

Teppo Gardemeister

PYÖRÖHIRSIEN TAIVUTUSLUJUUDEN KOKEELLINEN SELVITYS

Opinnäytetyö
Rakennustekniikka

2017



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tekijä	Tutkinto	Aika
Teppo Gardemeister	Insinööri AMK	Huhtikuu 2017
Opinnäytetyön nimi		
Pyöröhirsien taivutuslujuuden kokeellinen selvitys		35 sivua 9 liitesivua
Toimeksiantaja		
TT-Salvos Ky		
Ohjaaja		
Lehtori Jani Pitkänen		
Tiivistelmä		
<p>Työn tarkoituksena oli selvittää käsinveistettyjen pyöröhirsien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia ja verrata niitä Eurokoodi 5:n mukaisiin arvoihin. Tutkimusongelmana oli kokemusperäisten havaintojen ja mitoituslaskelmien suurehko ristiriita. Toisena ongelma-kohtana koettiin Eurokoodi 5:n yksioikoinen määritelmä pyöreän puun lujuusluokitukseen.</p> <p>Tutkimus suoritettiin taivutuskokeena läpimitaltaan 200 - 350 mm:n koekappaleilla noin 6 m:n jännevälillä. Voima kohdistettiin pistekuormana vetämällä hydraulisyliinterillä pukkien varaan tuettua hirttä sen keskikohdasta alaspäin. Kokeen aikana seurattiin painemittarin osoittamaa vetovoimaa ja linjalankaa verrokkina käyttäen kappaleen taipumaa. Taivutuskokeiden videotaltioinneista poimittiin mittarilukemat kuvaajien piirtämiseksi. Koekappaleet olivat kesän yli kuivuneita, kosteusprosentteiltaan 22,8 - 25,9 % ja iältään sekä kasvunopeudeltaan tavanomaisia päätehakkuukypsän metsän puuyksilöitä. Kokeessa oli mukana sekä mänty- että kuusitukkeja, verrokkina myös vastakaadettu täysin tuore hirsi, sekä muutama tarkoitushakuisesti erittäin huonolaatuinen tukki, joita ammattitaitoinen hirrenveistäjä ei ikinä käyttäisi kantavana palkkina.</p> <p>Koekappaleita ei rasitettu murtorajatilaan saakka, vaan kuormitus lopetettiin taipuman saavutettua arvon $L/50$, tai kun koelaitteiston kapasiteetin raja (n. 45 kN) tuli vastaan. Kokeen perusteella lasketut taivutusjännitykset vaihtelivat välillä 30 – 40 MPa. Arvot laskettiin tilanteessa, jossa taipuman suuruus oli 60 mm ($L/100$) ja kosteusprosentit n. 23 - 26. Lopullinen murtotilassa laskettu taivutuslujuus olisi kaikilla koekappaleilla ollut suurempi kuin näissä testeissä mitatut taivutusjännitykset ja siten selkeästi paremmat normeihin verrattuna. Kokeessa saatujen mittaustulosten perusteella määritettiin hirsille myös kimmomodulit. Myös nämä tulokset ylittivät suunnitteluohjeiden mukaiset arvot.</p>		
Asiasanat		
Pyöröhirsi, taivutusjännitys, taipuma, käsinveistetty, järeä		

Author	Degree	Time
Teppo Gardemeister	Bachelor of Engineering	April 2017
Thesis Title		
Bending strength examination of round logs		35 pages 9 pages of appendices
Commissioned by		
TT-Salvos Ky		
Supervisor		
Jani Pitkänen, Senior Lecturer		
Abstract		
<p>The objective of this thesis was to define the bending stress of hand crafted round logs and compare it with Eurocode 5 calculated strength. Because there is no industrial testing and this kind of test method would be needed in future, the equipment had to execute from beginning to end.</p> <p>There is some documented research on small-diameter round logs and also large-sized sawn material but nothing concerning massive round logs. Thus, assumable this kind of bending test had not been made earlier with logs of this size.</p> <p>For this research, eight logs were felled with diameters between 200 and 350 mm. Sampling included spruce and pine logs. The test equipment consisted of tripod supports, ground guy, hydraulic cylinder, pressure gauge and line string with a measure scale. The test specimen was set on supports, centralized, and concentrated load was caused with a hydraulic cylinder. Bending and hydraulic pressure were documented with video camera so that the string line, measure scale and pressure gauge were visible in the same view.</p> <p>The result indicate that a handcrafted round log have higher load capacity than sawn material. Figured out that test specimens strength in permitted bending limit corresponded nearby Eurocode 5 breaking strength for round wood material. Test specimens were fresh, with moisture content of 23-26 %, which weakens stiffness and strength of the logs. However, due to minor sampling, the results may only be directional. Therefore, further tests are necessary to calculate bending more accurately.</p>		
Keywords		
Round log, hand crafted, bending, strength		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	6
2	LÄHTÖTIEDOT TUTKIMUKSEEN.....	7
2.1	Pyöröhirsipalkkien käyttö rakentamisessa	7
2.1.1	Vesikaton pääkannattajana	7
2.1.2	Välipohjakannattajana	8
2.1.3	Muut palkit, kuten aukkojen ylitykset	8
2.2	Aiemmat tutkimukset aiheesta	9
2.2.1	Puu maatilarakentamisessa	9
2.2.2	Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa.....	10
2.2.3	VAKOLA:n tiedote 81/2000	10
2.2.4	VAKOLA:n tiedote 83/2000	11
2.2.5	Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet.....	12
2.3	Mitoituksen perusteet.....	13
2.4	Kuormitukset taivutuskokeissa	17
3	TUTKIMUKSEN TOTEUTUS.....	17
3.1	Koekappaleet.....	17
3.2	Mittausten käytännön toteutus	18
3.2.1	Työturvallisuus	18
3.2.2	Mittauspaikan valmistelu	20
3.2.3	Koejärjestely, kuormituksen ja taipuman toteaminen, dokumentointi	21
3.2.4	Mittaustarkkuuden varmistaminen.....	23
3.2.5	Tieteellinen toistettavuus.....	24
3.2.6	Menetelmän käyttömahdollisuudet.....	24
4	TULOKSET	25
4.1	Yleistä.....	25

4.2	Kappaleiden ominaisuudet	26
4.2.1	Oksasummat	26
4.2.2	Mittauskosteus kappaleittain	27
4.2.3	Vuosilustojen paksuus	29
4.3	Laskennalliset lujuudet kun kappaleet ovat kuivuneet käyttökosteuteen	31
4.4	Kappaleiden kestävät kuormitukset	31
5	YHTEENVETO	33

LÄHDELUETTELO

LIITTEET

1 JOHDANTO

Olen toiminut rakennusalan pienyrittäjänä vuodesta 2002 ja yritykseni päätoimiala on käsinveistettyjen hirsikehikoiden tuotanto. Työssäni olen toisinaan ihmetellyt kuntien rakennusvalvonnan suurta luottamusta toimintaani: yhtään kertaa valvojat eivät ole kyseenalaistaneet toteuttamieni hirsirakennusten harjahirsien tai muiden palkkien, kuten välipohjan kannattimien lujuutta, vaikka jännevälit pisimmillään ovat lähennelleet kymmentä metriä. Toki olen suurimpiin rakennuksiin valinnut erityisen järeitä ja hyvälaatuisia eli tiheäsyisiä, vähäoksaisia ja suorita puita.

Ilmeisesti silmävarainen arvioni on ollut kohdallaan, koska myöskään yhtään rekламаatiota ei ole taipumien johdosta eteen tullut. Mahdollisia ylimitoituksia on vaikea arvioida, mutta niiden taloudelliset vaikutukset ovat käytännössä merkityksettömiä. Työstä ja materiaalista aiheutuva lisäkustannus ylijäreän harjahirren vuoksi voidaan laskea enintään muutamissa kymmenissä euroissa.

Tarve järeiden, käsinveistettyjen pyöröhirsien taivutuslujuuksien selvittämiseen tuli siis omista henkilökohtaisista syistä, eikä tällä työllä siten ole varsinaista ulkopuolista tilaajaa. Meitä käsityönä hirsirakennuksia veistäviä yrittäjiä kuitenkin löytyy vielä sen verran, että tarve selkeille ja luotettaville mitoitusohjeille sekä kenttäolosuhteissa toteutettavissa olevalla testausmenetelmälle oli nähtävissä.

Tässä työssä pääsen monipuolisesti kehittämään ja hyödyntämään muitakin, kuin rakennustekniikan oppeja. Eri työvaiheissa tarvitaan niin konetekniikan, hydraulikan, mittaustekniikan, maarakentamisen, lujuusopin, metsätalouden, kuin metsurinkin taitoja.

2 LÄHTÖTIEDOT TUTKIMUKSEEN

2.1 Pyöröhirsipalkkien käyttö rakentamisessa

Suomi kuuluu pohjoiseen havumetsävyöhykkeeseen ja pyöröhirsien raaka-ainetta on saatavissa joka puolella maata, yleensä hyvinkin läheltä rakennuspaikkaa. Hirsien valmistus ei vaadi suuria kone- ja laiteinvestointeja ja tuotanto on varsin työvoimavaltaista. Pyöröhirren jalostusaste pysyy matalana ja uusiutuvana materiaalina sen käyttö on erittäin ekologista. Materiaalin hukka työstövaiheessa on pientä, eikä varsinaista hävitettävää jätettä synny lainkaan. Muodostuva kuori- ja vuolujäte voidaan kompostoida tai hyödyntää polttopuuna tai maanparannusaineena.

Hirsirakennuksissa tarvitaan monissa paikoissa kantavia palkkeja, jotka ulkonäkösyistä toteutetaan usein pyöröhirsinä, vaikka rakennuksen runko muutoin olisi toteutettu höylä- tai pelkkahirrestä. Pyöreäprofiilisia kannatinpalkkeja käytetään usein myös muissa kuin hirsirakennuksissa haettaessa tietyn henkistä arkkitehtuuria; rustiikkia, kansallisromantiikkaa tms. Seuraavassa joitakin esimerkkejä kohteista, joissa pyöröhirsipalkkeja tarvitaan ja käytetään.

2.1.1 Vesikaton pääkannattajana

Kurkihirsi on todennäköisesti vaativin rakenneosajohdun kuormituksen suurista muutoksista; lumikuorma, ja siitä, että harjapalkkina pyritään käyttämään yksittäistä hirttä, jonka tulee kantaa kattorakenteiden oman painon lisäksi suuresti vaihteleva ja toisinaan kuukausia rasittava lumikuorma. Teolliset hirsivalmistajat käyttävät nykyisin pääsääntöisesti kurkihirsinä liimapuupalkkeja, jotka ulkonäöllisesti poikkeavat varsin paljon vakiohirsistä.

Kahden tai useamman päällekkäisen kurkihirren käyttö on toki mahdollista, mutta tällöin yläkerran tai parven sisäkorkeudesta joudutaan yleensä tinkimään tai vaihtoehtoisesti joudutaan koko rakennusta korottamaan yhdellä hirsikerralla, jolla on jo huomattava kustannusvaikutus. Lisäksi kahden tai useamman kurkihirren käytön seurauksena rakennuksen julkisivujen arkkitehtuuri usein kärsii.

2.1.2 Välipohjakannattajana

Lujuusvaatimuksissa merkittävimmissä osassa on värähtely, mikäli kyseessä on useampikerroksinen rakennus. Mitoitusta helpottaa kuormituksen pienempi vaihtelu ja se, että välipohja koostuu useasta rinnakkaisesta kannatinpalkista. Hirsistä toteutettuna tavallisin koolausjako on noin yksi metri (= kk 1000 mm). Yksikerrosratkaisussa jänneväli voidaan suurimmillaan kasvattaa jopa kymmeneen metriin, jolloin kannatinhirret ovat varsin massiivisia: läpimitat yli 300 mm. Tämän suuruisilla jänneväleillä pieniin, pidemmän aikavälin muodonmuutoksiin täytyy varautua ja olla valmis ne hyväksymään, koska puun ominaispiirteisiin kuuluu tietty viruma pitkäaikaisissa kuormituksissa. Tyypillisesti esimerkiksi hirsirakennusten sisäkattojen keskikohdalle tulee 10 - 30 mm taipuma. Muuttumattomissa ympäristöolosuhteissa viruma on riippumaton kosteudesta ja sen suuruuden määrää pääasiassa pysyvä kuorma. (Pihlajamaa 1995, 36.) Kun välipohjan kuormat ovat tiedossa, voidaan kannatinpalkit mitoittaa ja testata tällä samalla menetelmällä taipuman ja lujuuden selvittämiseksi.

