



SAVONIA

KÄSINVEISTETTY LUONNONPYÖREÄ VAARNAPALKKI

TEKIJÄ: Samuli Eskelinen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Samuli Eskelinen	
Työn nimi Käsinveistetty luonnonpyöreä vaarnapalkki	
Päiväys	23.3.2016
Sivumäärä/Liitteet	68
Ohjaaja(t) Matti Mikkonen, rakennetekniikan lehtori ja Arto Puurula, rakennetekniikan yliopettaja	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Oma aihe	
Tiivistelmä	
<p>Tämän insinöörityön aiheena oli käsinveistettyjen luonnonpyöreästä puusta valmistettujen vaarnapalkkien mitoittaminen, valmistaminen ja testaaminen. Vaarnapalkki on kahdesta tai useammasta yksittäisestä palkista tehty yhdistetty palkkirakenne. Vaarnapalkkia käytetään silloin, kun yhden palkin kapasiteetti ei riitä kantavaksi rakenteeksi. Vaarnapalkkeja on valmistettu jo satoja vuosia, mutta niistä ei löydy paljoakaan tietoa Suomesta. Vaarnapalkkeja on käytetty paljon Keski-Euroopassa esimerkiksi siltarakentamisessa. Luonnonpyöreästä puusta vaarnapalkkeja on valmistettu vähemmän niiden haastavan valmistustekniikan takia. Yleensä vaarnapalkit on tehty massiivisesta sahatavaraista. Luonnonpyöreän vaarnapalkin edut ovat kuitenkin huomattavat; kapasiteetti on merkittävän suuri, jalostusaste alhainen ja palkki voidaan valmistaa paikallisesti pienellä miestyövoimalla ilman kalliita koneita. Luonnonpyöreä vaarnapalkki on erittäin ekologinen vaihtoehto kantavaksi rakenteeksi liima- ja kertopuupalkkeihin verrattuna, ja huomattavasti esteettisempi ratkaisu. Vaarnapalkkien liitostekniikoita on useita. Tässä opinnäytetyössä valmistettiin kolme erilaista vaarnapalkkia erilaisine liitoksineen koeistamista varten.</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli saada lisää tietoa käsinveistetyn luonnonpyöreän vaarnapalkin toiminnasta ja käytäytymisestä kuormitettuna. Tarkoituksena oli valmistaa toisistaan hieman erilaisia vaarnapalkkeja, jolloin niiden ominaisuuksia pystyttiin vertaamaan toisiinsa. Vaarnapalkkien valmistamisessa, rakenteellisessa toiminnassa ja ulkonäössä on omat erityiset piirteensä hyötyineen ja haittoineen. Vaarnapalkit mitoitetiin käsin laskien, ja mitoituksen tuloksia verrattiin laboratoriotesteihin. Vaarnapalkit valmistettiin Savon ammatti- ja aikuisopiston avustuksella Toivalassa sijaitsevalla hirsikoulutuskentällä. Teknistä tukea antoi Alppisalvos Oy. Kaikki vaarnapalkit kuormitettiin Savonia-ammattikorkeakoulun HitSavonian kuormituskehällä murtoon saakka. Mitoituksen luotettavuutta voitiin siten verrata käytännön koetuloksiin.</p> <p>Kokeen tulokset olivat linjassa mitoituksen kanssa, eli mitoitusastapaa voidaan pitää luotettavana. Poikkeuksena eurokoodi 5 suunnitteluohjeen mukainen mitoitusastapaa, jonka laskennalliset tulokset vaikuttivat ylimitoitetuilta verrattuna kuormitustuloksiin. Tulokset osoittivat, että vaarnapalkeista löytyy huomattava määrä kapasiteettia ja vahvistivat ennakkokäsityksen luonnonpyöreän vaarnapalkin eduista. Tuloksia voidaan kuitenkin pitää vain suuntaa antavina pienestä otoksesta johtuen. Lisäksi puutavara oli tuoretta, joka vaikuttaa lujuteen ja jäykkyyteen heikentävästi, ja taipumien tarkempaan laskemiseen tarvittaisiin lisää kokeita. Tietoisuutta massiivipuusta valmistettujen vaarnapalkkien käytöstä tulisi lisätä Suomessa niin suunnittelijoiden kuin kirvesmiesten keskuudessa, jolloin siitä voisi tulla vakavasti otettava vaihtoehto vaativiin puurakenteisiin korvaamaan liima- ja kertopuupalkkien käyttöä.</p>	
Avainsanat Vaarnapalkki, luonnonpyöreä puu, massiivipuusta, yhdistetty palkkirakenne, käsinveistetty	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Mechanical Engineering			
Author(s) Samuli Eskelinen			
Title of Thesis Handcrafted mechanically laminated beam of round timber			
Date	23 March 2016	Pages/Appendices	68
Supervisor(s) Mr. Matti Mikkonen, Senior Lecturer, Mr. Arto Puurula, Principal Lecturer in Structural Engineering			
Client Organisation /Partners Own subject			
<p>Abstract</p> <p>The topic of this Thesis is "strength calculation, production and testing of mechanically laminated beams that are handcrafted from round timber". Mechanically laminated beam is a structure created by joining together two or more individual beams. They are used when the load capacity of one single beam is not sufficient as a supporting structure. Mechanically laminated beams have been produced for hundreds of years, but there exists very little evidence of their use in Finland. In Europe they have been widely used, for example in bridge construction. Round timber has been less used in the production of mechanically laminated beams due to the difficulty of the manufacturing process. Usually, massive timber has been used instead.</p> <p>However, round timber has many significant advantages compared to massive timber. Its load capacity is significantly higher, the degree of processing is low and manufacturing requires little manpower and can be done without expensive machinery. Compared with glu-laminated beams or laminated veneer lumber, mechanically laminated beams produced from round timber are very ecological and also more aesthetically appealing. There are various techniques for joining mechanically laminated beams. In this study, three mechanically laminated beams were manufactured for testing – each one with a different joint structure.</p> <p>The aim of this study was to gain more knowledge on how mechanically laminated beams that are handcrafted from round timber function and react when carrying a load. The intention was to manufacture different mechanically laminated beams, so that their qualities could be compared. The differences in production, function and aesthetic result in distinctive qualities, each with their advantages and disadvantages. The strength calculations were done manually and the test outcomes were compared with laboratory test results. The mechanically laminated beams were manufactured at Toivala timber training field with support from Savo Vocational College. Alppisalvos Ltd provided technical counseling. Testing of the beams was conducted using the HitSavonia load frame of The Savonia University of Applied Sciences. All beams were loaded until rupture. Thus, the reliability of the strength calculation could be compared with collected test results.</p> <p>The results corresponded to the strength calculation, and therefore the calculation technique can generally be regarded as reliable. However, strength calculation following Eurocode 5 design guidelines was an exception; calculated results appeared exaggerated compared with test results. The results testify that mechanically laminated beams have high load capacity and confirmed their anticipated advantages. However, due to small sample, the results may only be regarded as directive. The used timber was fresh, which also weakens the strength and stiffness of the structure. Therefore, further tests are required to calculate bending more accurately. More knowledge on the use of mechanically laminated massive timber beams is needed amongst Finnish designers and carpenters. By raising awareness, laminated massive timber could become a real choice for complicated wood structures and replace the use of glu-laminated beams and laminated veneer lumber.</p>			
<p>Keywords Mechanically laminated beams, round timber, massive timber, combined beam structure, handcrafted</p>			

Kiitokset

Haluaisin kiittää opinnäytetyössäni minua tukeneita henkilöitä ja tahoja. Savon ammatti- ja aikuisopistoa siitä, että ovat mahdollistaneet puitteet ja materiaalit vaarnapalkkien valmistamiselle. Sieltä erityisesti koulutuspäällikkö Ari Puustista ja hirsirakentamisen vastuukouluttajaa Pekka Ruokosta. Alppisalvos Oy:stä Meinrad Rohneria teknisestä tuesta.

Savonia-ammattikorkeakoulusta projekti-insinööri Mauno Multamäkeä monipuolisesta avustamisesta ja HitSavonian henkilökuntaa kuormitus kokeiden valmistamisesta ja suorittamisesta. Lisäksi haluan kiittää opinnäytetyö ohjaajaani DI Matti Mikkosta selkeästä ja eteenpäin vievästä ohjauksesta.

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
2	VAARNAPALKKI	7
2.1	Toimintaperiaate.....	7
2.2	Historia	8
2.3	Erilaiset vaarnapalkit	11
2.3.1	Teollisesti valmistettu vaarnapalkki.....	16
2.3.2	Sahatavarasta valmistettu massiivipuinen vaarnapalkki.....	17
2.3.3	Luonnonpyöreä vaarnapalkki	18
3	LUONNONPYÖREÄT VAARNAPALKKIRAKENTEET	19
3.1	Luonnonpyöreä vaarnapalkki haastaa teolliset menetelmät	19
3.1.1	Modernia käsityötä	19
3.1.2	Edut ja mahdollisuudet	21
3.1.3	Käyttökohteet	21
3.2	Käsinveistettyjen luonnonpyöreiden vaarnapalkkien valmistusmenetelmät	22
3.2.1	Hammastettu vaarnapalkki	23
3.2.2	Palikkavaarnapalkki	25
3.2.3	Hammasleyvyvaarnapalkki.....	27
4	LUONNONPYÖREÄN VAARNAPALKIN LASKENNALLINEN LUJUUS	30
4.1	Vaarnapalkkien mitoittaminen.....	30
4.1	Palikkavaarnapalkin mitoittaminen	35
4.2	Hammastetun vaarnapalkin mitoittaminen	42
4.3	Hammasleyvyvaarnapalkin mitoittaminen	46
5	LUONNONPYÖREIDEN VAARNAPALKKIEN TEKNISTEN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN	53
5.1	Vaarnapalkkien valmistaminen	53
5.2	Vaarnapalkkien koestaminen	55
5.3	Luonnonpyöreiden vaarnapalkkien kuormituskokeen tulokset	57
5.3.1	Hammastettu vaarnapalkki	57
5.3.2	Palikkavaarnapalkki	59
5.3.3	Hammasleyvyvaarnapalkki.....	61
5.4	Puun kosteusmittaukset	61
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	63

6.1 Tulokset ja niihin vaikuttavat tekijät	63
6.2 Laskenta ja mitoitus	63
6.3 Mahdolliset parannukset luonnonpyöreiden vaarnapalkkien valmistamiseen	66
LÄHTEET	67

1 JOHDANTO

Vaarnapalkilla tarkoitetaan puusta valmistettua palkkia, missä vähintään kaksi palkkia yhdistetään mekaanisesti toimimaan yhtenäisenä rakenteena. Vaarnapalkit ovat olleet yleisesti käytössä ympäri maailmaa. Tiedetään, että niitä on valmistettu jo ainakin 300 vuotta sitten. Niiden vaativimpia käyttökohteita ovat silloin olleet rautatie- ja siltarakentaminen. 1900-luvulla teräksen valmistamisen kehittyminen, raudoitetut betonirakenteet ja liimapuu korvasivat lähes täysin vaarnapalkkien käytön. Tällä hetkellä vaarnapalkit ovat tekemässä uutta tulemistä ja niitä käytetäänkin melko paljon Keski-Euroopassa, Yhdysvalloissa ja Kanadassa massiivipuुरakentamisessa. Vaarnapalkkien käyttämiselle on kiistattomasti esteettisiä, taloudellisia ja ekologisia syitä. Niiden valmistamisessa, lujuuslaskemisessa ja mitoittamisessa olisi vielä kuitenkin tutkittavaa, jolloin niistä saataisiin täysi hyöty irti. Vaarnapalkit valmistetaan usein sahatusta massiivisesta sahatavarasta. Suomessa valmistetaan myös hieman hoikemmasta sahatavarasta tehtyjä vaarnapalkkeja naulalevyjä hyväksi käyttäen.

Tässä opinnäytetyössä keskitytään luonnonpyöreästä puusta valmistettuihin vaarnapalkkeihin, mikä on haastavampaa verrattuna sahatavarasta valmistettuun palkkirakenteeseen. Sillä on kuitenkin lukuisia etuja sahatavarasta valmistettuun vaarnapalkkiin nähden. Vaarnapalkkien valmistamiseen - tai toisin sanoen niiden liittämiseen toisiinsa mekaanisesti - on lukuisia eri vaihtoehtoja. Valmistusmenetelmissä on kehittämisen ja tutkimisen varaa. Monipuoliset valmistusvaihtoehdot takaavat tarpeen mukaan sopivan valmistustekniikan. Tarvitaanko esteettisesti kaunis vaarnapalkki vai riittääkö, että se on mekaanisesti toimiva ja tehty teknisesti nopeammin, ollen ehkä ulkonäöllisesti vaatimattomampi. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan kolmea erilaista vaarnapalkkia, jotka antavat valinnanvaraa niiden valmistamiseen tilanteen mukaisesti.

Minulla on muutaman vuoden työkokemuksen käsinveistettyjen hirsirakennusten tekemisestä. Työskennellessäni alalla olin mukana projekteissa, joissa valmistimme luonnonpyöreästä puusta vaarnapalkkeja kantaviksi rakenteiksi. Vaarnapalkkirakenteet ovat varsin luontevia käyttää varsinkin käsinveistetyssä hirsirakennuksessa. Koska aihe on kiinnostanut minua siitä lähtien, koin sen olevan erinomainen aihe myös opinnäytetyöhöni. Vastaavaanlaisista vaarnapalkkirakenteista ei myöskään toislaiseksi ole ollut virallista tutkimustietoa Suomessa. Opinnäytetyöllä ei ole toimeksiantajaa.

Opinnäytetyön tavoitteena on valmistaa ja mahdollisuuksien mukaan mitoittaa Eurokoodi 5 suunnitteluhjeiden mukaisesti. Vaarnapalkit kuormitetaan HitSavonian kuormituskehdellä, jolloin käytännön koetuloksia päästään vertaamaan laskennallisiin tuloksiin. Tavoite on, että vaarnapalkkien mitoittamisessa voisi käyttää hyväksi yksinkertaisia, luotettavia mitoitusmenetelmiä. Oletuksena voidaan pitää sitä, että vaarnapalkkien käyttäytyminen kuormitettuna on linjassa laskennan kanssa. Parhaimmillaan kokeen tulokset vahvistavat käsitykseni luonnonpyöreän vaarnapalkin merkittävästä kapasiteetista, ja siitä voisi tulla yleisemmin tunnettu, vakavasti otettava vaihtoehto vaativiin puurakenteisiin liima- ja kertopuupalkkien rinnalle.

2 VAARNAPALKKI

Vaarnapalkeille syntyi aikoinaan tarve, kun yksittäisen palkin kapasiteetti ei riittänyt täyttämään vaadittuja kuormia ja jännevälejä. Tällöin kehittyi tekniikoita, joilla yhdistettiin useampia palkkeja toimitaan yhdessä. Teräspalkkeja tai raudoitettua betonipalkkeja ei ollut vielä olemassa. Oli myös helppompaa valmistaa yhdistetty palkkirakenne useammasta pienestä palkista kuin löytää ja käsitellä yhtä valtavaa palkkia. Nykyaikana on periaatteessa ekologisesti kestävämpää, että pystytään käyttämään suhteessa pienempikokoisia puuaihoita kuin saada hankituksi valtavia tukkipuita. Voi myös olla että, rautakaupan hyllystä ei esimerkiksi löydy riittävän suurta sahatavarapalkkia, jolloin tarvittava koko palkille saadaan tekemällä siitä vaarnapalkki.

Vaikka vaarnapalkki ei välttämättä ole aivan yhtä luja ja jäykkä kuin samankokoinen yhdestä kiinteästä kappaleesta valmistettu palkki, voidaan siitä saada irti huomattava kapasiteetti. Vaikka liima- ja kertopuupalkit ovat osittain korvanneet vaarnapalkkien valmistamisen tarvetta, on vaarnapalkeille silti olemassa varsin perusteltu jalansija puurakentamisessa. Onhan se huomattavasti vähemmän jalostettu kuin esimerkiksi liimapuupalkki ja näin ollen paljon luontoystävällisempi ratkaisu. Sen valmistamiseen ei tarvita suuria tehtaita ja valmistuslinjoja.

2.1 Toimintaperiaate

Vaarnapalkkien toimintaperiaate on yhdistää kaksi tai useampi yksittäinen massiivipuupalkki toisiinsa. Tämän tapahtuu mekaanisesti erilaisia tekniikoita hyväksi käyttäen, kuten kuva 1 havainnollistaa.



KUVA 1. Luonnonpyöreä vaarnapalkki kurkihirtenä (Alppisalvos Oy 2015)

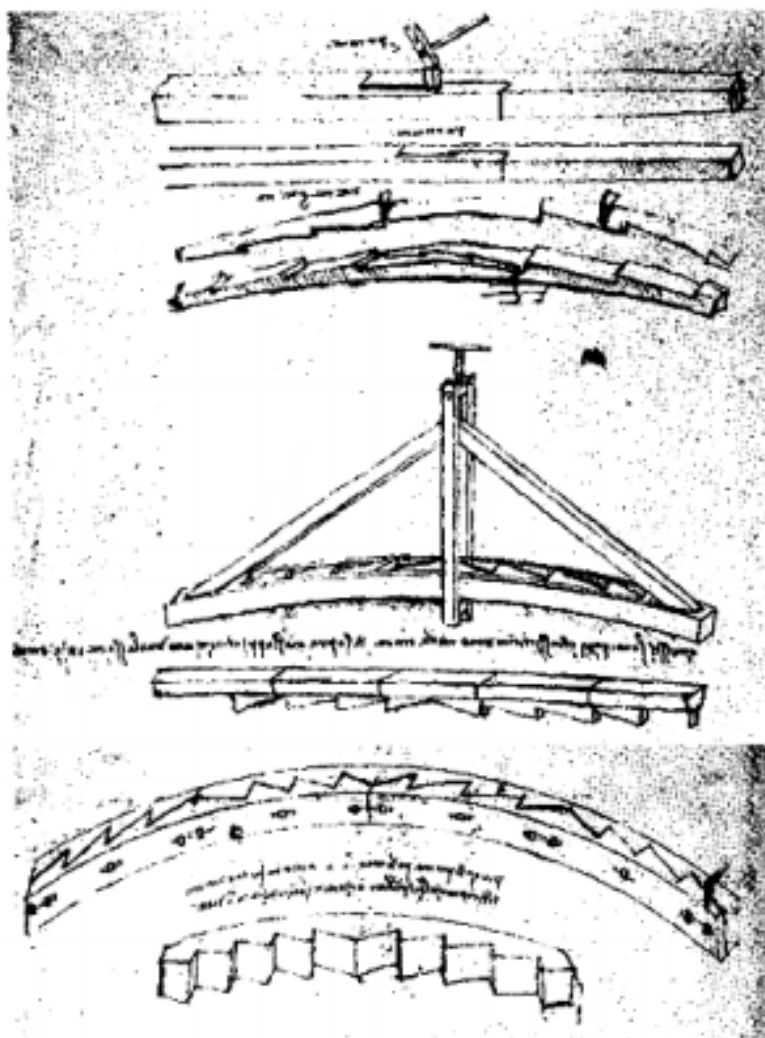
Kuormitettaessa palkkia se alkaa taipumaan alaspäin kuorman kasvaessa. Palkkeja mitoittaessa tarkastellaan niiden kestävyys murtorajatilassa erilaisilla kuormitusyhdistelmillä ja sallitut taipumat

käyttörajatilassa. Mikäli jokin raja-arvo tulee vastaan, palkkia on joko suurennettava tai sen materiaali on vaihdettava lujempaan. Tällöin puurakenteissa mahdollisuutena on suurentaa poikkileikkausta. Tehokkain keino on lisätä palkin korkeutta. Useimmiten rajoittavaksi tekijäksi muodostuu sallitun taipuman raja-arvon ylittyminen.

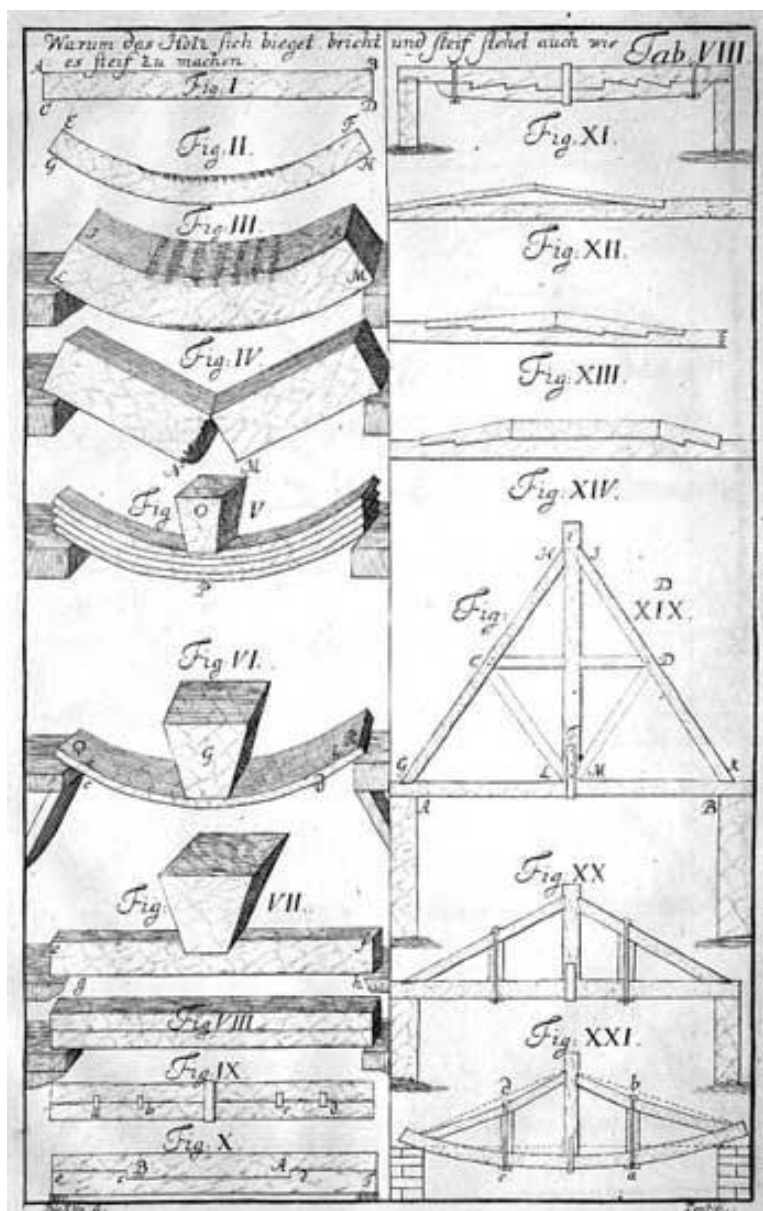
Kun kaksi erillistä palkkia laitetaan päällekkäin ja niitä kuormitetaan, syntyy palkkien välille taipumasta johtuvaa liukumaa. Liukuma on helppoiten havaittavissa palkkien päissä. Palkkien väliseen saumaan syntyy vaakasuuntainen työntövoima, joka on otettava vastaan mekaanisesti. Tällöin palkkien välinen liukuma estyy, palkki ei pääse taipumaan ja se toimii yhtenäisenä rakenteena. Vaaroina useimmiten käytetään joko puisia tai metallisia osia tai puuloveuksia. Kaikkien erilaisten vaarnojen tehtävä on kuitenkin sama; estää liukuma ja ottaa vastaan siitä syntyvät voimat. Jokaisella vaarnapalkkityypillä on omat hyvät ja huonot puolensa.

