

Mikki Keltto

TUNKEUMAMITTARIN KÄYTTÖ PUURA- KENTEIDEN KUNTOTUTKIMUKSISSA

Diplomityö
Rakennetun ympäristön tiedekunta
Professori Matti Pentti
Projektipäällikkö Toni Pakkala
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

MIKKI KELTTO: Tunkeumamittarin käyttö puurakenteiden kuntotutkimuksissa
Tampereen yliopisto
Diplomityö, 115 sivua, 33 liitesivua
Huhtikuu 2020
Rakennustekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Pääaine: Rakennesuunnittelu
Tarkastaja: professori Matti Pentti, projektipäällikkö Toni Pakkala

Avainsanat: Pilodyn-laite, puurakenne, tiheys, lujuus, lahovaurio

Rakennuksen kunto ja korjaustarve voidaan määrittellä niille tehtävillä kuntotutkimuksilla. Tällä hetkellä puurakenteiden kuntotutkimus perustuu lähinnä aistinvaraiseen havainnointiin, kosteusmittauksiin sekä rakenteen puukotukseen ja poraukseen. Tällaisissa tutkimuksissa ei tuoteta objektiivista tai tilastollista tietoa puurakenteen kunnosta.

Yhtenä työn päätavoitteena oli tutkia Pilodyn-laitteen käyttömahdollisuuksia puurakenteiden kuntotutkimuksissa. Pilodyn-laite on tunkeumamittari, joka mittaa tylppäpäisen neulan tunkeumasyvyyttä puussa. Käyttömahdollisuuksien tutkimisen lisäksi työn päätavoitteina oli tutkia Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puun lujuusominaisuuksien riippuvuussuhteita sekä kosteuspitoisuuden vaikutuksia Pilodyn-laitteen tuloksiin. Tutkimustyö aloitettiin tutustumalla kirjallisuuskatsauksella puun materiaaliominaisuuksiin, lujuuslajitteluun sekä Pilodyn-laitteeseen.

Tämän kirjallisuustutkimuksen pohjalta Pilodyn-laitteella suoritettiin kokeita erilaisille puukoekappaleille eri kosteusolosuhteissa. Koekappaleille tehtiin myös tiheys- ja puristuslujuuskokeita. Koetulosten perusteella tehtiin johtopäätökset Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puun eri ominaisuuksien välisistä riippuvuussuhteista. Otokseltaan samankaltaisten koe-erien suorittaminen eri kosteuspitoisuuksissa mahdollisti Pilodyn-laitteen tuloksien kosteuspitoisuuden korjauskaavan muodostamisen. Kosteuspitoisuuden korjauskaavalla eri kosteuspitoisuuksissa suoritettavat Pilodyn-laitteen mittaustulokset saadaan keskenään vertailukelpoisiksi.

Koetulosten perusteella Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä on vahva yhteys virheettömän puun lujuusominaisuuksien kanssa, varsinkin tiheyden kanssa. Tästä syystä Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydelle muodostettiin SFS-EN 338 lujuusluokkien mukainen lujuustaulukointi puun ominaistiheyden mukaan. Puun heterogeenisestä luonteesta johtuen pelkästään virheettömästä puusta saatava tieto ei yksistään riitä puurakenteen lujuuden arvioimiseen. Tästä syystä puun erilaiset viat tulee myös huomioida. Lisäksi Pilodyn-laitteella arvioitu virheettömän puun lujuus on hyvin pistemäinen lokaali lujuus. Näin ollen arvioitaessa puurakenteen lujuutta kokonaisuudessaan tulee tarkastella myös puun oksaisuutta ja rasiuksia.

ABSTRACT

MIKKI KELTTO: The Use of Penetrometer in The Condition Assessments of Timber Structures

Tampere University

Master of Science Thesis, 115 pages, 33 Appendix pages

April 2020

Master's Degree Programme in Civil Engineering

Major: Structural Engineering

Examiner: Professor Matti Pentti, Project manager Toni Pakkala

Keywords: Pilodyn, timber structure, density, strength, decay damage

The need for a renovation, and the overall structural condition of the building, can be determined with a condition assessment. Currently, the condition assessments of timber structures are mostly based on visual observation and drilling or knifing the structure. However, these kinds of investigations are not producing explicit or statistical enough information about the condition of timber structure.

One of the main objectives of the present thesis was to study the use of Pilodyn in the condition assessment of timber structures. Pilodyn is a penetrometer which measures a flat nosed pins penetration depth in timber. Other objectives of the study included investigating the correlation between Pilodyn penetration depth and timber strength properties as well as the effects of moisture content on Pilodyn penetration depth. The use of Pilodyn was investigated by exploring timber properties, the strength grading of timber and former studies conducted of the instrument.

Based on some of the earlier studies conducted of Pilodyn, tests were carried out with the objective of comparing Pilodyn to different kinds of timber specimens in varying moisture conditions. Density and compression strength parallel to the grain were also tested on the timber specimens. The test results indicated a direct correlation between Pilodyn penetration depth and the mechanical properties of timber. The tests were performed on several homogenous samples in different moisture conditions to produce a formula for adjusting the Pilodyn penetration depth according to moisture condition. With the adjustment formula, the Pilodyn results performed in different moisture conditions are comparable.

Finally, the test results demonstrate a strong correlation between Pilodyn penetration depth and the strength properties of defect-free timber, especially density. Because of this, a strength grading table was made for Pilodyn penetration depth according to SFS-EN 338 strength classes based on the characteristic density of timber. Due to the heterogenic nature of timber, knowledge gained from analyzing defect-free timber is not accurate enough to estimate the strength of timber structure as a whole. Hence, the various potential defects of timber must also be considered. In addition to this, the strength of defect-free timber estimated with Pilodyn is a value specific to that very location. Thus, when estimating the overall strength of a timber structure with Pilodyn, the knots and stresses of timber must also be taken into account.

ALKUSANAT

Tämä tutkimus tehtiin Tampereen yliopiston diplomi-insinöörin tutkinnon opinnäyte-työnä Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:lle. Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy:n lisäksi Tampereen yliopisto on ollut tutkimuksessa mukana osarahoittajana ja kokeiden laboratoriotilojen mahdollistajana. Tutkimuksen aihe on syntynyt Jenni Lätin diplomityön ”Arvokohteiden puisten kattoristikoiden vahvistaminen” seurauksena.

Kiitän työni aiheesta ja työn toimeksiannosta Simo-Pekka Valtosta. Suuri kiitos kuuluu myös Matti Pentille ja Toni Pakkalalle hyvästä työn ohjaamisesta ja opastuksen antamisesta työn eri vaiheissa. Tampereen yliopiston henkilökunnasta haluan kiittää myös Tomi Stranderia koevälineistön esittelemisestä ja kokeiden avustuksesta. Lisäksi haluan kiittää työkavereitani Pekka Kokkoa, Tuuli Rankia ja Jenni Lättiä avartavista keskusteluista aiheen tiimoilta sekä Sara Backmannia tiivistelmän englanninkielisen käännöksen tarkastamisesta.

Vielä lopuksi kiitän perhettäni, ystäviäni sekä varsinkin tyttöystävääni ja tulevaa vaimoani Helmi Hietalahtea kaikesta tuen antamisesta urakan aikana. Tästä on kokonaisuutena hyvä jatkaa eteenpäin.

Porissa, 4.4.2020

Mikki Keltto

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
1.1	Tutkimuksen tausta	1
1.2	Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset.....	2
1.3	Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne	2
2.	PUU RAKENNUSMATERIAALINA	4
2.1	Puurakentaminen Suomessa.....	4
2.2	Puun rakenne ja ominaisuudet.....	5
2.2.1	Puun rakenneviat.....	7
2.2.2	Tiheys.....	10
2.2.3	Kosteus.....	12
2.3	Lujuus.....	15
2.3.1	Tiheyden vaikutus puun lujuuteen	16
2.3.2	Kosteuden vaikutus puun lujuuteen	17
2.3.3	Ajan vaikutus puun lujuuteen	19
2.3.4	Rakennevikojen vaikutus puun lujuuteen	20
2.3.5	Koon vaikutus puun lujuuteen	22
2.4	Puun lujuuslajittelu.....	23
2.4.1	Visuaalinen lujuuslajittelu.....	25
2.4.2	Koneellinen lujuuslajittelu	27
2.5	Puurakenteiden vaurioituminen.....	27
3.	PUURAKENTEIDEN KUNTOTUTKIMUS SUOMESSA	31
3.1	Kuntotutkimus ja sen merkitys.....	31
3.2	Puurakenteiden kuntotutkimuksen rakenne	31
3.3	Yleisimmin tutkittavat puurakenteet ja niiden vauriot.....	33
4.	PILODYN-LAITE	37
4.1	Pilodyn-laitteen laitteisto.....	37
4.2	Pilodyn-laitteen käyttö	39
4.3	Pilodyn-laitteen aiemmat tutkimukset.....	41
4.3.1	Tutkimusten suoritus.....	42
4.3.2	Tutkimuksista saatu aineisto	44
5.	KOEJÄRJESTELYT	48
5.1	Yleistä.....	48
5.2	Koekappaleet.....	48
5.2.1	Koekappaleiden rakenneviat.....	49
5.2.2	Koekappaleiden sahaus	52
5.3	Koekappaleiden kosteuspitoisuus	54
5.3.1	Koekappaleiden kosteuspitoisuudet ja niiden tasapainotus	55
5.3.2	Kosteuspitoisuuden määrittäminen	59
5.4	Koekappaleiden tiheys	62

5.5	Koekappaleiden puristuslujuus	63
5.6	Ominaisarvojen laskenta	65
5.7	Koekappaleiden Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys	67
6.	KOKEIDEN TULOKSET	69
6.1	Koekappaleiden kosteuspitoisuus	69
6.2	Koekappaleiden tiheys	72
6.3	Koekappaleiden puristuslujuus	74
6.4	Koekappaleiden Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys	77
6.5	Koetulosten korrelaatiot	79
6.5.1	Puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio	80
6.5.2	Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden ja tiheyden korrelaatio	83
6.5.3	Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden ja puristuslujuuden korrelaatio	87
6.6	Lujuustaulukointi koetulosten perusteella	91
7.	CASE-TUTKIMUKSET	96
7.1	Yleistä	96
7.2	Fiskars Uusi Kasarmi	97
7.3	Munkkiniemen vanha seurakuntatalo	99
7.4	Kosken kartano päärakennus	100
7.5	Vallisaaren Luotsitalo	102
8.	PÄÄTELMÄT	105
8.1	Yleistä	105
8.2	Pilodyn-laitteella tehtävä lujuusluokitus ja kantavuuden arviointi	106
8.3	Pilodyn-laitteella tehtävä lahovauriokartoitus	109
8.4	Lisätutkimustarve	111
	LÄHTEET	112