2.1.3 Muut palkit, kuten aukkojen ylitykset

Rasitukset on laskettava tapauskohtaisesti, mutta tämän tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää materiaaliominaisuuksien osalta palkin läpimittaa määrittäessä. Kun palkkiin kohdistuva taivutusmomentti ja luotettava puumateriaalin lujuusluokka on tiedossa, voidaan helposti määrittää tarvittava hirren minimiläpimitta.

Tuntuma on, että nykyiset rakennesuunnittelijat eivät oikein osaa mitoittaa muuta kuin standardikokoista sahatavaraa, liima- ja kertopuuta. Esimerkki todellisesta, toteutuneesta korjaushankkeesta: Kohteena vanha historiallisesti arvokas Lapinjärven kartanorakennus, jonka suurehkon salin sisäkatto tuli saada tuettua yläpuolisella ripustusratkaisulla, koska vesikattorakenteisiin sidottu teräksinen vetotankokannatin oli aiheuttanut kattorunkoon suuren taipuman. Rakennesuunnittelijan määräyksestä kannatinpalkki toteutettiin neljällä toisiinsa ruuvatulla 51 x 300 mm:n kertopuupalkilla sen sijaan, että paikallinen kenttäsirkkelisahuri olisi sahanut yhden noin 200 x 350 mm palkin tiheäsyisestä kuusen- tai männyntyvestä.

Raaka-aineen materiaalikustannus ja sahauspalkkio yhteensä tuskin olisivat olleet edes yhden kertopuupalkin verran. Toki tämän kokoluokan tukin/palkin liikuttelu vaatii konevoimaa jokaisessa työvaiheessa, mutta eivät ne kertopuutkaan kottikärryillä työmaalle ilmesty.

2.2 Aiemmat tutkimukset aiheesta

Tavallisesta sahatavarasta ja yleensä puusta materiaalina on tehty lujuustutkimuksia valtavasti. Olen itsekin tehnyt pienten, tasalaatuisten kappaleiden taivutus- ja puristuslujuuskoesarjat puukaupallisen linjan metsätalousinsinöörin opintoihin kuuluvalla saha- ja levytuotteiden laboratorioskursilla.

Sahateollisuudessa syntyy valtaisa datamäärä puumateriaalin lujuudesta, koska lujuuslajiteltu sahatavara pääasiallisesti ajetaan testauslaitteiston läpi, eli jokaisen lujuusleimatun sahatavarakappaleen taivutusjännitys on konkreettisesti testattu. Valitettavasti tätä datamäärää on vaikea hyödyntää tutkimuksessa, koska testattujen kappaleiden oheistiedot, kuten tiheys, vuosilustojen paksuus, kasvupaikka jne. yleensä puuttuvat. Ainoastaan valtakunnallisessa mittakaavassa voidaan tehdä yleisiä päätelmiä metsänkasvatuksen tilasta ja suunnasta. Useinhan kuulee väitteitä, ettei nykymetsissä enää kasva tiheäsyistä, laadukasta puuta vaan tehometsätalous tuottaa nopeasti kasvanutta ja lujuudeltaan heikkoa materiaalia. Tämän tutkimuksen kannalta sahalaitosten lujuusmittausten tuloksilla ei oikein olisi ollut hyötykäyttöä.

Pyöreää puutavaraa käsittelevää tutkimustietoa oli varsin niukasti saatavilla. Pienestä, lähinnä ensiharvennuskokoisesta, pyöreästä puusta löytyi joitakin tutkimuksia, mutta tukkikokoisesta, yli 200 mm:n läpimittaisesta tavarasta ei oikeastaan mitään. Seuraavassa on lyhyt kooste löytyneistä tutkimuksista, jotka käsittelevät pyöreän/järeän puutavaran lujuutta ja käyttöä rakentamisessa.

2.2.1 Puu maantilarakentamisessa

Tässä 73-sivuisessa raportissa keskityttiin pääasiassa tavanomaisiin sahatavarasta toteutettuihin rakenteisiin ja pyöreän puun käytöstä oli kirjoitettu yksi sivu, johon oli tiivistetty laaja kokonaisuus pylväsperustuksista runkorakenteisiin. Ehkä

merkittävin anti oli, että raportista selvisi puun muodon vaikutus lujuuteen, mikä osoittaa pyöreän puun olevan lujuudeltaan parempaa kuin sahatavaran. Syyksi tähän todettiin ehjä syy rakenne ja oksien edullinen sijainti rasetuimmissa kohdissa poikkileikkausta. Luonnollisessa pyöreässä muodossa puun taivutuslujuus osoittautui jopa kolminkertaiseksi sahattuun materiaaliin verrattuna. (Lahtela 2008, 55.)

2.2.2 Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa

Samankaltaiseen tulokseen päätyy VTT:n rakennustekniikan tutkimusprofessori Alpo Ranta-Maunus tutkimuksessaan (1990) pyöreän puun käytöstä. Tässä EU-hankkeessa selvitettiin viidessä Euroopan maassa mahdollisuuksia pieniläpimittaisen, halkaisija 100–150 mm, lähinnä ensiharvennuspuun käytön lisäämiseen rakentamisessa. Samalla tutkittiin pyöreiden puiden lujuusominaisuuksia. (Ranta-Maunus 1990.)

Valitettavasti tässäkin raportissa pääpaino oli lujuusominaisuuksien sijasta toisarvoisissa asioissa, kuten puun korjuussa, kuorinnassa, kuivauksessa ja pyöreän rakennuspuun markkinoinnissa. Lujuustutkimuksen osuudessa selvisi, että kuusen taivutuslujuus oli noin kolmanneksen parempi kuin männyn vastaava. Sama toistui kimmokertoimen ja puristuslujuuden osalta. Lujuuskokeiden alustavat tulokset ovat liitteenä olevassa taulukossa. (Liite 1)

2.2.3 VAKOLA:n tiedote 81/2000

Maatalouden tutkimuskeskuksen tiedote jakautuu kahteen tutkimukseen ja pureutuu aiheeseen erityisen tieteellisesti. Ensimmäinen osa, joka käsittelee pienen pyöreän puun lujuusominaisuuksia, onkin tarkoitettu väitöskirjaksi. Tutkimuksessa selvitettiin Suomessa kasvaneen pieniläpimittaisen kuusen ja männyn mekaanista lujuutta. Mielestäni tärkein anti oli pyöreän puutavaran lujuuslajitteluohjeen (Boren 2000, 9) luominen.

Koetulokset osoittivat taivutuslujuuden olevan yli 30 N/mm², joten tämän perusteella pyöreä puu kuuluisi lujuusluokkaan C30. Kun puristuslujuus, kimmokerroin ja tiheys tutkittiin, lujuusluokka aleni C18:aan. Näin ollen EC 5:n tulkinta kaiken

pyöreän puun kuulumisesta T30-lujuusluokkaan on virheellinen. (Boren 2000.) Pieniläpimittainen pyöreä puu pitää lajitella, jotta lujuusluokka T30 saavutetaan.

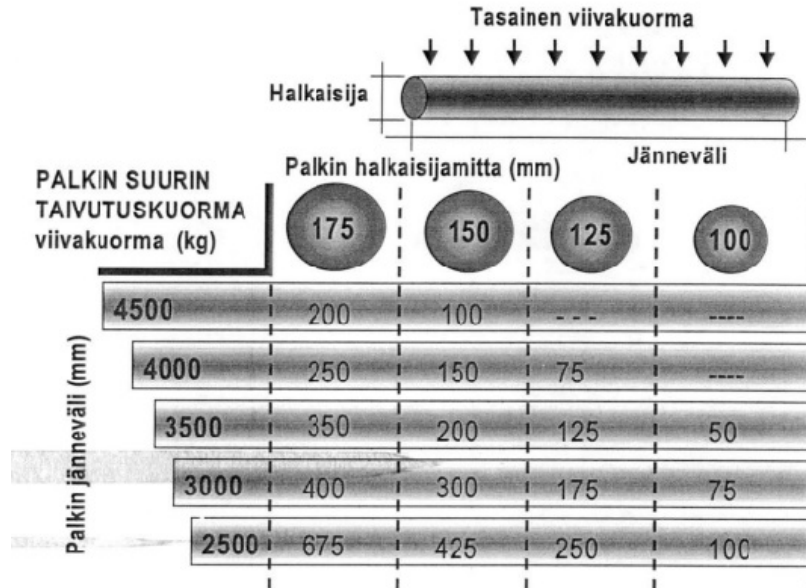
Viimeisimmän päivityksen mukaan ”Havupuutukeista valmistetun lajittelemattoman pyöreän puutavaran sekä pyörö- höylä- ja massiivipuuhirren lujuus- ja jäykkysominaisuuksien voidaan katsoa vastaavan sahatavaran lujuusluokkaa C24 edellyttäen, että puu ominaisuuksiltaan vastaa Suomessa kasvanutta puuta. Tällainen puutavara ei sisällä liimausta eikä sormijatkoksia”. (RIL 2009.)

Jostain syystä kaikenlainen pyöreä puu pitäisi luokitella luokkaan C24 riippumatta, onko kyseessä luontainen, kuorimalla saavutettu pyöreys, vai esim. sorvattu kappale. Rakennesuunnittelijan näkökulmasta ohje on sikäli hankala, että pyöröhirsisten palkkien läpimitat karkaavat nopeasti jännevälien kasvaessa. Toki suunnittelija voi edellyttää määrättyä lujuusluokkaa ja se on myös teoreettisesti mahdollista etukäteen määrittää silmävaraisesti.

2.2.4 VAKOLA:n tiedote 83/2000

Tässä pienen pyöreän puun käyttöä rakentamisessa käsittelevässä raportissa esitellään varsin laajasti pyöreän puun käyttömahdollisuuksia erilaisissa kohteissa sekä tyypillisiä kohtuullisen helposti toteutettavia liitoksia, joissa ei vaadita

erityisosaamista eikä kovin perusteellista rakennesuunnittelua. Tiedotteessa esitetään pienehköille jänneväleille soveltuva mitoitusaulukko, (kuva 1) jossa on pi-tuudet ja läpimitat eri kuormille.



Kuva 1. Mitoitusohje erikokoisille pyöreille palkeille (Kivinen 2000, 18)

2.2.5 Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet

Tämäkään tutkimusraportti ei anna vastausta järeiden pyöröhirsien mitoitukseen, mutta selvittää puun materiaaliominaisuuksia paremmin kuin pienten kappaleiden lujuustutkimukset. Tuloksien mukaan kappaleiden keskimääräinen taivutuslujuus oli hieman yli 45 MPa (Pihlajamaa 1995, 67). Tutkimus osoittaa myös, että kuusi on painoensa verrattuna lujin puulajimme. Kuusen ominaisuuksien on todettu vaihtelevan paljon vähemmän, kuin männyn, jolla esim. lujuuksien hajonta on suuri. (Pihlajamaa 1995, 25.)

Tämän oletan johtuvan männyn tyvi- väli- ja latvatukkien suurista eroavaisuuksista: Tyvi on usein pintapuunsa osuudelta jopa täysin oksaton, kun taas välitu-keissa on suuria, tyypillisesti kuivia, jopa lahoja oksia ja latvatukeissakin oksien koko kasvaa helposti 30 – 50 mm. Mielestäni näitä rungon eri osista katkottuja mäntytukkeja ja niistä saatavia sahatavara-kappaleita ei tulisi verrata keskenään.

Hyvä huomio on, että lenkojen, vinosyisten epäpyöreiden yms. epäkuranttien tukkien sahaaminen katkoo runsaasti syitä. Jälleen yksi vahva peruste käsinveistettyjen pyöröhirsien eduksi. Kun pinnasta poistetaan tasaisesti muutaman vuosikasvun paksuinen kerros, syy rakenne pysyy ehjänä puun alkuperäisen muodon säilyessä ennallaan. Lisäksi suorista ja täydellisen pyöreistä muodoista poikkeavat hirret tuovat hirsiseinään miellyttävän näköistä vaihtelua ja elävyyttä. Hyvinkin lenko tai mutkainen puu voidaan hyödyntää ovi- ja ikkuna-aukkojen reunojen lyhyissä pätkissä. Yleensä ei ole aina tarpeen tehdä metsässä kovin tarkkaa valikointia pystypuiden suhteen: läpimitta ratkaisee. Mutkaiset ja muuten vialliset tukit voidaan sopivasti asettelemalla sovittaa kehikkoon siten, että vikaisuudet peittyvät hirren saumaan tai esim. saunan lauteiden alle tai keittiökaapiston taakse.

Suurin lujuutta heikentävä vikaisuus on oksat. Syynä tähän on, että puumateriaalin vetolujuus kohtisuoraan syysuunnassa on vain 5 - 10 % syiden suuntaiseen vetolujuuteen, mikä tarkoittaa, että puu halkeaa helpommin kuin katkeaa. Koska oksa syysuunnasta ja tiheydestä johtuen kutistuu enemmän kuin ympäröivä puuainekse, oksa usein halkeaa ja erityisesti männyllä kuivat oksat tyypillisesti irtoavat ympäröivästä puusta. Joka tapauksessa oksan kohta menettää pienenkin vetolujuutensa.

