi 5 osa 1-1, luvut 6 ja 7)

Perusyhdistelmät:	
Sahatavara	1,3
Liimapuu	1,25
LVL, vaneri, OSB-lastulevy	1,2
Muu lastulevy	1,3
Kova kuitulevy	1,3
Puolikova kuitulevy	1,3
MDF-levy	1,3
Huokoinen kuitulevy	1,3
Liitokset	1,3
Naulalevyt	1,25
Onnettomuusyhdistelmät	1,0

### 3.2 Lähtötiedot

Mitoituksen lähtökohdaksi otin koululta löytyvän testauskoneen asettamat rajat. Laitteeseen saa asetettua korkeintaan kolme metriä pitkän koekappaleen, mutta tuet ja muut huomioiden päädyin 2,5 metriä pitkään palkkiin. Pistekuorman suuruudeksi valitsin 20 000 N, jotteivat palkin dimensiot kasva liian suureksi. Mitoitin tekemäni laskentapohjan avulla palkin dimensiot niin, että se kestää juuri ja juuri kyseisen kuorman. Liitokset on mitoitettu varman päälle, etteivät ne

ainakaan murru testauksen aikana. Voimasuureet mitoitusta varten, sekä palkin muodonmuutokset on tarkastettu Jigi-laskentaohjelmalla. (Kuva 5)



Kuva 5. Palkin voimasuureet ja koordinaatisto.

### 3.3 Palkin puristuskestävyys

Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelun kohdan 6.1.4 mukaan puurakenteisen syynsuuntainen puristus tulee mitoitaa seuraavasti:

$$\sigma_{c,0,d} \leq f_{c,0,d} \quad (\text{Kaava 1})$$

missä:  $\sigma_{c,0,d} = \frac{N_d}{A_{ef}}$

- $\sigma_{c,0,d}$  on syitä vastaan kohtisuoralla tehollisella kosketuspinnalla vaikuttavan puristusjännityksen mitoitussarvo.
- $N_d$  on syitä vastaan kohtisuoran puristavan kuorman mitoitussarvo.
- $A_{ef}$  on syitä vastaan kohtisuoran puristavan kuorman tehollisen kosketuspinnan pinta-ala.
- $f_{c,0,d}$  puristuslujuuden mitoitussarvo syysuuntaa vastaan kohtisuorassa puristuksessa
- $N$  on voiman yksikkö newton

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{31000 \text{ N}}{90 * 225} = 1,53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$1,53 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 15,68 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristuslujuuden käyttöaste on 10 % eli mitoitusehto täyttyy.

### 3.4 Palkin taivutuskestävyys poikkileikkauksen y- ja z-suunnassa

Tässä tapauksessa vetotangolla vahvistetulla palkilla on vain pysty akselin (y-akseli) suunnassa vaikuttavia kuormia, joten palkkiin ei kohdistu taivutusta aiheuttavaa voimaa vaakaa-akselin (z-akseli) suunnassa.

Taivutus y-akselin suunnassa:

$$\sigma_{m,z,d} = 0 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{koska } M_{z,d} = 0 \text{ Nmm}$$

Taivutuskestävyys z-akselin suunnassa lasketaan kaavalla:

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{M_{y,d}}{W_y} \leq f_{m,d} \quad (\text{Kaava 2})$$

missä:

- $\sigma_{m,y,d}$  on palkin taivutuskestävyys z-akselin suunnassa
- $M_{y,d}$  on palkin taivutusmomentin suuruus y-akselin suunnassa
- $f_{m,d}$  on taivutuslujuuden suunnittelu arvo

$$\sigma_{m,y,d} = \frac{7,8 * 10^6 \text{ Nmm}}{630\,375 \text{ mm}^3} = 12,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$$12,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 20,2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Taivutuslujuuden käyttöaste n. 60 %, mitoitusehto täyttyy.

### 3.5 Palkin yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys

Palkin yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys tarkoittaa sitä, kun molemmat rasitukset vaikuttavat samaan aikaan. Jännitykset määritetään Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu osa 1-1, kohta 6.2.3 mukaan. Aluksi määritetään hoikkuusluvut.

Hoikkuusluvut lasketaan nurjahduspituudesta ja jäyhyysäteestä. Nurjahduspituuteen vaikuttaa rakenteen tuentatapa.

$$\lambda_y = \frac{L_{c,z}}{i_z} \quad \lambda_z = \frac{L_{c,y}}{i_z} \quad (\text{Kaava 3})$$

missä:

- $L_{cy}$  ja  $L_{cz}$  on nurjahduspituus, valitaan tuentatavan perusteella (Taulukko 3).
- $i_z$  on jäyhyysäde, lasketaan kaavalla  $i_z = \frac{H}{\sqrt{12}}$ , missä  $H$  tarkoittaa palkin korkeutta.

$$\lambda_y = \frac{900 \text{ mm}}{\frac{225 \text{ mm}}{\sqrt{12}}} = 13,9 \quad \lambda_z = \frac{2500 \text{ mm}}{\frac{225 \text{ mm}}{\sqrt{12}}} = 38,5$$

Taulukko 3. Nurjahduspituus tuentatavan perusteella.

Tuentatapa	Nurjahdus- pituus $L_c$
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta ja nivelellisesti toisesta päästään (esim. jäykkäkantainen hallin päädyn "tuulipilari")	0,85 $L$
Sauva on nivelöity molemmista päistään (normaali tapaus)	1,0 $L$
Sauva on poikittaistuettu nurjahduksen suunnassa välein $a$	1,0 $a$
Sauva on jäykästi kiinnitetty toisesta päästään ja on vapaa toisesta päästään ("mastopilari")	2,5 $L$

Seuraavaksi lasketaan palkin muunnetut hoikkuusluvut kaavoilla:

$$\lambda_{rel,y} = \frac{\lambda_y}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad \lambda_{rel,z} = \frac{\lambda_z}{\pi} * \sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,05}}} \quad (\text{Kaava 4})$$

missä:

- $\lambda_y$  ja  $\lambda_{rel,y}$  ovat taivutusta y-akselin suhteen (eli z-akselin suuntaan) vastaava hoikkuusluku ja siitä laskettu suhteellinen hoikkuus.
- $\lambda_z$  ja  $\lambda_{rel,z}$  ovat taivutusta z-akselin suhteen (eli y-akselin suuntaan) vastaava hoikkuusluku ja siitä laskettu suhteellinen hoikkuus.
- $E_{0,05}$  on viiden prosentin (alempaa) fraktiilia vastaava, syysuuntaista kuormitusta vastaavan kimmokertoimen arvo.

$$\lambda_{rel,y} = \frac{13,9}{\pi} * \sqrt{\frac{15,7 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 0,17 \quad \lambda_{rel,z} = \frac{38,5}{\pi} * \sqrt{\frac{15,7 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 0,47$$

Seuraavaksi lasketaan palkille nurjahduskerroin:

$$k_z = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,z} - 0,3) + \lambda_{rel,z}^2) \quad (\text{Kaava 5})$$

$$k_y = 0,5 * (1 + \beta_c * (\lambda_{rel,y} - 0,3) + \lambda_{rel,y}^2)$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{k_z + \sqrt{k_z^2 - \lambda_{rel,z}^2}} \quad (\text{Kaava 6})$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{k_y + \sqrt{k_y^2 - \lambda_{rel,y}^2}}$$

missä:

- $k_z$ ,  $k_{c,z}$ ,  $k_y$  ja  $k_{c,y}$  ovat palkin nurjahduskertoimia
- $\beta_c$  on alkukäyryydestä johtuva kerroin, joka on materiaalienkohtainen. Tässä tapauksessa palkki on liimapuuta, joten kerroin on 0,1

$$k_z = 0,5 * (1 + 0,1 * (0,6 - 0,3) + 0,6^2) = 0,7$$

(Kaava 5)

$$k_y = 0,5 * (1 + 0,1 * (0,2 - 0,3) + 0,2^2) = 0,52$$

$$k_{c,z} = \frac{1}{0,7 + \sqrt{0,7^2 - 0,6^2}} = 0,95 \quad (\text{Kaava 6})$$

$$k_{c,y} = \frac{1}{0,52 + \sqrt{0,52^2 - 0,2^2}} = 1$$

Lopuksi lasketaan yhdistetyn jännityksen taivutus + puristus käyttöaste. Eurokoodi 5 kohdan 6.2.4 mukaan seuraavien ehtojen tulee täyttyä:

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} + \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + k_m * \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Kaava 7})$$

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,y} * f_{c,0,d}} + k_m * \frac{\sigma_{m,z,d}}{f_{m,d}} + \frac{\sigma_{m,y,d}}{f_{m,d}} \leq 1 \quad (\text{Kaava 8})$$

missä:

- $\sigma_{c,0,d}$  on palkin puristusjännitys
- $\sigma_{m,z,d}$  ja  $\sigma_{m,y,d}$  on palkin taivutusjännityksiä akselien suhteen
- $f_{m,d}$  on palkin taivutuslujuus
- $f_{c,0,d}$  on palkin puristuslujuus

$$\frac{1,53}{0,95 * 15,68} + \frac{0}{20,16} + 0,7 * \frac{12,38}{20,16} \leq 1 \quad (\text{Kaava 7})$$

$$0,54 \leq 1$$

$$\frac{1,53}{1,0 \cdot 15,68} + 0,7 \cdot \frac{0}{20,16} + \frac{12,38}{20,16} \leq 1 \quad (\text{Kaava 8})$$

$$0,74 \leq 1$$

Yhdistetyn puristus- ja taivutuslujuuden käyttöaste on enimmillään 74 %, joten mitoitusehto täyttyy.

### 3.6 Palkin leikkauskestävyys

Palkin leikkauskestävyys määritetään Eurokoodi 5 Puurakenteiden suunnittelu osa 1-1, kohta 6.1.7 mukaan. Kun palkkia rasittaa voima, joka aiheuttaa leikkausjännitystä, tulee seuraavan ehdon täyttyä:

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

missä:

- $\tau_d$  on palkkiin kohdistuva leikkausjännitys:  $\tau_d = 1,5 \cdot \frac{V_d}{A}$
- $f_{v,d}$  on palkin leikkauslujuus

$$\tau_d = 1,5 \cdot \frac{13,5 \cdot 10^3 N}{90 \text{ mm} \cdot 225 \text{ mm}} = 1 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

$$1 \frac{N}{\text{mm}^2} \leq 2,24 \frac{N}{\text{mm}^2}$$

Leikkauskestävyyden käyttöaste on 45 %, joten mitoitusehto täyttyy.

### 3.7 Palkin kiepahdus (yläpinta)

Tarkastetaan ettei palkin yläpinta kiepahda taivutusjännityksen takia. Ensin täytyy määrittää palkin tehollinen kiepahduspituus sekä siihen vaikuttava kriittinen taivutusjännitys.

$$\sigma_{m,crit} = \frac{c \cdot b^2}{h \cdot L_{ef}} \cdot E_{0.05} \quad (\text{Kaava 9})$$

missä:

- $\sigma_{m,crit}$  on kriittinen taivutusjännitys
- $b$  ja  $h$  palkin leveysmitta ja korkeusmitta



- $c$  on materiaalista riippuva kerroin, liimapuulle  $c = 0,7$
- $L_{ef}$  on tehollinen kiepahduspituus, joka lasketaan:  $L_{ef} = L + 2 * h$

$$\sigma_{m,crit} = \frac{0,7 * 90^2}{225 * 2950} * 10800 \frac{N}{mm^2} = 92,3$$

Kiepahduksen tapauksessa lasketaan palkin hoikkuusluku, jonka avulla lasketaan edelleen kiepahduskerroin  $k_{crit}$ :

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{f_{m,k}}{\sigma_{m,crit}}} \quad (\text{Kaava 10})$$

$$k_{crit} = \begin{cases} 1, kun \lambda_{rel,m} \leq 0,75 \\ 1,56 - 0,75 * \lambda_{rel,m}, kun 0,75 \leq \lambda_{rel,m} \leq 1,4 \\ \frac{1}{\lambda_{rel,m}^2}, kun \lambda_{rel,m} > 1,4 \end{cases}$$

$$\lambda_{rel,m} = \sqrt{\frac{30 \frac{N}{mm^2}}{92,3 \frac{N}{mm^2}}} = 0,57$$

Eli edellä mainitun ehdon mukaan  $\lambda_{rel,m} \leq 0,75$ , joten tässä tapauksessa  $k_{crit} = 1$

Tämän jälkeen tarkistetaan, että mitoitusehto täyttyy:

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} * f_{m,d}$$

$$12,4 \frac{N}{mm^2} \leq 1 * 20,2 \frac{N}{mm^2}$$

Kiepahduksen käyttöaste tässä tapauksessa on 62%, joten mitoitusehto täyttyy. Lopuksi tarkistetaan vielä kiepahduksen ja nurjahduksen yhteisvaikutus palkin yläpinnassa

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (\text{Kaava 11})$$

$$\left( \frac{12,4 \frac{N}{mm^2}}{1 * 20,2 \frac{N}{mm^2}} \right)^2 + \frac{1,53}{0,95 * 15,68} \leq 1$$

$$0,48 \leq 1$$

Kiepahduksen ja nurjahduksen yhteisvaikutus palkin yläpinnassa on 48 % eli mitoitusehto täyttyy.

### 3.8 Palkin kiepahdus (alapinta)

Alapinnan kiepahdus lasketaan muuten samalla tavalla kuin yläpinnankin, mutta tehollisen kiepahduspituuden määrittäminen on erilainen. Laskukaavat ovat samat kuin kappaleessa 3.7 Palkin kiepahdus yläpinta (Kaavat 9,10 ja 11)

$$- \sigma_{m,crit} = 302,4 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{Kaava 9})$$

$$- \lambda_{rel,m} = 0,31 \Rightarrow k_{crit} = 1 \quad (\text{Kaava 10})$$

Lopuksi tarkastetaan samat mitoitus ehdot, kuin palkin yläpinnan tapauksessa.

$$\sigma_{m,y,d} \leq k_{crit} * f_{m,d}$$

$$12,4 \frac{N}{mm^2} \leq 1 * 20,2 \frac{N}{mm^2}$$

Käyttöaste kiepahdukselle palkin alapinnassa on 62 %, eli mitoitus ehto täyttyy tässäkin tapauksessa. Kiepahduksen ja nurjahduksen yhteisvaikutus palkin alapinnassa

$$\left( \frac{\sigma_{m,y,d}}{k_{crit} * f_{m,d}} \right)^2 + \frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1 \quad (\text{Kaava 11})$$

$$\left( \frac{12,4 \frac{N}{mm^2}}{1 * 20,2 \frac{N}{mm^2}} \right)^2 + \frac{1,53}{0,95 * 15,68} \leq 1$$

$$0,48 \leq 1$$

### 3.9 Palkin tukipinnat

Seuraavaksi tarkistetaan palkin puristusjännitys tuilla sekä vertikaalien kohdalla Eurokoodi 5 osa 1-1 kohdan 6.1.5 mukaan, syytä vastaan kohtisuoran puristusjännityksen, on täytettävä seuraava ehto:

$$\sigma_{c,90,d} \leq k_{c,koht} * f_{c,90,d}$$

missä:

- $\sigma_{c,90,d}$  on syytä vastaan kohtisuoralla tehollisella kosketuspinnalla vaikuttavan puristusjännityksen mitoitusarvo, joka lasketaan kaavalla

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{V_d}{b * h} \quad (\text{Kaava 12})$$

missä:

- $V_d$  on palkin päässä vaikuttava tukivoima
- $b$  ja  $h$  ovat palkin mittoja
- $f_{c,90,d}$  on syytä vastaan kohtisuoran puristavan kuorman mitoitusarvo.