LIITE A: KOEKAPPALEIDEN JA VIIPALENÄYTTEIDEN DIMENSIOT

LIITE B: KOEKAPPALEIDEN KOSTEUSPITOISUUS

LIITE C: KOEKAPPALEIDEN PILODYN-LAITTEEN TUNKEUMASYVYYS

LIITE D: KOEKAPPALEIDEN TIHEYYS

LIITE E: KOEKAPPALEIDEN PURISTUSLUJUUS

LIITE F: KOEKAPPALEIDEN ALKUPERÄISTEN JA KOSTEUSKORJATTUJEN PURISTUSLUJUUDEN JA TIHEYDEN KUVAAJAT

LIITE G: KOEKAPPALEIDEN ALKUPERÄISTEN JA KOSTEUSKORJATTUJEN PILODYN-LAITTEEN TUNKEUMASYVYYDEN JA TIHEYDEN KUVAAJAT

LIITE H: KOEKAPPALEIDEN ALKUPERÄISTEN JA KOSTEUSKORJATTUJEN
PILODYN-LAITTEEN TUNKEUMASYVYYDEN JA PURISTUSLUJUUDEN KU-
VAAJAT

LYHENTEET JA MERKINNÄT

C	havupuun standardin SFS-EN 338 mukainen lujuusluokkatunnus
T	havupuun standardin SFS 5878 mukainen lujuusluokkatunnus
KL	puurakenteen kuntoluokka
RH	suhteellinen kosteus
UP	uusi puutavara
VP	vanha puutavara
SFS-EN 338	rakennesahatavaran lujuusluokka standardi
SFS-EN 384	standardi rakennesahatavaran ominaisarvojen ja mekaanisten tekijöiden määrittämiseen
SFS-EN 408	standardi puurakenteen mekaanisten ja aineellisten ominaisuuksien kokeelliseen määrittämiseen
SFS-EN 13183-1	standardi kosteuspitoisuuden määrittämiseen punnituskuivauksella
SFS-EN 14081-1	standardi rakennesahatavaran visuaalisen ja koneellisen lujuuslajittelun vaatimuksista
SFS-EN 14358	standardi rakennesahatavaran ominaisarvojen laskennalliseen määrittämiseen
SFS 5878 INSTA 142	standardi rakennesahatavaran visuaalisen lujuusluokitteluun

ρ_{ω}	materiaalin tiheys kosteuspitoisuudessa ω	kg/m ³
$\rho_{12,k}, \rho_k$	materiaalin ominaistiheys	kg/m ³
ρ_{mean}	materiaalin keskiarvotiheys	kg/m ³
$\rho_{\omega_{ref}}$	materiaalin tiheys standardikosteudessa	kg/m ³
ω	kosteuspitoisuus	%
ω_{ref}	standardikosteuspitoisuus	%
b	koekappaleen poikkileikkauksen leveys	mm
F_{max}	akselialinen murtovoima	kN
$f_{c,0}$	syiden suuntainen puristuslujuus	N/mm ²
$f_{c,0,\omega}$	syiden suuntainen puristuslujuus kosteuspitoisuudessa ω	N/mm ²
$f_{c,0,\omega_{ref}}$	syiden suuntainen puristuslujuus standardikosteudessa	N/mm ²
$f_{c,90,k}$	syitä vastaan kohtisuora puristuslujuus	N/mm ²
$f_{t,0}$	syiden suuntainen vetolujuus	N/mm ²
f_m	taivutuslujuus	N/mm ²
h	koekappaleen poikkileikkauksen korkeus	mm
k_{mod}	kosteuden ja kuormitusajan huomioiva kerroin	-
k_s	otoksen koon huomioiva kerroin	-
m_0	kuivamassa	kg
m_{ω}	massa kosteuspitoisuudessa ω	kg
m_k	otosjoukon ominaisarvo	-
m_i	yhden koekappaleen koetulos	-
n	otoksen kappalemäärä	-
P	Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys	mm
P_{ω}	Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys kosteuspitoisuudessa ω	mm
$P_{\omega_{ref}}$	Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys standardikosteudessa	mm

R^2	korrelaatiokerroin	-
s_y	keskihajonta	-
V_ω	tilavuus kosteuspitoisuudessa ω	m^3
x	x-koordinaatti	-
x_{UP}	x-koordinaatti uuden puutavaran kuvaajassa	-
x_{VP}	x-koordinaatti vanhan puutavaran kuvaajassa	-
y	y-koordinaatti	-
y_{UP}	y-koordinaatti uuden puutavaran kuvaajassa	-
y_{VP}	y-koordinaatti vanhan puutavaran kuvaajassa	-
y_{mean}	otoksen keskiarvo	-

1. JOHDANTO

1.1 Tutkimuksen tausta

Puurakentamisella on pitkä historia Suomessa, sillä puuta on ollut aina saatavilla. Tästä kertovat puurakenteiset, vanhat ja arvokkaat kaupunkien puutaloalueet, kirkot, huvilat, virastotalot ja talonpoikaistalot. Myös vanhoissa kivirakennuksissa on käytetty paljon puurakenteita ikkuna-, välipohja- ja kattorakenteissa. Nykyäänkin, betonirakentamisen suosiosta huolimatta, on puu rakennusmateriaalina säilyttänyt vahvan aseman suomalaisessa rakentamisessa.

Korjausrakentaminen on jatkuvassa kasvussa Suomessa ja yksi tärkeä rakennuksen korjaustarpeen määräävä tekijä on rakenteiden kunto. Rakenteiden kuntoa voidaan arvioida rakenteisiin tehtävillä kuntotutkimuksilla. Rakenteiden kuntoa voidaan tutkia niin ainetta rikkomattomin- kuin ainetta rikkovinkin menetelmin. Mikäli mahdollista, tarvittava tieto rakenteesta ja sen kunnosta pyritään saamaan ainetta rikkomattomin menetelmin. Se säästää usein aikaa, työtä ja rakenteen vanhan ilmeen sekä on usein rakennuksen käyttäjälle mieleisempi vaihtoehto. Varsinkin suojeltujen sekä kulttuurillisesti ja historiallisesti arvokkaiden rakennusten kohdalla rakenteiden kuntotutkimus tulisi tehdä ainetta rikkomattomin menetelmin. [1, s. 35]

Perinteisesti puurakenteiden kuntoa on tutkittu lähinnä aistinvaraisesti ja puukottamalla rakennetta sen kovuuden selvittämiseksi. Tällaisella tutkimuksella ei kuitenkaan saada kokeellista tutkimusaineistoa puurakenteen kunnosta. Lisäksi aistinvaraisen tutkimuksen ja puukotuksen tulokset ovat hyvin riippuvaisia tutkijasta. Yksi ainetta rikkomaton puurakenteiden kuntotutkimusväline on Pilodyn-laite. Pilodyn-laite on tunkeumamittari, joka ampuu 2,5 mm paksun neulan puun sisään vakiovoimalla ja mittaa neulan tunkeumasyvyyttä puuhun. Neulan tunkeumasyvyyden tiedetään korreloivan puun tiheyden kanssa, jonka kautta laitteella voidaan saada kokeellista tutkimusaineistoa puurakenteen kunnosta.

Tämän työn tarkoituksena on tutkia Pilodyn-laitteen käyttömahdollisuuksia puurakenteiden kuntotutkimuksissa. Työ liittyy olennaisesti puurakenteiden kuntotutkimusten ainetta rikkomattomien menetelmien laadun parantamiseen. Tämä työ on jatkotutkimus omasta kandidaatintyöstäni ”Pilodyn-kokeen käyttö puurakenteiden kuntotutkimuksissa”. Kandidaatintyössä tutustuttiin kirjallisuusselvityksellä puun eri ominaisuuksiin, Pilodyn-laitteen käyttöön sekä miten Pilodyn-laitteen tulokset ovat yhteydessä puun eri

ominaisuuksiin. Lisäksi tutkittiin aiempia Pilodyn-laitteesta tehtyjä tutkimuksia ja niiden koemenettelyitä.

1.2 Tutkimuksen tavoitteet ja rajaukset

Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää, onko Pilodyn-laitteen antamalla tunkeumasyvyydellä yhteys puun lujuusominaisuuksien kanssa ja muodostaa tunkeumasyvyyttä vastaava standardin SFS-EN 338 [14] mukainen lujuustaulukointi. Lujuusominaisuudet riippuvat suuresti puun kosteuspitoisuudesta ja näin ollen toisena päätavoitteena on tutkia puun kosteuspitoisuuden vaikutuksia Pilodyn-laitteen tuloksiin. Kolmantena päätavoitteena on yleisesti selvittää laitteen käyttömahdollisuuksia puurakenteiden kuntotutkimuksissa. Mikäli tunkeumasyvyyks korreloi puun lujuuden kanssa, voidaan laitteella arvioida puun lujuutta ja sen vaurioitumista. Tämä lujuus on kuitenkin melko pistemäinen. Tästä syystä tutkimuksen alatavoitteena on tehdä lyhyt ja selkeä ohje kantavien puurakenteiden lujuus- ja vauriokartoitukseen Pilodyn-laitteella. Ohjeessa otetaan kantaa, miten laitetta ja sen tuloksia tulisi tulkita tai käyttää erilaisissa tilanteissa. Lisäksi ohjeessa opastetaan laitteen oikeaan käyttöön ja kerrotaan, miten puun oksaisuus otetaan tuloksissa huomioon. Toisena alatavoitteena on yleisesti tutustua puurakenteiden kunnan tutkimiseen ja puuhun rakennusmateriaalina.

Tarkemmin tutkimuksessa käsitellään kantavien puurakenteiden tutkimusta Pilodyn-laitteella. Työ ei siis käsittele teollisesti valmistettujen liimapuu- tai kertopuurakenteiden tutkimusta. Tämä työ käsittelee puurakenteiden kuntotutkimusta vain Pilodyn-laitteen näkökulmasta. Lisäksi työ rajataan käsittelemään vain suomalaisten havupuurakenteiden kunnan tutkimista. Lujuusominaisuuksista tarkemmin keskitytään vain syiden suuntaiseen puristus- ja vetolujuuteen sekä taivutuslujuuteen.

1.3 Tutkimusmenetelmät ja työn rakenne

Päätutkimusmenetelminä työssä käytetään kokeellista tutkimusta. Kokeellista tutkimusaineistoa kerätään laboratoriossa tehtävillä tutkimuksilla. Laboratoriossa eri ikäisiä ja poikkileikkaukseltaan eri suuruisia puukoekappaleita tutkitaan Pilodyn-laitteella ja koe-kuormituksilla. Lisäksi kokeissa tutkitaan puun oksaisuuden ja kosteuden vaikutuksia tutkimustuloksiin. Laboratoriokokeissa tutkitaan Pilodyn-laitteen tuloksien, puun tiheyden ja puristuslujuuden pyritään korrelaatioita. Kokeellista tutkimusainestoa kerätään myös case-kohteisiin tehtävillä tutkimuksilla. Case-kohteisiin tehtävillä tutkimuksilla tarkennetaan Pilodyn-laitteen käyttömahdollisuuksia puurakenteiden kuntotutkimuksissa.

Kandidaatintyössä tehtyä kirjallisuustutkimusta täydennetään tässä työssä vaadittavilta osin. Kirjallisuustutkimuksen aineisto kerätään analysoimalla Pilodyn-laitteesta jo tehtyjä tutkimuksia sekä tutkimalla puun ominaisuuksia käsittelevää kirjallisuutta. Lisäksi kirjallista tutkimusaineistoa kerätään tutkimalla puurakenteiden kuntotutkimusta käsittelevää kirjallisuutta. Kokeellisen- ja kirjallisuustutkimuksen lisäksi haastatellaan kokeneempia kuntotutkijoita ja rakennusfysiikan asiantuntijoita. Haastatteluilla selvitetään puurakenteiden kuntotutkimuksen peruspiirteitä. Kirjallisuustutkimuksen ja haastatteluiden perusteella tehdään valinnat laboratoriokokeiden suorittamiselle.