Suunnitteluohjeiden lähtökohtana olevat lujuusarvot on määritelty pienien, virheettömien koekappaleiden testeillä eikä täyden mittakaavan kokeita ole juuri tehty. Weibullin teorian mukaan kappaleen lujuus heikkenee sen koon kasvaessa, mutta jännevälillä vaikutusta ei huomioida suomalaisissa eikä eurooppalaisissa suunnitteluohjeissa. Tämän tutkimuksen tarkoitus oli nimenomaan selvittää täysikokoisen pyöröhirren todellinen kapasiteetti määrättyillä taipumilla. (Pihlajamaa 1995, 46.)

2.3 Mitoituksen perusteet

Kosteus ja sen vaihtelu vaikuttavat varsin suuresti puun lujuuteen ja pitkäaikaisessa rasituksessa muodonmuutoksiin. Tämä seikka huomioitiin ainoastaan het-

kellisen rasituksen osalta mittaamalla koekappaleiden absoluuttinen kosteus välittömästi taivutuskokeiden jälkeen otetuista koepaloista punnitus-kuivaus-punnitus-menetelmällä. Näin voidaan tarvittaessa jälkikäteen tutkia laskennallisia lujuuden muutoksia eri kosteusolosuhteissa.

Koska pyöröhirsirakennukset veistetään varsin tuoreesta puumateriaalista, oli tarpeetonta arvioida teoreettisia lujuuksia siinä tai tuossa kosteusprosentissa, koska harjahirren tulee kestää esim. lumikuorma myös ensimmäisinä vuosina ennen lopulliseen käyttökosteuteen kuivumistaan.

Pyöröhirttä käytetään pääasiassa vapaa-ajanrakennuksissa, joten mitoituksen lähtökohdaksi otettiin alle 100 m²:n rakennukset, sillä näissä kurkihirren jänneväli on tyypillisesti enintään 10 m. Mitoituksen perustaksi muodostettiin laskentataulukko Eurokoodi 5:n mitoitusohjeiden pohjalta käyttäen pyöreän puun lujuusluokkana C24:ää. (Taulukko 1) Taulukkoon valittiin yleisiä pohjamittoja 3 - 10 metrin väliltä siten, että harjan suuntainen sivu on hieman pidempi kuin päätyseinä. Taulukosta näkee yhdellä silmäyksellä useita tavanomaisia pohjamittoja ja se antaa myös mahdollisuuden kokeilla nopeasti erilaisten pohjaratkaisujen, kattokulmien ja kuormitusten vaikutusta harjahirren vaadittavaan läpimittaan.

Taulukko 1. kurkihirren laskennallinen läpimitta

Harjan pituus (m)	Päätyseinä (m)	Harjan kuorma (kN)	Viivakuorma (kN/m)	Taivutusmomentti (kNm)	Kurkihirren lpm (mm)
3	2	7,01	2,34	2,6	110
4	3	14,01	3,50	7,0	153
5	4	23,35	4,67	14,6	195
6	5	35,03	5,84	26,3	237
7	6	49,04	7,01	42,9	280
8	7	65,39	8,17	65,4	322
9	8	84,07	9,34	94,6	364
10	8	93,42	9,34	116,8	390

Laajempi taulukko muuttujineen, mm. kuormat, kattokulma, ohjeet ym. liitteenä. (Liite 2) Taulukossa pohjan mitat ovat käyttäjän itse valittavissa ja kuormat, taivutusmomentti ja harjahirren läpimitta muodostuvat annettujen arvojen perusteella seuraavassa esitetyillä kaavoilla.

$$Q_{\text{harja}} = \frac{L * W}{2} * Q_{\text{sq}}$$

Jossa Q_{harja} = harjan kokonaiskuorma (kN), L = harjan pituus/jänneväli (m), W = päätyseinän leveys (m) ja Q_{sq} = katon kuorma (kN/m²)

$$Q_{\text{line}} = \frac{W}{2} * Q_{\text{harja}}$$

Jossa Q_{line} = viivakuorma harjalla (kN/m), W = päätyseinän leveys (m) ja Q_{harja} = harja kokonaiskuorma (kN)

$$M_{\text{max}} = \frac{Q_{\text{line}} * L^2}{8}$$

Jossa M_{max} = taivutusmomentti, Q_{line} = viivakuorma harjalla (kN/m), L = harjan pituus (m)

$$d = \sqrt[3]{\frac{M_{\text{max}}}{\frac{\pi}{32} * f_{m,d}}}$$

Jossa d = läpimitta (mm), M_{max} = taivutusmomentti (Nmm), $f_{m,d}$ = materiaalin suunnittelulujuus (N/mm²). Tässä tapauksessa käytetty 24 N/mm². Mitoituskaavat taulukossa on laadittu siten, että päätykolmiot tehdään hirrestä, jolloin kattokannattajat kiinnitetään liukuvina sivuseinään. Mikäli harjahirsi asennetaan pilareiden varaan, tilanne muuttuu huomattavasti, koska tällöin kuormia siirtyy kurkihirreltä sivuseinille kattokannattajien ja sivuseinien muodostamaa kehärakennetta pitkin. (Kuva 2) Toisin sanoen osa harjahirteen kohdistuvasta pystykuormasta siirtyy kattokannattajan normaalivoimana sivuseinään kohdistuvaksi vaakavoimaksi.

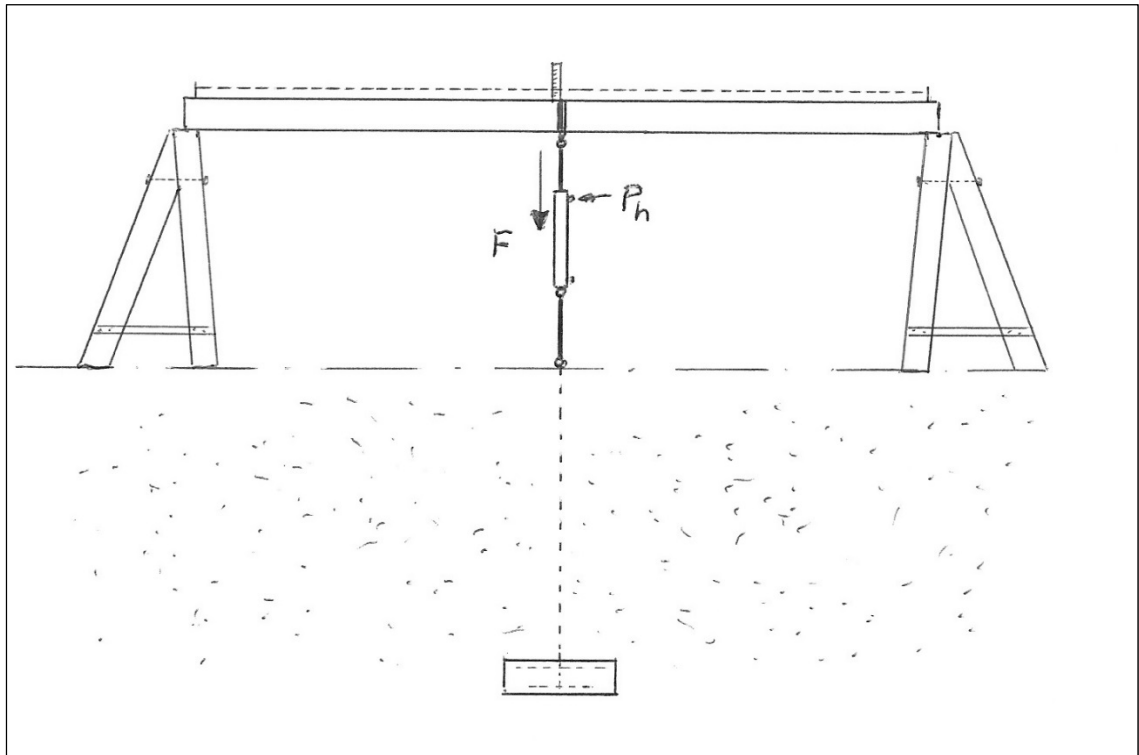


Kuva 2, pilareilla toteutettu kurkihirsi (Gardemeister 2014)

Kattorakennetta voidaan vahvistaa lisää sijoittamalla välipohjan kannattajat kohtisuoraan harjahirteen nähden, jolloin välipohjavesat toimivat vetosauvoina estäen sivuseiniä pullistumasta ulospäin. Tällöin riittävän jyrkällä kattokulmalla voitaisiin periaatteessa harjahirsi jättää kokonaan pois, kuten vanhoissa esim. rintamamiestaloissa perinteisesti on tehty.

2.4 Kuormitukset taivutuskokeissa

Koska mittausmenetelmä haluttiin pitää yksinkertaisena ja helposti kenttäolosuhteissa toteutettava (Kuva 3) päädyttiin yhteen palkin keskelle kohdistettavaan pistekuormaan sen sijaan, että palkkeja olisi kuormitettu standardin mukaisesti kahdella pituuden kolmannespisteisiin kohdistetulla pistekuormalla. Kuvassa "F" tarkoittaa koekappaleeseen kohdistuvaa voimaa ja "P_h" sylinterin hydraulista painetta.



Kuva 3, taivutuskoejärjestely, (Gardemeister 2017)

3 TUTKIMUKSEN TOTEUTUS

3.1 Koekappaleet

Tutkimusta varten kaadettiin joulukuussa 2015 mänty- ja kuusirunkoja, joista katkaistiin yhteensä kahdeksan kappaletta noin kuusi metriä pitkiä tyvitukkeja. Puut kuorittiin ja vuoltiin siten, että pinnasta poistettiin enintään n. viiden mm:n kerros puuta. Tämän jälkeen tukit koottiin rimoilla erotettuina taapeliin ja suojattiin vesisateilta. Kappaleiden annettiin kuivua kesän 2016 ajan aurinkoisella ja avoimella

paikalla Utin teollisuusalueella Kirvuntiellä. Koekappaleet numeroitiin tukin päähän naulatuilla vanerilapuilla, jotka seurasivat koekappaleita koko tutkimuksen ajan. Jokaisesta tutkittavasta kappaleesta kerättiin seuraavat ominaisuustiedot:

Kaadettaessa:

- Puulaji
- Kasvupaikkatiedot (taustatiedoksi arvioitaessa esim. vuosiluston paksuutta ja tiheyttä)

Taivutuskokeen yhteydessä:

- Kosteus mittaushetkellä
- Läpimitat tyvestä, keskeltä ja latvasta
- Vuosilustojen keskimääräinen paksuus ja puun ikä
- Oksaisuus (oksasumma)

Koekappaleiden ominaisuudet on eritelty tarkemmin tulokset -osiossa. (4.2.3./Taulukko 4)

3.2 Mittausten käytännön toteutus

3.2.1 Työturvallisuus

Koska tutkittavat kappaleet ovat painavia ja käytettävät voimat suuria, oli taivutuskokeen turvallinen toteutus ensiarvoisen tärkeää. Tämän vuoksi tehtiin riskianalyysi koetilanteesta.

Riskien arviointi, millaisia vahinkoja kokeen aikana voisi tapahtua?

Koekappaleen äkillinen murtuminen kuormituksen aikana

Koska koekappaleet ovat raskaita, suurin riski todennäköisesti aiheutuisi kappaleen pään putoamisesta tuelta kappaleen murtuessa. Katkeamiskohdasta saataisi myös singota teräviä puunpalasia, jotka voisivat aiheuttaa henkilövahinkoja.

Todennäköinen suunta olisi alas ja sivulle, mutta aivan vieressä ei kannattaisi seisokella missään suunnassa.

Testauslaitteiston rikkoutuminen

Tukien toteutus oli suunniteltava huolellisesti, jotta ne eivät kaatuisi tai muuten rikkoutuisi kuormitustilanteessa. Tukipukkien ohella vetolaitteiston riskitekijät oli kartoitettava, hydrauliletkut, liittimet, painemittari, sylinteri ym. tarkastettaisiin huolellisesti ennen jokaista kuormituskoetta. Tässä tapauksessa toimittaisiin tärkeällä pohjavesialueella, joten hydraulioöljyn vuodoissa noudatettaisiin ns. nollatoleranssia. Vetoliinan ja muiden kiinnittimien lujuuden tulee vastata käytettäviä voimia eikä niissä saa olla hiertymiä tai muita vaurioita.