- $A_{ef}$  on syitä vastaan kohtisuoran puristavan kuorman tehollisen kosketuspinnan pinta-ala.
- $f_{c,90,d}$  puristuslujuuden mitoitusarvo syysuuntaa vastaan kohtisuorassa puristuksessa.
- $k_{c,90}$  on kerroin, jonka avulla otetaan huomioon kuorman sijainti, halkeamismahdollisuus ja puristuman suuruus. Tässä tapauksessa palkki on liimapuuta, joten Eurokoodi 5 ohjeiden mukaan voidaan käyttää arvoa  $k_{c,90} = 1,5$

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{13\,500\text{ N}}{90\text{ mm} * 225\text{ mm}} = 0,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Seuraavaksi määritetään tukipainekerroin kaavalla:

$$k_{c,koht} = \frac{L_{c,90,ef}}{a} * k_{c,90} \quad (\text{Kaava 13})$$

missä:

- $L_{c,90,ef}$  on palkin tukipinnan tehollinen leveys,  $L_{c,90,ef} = a + 2 * 30\text{ mm}$ , missä  $a$  on tukipinnan todellinen leveys.

$$k_{c,koht} = \frac{90\text{ mm} + 2 * 30\text{ mm}}{150\text{ mm}} * 1,5 = 1,5$$

Lopuksi tarkistetaan, että edellä mainittu mitoitusehto toteutuu.

$$0,67 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \leq 2,4 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Puristuskestävyyden käyttöaste tuen kohdalla on 20 %, eli mitoitusehto täyttyy.

### 3.10 Puristussauvojen eli vertikaalien puristuskestävyys

Seuraavaksi tarkastetaan, että vertikaalisauvat kestävät vetotangon aiheuttaman puristusjännityksen ja etteivät ne pääse nurjahtamaan. Laskenta tapahtuu samoin kuin palkin tapauksessa. Vertikaalien tapauksessa kyse on neliöpoikkileikkauksesta, kun ne on tuettu molemmilta sivuilta, joten riittää, kun tarkastellaan nurjahdus yhdestä suunnasta. Laskukaavat löytyvät kappaleesta 3.5 Palkin yhdistetty puristus- ja taivutuskestävyys (Kaava 3,4,5,6 ja 7)

- vertikaalin hoikkuusluku:  $\lambda_z = \frac{300\text{ mm}}{\frac{90\text{ mm}}{\sqrt{12}}} = 11,6$  (Kaava 3)

- muunnettu hoikkuusluku:  $\lambda_{rel,z} = \frac{11,6}{\pi} * \sqrt{\frac{15,7 \frac{N}{mm^2}}{10\,800 \frac{N}{mm^2}}} = 0,14$  (Kaava 4)
- nurjahduskerroin:  $k_z = 0,5 * (1 + 0,1 * (0,14 - 0,3) + 0,14^2) = 0,5$  (Kaava 5)

$$k_{c,z} = \frac{1}{0,5 + \sqrt{0,5^2 - 0,14^2}} = 1$$

Vertikaalin puristuskestävyys Eurokoodi 5 mitoitusohjeiden mukaan, kaava kohdasta 3.3 Palkin puristuskestävyys:

$$\sigma_{c,0,d} = \frac{7200}{90*90} = 0,9 \frac{N}{mm^2} \quad (\text{Kaava 3})$$

$$0,9 \frac{N}{mm^2} \leq 15,68 \frac{N}{mm^2}$$

Seuraavaksi tarkastetaan vielä vertikaalin nurjahduskestävyys, jottei se nurjahda kuormituksen aikana.

$$\frac{\sigma_{c,0,d}}{k_{c,z} * f_{c,0,d}} \leq 1$$

$$\frac{0,9 \frac{N}{mm^2}}{1 * 15,68 \frac{N}{mm^2}} \leq 1$$

$$0,06 \leq 1$$

Lopuksi määritetään tukipainekestävyys vertikaalille samoin kuin palkillekin kohdassa 3.9 ja tarkastetaan, että mitoitusehto toteutuu.

- tukipaineekerroin:  $k_{c,koht} = \frac{90\,mm + 2*30\,mm}{90\,mm} * 1,5 = 2,5$
- mitoitusehto:  $0,9 \frac{N}{mm^2} \leq 4 \frac{N}{mm^2}$
- Puristuskestävyyden käyttöaste tuen kohdalla on 23%, eli mitoitusehto täyttyy

### 3.11 Vetotankojen mitoitus

Mitoitetaan vetotangon poikkileikkauksen vetolujuus Eurokoodi 3 Teräsrakenteiden suunnittelu kohta 6.2.3 b löytyvien kaavojen avulla.

$$N_{pl,Rd} = \frac{A * f_y}{\gamma_{M0}} \quad (\text{Kaava 14})$$

missä:

$N_{pl,Rd}$  on bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisen kestävyysmitoitussarvo

- A on poikkileikkauksen pinta-ala
- $f_y$  on teräksen myötölujuus
- $\gamma_{M0}$  on materiaalin osavarmuusluku
- 

Jigillä tekemälläni mitoituksella sain vetotangon tarvittavaksi paksuudeksi 20 millimetriä.

$$N_{pl,Rd} = \frac{\pi * (10 \text{ mm})^2 * 355 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}{1,25} = 89 \text{ kN}$$

Lopuksi tarkastetaan vetotangon mitoitusehto:

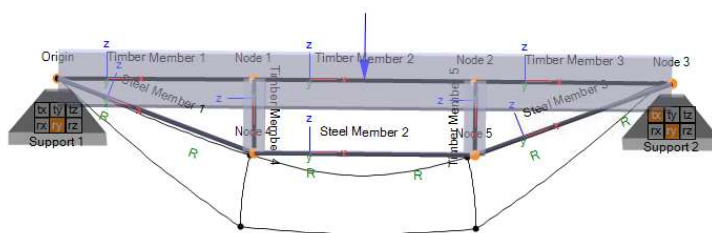
$$N_d \leq N_{pl,Rd}$$

$$31 \text{ kN} \leq 89 \text{ kN}$$

Vetotangon poikkileikkauksen vetolujuuden käyttöaste 35 %, eli mitoitusehto täyttyy.