Tämä työ koostuu aihetta tutkivasta teoreettisesta osasta, laboratoriokokeiden ja case-tutkimuksien suorittamisesta, tulosten analysoinnista ja johtopäätöksien teosta. Päälukeja on yhteensä kahdeksan. Johdannon jälkeen luvussa 2 tutustutaan puun fysikaalisiin ja rakenteellisiin ominaisuuksiin puurakentamisessa. Kolmannessa luvussa käsitellään lyhyesti puurakenteiden kuntotutkimuksen vaiheita ja suoritettavia toimenpiteitä. Pilodyn-laitteeseen, sen käyttöön ja laitteen aikaisempaan tutkimusaineistoon tutustutaan luvussa 4. Luvussa 5 käydään läpi, miten laboratoriokokeet on suoritettu ja luvussa 6 annetaan kokeissa saadut tulokset. Lisäksi luvussa kuusi esitetään yhden päätavoitteen mukainen lujuustaulukointi. Pilodyn-laiteella tehdyt case-tutkimukset käsitellään luvussa 7. Luvussa 8 tehdään yhteenveto tutkimuksesta ja annetaan lyhyet ohjeistukset tutkimuksien teosta laitteella.

2. PUU RAKENNUSMATERIAALINA

2.1 Puurakentaminen Suomessa

Suomessa puu on ollut luontainen valinta rakennusmateriaalina sen saatavuuden vuoksi. Suomi on asukaslukuunsa ja pinta-alaansa suhteutettuna Euroopan metsäisin maa. [2, s. 33] Suomen pitkistä puurakentamisen perinteistä kertovat muun muassa Porvoon ja Rauman vanhat puutaloalueet, 1600–1800-luvuilla rakennetut vanhat ja edustavat puukirkot ja maaseudun talonpoikaistalot [3, s. 14]. Kuvassa 2.1 on Kullaan puukirkko, joka osaltaan esittää vanhaa suomalaista puurakentamista.



Kuva 2.1. Kullaan puukirkko, 1766–1767. [4]

Puu oli Suomen käytetyin rakennusmateriaali aina 1950-luvun lopulle asti. Kerrostalorakentamisen yleistyttyä ja betonielementtien markkinoille tulon jälkeen puu menetti hieman asemaansa rakennusmateriaalina. 1970-luvun lopun jälkeen puun käyttö rakennusmateriaalina on yleistynyt nopeasti, ja nykyisin kaikesta talonrakennustuotannosta on 50 % puurakennuksia. Tämä selittyy osin sillä, että rakennettujen pientalojen määrä on kasvanut suhteessa kerrostalojen määrään vuoden 1979 jälkeen. Kerrostalotuotannossa puukerrostaloja rakennetaan myös jatkuvasti enemmän kuin aikaisemmin. [2, s. 17–18] Vanhoissa kerrostaloissa välipohjat kannateltiin lähes yksinomaan järeillä puusilla välipohjapalkeilla aina 1900-luvun alkupuolelle asti. Vasta vuoden 1920-luvun jälkeen teräs- ja betonirakenteet lopullisesti syrjäyttivät puiset välipohjarakenteet kerrosta-

loissa. [5, s. 88] Kerrostalojen vesikattorakenteissa puiset rakenteet säilyttivät asemansa paljon pidempään. Aina 1960-luvulle asti kerrostalojen vesikattorakenteet olivat pääosin puisia. [6, s. 75]

Kuten sanottua, Suomi on metsäinen maa. Sen pinta-alasta lähes kolme neljäsosaa on metsää, ja metsäalasta mäntyä on n. 49 % ja kuusta n. 30 %. Kolmanneksi eniten Suomen metsistä löytyy koivua, jonka eri lajikkeita on yhteensä n. 16 %. Lujuusominaisuuksiltaan havupuuta parempaa koivua käytetään jonkin verran vaneriteollisuudessa ja huonekaluissa. Kuusi ja mänty ovat Suomen käytetyimmät puulajit rakennusteollisuudessa. [2, s. 33-34] Tästä syystä tutustaan työssä ainoastaan kuusen ja männyn ominaisuuksiin sekä tutkimiseen.

2.2 Puun rakenne ja ominaisuudet

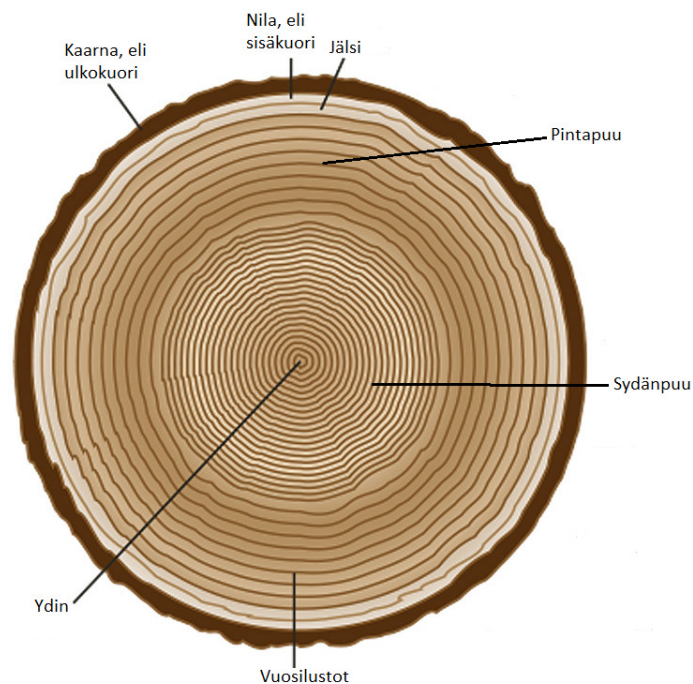
Puu on luonnon tuottama orgaaninen materiaali, ja siksi jokainen puu on aina yksilö. Tämän takia puiden rakenteelliset ominaisuudet riippuvat paljon puuyksilöstä. Rakenteellisten ominaisuuksien vaihtelu vaikuttaa puolestaan puun fysikaalisiin ominaisuuksiin, kuten tiheyteen, lujuuteen ja kosteuteen. Nämä puun fysikaaliset ominaisuudet ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Epäorgaanisiin materiaaleihin verrattuna puu on todella monivivahteinen materiaali ja sen ominaisuudet ovat monen tekijän summa. [2, s. 23–33] Merkittävimmät puun ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät ovat sen kasvumaaperä ja kasvupaikan ympäristö sekä maantieteellinen sijainti [2, s. 58].

Puu koostuu juurista, rungosta ja lehvästöstä. Rakennusteollisuudessa käytettävä sahatavara tuotetaan puun rungosta. Rungon tehtävä, osana puuta, on veden ja ravinteiden kuljettaminen sekä puulle tulevien kuormien vastaanottaminen. Rungon uloin kerros kuori ja kuoren sisäpuolella olevat päällekkäiset vuosilustot eli vuosirenkaat muodostavat puun rungon. Kuori koostuu kovasta ulkokuoresta eli kaarnasta, joka suojaa elävää puuta, sekä pehmeästä sisäkuoresta nilasta, joka kuljettaa lehvästön tuottamia ravinteita alaspäin. Kuoren ja vuosilustojen välissä on jälsikerros, joka tuottaa uusia soluja rungon kasvattamiseksi. [2, s. 22–23]

Suomalaisen puun kasvukausi on n. 10 viikkoa toukokuusta elokuuhun, jolloin puu synnyttää aina uuden vuosiluston rungon ympärille. Havupuilla vuosilusto koostuu selvästi kahdesta erivärisestä osasta, kevätpuusta ja kesäpuusta. Kevätpuu on vaalea ja harva, kun taas kesäpuu on tumma ja tiivis. [2, s. 23] Vuosiluston paksuus, eli vuosilustojen keskinäinen väli, vaikuttaa havupuiden tiheyteen ja näin ollen puun lujuusominaisuuksiin. Mitä paksumpi vuosilusto havupuulla on, sitä pienempi sen tiheys useimmiten on. Harvempi kevätpuu aiheuttaa suurimman osan havupuiden vuosiluston paksuusvaihtelusta. [7, s. A4/5] Kesäpuun tiiviimpi ja kovempi rakenne johtuu sen hitaammasta muodostumisesta. Näin ollen mitä hitaammin puu kasvaa niin, sitä suurempi osuus puun

poikkileikkauksesta on kesäpuuta. Tällöin myös puun tiheys kasvaa. Toisaalta kesäpuun osuuden kasvaessa tiheyden vaihtelut myös kasvavat, sillä kesäpuulla tiheysvaihtelut ovat suurempia kuin kevätpuulla. [8, s. 29-30]

Nuorimmat vuosilustot rungon uloimmalla osalla ovat pintapuuta, jonka tehtävänä on kuljettaa juurien keräämää vettä ylöspäin koko puulle. Puun vanhetessa sen sisimmät pintapuun osat muuttuvat sydänpuuksi. Sydänpuun solukko on kuollutta, ja siksi se ei enää kuljeta juurien keräämää vettä. Männyn sydänpuu on tummempi kuin pintapu, mutta kuusen sydänpuu puolestaan pysyy samanvärisenä kuin pintapu, vaikka senkin ominaisuudet eroavat pintapuusta. [7, s. A4/5] Sydänpuun sisältämät uuteaineet tekevät siitä lujempaa ja lahonkestävämpää kuin pintapu. Havupuiden sydänpuun vedenläpäisevyys myös alenee. Sydänpuun osuus puun rungossa kasvaa jatkuvasti ajan kuluessa. Tästä syystä ennen pitkää puu kuolee, sillä sen pintapu ei enää kykene kuljettamaan vettä riittävästi ylöspäin. [2, s. 23-24] Kuvassa 2.2 on esitelty puun rungon poikkileikkauksen osat.



Kuva 2.2. Puun rungon poikkileikkaus. Muokattu lähteestä [9]

Koska puu on orgaanista ainetta, koostuu puu sille tyypillisistä soluista. Näiden solujen ja soluseinämien ominaisuuksien takia puun ominaisuudet, kuten lujuusominaisuudet, ovat erilaiset sen eri suunnissa. [7, s. A4/1] Juuri puun solujen omalaatuisuus tekee jokaisesta puusta yksilön ja erilaisen, sillä solujen koko ja muoto riippuvat sekä puulajista että ympäristöolosuhteista. Havupuiden solukko koostuu kahdentyyppisistä soluista, trakeideista eli vesisoluista ja tylppysoluista. Nimensä mukaisesti vesisolut kuljettavat vettä rungossa, mutta lisäksi ne vastaavat puun lujuudesta. Havupuun soluista suurin osa on vesisoluja. Tylppysolut puolestaan varastoivat ja kuljettavat puun ravinneaineita.