Koekappaleiden asettaminen ja poistaminen tukipukkien päältä

Kappaleiden painon vuoksi nostot on tehtävä konevoimin ja asettelussa tulee noudattaa suurta huolellisuutta, ettei kappale pääse putoamaan esim. vetoliinaa asennettaessa. Kappaleen päät asetetaan tuelle vähintään 100 mm:n pituudelta lipsahtamisen estämiseksi. Suunnitteluvaiheessa harkittiin myös vaihtoehtoja kappaleen ja tuen välisen kitkan kasvattamiseksi: esimerkiksi pienisilmäinen teräslankaverkko, sora tms. Osoittautui, että tälle ei ollut tarvetta, koekappaleet pysyivät hyvin paikoillaan.

3.2.2 Mittauspaikan valmistelu



Kuva 4, haruksen valmistelua (Gardemeister 2016)

Kokeita varten tarvittiin tukevasti maahan ankkuroitu vetoharus. Salpausselän harjulla Utissa sijaitsevalla teollisuustontilla peruskallio löytyy vasta usean kymmenen metrin syvyisen hiekkakerroksen alta, joten kallioon harustaminen ei tullut kyseeseen. (Kuva 4) Oli siis kaivettava hiekkaan noin 2,5 metrin syvyinen kuoppa, jonka pohjalle valettiin 800 x 800 mm:n levyinen ja 250 mm paksuinen betonilaatta. Valun keskelle sovitettiin kuumasinkitty M24 8.8 kierretanko, jonka päähän oli hitsattu neljästä 10 x 40 mm:n lattaraudasta ristikko. (hitsi: ESAB 48.00) Laatan rauditus mitoitettiin käänteisenä pilarianturana kestämään 100 kN:n keskeinen pistekuorma. Asennussyvyydestä johtuen ei ollut tarpeellista mitoitaa laattaa kierretangon vetolujuutta, noin 290 kN, vastaavaksi, koska näin suuri vetovoima nostaisi koko haruksen maasta. Kaivanto täytettiin hiekalla ja kivillä sekä maan pinta tasattiin haruksen ympäriltä. Koekappaleiden tuet valmistettiin n. 300 – 350 mm:n pyöröhirsistä kolmijalkamallisina. (kuva 5)



Kuva 5, Harus ja tukipukit valmiina (Gardemeister 2016)

3.2.3 Koejärjestely, kuormituksen ja taipuman toteaminen, dokumentointi

Koejärjestely toteutettiin tukemalla koekappale päistään ja kuormitus kohdistettiin kappaleen keskikohtaan vetämällä kappaletta hydraulisynterillä alaspäin. Vetosylinterin kiinnitys koekappaleeseen tehtiin leveän nostoliinan ja sakkeiden avulla, jolloin vältettiin kappaleen pinnan muodonmuutokset, joita väistämättä tapahtuisi, mikäli kuormitus kohdistettaisiin esimerkiksi kovan teräslevyn välityksellä.

Taipuma luettiin koekappaleeseen päistään pingotetun linjalangan ja kappaleen keskelle kiinnitetyn mitta-asteikon avulla. Taivutuskokeiden dokumentointi suoritettiin videokuvauksella, jossa taltioitiin painemittarin lukema ja kappaleen taipuma em. mitta-asteikkoa ja linjalankaa hyödyntäen. (Kuva 6)



Kuva 6, painemittarin, linjalangan ja kameran asettelu (Gardemeister 2017)

Tarvittava pistekuorma tuotettiin sylinterillä, jonka männän halkaisija on 80 mm, varren 40 mm ja iskun pituus 600 mm. Tämän sylinterin vetopuolen tehollinen vetopinta-ala P on 3770 mm² (männän ala – varren ala) joten esim. 10 baarin (=1 MPa tai 1 N/mm²) paine kohdistaa mäntään 3,77 kN:n voiman:

$$P = \frac{F}{A} \rightarrow F = P * A \rightarrow 1 \text{ N/mm}^2 * 3770 \text{ mm}^2 = 3770 \text{ N}$$

Jossa P = paine, F = voima ja A = pinta-ala.

Tavanomaisen maataloustraktorin hydrauliiikan työpaineella 0 - 160 bar pystytään tuottamaan maksimissaan n. 60 kN:n vetovoima. Erityistapauksissa päästään n. 75 kN:n kuorman nostamalla työpainetta tai käsikäyttöisellä hydraulikoneikolla. Sylinterin suurin sallittu työpaine on 210 bar.

Kuormituksen I. voiman mittausta varten asennettiin painemittari sylinterin veto-puolen letkulinjaan. Painemittarin asteikko on viiden baarin jaotuksella ja viivävälillä pystyy kohtuullisella lukematarkkuudella puolittamaan. Näin ollen tämän laitteen mittaustarkkuus on pyöreästi 1 kN (=0,94 kN) ja mittausalue 2 - 60 kN. Koska mitattavien kappaleiden lujuusvaatimukset ovat luokkaa 10 – 50 kN, laitteen tarkkuus ja mittausalue vastaavat tarkoitusta. (Taulukko 2)

Taulukko 2, sylinterin tuottama voima eri paineilla

Paine (bar)	Voima (kN)	Paine (bar)	Voima (kN)	Paine (bar)	Voima (kN)
5	1,88	50	18,85	110	41,47
10	3,77	60	22,62	120	45,24
15	5,65	70	26,39	130	49,01
20	7,54	80	30,16	140	52,78
30	11,31	90	33,93	150	56,55
40	15,08	100	37,70	160	60,32

3.2.4 Mittaustarkkuuden varmistaminen

Koska kyseessä ei ole laboratoriomittalaitteilla toteutettava koe, jouduttiin mittaustarkkuudesta jonkin verran tinkimään. Mittausjärjestelyitä suunniteltaessa otettiin lähtökohdaksi ja tavoitteeksi enintään 5 %:n virhemarginaali, joka on mittaustulosten varmuuskertoimiin suhteutettuna riittävän tarkka. Suunnitteluvaiheessa vaihtoehtoisina mittausmenetelminä oli koukkuvaaka -tyyppinen voimamittari ja hydraulisen painemittarin käyttäminen. Mittausmenetelmän luotettavuuden varmistamiseksi voitaisiin käyttää verrokkina esimerkiksi teräspalkkia, jonka taipuma eri kuormituksilla on varmuudella tiedossa.

Tämä tutkimusjärjestely on mahdollisesti ensimmäinen prototyyppi laatuaan, joten samalla selvitettiin mahdollisuuksia koejärjestelyn yksinkertaiseen ja kustannuksiltaan edulliseen monistamiseen erilaisilla laitekokonaisuuksilla. Muuttujina hydraulisylinterit, pumput, venttiilit, mittarit, tuet, harukset ym. Koska kaivutyöt,

valut, tarvittavat hitsaukset jne. pystyttiin toteuttamaan ns. omana työnä, varsinaisten laitehankintojen kustannukseksi muodostui muutamia satoja euroja; sylinteri, painemittari, letkut, liittimet, haruksen materiaalit, nostoketjut/sakkelit.

3.2.5 Tieteellinen toistettavuus

Rajallisista resursseista johtuen tämä koesarja jouduttiin toteuttamaan melko pienellä otannalla, mutta tieteellinen arvo pyrittiin varmistamaan mahdollisimman tarkalla dokumentoinnilla koekappaleiden ominaisuuksista, jotta vastaaville kokeille saataisiin hyvä vertailupohja.

Yleensä otantaan perustuvissa kokeissa ei tehdä etukäteisvalintaa koekappaleiden suhteen, mutta se katsottiin tässä tapauksessa tarpeelliseksi. Valitaanhan jokainen kurkihirsikin suuresta joukosta tavoitteena löytää paras ja vahvin puu sinne missä sitä tarvitaan. Koekappaleiden valintaperusteina käytettiin ensisijaisesti oksaisuutta sekä vuosilustojen paksuutta, joka aiempien tutkimusten perusteella selkeästi korreloi puumateriaalin tiheyteen ja lujuuteen. Samoin koekappaleiden lujuudesta tehtiin silmävaraiset arviot VAKOLA:n tutkimusselostuksen määrittämällä perusteilla. (Pihlajamaa 1995, 51.)

3.2.6 Menetelmän käyttömahdollisuudet

Hirsirakennusten veistäjillä saattaisi olla yleisemminkin käyttöä edulliselle menetelmälle varmistaa palkkien kantavuus ja taipuma määrätyllä kuormalla. Mikäli mittaukset voidaan osoittaa luotettavaksi, tästä menetelmästä olisi varmasti suuri hyöty erityisesti vientiyrityksille. Voitaisiin käyttää järeitä ja näyttäviä hirsitä kantavina palkkeina teollisten liimapuupalkkien sijaan ja etukäteen varmistaa mitaamalla jokaisen palkin lujuus.

Työaikaa ei merkittävästi hukkaannu siihen, että hirsi nostetaan pukkien päälle, kytketään vetoliina ja hydraulisesti taivutetaan hirsi sallittuun maksimitaipumaan sekä luetaan painemittarista käytetty vetovoima. Kun laitteisto on käyttövalmiina, aikaa yhden mittauksen tekoon kuluu n. 10 – 15 minuuttia.

Rakennesuunnittelija määrittää tapauskohtaisesti tarvittavan lujuuden ja laskee taivutusmomentin mukaisen pistekuorman, joka hirren pitää sallittujen taipumien rajoissa kestää. Mikäli taipuma osoittautuu sallittua suuremmaksi, tässä vaiheessa on yksinkertaista vaihtaa hirsi esim. läpimitaltaan suurempaan.

Pahimmassa tapauksessa vaihtoehtona on, että alimittainen kurkihirsi tai muu kantava palkki asennetaan paikoilleen ja rakenteet taipuvat kuorman johdosta. Rakennuksen korjaaminen tässä vaiheessa tulee varmasti monin verroin kalliimmaksi, kuin rakenteiden kannalta kriittisten hirsien taivutuslujuuden testaus etukäteen.

4 TULOKSET

4.1 Yleistä

Koekappaleita ei taivutettu murtoon, vaan kuormitus keskeytettiin kun taipuma saavutti $L/50$ arvon tai hydrauliiikan maksimipaine saavutettiin. Kuuden metrin mittaista koekappaletta siis taivutettiin enimmillään n. 120 mm, mikä suoraan sanottuna näytti, ja joissakin tapauksissa myös kuulosti melko hurjalta.

Koekappaleista kolme kesti maksimipaineen eli n. 4500 kg:n kuorman enintään 60 mm:n taipumilla ja kolme muuta enintään 120 mm:n taipumilla. Ainoastaan yksi kappaleista todennäköisesti murtui kokeiden aikana noin 110 mm:n taipumassa. Äänihavainto ja jännitys/taipuma -käyrän kaartuminen osoittavat, että materiaalin myötöraja saavutettiin, mutta koekappaleessa ei ollut nähtävissä merkkejä murtumasta, siksi ilmaisu ”todennäköisesti”.

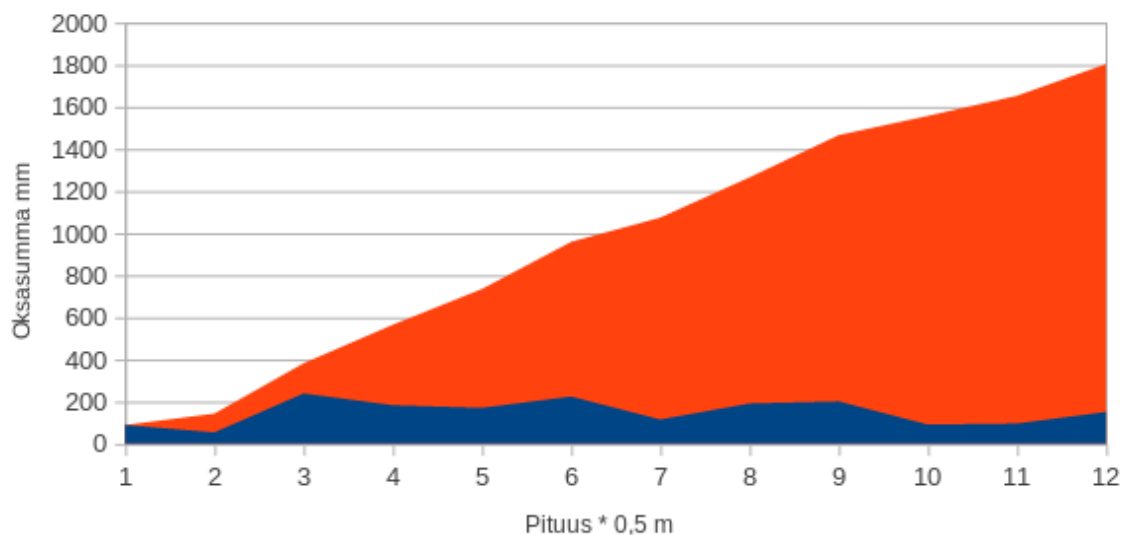
Yksittäisen taivutuskokeen kesto oli noin kaksi minuuttia, jossa ajassa kappale taivutettiin mahdollisimman hitaasti joko enimmäistaipumaan tai suurimpaan kuormitukseen, jonka laitteiston kapasiteetti mahdollisti. Yksi koekappale (17 02) jouduttiin jättämään liian lyhyen pituuden vuoksi taivutuskokeista pois. Tukien väli oli 5870 mm ja koekappaleiden pituudet keskimäärin 6100 mm. Kappaleen 17 02 pituus 5920 mm ei olisi turvallisesti riittänyt sen asettamiseen tukien päälle, eikä tukien siirtäminen yhtä koekappaletta varten ollut vaihtoehto.