2.2 Historia

Vaarnapalkeilla on pitkä ja monipuolinen historia. Euroopassa vaarnapalkkeihin liittyviä dokumentteja on yli 300 vuoden takaa. Kuvassa 3 on hahmotelma hammastetusta vaarnapalkista.



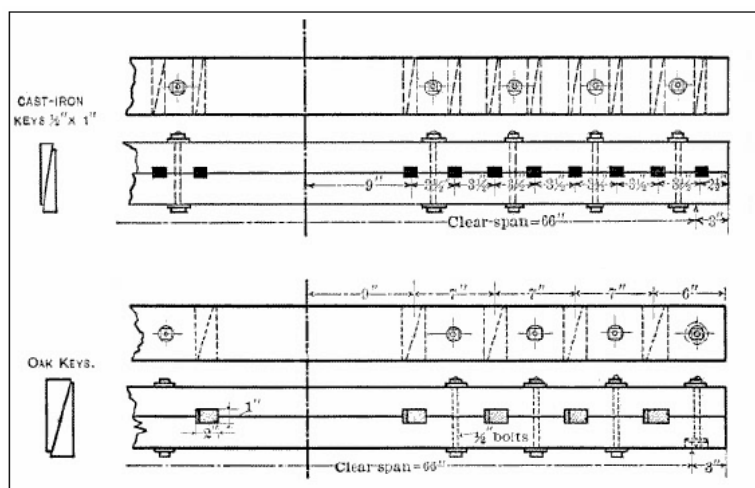
KUVA 3. Leonardo da Vincin piirros vaarnapalkista (Teike 2013)



KUVA 4. Jacob Leupoldin piirros (Brungraber & Miller 2009)

Kuvassa 4 on saksalaisen mekaanikon Jacob Leupoldin (1674-1727) piirustus vuodelta 1726 pitkän jännevälin aiheuttamista ongelmista ja ratkaisuvaihtoehdoista. Kuvassa näkyy vasemmalla alhaalla puupalikoilla tai kiiloilla tehty vaarnapalkki ja oikealla ylhäällä hammastettuja vaarnapalkkeja tai vaarnapalkin ja ristikon hybridi.

Kuvassa 5 on amerikkalaisen insinöörin Edgar Kidwellin piirustukset vaarnapalkista, joissa on käytetty vaarnoina kiilapareja eri puulajeista. Kidwell oli tunnettu kuparikaivoksen insinööri ja professori Michigan College of Mines:lla. Hän suoritti laajan testauksen vaarnapalkeilla käyttäen täysmittaisia palkkeja. Testien tulokset julkaistiin American Institute of Mining Engineering julkaisussa nimeltä "The Efficiency of Built-up Wooden Beams" (Brungraber & Miller 2009).

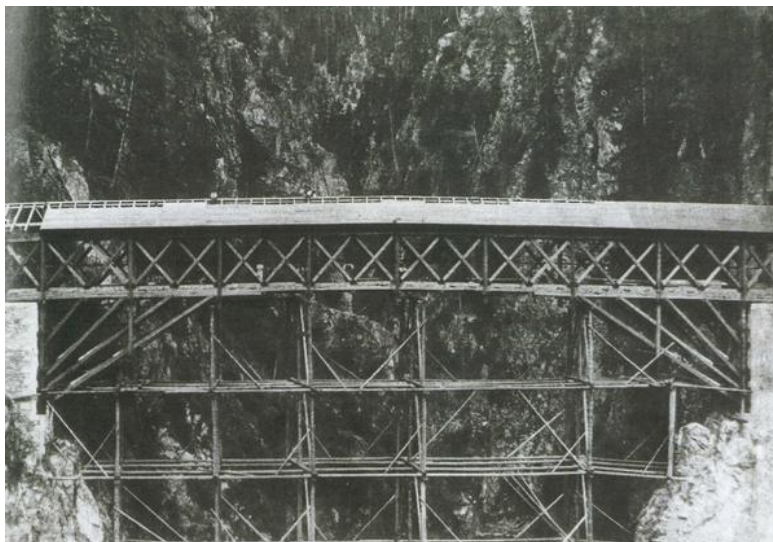


KUVA 5. Edgar Kidwell piirustus vuodelta 1897 (Brungraber & Miller 2009)

Puuta rakennusmateriaalina on aina ollut saatavilla ja se on ollut helpointa työstää jo entisaikoina. Vaarnapalkkeja ovat tutkineet ja niistä ovat olleet kiinnostuneina useat eri insinöörit ja kirvesmiehet ajan saatossa. Useimmiten vaarnapalkkeja on käytetty silta- ja rautatierakentamisessa. Kyseisissä rakenteissa vaarnapalkkia on käytetty yleensä erilaisten ristikkorakenteiden alapaarteena. Kuvassa 6 näkyy vaarnapalkki katetun puusillan alapaarteena. Vaaroina on käytetty vinoon asennettuja puupalikoita.



KUVA 6. Puusilta Itävallassa, jossa massiivipuinen vaarnapalkki (Brungraber & Miller 2009)



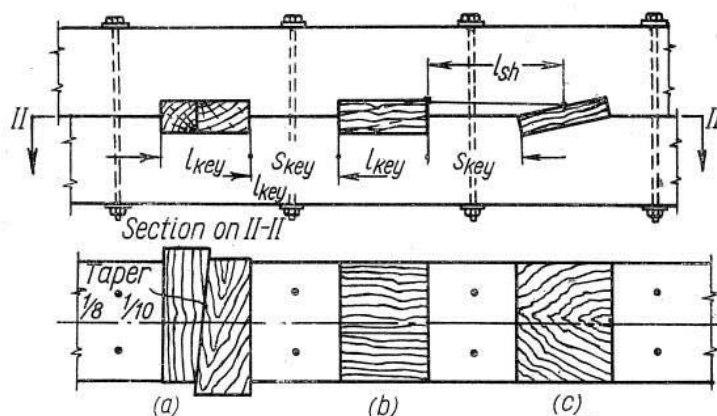
KUVA 7. Russeintobelin silta Sveitsin vuoristossa (structurae.net.)

Kuvassa 7 oleva silta on Sveitsistä ja se on rakennettu vuonna 1857. Sillan jänneväli on 56,2 m. Kuva on otettu rakentamisen aikana. Siltaan ollaan parasta aikaa tekemässä vesikattoa. Sillan sivut on valmiina suojattu lähes kokonaan puisella lautaverhouksella. Kuva on otettu kaukaa, mutta siitä pystyy erottamaan kuinka alapaarteena on käytetty vaarnapalkkeja, joissa on puupalikoista tehdyt vaarnat. Sillan alla on rakennusaikaiset rakennustelineet ja tuennat.

2.3 Erilaiset vaarnapalkit

Vaarnapalkkeja on olemassa lukuisia erilaisia. Yksinkertaistettuna vaarnapalkki tarkoittaa sitä, että kahden palkin väliin lyödään tai porataan terästappi eli tappivaarna. Ennen vanhaan on yleisimmin käytetty puupalikkaa tai muuta puu-puu liitosta, kuten hammastusta. Hammastus takaa lujan liitoksen, mutta hammastuksen tekeminen poistaa suhteessa eniten puuta poikkileikkaukseen nähden. Hammastuksessa loveuksen pystysuorat pinnat ottavat vastaan työntövoiman. Pykäliin kohdistuvat puristusvoimat ovat lähes täysin syynsuuntaiset, joten ne pystyvät ottamaan vastaan suuria voimia. Niiden valmistaminen on kuitenkin tarkkaa työtä, sillä jos työvirheestä johtuen hammastukseen, jää rakoja tulee alkutaipumasta liian suuri ennen kuin hampaat alkavat "puremaan".

Puupalikkaa käytettäessä se voidaan karkeasti ottaen asentaa kahdella eri tavalla, joko asennettuna vaakaan tai vinoon, kuten kuvassa 8 on havainnollistettu.

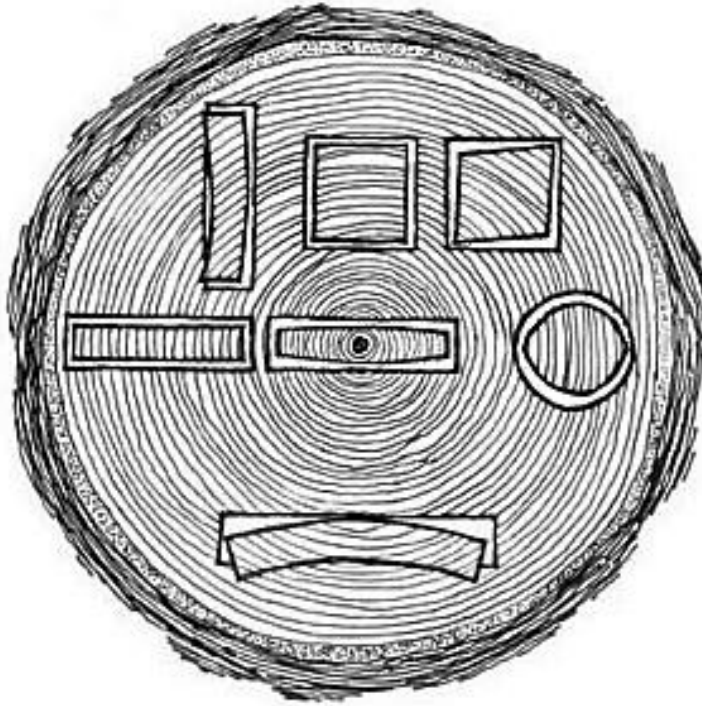


KUVA 8. a) Kiilapari syysuunta poikittain, b) palikka vaakatasossa syysuunnassa ja c) kallistettu palikka syysuunnassa (Brungraber & Miller 2009)

Palikka on joko yksiosainen tai kiilapari. Kiilaparin hyvänä puolena on sen kiristettävyyden jälkikäteen (kuva 5). Tällöin se antaa myös anteeksi mahdolliset työvirheet, koska raot saadaan kiristettyä umpeen. Huonona puolena voidaan pitää sitä, että kiilapari on asennettuna loveensa poikittain. Puu on poikittaiseen syysuuntaan nähden monin kerroin heikompaa kuin pituussuuntaisesti. Tällöin palikan puristuskestävyys ylittyy helpommin. Yksiosainen palikka voidaan asentaa suoraan syitä vastaan. Tällöin se kestää puristusvoimia huomattavasti paljon enemmän, mutta kiristettävyyden menetetään ja työvirheisiin ei ole varaa. Toisaalta etuna hammastettuun vaarnaukseen on se että, palikka on vaihdettavissa uuteen työvirheen sattuessa. Palikat tulisi valita kuivasta puusta, ettei kuivumiskutistumista pääse tapahtumaan. Lisäksi poikittain asennettuna palikan puulajilla on suuri merkitys. Palikoiden materiaaliksi tulisi valita kova puulaji.

Triofloorin puulajioapas (2013, 12) mainitsee seuraavaa: ”Perussääntönä on kuitenkin hyvä pitää jalkoa kahteen luokkaan: pehmeät puulajit (tammea pehmeämmät) ja kovat puulajit.”

Vinoon asennetun palikan etu on se että, siihen kohdistuu ainoastaan puristusvoima, kun taas vaakatasoiseen palikkaan kohdistuu puristusvoiman lisäksi leikkausvoima. Tällöin on otettava huomioon kuinka puun syöt kulkevat palikan poikkileikkauksessa, jottei se leikkautuisi syiden välistä. Puun syöt tulisi näin ollen olla pystysuoraan. Kuvasta 9 katsottuna reunimmainen sahaus vasemmalta olisi optimaalisin, kun taas huonoin vaihtoehto olisi kuvan alareunassa oleva sahaus. Koska vinoon palikkaan kohdistuu vain puristusvoimia, on sen kapasiteetti oletettavasti suurin, kun se on asennettu pitkittäin syysuuntaan nähden.



KUVA 9. Puun poikkileikkaus (Museovirasto 2015)

Vinoon asennettu palikka ei saa olla liian lyhyt, koska siihen kohdistuva työntövoima pyrkii kääntämään sitä pystyyn. Kokemusperäisen tiedon mukaan sen pituus tulisi olla noin viisinkertainen korkeuteen nähden, kuten kuvassa 10 nähdään.

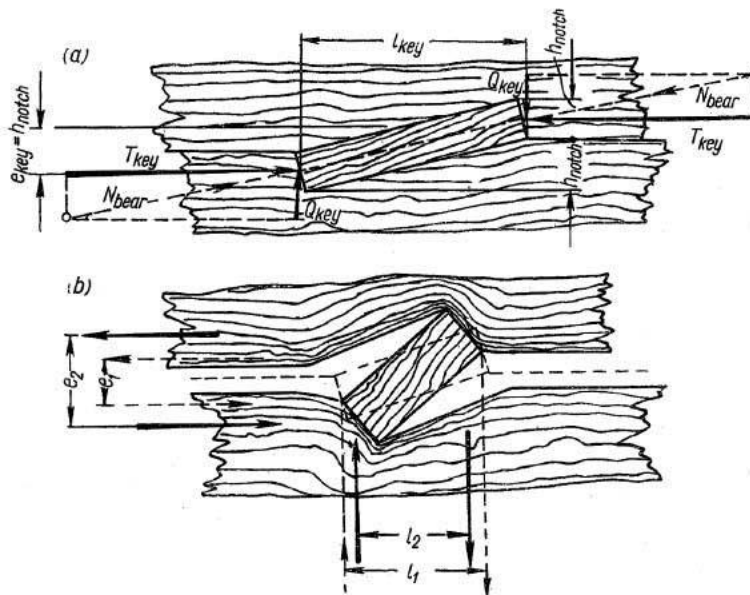


Fig. 53. Rectangular sloping key
 a—normal ($l_{key} = 5h_{notch}$); b—too short ($l_{key} \leq 3h_{notch}$)

KUVA 10. a) palikan pituus = $5 \times$ loven syvyys h

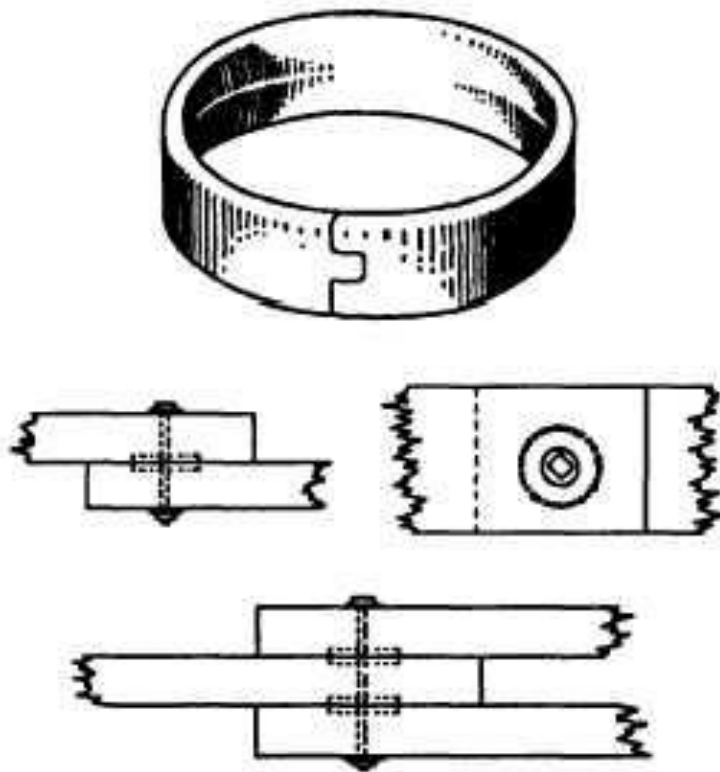
b) palikan pituus vähemmän kuin $3 \times$ loven syvyys h (Brungraber & Miller 2009)

Hammastettu vaarnapalkki ja vinoon asennettu palikallinen vaarnapalkki toimivat vain yhdestä suunnasta kuormitettuna. Se, että kuorman suunta palkkirakenteessa pääsisi muuttumaan, on käytännössä mahdotonta. Jos vaarnapalkkeja käytetään pilareina, tulee tämä asia kuitenkin huomioida. Tuulikuormista syntyvät vaakavoimat vaihtavat suuntaa tuulensuunnan muuttuessa. Vaakaan asennetun palikan etu on se, että se toimii molemmista suunnista kuormitettuna.

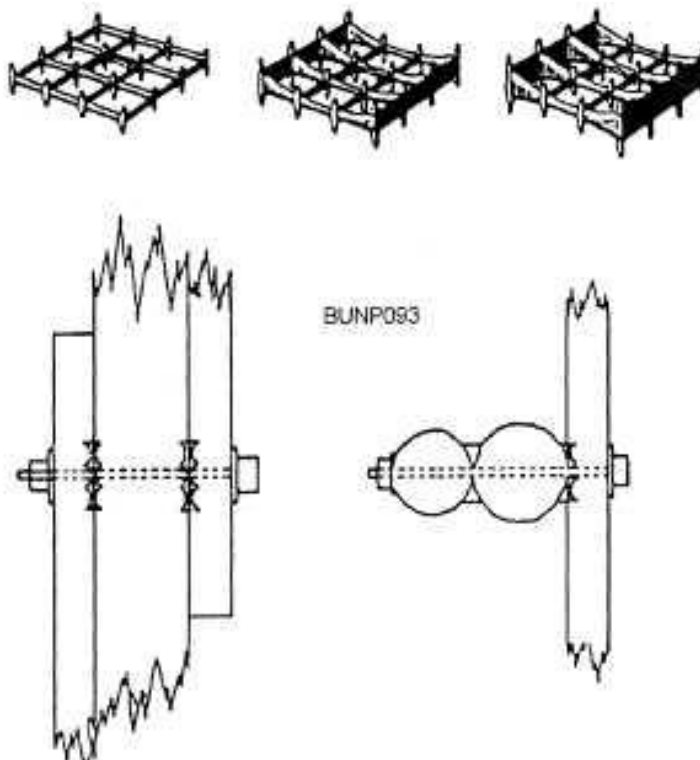


KUVA 11. Vaarnapilari. Vaarnapalikat asennettu vaakaan, jolloin pilari pystyy ottamaan vastaan vaakavoimia molemmista suunnista (Brungraber & Miller 2009).

Vaarnapalkeissa on käytetty myös erilaisia teräksestä valmistettuja osia, joiden avulla siirretään leikkausvoimia. Näitä ovat hammaslevyt (buldog), rengasvaarnat, erilaiset piikkiverkot ja muut sovellukset. Näitä metallisia osia käytetään myös muissa puu-puu liitoksissa, joihin kohdistuu leikkausvoimia.



KUVA 12. Rengasvaarna, englanniksi split ring (engineeringtraining.tpub.com)

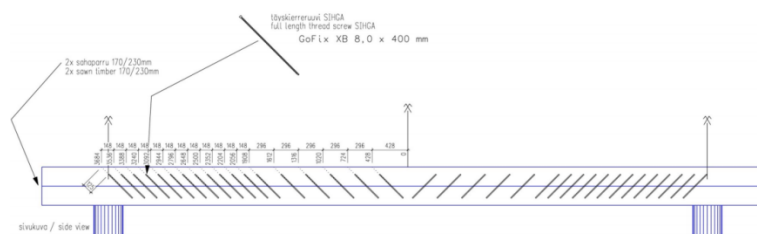


KUVA 13. Spike Grid eli piikkiverkko puuliitoksissa (constructionmanuals.tpub.com)



KUVA 14. Bulldog-levy kaksipuoleisena (Mitek Finland Oy)

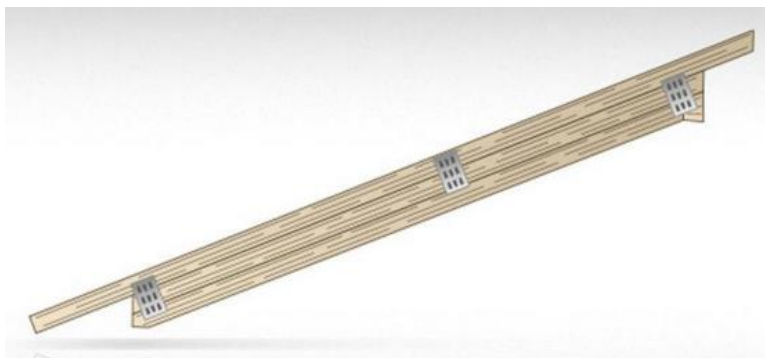
Teräksestä valmistettuja vaarvoja on olemassa monenlaisia. Suomessa ne ovat melko tuntemattomia, vaikka niistä voisi olla hyötyä tehtäessä leikkausliitoksia. Tässä opinnäytetyössä yhdessä vaarnapalkissa on käytetty hammaslevyjä. Muita edellä mainittuja osia ei ole saatavana Suomesta. Teräksisten liitososien etuna on nopeampi valmistus. Yksittäisen teräsvaarnan kapasiteetti ei ole kuitenkaan yhtä hyvä kuin edellä mainituilla puu-puu liitos vaarvoilla. Yksi erittäin varteen otettava vaihtoehto on täyskierreruuveilla tehty vaarnapalkki, joka on kuvassa 15. Huomaa, että ruuvit on 45 asteen kulmaan toisinpäin miten esimerkiksi hammastus on tehty. Tämä johtuu siitä, että ruuvit eivät juurikaan ota vastaan puristusvoimia, mutta vetovoimia kohtaan niillä riittää enemmän kapasiteettia. Ruuveihin kohdistuu siis vetovoima. Täyskierreruuveilla valmistettu vaarnapalkki on varsin nopea valmistaa.