### 3.12 Vahvistetun palkin taipuma

Vahvistetun palkin taipumaa ei voida laskea Eurokoodi 5 löytyvillä kaavoilla, koska ne eivät huomioi vetotangon ja vertikaalien vaikutusta taipumaan. Muodonmuutosten selvittämiseksi vetotangolla vahvistettu palkki tulee mitoittaa FEM-ohjelmaa käyttäen, jotta tulokset ovat tarkkoja ja luotettavia (Kuva 6). Tässä tutkielmassa mitoitin palkin Jigillä. Jigi on helppokäyttöinen suomenkielinen ohjelma rakennesuunnitteluun. Ohjelmisto sisältää betonin, teräksen, puun ja anturoiden mitoituksen eurokoodin mukaan. Jigin statiikkamoduuli perustuu 3D-elementtimenetelmään ja mitoitukset perustuvat EN-versioon ja kansallisiin liitteisiin. Rakennesuunnittelijat hyödyntävät Jigiä muun muassa erilaisten talorakenteiden mitoitukseen.



Kuva 6. Palkin muodonmuutokset Jigi-ohjelmalla.

### 3.13 Vahvistetun palkin palomitoitus

Vetotangolla vahvistetun palkin palomitoituksessa vetotangon vaikutusta ei huomioida, joten palkki voidaan mitoittaa palotilanteessa niin, että vain liimapuupalkki toimii kantavana. Mitoituksen voi suorittaa Eurokoodi 5 osa 1-2 Puurakenteiden palomitoitus mitoitusohjeilla tai kuten tässä työssä käytän internetistä löytyvää Stora Enson Calculatis-mitoitustyökalua. Se on ilmainen mitoitustyökalu ja sillä saadaan mitoitetut rakenteet vaivattomasti. Calculatis on helppokäyttöinen ja sillä saa mitoitetut puurakenteiset palkit, välipohjat sekä seinäelementit. Seuraavaksi esittelen Calculatis-mitoitustyökalun palomitoituksen osalta. Ensimmäiseksi syötetään rakenteet tiedot, kuten tässä tapauksessa palkin korkeus, leveys ja materiaali (Kuva 7).

Järjestelmän tiedot			
Nimi	Liimapuupalkki	Huoltoluokka	Käyttöluokka 1
Kallistuma	0 [°]	Omapaino otettu huomioon	<input checked="" type="checkbox"/>
Kappaleen leveys	9 [cm]	Kannatuksen suunnittelu	<input type="checkbox"/>
Kappaleen korkeus	22,5 [cm]	Sivusuuntaisen jäykisteen väli	0,8 [m]
Materiaalit	GL 30h	$k_{sys,z}$	1 [-]
Luotettavuusluokka	RC2	Kuormitus vaikuttaa puristuksen puolella	<input type="checkbox"/>

Kuva 7. Stora Enso Calculatis-työkalun järjestelmän tiedot.

Määritetään palkille seuraavaksi kuormitukset sekä niiden sijainti. Tässä tapauksessa palkkiin kohdistuu palkin oma paino sekä valitsemani keskeinen pistekuorma 20 000 N (Kuva 8).

Kuormaryhmä Hyötykuorma, luokka A: asuin- ja majoitustilat

☒ Jännevälistä riippumaton muuttuva kuorma  
 Pistekuormat

Kenttä	Suunta	a	$P_k$
1	globaali	1,250	20,00

Kuva 8. Palkin kuormitusten määrittäminen


Lopuksi määritetään palomitoituksen tiedot. Tässä tapauksessa mitoitin palkin paloluokkaan R60, joka tarkoittaa, että palkki kestää kuormitusta palotilanteessa 60 minuutin ajan valitulla palonsuojaverhouksella (Kuva 9).

Palomitoituksen tiedot			
Paloluokka	R 60	Palonsuojaverhoukset	Kaksinkertainen suora vaneriverhoukset EN 1995-1-2 ja ON B 1995 1-2 mukaisesti
Kuormitusyhdistelmän tekijä Palomitoitusta varten	$\Psi_2$	Palonsuojakerrokset	2 x 15,0 mm kipsilevy Tyyppi F
		$t_{ch} / t_f$	43,8 [min] / 43,8 [min]

Kuva 9. Palomitoitukseen tarvittavat tiedot

Tämän jälkeen suoritetaan laskenta, jolloin ohjelmasta saadaan palkin kapasiteetin käyttöaste palotilanteessa sekä kuinka palkki hiiltyy palon aikana (Kuva 10). Laskennan tulokset löytyvät tutkielman lopusta liitteenä. (Liite 3)

Jakso Tulipalo Puupalkki 9/22,5



76 mm

216 mm

Palonsuojakerrokset: 2 x 15.0 mm kipsilevy Tyyppi F

- Gipskartonbauplatte (nach ÖNORM B 3410 und DIN 18180)
- Gipskartonfeuerschutzplatte (nach ÖNORM B 3410 und DIN 18180)

Kappaleen leveys	Kappaleen korkeus	Alue	ly	lz
[cm]	[cm]	[mm <sup>2</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]	[mm <sup>4</sup> ]
7,6	21,6	16 392	63 542 150	7 889 860

k <sub>0</sub>	d <sub>0</sub>	β <sub>n</sub>	d <sub>ef,v</sub>	d <sub>ef,h</sub>	Kappaleen leveys	Kappaleen korkeus
[-]	[mm]	[mm/min]	[mm]	[mm]	[cm]	[cm]
1	7	0,7	14,0	9,3	7,6	21,6

t <sub>ch,v</sub>	t <sub>f,v</sub>	t <sub>a,v</sub>	d <sub>char,n,v</sub>	t <sub>ch,h</sub>	t <sub>f,h</sub>	t <sub>a,h</sub>	d <sub>char,n,h</sub>
[min]	[min]	[min]	[mm]	[min]	[min]	[min]	[mm]
62	63	81	0,0	44	44	62	2,3

Kuva 10. Palkin hiiltyminen palotilanteessa.