4.2 Kappaleiden ominaisuudet

4.2.1 Oksasummat

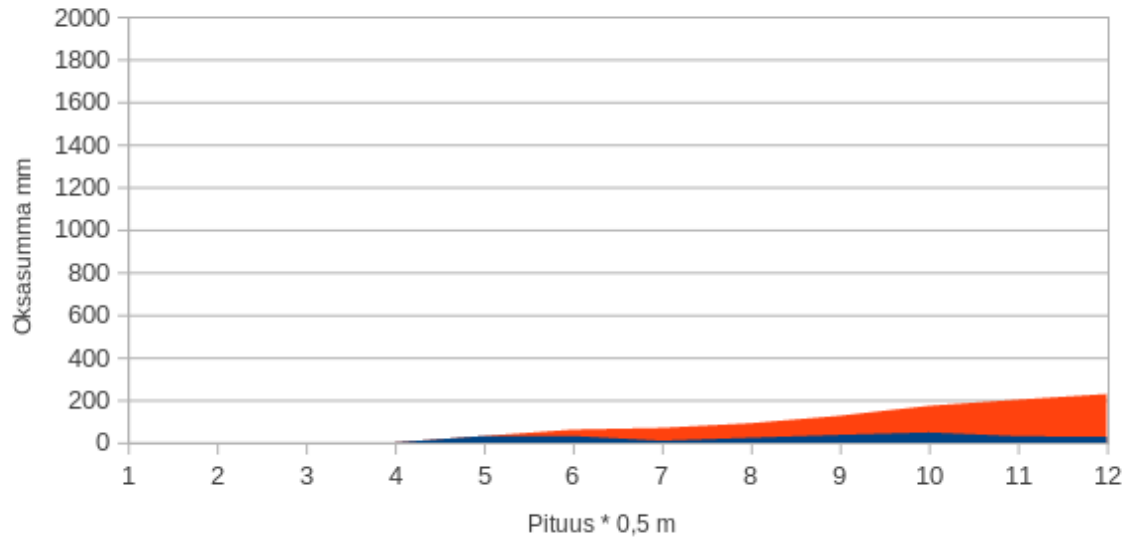
Koekappaleista mitattiin oksien läpimitat puolen metrin jaksoina tyvestä alkaen siten, että kaikki yli 5 mm:n oksat mitattiin työntömitalla millimetrin tarkkuudella. Mittaukset tehtiin kohtisuoraan tukin syysuuntaan nähden ja kirjattiin muistiin. Kuvajissa sininen alue kuvaa oksasummaa yhtä puolen metrin pätkää kohti ja punainen alue kumulatiivisesti kasvavaa oksasummaa tyvestä alkaen. Seuraavassa on esitelty kaksi esimerkkiä erityisen suuresta ja pienestä oksasummasta. (Kuvat 7 - 8) Mainittakoon vielä, että koekappaleissa 17 01 ja 17 06, molemmat mäntyjä, ei ollut lainkaan pinnassa näkyviä oksia.

Kaavio 3, kappale: 17 03



Kuva 7, esimerkki suuresta oksasummasta

Kaavio 5, kappale: 17 05



Kuva 8, esimerkki pienestä oksasummasta

4.2.2 Mittauskosteus kappaleittain

Taivutuskokeiden jälkeen kappaleista otettiin kasvukairalla (kuva 9) kuusi n. 15 – 20 cm:n mittaista näytettä tasaisesti eri kohdista kappaletta. Näytteet pakattiin tiiviisti suljettaviin muovipusseihin ja säilytettiin jääkaapissa näytteenoton ja tuorepunnituksen välisenä aikana kosteuden haihtumisen ehkäisemiseksi.



Kuva 9, kasvukaira ja näytteen porausreikä (Gardemeister 2017)

Näytteiden kosteusprosentit (Taulukko 3) määriteltiin **punnitus-kuivaus-punnitus-menetelmällä**. Kaikki näytteet punnittiin Prego P-7003 vaa'alla pusseineen. (Kuva 10) Lisäksi näytteet punnittiin siten, että vaaka taarattiin yhden pussin painolle, jolloin saatiin näytteiden nettopainot ilman pusseja. Kaikki punnitukset toistettiin kolmeen kertaan yksittäisvirheiden välttämiseksi ja kosteusprosenttien laskennassa käytettiin punnitussarjojen keskiarvoja yksittäisten punnitussarjojen sijaan. Jokaisen koekappaleen kuutta kairanäytettä käsiteltiin mittauksissa yksittäisenä näytteenä ja säilytuspussien paino vähennettiin kosteusprosenttia laskettaessa.



Kuva 10, näytteiden punnitus (Gardemeister 2017)

Taulukko 3, Koekappaleiden kosteudet

Näyte	Lähtöpaino (g)	Kuivapaino (g)	Kosteus (%)
17 01	12,3	9,9	24,2
17 03	11,6	9,3	24,7
17 04	11,9	9,7	23,4
17 05	12,8	10,2	25,1
17 06	12,8	10,4	23,4
17 07	12,6	10,1	25,5
17 08	11,5	9,1	26,0

4.2.3 Vuosilustojen paksuus

Kappaleiden tyvipäästä laskettiin vuosilustojen lukumäärä ja mitattiin läpimitta ns. ristimittauksella. Keskimääräinen vuosiluston paksuus laskettiin kaavalla:

$$\text{Lustopakkuus} = \frac{D}{n * 2}$$

Jossa D = puun halkaisija (mm) ja n = puun ikä ts. vuosilustojen lukumäärä pinnasta ytimeen. Aiempien tutkimustulosten perusteella vuosiluston keskimääräisen paksuuden tulisi korreloida selvästi kappaleen lujuuden kanssa siten, että mitä ohuempi vuosilusto, sitä lujempi kappale.

Omasta mielestäni näin yksioikoinen tulkinta keskimääräisen vuosiluston paksuuden ja kappaleen lujuuden yhteydestä ei täysin pidä paikkaansa varsinkaan pyöreän puun kohdalla. Huomasin vuosilustoja laskiessani, että ohuiden ja paksujen vuosilustojaksojen sijainti säteen suunnassa vaihteli kappaleiden välillä suuresti; joissakin kappaleissa, tyypillisemmin kuusissa, ytimen lähellä oli erittäin tiiviitä osuuksia, joissa vuosilustojen tarkka laskeminen oli lähes mahdotonta. Alle parin senttimetrin matkalla saattoi olla 30 – 40 vuosilustoa. Vastaavasti samassa kappaleessa saattoi olla lähempänä pintaa jaksoja, joiden vuosikasvut olivat useita millimetrejä. Mäntyjen kohdalla tilanne saattoi olla päinvastainen; ytimen lähellä hyvinkin nopeaa paksuuskasvua ja pintapuussa niin tiiviitä jaksoja, että niiden laskeminen ilman suurennuslasia oli varsin haastavaa.

Asiaa selittänee männyn ja kuusen erilainen kasvutapa taimikko-vaiheessa; kuuset tyypillisesti jurovat taimina helposti parikymmentäkin vuotta ennen reilumman kasvun alkua. Sen sijaan varttuneempi kuusikko varsinkin harvennushakkuun jälkeen voimistaa paksuuskasvua, jolloin pintapuun vuosilustot voivat olla hyvinkin paksuja. Männyn kasvu taimivaiheessa on varsin nopeaa niin pituuden kuin paksuudenkin osalta, mutta varttuneemman männikön paksuuskasvu hidastuu varsinkin karummilla metsäpohjilla ja puustotiheyden ollessa suuri.

Koska pyöröhirren taivutuslujuus muodostuu pääosin pintapuun ominaisuuksista, kannattaa kiinnittää huomiota ulkopinnan vuosilustojen paksuuteen laskemalla esimerkiksi viiden senttimetrin vuosilustot pinnasta alkaen.

Taulukko 4, koekappaleiden ominaisuudet

Kappale (ID)	Ikä (v)	Lpm (mm)	Lusto (mm)	Kaadettu (pvm)	Puulaji	Metsä-tyyppi	Kosteus (%)
17 01	103	353	1,71	14.12.15	Mänty	MT	23,8
17 03	110	340	1,55	Ei tied.	Kuusi	Ei tied.	24,4
17 04	86	295	1,72	11.12.15	Kuusi	MT	23,1
17 05	89	350	1,97	11.12.15	Kuusi	MT	24,1
17 16	87	242	1,39	12.12.15	Mänty	VT	22,8
17 07	77	328	2,13	15.12.15	Kuusi	MT	24,6
17 08	73	310	2,12	11.12.15	Kuusi	MT	25,9

4.3 Laskennalliset lujuudet kun kappaleet ovat kuivuneet käyttökosteuteen

Puumateriaalin lujuus muuttuu kosteuden suhteen siten, että lujuus kasvaa kun kosteus pienenee. Kosteudella on suurin vaikutus puun puristuslujuuteen. Madsenin suorittamissa taivutuskokeissa kosteuden ja ominaislujuuden korrelaatio vaihteli lujien ja tavanomaisten sahatavarakappaleiden kesken siten, että lujissa koekappaleissa ilmeni puristuslujuuden voimakas riippuvuus kosteudesta, mutta heikompien koekappaleiden ominaislujuuden määräsi alhaisempi vetolujuus, joka on lähes riippumaton kosteudesta. (Madsen 1992.)

Tässä tutkimuksessa ei ole tarpeen pureutua kosteusprosentin ja taivutuslujuuden verrannollisuuteen kovin syvästi, koska esim. hirsirakennuksen harjahirren täytyy kestää myös ensimmäisten 3 - 5 talven lumikuormat kun hirsi kuivuu lopulliseen käyttökosteuteen n. 16 – 20 %. Tämä johtuu siitä, että massiivipuisia pyöröhirsiiä ei ole järkevää kuivattaa etukäteen halkeilun vuoksi. Rakennukset veistetään tuoreesta materiaalista, jolloin halkeilu ohjautuu hirsien saumoihin l. varauksiin. Teollisesti valmistetuissa pyöröhirsirakennuksissa näkee usein suurikin halkeamia seinäpinnoissa.

4.4 Kappaleiden kestävät kuormitukset

Seuraavassa (Taulukko 5) on koottuna koekappaleiden kuormankantokyky 10 – 60 mm:n taipumilla. Koekappaleet kestivät rasitukset varsin hyvin, vain yksi hirsi oletettavasti murtui kokeiden aikana. Tämäkin murtuma ilmeni lähinnä äänestä:

taipuman saavuttaessa noin 110 – 120 mm arvon kuului voimakas risahdus ja vetosylinterin paine laski 10 - 15 baaria. (= n. 4 - 6 kN) Jatkettaessa taivutusta kappaleesta löytyi vielä kapasiteettia aina lähelle 40 kN:ia. Tällöin taipuma oli jo 160 mm ja koska kappaletta ei ollut tarkoitus rikkoa, koe lopetettiin tähän.

Taulukko 5, kuormat taipumilla 0 – 60 mm

Taipuma (mm)	17 01 (kN)	17 03 (kN)	17 04 (kN)	17 05 (kN)	17 06(1) (kN)	17 06(2) (kN)	17 07 (kN)	17 08 (kN)	Vertailu (kN)
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10	12,3	3,8	3,8	6,4	3,8	1,9	1,9	5,7	3,8
20	24,5	8,5	8,3	15,1	7,5	4,5	7,9	13,6	7,5
30	35,8	14,1	14,3	24,5	10,4	8,3	15,1	21,5	10,4
40	++	18,8	19,6	33,9	13,2	11,3	22,6	29,0	13,2
50	++	26,4	24,9	42,2	17,0	13,9	28,3	36,6	14,1
60	++	31,1	30,9	++	20,7	15,1	35,1	43,4	17,0

Videokameran toimintahäiriön vuoksi jouduttiin toistamaan osa taivutuskokeista ja tulosten perusteella havaittiin, että toisella kerralla edellä mainitun kappaleen 17 06 kuormitukset samoilla taipumilla olivat n. 20 – 25 % pienemmät. Kappaletta taivutettiin toisellakin kerralla n. 150 mm eikä näkyvää murtumaa ilmennyt silloinkaan. Kappaleen läpimitta kuormituskohdassa oli 210 mm.