KUVA 15. Työpiirustus täyskierreruuveilla valmistetusta vaarnapalkista massiivisesta sahatavarasta (Alppisalvos Oy 2015)

2.3.1 Teollisesti valmistettu vaarnapalkki

Teollisesti valmistettu vaarnapalkki on tehty hoikasta sahatavarasta. Siinä palkit yhdistetään toisiinsa useimmiten naulalevyillä. Naulalevyillä on hyvä kyky ottaa vastaan niille kohdistuvia leikkausvoimia. Palkkeja on päällekkäin usein jopa kolme, näin saadaan aikaiseksi jo melko korkea poikkileikkaus. Teollisesti valmistetulla vaarnapalkilla pystytään korvaamaan liima- ja kertopuupalkkien käyttöä. Tarkoituksena on saada kustannustehokkaampi ratkaisu. Käyttökohteita teolliselle vaarnapalkille ovat esimerkiksi puiset alapohjarakenteen, välipohjarakenteet, pulpettikatot, kurkihirsirakenteet, katokset yms. Teollinen vaarnapalkki voidaan käyttää yhdistettynä rakenteena kattoristikon kanssa, missä vaarnapalkki toimii yläpaarteena. Tällaisia ristikoita käytetään puolitoista- ja kaksikerroksisissa pientaloissa. Teollisesti valmistettu vaarnapalkki jätetään piiloon ainakin asuinrakennuksissa, koska sen ulkonäkö ei ole kovin imarteleva.



KUVA 16. Teollisesti valmistettu vaarnapalkki (Sepa Oy)

2.3.2 Sahatavarasta valmistettu massiivipuinen vaarnapalkki

Kuten tämän opinnäytetyön kuvista on käynyt ilmi, useimmiten vaarnapalkit on valmistettu massiivisista palkeista, jotka on sahattu suorakaiteen muotoisiksi tai pelkoiksi. Pelkka tarkoittaa sitä että, palkin sivut on tasattu, mutta ylä- ja alapinta on jätetty luonnonpyöreäksi. Ennen vanhaan palkit veistettiin usein kirveellä. Kun palkkien sivuille on tehty niin sanotusti suorat pinnat, on niihin huomattavan paljon helpompi merkata loveukset, kolot, hammastukset ja niin edelleen. Siihen ei tarvita muuta kuin mitta, suorakulma ja kynä. Massiivisesta sahatavarasta valmistetun vaarnapalkin etuina ovat niiden helpompi ja nopeampi valmistaminen suorista pinnoista johtuen. Esimerkiksi loveuksien työstämisessä pystyy käyttämään käsisirkkeliä. Verrattuna luonnonpyöreään vaarnapalkkiin, massiivisesta sahatavarasta valmistetusta vaarnapalkista on poistettu paljon puuta, jolloin sen lujuus on huomattavasti heikompi.

Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että pyöreän puun lujuus voi olla 50 % suurempi kuin samankorkuisen sahapalkin, vaikka puumateriaalin määrä voi olla jopa kaksinkertainen sahatavaraan verrattuna. (Kivinen, Pietilä 2000.)



KUVA 17. Massiivisesta sahatavarasta valmistettu kolmiosainen vaarnapalkki (Brungraber & Miller 2009)

Kuvassa 17 on valmistettu todella järeä vaarnapalkki kolmesta erillisestä sahatavarapalkista. Vaarnapalkit on asennettu vaakatasoon ja palikan värierosta voi arvella että, kyseessä on kiilapari.

2.3.3 Luonnonpyöreä vaarnapalkki

Luonnonpyöreitä vaarnapalkkeja on käytetty ja tehty huomattavasti vähemmän kuin sahatavarasta valmistettuja vaarnapalkkeja. Tämä johtuu siitä, että niiden valmistaminen on erittäin tarkkaa ja haastavaa työtä. Luonnonpyöreät vaarnapalkit on tehty lähinnä yksinkertaistetuilla menetelmin, kuten kuvasta 18 voi nähdä. Siinä suurehko puupalikat on vain hieman lovettu alempaan ja ylempään puuhun ja puut on sidottu toisiinsa terässpannoilla tai vaijerilla.



KUVA 18. Tukkien kuljetusta varten valmistettu silta syrjäiselle metsäautotielle (Wolfe 1999)

Vasta nykyaikaisten tarkkuushirsivarojen kehittyminen on käytännössä mahdollistanut perinteisten vaarnapalkkien valmistustekniikoiden soveltamista luonnonpyöreisiin vaarnapalkkeihin. Vaarnapalkkien valmistustekniikoiden soveltamista luonnonpyöreään puuhun Suomessa on kehittänyt Meinrad Rohner, joka on sveitsiläissyntyinen pitkänlinjan hirs- ja massiivipuurakentaja. Hänen oppejaan sovelletaan tämän opinnäytetyön käytännön osiossa. Kuvassa 19 näkyy hammastetun vaarnapalkin soveltaminen luonnonpyöreään puuhun.



KUVA 19. Hammastettuvaarnapalkki luonnonpyöreässä puussa uniikeilla pilareilla (Alppisalvos Oy 2015)

3 LUONNONPYÖREÄT VAARNAPALKKIRAKENTEET

3.1 Luonnonpyöreä vaarnapalkki haastaa teolliset menetelmät

Luonnonpyöreä puu, josta poistetaan vain kuori vuolemalla käsin tai koneellisesti, on huomattavasti lujempaa kuin vastaavan korkeuden omaava sahatavarapalkki. Nyrkkisääntönä voidaan sanoa, että pyöreän puun lujuus voi olla 50 % suurempi kuin saman korkuisen sahapalkin, vaikka puumateriaalin määrä voi olla jopa kaksinkertainen sahatavaraan verrattuna. (Kivinen & Pietilä 17, 2000) Myös puun sorvaus heikentää sen lujuutta huomattavasti, koska puun syyt eivät säily ehjänä vaan katkeavat työstämisestä johtuen. Lisäksi sorvatessa puuta oksien suhteellinen osuus kasvaa ja varsinkin tyvipäästä tukkipuuta poistuu huomattava määrä. Puun pyöreä muoto ja syiden ehjänä säilyminen kompensoi sen mahdollisia heikkoja kohtia. (Boren, Pietilä, Lehtoviita, Meuronen & Suonio 2000; Kivinen, Pietilä, 12, 2000.)

Luonnonpyöreän puun ominaislujuus vastaa melko tarkasti liimapuun lujuutta GL28c ja GL32c Suomalaisen pyöreän puutavaran lujuusluokaksi voidaan olettaa C30. Tätä tulkintaa saadaan noudattaa siihen saakka kunnes lujuuslajitellun pyöreän puutavaran tuotestandardi EN 14544 astuu voimaan (Ympäristöministeriön tiedote 2007; Puuinfo, lyhennettysuunnitteluohje, 17).

Luonnonpyöreän puun poikkileikkausmuoto vaakarakenteissa on epäedullinen siinä mielessä, että se on yhtä korkea kuin leveäkin. Palkin rakenteellinen teho perustuu palkin maksimaaliseen rakennekorkeuteen. Leveys lisää poikittaisjäykkyyttä. (Kivinen & Pietilä 17, 2000) Vaarnapalkkirakenne on juurikin ratkaisu tähän ongelmaan. Ei ole tarvetta hankkia ylijäreitä tukkiaihioita, koska tarvittava rakenteellinen korkeus on saavutettavissa vaarnapalkeilla. Pyöreää puuta on mahdollista hankkia todella läheltä rakennuspaikkaa, sen jalostusaste on todella pieni, jolloin se on rakennusmateriaalina todella edullinen, turvallinen ja ekologinen. Luonnonpyöreällä puulla vaarnapalkkirakenteena on huomattavan suuri lujuuskapasiteetti, jolloin se todella pystyisi haastamaan massiivisetkin liimapuupalkit erilaisissa rakenteissa.

3.1.1 Modernia käsityötä

Kuten aiemmin mainittu, vasta nykyaikaisten tarkkuus hirsivarojen kehittyminen on mahdollistanut perinteisten vaarnapalkkien valmistustekniikoiden soveltamisen luonnonpyöreään puuhun. Puun pyöreästä muodosta johtuen siihen erilaisten loveuksien, liitoksien ja sahausten merkitseminen ei onnistu tavallisia menetelmiä käyttäen - ainakaan työn tarkkuus ei ole riittävä. Modernit tarkkuushirsivarat on varustettu vaaka- ja pystysuuntaisilla libelleillä, joita käytetään esimerkiksi vesivaaioissa. Libellien avulla ns. piirtokynät pysyvät luodissa toisiinsa nähden. Toisin sanoen siirrettäessä muotoja, loveuksia tai muita merkkejä puusta toiseen libellit pitävät huolen siitä, että se tapahtuu millimetrin tarkkuudella. Kuvissa 20 ja 21 näkyy kaksi erilaista tarkkuus hirsivaraa.



KUVA 20. Kalibroitava hirsivara. Nurkkasalvoksen tasapinnan pisteiden siirtäminen (boisbrut.free.fr.)



KUVA 21. Kalibrintivapaa tarkkuushirsivara Chambers Log-Scriber (chamberslogscribers.com)

Vaarnapalkkien työstössä käytetään apuna yleensä moottorisaha raakatyöstöä varten. Lopullinen viimeistely tehdään kuitenkin käsityökaluja käyttäen. Niitä ovat perinteiset seppiä takomat käsityökalut, kuten lyöntitaltta, työntotaltta, kourutaltta jne. Vaarnapalkkien tekeminen luonnonpyöreästä puusta on puhdasta käsityötä, jota ei olisi mahdollista toteuttaa ilman nykyaikaista tekniikkaa. Koneellisesti niiden valmistaminen ei ole mahdollista. Tekniikka siihen on periaatteessa olemassa, mutta se olisi liian kallista toteuttaa.

3.1.2 Edut ja mahdollisuudet

Suomi on metsäinen maa. Havupuuta kasvaa joka puolella Suomea, pois lukien aivan pohjoisin Lappi tuntureineen ja vaivaiskoivuineen. Yleisesti ottaen rakennusmateriaalia on saatavilla mistä päin tahansa Suomea. Luonnonpyöreisiin ja muihin massiivipuisiin vaarnapalkkeihin tarvittava rakennusmateriaali on mahdollista hankkia todella läheltä rakennuspaikkaa. Jos puita ei tarvita paljoa, on niiden kaataminen metsurityönä järkevää. Kuljetukset ja muut siirrot on mahdollista pitää todella lyhyinä. Puut voidaan työstää suoraan rakennuspaikalla tai erillisellä työkentällä tilanteen mukaan. Puiden jalostusaste pysyy todella pienenä, koska niille ei tarvitse tehdä kuin kuoren poisto ja työstö. Materiaalia hukkaantuu todella vähän, kun niitä ei tarvitse sahata, höylätä, liimata yms. Luonnonpyöreän vaarnapalkin valmistamiseen ei tarvita kalliita koneita tai suuria määriä muita laitteita. Ne valmistetaan miestyönä, joten sillä on hyvä työllistävä vaikutus. Tukkipuita ei tarvitse kuivata koneellisesti, vaan ne voi ilmakeivata hyvin tuulettuvassa taapelissa, ilmavasti peitettynä. Luonnonpyöreiden vaarnapalkkien valmisteluun kuuluu todella vähän ylimääräistä energiaa, joten ne ovat erittäin ekologisia. Puun hankinnassa voidaan valita vain tietyt puut, jotka täyttävät tietyt laatuvaatimukset. Varovaisella puun korjuulla metsä säilyy vahingoittumattomana, eikä isoja hakkuuta tarvita.

Ulkonäöllisesti luonnonpyöreä puu on erittäin kaunis ja esteettinen. Kun sen luonnolliset muodot ovat säilyneet, puusta voi nähdä sen yksilölliset piirteet, ja niitä voidaan jopa korostaa. Luonnonpyöreää tai massiivipuista sahatavaravaarnapalkkia ei tarvitse piilottaa katseilta, vaan sen voi jättää näkyviin katseen vangitsijaksi, myös sisätiloissa. Luonnonpyöreä puu on todella lujaa, varsinkin jos se on hitaasti kasvanutta. Koska puun syyt ovat ehjät, eikä niitä ole katkottu, se pystyy kompensoimaan puun mahdollisia heikompia kohtia. Onhan se jo kasvaessaan joutunut kestämaan kovia tuulia ja muita rasituksia. Puuhun itseensä on sitoutunut iso määrä hiilidioksidia. Se kestää suojattuna saateelta ja maakosteudelta jopa satoja vuosia. Purettaessa siitä ei synny jätettä vaan se voidaan hyödyntää uudelleen vähintäänkin polttopuuna. Suomen metsävaroja voisi siis hyödyntää nykyistä paljon paremmin.

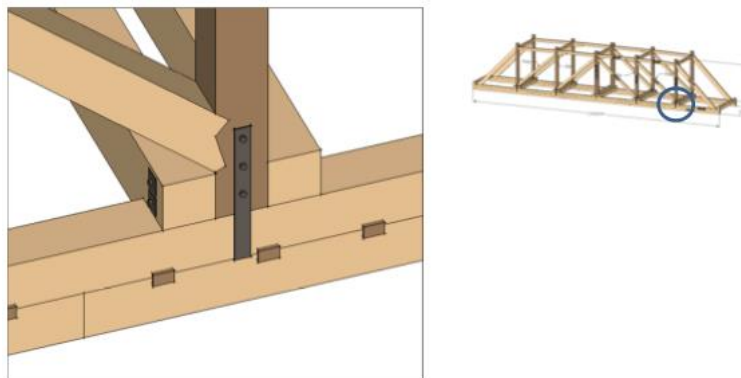
Luonnonpyöreästä puusta ja vaarnapalkkeja hyväksi käyttäen olisi mahdollista tehdä vaativia rakennuksia, joissa on melko pitkät jänneväli. Kehärakenteisena vaarnapalkkina voisi saavuttaa jo varsin varteenotettavia jännevälejä. Kehärakenteissa erilaiset liitostekniikat ovat haasteellisin osio.

3.1.3 Käyttökohteet

Luonnonpyöreitä vaarnapalkkeja olisi mahdollista soveltaa lukuisissa erilaisissa rakennuksissa ja rakennelmissa. Tavanomaisessa talonrakentamisessa tai hirsirakentamisessa ne soveltuvat esimerkiksi kantaviksi pääkannattajiksi välipohjarakenteissa, kuistien räystäspalkkeina ja kurkihirtenä. Erilaisissa pilari-palkki tyyppisissä runkoratkaisuissa, kuten katoksissa, vajoissa, halleissa jne. Monen tyyppisissä kehärakenteissa niitä pystyisi myös soveltamaan, joissa ne voisivat toimia myös mastopilarina.

Siltarakenteissa vaarnapalkkeja on sovellettu jo satoja vuosia sitten, joten varsinkin nykyään voisi olla järkevää hyödyntää niitä esimerkiksi kevyissä jalankulkusilloissa. Niissä vaarnapalkit ovat olleet

yhdistettynä rakenteena, kuten kuvan 22 Howe-tyyppisessä ristikossa sillan alapaarteena. Kuva on Anna Teiken opinnäytetyöstä. Silta on ollut tarkoitus rakentaa Ruotsin Mariestadiin jalankulkusillaksi vuonna 2014.



KUVA 22. Massiivipuinen vaarnapalkki puurakenteisessa jalankulkusillassa (Teike 2013)

Katettuna ja suojattuna puinen silta voi kestää satoja vuosia. Puusta valmistettujen siltojen määrää voisi lisätä huomattavasti. Esteenä ovat ennakkoluulot, valmistajien ja urakoitsijoiden vähäinen määrä Suomessa sekä perinteisten kirvesmiestaitojen ja tietojen häviäminen. Esimerkiksi Ruotsissa, Norjassa ja Keski-Euroopassa puusilloja rakennetaan huomattavasti enemmän, niin teollisesti, kuin myös käsityönä.

3.2 Käsintehtyjen luonnonpyöreiden vaarnapalkkien valmistusmenetelmät

Vaarnapalkkeja on lukuisia erilaisia, joilla kullakin on omat, hieman toisistaan poikkeavat valmistusmenetelmät. Erilaisia vaarnapalkkeja on tarkasteltu aiemmin tässä opinnäytetyössä. Eniten toisistaan eroavat puu-puu liitoksin tehtävät vaarnapalkit ja metallisin liittimin valmistetut vaarnapalkit. Puu-puu liitoksien kapasiteetti on todella hyvä, joten tähän opinnäytetyöhön on valittu kaksi erilaista puuliitoksin tehtävää vaarnapalkkia, jotta niitä voi verrata toisiinsa. Lisäksi valmistetaan yksi metalliliittimin valmistettu hammaslevyllinen vaarnapalkki, jota on mielenkiintoista verrata puuliitoksiin vaarnapalkkeihin. Hammaslevy ei ole kapasiteetiltaan parhaimmasta päästä verrattaessa muihin metalliliittimiin, mutta tähän opinnäytetyöhön se jouduttiin valitsemaan siksi, että toisenlaiset liittimet olisi jouduttu tilaamaan ulkomailta. Suomalaiset rautakaupat kun ovat nykyään enemmän sisustusliikkeitä. Yksi mielenkiintoinen vaarnatyyppi olisi ollut rengasvaarna.

Valmistusmenetelmiltään tämän opinnäytetyön vaarnapalkit ovat pääpiirteittäin samankaltaiset. Eniten valmistustekniikaltaan eroaa hammaslevyllinen vaarnapalkki, johon ei tule minkäänlaisia puu-puu-liitoksia. Jokaisen vaarnapalkin tekeminen alkaa samoilla valmistavilla toimenpiteillä, kuten puiden valinnalla, kuorinnalla ja asemoinnilla. Piirto- ja liitostekniikoissa on suurimmat erot. Näissä hammastettu ja palikallinen vaarnapalkki ovat eniten toistensa kaltaiset, kuitenkin omineen eroavaisuuksineen. Jokainen palkki joudutaan yksilöllisesti piirtämään ja työstämään toisiinsa nähden sopiviksi. Metallisilla liitoselimillä valmistetun vaarnapalkin valmistamisessa olisi kuitenkin mahdollista oikoa siinä mielessä, että puita ei varattaisi toisiinsa, vaan molemmille sahattaisiin tasapinnat, jotka

tulisivat toisiaan vasten. Tällöin puut eivät täsmällisesti "sulautuisi" toisiinsa nähden. Mikäli ulkonäöllisesti sillä ei olisi suurta merkitystä, menetelmä nopeuttaisi palkin valmistamista.

3.2.1 Hammastettu vaarnapalkki

Hammastetun vaarnapalkin alempaan puuhun on aluksi tehtävä suunniteltu hammastuskuvio. Hammastuksille on laskettava riittävä syvyys, jotta puristuspinnoille tulee riittävä poikkipinta-ala. Lisäksi puristuspinnojen eli pykälien väli on oltava riittävän pitkä, jotta hammastuksen leikkauspituus tulee riittävän suureksi. Muuten hammastus saattaa leikkautua puun pitkittäissuuntaisesti. Hammastusta varten tarvitaan leveä lankku, joka katkaistaan suunniteltuun pituuteen. Hammastusten aloituspisteiden merkkaamisen jälkeen lankku voidaan asemoida paikalleen. Kaltevuuden säätö ja muu aseointi vaatii tarkkuutta ja hienosäätöä tarkkuushirsivararan avulla. Kun lankku on oikeassa asennossa paikallaan, voidaan sen avulla piirtää hammastus puuhun tarkkuushirsivaralla.



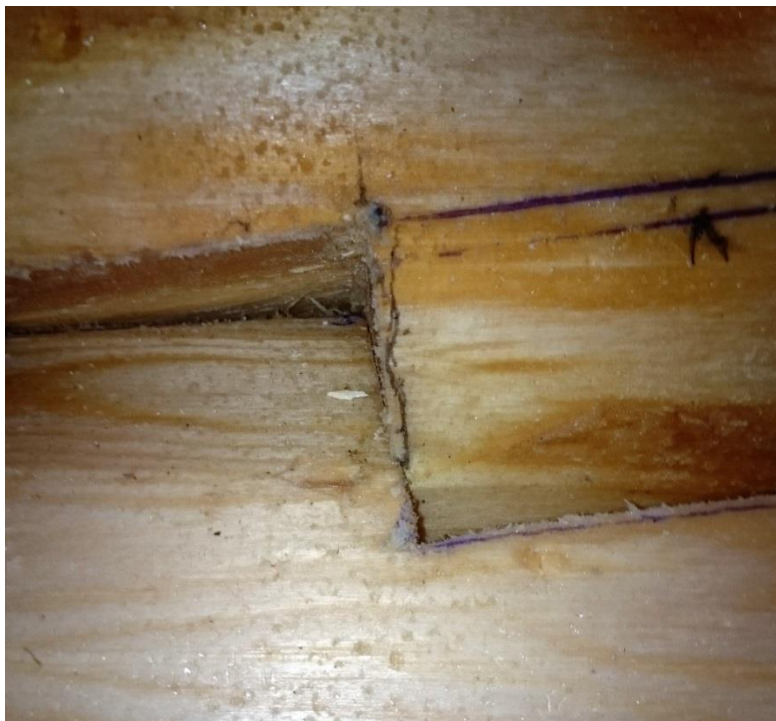
KUVA 23. Hammastuksen piirto alempaan puuhun (Eskelinen 2015)

Kuvassa 23 näkyy kaksi ensimmäistä hammastusta piirrettynä puun oikeassa reunassa. Lankku on kallistettu sopivaan kulmaan puisten kiilojen avulla ja kiinnitetty väliaikaisesti rautanauhoilla. Kun kaikki hammastukset on piirretty, ne voidaan työstää. Raakatyö tehdään moottorisahalla ja pintojen viimeistely käsityönä talttojen avulla.



KUVA 24. Alemman puun hammastus valmiina (Eskelinen 2015)

Kuvassa 24 hammastus on valmis. Tämän jälkeen jälleen lankkua hyväksi käyttäen hammastus "siirretään" ylempään puuhun tarkkuushirsivaralla. Kun piirto on tehty, voidaan ylempikin puu työstää valmiiksi. Piirtämisen tarkkuuteen on kiinnitettävä erityistä huomiota, eikä sahauksessakaan saa tehdä virheitä. Hammastusten on pureuduttava tiukasti toisiinsa, kuten kuvassa 25 näkyy.



KUVA 25. Hammastuksen pystypintojen tiukka sovitus (Eskelinen 2015)

Kun puut on piirretty ja työstetty, ne voidaan nostaa päällekkäin. Koska hampaat purevat toisiinsa kiinni erittäin tiukasti, tarvitaan pari isoa kuormaliinaa puristamaan niitä toisiinsa samalla puunuijalla lyöden. Kun puut on saatu kiinni toisiinsa, voidaan kierretangoille porata reiät. Kierretankojen tehtävä hammastetussa ja palikallisessa vaarnapalkissa on pitää puut kiinni toisissaan. Ilman niitä ne pyrkivät irtoamaan toisistaan kuormitettuna. Kierretankojen aluslevyjä varten tarvitaan upotukset, jotka porataan riittävän isolla oksaporalla. Tämän jälkeen kierretangot voidaan asentaa reikiin ja ki-ristää muttereiden avulla.