## 4 Vetotangolla vahvistetun palkin testaus

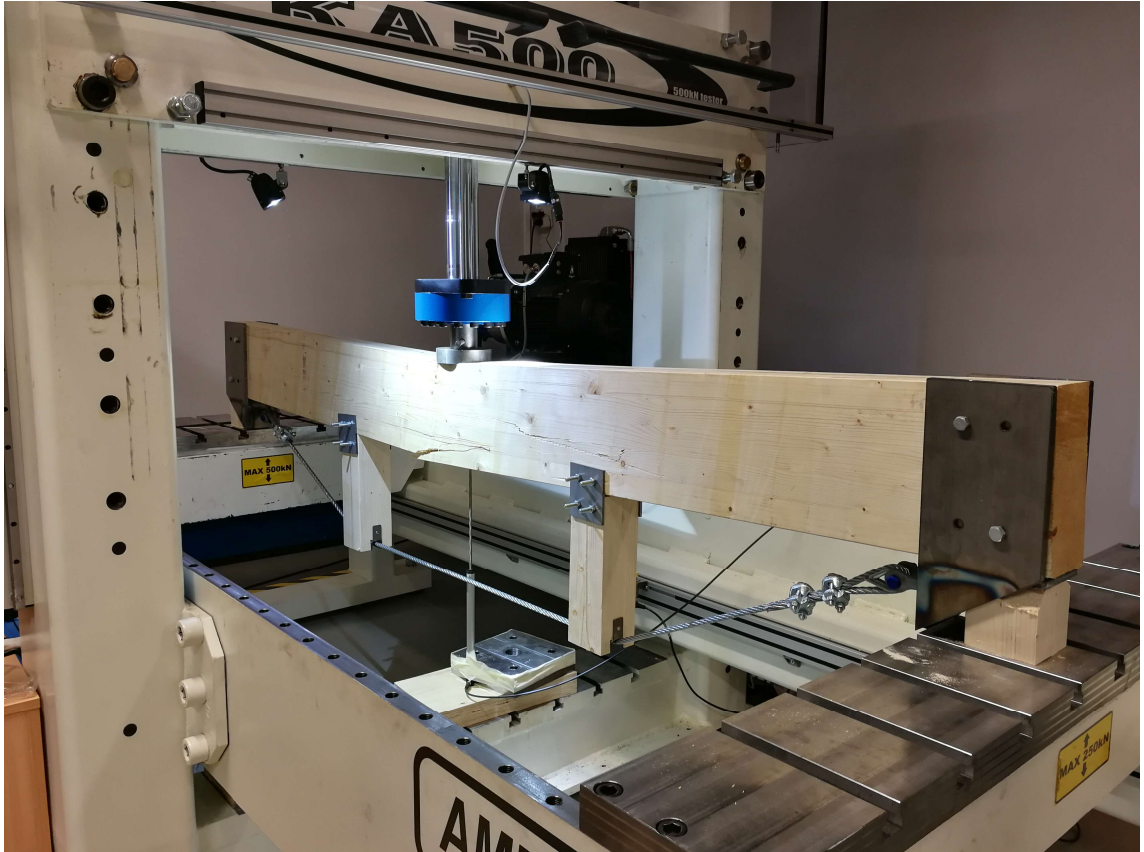
### 4.1 Laitteisto

Suoritin palkkien testauksen Karelian ammattikorkeakoululta löytyvällä testauslaitteella. (Kuva 11) Laite on sähköhydraulinen koestuspuristin puuainesta ja metalleja varten. Sillä voidaan tehdä esimerkiksi vetokoe pitkälle kappaleelle, puristuskoe lyhyelle tai pitkälle, leikkauskoe puuhun syiden suuntaan ja taivutus- ja tai vetokoe säädettävällä tukipistevälillä sopivia työkaluja käyttäen. Laite on muunneltavissa helposti muihin testauksiin säätyvien ja irrotettavien voimavasteiden avulla. Laite voi myös ajaa vaihtokuormitustestausta. Tulokset kerätään jälkikäsitteilyä varten mukana tulevalle ohjaavalle tietokoneelle.

Koepuristimen tekniset tiedot:

- maksimi veto/puristusvoima	500 kN
- männänliike	500 mm
- männän nopeus	0,0025...600 mm/min
- voima-anturin tarkkuus	+/- 0,15% koko alue
- kiinteän pituusanturin tarkkuus	< 0,025 mm
- potentiometrianavat	16 bit, 4 kpl
- max. tukiväli pituussuunnassa	3000 mm
- ma. kappaleen leveys	1200 mm
- ylävasteitten korko	875 mm
- max. kitaväli yläasteille	900 mm ilman työkaluja
- max. kitaväli alavasteille	1550 mm ilman työkaluja
- taipumakompensointi	ohjelmallinen
- laitteen mitat	k <2700 xl 3500xs1400mm
- paino	n. 200 kg ilman työkaluja



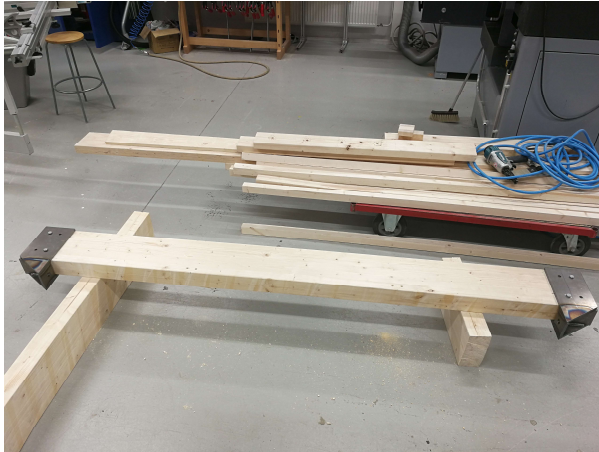


Kuva 11. Koepuristin KA 500.

#### 4.2 Palkin kokoaminen

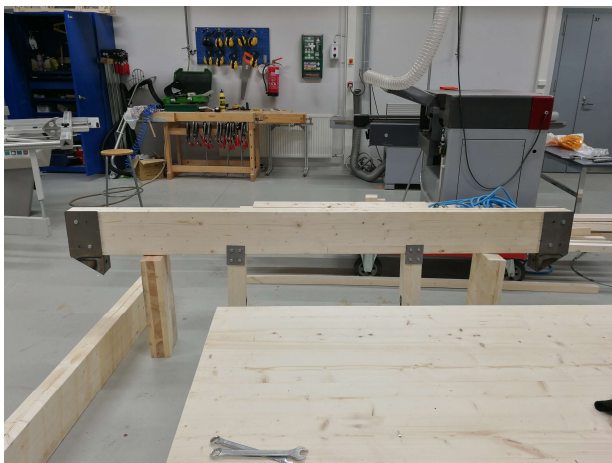
Testauksen suorittamiseksi valmistin koekappaleen Karelian ammattikorkeakoulun tiloissa. Vetotangolla vahvistetun palkin kokoamiseksi hankin koululle liimapuuta, teräslevyt liitoksia varten sekä vaijeria palkin vahvistamiseen. Materiaalit hankittiin edellä esitetyn mitoituksen tuloksien perusteella. Teräsosat palkkia varten tilattiin paikalliselta metallipajalta ja vaijeri sekä muut osat tilattiin paikallisen liikkeen kautta.

Ensin sahasin liimapuupalkin 2,5 metriä pitkäksi, jonka jälkeen tein jäljelle jääneestä osasta palkkiin tarvittavat vertikaalituuet. Seuraavaksi porasin palkin päihin reiät, jotta sain kiinnitettyä niihin tulevat palkkikengät paikoilleen (Kuva 12).



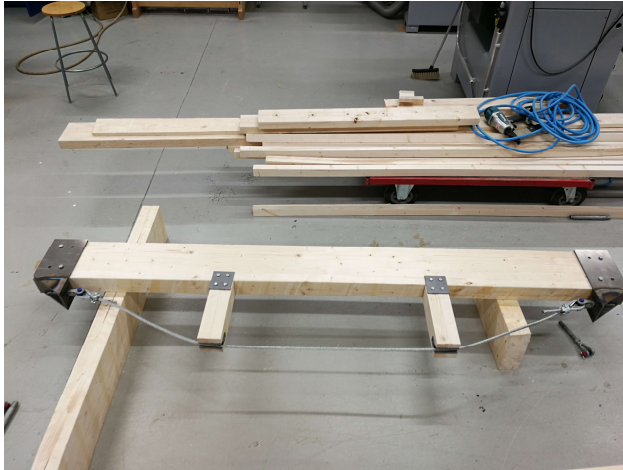
Kuva 12. Vahvistettu palkki alkuvaiheessa.

Tämän jälkeen sahasin lovet vertikaalitukien päihin, jotta pystyin kiinnittämään niihin tulevat suunnittelemani teräsosat, jotta vaijeri asettuisi helpommin paikalleen. Lopuksi kiinnitin vertikaalitet palkkiin (Kuva 13).