Isoimmat kappaleet kestivät kuormituksen helposti, vahvimpia koekappaleita ei edes saatu taipumaan suunniteltua 60 millimetriä, taipuma jäi 35 – 50 mm:in maksimipaineella, joka tuotti 43 kN, eli n. 4,4 tonnia. Nämäkään hirret eivät olleet läpimitaltaan mitenkään poikkeavan kookkaita. Yhtä lukuun ottamatta kaikki koekappaleet kestivät yli neljän tonnin kuormituksen, vaikka useimpien hirsien kuormituskohdan halkaisija oli alle 250 mm. Normaalisti näin pieniläpimittaisia hirsiiä ei laitettaisi kuuden metrin jännevälille kurkihirreksi.

Kappaleiden taivutusjännitykset 30 mm:n taipumalla asettuivat n. 15 - 20 MPa:n haarukkaan. Kimmomoduulit tästä taipumasta laskettuina olivat 11 000 - 15 000 MPa. 60 mm:n taipumalla jännitykset vähintään kaksinkertaistuivat ollen noin 30 – 41 MPa. Kimmomoduuleissa ei odotetusti ollut suuria eroja, koska kappaleita ei taivutettu myötörajaan.

Kimmomoduulit laskettiin kaavoilla:

$$E = \frac{F * L^3}{48 * v_{set} * I}$$

$$I = \frac{\pi * r^4}{4}$$

Joissa E = kimmomoduuli (MPa), F = kappaletta rasittava pistekuorma (N), L = tukien väli (5870 mm), v_{set} = taipuma (mm) ja r = kappaleen poikkileikkauksen säde rasituskohdassa/ keskellä (mm).

5 YHTEENVETO

Tutkimuksen tulos vastaa varsin hyvin opinnäytetyön tekijän aiempaa käsitystä pyöröhirsien taivutuskestävyydestä, eikä jatkossakaan tämän tutkimuksen tekijän henkilökohtainen stressitaso nouse luovutettaessa asiakkaalle rakennusta, jossa on vain yksi harjahirsi, vaikka sitten pidempikin. Sen verran tulokset yllättivät, että niiden perusteella täytyy muuttaa käsitystä kuusen ylivertaisesta jäykkyydestä mäntyyn verrattuna ja näin paremmasta soveltuvuudesta kantavien palkkien materiaaliksi. Lujimmaksi yksilöksi osoittautui mänty, jonka läpimitta ei ollut merkittävästi suurempi kuin kahden – kolmen seuraavaksi lujimman kappaleen, jotka olivat kuusia. Myös läpimitaltaan pienimmän koekappaleen, puulaji mänty, taivutusjännitys nousi taivutuskokeessa korkeaksi.

Tämän voi olettaa johtuvan samasta seikasta, josta mainittiin aiemmin vuosilustojen paksuutta käsittelevässä luvussa 4.2.3; Kuusten tiiveimmät vuosilustojaksot ajoittuivat ytimen lähelle pintapuun ollessa harvempaa. Mäntyjen lustotiheys oli suurin pintapuussa. Toinen varteenotettava syy mäntyjen suureen kokeen perusteella arvioituun taivutuslujuuteen on kappaleiden pinnan oksattomuus. Aivan odotusten mukaisesti ne koekappaleet, joiden oksasummat olivat suurimpia, saivat heikoimpia kestävyiden arvoja.

Voidaan todeta, että koekappale, jonka oksasumma oli suurin, olisi myös taivutuslujuudeltaan heikoin pl. tuore vertailukappale. Selvää korrelaatiota vuosiluston paksuuden ja lujuuden välillä ei voida osoittaa, sen sijaan tuoreen vertailukappaleen taivutuslujuus olisi kokeiden perusteella merkittävästi heikompi kuin kesän yli kuivatettujen koekappaleiden.

Oksaisuuden ja kosteuden vaikutus taipumaan ei ollut mikään yllätys, mutta hie-man ristiriitaiset havainnot vuosiluston paksuudesta ja taipuman suhteesta kuormitukseen vaatisivat perusteellisempaa analyysiä koekappaleiden materiaaliominaisuuksista ja niiden muutoksista säteen suunnassa. Esim. koekappaleiden sahaus, ja puristus-/taivutuslujuuskokeiden teko eri kohdista poikkileikkausta pienillä näytekappaleilla. Tämä olisi täysin mahdollista toteuttaa, koska koekappaleiden taivutuskokeet tehtiin materiaalia rikkomatta. Ajankäytöllisistä syistä siihen ei nyt ollut mahdollisuutta.

Taivutuskoejärjestely osoittautui toimivaksi ja mahdollisuudet menetelmän monistamiseen ovat olemassa. Nykyiset painemittarit ovat laadukkaita ja luotettavia, joskin öljytäytteisestä neularasiasta johtuen taivutuskoe on tehtävä riittävän hitaasti, jotta mittari ehtii reagoida paineenvaihteluun. Paras ja tarkin tulos todennäköisesti saataisiin käsikäyttöisellä hydraulipumpulla. Tällöin myös kuormitusaika lisääntyisi vastaamaan hetkellisen kuormituksen määritelmää, joka on < 10 minuuttia. Nyt kun menetelmä on koeajettu ja kalusto olemassa, tullaan TT-Salvos Ky:n rakennustyömailla varmuudella käyttämään taivutustestattuja kantavia hirsiiä ym. palkkeja.

Käsinveistettyjen pyöröhirsipalkkien mitoitus Eurokoodi 5:n mukaisesti osoittautui turvalliseksi. Kaikkien koekappaleiden, myös tarkoituksella valitun erityisen oksaisen puun, mitatut taipumat olivat pienemmät verrattuna käytössä olevilla suunnitteluohejeilla eli EC 5:llä laskettuihin taipumiin. Puun lujuus- ja muodonmuutosominaisuudet huomioon ottaen puu- ja hirsipalkin mitoituksessa taivutuslujuuden suuruus on usein melko merkityksetön tieto suunnittelijalle. Sen sijaan kimmomoduuli ratkaisee vaadittavan läpimitan laskettaessa pyöröhirren soveltuvuutta kantavaksi palkiksi.

Tämän koesarjan perusteella uskaltaisin käyttää suunnitteluarvoina $f_{m,d} = 24$ MPa ja $E_{Mean} = 10000$ MPa kurkihirttä mitoitettaessa. Toki edelleen valintaperusteina pysyy suoruus, vähäoksaisuus ja tiheä vuosikasvu. Jatkossa uutena kriteerinä kurkihirren valinnassa TT-Salvos Ky:n rakentamissa hirsirakennuksissa tulee olemaan konkreettinen taivutuskoee. Seuraavassa taulukossa (Taulukko 6) on koottu vielä yhteenvetona kaikki mittaustulokset ja niiden perusteella lasketut lisäsuureet.

Taulukko 6, kooste tutkimustuloksista

Tiivistelmä mittaustuloksista								
Koekappale:	17-01	17-03	17-04	17-05	17-06	17-07	17-08	Vertailu
Ikä v	103	110	86	89	87	77	73	
Lusto mm	1,71	1,55	1,72	1,97	1,39	2,13	2,12	
Lpm.(tyvi)	352	340	295	350,00	242	327	310	
Lpm.(keski)	295	250	240	265	210	250	255	215,0
Lpm.(latva)	260	220	225	250	195	245	240	
Puulaji	Mänty	Kuusi	Kuusi	Kuusi	Mänty	Kuusi	Kuusi	Mänty
Kosteus %	23,8	24,4	23,1	24,10	22,8	24,6	25,9	
Oksasumma mm	0	1803	875	227,00	0	929	814	
30 mm/kN	35,8	14,1	14,3	24,50	10,4	15,1	21,5	10,4
Momentti/30 mm	52,5	20,7	21,0	36,0	15,3	22,2	31,6	15,3
Jännitys Mpa(30mm)	20,8	13,5	15,5	19,7	16,8	14,4	19,4	15,6
60 mm/kN	70	31,1	30,9	50,00	20,7	35	43,4	17,0
Momentti/60 mm	102,7	45,6	45,3	73,4	30,4	51,4	63,7	24,9
Jännitys Mpa(60mm)	40,8	29,8	33,4	40,2	33,4	33,5	39,1	25,6
Tilavuus dm ³	420	302	278	339	213	302	314	
E /30 mm (MPa)	13526	10329	12333	14216	15302	11061	14550	13927
E /60 mm (MPa)	13224	11391	13325	14506	15228	12819	14685	11383
I (mm ⁴)	3,72E+08	1,92E+08	1,63E+08	2,42E+08	95465638	1,92E+08	2,08E+08	1,05E+08

LÄHDELUETTELO

Borén H. Pietilä J. Lehtoviita T. Meuronen T. & Suonio J. 2000. Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa/ VAKOLA:n tiedote 81/2000. WWW-dokumentti. Saatavissa:

https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/439948/vtiedote81_2000.pdf [viitattu 22.4.2017].

Kivinen T. & Pietilä J. 2000. Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa III/ VAKOLA:n tiedote 83/2000. WWW-dokumentti. Saatavissa:

https://jukuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/440033/vtiedote83_2000.pdf [viitattu 14.11.2016].

Lahtela T. 2008. Puu maatilarakentamisessa/Puuinfo. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/rakentaminen/suunnitteluohjeet/puu-maatilarakentamisessa/6-koko-ohje-puuma080807.pdf> [viitattu 3.2.2017].

Madsen B. 1992. Structural behavior of timber. Timber Engineering Ltd, Vancouver 1992.

Pihlajamaa T & Jantunen J. 1995. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://docplayer.fi/2928126-Jarean-sahatavaran-mekaaniset-ominaisuudet.html> [viitattu 18.4.2017].

Ranta-Maunus A. 1998. Pienen pyöreän puun käyttö rakentamisessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: http://www.vtt.fi/inf/pdf/jurelinkit/RTE_Ranta-Maunus.pdf [viitattu 17.11.2016].

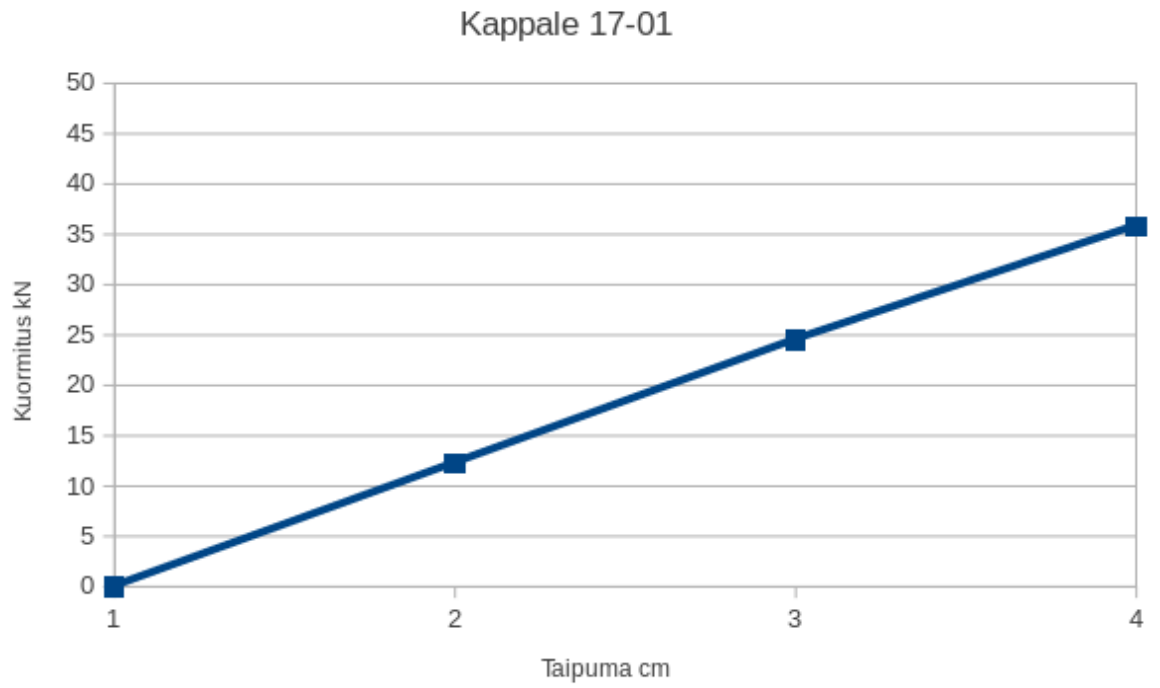
RIL 205-1-2009. 2016. Puurakenteiden suunnitteluohje/Suomen kansallinen liite. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry. Turku: Hansaprint Oy.