KUVA 26. Porausta ja kierretankoja vaille valmis hammastettu vaarnapalkki (Eskelinen 2015)

Asennusta voi helpottaa kiilaamalla alemmaa puuta ylöspäin, jolloin hammastuksiin syntyy hieman "väljyyttä". Samaa tekniikka voi käyttää jo piirtovaiheessa, jos palkille halutaan tehdä esikorotusta ylöspäin. Tämä aiheuttaa valmiiksi pienen jännityksen puiden välipintaan, jolloin hammastus pureutuu varmemmin tiukasti toisiinsa jo ennen kuormitusta.

3.2.2 Palikkavaarnapalkki

Palikallisen vaarnapalkin tekeminen ei poikkea valmistelevilta osiltaan hammastetusta vaarnapalkista. Asemoinnin jälkeen lankun korvaavat palikat. Tässä opinnäytetyössä palikat on tehty myös kuusesta ja ne on valmistettu melko tuoreesta puusta, rajallisista resursseista johtuen. Palikkana voisi käyttää kovempaa puulajia, ja kutistumisen seurauksena mahdollisesti syntyvän väljyyden välttämiseksi tulisi palikoiden olla kuivaa puutavaraa. Jos palikka tehdään kiilapariksi, kuivuudella ei ole niin isoa merkitystä, koska kiiloja voidaan kiristää. Se on kuitenkin suotavaa. Lankun sijaan valmistetaan tarvittava määrä suunnitellun koon mukaisia palikoita. Niiden tulee olla riittävän korkeita, jotta puristuspinnoista tulee sopivan syvä ja riittävä poikkipinta-alaltaan. Palikoiden väli tulee olla myös sopiva, ettei loveuksien välinen puu leikkaudu puun pitkästä suunnasta.

Yhdysvalloissa Ben Brungraperin ja Joe Millerin Michiganin teknillisessä yliopistossa tekemien tutkimusten ja havaintojen mukaan vaarnapalkki toimii tehokkaammin, jos palikoita on enemmän ja ne ovat suhteessa pienempiä kuin että ne olisivat isoja ja harvemmassa. Saman johtopäätöksen ovat tehneet vaarnapalkkeja aiemmin tutkineet henkilöt. On kuitenkin huomioitava, että vinoon asennettu palikka liian lyhyenä pyrkii kääntymään pystyyn, joten sen pituuden on oltava riittävä (Brungraber, Miller 2009).

Kun puut on asemoitu sopivalla raolla toisiinsa nähden, voidaan piirtää tarkkuushirsivaralla varausviivat. Varauksen tulee olla sopivan leveä puun leveyteen nähden. Varausviivojen avulla palikat asemoidaan sopivaan kaltevuuteen ja niille tehdään hienosäätö. Palikan alempi pystypinta täytyy upota kokonaan alempaan puuhun ja yläpinnan ylempään puuhun. Palikat eivät saa tällä tyylillä koskettaa yhdeltä pystypinnalta molempiin puihin samanaikaisesti, joten niiden säätäminen on tehtävä tarkasti. Kun palikat on asennettu oikein, sen alempi pinta siirretään alempaan puuhun ja ylempi pitkitäinen- ja pystypinta ylempään puuhun. Tämäkin tapahtuu tarkkuushirsivaraa käyttäen. Piirto on tehtävä suurella huolellisuudella, jotta vältetään piirtovirheitä ja väljältä liitokselta. Vaarnapalkin toiminta edellyttää tiukkoja liitoksia.



KUVA 27. Palikat asennettuna ja piirrettyä (Eskelinen 2015)

Kun palikoille tarvittavat loveuksetkin on piirretty, voidaan puut työstää. Palikoiden väliin tehdään tasavaraus ja niiden kohdalle porataan reiät kierretankoja varten. Työstö ei juurikaan poikkea hammastetusta vaarnapalkista. Palikat on syytä numeroida jotta vaarnapalkkia koottaessa ne tulee laitettua tarkalleen samoille paikoille, missä ne ovat olleet piirtovaiheessa. Tämä siksi, että niissä voi mahdollisesti olla pieniä eroja paksuuden ja pituuden suhteen. Ennen kokoamista loveukset on helppo tarkistaa palikoiden avulla, että ne asettuvat hyvin omille paikoilleen.



KUVA 28. Valmis loveus ja loveuksien välinen tasavaraus (Eskelinen 2015)



KUVA 29. Palikka vaarnapalkki lähes valmiina kokoamisvaiheessa (Eskelinen 2015)

Koottaessa vaarnapalkkia tarvitaan kuormaliinoja, jotta puut saadaan puristettua kiinni toisiinsa. Tämä on merkki siitä, että loveukset ovat onnistuneet, kuten kuvassa 30 näkyy.



KUVA 30. Hyvin pureutuva liitos loveuksen pystypinnoilla, mihin puristusvoimat kohdistuvat (Eskelinen 2015).

Kun kaikki loveukset ovat silmänmääräisesti onnistuneet, voidaan kierretangoille porata reiät ja aluslevyille upotukset. Kierretankojen asennuksen jälkeen vaarnapalkki on valmis.

3.2.3 Hammaslevyvaarnapalkki

Hammaslevyllinen vaarnapalkki on näistä kolmesta vaarnapalkista pelkistetyin ja yksinkertaisin, mutta liitoksien kapasiteetilta huonoin. Puut asemoidaan samalla tavalla ja tarkkuushirsivaralla piirretään varausviivat niin, että varauksen leveydestä tulee sopiva. Piirron jälkeen tehdään tasavaraus ja puut asennetaan paikoilleen. Tässä vaiheessa tarkistetaan, että puut istuvat hyvin toisiinsa nähdessä, kuten kuvassa 31 näkyy.



KUVA 31. Ulkoapäin katsottuna tasavarausta ei erota tavanomaisesta (Eskelinen 2015)

Tämän jälkeen voidaan kierretangoille merkata suunnitellut paikat ja ne voidaan porata. Toisin kuin aiemmissa vaarnapalkeissa joissa reiät porattiin kierretangoille hieman väljiksi, hammaslevyliitoksessa reikä saa olla 1 mm suurempi kuin itse kierretanko. Reikä porattiin saman kokoiseksi kuin kierretanko, mikä oli 16 mm (Puuinfo, hammasvaarnan kapasiteetti, 3).

Reikien porauksen jälkeen kierretangot katkaistaan sopivan pituisiksi, puut nostetaan irti toisistaan joko kokonaan tai sen verran, että hammaslevyt voidaan asentaa reikien kohdalle. Asennettaessa puita lopullisesti paikoilleen on syytä laittaa niiden väliin laudan tai lankun pala ja lyödä kierretangot reikiinsä, jotta puut ohjautuvat samaan asentoon missä ne on porattu ja koekäytetty. Hammaslevyen puretuessa puuhun niiden säätäminen ei enää onnistu.



KUVA 32. Hammaslevyt asennettuna alempaan puuhun (Eskelinen 2015)



KUVA 33. Hammaslevyllisen vaarnapalkin kokoaminen (Eskelinen 2015)

Kuvassa 33 puiden väliin on jätetty laudan pätkät jotta kierretangot saadaan lyötyä reikiinsä. Ne ohjaavat puut kohdalleen samaan asentoon, mitä ne oli koeasennuksen yhteydessä porattaessa. Kun kierretangot on saatu lyötyä reikiinsä, voidaan laudan palat poistaa. Tämän jälkeen kierretankoja

voidaan alkaa kiristämään. Siinä voidaan käyttää apuna kuormaliinoja ja puunuijaa. Hammaslevyt eivät kovin kevyesti pureudu täysin kokonaan puuhun. Puiden asemoinnin ja varauksen piirron yhteydessä, niiden päihin on piirretty pystyviivat keskilinjan mukaan. Niistä voidaan tarkistaa, että puut ovat asettuneet samaan asentoon kuin aiemmin.



KUVA 34. Vaarnapalkki onnistuttu asentamaan kohdalleen (Eskelinen 2015)

Kuvasta 34 nähdään, että keskilinjojen mukaiset pystyviivat ovat linjassa. Kuvasta voi nähdä myös tyven ja latvan välinen kokoero, vaikka palkin kokonaispituus on vain 5 metriä. Alemmasta puusta voi nähdä myös tukipintaa varten tehty tasapinta. Kun kierretangot ovat kiristetty, hammaslevyllinen vaarnapalkki on valmis.

4 LUONNONPYÖREÄN VAARNAPALKIN LASKENNALLINEN LUJUUS

4.1 Vaarnapalkkien mitoittaminen

Eurokoodin liitteessä B on määritetty mekaanisesti liitetyille palkeille yksinkertaistettu laskentakaava. Kaava perustuu efektiivisen kimmomoduulin ja jäyhyysmomentin $(EI)_{ef}$ laskentaan. Kaava on suunniteltu puikkoliittimin valmistettuihin liittopalkkeihin. Kyseisessä menetelmässä lasketaan γ -ker-toimella mekaanisesti liitetyn palkin $(EI)_{ef}$. Kertoimen laskemiseksi tarvitaan liittimien siirtymäker-toimet K_{ser} ja K_u . Kyseistä kaavaa voidaan käyttää vain jos palkit on liitetty toisiinsa tappivaar-noin, pultein, ruuvein tai nauloin.

TAULUKKO 1. Puikkoliittimien siirtymäkertoimien arvot (RIL 205-1 2009, 98).

Liitintyyppi	K_{ser} [N/mm]
Tappivaarnat	$\rho_m^{1,5}d/23$
Pultit ^a	
Ruuvit	
Naulat, kun puuhun esiporataan reikä	$\rho_m^{1,5}d^{0,8}/30$
Naulat ilman esiporausta	
^a Reiän välys on lisättävä pulttiliitoksen siirtymään	

Mekaanisesti liittimin koottujen palkkien yksinkertaistettu laskentamenetelmä perustuu seuraaviin olettamuksiin (RIL 205-1-2009, 138–139):

- palkit ovat vapaasti tuettuja jännevälin ollessa l
- yksittäiset osat ovat täysimittaisia tai sormijatkettuja
- osat kiinnitetään toisiinsa mekaanisin liittimin, joiden siirtymäkerroin on K
- liitinväli on vakio tai muuttuu leikkausvoiman mukaisesti välillä s_{min} ja s_{max} siten, että $s_{max} \leq 4s_{min}$
- kuorma aiheuttaa sinimuotoisen tai parabolisen momenttijakauman ja leikkausvoiman. (Jaaranen 2014, 30.)

Kun liitoksen jäykkyyttä ei voida määrittää laskennallisesti, lujuus- ja jäykkyysominaisuudet tulee selvittää kokeellisesti. Liitinjäykkyyden merkitys rakenteen jännitys jakaumaan ja muodonmuutoksiin on suuri, ja väärän arvon käyttö voi johtaa epävarmalla puolella oleviin tuloksiin rakennelaskelmissa. (Jaaranen 2014, 36.)

Eurokoodissa annettua menetelmää voidaan soveltaa tässä opinnäytetyössä vain hammaslevyillä ja kierretangoilla yhdistetyn palkin laskentaan, siinäkin huomioon otetaan periaatteessa vain kierre-tanko. Palikallisen ja hammastetun vaarnapalkin laskemiseen joudutaan soveltamaan muita menetel-miä. Niissäkin pyritään suorittamaan laskut yksinkertaistetusti. Lopputulosten avulla voidaan periaat-teessa ratkaista ”liitinjäykkyydet”. Tosin nekin eivät ole aivan totuuden mukaiset, koska puutavara

on tuoretta. Tuore puu on heikompaa kuin kuiva. Yksinkertaistuksen vuoksi murtorajatilan laskuissa palikallinen ja hammastettu vaarnapalkki oletetaan olevan täysin yhtenäiset.

Vuonna 1960 julkaistussa saksalaisessa puurakenteiden suunnitteluoppaassa on käsitelty sahatavara-rasta valmistettujen vaarnapalkkien mitoittamista melko laajasti. Kuvassa 36 nähdään leikkausjännityksen jakauma palkin poikkileikkauksessa. Ylimpänä yhtenäinen palkki, keskellä kaksi erillistä palkkia ja alimpana vaarnapalkki. Kuvassa 35 on havainnollistettu palkin päähän syntyvää liukumaa. Siinäkin ylimpänä on yhtenäinen palkki, keskellä kaksi erillistä palkkia päällekkäin ja alimpana vaarnapalkki.

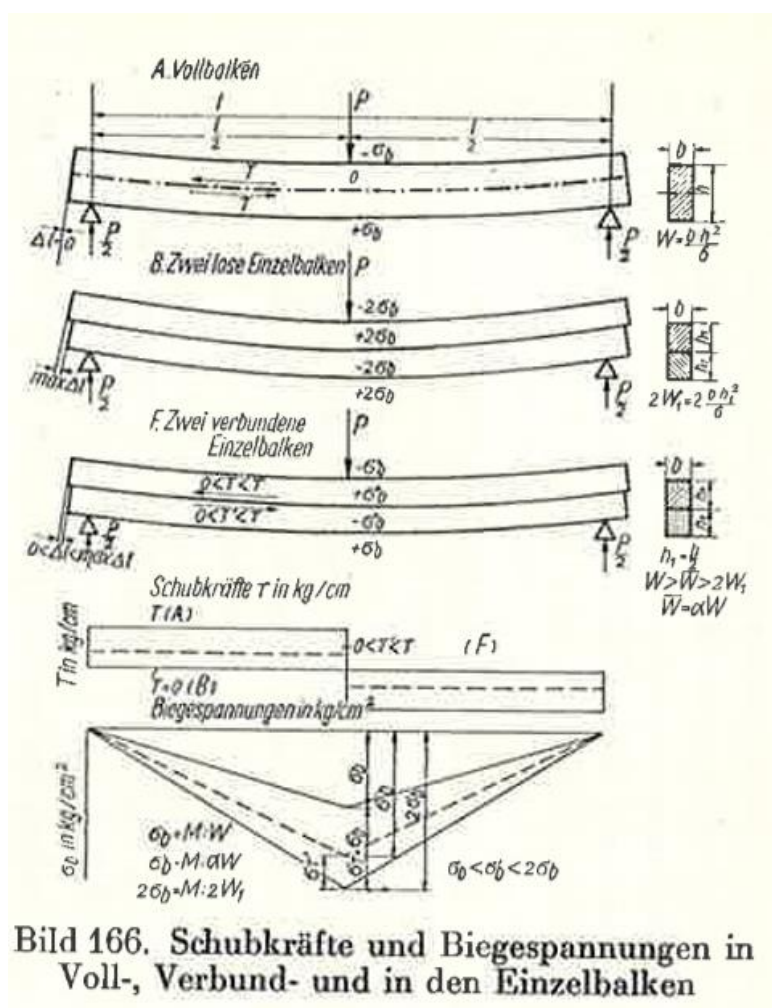


Bild 166. Schubkräfte und Biegespannungen in Voll-, Verbund- und in den Einzelbalken

KUVA 35. Kuvassa näkyy palkkien välinen liukuma, sekä leikkaus- ja momenttikuvio kun pistekuorma on palkin keskipisteessä (Fonrobert, Stoy & Dröge, 161, 1960).

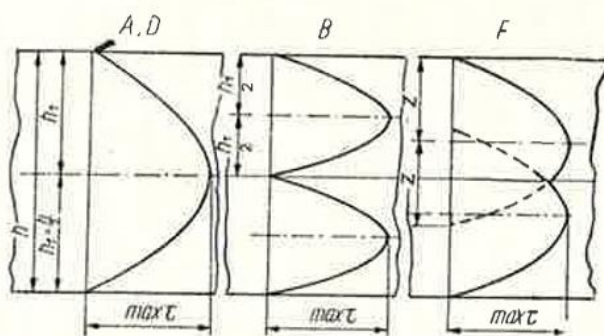


Bild 169. Schubspannungen im Voll-, in den Einzel- und im Verbundbalken

KUVA 36. Leikkausjännityksen jakauma kolmella eri tapauksella (Fonrobert, Stoy & Dröge, 161, 1960)

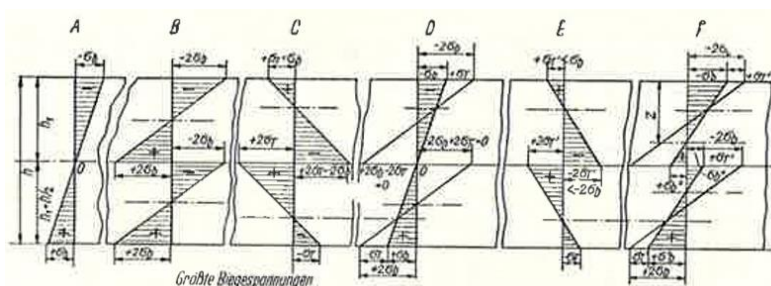


Bild 167. Biegespannungen im Voll- und Verbundbalken

- A = Spannungsfläche für den Vollbalken
- B = Spannungsflächen für den Einzelbalken (Belastung mit P)
- C = Spannungsflächen für den Einzelbalken (Belastung mit $T \cdot l/2$)
- D = Spannungsfläche für den vollkommenen Verbundbalken
- E = Spannungsflächen für die Einzelbalken (Belastung mit $T' \cdot l/2$)
- F = Spannungsflächen für den unvollkommenen Verbundbalken

KUVA 37. Palkkien sisäiset puristus- und vetojännityskurven (Fonrobert, Stoy & Dröge, 161, 1960)

Kuvassa 37 kohta A on normaalin palkin puristus- und vetojännityskurven. Kohdassa B on kaksi erillistä päällekkäin olevaa palkkia. D ja F ovat vaarnapalkkeja, joissa kohdassa D on täydellisesti yhtenäinen palkki ja kohdassa F ei täysin yhtenäisesti toimiva palkki.

Teoksessa käydään läpi vaarnapalkkien mitoittamista. Kielitaidon puutteen vuoksi siitä saatu hyöty jäi hieman vajaaksi, mutta mitoitus tapa siitä osittain selvisi. Mitoittamisessa lasketaan leikkausvoimasta syntyvä työntövoima. Tälle voimalle mitoitetään palkkien väliin laitettavat puupalikat. Kirjan esimerkissä kuormituksena on tasainen kuorma, jolloin leikkausjännitys on suurimmillaan tuella. Palkkien jakoväli pienenee tuelle päin. Koska pistekuorman leikkausjännitys on tasainen, opinnäytetyössä valmistetuissa vaarnapalkeissa käytetään tasaista jakoa. Hammaslevyllinen vaarnapalkki mitoitetään eurokoodin B liitteen menetelmää käyttäen, mutta palikallinen ja hammastettu vaarnapalkki mitoitetään käyttäen edellä mainitun kirjan mitoitus tapaa, koska eurokoodin menetelmää ei niissä pysty soveltamaan. Eurokoodin mukaan mekaanisesti koottujen palkkien taipuma lasketaan myös käyttäen saatua $(EI)_{ef}$ arvoa taipuman kaavassa. Palikallisen ja hammastetun vaarnapalkin $(EI)_{ef}$ pyritään ratkaisemaan tuloksista saatujen taipumien avulla. Haasteena siinä on se, että tuoreen puun kimmokertoimen arvo on huomattavasti pienempi kuin kuivan puun. Lujuusluokan C30

kimmokerroin on $12\ 000\text{N/mm}^2$. Tuoreella puulla se voi olla vain 60 - 70 % siitä, joten laskuissa on arvioitava pienempi arvo kimmokertoimelle. Kimmokerroin olisi ollut mahdollista selvittää kokeellisesti jos jokaisen vaarnapalkin yksittäinen puu olisi testattu erikseen. Tällä kertaa se ei ollut mahdollista. Luonnonpyöreän puun ja sahatavaran välillä ei ole huomattavaa eroa kimmokertoimessa.

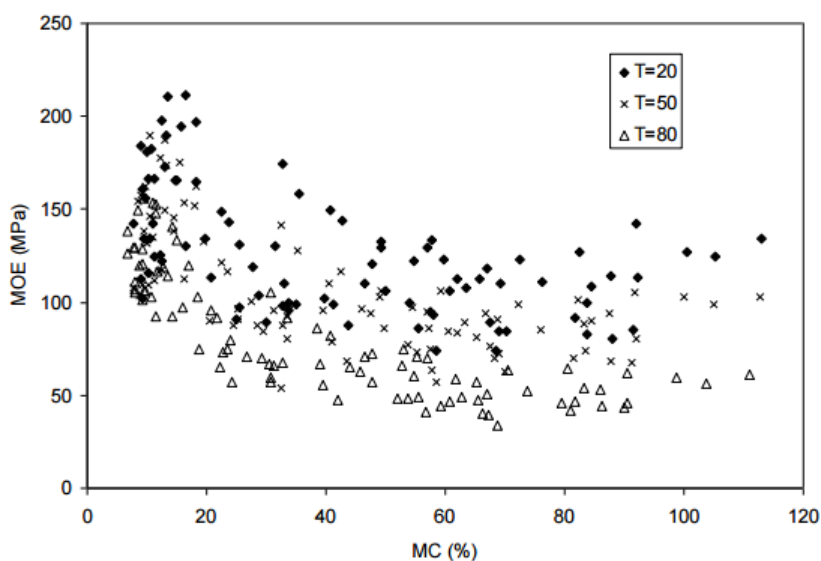
TAULUKKO 2. Pyöreän puun (Log) ja sahatavaran (Lumber) välinen kimmokertoimen ero (Ross, McDonald, Green, Schad, 91, 1997).