Kuva 13. Vahvistettu palkki vertikaalien kiinnityksen jälkeen.

Viimeisenä vaiheena kokoamisessa oli vaijerin kiinnitys liimapuupalkin päissä oleviin palkkikenkiin vanttiruuvien avulla. Käytin kiinnityksessä vanttiruuveja, koska niiden avulla sain kiristettyä vaijeria tiukemmalle sen asentamisen jälkeen. Tavoitteena oli saada vaijeri pingotettua mahdollisimman kireälle, jotta rakenne toimisi testausvaiheessa suunnitelmien mukaan (Kuva 14).



Kuva 14. Vahvistettu palkki valmiina

### 4.3 Testaus

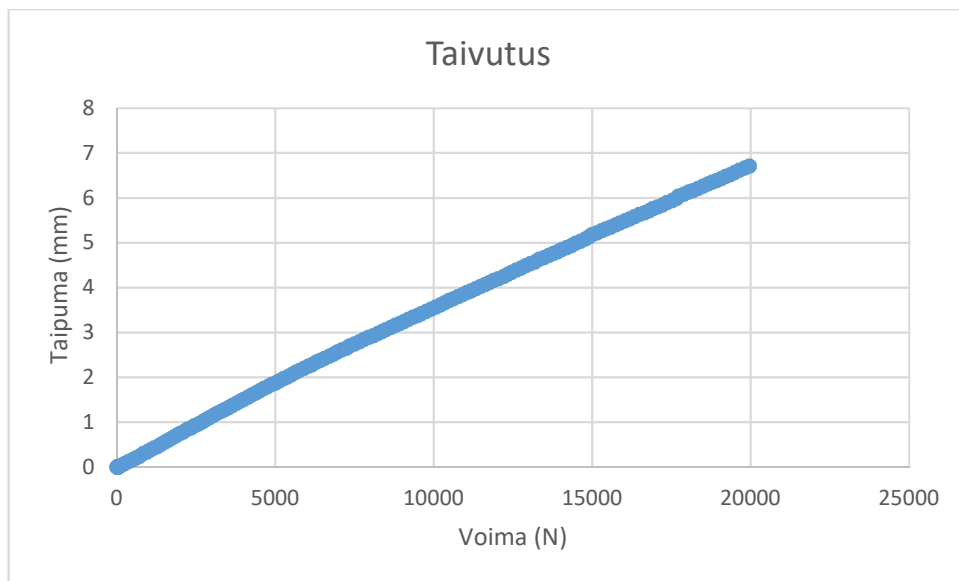
Testaus alkoi koepuristimen valmistelulla koetta varten. Laitteeseen kytkettiin virrat päälle ja tarkistettiin männän toimivuus sekä anturien kunto. Seuraavaksi sijoitettiin alavasteet, joiden varaan palkki laitetaan oikealle kohdalleen ja kiristetään pultit, jotta se pysyy paikallaan testauksen ajan. Seuraavaksi palkki nostettiin paikalleen alavasteiden päälle 90x90 millimetriä olevien puupalikoiden varaan, jotka toimivat testin aikana palkin päiden tukipintana. Lopuksi määritettiin ohjauskoneella koepuristimen asetukset testausta varten. Tässä tapauksessa kyseessä oli taivutuskoe. Tämän vaiheen jälkeen testaus voitiin suorittaa (Kuva 15).



Kuva 15. Vahvistettu palkki testauksen alussa.

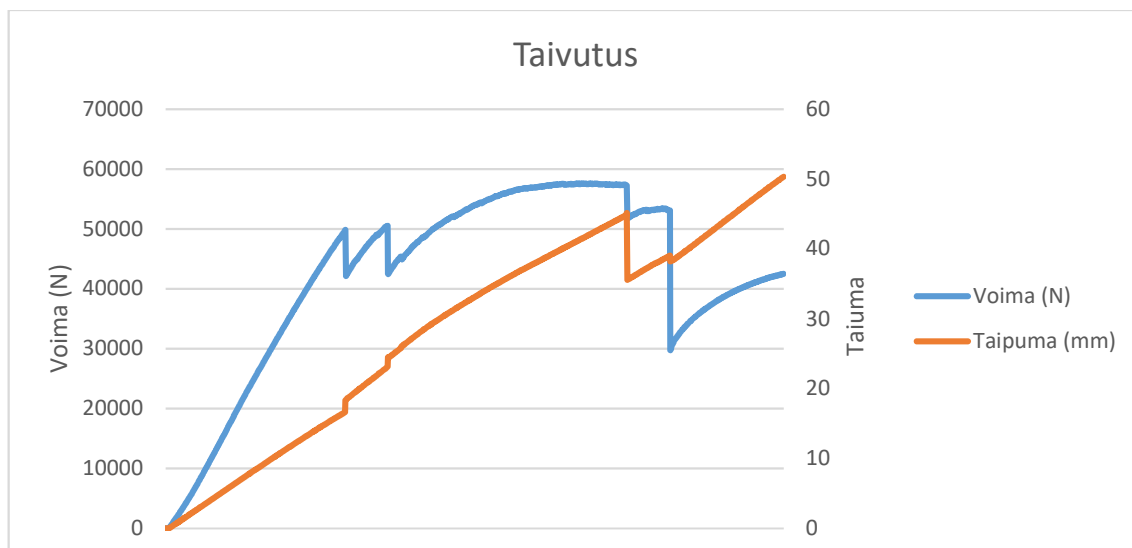
#### 4.4 Tulokset

Vahvistetulle palkille suoritettiin kaksi taivutuskoetta. Ensimmäisessä kokeessa kuormitus nousee tasaisesti aina 20 000 N asti, jolloin kone lopettaa kuormituksen automaattisesti. Tämän jälkeen tietokoneelta otetaan kokeen tulokset ylös ja ne tallentuvat excel-tiedostomuodossa, josta tulokset ovat kätevä muuttaa helpommin ymmärrettävään muotoon, kuten esimerkiksi viivakaavioksi (Kaavio 1).



Kaavio 1. Ensimmäinen koepuristuksen aiheuttama taipuma suhteessa puristusvoiman suuruuteen.

Ensimmäisen kokeen jälkeen suoritin palkille toisen koepuristuksen, jossa katsoin kuinka suuren kuormituksen palkki loppujen lopuksi kestää. Koepuristin palkkia niin kauan kun katsoin sen olevan järkevää. Vahvistettu palkki kesti kuormitusta noin 50 000 N asti ennen kuin ensimmäinen murtuminen tapahtui (Kaavio 2).



Kaavio 2. Vahvistetun palkin koepuristus murtumiseen asti.

## 5 Yhteenveto

### 5.1 Tutkimustyön lopputulos

Vahvistetun palkin laskennallisen mitoituksen perusteella palkin vahvistamisen todettiin pienentävät palkin rasituksia, etenkin taivutusjännityksen osalta. Samaan johtopäätökseen päädyttiin myös vahvistetulle palkille suoritettun kuormituskokeen perusteella. Taivutuskokeen tuloksen perusteella vahvistetun liimapuupalkin taipuma pienenee vaijerilla vahvistamisen ansioista, kun vertailukohteena on yksinkertaisen liimapuupalkin laskennallinen taipuma. Koeistuksen sekä laskentojen lopputulosten perusteella voidaan todeta, ettei rakenne olisi täyttänyt asetettuja mitoitussehtoja, jos se olisi toteutettu yksinkertaisena liimapuupalkkina (Liite 3).