		Suomi	Hollanti	Englanti	Itävalta	Ranska
Taivutuslujuus [MPa]						
	Kuusi	64 / 49			61 / 39	
	Sitkakuusi			57 / 44	tapulikuiv.	
	Mänty	47 / 31		54 / 39		
	Lehtikuusi		78 / 62			
	Douglasmänty					54 / 33
Kimmokerroin [GPa]						
	Kuusi	13 / 8.4			13 / 9	
	Sitkakuusi			16 / 10		
	Mänty	12 / 5.6		15 / 9		
	Lehtikuusi		14.3/10.5			
	Douglasmänty					12 / 6
Puristuslujuus [MPa]						
	Kuusi	31 / 24				
	Sitkakuusi			29 / 21		
	Mänty	22 / 15		33 / 26		
	Lehtikuusi		44 / 37			33 / 26
	Douglasmänty					
Vetolujuus [MPa]						
	Douglasmänty					29 / 19

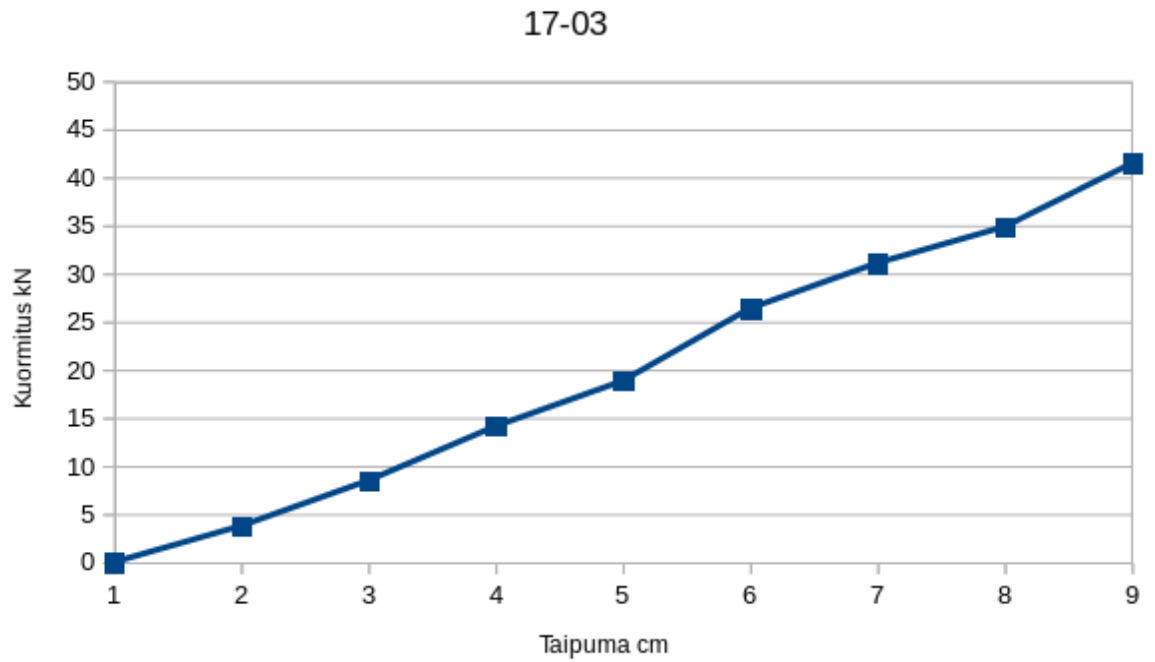
Taulukko 2. Pienen pyöreän puun alustavat lujuusarvot korjattuna 12% kosteuteen (keskiarvo / suunnittelussa käytettävä karakteristinen arvo).

Harjahirren mitoitustaulukko suorakaiteen muotoiselle pohjaratkaisulle. Eurokoodi5					
Kuormat	Rakenteen omapaino		0,30 kN/m ²		Peltikate+
	Lumikuorma		2,00 kN/m ²		kylmä ullakko
	Muu kuorma (ripustukset ym.)		0,00 kN/m ²		
	Yhteensä:		2,30 kN/m ²		
Lujuudet	Puutavaran lujuusluokka		C30		
	Suunnitteluarvo		20 N/mm ²		
	Kattokulma (suhde)		1: 2		
Laskennallinen mitoitustaulukko, arvot harjahirrelle, pohjan mitat vaihdettavissa					
Harjan Pituus	Pääty-seinä	Harjan kok.kuorma	Viiva-kuorma	Taiutusmomentti	Harjahirren läpimitta
m	m	kN	kN/m	kNm	mm
3	2	7,01	2,34	2,6	110
3,5	3	12,26	3,50	5,4	140
4	3	14,01	3,50	7,0	153
4,5	4	21,02	4,67	11,8	182
5	4	23,35	4,67	14,6	195
5,5	4	25,69	4,67	17,7	208
6	5	35,03	5,84	26,3	237
7	6	49,04	7,01	42,9	280
8	7	65,39	8,17	65,4	322
9	8	84,07	9,34	94,6	364
10	8	93,42	9,34	116,8	390
Enintään n. 8-9 m:n jänneväleille, tätä pidemmät harjaratkaisut suositellaan toteutettavaksi välituilla ja esimerkiksi jatkuvan palkin mitoitusohjeilla. Tarvittaessa harjahirsi koostetaan useammasta päällekkäisestä hirrestä. Näiden mitoitukset on laskettava tapauskohtaisesti.					
Mitoitus laskettu hirsisiä päätykolmioita käytettäessä; kattokannattajien kiinnitys liukuvana sivuseinällä, jolloin kattokulmalla ei ole merkitystä. Tilanne muuttuu täysin, jos käytetään ns. jäykkää päätykolmiota, jolloin kattokannattajat voidaan kiinnittää tiukasti sivuseinällä. Tällöin mitoituksessa voidaan hyödyntää kattokehän muodostamaa tukea varsinkin, jos välipohjan kannatus on toteutettu siten, että kannattajat muodostavat vetosauvoja kohtisuoraan harjapalkkiin nähden. Kattokulman ollessa riittävä, harjapalkkia ei välttämättä aina edes tarvittaisi.					
Mitoituksessa ei ole huomioitu räystäiden pituutta, joka siirtää kuormitusta harjapalkilta seinille, joten tulokset ovat siltäkin osin "varmalla puolella". Rakenteen omapainon kasvu kattokulman muuttuessa jyrkemäksi on huomioitu kuormia laskettaessa. Lumikuorma laskettu pohjaneliöiden (=tasakatto) mukaan.					
Taulukko on laadittu siten, että kuormien muutokset vaikuttavat koko taulukkoon, samoin pohjaratkaisun mittojen muutokset. Jos esim. käytetään lämpöeristettyä yläpohjaa tai muuta katemateriaalia kuin peltiä riittää kun korjaa rakenteen omapainon kohdalleen.					

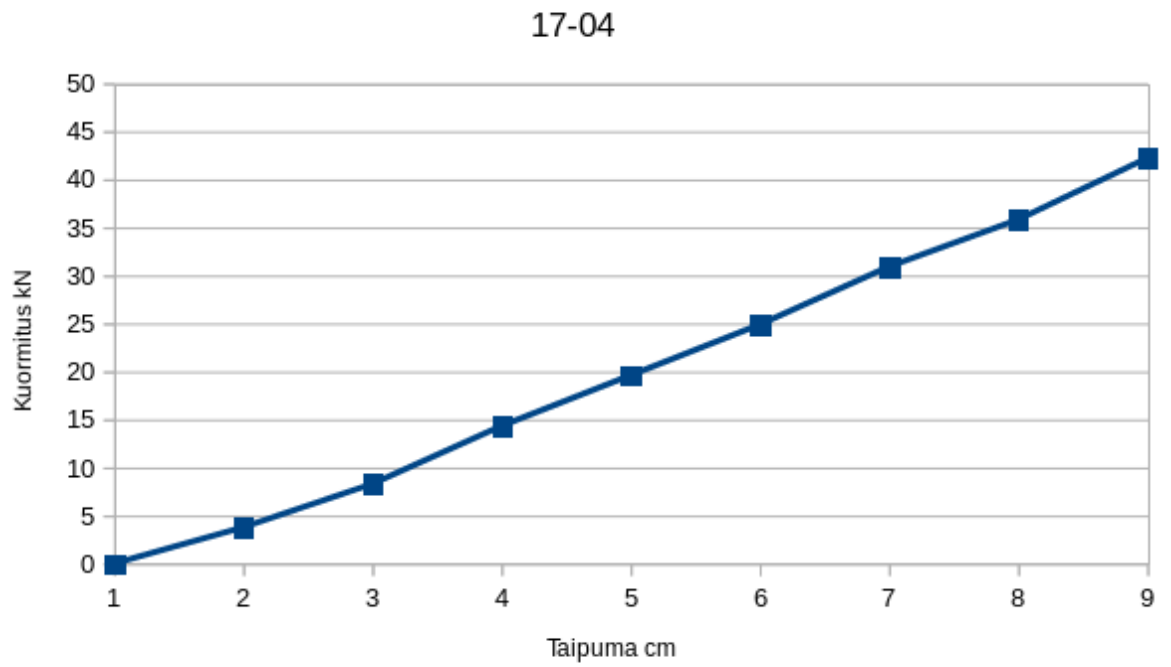
Liite 3.1, Kuormitus/taipuma -kaaviot kappaleittain. (Kuvat 11-19) Vertailun helpottamiseksi kaikissa kuvaajissa y-akselin suurin arvo on sama.