Havupuiden solutoiminnalle tyypillisiä ovat myös pihkatiehyet sekä solujen huokosten ja niiden läppien toiminta. Pihkatiehyet ovat havupuun solujen muodostamaa solukkoa, jotka erittävät pihkaa. Solujen huokokset ja niiden läpät säätelevät virtauksia puun sisällä. Puun kuivuessa männyn sydänpuun ja kuusen huokosten läpät sulkeutuvat, jolloin virtausten kulku puun sisällä vaikeutuu. Tästä syystä kuusi ja männyn sydänpuu kestävät hyvin säätä, mutta toisaalta tämä ominaisuus estää niiden kyllästämisen. Männyn pinta-puun soluhuokokset puolestaan sisältävät pieniä nystyröitä, ja siksi huokosen läppä ei sulkeudu kokonaan. Tämä mahdollistaa männyn pintapuun kyllästämisen. [2, s. 25–26]

2.2.1 Puun rakenneviat

Puun erilaiset kasvuviat vaikuttavat merkittävästi puun ominaisuuksiin rakennusmateriaalina. Puun oksat, reaktio- ja nuorpuu sekä syyhäiriöt ovat yleisimpiä puun vikoja. Puun erilaisia kasvuvikoja ovat myös muun muassa haavat ja halkeamat sekä havupuilla pihkaraot, mutta näiden vaikutus puun ominaisuuksille ei kuitenkaan ole huomattavan suuri. [10, s. 155] Kuten muutkin puun ominaisuudet, ovat kasvuviat puille hyvin yksilöllisiä ja riippuvat sekä puulajista että ympäristöolosuhteista [7, s. A4/6–7]. Kasvuvikojen merkittävydestä kertoo se, että niiden määrittäminen toimii sahatavaran visuaalisen lujuuslajittelun lähtökohtana [2, s. 61].

Puun oksat ovat välttämättömiä puun elämiselle, mutta ajateltaessa puuta rakennusmateriaalina ovat oksat rakennepuutavaran yleisin ja merkittävin haittatekijä. Puun oksat kasvavat puun rungosta ulospäin, ja siksi ne aiheuttavat epäsäännöllisyyden puun runkoon ja sen syiden suuntaan. Tämän takia oksat vaikuttavat puun lujuusominaisuuksiin negatiivisesti. [2, s. 27–28] Puun oksaisuus onkin yhtenä visuaalisen lujuuslajittelun perustana [7, s. A6/4]. Oksien vaikutuksista puun lujuusominaisuuksiin on kerrottu vielä tarkemmin luvussa 2.3.3. Oksia on käytännössä kahdenlaisia ja ne vaikuttavat hieman eri tavalla puun ominaisuuksiin. Puun rungosta ulkonevia oksia kutsutaan ulko-oksiksi ja rungon sisäisiä oksia kutsutaan sisäoksiksi. Puiden oksaisuus on erilaista sen mukaan, mikä puulaji on kyseessä. Havupuille tyypillistä ovat oksaryhmät sekä puun pituus-suunnassa säännöllisesti olevat oksakiehkurat tai oksaryhmät. [7, s. A4/6-7][11, s. 269-270] Männylle tyypillistä on myös puun tyvessä pitkä oksaton osa, sillä männyn oksat sijaitsevat yleensä lähellä latvaa. Kuusella on oksia enemmän mäntyyn verrattuna, mutta ne ovat paljon pienempiä. Lisäksi kuusen tyven oksaton osa on huomattavasti lyhyempi kuin männyllä. Männyllä suurimpien oksien koko on noin 60 mm, kun puun rungon läpimitta on 35 cm. Taas kuusella samankokoisen puun suurimmat oksat ovat noin 30-40 mm. [8, s. 26-27]

Rakennepuutavaran oksat voidaan ryhmitellä kahdella eri tavalla, niiden laadun tai muodon ja sijainnin perusteella. Laaturyhmittelyllä oksat jaetaan terveisiin, kuiviin, laho-, kuori- ja pystyoksiin. Muodon ja sijainnin perusteella oksat jaetaan lape- ja syrjä-

oksiin sekä usean oksan muodostamiin oksaryhmiin. [2, s. 28] Sahatavara jaetaan oksien koon ja tyyppin perusteella laatuluokkiin. Myös visuaalisessa lujuuslajittelussa oksan koko ja tyyppi vaikuttavat puutavaran lajitteluun. Laatuluokan määrävimmät ominaisuudet sahatavaralla ovatkin oksien koko, sijainti, lukumäärä ja laatu. Pohjoismaisen sahatavaran lajitteluohjeen mukaan sahatavara on jaettu neljään päälaatuluokkaan A, B, C ja D. [2, s. 58-61] Kuvassa 2.3 on esitetty sahatavaran laatuluokitus puun oksaisuuden perusteella. Kuvan 2.3 taulukkoon ei ole merkitty raja-arvoja luokalle D.

PÄÄLAADUT		A	B	C
OKSIEN SALLITTU ENIMMÄISMÄÄRÄ HUONOIMMALLA 1 METRIN OSUUEDELLA				
LAPPEEELLA, terveet ja kuivat oksat/ joista kuorioksia ¹		4 / 2	5 / 3	8 / 4
SYRJÄLLÄ, terveet ja kuivat oksat/ joista kuorioksia ¹		2 / 1	3 / 2	4 / 3
LAPEOKSIEN KOKO				
sahatavaran paksuus, mm	sahatavaran leveys, mm	terveen lapeoksan Ø enintään, mm		
16, 19, 22, 25	75, 100, 115, 125, 150, 175, 200, 225	20	35	50
		25	40	55
		30	45	60
32, 38	75, 100, 115, 125, 150 175, 200, 225	25	40	55
		30	45	60
		35	50	65
44, 50	75, 100, 115, 125, 150 175, 200, 225	30	45	60
		35	50	65
		40	55	70
63, 75	75, 100, 115, 125, 150 175, 200, 225	35	50	65
		40	55	70
		45	60	75
SYRJÄOKSIEN KOKO				
	sahatavaran paksuus, mm	terveen syrjäoksan Ø enintään, mm		
	16, 19	18	•	•
	22, 25	20	•	•
	32, 38	28	30	•
	44, 50	30	40	•
	63, 75	35	50	•
MUIDEN OKSIEN KOKO ULKOLAPPEELLA JA SYRJÄLLÄ				
Oksatyyppi ²	oksin läpimitta enintään % em. terveen oksan mitasta			
Ryhmäoksa	70	70	80	
Kuiva oksa	70	70	100	
Kuoren ympäröimä oksa	50	60	80	
Laho oksa		50	80	

¹ laaduissa B ja C ei enintään Ø 10 mm suuristen terveiden tai kuivien oksien lukumäärälle ole asetettu rajoituksia

laaduissa B ja C sallitaan myös laho-oksa

laaduissa C sallitaan myös enintään Ø 15 mm suuriset oksanreiät tai irto-oksat

• oksan halkaisija on yhtä suuri kuin sahatavaran paksuus

² laaduissa A ja B oksat eivät saa olla irtonaaisia

Kuva 2.3. Sahatavaran laatuluokitus oksaisuuden perusteella. [12]

Nuorpuu ja reaktiopuu ovat rungon poikkileikkaukseen kasvuvikojen takia syntyvää puuainesta. Nuorpuu on, nimensä mukaisesti, puun ensimmäisten vuosilustojen muodostama osuus poikkileikkauksesta. Nuorpuun sijaitsee yleensä kokonaisuudessaan sydänpuussa, sillä ensimmäiset vuosilustot sijaitsevat ytimessä. Nuorpuu on lujuusominaisuuksiltaan heikompaa kuin normaali puuainesta ja sen muodonmuutokset ovat suurempia, sillä sen tiheys on alhainen. Tämän takia nuorpuu heikentää sydänpuun laatua. Kuusen nuorpuun ominaisuudet ovat kuitenkin paremmat kuin männynllä, sillä sen tiheys on melko hyvä. Mitä nopeammin puu kasvaa sitä suurempi on nuorpuun osuus rungon poikkileikkauksesta. Reaktiopuu eli lyly on puolestaan havupuun runkoon kohdistuville

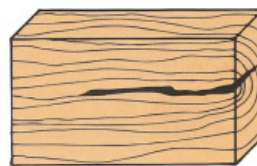
puristusjännitysalueille muodostuvaa puuainesta. Lylyn lujuusominaisuudet ovat hyvät, sillä sen tiheys on suurempi kuin normaalipuun. Kuivattu lylyinen puu on kuitenkin hyvin herkkä hauraalle murtumiselle. [2, s. 29–30][7, s. A4/6]

Puun solujen suunnan poikkeaminen aiheuttaa kierresyisyyttä puulle. Kierresyisyys tai vinosyisyys on yleistä nuorille puille, mutta puun vanhetessa vinosyisyys oikenee hiljalleen. Puun ominaisuudet ovat hyvin erilaisia eri syysuunnissa. Tästä syystä kierre- tai vinosyisyyden aiheuttamat poikkeamat vaikuttavat suuresti puun ominaisuuksiin. [7, s. A4/6] Havupuista kuusi on todella suorasyistä [2, s. 34].

Sekä elävään että kuolleeseen kaadettuun puuhun voi syntyä halkeamia. Erilaisia halkeamia on käytännössä kolmea tyyppiä. Näistä rengashalkeamat ja sydänhalkeamat syntyvät tuoreeseen elävään puuhun. Rengashalkeama menevät vuosilustojen mukaan ja ne esiintyvät yleensä puun sisäosissa. Rengashalkeamat syntyvät tuulen taivuttaessa puuta. Sydänhalkeamat puolestaan kulkevat säteen suuntaisesti, mutta ne ovat huomattavasti yleisempiä lehtipuilla kuin havupuilla. [2, s.30-31][11, s. 304-305] Kolmas halkeamatyyppejä on kaadetun puutavaran kuivauksessa syntyvät kuivumishalkeamat. Kuten sydänhalkeamat, kuivumishalkeamat ovat säteen suuntaisia. Kun puutavaraa kuivataan sen kyllästymispisteen alapuolelle, syntyy puuhun jännityksiä. Jännitykset johtuvat puun eri suuntien erilaisista kutistumisominaisuuksista. Oikeanlaisella kuivauksella voidaan vähentää huomattavasti puutavaran halkeilua. [11, s. 307] Kuvassa 2.4 on esitetty periaatepiirroksia puun eri halkeamatyypeistä.