Tutkimustyön sekä kuormituskokeen tuloksia voidaan mielestäni pitää luotettavana, jotta niistä voidaan tehdä johtopäätöksiä liimapuupalkin vahvistamisesta saatavista hyödyistä. Tutkimustyön tavoitteena oli tutkia, kuinka liimapuupalkin vahvistaminen vaikuttaa rakenteen lujuusominaisuuksiin. Vahvistetun liimapuupalkin mitoitus osoittaa sen olevan rakenteena lujempi, kuin yksinkertainen liimapuupalkki. Kuormituskokeen tulokset tukevat tätä huomiota.



## 5.2 Puun ja teräksen liittorakenteiden tulevaisuus

Puun ja teräksen liittorakenteiden tulevaisuus näyttää mielestäni lupaavalta. Olen varma, että tulevaisuudessa sille keksitään yhä useampia hyödyntämiskeinoja erilaisissa rakenteissa sekä betoni- ja teräsrakenteiden korvaamisessa. Puun ja teräksen yhdistelmiä hyödynnetään Suomessa jo niin puurakenteisissa silloissa kuin suurialaisissa hallirakennuksissa. Euroopassa puun ja teräksen yhdistelmärakenteilla on toteutettu myös suuria julkisia kohteita, jotka on haluttu toteuttaa puurakenteisina. (Kuva 1) Puun ja teräksen liittorakenteita voidaan hyödyntää myös puukerrostalorakentamisessa. Näin on toimittu paikallisen korkean puukerrostalon toteutuksessa, kun kerrostalon puurunkoisten ulkoseinien ja perustuksen väliset nurkkaliitokset on jäykistetty teräsrakenteisin liittimin, jotta saadaan paremmin taloon kohdistuvat vaakavoimat hallintaan.

Puun ja teräksen liittorakenteiden käyttämisellä on vaikutusta ekologisuuteen, hiilijalanjälkeen sekä kestävään kehitykseen. Puun ja teräksen liittorakenteiden avulla voidaan päästä pienempiin materiaali määriin, joten rakentamisesta syntyy vähemmän jätettä koko rakennuksen käyttöiän aikana aina rakentamisesta sen purkamiseen. Betonirunkoisen kerrostalon tai siltarakenteen korvaaminen puurunkoisella vaihtoehdolla liittorakenteita hyödyntäen saadaan betonia korvattua puulla. Puu on materiaalina huomattavasti ympäristöystävällisempää kuin betoni ja uusiutuva luonnonvara, joka siten pienentää rakennusteollisuuden aiheuttamaa hiilijalanjälkeä. (Kuva 16)

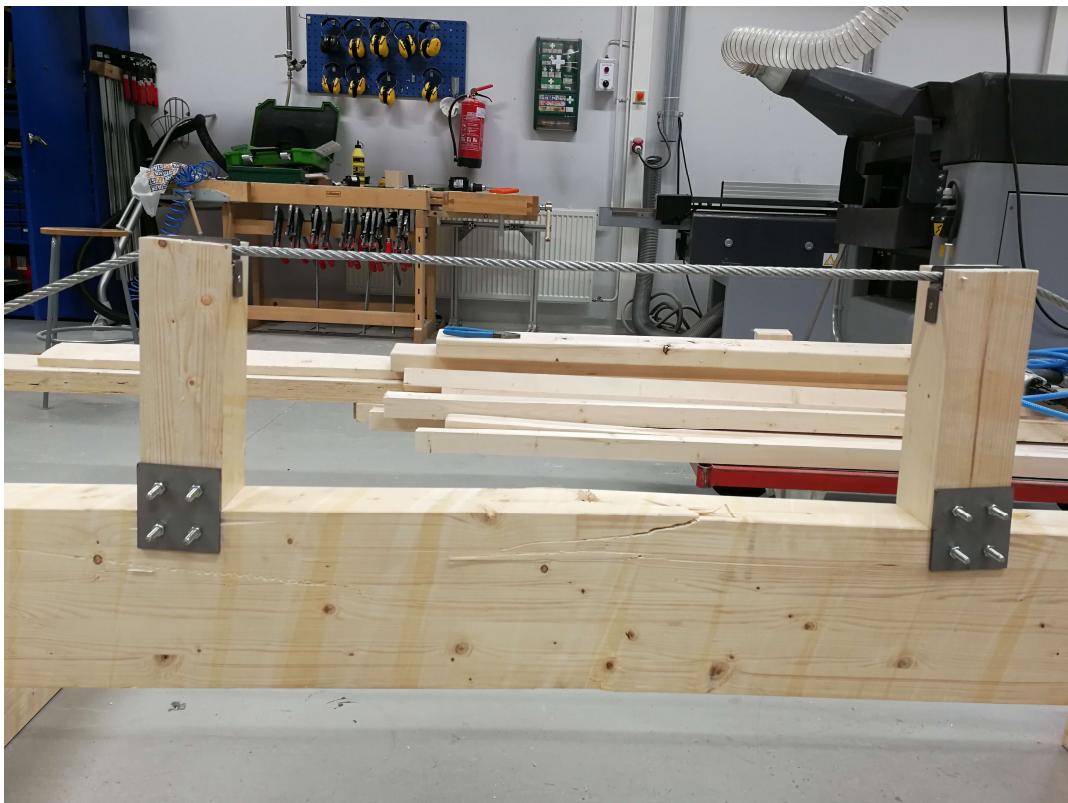
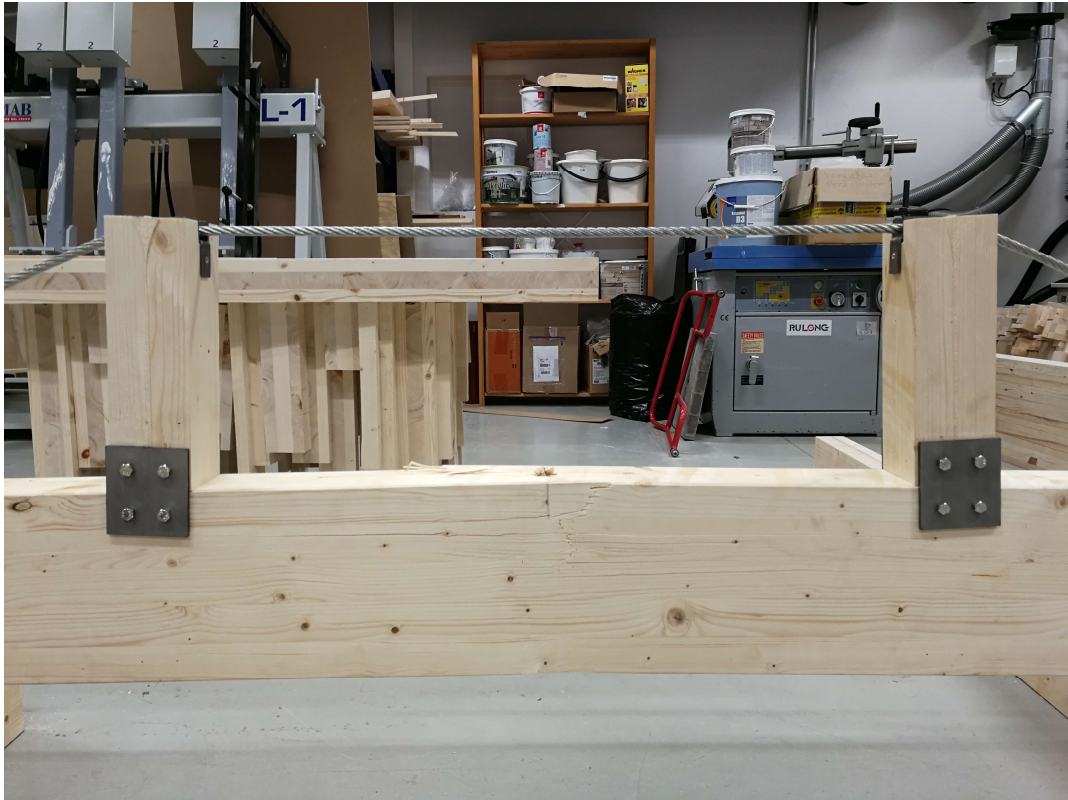