TABLE 2. — MOE of balsam fir and eastern spruce logs and individual lumber specimens.^a

Species and visual log grade	MOE of log		MOE of lumber	
	Average	Minimum-Maximum	Average	Minimum-Maximum
----- (× 10 ⁶ psi) -----				
Balsam fir				
1	--	--	--	--
2	1.56	1.19-2.20	1.87	1.24-2.92
3	1.37	0.96-1.79	1.72	1.00-2.80
4	1.56	1.30-1.83	1.71	1.47-1.98
Eastern spruce				
1	1.52	1.13-2.31	1.69	0.90-2.40
2	1.49	1.18-1.81	1.71	1.03-2.65
3	1.34	0.91-1.93	1.47	0.68-2.35
4	1.21	1.10-1.39	1.36	0.99-2.06

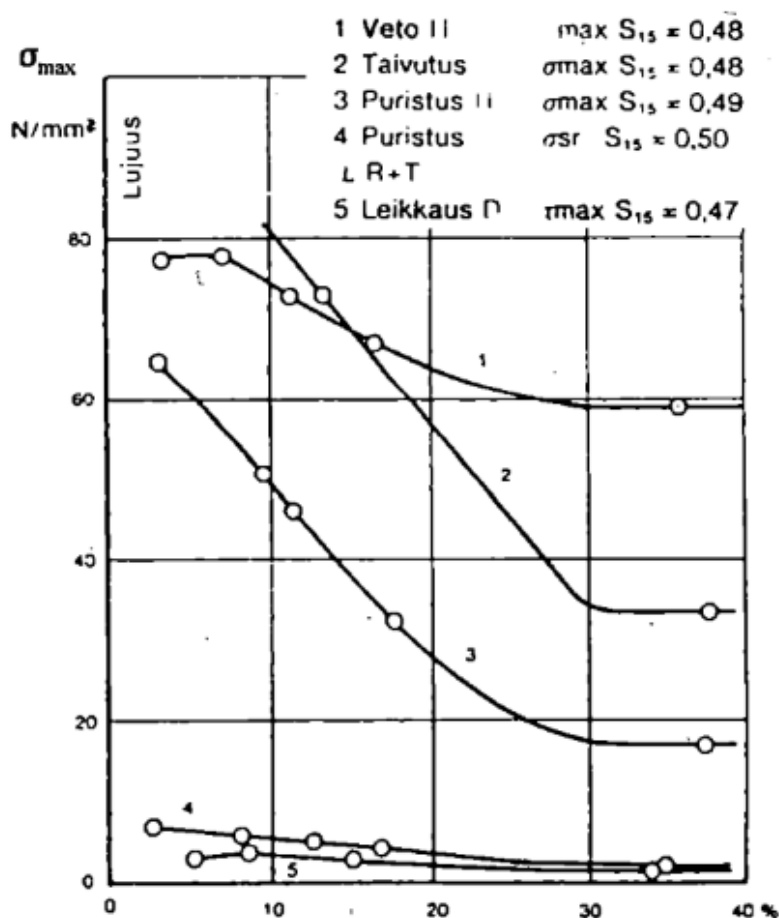
^a 1 psi = 6.894×10^6 GPa.

Taulukon 2 mukaan sahatavaran kimmokerroin on jopa hieman korkeampi, kuin pyöreän puun. Ero on kuitenkin niin pieni, ettei sitä juuri tarvitse ottaa huomioon. Kuviossa 1 näkyy puun kosteuden ja lämpötilan vaikutus puun kimmokertoimeen. Tästä voidaan kuitenkin tehdä sellainen johtopäätös, että verrattaessa tuoreen ja kuivan puutavaran kimmokertoimen keskimääräistä eroa, voidaan samaa suhdetta käyttää pyöreän puun kimmokerrointa arvioitaessa, vaikka testit on tehty sahatavaraalle.



KUVIO 1. Kimmokertoimen muutos puun kosteuspiitoisuuden ja lämpötilan muuttuessa (Ekevad, Axelsson, 7, 2012).

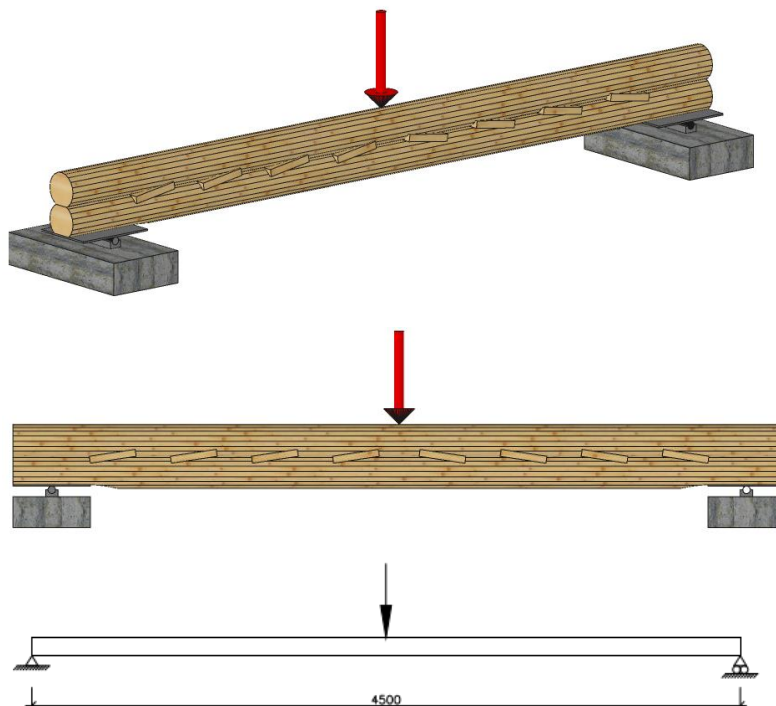
Kimmokerroin on melko tasainen ja vakaa puun kosteuspitoisuuden ollessa kyllästymispisteen yläpuolella, mikä on noin 30 %. Kun puu on kuivempaa kuin 30 %, sen kimmokerroin alkaa paranemaan, kuten myös lujuus. Mustat pisteet ovat mitattu +20 °C lämpötilassa. Niiden keskimääräinen muutos on noin 110MPa:sta keskimäärin 180MPa:iin. Jolloin prosentuaalisesti tuoreen puun kimmokerroin on noin 61 % kuivan puun kimmokertoimesta. Ennen koetta vaarnapalkkien kosteus mitattiin piikkimittarilla noin 20 mm syvyydestä. Jolloin tulos vaihteli 33 - 36 % välillä. Tarkemmat kosteusmittaukset suoritettiin kokeen jälkeen uunikuivauksen avulla. Vaarnapalkit olivat kuitenkin koetilanteen aikaan täysin tuoreita, vielä kyllästymispisteen yläpuolella, jolloin niiden kimmokerroin ja lujuus on ollut huomattavasti alhaisempi kuin kuivan puun. Kuviossa 2 nähdään puun lujuuden kehittyminen puun kuivuessa.



KUVIO 2. Kosteuden vaikutus puun lujuuteen virheettömässä männyssä (Pihlajamaa, Jantunen, 35, 1995)

Käyrästä 1-3 nähdään kuinka puun veto- taivutus- ja puristuslujuus alkaa paranemaan voimakkaasti kun puun kyllästymispiste alittuu. Normaalin ulkokuivan puutavaran kosteudessa, mikä on noin 12 – 15 %, se on huomattavasti lujempaa. Puristuslujuus on taivutus- ja vetolujuutta huomattavasti heikompi, joten voi olla odotettua, että kokeessa vaarnapalkkien puristuslujuus ylittyy mahdollisesti ensimmäisenä. Vaarnapalkkien tuoreutta ei oteta huomioon murtorajatilan lujuuslaskuissa. Kosteus otetaan tietenkin huomioon analysoitaessa kokeen tuloksia ja verrattaessa niitä laskuihin. Vaarnapalkin taipumassa on otettava huomioon kimmokertoimen heikompi arvo.

Vaarnapalkit kuormitettiin kolmipiste kuormituksella. Tällöin palkin keskelle tulee pistekuorma. Tukipisteiden jänneväli oli 4500mm. Toisessa päässä palkkia on nivelletty tukipinta ja toisessa rullallinen tukipinta.



KUVA 38. Palikallinen vaarnapalkki mallinnettuna Cadwork-ohjelmalla ja sen staattinen malli (Eskelinen 2016)

4.1 Palikkavaarnapalkin mitoittaminen

Lähtötiedot:

Koska vaarnapalkit ovat luonnonpyöreitä ja ne kapenevat luontaisesti tyveltä latvaa kohti, käytetään poikkileikkauksen kokona palkin keskeltä keskimääräistä kokoa. Mikä on käytännössä latvan ja tyven koon keskiarvo. Vaarnapalkki oletetaan olevan täysin yhtenäinen murtorajatilan laskuissa yksinkertaisuuden vuoksi.

Poikkileikkaus:

Poikkileikkauksen ja loveuksen pystypinnan pinta-alan saamiseksi on käytetty AutoCADⁱⁿ toimintoja Area tai Massprop.

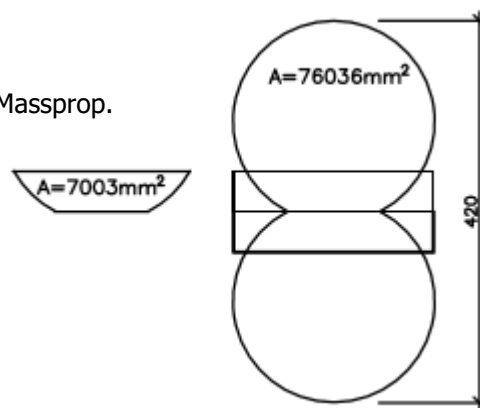
Poikkileikkauksen pinta-ala $A = 76036\text{mm}^2$

Jäyhyysmomentti $I = 998\,874\,093\text{mm}^4$

Korkeus $h = 420\text{mm}$

Leveys $b = 220\text{mm}$

Loveuksen pystypinnan pinta-ala $A = 7003\text{mm}^2$



Materiaali:

Luonnonpyöreä kuusi, lujuusluokka C30

Aikaluokka: Hetkellinen (alle 10 minuuttia)

→ $K_{\text{mod}} = 1,1$

Osavarmuusluku $\gamma_M = 1,4$

Lujuus ja jäykkyysominaisuudet

Suunnittelulujuuden kaava on $X_d = \frac{X_k}{\gamma_M}$ (1)

	Ominaislujuus	Suunnittelulujuus
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 23,6 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus:	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 3,14 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus 90° :	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,12 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus 0° :	$f_{c,0,k} = 23,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 18,0 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus 0° :	$f_{t,0,k} = 18,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,0,d} = 14,14 \text{ N/mm}^2$

Mitoitetaan vaarnapalkki maksimi taivutusjännityksen mukaan, jolloin lasketaan 100% käyttöastetta vastaava taivutusjännityksen voima. Pistekuorman momentti lasketaan kaavalla:

$$M = \frac{FL}{4} \quad (2)$$

Suurin sallittu jännitys on

$$\sigma_{sall} = \frac{M}{W} = \frac{M}{I} * y = \frac{FL}{I} * y, \quad (3)$$

missä y = palkin yläpinnan etäisyys vaarnapalkin neutraaliakseliin.

$$\rightarrow F = \frac{\sigma_{sall} * I * 4}{L * y_0}, \text{ missä } \sigma_{sall} = 23,6 \text{ N/mm}^2$$

$$F = \frac{23,6 \text{ N/mm}^2 * 998\,874\,093 \text{ mm}^4 * 4}{4500 \text{ mm} * 210 \text{ mm}} = 99,8 \text{ kN}$$

Leikkausvoima

$$V_d = \frac{F}{2} = \frac{99,8kN}{2} = 49,89kN \quad (4)$$

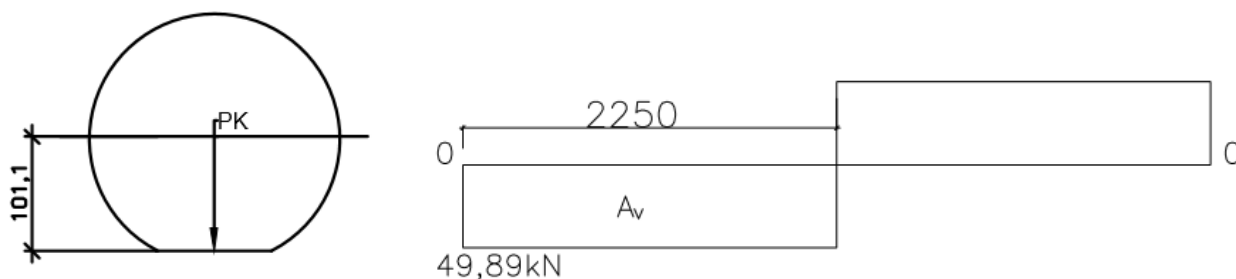
Vaarnapalkin keskisaumaan syntyvä työntövoima

$$T = \frac{S}{I} * A_v, \quad (5)$$

missä S = staattinen momentti ja A_v = leikkausvoiman pinta-ala

$$S = A_1 * pk, \quad (6)$$

missä pk = ylemmän puun pintakeskiö, mikä saadaan AutoCAD massprop toiminnolla.



$$S = \frac{76\,036mm^2}{2} * 101,1mm = 3\,843\,619,8mm^3$$

$$A_v = 49,89 * 10^3 N * 2250mm = 112\,252\,500Nmm$$

$$T = \frac{3\,843\,619,8mm^3}{998\,874\,093mm^3} * 112\,252\,500Nmm = 431\,740N = 431,7kN$$

Loveuksien määrä on 4 kappaletta, joten yhdelle palikalle/lovelle tuleva puristusvoima on

$$\frac{431,7kN}{4} = 107,9kN$$

Loveuksen mitoittamiseen sovelletaan Keski-Euroopassa käytettävää eurokoodin kansallista liitettä DIN 1052 ja RIL 205-1-2009 liitteen B kaavaa 5.1. Eurokoodissa itsessään ei ole suunnitteluohjetta kirvesmiesliitoksille, joten ne ovat kansallisissa liitteissä. Ohjeessa on mitoitussehtoja erilaisten puulii-
tosten kestävyydelle.

Stirnversatz (Stirn rechtwinklig zur Stabachse)

Nachweise nach DIN 1052

- Druckspannungen in der Strebe

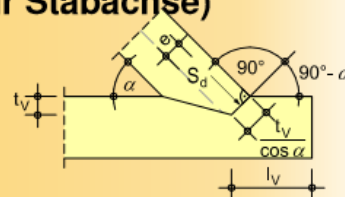
$$\frac{S_d}{b \cdot h \cdot f_{c,0,d}} + \frac{M_{y,d}}{\left(\frac{b \cdot h^2}{6}\right) \cdot f_{m,d}} \leq 1$$

$$M_{y,d} = S_d \cdot 0,5 \cdot \left(h - \frac{t_v}{\cos \alpha} \right)$$

- Abscheren des Vorholzes

$$\frac{S_d \cdot \cos \alpha}{b \cdot l_v \cdot f_{v,d}} \leq 1$$

$$20 \text{ cm} < l_v \leq 8 \cdot t_v$$



S_d	Bemessungswert der Druckkraft [N]
$M_{y,d}$	Exzentrizitätsmoment [Nmm]
α	Innenwinkel unter dem sich beide Stäbe treffen
l_v	Vorholzlänge [mm]
b	Breite der Strebe [mm]
h	Höhe der Strebe [mm]
$f_{v,d}$	Bemessungswert der Schubfestigkeit [N/mm ²]
$f_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm ²]
$f_{m,d}$	Bemessungswert der Biegefestigkeit [N/mm ²]

KUVA 39. Leikkauspituuden l_v mitoitusohje (DIN 1052 Zimmermannmäßige Verbindungen)

Stirnversatz (Stirn rechtwinklig zur Stabachse)

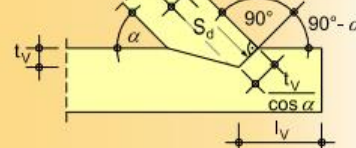
Nachweise nach DIN 1052

- Druckspannungen im Versatzboden

$$\frac{S_d \cdot \cos \alpha}{b \cdot t_v \cdot f_{c,\alpha,d}} \leq 1$$

$$t_v \leq \begin{cases} h/4 & \text{für } \alpha \leq 50^\circ \\ h/6 & \text{für } \alpha > 60^\circ \end{cases}$$

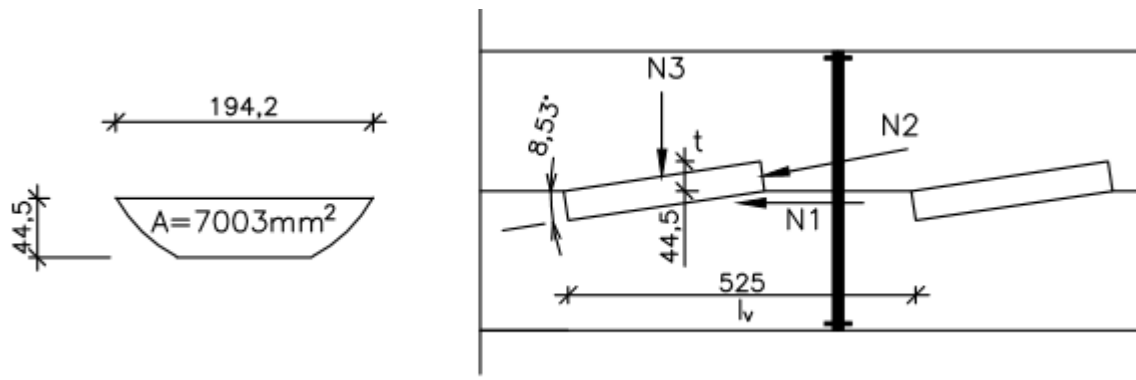
$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{2 \cdot f_{c,90,d}} \cdot \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{2 \cdot f_{v,d}} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha\right)^2 + \cos^4 \alpha}}$$



S_d	Bemessungswert der Druckkraft [N]
α	Innenwinkel unter dem sich beide Stäbe treffen
t_v	Einschnitttiefe [mm]
b	Breite der Strebe [mm]
h	Höhe der Strebe [mm]
$f_{c,0,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit in Faserrichtung [N/mm ²]
$f_{c,\alpha/2,d}$	Bemessungswert der Druckfestigkeit im Winkel $\alpha/2$ zur Faser [N/mm ²]

KUVA 40. Liitoksen puristuskestävyyden mitoitusohje ja vähimmäisarvo loveuksen syvyydelle (DIN 1052 Zimmermannmäßige Verbindungen)

Loveuksen ja palikoiden kestävyys



$$N1 = 107,9 \text{ kN}$$

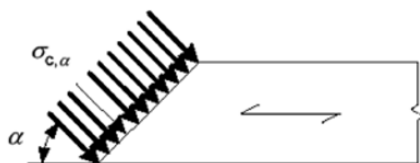
$$N2 = \frac{107,9 \text{ kN}}{\cos 8,53} = 109,1 \text{ kN}$$

$$l_v = 525 \text{ mm}$$

$$t_v = 44,5 \text{ mm}$$

$$b = 194,2 \text{ mm}$$

Eurokoodissa on mitoitusehto syysuuntaan kulmassa vaikuttavan voiman mitoittamiseksi.



KUVA 41. Syysuuntaan nähden vinosti vaikuttavat puristusjännitykset (RIL 205-1-2009).

Jonka kaava on (RIL 205-1-2009 liite B 5.1)

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq \frac{f_{c,0,d}}{\frac{f_{c,0,d}}{K_{c,90} * f_{c,90,d}} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}, K_{c,90} = 1 \quad (7)$$

Vastaava kaava DIN 1052 on

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{f_{c,0,d}}{\sqrt{\left(\frac{f_{c,0,d}}{2 * f_{c,90,d}} * \sin^2 \alpha\right)^2 + \left(\frac{f_{c,0,d}}{2 * f_{v,d}} * \sin \alpha^2 \cos \alpha^2\right)^2 + \cos^4 \alpha}} \quad (8)$$

Joista muutetuiksi lujuuksiksi saadaan

RIL 2015-1-2009 kaavan 5.1 mukaan:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{18 \text{ N/mm}^2}{\frac{18 \text{ N/mm}^2}{2,12 \text{ N/mm}^2} * \sin^2 8,53^\circ + \cos^2 8,53^\circ} = 15,45 \text{ N/mm}^2$$

DIN 1052 mukaan:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{18N/mm^2}{\sqrt{\left(\frac{18N/mm^2}{2*2,12N/mm^2} \sin^2 8,53^\circ\right)^2 + \left(\frac{18N/mm^2}{2*3,14N/mm^2} \sin 8,53^\circ \cos 8,53^\circ\right)^2 + \cos^4 8,53^\circ}} = 16,84N/mm^2$$

Puristusjännitys RIL 205-1-2009 kaavan 5.1 mukaan

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_2}{A_{loveus}} = \frac{109,1*10^3N}{7003N/mm^2} = 15,57N/mm^2$$

RIL 205-1-2009 kaavan 5.1 mukainen mitoitusehto

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq f_{c,\alpha,d} = \frac{15,57N^2}{mm} \leq \frac{15,45N^2}{mm}, \text{ käyttöaste } 100,7 \%, \text{ mikä ylittyy hieman.}$$

DIN 1052 mukainen mitoitusehto

$$\frac{S_d * \cos \alpha}{b * t_v * f_{c,\alpha,d}} \leq 1, \text{ missä } b * t_v = A_{loveus} \text{ ja } S_d = N_2$$

$$\frac{109,1kN * \cos 8,53^\circ}{7003mm^2 * 16,84N/mm^2} = 0,914 \leq 1, \text{ Käyttöaste } 91,5 \%$$

Tuloksissa on pieni ero toisiinsa nähden. Kuitenkin taivutusjännityksen 100 %:lla käyttöasteella 4 loveusta/palikkaa on riittävä määrä.

Loveuksen leikkauskestävyyden mitoitusehto DIN 1052 mukaan on

$$\frac{S_d * \cos \alpha}{b * l_v * f_{v,d}} \leq 1 \tag{9}$$

$$\frac{109,1*10^3N * \cos 8,53^\circ}{194,2mm * 525mm * 3,14N/mm^2} = 0,337 \leq 1, \text{ Käyttöaste } 33,7 \%$$

Leikkausvoimakestävyys yksittäiselle palkille:

Leikkausjännitys on=

$$\tau_d = \frac{V_d}{A} = \frac{49,89 \cdot 10^3 N}{\frac{76036 \text{ mm}^2}{2}} = 1,31 N/\text{mm}^2 \quad (10)$$

Mitoitusehto

$$\tau_d \leq V_d = 1,31 N/\text{mm}^2 \leq 3,14 N/\text{mm}^2, \text{ Käyttöaste } 41,8 \% \text{ OK}$$

Puristusvoimakestävyys yksittäiselle palkille:

Momentin aiheuttama puristusjännitys ylemmässä puussa on

$$\sigma_c = \frac{M_d}{I} * y_0 \quad (11)$$

$$M_d = \frac{FL}{4} = \frac{99,8 \cdot 10^3 N \cdot 4500 \text{ mm}}{4} = 112\,275\,000 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_c = \frac{112\,275\,000 \text{ Nmm}}{998\,874\,093 \text{ mm}^4} * 210 \text{ mm} = 23,6 N/\text{mm}^2$$

Mitoitusehto $\sigma_c \leq f_{0,d}$ ei toteudu, käyttöasteeksi tulee $\frac{23,6 N/\text{mm}^2}{18,0 N/\text{mm}^2} * 100 \% = 131,1 \%$

Momentin aiheuttamalle puristukselle 100%:lle käyttöasteelle vastaava pistekuorma on

$$F = \frac{18 N/\text{mm}^2 * 998\,874\,093 \text{ mm}^4 * 4}{4500 \text{ mm} * 210 \text{ mm}} = 76\,104,7 N = 76,1 kN$$

Vaarnapalkin puristuskestävyys näyttäisi muodostuvan mitoittavaksi tekijäksi. Lasketaan taipuma kyseiselle voimalle.