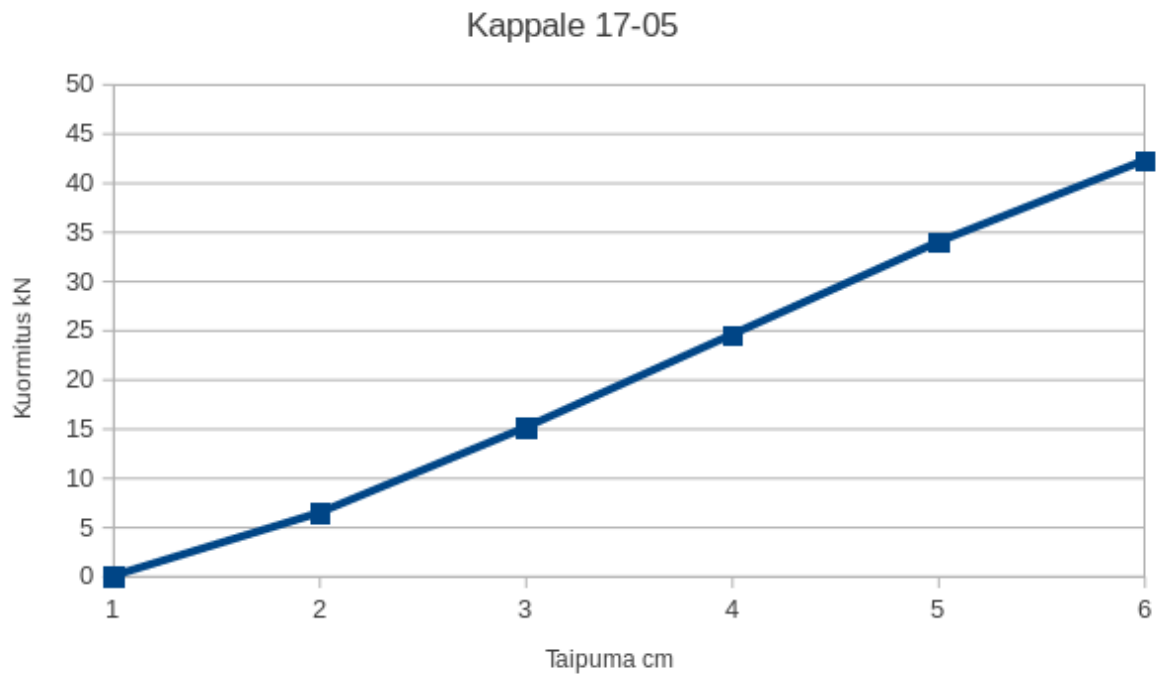
Kuva 11



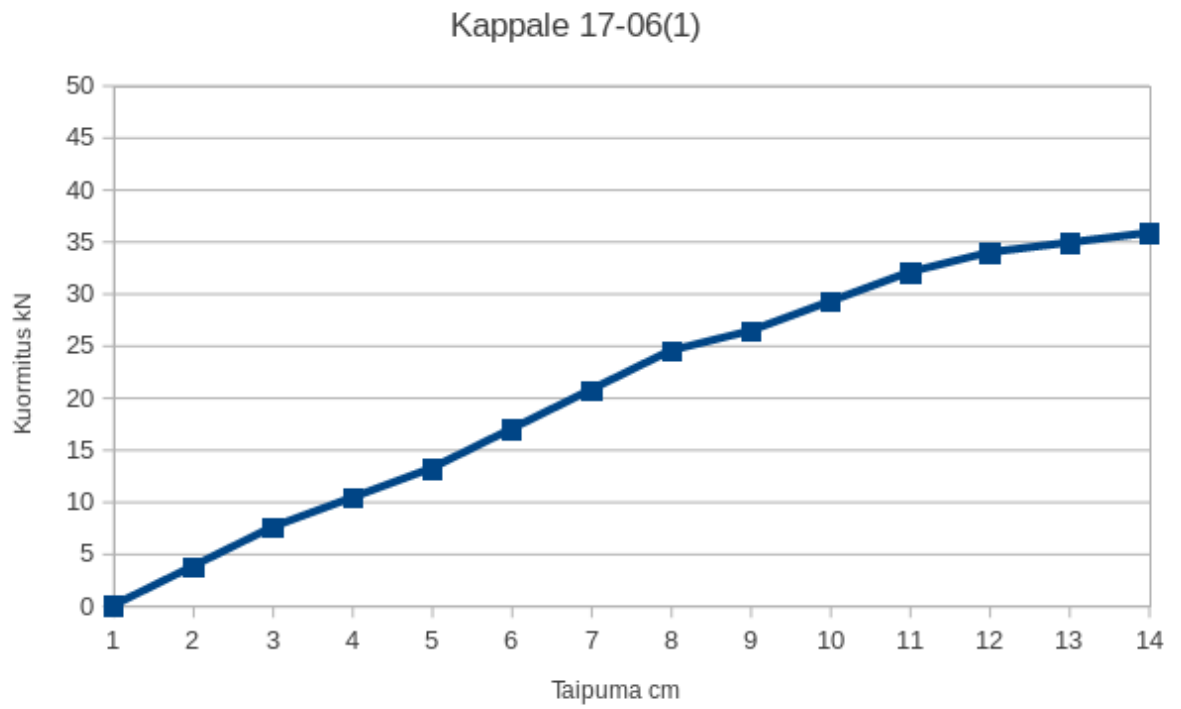
Kuva 12



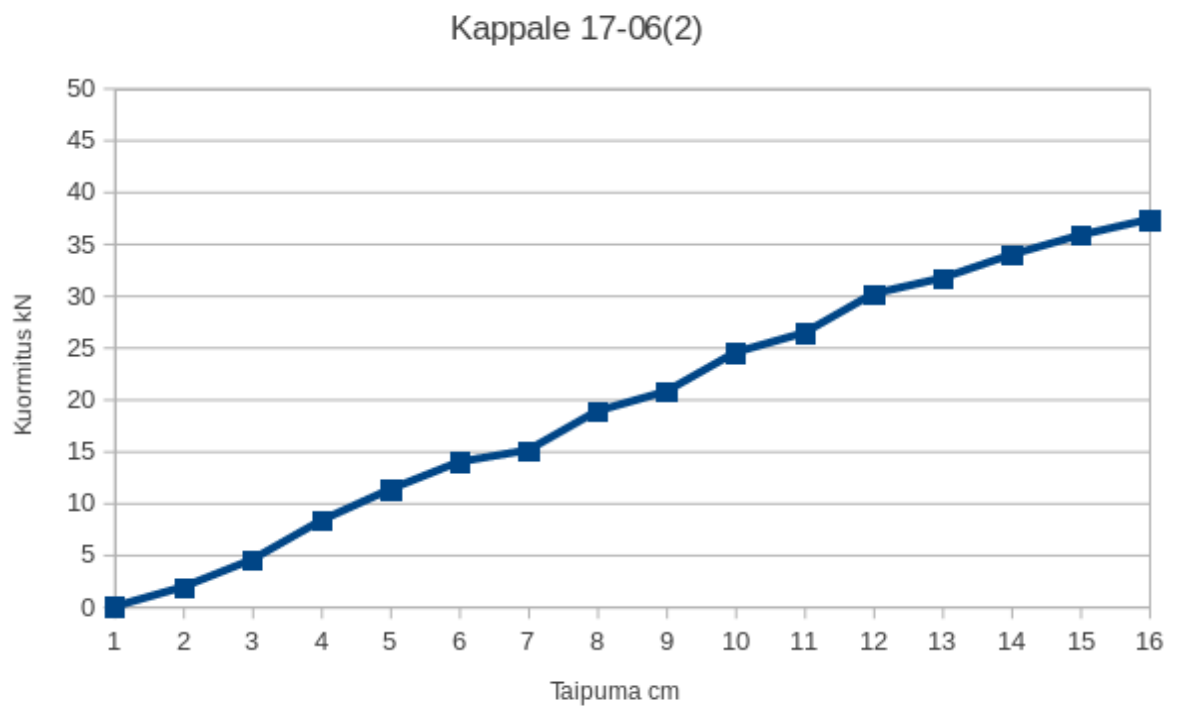
Kuva 13



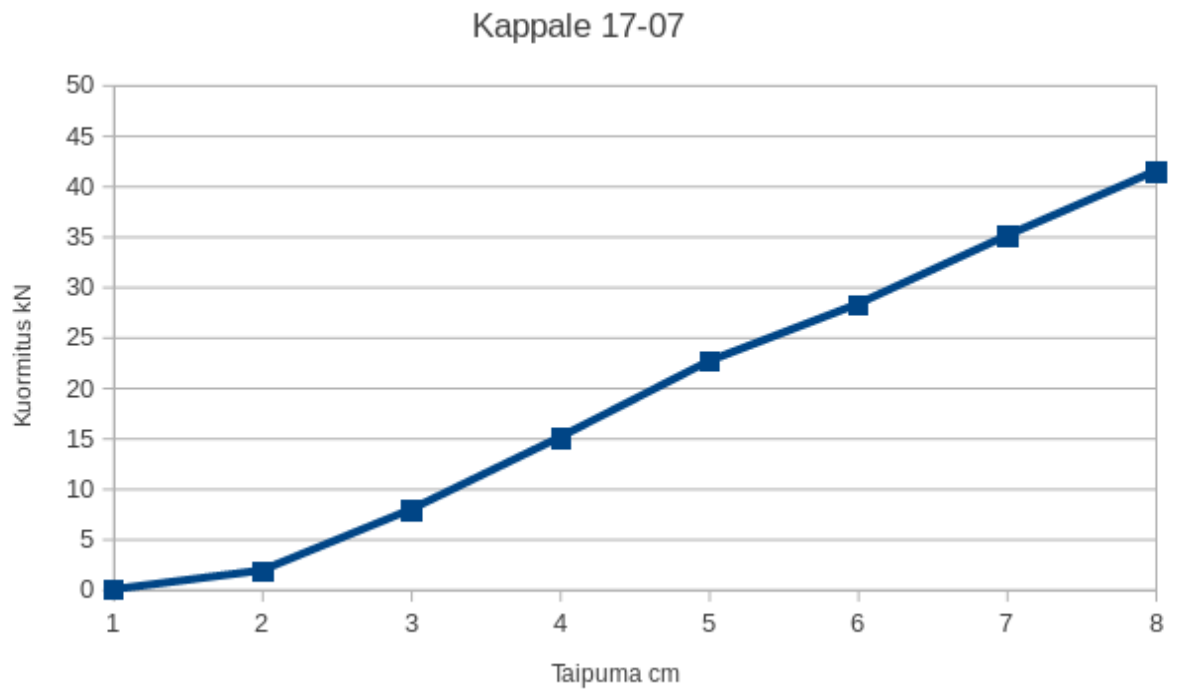
Kuva 14



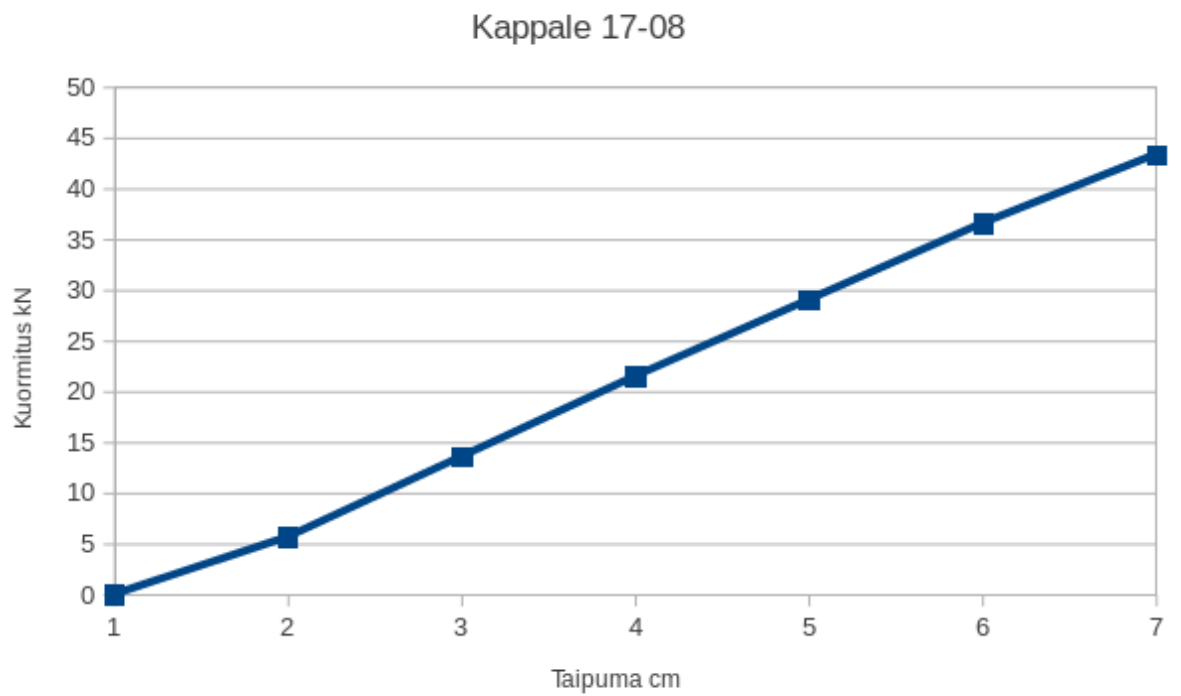
Kuva 15



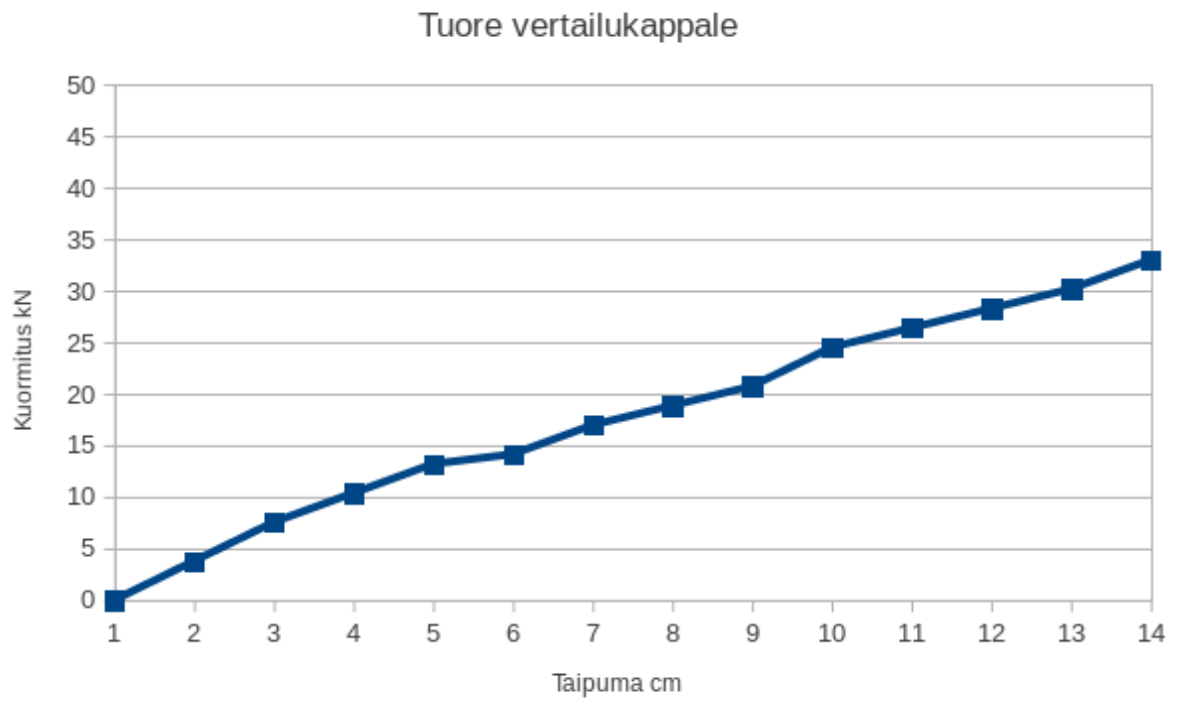
Kuva 16



Kuva 17



Kuva 18



Kuva 19