Sydänhalkeama



Kuivumishalkeama



Rengashalkeama

Kuva 2.4. Eri halkeamatyypit. [2, s. 31]

2.2.2 Tiheys

Sahatavaran tiheys on yhteydessä moniin puun fysikaalisiin ominaisuuksiin, siksi se on yksi sahatavaran tärkeimmistä ominaisuuksista [7, s. A4/7]. Kuten aiemmin on tullut selville, vaikuttaa puun tiheyteen eri puulajeille tyypilliset rakenneominaisuudet. Tämän takia eri puulajien tiheys ei ole samanlainen. Tiheys vaihtelee myös puulajin yksilöiden välillä melko voimakkaasti, riippuen puun kasvunopeudesta. Kuten aiemmin mainittiin, mitä suurempi on kasvunopeus, sitä pienempi on tiheys. Puun kasvunopeus puolestaan riippuu muun muassa ympäristöolosuhteista ja maantieteellisestä sijainnista. [2, s. 43] Yhden puun sisälläkin esiintyy vaihtelua tiheydessä niin poikittais- kuin pituussuunnassa. Poikittaissuunnassa tiheyteen vaikuttavat pääasiassa kevät- ja kesäpuun suhteet. Tämän lisäksi varsinkin männyllä pintaosien tiheydet ovat tavallisesti suurempia kuin ytimen tiheydet. Pituuden suunnassa tiheys on suurimmillaan puun tyvessä ja latvassa alhaisimmillaan. [8, s. 25]

Yksi puun ominaisuus, jonka kanssa tiheydellä on voimakas yhteys, on puun kosteuspitoisuus. Kosteus lisää puun massaa ja jonkin verran myös kasvattaa puun tilavuutta. Puun tilavuuden kasvu sen kosteuspitoisuuden kasvaessa johtuu soluseinämiin tunkeutuneesta kosteudesta. Tilavuus ei kuitenkaan kasva, kosteuden lisääntyessä, samassa suhteessa massan kanssa. Tämän takia puun tiheyttä määritettäessä on ilmoitettava myös puun kosteuspitoisuus. Kun soluseinämät ovat täysin kyllästyneitä, puun tilavuus ei enää kasva. Yleisesti puun soluseinämät ovat täysin kyllästyneitä n. 28 % kosteuspitoisuudessa. Kyllästymispisteen alapuolella puun tiheyden muutosta voidaan pitää likimain lineaarisena kosteuden suhteen. Puun tiheys lasketaan kaavalla 2.1 [7, s. A4/8]

$$\rho_{\omega} = \frac{m_{\omega}}{V_{\omega}}, \quad (2.1)$$

missä alaindeksi ω on puun kosteuspitoisuus massan ja tilavuuden määrittämisellä, ρ on puun tiheys, m on puun massa ja V on puun tilavuus.

Yleisesti puun tiheys ilmoitetaan 12 tai 15 % kosteuspitoisuudessa. Taulukossa 2.1 on esitetty männyn ja kuusen keskimääräinen tiheys 15 % kosteuspitoisuudessa. [2, s. 41-43] Taulukon antamat arvot ovat suuntaa antavia, sillä kuten edellä mainittiin, riippuu puun tiheys puulajinkin sisällä niin monesta tekijästä. Esimerkiksi Puuinfo Oy:n sivustolla annetaan 12–15 % kosteuspitoisuudessa kuusen tiheyden vaihteluväliksi 330–470 kg/m^3 ja männyn tiheyden vaihteluväliksi 330–520 kg/m^3 . [13]

Taulukko 2.1. Suomalaisen kuusen ja männyn tiheys 12 % kosteuspitoisuudessa. [2, s. 41]

Puulaji	Tiheys ρ_{12} [kg/m^3]
Kuusi	440
Mänty	480

Puun tiheys on yhtenä raja-arvona standardin SFS-EN 338 [14] (rakennesahatavaran lujuusluokittelustandardi) sahatavaran lujuusluokkavaatimuksissa. Standardissa ilmoitetaan puun keskiarvotiheys ρ_{mean} ja ominaistiheys ρ_k . Molemmat tiheysarvot on annettu lujuusluokittain puun 12 %:n kosteuspitoisuudessa standardiolosuhteissa (lämpötila 20 °C ja RH-% 65 %). [14, s. 7] Standardissa SFS-EN 338 [14] keskiarvotiheyden lujuusluokkavaatimukset määritetään ominaistiheyden kautta. Keskiarvotiheys voidaan laskea ominaistiheydestä yksinkertaistetusti kaavalla 2.2 [15, s. 13]

$$\rho_{mean} = \rho_k \cdot 1,2. \quad (2.2)$$

Tiheys voidaan määrittää usealla eri tavalla. Näistä tyypillisin tapa on mitata puukappaleen massa ja tiheys tietyssä kosteuspitoisuudessa. Tämän jälkeen tiheys saataisiin kaavalla 2.1. Puurakenteissa luotettavan tiheysnäytteen ottaminen ei aina ole mahdollista. Tästä syystä puun tiheyden määrittämiseen on keksitty muitakin tapoja. Tällaisia tapoja ovat muun muassa röntgenmittaus tai kairausvastuksen määrittäminen. Yksi melko tuntematon tapa määrittää puun tiheys on Pilodyn-laite. [11, s. 141-142] Pilodyn-laitteesta enemmän luvussa 4.

Puun tiheydellä on myös yhteys sen lujuusominaisuuksien kanssa. Esimerkiksi puun kimmomoduuli ja vetolujuus ovat lähes suoraan yhteydessä puun tiheyteen. [2, s. 46–47] Tämän takia tiheys on yhtenä raja-arvona standardin SFS-EN 338 [14] sahatavaran lujuusluokkavaatimuksissa, jossa tiheyden ominaisraja-arvo on annettu lujuusluokittain puun 12 %:n kosteuspitoisuudessa [14, s. 7]. Taulukossa 2.2 on ilmoitettu havupuutavaran ominaistiheysarvot $\rho_{12,k}$ lujuusluokittain.

Taulukko 2.2. Havupuutavaran ominaistiheydet lujuusluokittain. [14, s. 7]

Lujuusluokka	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Tiheys $\rho_{12,k}$ [kg/m^3]	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430

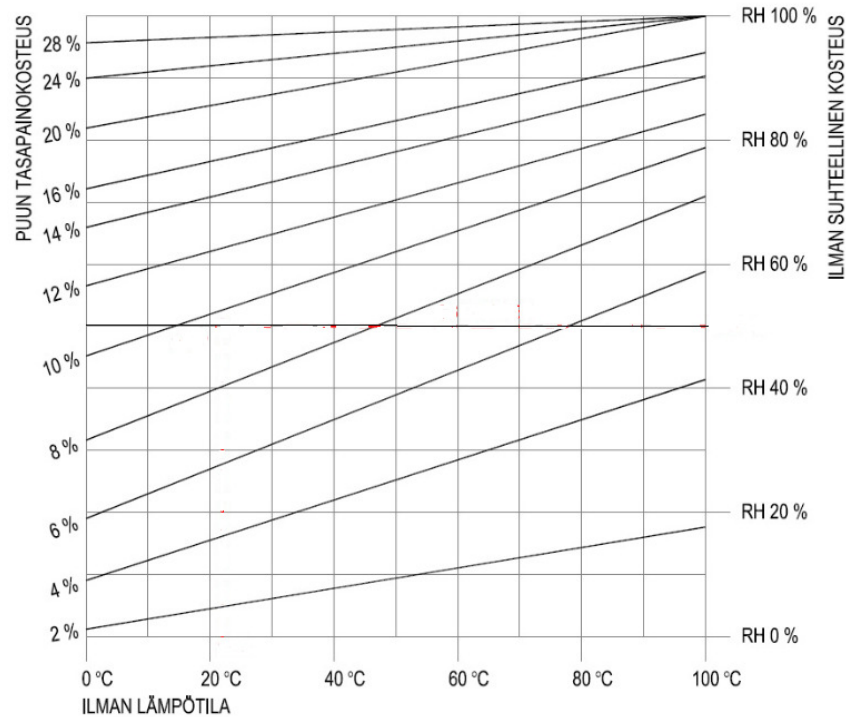
2.2.3 Kosteus

Ilman vettä ei puun eläminen ja kasvaminen olisi mahdollista. Sahatavarana puu sisältää lähes aina vettä, sillä se on kosteutta imevä materiaali. Tästä ominaisuudesta johtuen puun kosteuspitoisuus riippuu ympäristön suhteellisesta kosteudesta. Edellisessä luvussa käytiin läpi kosteuspitoisuuden vaikutusta puun tiheyteen. Tämän lisäksi puun kosteuspitoisuus vaikuttaa moniin muihinkin puun ominaisuuksiin. Näistä merkitsevimmät ovat puun lujuusominaisuudet, muodonmuutokset ja vaurioituminen. Puun kosteuspitoisuutta mitataan usein sähköisillä kosteusmittareilla. Tällaisilla sähköisillä mittareilla tulos voi heittää, 6–28 % kosteuspitoisuuksilla ± 2 %. Sähköisten mittarien käyttö perustuu kahden elektrodin lyömiseen puun pintaa. Koska mittauspäät lyödään puun pintaan, tulee muistaa, ettei mittari välttämättä kerro tarkasti puun sisäosien kosteutta. Tarkemmin kosteuspitoisuus määritetään puun sisältämän veden massan ja puun kuivamassan suhteena kaavan 2.3 mukaisesti [2, s. 43-44][7, s. A4/9–10]

$$\omega = \frac{m_{\omega} - m_o}{m_o} \cdot 100 \%, \quad (2.3)$$

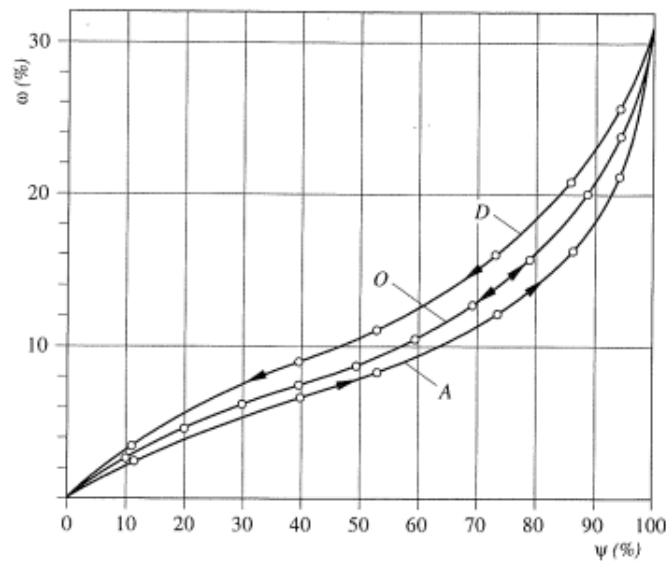
missä ω on puun kosteuspitoisuus prosentteina, m_o on puun kuivamassa ja m_{ω} on puun massa märkänä.

Puu asettuu ympäristön määräämään kosteuspitoisuuteen melko hitaasti. Esimerkiksi poikkileikkaukseltaan 50 x 100 mm² olevan kuusikoekappaleen, jonka kosteuspitoisuus on 20 %, tasapainottaminen ympäristön mukaiseen 10 % kosteuspitoisuuteen kestää yli 4 viikkoa. Tästä on helposti pääteltävissä, että pienet ympäristön olosuhteiden äkilliset muutokset eivät juurikaan vaikuta puutavaran kosteuspitoisuuteen. [7, A4/10] Kuvassa 2.5 on esitetty, miten puun tasapainokosteus riippuu ilman lämpötilasta ja suhteellisesta kosteudesta.