Kuva 16. Vihantasalmen puusilta. (Woodarchitecture.fi)

## Lähteet

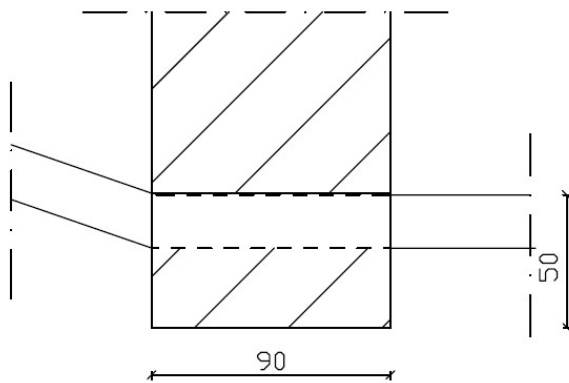
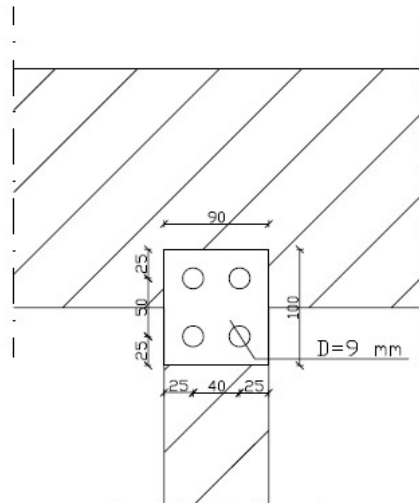
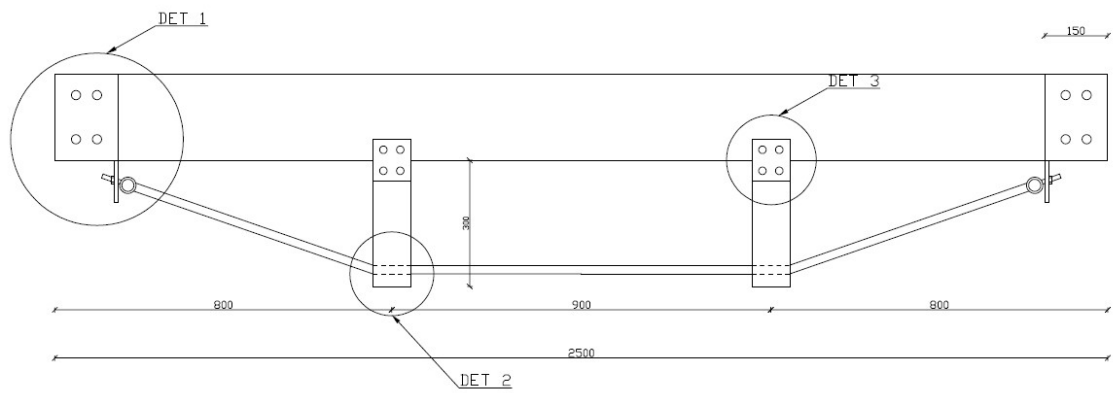
Jarkko Johansson, Teräsrakenteiden palosuojausmenetelmien kustannusvertailu, 2013, Metropolian ammattikorkeakoulu  
Puuinfo, Esimerkkilaskelma, Vetotangolla vahvistettu palkki 28.07.2017  
CEN/TC250 "Structural Eurocodes", 16.06.2014 Eurokoodi 5  
PUURAKENTEIDEN SUUNNITTELU OSA 1-1: YLEISET SÄÄNNÖT JA RAKENNUKSIA KOSKEVAT SÄÄNNÖT, Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/380211.html.stx>, 08.08.2018  
CEN/TC250 "Structural Eurocodes", 16.06.2014 EUROCODE 3. TERÄSRAKENTEIDEN SUUNNITTELU.OSA 1-1: YLEISET SÄÄNNÖT JA RAKENNUKSIA KOSKEVAT SÄÄNNÖT, Suomen standardisoimisliitto SFS Ry, <https://online.sfs.fi/fi/index/tuotteet/SFS/CEN/ID2/1/9344.html.stx>, 08.08.2018  
Rami Ylä-Pöntinen, Jäykistetyin palkin stabiliteetti, opinnäytetyö 1999, Kymenlaakson ammattikorkeakoulu  
<https://www.puuinfo.fi/puutieto/puustarakentaminen/pitkäaikaiskestävyys>

### Kuvat palkista testauksen jälkeen





## Palkin alustavat suunnitelmat



## Liimapuun lujuusominaisuudet sekä palkkien rasitukset ja palomitoituksen tulokset

	Ominaislujuus	Suunnittelulujuus
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = k_h \times k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_M = 20,2 \text{ N/mm}^2$ (palkki)
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = k_h \times k_{mod} \times f_{m,k} / \gamma_M = 21,1 \text{ N/mm}^2$ (vertikaali)
Leikkauslujuus:	$f_{v,k} = 3,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = k_{mod} \times f_{v,k} / \gamma_M = 2,24 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus (90°):	$f_{c,90,k} = 2,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = k_{mod} \times f_{c,90,k} / \gamma_M = 1,60 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus (0°):	$f_{c,0,k} = 24,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = k_{mod} \times f_{c,0,k} / \gamma_M = 15,7 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus (90°):	$f_{t,90,k} = 0,5 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,90,d} = k_{mod} \times f_{t,90,k} / \gamma_M = 0,32 \text{ N/mm}^2$
Kimmomoduuli:	$E_{0,mean} = 13\,000 \text{ N/mm}^2$	$E_{0,05} = 10\,800 \text{ N/mm}^2$
Liukumoduuli:	$G_{0,mean} = 650 \text{ N/mm}^2$	$G_{0,05} = 540 \text{ N/mm}^2$

## Vahvistetun ja yksinkertaisen liimapuupalkin rasitukset ja taipuma

### Vahvistettu liimapuupalkki

$$\sigma_{m,y,d} = 12,4 \text{ N/mm}^2 \text{ (62\%)}$$

$$\tau_d = 1 \text{ N/mm}^2 \text{ (45\%)}$$

$$\sigma_{c,90,d} = 0,67 \text{ N/mm}^2 \text{ (42\%)}$$

$$w_{fin} = 6,71 \text{ mm}$$

### Yksinkertainen liimapuupalkki

$$\sigma_{m,d} = 22,3 \text{ N/mm}^2 \text{ (110\%)}$$

$$\tau_d = 1,5 \text{ N/mm}^2 \text{ (67\%)}$$

$$\sigma_{c,90,d} = 1,7 \text{ N/mm}^2 \text{ (107\%)}$$

$$w_{fin} = 7,3 \text{ mm}$$