Käyttörajatila

Käyttörajatilassa taipuman kaava keskeiselle pistekuormalle on

$$W = \frac{P * L^3}{48 * EI} \quad (12)$$

Lujuusluokan C30 kimmokerroin on $12\,000\text{N/mm}^2$, koska puu on tuore ja kosteuspiitoisuus $>30\%$ käytetään kimmokertoimelle pienempää arvoa. Kimmokerrointa pienennetään kertoimella 0,6 joka on saatu kuvion 1 arvoista. Tällöin arvioitu kimmokerroin on

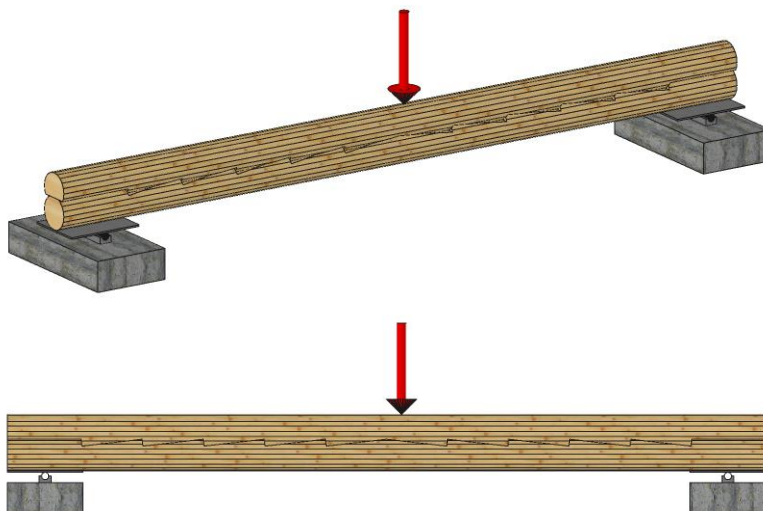
$$E = 0,6 * 12000\text{N/mm}^2 = 7200\text{N/mm}^2$$

Laskennallinen taipuma on

$$W = \frac{76,1 * 10^3\text{N} * 4500^3\text{mm}}{48 * 7200\text{N/mm}^2 * 998\,874\,093\text{mm}^4} = 20,1\text{mm}$$

Todennäköisesti taipuma on todellisuudessa hieman laskennallista taipumaa suurempi, koska vaarnapalkki on laskennallisesti oletettu täysin yhtenäiseksi, mitä se ei todellisuudessa täysin ole. Tulosten perusteella voidaan arvioida vaarnapalkille efektiivistä jäyhyysmomentin arvoa I_{ef} . Tulokset ovat kuitenkin suuntaa antavia, koska kimmokertoimelle kokeen kannalta tulisi mitata tarkka arvo.

4.2 Hammastetun vaarnapalkin mitoittaminen



KUVA 42. Hammastettu vaarnapalkki mallinnettuna Cadwork-ohjelmalla (Eskelinen 2016)

Lähtötiedot:

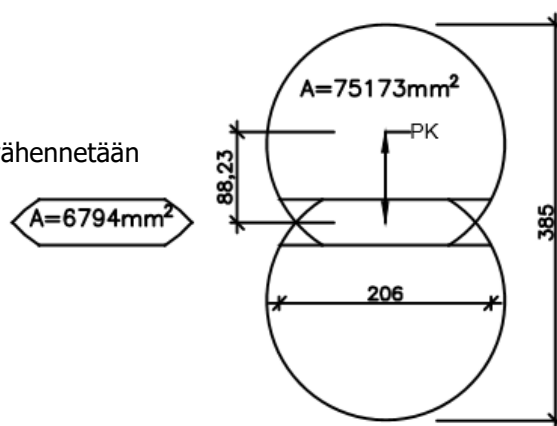
Poikkileikkaus:

Hammastuksen osalta liitoksien limittyvät osat vähennetään poikkileikkauksesta.

Poikkileikkauksen pinta-ala $A = 75\,173\text{mm}^2$

Jäyhyysmomentti $I = 776\,902\,380\text{mm}^4$

Korkeus $h = 385\text{mm}$



Leveys $b = 230\text{mm}$

Loveuksen pystypinnan pinta-ala $A = 6794\text{mm}^2$

Materiaali:

Luonnonpyöreä kuusi, lujuusluokka C30

Aikaluokka: Hetkellinen (alle 10 minuuttia)

→ $K_{\text{mod}} = 1,1$

Osavarmuusluku $\gamma_M = 1,4$

	Ominaislujuus	Suunnittelulujuus
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 23,6 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus:	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 3,14 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus 90° :	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,12 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus 0° :	$f_{c,0,k} = 23,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 18,0 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus 0° :	$f_{t,0,k} = 18,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,0,d} = 14,14 \text{ N/mm}^2$

Suurimman sallitun taivutusjännityksen mukainen pistekuorma.

$$F = \frac{23,6 \text{ N/mm}^2 * 776 \text{ 902 } 380 \text{ mm}^4 * 4}{4500 \text{ mm} * 192,5 \text{ mm}} = 84,6 \text{ kN}$$

Leikkausvoima

$$V_d = \frac{F}{2} = \frac{99,8 \text{ kN}}{2} = 42,3 \text{ kN}$$

Vaarnapalkin keskisaumaan syntyvä työntövoima T on

$$S = \frac{75 \text{ 173 mm}^2}{2} * 88,23 \text{ mm} = 3 \text{ 316 } 418,5 \text{ mm}^3$$

$$A_v = 42,3 * 10^3 \text{ N} * 2250 \text{ mm} = 95 \text{ 175 } 000 \text{ Nmm}$$

$$T = \frac{3 \text{ 316 } 418,5 \text{ mm}^3}{776 \text{ 902 } 380 \text{ mm}^3} * 95 \text{ 175 } 000 \text{ Nmm} = 406,3 \text{ kN}$$

Loveuksien määrä on 4 kappaletta, joten yhdelle palikalle/lovelle tuleva puristusvoima on

$$\frac{406,3 \text{ kN}}{5} = 81,26 \text{ kN}$$

Hammastuksen kestävyys

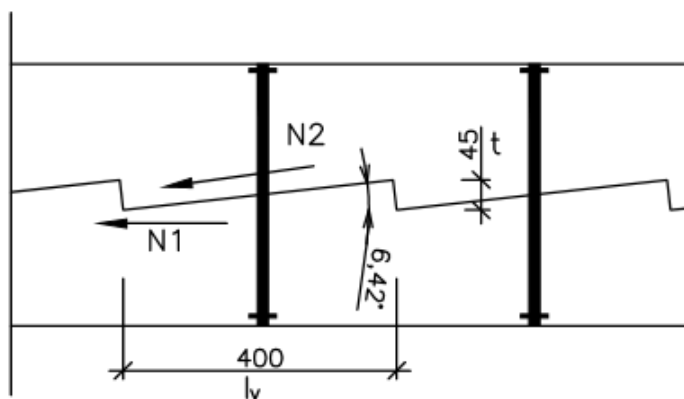
$$N1 = 81,26kN$$

$$N2 = \frac{81,26kN}{\cos 6,42^\circ} = 81,8kN$$

$$l_v = 400mm$$

$$t_v = 45mm$$

$$b = 206,0mm$$



Hammastuksen pystypintojen muutettu lujuus

RIL 2015-1-2009 kaavan 5.1 mukaan:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{18N/mm^2}{\frac{18N/mm^2}{2,12N/mm^2} \cdot \sin^2 6,42^\circ + \cos^2 6,42^\circ} = 16,45N/mm^2$$

DIN 1052 mukaan:

$$f_{c,\alpha,d} = \frac{18N/mm^2}{\sqrt{\left(\frac{18N/mm^2}{2 \cdot 2,12N/mm^2} \cdot \sin^2 6,42^\circ\right)^2 + \left(\frac{18N/mm^2}{2 \cdot 3,14N/mm^2} \cdot \sin 6,42^\circ \cdot \cos 6,42^\circ\right)^2 + \cos^4 6,42^\circ}} = 17,32N/mm^2$$

Puristusjännitys RIL 205-1-2009 kaavan 5.1 mukaan

$$\sigma_{c,\alpha,d} = \frac{N_2}{A_{loveus}} = \frac{81,8 \cdot 10^3 N}{6794N/mm^2} = 12,04N/mm^2$$

RIL 205-1-2009 kaavan 5.1 mukainen mitoitusehto

$$\sigma_{c,\alpha,d} \leq f_{c,\alpha,d} = \frac{12,04N^2}{mm} \leq \frac{16,45N^2}{mm}, \text{ käyttöaste } 73,2 \%$$

DIN 1052 mukainen mitoitusehto

$$\frac{81,8kN \cdot \cos 6,42^\circ}{6794mm^2 \cdot 17,32N/mm^2} = 0,690 \leq 1, \text{ Käyttöaste } 69,0 \%$$

Loveuksen leikkauskestävyyden mitoitusehto DIN 1052 mukaan on

$$\frac{S_d \cdot \cos \alpha}{b \cdot l_v \cdot f_{v,d}} \leq 1$$

$$\frac{81,8,1 \cdot 10^3 N \cdot \cos 6,42^\circ}{206 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm} \cdot 3,14 \text{ N/mm}^2} = 0,314 \leq 1, \text{ Käyttöaste } 31,4 \%$$

Leikkausvoimakestävyys yksittäiselle palkille:

Leikkausjännitys on

$$\tau_d = \frac{V_d}{A} = \frac{42,3 \cdot 10^3 N}{\frac{75 \cdot 173 \text{ mm}^2}{2}} = 1,125 \text{ N/mm}^2$$

Mitoitusehto

$$\tau_d \leq V_d = 1,125 \text{ N/mm}^2 \leq 3,14 \text{ N/mm}^2, \text{ Käyttöaste } 35,8 \%$$

Puristusvoimakestävyys yksittäiselle palkille:

Momentin aiheuttama puristusjännitys ylemmässä puussa on

$$\sigma_c = \frac{M_d}{I} \cdot y_0$$

$$M_d = \frac{FL}{4} = \frac{84,6 \cdot 10^3 N \cdot 4500 \text{ mm}}{4} = 95 \, 175 \, 000 \text{ Nmm}$$

$$\sigma_c = \frac{95 \, 175 \, 000 \text{ Nmm}}{998 \, 874 \, 093 \text{ mm}^4} \cdot 192,5 \text{ mm} = 23,58 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Mitoitusehto } \sigma_c \leq f_{c,0,d} \text{ ei toteudu, käyttöasteeksi tulee } \frac{23,58 \text{ N/mm}^2}{18,0 \text{ N/mm}^2} \cdot 100\% = 131,0 \%$$

Momentin aiheuttamalle puristukselle 100%:lle käyttöasteelle vastaava pistekuorma on

$$F = \frac{18 \text{ N/mm}^2 \cdot 776 \, 902 \, 380 \text{ mm}^4 \cdot 4}{4500 \text{ mm} \cdot 192,5 \text{ mm}} = 64 \, 573,7 \text{ N} = 64,6 \text{ kN}$$

Vaarnapalkin puristuskestävyys näyttäisi muodostuvan mitoittavaksi tekijäksi. Lasketaan taipuma kyseiselle voimalle.

Käyttörajatila

Käyttörajatilassa taipuman kaava keskeiselle pistekuormalle on

$$W = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot EI}$$

$$E = 0,6 \cdot 12000 \text{ N/mm}^2 = 7200 \text{ N/mm}^2$$

Laskennallinen taipuma on

$$W = \frac{64,6 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 4500^3 \text{ mm}}{48 \cdot 7200 \text{ N/mm}^2 \cdot 776\,902\,380 \text{ mm}^4} = 21,9 \text{ mm}$$

4.3 Hammaslevyvaarnapalkin mitoittaminen

Lähtötiedot:

Poikkileikkaus:

Poikkileikkauksen pinta-ala $A = 69\,243 \text{ mm}^2$

Poikkileikkauksen pinta-ala $A_1 = A_2 = 34\,621,5 \text{ mm}^2$

Jäyhyysmomentti $I_{\text{tot}} = 823\,545\,519 \text{ mm}^4$

Jäyhyysmomentti $I_1 = I_2 = 91\,652\,461 \text{ mm}^4$

Korkeus $h_{\text{tot}} = 400 \text{ mm}$

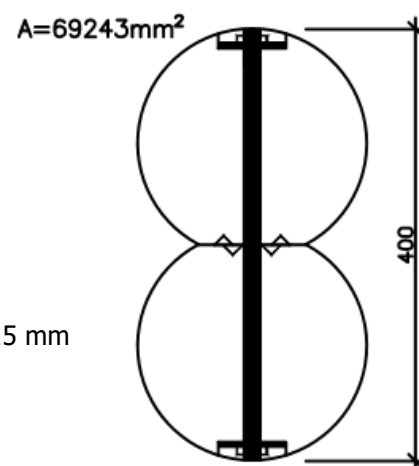
Leveys $b = 210 \text{ mm}$

Ylemmän puun pintakeskiön etäisyys neutraaliakseliin $a = 96,15 \text{ mm}$

Kierretanko M16 (8.8) $d = 16 \text{ mm}$

Aluslevyt = 54x3 mm

Hammaslevyn koko $d_c = 62 \text{ mm}$, kaksipuoleinen



Materiaali:

Luonnonpyöreä kuusi, lujuusluokka C30

Aikaluokka: Hetkellinen (alle 10 minuuttia)

→ $K_{\text{mod}} = 1,1$

Osavarmuusluku $\gamma_M = 1,4$

	Ominaislujuus	Suunnittelulujuus
Taivutuslujuus:	$f_{m,k} = 30 \text{ N/mm}^2$	$f_{m,d} = 23,6 \text{ N/mm}^2$
Leikkauslujuus:	$f_{v,k} = 4,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{v,d} = 3,14 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus 90° :	$f_{c,90,k} = 2,7 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,90,d} = 2,12 \text{ N/mm}^2$
Puristuslujuus 0° :	$f_{c,0,k} = 23,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{c,0,d} = 18,0 \text{ N/mm}^2$
Vetolujuus 0° :	$f_{t,0,k} = 18,0 \text{ N/mm}^2$	$f_{t,0,d} = 14,14 \text{ N/mm}^2$

Tiheys:	$\rho_{mean} = 420 \text{ kg/m}^3$	$\rho_k = 350 \text{ kg/m}^3$
Kimmokerroin:	$E = 7200 \text{ N/mm}^2$	

Mitoittaminen liitteen B mukaan, mekaanisesti liitetyt palkit

Efektiiivinen taivutusjäykkyys EI_{ef}

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^3 = (E_i I_i + y_i E_i A_i a_i^2) \quad (13)$$

$$y_2 = 1$$

$$y_1 = [1 + \pi^2 E_i A_i S_i / (K_i * l^2)]^{-1} \quad (14)$$

$K_i = K_{ser}$, Käytetään käyttörajatilan laskuissa

$K_i = K_u$, Käytetään murtorajatilan laskuissa

$$K_{ser} = \frac{\rho_{mean}^{1,5} * d}{23} \quad (15)$$

$$K_u = \frac{2}{3} * K_{ser} \quad (16)$$

$$K_{ser} = \frac{420^{1,5} * 16}{23} = 5987 \text{ N/mm}$$

$$K_u = \frac{2}{3} * 5987 \text{ N/mm} = 3991 \text{ N/mm}$$

$$y_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 7200 \text{ N/mm}^2 * 34 \text{ mm}^2 * 621,5 \text{ N/mm}^2 * 400 \text{ mm}}{3991 \text{ N/mm} * 4500^2 \text{ mm}}} = 0,0759$$

$a_1 = a_2 =$ puiden painopisteen etäisyys neutraaliakselilta

$$(EI_{ef}) = (7200 \text{ N/mm}^2 * 91 \text{ mm}^4 + 0,0759 * 7200 \text{ N/mm}^2 * 34 \text{ mm}^2 * 96,1^2 \text{ mm}) + (7200 \text{ N/mm}^2 * 91 \text{ mm}^4 + 1 * 7200 \text{ N/mm}^2 * 34 \text{ mm}^2 * 96,1^2 \text{ mm}) = 3,7966569414 * 10^{12} \text{ Nmm}^2$$

Momentin aiheuttaman jännityksen kaava on

$$\sigma_m = \frac{0,5 * E_i h_i * M}{(EI)_{ef}}, M = \frac{FL}{4} \quad (17)$$

Ratkaistaan voima F suurimmalle sallitulle taivutusjännitykselle

$$\rightarrow F = \frac{\sigma_{m,d} * (EI)_{ef} * 4}{0,5 * L * E * h_1}$$

$$F = \frac{23,6N/mm^2 * 3,796 * 10^{12} Nmm^2 * 4}{0,5 * 4500mm * 7200N/mm^2 * 200mm} = 110\,618\,N = 110,6\,kN$$

Tällöin leikkausvoima V on

$$V = \frac{F}{2} = 55,3\,kN$$

Leikkauskestävyys

$$\tau_d = \frac{V_d}{A} = \frac{55,3 * 10^3 N}{34\,621,5 mm^2} = 1,597 N/mm^2$$

Mitoitusehto

$$\tau_d \leq V_d = 1,597 N/mm^2 \leq 3,14 N/mm^2, \text{ Käyttöaste } 50,8\%$$

Momentin aiheuttama puristus

$$\sigma_c = \frac{y_i * E_i * a_i * M}{(EI)_{ef}} \quad ()$$

$$\sigma_c = \frac{0,0759 * 7200 N/mm^2 * 96,1 mm * \frac{110,6 * 10^3 N * 4500 mm}{4}}{3,79665 * 10^{12} Nmm^2} = 1,72 N/mm^2$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_c}{f_{c,0,d}} * 100\% = \frac{1,72 N/mm^2}{18 N/mm^2} * 100\% = 9,6\%$$

Liitimelle tuleva voima on

$$F_i = \frac{y_1 E_1 A_1 a_1 s}{(EI)_{ef}} * V_d \quad (18)$$

$$F = \frac{0,0759 * 7200 N/mm^2 * 34\,621,5 mm^2 * 96,1 mm * 400 mm}{3,796 * 10^{12} Nmm^2} * 55,3 * 10^3 N = 10\,593 N$$

Liittimen kapasiteetti:

Pultin eli kierretangon kapasiteetti

K_{90} – kerroin havupuuulle on

$$K_{90} = 1,35 + 0,015 * d \quad (19)$$

$$K_{90} = 1,35 + 0,015 * 16 = 1,59$$

Puun reunapuristuslujuus

$$f_{h,0,k} = 0,080 * (1 - 0,01 * d) * \rho_k \quad (20)$$

$$f_{h,0,k} = 0,080 * (1 - 0,01 * 16) * 350 = 24,1 \text{ N/mm}^2$$

Reunapuristuslujuus kulmassa α syyn suuntaan nähden. Kulma on 0° .

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{f_{h,k}}{K_{90} \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha} \quad (21)$$

$$f_{h,\alpha,k} = \frac{24,1 \text{ N/mm}^2}{1,59 * \sin^2 0^\circ * \cos^2 0^\circ} = 24,1 \text{ N/mm}^2$$

Pultin myötömomentti, M_y , pultin vetomurtolujuus $f_{u,k} = 800 \text{ N/mm}^2$

$$M_y = 0,3 * f_{u,k} * d^{2,6} \quad (22)$$

$$M_y = 0,3 * \frac{800 \text{ N}}{\text{mm}^2} * 16^{2,6} = 324\,282 \text{ Nmm}$$

Liitospuiden paksuudet $t_1 = t_2 =$ noin 210mm (min=4d=4*16=64mm)

Yhden leikkeen leikkauskestävyys

$$f_h = \min \begin{cases} f_{h,1,k} \\ f_{h,2,k} \\ f_{h,s,k} \end{cases} = \min \begin{cases} 24,1 \\ 24,1 \\ 24,1 \end{cases} = 24,1 \text{ N/mm}^2 \quad (23)$$

$$t_u = \min \begin{cases} \frac{t_1 f_{h,1,k}}{f_h} \\ \frac{t_2 f_{h,2,k}}{f_h} \end{cases} = \min \begin{cases} \frac{210 * 24,1}{24,1} \\ \frac{210 * 24,1}{24,1} \end{cases} = 210 \text{ mm} \quad (24)$$

$$R_k = \min \begin{cases} 0,4 * f_h * t_u * d * \sqrt{1 + \frac{3 * M_y}{f_h * d * t_u^2}} \\ 2 * \sqrt{M_y * f_h * d} \end{cases}$$

$$R_k = \min \begin{cases} 0,4 * 24,1 * 210 * 16 * \sqrt{1 + \frac{3 * 324\,282}{24,1 * 16 * 210^2}} = 34,2 \text{ kN} \\ 2 * \sqrt{324\,282 * 24,1 * 16} = 22,4 \text{ kN} \end{cases} = 22,4 \text{ kN}$$

Liitoksen suunnittelulujuus

$$R_{liitos,d} = \frac{k_{mod}}{\gamma_m} * m * n * R_k \quad (25)$$

$n =$ liitoksen pulttien määrä, $m =$ liitoksen leikkeiden määrä $\gamma_m = 1,2$ ja $k_{mod} = 0,8$

$$R_{liitos,d} = \frac{0,8}{1,2} * 1 * 1 * 22,4 \text{ kN} = 14,93 \text{ kN}$$

Hammastelevyn eli buldogin kapasiteetti

Kaksipuolisen hammasvaarnan, jonka tyyppi on C1, kapasiteetti lasketaan kaavalla:

$$F_{v,Rk} = 18 * k_1 k_2 k_3 d_c^2 [N] \quad (26)$$

$$k_1 = \min \begin{cases} \frac{1}{3 * h_e} = \frac{1}{3 * 7,4} = 9,4 \\ \frac{1}{5 * h_e} = \frac{1}{5 * 7,4} = 5,6 \end{cases} \rightarrow k_1 = 1 \quad (27)$$

$$a_{3,t} = \max \begin{cases} 1,1 * d_c = 1,1 * 62 = 68 \text{ mm} \\ 7 * d = 7 * 16 = 112 \text{ mm} = 112 \text{ mm} \\ 80 \text{ mm} \end{cases} \quad (28)$$

$$k_2 = \min \begin{cases} \frac{1}{1,5 * d_c} = \frac{1}{1,5 * 62} = 1,2 \\ \frac{1}{1,5 * 62} = 1,2 \end{cases} \rightarrow k_2 = 1 \quad (29)$$

$$k_3 = \min \begin{cases} \frac{1,5}{350} = \frac{1,5}{350} = 1 \\ \frac{1,5}{350} = 1 \end{cases} \rightarrow k_3 = 1 \quad (30)$$

$$F_{v,Rk} = 18 * 1 * 1 * 1 * 62^2 = 9\,754 \text{ N/hammasvaarna}$$

$$R_{liitos,d} = \frac{0,8}{1,2} * 9\,754 \text{ N} = 6\,502 \text{ N} = 6,5 \text{ kN}$$

Koko liitoksen kapasiteetti $R_d =$ Pultti + hammasvaarna yhteensä

$$R_d = 19,93 \text{ kN} + 6,5 \text{ kN} = 21,43 \text{ kN}$$

Käyttöaste liittimille on

$$\frac{10\,593 \text{ N}}{21,43 * 10^3 \text{ N}} * 100 \% = 49,43 \%$$

Edellisten vaarnapalkkien laskukaavoilla voisi verrata millaisia eroavaisuuksia näillä kahdella eri tavalla mahdollisesti tulisi. Tällöin suurin sallittu työntövoima olisi leikkeen 100 prosenttinen käyttöaste. Työntövoiman kautta ratkaistaan sitä vastaava pistekuorma.

$$T = \frac{S}{l} * A_v$$

$$T = 6 * 21,43 * 10^3 \text{ N} = 128\,580 \text{ N}, \text{ hammasvaarnoja on 6 kappaletta yhdellä puolella.}$$

$$S = A_1 * pk = 34\,621,5 \text{ mm}^2 * 96,1 \text{ mm} = 3\,327\,126 \text{ mm}^3$$

$$I = 823\,545\,519 \text{ mm}^4$$

$$A_v = \frac{l}{2} * V, \text{ ratkaistaan leikkausvoima } V$$

$$T = \frac{S}{I} * \frac{l}{2} * V \rightarrow V = \frac{T * I * 2}{S * l}$$

$$V = \frac{128\,580 \text{ N} * 823\,545\,519 \text{ mm}^2 * 2}{3\,327\,126 \text{ mm}^3 * 4500 \text{ mm}} = 14\,145 \text{ N} = 14,14 \text{ kN}$$

$$V = \frac{F}{2}$$

$$\rightarrow F = V * 2 = 14,14 \text{ kN} * 2 = 28,3 \text{ kN}$$

Euronormi mitoituksen mukaan suurin pistekuorma oli 110,6 kN, joten ero on todella suuri lasketuna suurimmalle sallitulle työntövoimalle. Euronormin mitoituksen mukaan leikkeen käyttöaste 110,6 kN pistekuormalla oli kuitenkin verrattain melko pieni, vain 49,4 %. Katsotaan saadaanko koestuksen tuloksien avulla tehtyä millaisia suuntia antavia johtopäätöksiä.