Kuva 2.5. Puun tasapainokosteuden riippuvuus ilman lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. Muokattu lähteestä [16]

Toisaalta puun tasapainokosteuden arvo riippuu myös siitä, saavutetaanko se kosteuden imeytymisen (absorptio) vai luovuttamisen (desorptio) kautta. Kuvassa 2.6 on esitetty kuusen tasapainokosteuden riippuvuutta ilman suhteellisesta kosteudesta vakio­lämpötilassa 20 °C. Kuvasta huomataan, että mikäli puun tasapainokosteus saavutetaan kuivumisen kautta, on se suurempi kuin, mikäli se saavutettaisiin kostumisen kautta. Kyseistä käyrää voidaan käyttää myös männylle. Kuvassa D-kirjain kuvaa desorptiokäyrää, A-kirjain absorptiokäyrää ja O-kirjain vaihtelevaa sorptiokäyrää. [7, s. A4/10]



Kuva 2.6. Kuusen tasapainokosteuden riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta va-
kiolämpötilassa 20 °C. [7, s. A4/11]

Kuten aikaisemmassa luvussa todettiin, puun tilavuus muuttuu kosteuspitoisuuden muuttuessa, kun kosteuspitoisuus on kyllästymispisteen alapuolella [2, s. 43]. Havupuilla tämä kosteuseläminen on pienempää kuin lehtipuilla [2, s. 33–34]. Puun kosteuseläminen on myös erilaista puun erisuunnissa. Esimerkiksi männyn tai kuusen kuivussa tuorekosteudesta täysin kuivaksi on kutistuminen pituussuunnassa noin 0,2 %, säteen suunnassa 4 % ja tangentin suunnassa 8 %. Tästä syystä puurakenteiden pitkittäisellä kosteuselämisellä ei yleensä ole puurakenteiden kannalta suurtakaan merkitystä. Poikittaissuuntainen eläminen taas tulee ottaa huomioon puurakenteiden suunnittelussa. [2, s. 43] Suurilla poikkileikkauksilla myös pitkittäinen kosteuseläminen voidaan joutua huomioimaan. Esimerkiksi kattorakenteisessa voi korkean palkin ylä- ja alapinnan kosteuspitoisuus olla hyvinkin erilainen, jolloin voi syntyä palkin taipumaa. [7, s. A4/14]

Yleisesti käytettävän puutavaran kosteuspitoisuuden tulisi olla mahdollisimman lähellä lopullisen käyttöympäristönsä olosuhteiden mukaista kosteuspitoisuutta ennen sen asennusta. Tällöin vältetään haitalliselta poikittaissuuntaiselta kosteuselämiseltä. Tuoreen kaadetun puun kosteuspitoisuus on yleisesti 30-200 %. Tästä syystä puutavara on käytännössä aina kuivattava ennen käyttöä [2, s. 49]. Kuivauksen seurauksena sahatavaraan voi syntyä muodonmuutoksia, koska kosteuseläminen puun eri suunnissa on erisuuruista. Muodonmuutosten, kuten vääryyden ja kierouden, lisäksi puussa voi esiintyä myös halkeilua sen kuivussa. Kuivumishalkeilu on sitä merkittävämpää mitä suurempi on poikkileikkaus. [7, s. A4/12-14] Kuusi kieroutuu ja halkeilee helposti kuivussa, mutta mäntyyn verrattuna kuusi kestää paremmin kosteuden vaihtelua ja se imee kosteutta vähemmän kuin mänty [2, s. 34].

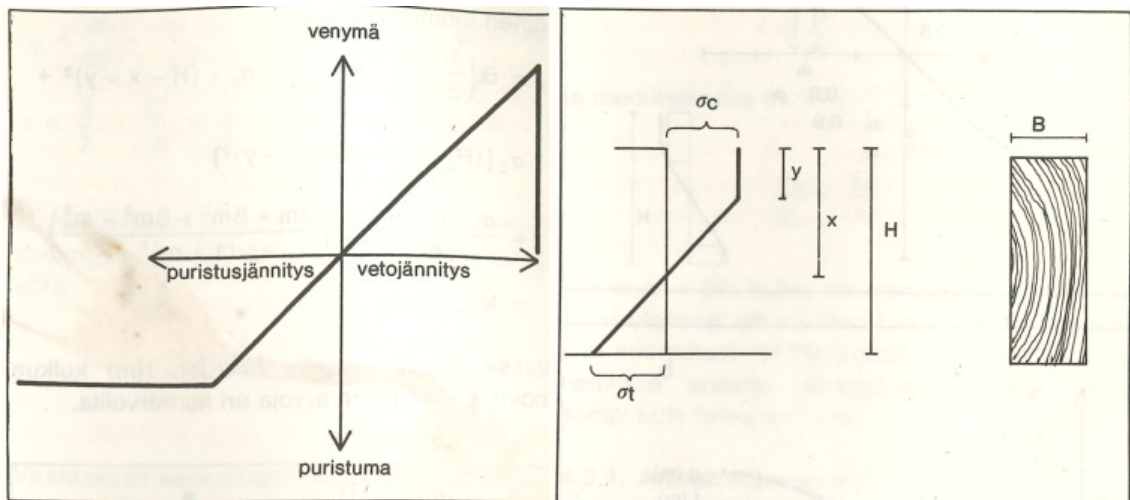
2.3 Lujuus

Kuten kosteuseläminenkin, ovat puun lujuusominaisuudet erilaisia puun eri suunnissa. Esimerkiksi syiden suunnassa ovat puun lujuusominaisuudet moninkertaiset verrattuna syitä vastaan kohtisuoraan suuntaan (ks. Taulukko 2.3). Omaan painoonsa nähden puun lujuusominaisuudet ovat hyvät. Tämän takia on puu suosittu kattorakenne myös kivirakennuksissa. Tosin puun kimmomoduuli ja leikkauslujuus ovat pieniä teräkseen ja betoniin verrattuna. [7, s. A5/2–5] Havupuista mänty on lujuusominaisuuksiltaan hieman kuusta parempaa, mutta toisaalta kuusi on sitkeämpää, kuten taulukosta 2.3 nähdään [2, s. 34].

Taulukko 2.3. Kuusen ja männyn lujuusominaisuuksia. [2, s. 41]

Puulaji	Puristuslujuus		Vetolujuus	Taivutuslujuus	Kimmomoduuli	Tiheys
	Syysuuntaan N/mm^2	Kohtisuoraan vasten syysuuntaa N/mm^2	Syysuuntaan N/mm^2	N/mm^2	N/mm^2	kg/m^3
Kuusi	50	5,5	90	75	10500	440
Mänty	55	7,5	100	100	11800	480

Virheettömällä puulla syiden suunnassa puristuslujuus on noin puolet pienempi kuin vetolujuus, mutta puristuslujuuden murtotapa on puolestaan huomattavasti sitkeämpi. Puristusrutto tapahtuu syiden nurjahduksen seurauksena. Yleensä taivutuslujuus on lähes yhtä suuri kuin vetolujuus. Puurakenteen taivutuksessa syntyy puurakenteeseen puristus- ja vetopuoli. Ajateltaessa yläpuolelta kuormitettua palkkia syntyy yläpintaan puristus- ja alapintaan vetopinta. Kuormituksen lisääntyessä puristuspuolella syyt alkavat nurjautaa. Tämä aiheuttaa neutraaliakselin siirtymistä lähemmäs vetopuolta. Neutraaliakselin siirtyminen taivutetussa rakenteessa aiheuttaa hauraan murron vetopuolella. Tästä syystä puun taivutuslujuus on lähes yhtä suuri kuin vetolujuus. [8, s. 34-35] Kuvassa 2.7 on esitetty taivutetun poikkileikkauksen jännitysten ja venymän sekä puristuman jakaumaa. Kuvasta voidaan nähdä, että palkin poikkileikkauksen keskiosat ovat vähiten kuormitettuja. Lisäksi oikeanpuoleisesta kuvasta voidaan nähdä, miten neutraaliakseli liikkuu kohti vetopintaa puristuspuolen myötäessä.

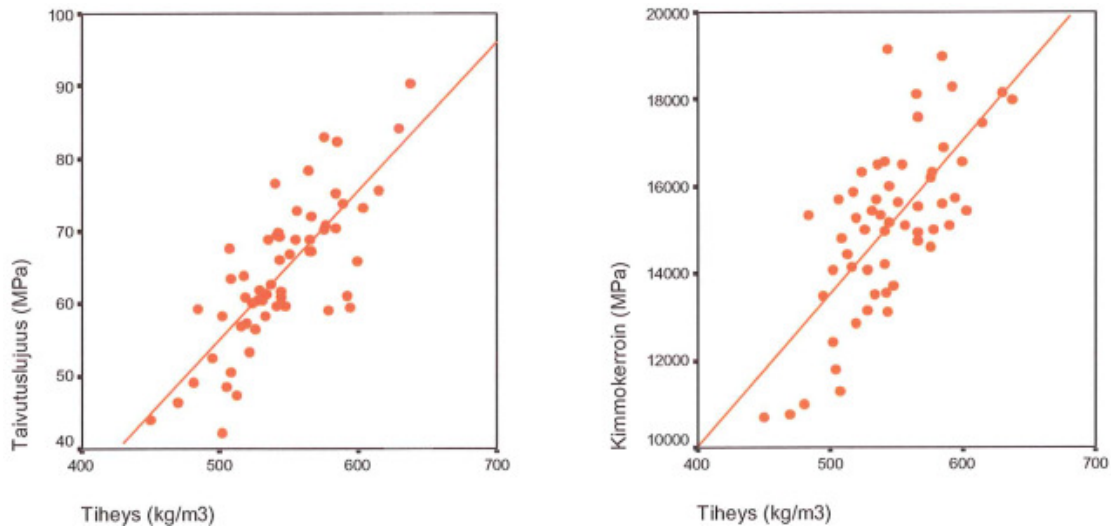


Kuva 2.7. Taivutetun poikkileikkauksen jännitysten ja venymän sekä puristuman jakaumaa. [17, s. 39]

Puun lujuusominaisuudet ovat monen tekijän summa. Tiheyden ja kosteuden lisäksi puun lujuuksiin vaikuttavat suuresti sen erilaiset viat.

2.3.1 Tiheyden vaikutus puun lujuuteen

Eniten puun lujuuteen vaikuttaa sen tiheys. Mitä suurempi tiheys puulla on, sitä parempaa se on lujuusominaisuuksiltaan [2, s. 46]. Esimerkiksi männyllä on hieman suurempi tiheys kuin kuusella ja sitä mukaa hieman paremmat lujuusominaisuudet [2, s. 34]. Useiden kirjallisuuslähteiden mukaan virheettömän puun tiheys on käytännössä suoraan verrannollinen lähes kaikkien lujuusominaisuuksien kanssa [2, s. 46-47][17, s. 34-42]. Kuvassa 2.8 on esitetty esimerkkinä harvennuskäynnin taivutuslujuuden ja kimmomoduulin riippuvuudet puun tiheydestä. Kuva on Stödin ja Verkasalon [18] tutkimuksesta, jossa tutkittiin harvennuskäynnistä saatavan sahatavaran lujuutta ja jäykkyyttä. Kyseisessä tutkimuksessa käytettiin lähes 2 metriä pitkiä sahatavarakappaleita, jolloin koe-kappaleet ovat sisältäneet puun vikaisuuksia. [18, s. 4] Kuvasta voidaan nähdä, että kun kyseessä ei ole puhdas virheetön puukappale, eivät lujuusominaisuudet ja tiheys ole täysin lineaarisesti riippuvaisia.