Käyttörajatila

Käyttörajatilassa taipuman kaava keskeiselle pistekuormalle on

$$W = \frac{P * L^3}{48 * EI}$$

$$E = 0,6 * 12000 \text{ N/mm}^2 = 7200 \text{ N/mm}^2$$

Normin mukaan taipuma lasketaan myös käyttäen taivutusjäykkyyden arvoa $(EI)_{ef}$.

Jolloin käytetään taulukon 1 mukaista liittimien siirtymäkerrointa K_{ser} . Se laskettiin aiemmin ja sen arvo oli

$$K_{ser} = 5\,987 \text{ N/mm}^2$$

$$y_1 = [1 + \pi^2 E_i A_i S_i / (K_i * l^2)]^{-1} \quad (31)$$

$$y_1 = \frac{1}{1 + \frac{\pi^2 * 7200 \text{ N/mm}^2 * 34\,621,5 \text{ N/mm}^2 * 400 \text{ mm}}{5\,987 \text{ N/mm}^2 * 4500^2 \text{ mm}}} = 0,1097$$

$$(EI_{ef}) = (7200N/mm^2 * 91\,652\,461mm^4 + 0,1097 * 7200N/mm^2 * 34\,621,5mm^2 * 96,1^2mm) + (7200N/mm^2 * 91\,652\,461mm^4 + 1 * 7200N/mm^2 * 34\,621,5mm^2 * 96,1^2mm) = 3,874441496 * 10^{12} Nmm^2$$

$$W = \frac{110,6 * 10^3 N * 4500^3 mm}{48 * 3,874441496 Nmm} = 54,2 mm$$

Ja taipuma toisen mitoitustavan mukaan on

$$W = \frac{28,3 * 10^3 N * 4500^3 mm}{48 * 3,874441496 Nmm} = 13,9 mm$$

5 LUONNONPYÖREIDEN VAARNAPALKKIEN TEKNISTEN OMINAISUUKSIEN TUTKIMINEN

5.1 Vaarnapalkkien valmistaminen

Minulla muutaman vuoden työkokemuksen hirsirakennusten käsin veistosta, missä vaarnapalkkirakenteet ovat luontevia käyttää. Vaikka kokemuspohja juuri vaarnapalkkien veiston osalta ei minulla ole kovinkaan kattava, päätin kuitenkin tehdä veistämisen itse. Vaarnapalkkien valmistaminen luonnonpyöreästä puusta on varsin haastavaa, ja lähtökohtiin nähden niiden valmistaminen onnistui laadullisesti erittäin hyvin. Puumateriaalin vaarnapalkkeihin tarjosi Savon ammatti- ja aikuisopiston luonnonvara-alan Toivalan metsäopetuksen yksikkö. Vaarnapalkit valmistettiin heidän metsäkoopetuksen yhteydessä sijaitsevalla hirsirakentamisen veistokentällä. Siellä oli tarvittavat koneet puiden siirtämistä ja nostamista varten, sekä tarvittavia käsityökaluja. Veistämiseen liittyvää teoreettista ja teknistä tukea sain Alppisalvos Oy:ltä.

Vaarnapalkkien valmistamisen aloitin puiden valinnalla. Tavoitteena oli saada staattinen malli, jossa pistekuorma sijaitsee palkin keskellä ja jänneväli olisi 4 - 4,5 metriä. Puiden pituuteen täytyi lisätä reilusti pituutta tukipintaa varten, jottei tukipinnasta muodostuisi mitoitettavaa tekijää. Näin päädyin valitsemaan 5,1 metriä pitkiä tukkeja. Lopullinen pituus päiden tasoittamisen jälkeen on noin 5 metriä. Puut pyrin valitsemaan mahdollisimman tasakokoisina, ainakin niin, että itse vaarnapalkin puut olisivat toisiinsa nähden saman vahvuisia. Puiden joukossa oli myös tuulenkaatoja, joten valinnassa tuli katsoa, ettei tukeissa ole valmiiksi vaurioita. Valinnanvara ahioissa oli melko rajallinen, mutta mielestäni vaarnapalkeiksi saatiin valittua kohtuu hyvät tukkipuut. Kuusi oli ainut puulaji mitä oli tällä kertaa mahdollista käyttää ja ne olivat täysin tuoreita. Vaarnapalkit tulisi aina tehdä tasapainokosteuteen kuivatuista puista. Tällä kertaa se ei ollut mahdollista. Tuore puu on huomattavasti elastisempaa kuivaan puuhun nähden.

Vaarnapalkkien valmistus alkoi puiden kuorimisella. Puiden kuoren poistin vuoluraudalla. Tämän jälkeen jaoin puut keskenään pareihin ja päätin minkälaisen vaarnapalkin kustakin parista teen. Ensimmäiseksi veistin hammaslevyllisen vaarnapalkin. Kuvissa 43 ja 44 puut on valittu ja siirretty puhtaaksi vuolemista varten



KUVA 43. Puiden valinta suoritettu, merkattu ja siirretty odottamaan kuorimista (Eskelinen 2015)



KUVA 44. Puiden kuorinta käsin vuoluraudalla (Eskelinen 2015)

Kaikkien vaarnapalkkien työvaiheet muistuttavat olennaisin osin toisiaan. Suurin ero on piirtotekniikassa. Koska puut pelkästään vuoltiin puhtaiksi, niiden kaikki luonnolliset muodot säilyvät. Puu luonnollisesti myös kapenee latvaa kohti, ja siksi ne täytyy muotoilla toisiinsa sopiviksi. Tätä työvaihetta kutsutaan varaamiseksi. Puut asemoidaan optimaalisesti toisiinsa nähden ja mahdolliset lenkoudet pyritään kääntämään ylös- ja sivuille päin. Piirtoa varten puut on saatava irti toisistaan niin, että niiden väliin jäävä rako olisi mahdollisimman tasainen ja sopivan kokoinen. Muodoiltaan vaihteleva pyöreä puu sijoitetaan sen keskiviivan mukaan, eli puun selkään tehdään keskiviiva väriliitulangalla. Puut asemoin aluksi kyljellään kohdalleen toisiinsa nähden, minkä jälkeen ruuvasin puiden päihin tukevan lankun. Seuraavaksi puut voitiin nostaa pystyyn ja reivata tukevasti kiinni.

Hammasleyvyillä ja kierretangoilla vaarnattu palkki on kaikista yksinkertaisin valmistaa, joten aloitin tutkimuksen sen valmistamisella. Hirret varataan toisiinsa, mutta varaus poikkeaa tavanomaisesta. Normaalisti ylemmän puun alareuna ”koverretaan” sopivaksi alemman puun mukaan. Tasavarauksessa molempiin puihin tehdään tasapinnat piirrettyjen varausviivojen mukaan. Tämä siksi, että hammasleyvyn täytyy pureutua puuhun sekä ylä-, että alahampaistaan, jotta se siirtää vaarnapalkkiin muodostuvat työntövoimat. Haasteena on saada puut osumaan toisiinsa nähden kohdalleen vaarnapalkkia koottaessa, koska hammasleyvyn puretuessa kiinni puiden siirtäminen ja säätäminen toisiinsa nähden ei enää ole mahdollista. Puiden valinnanvaran vähyydestä johtuen jouduin valitsemaan melko lengot eli väärät puut hammastettua vaarnapalkkia varten. Väärässä puussa sen keskilinja ammutaan värilangalla suunnilleen massakeskiön mukaan, joten keskilinja tukkien päissä ei ole poikkileikkaukseen nähden. Otin vääryyttä tässä vaarnapalkissa hieman liika sivuille, jolloin kierretankojen poraukset tulivat alemman puun läpi hieman liian reunasta. Poraajassakin oli hieman vikaa. Yleensä siinä käytetään kaveria apuna, jolloin työkaveri voi ohjeistaa poran kallistamisessa oikeaan suuntaan. Yksin tehdessäni läpiporauksista ei tullut kovin onnistuneita.

Toiseksi valmistin hammastetun vaarnapalkin. Hammastettu vaarnapalkki on ehkä teknisesti haastavin toteuttaa. Hammastusten hampaat, eli pystypinnat on saatava tehtyä todella pureviksi toisiinsa nähden, jottei kuormituksen alussa synny liikaa alkusiirtymää, ennen kuin hampaat kunnolla purevat

toisiinsa. Virheisiin ei ollut varaa, koska juuri enempää viisi metrisiä puita ei sillä hetkellä ollut. Hammastukset tehdään suunnitelmien mukaan käyttäen apuna esimerkiksi leveää lankkua. Aluksi palkit varataan toisiinsa, kuten hammaslevyllisessä vaarnapalkissa. Varausviivojen avulla lankku asennetaan sopivaan kaltevuuteen ja viivojen avulla määritetään hammastukselle suunniteltu upotus. Ensin muotoillaan alempi puu, minkä jälkeen sen hammastus siirretään ylempään puuhun. Piirtovaiheessa on mahdollista esijännittää puita hieman ylöspäin korottaen. Tässä tapauksessa päädyin tekemään niin, sillä sahasin alemman puun tukipintojen tasapinnan vahingossa väärälle puolelle. Olin katsonut, että puun lenkous olisi kaareutuvasti hieman ylöspäin. Virheestä johtuen puusta tuli hieman ”roikuva” ja yritin kompensoida kyseistä virhettä ko. menetelmällä. Kyseisellä pienellä virheellä saattaa olla vaikutusta kokeen tulokseen kyseisen vaarnapalkin osalta.

Viimeisenä valmistin palikallisen vaarnapalkin. Tässäkin alkutoimenpiteet ovat samat kuin aiemmilla palkeilla. Tässä vaarnapalkissa tehdään ”taskut” palikoille. Palikat valmistettiin myös kuusesta. Sitä varten sahattiin leveää lankkua 45mm paksuiseksi ja se pätkittiin katkaisusirkkelillä 300 mm pituisiksi palikoiksi. Palikat asetetaan alemman puun päälle suunnitellulla jaolla ja säädetään sopivaan kulmaan. Tarkkuusvaralla piirretään tarkasti niille tulevat kolot. Palikat asennettiin tässä vaarnapalkissa syynsuuntaisesti. Palikan pääpuun alareuna täytyy upota kokonaan alempaan puuhun ja yläpää kokonaan ylempään puuhun. Tällöin työntövoimat siirtyvät suunnitellusti loveuksien pystypintoihin. Lopuksi vaarnapalkki pultataan tiukasti kiinni kierretangon avulla. Hammastetun vaarnapalkin ja palikallisen vaarnapalkin reiät kierretankoja varten porattiin tarkoituksella väljiksi, jotta kierretangot eivät ottaisi kuormia, vaan kaikki voimat siirtyisivät hammastusta tai palikkaa pitkin eteenpäin. Aikaa vaarnapalkkien tekemiseen kului useampi työpäivä. Tarkkaa määrää tunneista en kirjannut ylös.

5.2 Vaarnapalkkien koestaminen

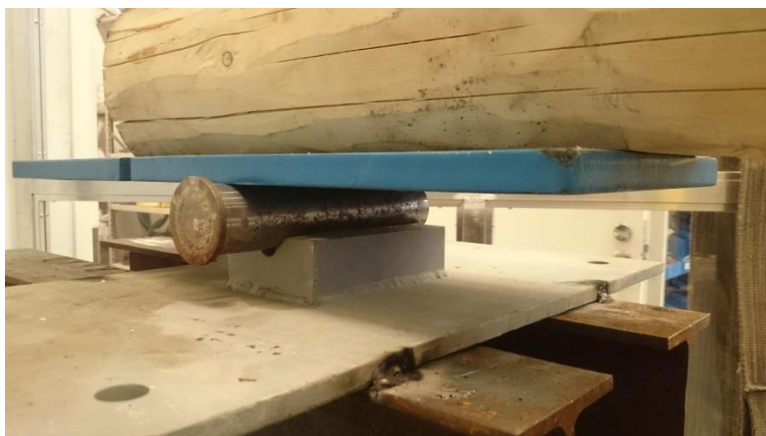
Vaarnapalkit koestettiin HitSavonian teräslaboratoriossa. Kokeen tarkoituksena on kuormittaa palkkeja 100 % käyttöasteeseen asti murtorajatilassa, ja tehdä havaintoja onko niissä siinä vaiheessa havaittavissa merkittäviä muodonmuutoksia. Lisäksi havainnoidaan sitä, ovatko palkit siinä vaiheessa todennettavissa turvallisiksi. Tämän jälkeen kuormituksen määrää jatketaan murtoon saakka, jolloin nähdään millä tavalla ja mistä kohdasta vaarnapalkki murtuu. Taipuma on myös tekijä, jota seurataan tarkasti käyttörajatilaa silmällä pitäen. Vaarnapalkkeja kuormitetaan pistekuormalla keskeltä palkkia.

Vaarnapalkit tuotiin Savonia-ammattikorkeakoulun hitsauslaboratoriolle ennen joulua 2015. Koestus siirtyi tammikuun alkuun 2016. Kokeen järjestelyissä olivat auttamassa Lauri Alonen, Arvo Tiilikainen, Esa Jääskeläinen, Juhani Mikkonen ja Juha Lehtikanto. Koska kuormituskehän pöydän pituus on alle kaksi metriä ja vaarnapalkkien tukipinnat ylettyvät reilusti pöydän ulkopuolelle, oli kuormituskokeessa riskinä kuormituskehän nouseminen ilmaan ja sen kaatuminen. Kuormituskehän oma paino on noin 100kN ja laskennallisesti tämä ylittyisi osalla palkeista. Tästä johtuen pöydän päälle asennettiin noin kuusi metrinen erittäin jyrävä teräspalkki. Teräspalkin päälle valmisteltiin telineet tukipintoja varten. Näin kuormat siirtyvät teräspalkkia pitkin kuormituskehän pöydälle ja sen nousemi-

nen ilmaan estyy. Teräspalkin päihin hitsattiin pienillä pienoilla kiinni kaksi kappaletta IPE200 teräspalkin pätkää korokkeeksi. Korokkeiden päälle hitsattiin kiinni teräslevyt joihin saatiin toiseen päähän nivelletty tukipinta ja toiseen päähän rullallinen tukipinta. Näin varmistettiin statiikan sääntöjen mukainen staattinen malli. Nämä näkyvät kuvissa 45 ja 46.



KUVA 45. Nivelletty tukipinta (Eskelinen 2016)



KUVA 46. Rullallinen tuki (Eskelinen 2016)

Vaarnapalkkien nurjahtamisen estäminen varmistettiin pystysuuntaisilla teräsosilla, jotka on tehty yhteensopiviksi teräspalkkia varten. Ne saatiin säädettyä sivusuunnassa palkkien leveyden mukaan sopiviksi ja teräsosien yläpään laitettiin 10mm kierretangot. Kuvassa 47 hammaslevyllinen vaarnapalkki koestusta varten valmiina.



KUVA 47. Nurjahdustuet asennettuna (Eskelinen 2016)

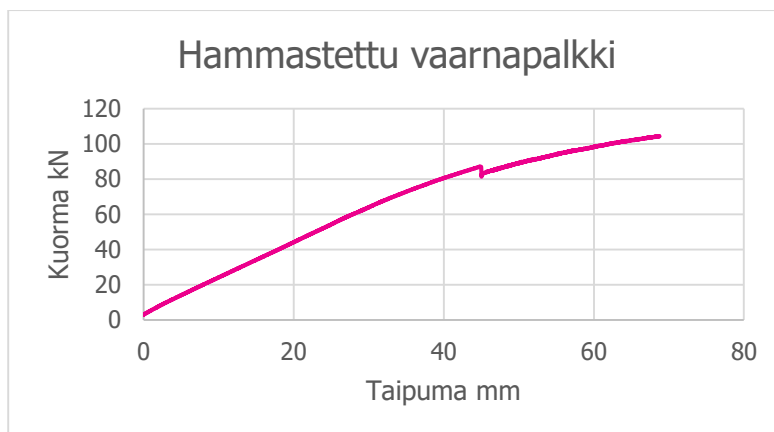
Järjestelyiden jälkeen tehtiin tarvittavat asetuksen kuormituskehän ohjelmistoon, jonka jälkeen kaikki oli valmista koestuksia varten. Lauri Alonen käytti ohjelmistoa. Kuormitus tapahtuma kuvattiin pienellä action-kameralla ja palkkien päissä tapahtuvia siirtymiä kuvattiin älypuhelimien kameralla. Siirtymiä ei siis mitattu millään mittalaitteella.

Koepäivä sujui hyvin ja ilman ongelmia. Kuormituskoe aloitettiin hammaslevyllisellä vaarnapalkilla. Ohjelmistoon syötettiin 3kN alkukuorma kaikille palkeille, jonka jälkeen alkoi varsinainen tasainen kuormittaminen. Kun murto oli saavutettu, koe lopetettiin ja todettiin murtotapa. Toiseksi testattiin hammastettu vaarnapalkki ja viimeiseksi palikallinen vaarnapalkki. Kuormitusnopeus oli 30mm/minuutti.

5.3 Luonnonpyöreiden vaarnapalkkien kuormituskokeen tulokset

5.3.1 Hammastettu vaarnapalkki

Hammastettu vaarnapalkki oli edellistä huomattavasti lujempi. Siinä tapahtui äkillinen murto, kun alemman puun taivutuskestävyys ylittyi. Murto tapahtui oksaryhmän kohdalta, missä se näyttää jopa vetomurtumiselta, mutta puun alapinnassa on nähtävissä selvästi taivutusmurrosta johtuva lohkeaminen. Palkin kuormittamista jatkettiin tovin aikaa. Hammastettu vaarnapalkki oli äkilliseen murttoon saakka lähes myötäämätön. Ensimmäisen murron jälkeen alkoi syntyä myötäämistä kun ylempään puuhun alkoi syntyä puristusmuodonmuutoksia. Huomattavaa on myös se, että palkista löytyi lisäkapasiteettia vielä ensimmäisen murtumisen jälkeen. On myös mahdollista että tekovaiheen virhe, missä puun lenkous tuli vahingossa alaspäin, vaikutti kyseisen palkin tulokseen.



KUVIO 4. Hammastetun vaarnapalkin kimmoviiva (Eskelinen 2016)

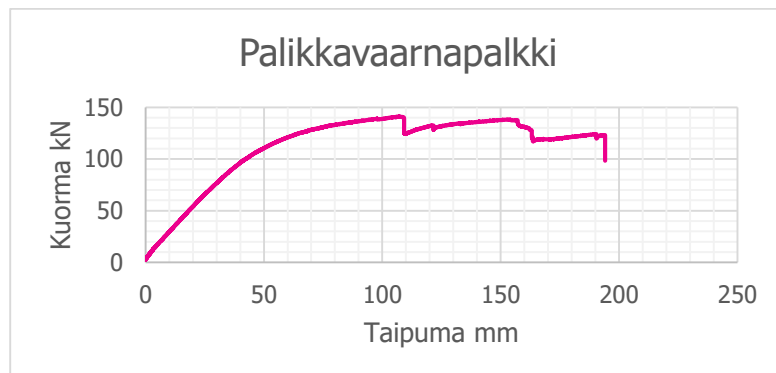
Hammastetun vaarnapalkin maksimi kuormitus tässä kokeessa oli 104,28kN. Se olisi ollut vielä hieman enemmän jos kuormittamista olisi vielä jatkettu. Palkista löytyi lisäkapasiteettia ensimmäisestä taivutusmurrosta huolimatta. Vaarnapalkin puristuslujuus on kylläkin jo ylittynyt mikä näkyy kimmoviivan loivenemisesta. Hammastetussa vaarnapalkissa ei ollut havaittavissa siitä, että puut pyrkivät erkanemaan toisistaan, kuten palikallisessa vaarnapalkissa kävi. Osassa hammastuksia oli havaittavissa pieniä rakoja, mikä saattoi johtua siitä, että palkit olivat noin kaksi viikkoa koetilan sisätiloissa ennen koepäivää. Pientä kutistumista on voinut tapahtua, mistä seuraa suurempi alkusiirtymä ja taipuma. Hammastuksissa itsessään oli pieniä puristusvoimista johtuvaa "litistymistä", mutta ne olivat yllättävän pieniä. Niillä on kuitenkin iso vaikutus siirtymiin ja sitä kautta palkin taipumaan.



KUVA 48. Hammastetun vaarnapalkin taivutusmurto (Eskelinen 2016)

5.3.2 Palikkavaarnapalkki

Palikallisen vaarnapalkin tulokset olivat tässä testissä ylivoimaisesti parhaat. Sen kimmoviiva on kaikista jyrkin, joten se oli myös jäykin testatuista kappaleista. Palikallisen vaarnapalkin myötääminen alkoi myös ylemmän puun puristuslujuuden ylittymisellä, mikä on yhteistä kaikilla vaarnapalkeilla. Myötöraja oli noin 100 kN tienoilla, jolloin ylempi puu alkoi puristumaan. Maksimi voima oli 140,98 kN, jolloin vaarnapalkin toisen puolen reunimmaisin loveus leikkautui pitkittäissuunnassa.



KUVIO 5. Palikka vaarnapalkin kimmoviiva (Eskelinen 2016)

Kuormitusta jatkettiin vielä tämän jälkeen. Vaarnapalkissa riitti vielä kapasiteettia lähes 140kN asti uudelleen. Lopullinen murto tapahtui palkin keskellä taivutuskestävyyden ylittymisellä. Kuvassa 49 näkyy puristuslujuuden ylittyminen ja kuvassa 50 loveuksen leikkausmurto.



KUVA 49. Puristusmurto ylemmässä puussa (Eskelinen 2016)

Puristusmurrossa puun syyt ikään kuin nurjahtavat toistensa yli. Palikoissa ja loveuksissa oli yllättävän vähän puristumaa, vaikka niihin kohdistuu todella suuria voimia. Kun reunimmainen loveus oli leikkausmurtunut ja kuormitusta jatkettiin, pyrki sitä edeltävä palikka erittäin voimakkaasti pyörähtämään eli kääntymään pystyyn. Sen pystyi havaitsemaan todella suuresta raosta puiden välissä aivan kokeen lopussa. Tällöin kierretankojen aluslevyt olivat uponneet puuhun todella voimakkaasti. Vaarnapalkissa, jossa käytetään vinoon asennettuja palikoita, olisi ehkä syytä käyttää suurempia aluslevyjä.



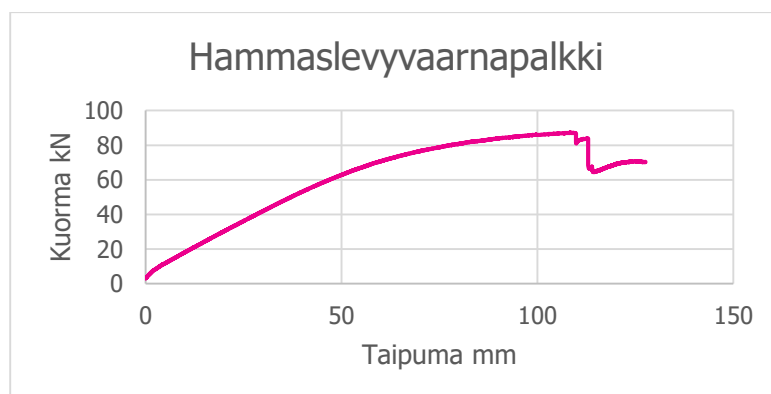
KUVA 50. Loveuksen leikkausmurron näkymä alemman hirren päässä (Eskelinen 2016)



KUVA 51. Loveuksen leikkausmurto loveuksen pohjassa (Eskelinen 2016)

5.3.3 Hammaslevyvaarnapalkki

Hammaslevy vaarnapalkki oli testauksen heikoin, niin kuin oli oletettukin. Myötöraja sillä saavutettiin hieman ennen 60 kN. Tämän jälkeen vaarnapalkin molemmat puut alkoivat puristumaan yläpinnastaan, mikä on nähtävissä kimmoviivan tasaisesta loivenemisestä. Taivutuslujuuden ylittyminen tapahtui palkin maksimikuorman 87,16kN kohdalla (Kuvio 3).



KUVIO 3. Hammaslevyllisen vaarnapalkin kimmoviiva (Eskelinen 2016)

Purettaessa palkkia huomattiin, että osa hammaslevyistä oli lähes alkuperäisessä kunnossa. Kierretangot siis ottivat suurimman osan voimista vastaan, kuten kävi ilmi mitoittamisessa. Kierretangot olivat hieman vääntyneet. Puu niiden kohdalla oli puristunut. Kuivalla puutavaralla tulos olisi todennäköisesti ollut huomattavasti parempi, ottaen huomioon, että juuri puristuslujuus on alhaisin tuoreella puulla.

5.4 Puun kosteusmittaukset

Vaarnapalkeista otettiin kokeen jälkeen yhdet koepalat per palkki kosteusmittausta varten. Lisäksi palikallisen vaarnapalkin kaikkien palikoiden kosteuspitoisuus mitattiin. Mittaus suoritettiin niin sanotulla uunikuivaus menetelmällä. Siinä koepaloista mitataan lähtöpaino, jonka jälkeen ne laitettiin kui-

vausuuniin 103 - 105C^o asteeseen useaksi päiväksi. Koepalojen kuivuttua absoluuttiseen kuivapainoon, niiden paino punnittiin uudelleen. Kosteuspitoisuus saadaan vähentämällä kuivapaino lähtöpainosta ja jakamalla erotus kuivapainolla. Taulukoissa 3 ja 4 on kosteusmittausten tulokset.

TAULUKKO 3. Palikka vaarnapalkin palikoiden kosteuspitoisuus (Eskelinen 2016).

Näyte	Lähtöpaino	Kuivapaino	Kosteus %
1.	1543,5	1249,7	23,5
2.	1484,3	1220	21,7
3.	1516,9	1193,6	27,1
4.	1539,2	1240,7	24,1
5.	1490,2	1187,7	25,5
6.	1480,4	1192,6	24,1
7.	1577,9	1213,8	30,0
8.	1509,3	1172,9	28,7

Taulukko 4. Vaarnapalkkien kosteusmittaus (Eskelinen 2016)

Näyte	Lähtöpaino (g)	Kuivapaino (g)	Kosteus (%)
1.	894,8	668,4	33,9
2.	1015,7	766,0	32,6
3.	1040,7	682,9	52,4

Palikoiden kosteuspitoisuus on hieman alhaisempi, koska ne tehtiin aiemmin kaadetusta tukista. Vaarnapalkeista olisi ollut hyvä[62][62] tehdä kosteusmittaus useammasta pienestä näytteestä, mutta näistä kolmestakin huomaa, että vaarnapalkit ovat olleet täysin tuoreita.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

6.1 Tulokset ja niihin vaikuttavat tekijät

Tulokset ovat selvästi linjassa mitoituksen kanssa hammastetulla ja palikka vaarnapalkilla. Koska vaarnapalkit olivat täysin tuoreista tukeista tehtyjä ja pienestä koe otoksesta johtuen tulokset ovat suuntaa antavia. Tuoreessa puussa on huomattavasti enemmän muuttujia, joita on vaikea arvioida. Kuten tuloksista nähdään kaikissa vaarnapalkeissa ylemmän puun puristuskestävyys antaa periksi ensimmäiseksi lukuun ottamatta hammastetun palkin äkillistä murtoa. Voidaan olettaa, että tulokset olisivat olleet huomattavasti paremmat kuivalla puulla, niin lujuuden, kuin myös taipumien osalta. Myötöraja olisi saavutettu paljon myöhemmin. Vaikeinta on arvioida kuinka paljon puiden tuoreus vaikutti heikentävästi vaarnapalkkien taipuman määrään. Koska vaarnapalkit viettivät joulun pyhät Savonia-ammattikorkeakoulun teräslaboratoriossa, on tuoreudesta johtuva mahdollinen kuivumiskuituminen voinut myös osaltaan hieman huonontaa tuloksia, varsinkin taipuman suhteen.

Hammasleyvyaarnapalkin kestävyys oli noin kaksi kertaa heikompi, mitä eurokoodin mitoitusohjeiden mukainen mitoitus antoi tulokseksi. Minusta tulos on huolestuttava. Myös momentista aiheutuvan puristuksen ja liittimien käyttöaste jäi melko alhaiseksi. Hammasleyvy vaarnapalkin myötääminen alkoi kuitenkin jo noin 60 kN kohdalla ja laskennallinen tulos taivutukselle oli 110,6 kN. Kun taas toisella mitoitustavalla, jossa liittimien mitoituslujuus otettiin suurimmaksi sallituksi työntövoimaksi ja ratkaistiin sitä vastaava pistekuorma, tulos jäi huomattavasti varmalle puolelle. Näin ollen voidaan todeta, että eurokoodin mukainen mitoitustapa ainakin luonnonpyöreällä puulla ei vaikuta toimivalta vaan antaa vääränlaisia tuloksia.

Hammastetun ja palikallisen vaarnapalkin mitoittava tekijä pysyi plastisella alueella, eli myötöraja saavutettiin vasta myöhemmin. Jos vaarnapalkit olisivat olleet tehty kuivasta puusta, olisi mitoituksessa huomattavasti enemmän lisävarmuutta, koska tulokset oletettavasti olisivat olleet paremmat. Huomioitavaa on se, että kaikkien vaarnapalkkien myötääminen alkaa noin 50 mm taipuman kohdalla, jolloin puristuskestävyys ylittyy. Pistekuormien ero vaarnapalkkien kesken on kuitenkin melko suuri tämän taipuman kohdalla. Luonnonpyöreältä vaarnapalkilta, puuliitoksin varsinkin, tuntuu löytyvän kelvollisesti kapasiteettia. Voidaan sanoa, että kokeessa käytetyt tukit ovat kooltaan kuitenkin aikalailla pikkutukkeja, joten puun kokoa kasvattamalla saadaan helposti vaarnapalkeille lisä kapasiteettia.

6.2 Laskenta ja mitoitus

Palikallisen ja hammastetun vaarnapalkin mitoitustapa murtorajatilassa vaikuttaa toimivalta, melko yksinkertaiselta ja olevan tämän pienen testin pohjalta luetettava. Eurokoodin mukainen mitoitustapa ei välttämättä ole tällaiselle palkille kaikista sopivin. Hankaluus onkin siinä, että ne kuitenkin tulisi mitoittaa normien mukaisesti. Tuloksien pohjalta olisi mahdollista laskea liitosjäykkyydet, mutta tarkempia tuloksia varten tulisi palkkien olla kuivasta puusta tehdyt ja kokeita tulisi suorittaa enem-

män. Eurokoodin mitoituksen mukaan liittimelle tulevan voiman ja palkin puristuskestävyyden laske-
misessa on kuitenkin jotain, mikä ei näytä täsmäävän todellisuuden kanssa. Taipumat kaikilla vaar-
napalkeilla olivat hieman suuremmat kuin laskennallisesti, mikä oli oletuskin. Hammastetulla vaarna-
palkilla voimalla 64,6kN laskennallinen taipuma oli 21,9 mm ja kokeessa taipuma saman voiman
kohdalla oli noin 30 mm. Ero oli noin 8 mm. Palikallisen vaarnapalkin laskennallinen taipuma voi-
malla 76,1 kN oli 20,1mm ja todellinen taipuma sen kohdalla oli 29,7 mm. Eroa oli siis noin 10 mm.
Erot eivät sinällään olleet kovin suuret. Todellisten taipumien avulla voitaisiin laskea jäyhyysmomen-
tille efektiivinen arvo I_{ef} . Tulokset sen suhteen ovat suuntaa antavia. Kokeita tulisi tehdä useammalle
palkille ja tietenkin kuivasta puusta valmistetuille. Tällöin saataisiin tarkempaa tietoa, kuinka jäykkä
ja yhtenäinen vaarnapalkki todellisuudessa olisi.

Lasketaan jäyhyysmomentin efektiiviset arvot hammastetulle ja palikalliselle vaarnapalkille.

Taipuman kaava keskeiselle pistekuormalle oli

$$W = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot EI}$$

Taipuma tiedetään joten lasketaan sen mukainen jäyhyysmomentti ensin palikalliselle vaarnapalkille.

$$I_{ef} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot W} = \frac{76,1 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 4500^3 \text{ mm}}{48 \cdot 7200 \text{ N/mm}^2 \cdot 29,7 \text{ mm}} = 675\,603\,693 \text{ mm}^4$$

Joka on prosentuaalisesti

$$\frac{675\,603\,693 \text{ mm}^4}{998\,874\,093 \text{ mm}^4} * 100\% = 67,6 \%$$

Hammastetun vaarnapalkin efektiivinen jäyhyysmomentti on

$$I_{ef} = \frac{P \cdot L^3}{48 \cdot E \cdot W} = \frac{64,6 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 4500^3 \text{ mm}}{48 \cdot 7200 \text{ N/mm}^2 \cdot 30 \text{ mm}} = 567\,773\,437 \text{ mm}^4$$

Joka on prosentuaalisesti

$$\frac{567\,773\,437 \text{ mm}^4}{776\,902\,380 \text{ mm}^4} * 100\% = 73,1 \%$$

Näiden kahden otoksen suhteen efektiivinen jäyhyysmomentti on linjassa toisiinsa nähden.

Olisi mielenkiintoista nähdä hieman laajemmalla otoksella olisiko puuliitoksen tehdyn vaarnapalkin
efektiivinen jäyhyysmomentti tätä luokkaa, voisiko joillakin valmistustekniikoille sitä parantaa tai
jopa saada täysin yhtenäisesti toimivaksi.

Hammasleyyllisen vaarnapalkin ei koskaan saavuttanut 110,6 kN kuormaa, mutta sen sijaan vaihtoehdoisella tavalla pistekuormalla 28,3 kN laskennallinen taipuma oli 13,9 mm. Kokeessa taipuma 28,3 kN kohdalla oli 18,4 mm, ero ollen noin 4,5 mm. Myös momentista johtuvan puristuskestävyyden ja liittimien käyttöaste jäi todella alhaiseksi, vaikka palkki on murtunut jo paljon aiemmin. Jos suurimman sallitun pistekuorman kaavassa käyttää h_1 arvona koko vaarnapalkin korkeutta 400 mm päästään järkevämpään tulokseen ainakin taivutuskestävyyden suhteen, mutta siinäkin muut mitoitukset jäävät käyttöasteeltaan varsin pieniksi.

$$F = \frac{\sigma_{m,d} \cdot (EI)_{ef} \cdot 4}{0,5 \cdot L \cdot E \cdot h_1}$$

$$F = \frac{23,6 \text{ N/mm}^2 \cdot 3,796 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2 \cdot 4}{0,5 \cdot 4500 \text{ mm} \cdot 7200 \text{ N/mm}^2 \cdot 200 \text{ mm}} = 55,3 \text{ kN}$$

$$\sigma_c = \frac{y_i \cdot E_i \cdot a_i \cdot M}{(EI)_{ef}}$$

$$\sigma_c = \frac{0,0759 \cdot 7200 \text{ N/mm}^2 \cdot 96,1 \text{ mm} \cdot \frac{55,3 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 4500 \text{ mm}}{4}}{3,79665 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2} = 0,86 \text{ N/mm}^2$$

Käyttöaste

$$\frac{\sigma_c}{f_{c,0,d}} \cdot 100 \% = \frac{1,72 \text{ N/mm}^2}{18 \text{ N/mm}^2} \cdot 100 \% = 4,8 \%$$

Liitimelle tuleva voima on

$$F_i = \frac{y_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s}{(EI)_{ef}} \cdot V_d$$

$$F = \frac{0,0759 \cdot 7200 \text{ N/mm}^2 \cdot 34 \cdot 621,5 \text{ mm}^2 \cdot 96,1 \text{ mm} \cdot 400 \text{ mm}}{3,796 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2} \cdot 27,65 \cdot 10^3 \text{ N} = 5 \cdot 296 \text{ N}$$

Käyttöaste liittimille on

$$\frac{5 \cdot 296 \text{ N}}{21,43 \cdot 10^3 \text{ N}} \cdot 100 \% = 24,7 \%$$

Näin laskettuna taivutuskestävyys on mitoittava tekijä ja se jää turvalliselle puolelle. Muut tekijät jäävät käyttöasteeltaan kuitenkin suhteettoman alhaisiksi.

Itselleni jäi melko varma ja turvallinen olo tavasta millä hammastettu ja palikallinen vaarnapalkki mitoitettiin. Murtorajatilan mitoitus oli varmalla puolella ja plastisella alueella, vaikka puu oli täysin tuoretta. Taipumia laskiessa tulee käyttää efektiivistä arvoa taivutusjäykkyyden suhteen. Eurokoodin mukaisesta mitoitustavasta jäi enemmänkin epävarma tunne. En tiedä ovatko sen mukaiset kaavat

enemmän sopivia suorakaiteen muotoisten palkkien tai pilarien mitoittamista varten tai muiden erikoisempien liittopalkkien suunnittelua varten.

6.3 Mahdolliset parannukset luonnonpyöreiden vaarnapalkkien valmistamiseen

Vaarnapalkit tulisi valmistaa riittävän kuivasta puusta. Tukeista tulisi valita kaikista laadukkaimmat puut. Laadukkaan puun ominaisuuksia ovat esimerkiksi hidas kasvu, oksattomuus, vähän nuorpuuta, ei reaktiipuuta eli lylyä eikä muitakaan visuaalisesti havaittavissa olevia vikoja tai vaurioita. Tuloksien perusteella tuoreesta puusta tehty vaarnapalkki on turvallinen ja kestävä, mutta kuivasta puusta tehtynä vältyttäisiin kuivumisesta johtuvan kutistumisen aiheuttamilta liitosten mahdollisilta väljistyksiltä. Tuoreesta puusta tehtynä olisi vaarnapalkki suositeltava esijännittää ylöspäin kaarelle, mikä tekovaiheessa on kohtuu vaivatonta. Hammaslevy vaarnapalkki olisi ehkä järkevämpi tehdä hieman suuremmasta kierretangosta. Hammaslevyn sijaan voisi miettiä jotain parempia ja tehokkaampia metalliliittimiä, joiden kapasiteetti on suurempi. Palikallinen vaarnapalkki, missä palikat on asennettu vinoon, olisi syytä käyttää suurempia aluslevyjä ja mahdollisesti suurempaa kierretankoa. Palikoiden pyrkimässä kääntymään pystyyn, kohdistuu kierretankojen aluslevyille suuria voimia, kun puut pyrkivät erkanemaan toisistaan. Kierretangon voisi jättää pois vaarnapalkin keskeltä, jottei sitä turhaan heikennetä kohdasta, jossa jännitykset ovat suurimmillaan.

LÄHTEET

Alppisalvos Oy [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-12-17]. Saatavissa: http://alppisalvos.fi/2012/tiedostot/Palkkien_koerasitus.pdf

Alppisalvos Oy [valokuva]. [Viitattu 2015-12-9,19]. Saatavissa: <http://www.alppisalvos.fi>

Polku: Etusivu. Kuvagalleria

BRUNGRABER, Ben & MILLER, Joe. 2009. White Paper: Mechanically laminated beams. Saatavissa: <http://www.ftet.biz/index.php?action=resources.wp01>

BOREN, H., PIETILÄ, J., LEHTOVIITA, T., MEURONEN, T., SUONIO, J. 2000. Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa I. VAKOLAn tiedote 81:2000. [Viitattu 2015-12-20.] Saatavissa: <http://jukuri.luke.fi/handle/10024/439948>

Build with logs in Europe [valokuva]. [Viitattu 2015-12-21] Saatavissa: <http://boisbrut.free.fr/com-pas.html>

DIN 1052 Zimmermannsmäßige Verbindungen [verkkoaineisto]. [Viitattu 2016-01-42]. Saatavissa: http://www.holzbau-kompetenzzentren.de/uploads/media/TP_II-Holz-Holz-Verbindungen.pdf

EKEVAD, M. & AXELSSON, A. 2012. Variation of modulus of elasticity in the tangential direction with moisture content and temperature for Norway spruce (Picea Abies). [Viitattu 2016-01-37.] Saatavissa: http://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_07_4_4730_Ekevad_Axelsson_Elasticity_Tangential_Moisure_Temp_Picea/1719

EN 1995-1-1 :2004+A 1 Annex B: Mechanically jointed beams [verkkoaineisto]. Saatavissa: <https://law.resource.org/pub/eu/eurocode/en.1995.1.1.2004.pdf>

FONROBERT, Felix, STOY, Wilhelm, DRÖGE, Georg, 1960. Grundzuge des holzbaues im hochbau. 7. painos. Berliini: Wilhelm Ernst & Sohn

Mitek Finland Oy [valokuva]. [Viitattu 2015-12-16]. Saatavissa: <http://www.mitek.fi>

Polku: Kiinniketuotteet. Kiinnikkeet. Hammaslevyt ja Bulldog.

JAARANEN, Joonas 2014. Puurakenteisen välipohjan laskentaohjelma. Kymenlaakson ammattikorkeakoulu. Rakennustekniikan koulutusohjelma. Opinnäytetyö. [Viitattu 2016-01-33.] Saatavissa: https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70356/Jaaranen_Joonas.pdf?sequence=1

KIVINEN Tapani & PIETILÄ Jukka. 2000. Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa III. VAKOLAn tiedote 83:2000. [Viitattu 2015-12-20.] Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/440033>

PIHLAJAMAA, T. & JANTUNEN, J. 1995. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet. VAKOLAn tutkimuslaskelma 70:1995. [Viitattu 2016-01-38.] Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/443346>

ROSS, R., McDonald, K., Green, D., Schad, K. 1997. Relationship between log and lumber modulus of elasticity. [Viitattu 2016-01-36.] Saatavissa: <http://originwww.fpl.fs.fed.us/documents/pdf1997/ross97a.pdf>

RIL 205-1-2009. Puurakenteiden suunnitteluohje. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Turku: Hansaprint Oy.

Sepa Oy [valokuva]. [Viitattu 2015-12-17] Saatavissa: <http://www.sepa.fi>
Polku: Etusivu. Kattoristikot. Vaarnapalkit.

Structurae [valokuva]. [Viitattu 2015-12-12]. Saatavissa: <http://structurae.net/structures/russeintobel-bridge>

TEIKE, Anna 2013. Study of a multiple kingpost truss bridge with framed joints. Chalmers university of technology. Department of civil and environmental engineering, division of structural engineering. Master's Thesis. [Viitattu 2015-12-10]. Saatavissa: <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179892/179892.pdf>

The Chambers log scribe [valokuva]. [Viitattu 2015-12-21] Saatavissa logbuilding.org
Polku: Etusivu. Scribes.

Tpub [valokuva]. [Viitattu 2015-12-16]. Saatavissa: http://engineeringtraining.tpub.com/14070/css/14070_27.htm ja http://constructionmanuals.tpub.com/14045/css/14045_273.htm

Triofloor Oy [verkkoaineisto]. [Viitattu 2015-12-14]. Saatavissa: <http://triofloor.fi/fileadmin/tiedostot/oppaat/1puulajiopas2013.pdf>

WOLFE, Ronald. 1999. [Valokuva]. [Viitattu 2015-12-19]. Saatavissa: <http://www.fpl.fs.fed.us/documents/fplgtr/fplgtr113/ch18.pdf>