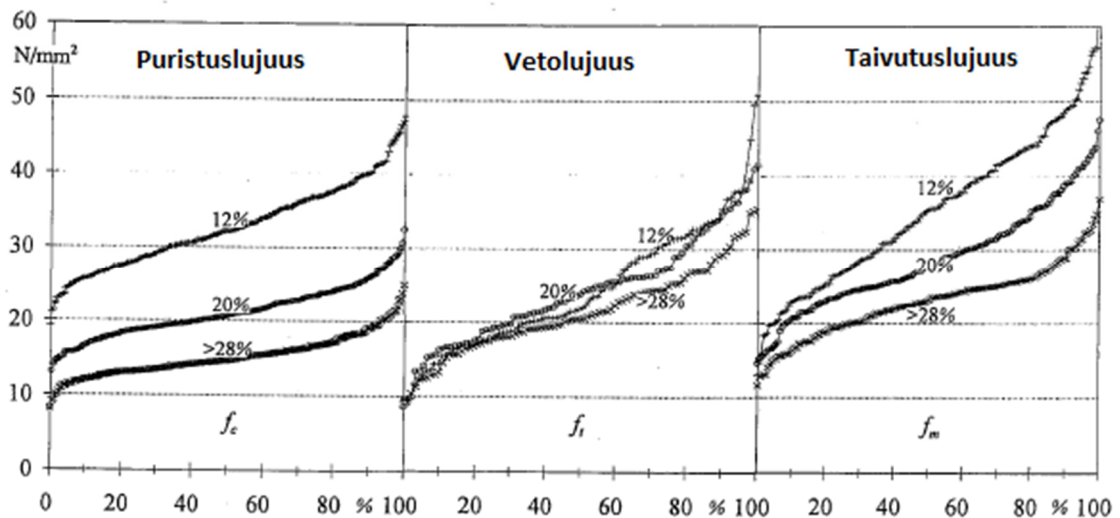


Kuva 2.8. Männyn tiheyden ja taivutuslujuuden sekä kimmomoduuli riippuvuus toisistaan. [18, s. 7]

Puun tiheys kasvaa ytimestä pintaan päin mentäessä [8, s.25]. Tästä syystä myös puun lujuusominaisuudet paranevat pintaan päin mentäessä. Varsinkin puurakenteen taivutuslujuuden kannalta tällä on suuri merkitys, sillä useimmiten puun pintaosat ovat puristus- ja vetopinnoilla. [8, s. 83]

2.3.2 Kosteuden vaikutus puun lujuuteen

Puun kosteuspitoisuudella on huomattava merkitys puun lujuusominaisuuksiin. Virheettömällä puulla kosteuspitoisuuden ollessa 8–20 % voidaan kosteuspitoisuuden ja lujuusominaisuuksien olettaa riippuvan toisistaan lähes lineaarisesti. Ylitettäessä puun soluseinämien kyllästymispiste, lujuusominaisuudet eivät enää vaihtelee kosteuden vaikutuksesta vaan pysyvät lähes vakioina. Kosteuspitoisuuden vaikutus lujuusominaisuuksiin riippuu myös puun laadusta. Tässä kuitenkin esiintyy vaihtelua eri lujuusominaisuuksien kanssa. Esimerkiksi huonolaatuisen sahatavaran vetolujuus on käytännössä täysin riippumaton puun kosteuspitoisuudesta. Sen sijaan puristuslujuus on riippuvainen kosteudesta kaikilla puulaaduilla. Kuvassa 2.9 on esitetty kuusen veto, puristus- ja taivutuslujuuden käyttäytymistä eri kosteuspitoisuuksilla ja laaduilla. Kuvassa x-akselilla prosenttimäärä kertoo puun laadun. Esimerkiksi 100 %:n arvo kuvaa virheetöntä puuta, 50 % on keskiarvolaadun omaava puu ja 0 % on huonolaatuisin puu. Kuvasta voidaan nähdä, että kosteus vaikuttaa huomattavasti enemmän puristuslujuuteen, kuin mitä se vaikuttaa vetolujuuteen. Taas vaikutus taivutuslujuuteen on näiden kahden lujuusominaisuuden välistä. Tämä selittyy sillä, että taivutuslujuus ylittää näiden kahden lujuusominaisuuden yhdistelmä. Lisäksi kuvasta voidaan nähdä, että puun laadun merkitys vähenee puristuslujuudessa kosteuden kasvaessa. [7, s. A4/10 ja 15–16]



Kuva 2.9. Lujuusominaisuuksien riippuvuus puun eri laaduista ja kosteuspitoisuuksista. Muokattu lähteestä [7, s. A4/16]

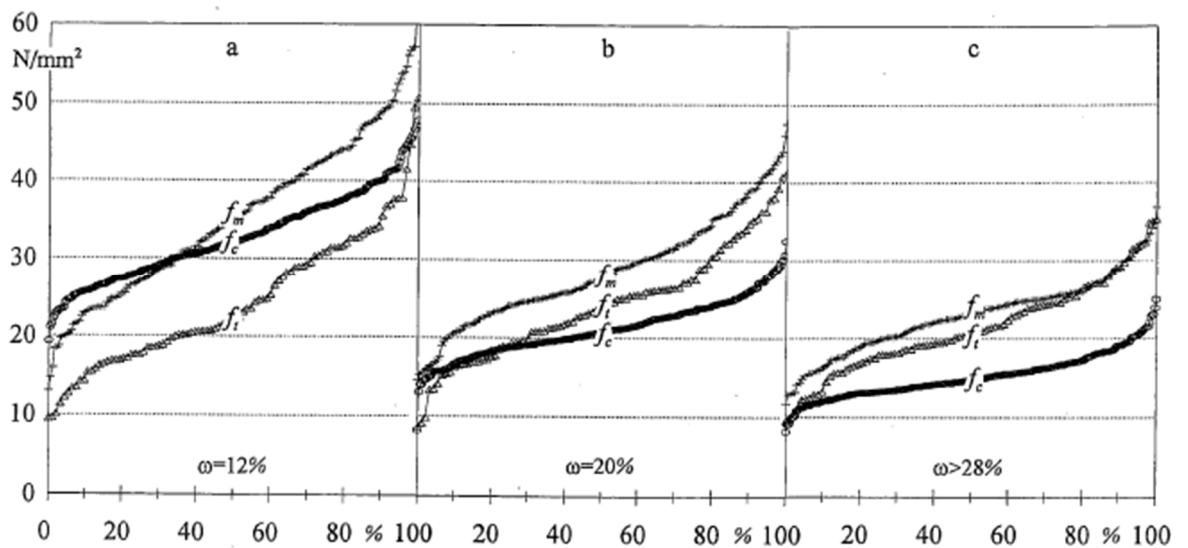
Kosteuden vaikutus puun lujuuteen on niin suuri, että se otetaan huomioon puurakenteiden mitoituksessa k_{mod} kertoimella. Kyseinen kerroin ottaa huomioon kosteuspitoisuuden lisäksi kuormitusajan. Kosteuspitoisuuden ja ympäristöolosuhteiden mukaan puurakenteet jaetaan käyttöluokkiin 1-3. Näistä käyttöluokka 1 vastaa standardiolosuhdetta (lämpötila 20 °C ja RH-% 65 %). Käyttöluokkaan 2 kuuluvat taas ne puurakenteet, joiden kosteuspitoisuus on alle 20 %. Käyttöluokkaan 3 taas kuuluvat rakenteet, joiden kosteuspitoisuus voi olla pitkäaikaisesti yli 20 %. [19, s. 15] Kuvan 2.10 taulukon mukaan voidaan määrittää k_{mod} kerroin käyttöluokan ja kuormitusajan perusteella.

Materiaali	Käyttöluokka	Kuorman aikaluokka		
		Pysyvä	Keskipitkä	Hetkellinen
Sahatavara, Pyöreä puutavara, Liimapuu, LVL, Vaneri, CLT	1	0,60	0,80	1,10
	2	0,60	0,80	1,10
	3	0,50	0,65	0,90
Lastulevy P4 ¹⁾ , OSB/2 ¹⁾ , Kova kuitulevy	1	0,30	0,65	1,10
	2	0,20	0,45	0,80
Lastulevy P6 ¹⁾ , OSB/3 ja OSB/4	1	0,40	0,70	1,10
	2	0,30	0,55	0,90
Puolikovat kuitulevyt: MBH.LA ¹⁾ , MBH.HLS, MDF.LA ¹⁾ ja MDF.HLS	1	0,20	0,60	1,10
	2	-	-	0,80

Kuva 2.10. Kertoimen k_{mod} arvot käyttöluokan ja kuormitusajan mukaan. [19, s. 17]

Kuten edellä mainittiin, taivutettuun rakenteeseen syntyi sekä puristus- että vetopinta ja yleensä rakenne murtuu vetopinnasta hauraasti. Tämä ei kuitenkaan ole aivan yksiselitteistä. Taivutetun puurakenteen murtotapa riippuu nimittäin myös sen kosteuspitoisuudesta, kuten kuvasta 2.11 käy ilmi. Kuvassa on kosteuspitoisuuksien ω (12 %, 20 %

ja 28 %) mukaan 3 erilaista kuvaajaa a-c, joihin on piirretty kuusen puristus-, veto- ja taivutuslujuuden käyrät sen laadun mukaan. Kuvan 2.11 kuvaajissa y-akselilla on puun lujuus ja x-akselilla prosenttimäärä kertoo puun laadun. Eli 100 %:n kohta vastaa täysin virheetöntä puuta, kuten kuvassa 2.9. Kuvasta voidaan nähdä, että käyttöluokan 2 ja 3 (b- ja c-kuvaajat) mukaisilla kosteuspitoisuuksilla puristuslujuus on pienempi, kuin vetolujuus lähes kaikilla puulaaduilla. Tällöin korkeilla kosteuspitoisuuksilla taivutettu puurakenne murtuu sitkeästi puristuspuolelta. Alle 20 % kosteuspitoisuuksilla puurakenne murtuu lähes aina hauraasti vetopuolelta.



Kuva 2.11. Puun puristus- (f_c), veto- (f_t) sekä taivutuslujuuden (f_m). käyttäytyminen kosteuspitoisuuden ja puun laadun mukaan. [7, s. A4/16]

2.3.3 Ajan vaikutus puun lujuuteen

Sahatavaran lujuusominaisuudet heikkenevät kuormituksen alaisena ajan myötä, johtuen puun suuresta virumisesta. Pitkäaikaisen kuormituksen alaisen sahatavaran lujuus voi laskea 10 vuoden kuluessa 60 %:in alkuperäisestä lyhytaikaisesta lujuudesta. Kosteudella on merkittävä rooli puun kuormitusajasta riippuvassa lujuuden alenemisessä. Korkeassa kosteuspitoisuudessa olevien puurakenteiden lujuus heikkenee ajan myötä nopeammin, kuin mitä kuivissa olosuhteissa olevien puurakenteiden lujuudet. [7, s. A4/17-18] Kuten edellisestä luvusta tuli ilmi, otetaan kuormitusajan vaikutukset huomioon mitoituksessa k_{mod} kertoimella. Tämän lisäksi pitkäaikaisten kuormien aiheuttama viruma otetaan huomioon taipuman laskennassa k_{def} kertoimella [19, s. 16]. Edellä mainittu viruman aiheuttama lujuuden aleneminen koskee lähinnä tilannetta, jossa sahatavara on tasaisen kuormituksen alaisena rakenteessa muuttumattomana.

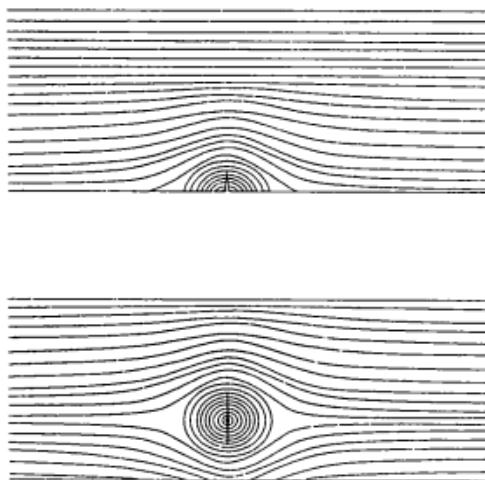
Ikääntymisen seurauksena puun lujuusominaisuuksien alenemisesta on kuitenkin hie- man ristiriitaista tietoa. Cavallin et. al. [20] tutkimuksien mukaan taivutuslujuudessa,

syiden suuntaisessa puristuslujuudessa ja iskulujuudessa voi tapahtua lujuuden alentumaa puutavaran ikääntyessä, mutta ei läheskään aina. Kyseisessä tutkimuksessa on tutkittu eri ikääntynyttä puutavaraa koskevia tutkimuksia ja koottu näiden tuloksia. Kyseisen tutkimuksen mukaan ainoastaan iskulujuudessa oli havaittu lähes poikkeuksetta lujuuden alentumaa ikääntymisen seurauksena. [20, s. 1-24]

Puun ikääntymisen vaikutusta puun eri lujuusominaisuuksiin on vaikea arvioida, ilman puun historian tarkkaa tuntemista. Vanhan puutavaran alkuperäisiä ominaisuuksia ei tunneta, joten on vaikeaa arvioida niiden muutoksia. Lisäksi vanha puutavara voi esimerkiksi sisältää alkavaa tai alkavana pysähtynyttä lahovauriota, jota ei ilman mikroskooppia huomata. [20, s. 3-4][11, s.230-232] Ja jo pienikin lahon aiheuttama vähentyminen vaikuttaa huomattavasti puun lujuusominaisuuksiin, kuten jäljempänä luvussa 2.5 tulee ilmi [11, s. 327].

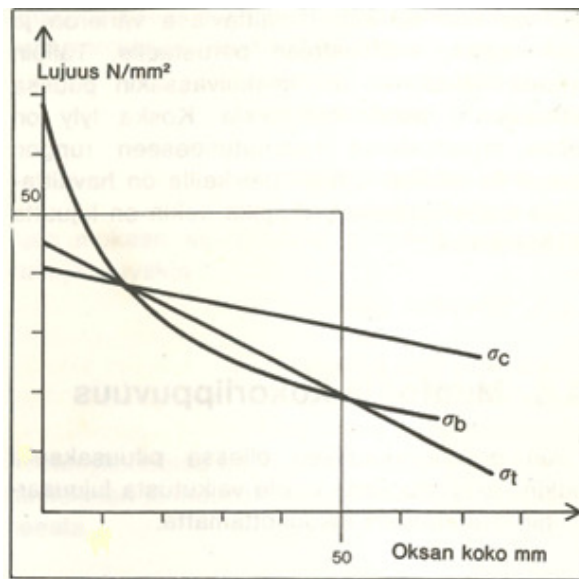
2.3.4 Rakennevikojen vaikutus puun lujuuteen

Kuten taulukossa 2.3 puun lujuusominaisuudet ilmoitetaan yleensä virheettömän puun mukaan. Puun erilaisilla rakennevioilla on kuitenkin suuri merkitys sahatavaran lujuusominaisuuksiin. Lujuuden kannalta merkittävin puun rakennevika on oksat. Myös muut syysuunnan häiriöt sekä halkeamat ja reaktiopuu vaikuttavat lujuusominaisuuksiin negatiivisesti, mutta näiden vaikutukset eivät ole niin merkittäviä. Halkeamat heikentävät lähinnä puun leikkauslujuutta. Kuten yllä mainittiin, ovat puun lujuusominaisuudet huomattavasti paremmat puun syiden suunnassa. Tästä syystä syysuunnan häiriöt, kuten kierre- ja vinosyisyys, heikentävät puun lujuusominaisuuksia. Lisäksi syiden kiertyessä rungossa voi tukin sahaus sahatavaraksi aiheuttaa syiden katkeamista, mikä heikentää edelleen puun lujuutta. Kuvassa 2.12 on esitetty oksan aiheuttamaa syiden kaareutumista. [8, s. 38-39]



Kuva 2.12. Oksan aiheuttamaa syiden kaareutumista. [8, s. 39]

Oksatkin aiheuttavat puuhun paikallisia syysuunnan poikkeamia, sillä oksien syysuunta on käytännössä kohtisuorassa varsinaisen puun syysuuntaan nähden. Lisäksi puun syyt kaareutuvat kiertäessään oksan. Lujuusominaisuuksista syiden suuntainen vetolujuus kärsii eniten oksista ja taas puristuslujuus vähiten, kuten kuvasta 2.13 käy ilmi. Oksan vaikutus taivutuksessa taas riippuu paljolti siitä, sijaitseeko oksa puristus- vai vetopuolella. Vetopinnalla oleva oksa heikentää taivutuslujuutta enemmän kuin oksa puristus-pinnalla. [17, s. 43] Taivutetussa poikkileikkauksessa keskellä olevan oksan vaikutus on kuitenkin pienin, sillä keskiosilla vallitsee yleensä pienimmät jännitykset (ks. kuva 2.7). [17, s. 39]



Kuva 2.13. Oksien ja niiden koon vaikutukset puristus- (σ_c) ja vetolujuuteen (σ_t) sekä taivutuslujuuteen (σ_b). Muokattu lähteestä [17, s. 43]

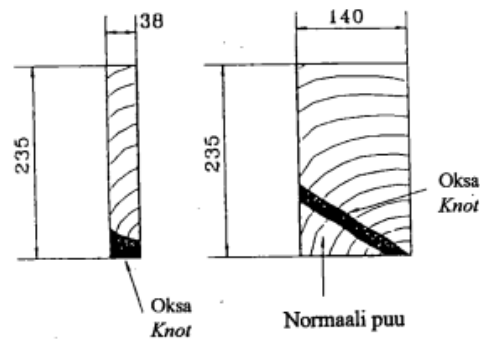
Puukappaleen puristuksessa ei oksan sijainnilla ole merkitystä toisin kuin taivutusrasituksessa. Puristuskappaleessa oksan vaikutus voidaankin mallintaa suhteellisella oksapinta-alalla. Tämä tarkoittaa sitä, että oksan pinta-alan kasvaessa sen vaikutuskin kasvaa. Taivutusrasituksen lisäksi vetorasituksessakin oksapinta-alan lisäksi tulee ottaa huomioon oksan sijainti. Vetorasituksessa kappale murtuu usein nurkkaa tai syrjää lähellä olevan oksan kohdalta. Taivutuksessa taas oksan vaikutusta voidaan mallintaa reikäanalogian avulla. Tällöin oksa mallinnetaan tyhjäksi reiäksi ja rasitukset huomioidaan vain jääneelle poikkileikkaukselle. Reikäanalogia ei kuitenkaan ole täydellinen vaikutusten arviointitapa, sillä se ei ota huomioon oksan ympärillä olevia syyhäiriöitä. Puristus- ja vetorasituksessa reikäanalogiaa ei voida käyttää oksien vaikutusten mallintamiseen. [8, s. 38]

2.3.5 Koon vaikutus puun lujuuteen

Sahatavaran pituuden ja poikkileikkauksen koon vaikutuksen tarkastelu tapahtuu yleisesti Weibullin heikoimman lenkin teorian mukaan. Tämän teorian mukaan vetorasitukselle altistuneen puurakenteen lujuus on yhtä suuri kuin rakenteen heikoimman kohdan lujuus. Eli käytännössä puurakenteen lujuus olisi kauttaaltaan yhtä suuri kuin heikoimman kohdan lujuus. Tällainen heikko kohta tarkoittaa oksaa tai muuta puun vikaisuutta. Yksinkertaistetusti tämä pätee aksiaalisilla veto- ja puristuskuormituksilla, sillä aksiaalinen kuorma on yleensä jatkuva koko kappaleella. Taivutusrasituksessa Weibullin teoria taas ei täysin päde sellaisenaan. Taivutetussa rakenteessa ei yleensä vallitse vakio-momenttia koko rakenteessa, vaan rasituksen suuruus vaihtelee. Tästä syystä taivutetussa rakenteessa tulee ottaa huomioon myös se, että millä todennäköisyydellä heikoin lenkki sijaitsee maksimirasituksen alueella. [8, s. 41-42]

Weibullin teorian mukaisesti sahatavaran pituuden kasvaessa lujuus alenee. Pituuden kasvaessa on suurempi todennäköisyys sille, että kappale sisältää murron aiheuttaman oksan tai muun vikaisuuden. Tämä sen takia, että oksien määrä kasvaa pituuden kasvaessa. Tämä pituusvaikutus on havaittu niin vedossa, puristuksessa kuin taivutuksessa-kin. [8, s. 43]

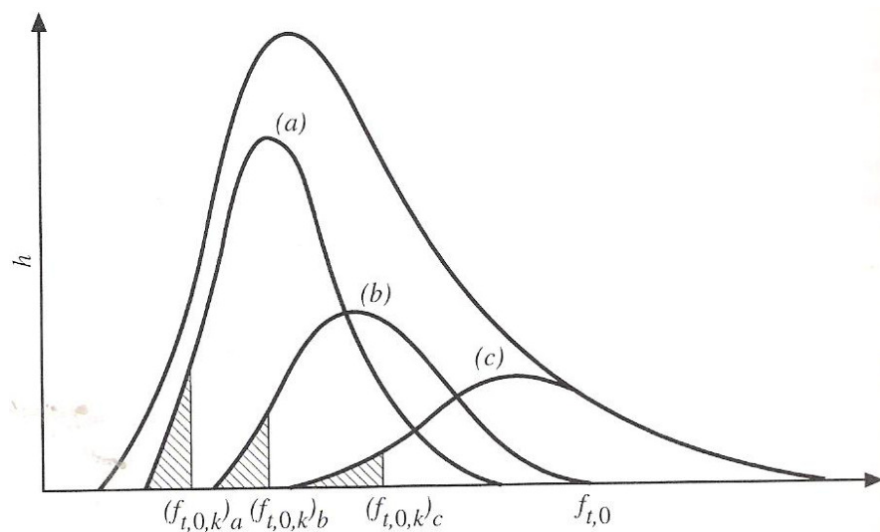
Weibullin teorian mukaan lujuusominaisuuksien tulisi heiketä myös poikkileikkauksen koon kasvaessa, sillä tällöin suuren oksan todennäköisyys kasvaa [8, s. 43]. Pihlajamaan ja Jantusen [8] tutkimuksen mukaan tämä ei kuitenkaan pidä täysin paikkaansa. Pihlajamaa ja Jantunen tutkivat tutkimuksissaan järeän sahatavaran mekaanisia ominaisuuksia. He tulivat tutkimuksissaan siihen tulokseen, että poikkileikkauksen leveyden kasvaessa oksien vaikutukset puun lujuuteen vähenevät. Tämä johtuu siitä, että suomalaisten havupuiden suurimpien oksien koko on puulajille lähes vakio. [8, s. 78] Tällöin oksan suuruuden todennäköisyys ei kasva loputtomasti poikkileikkauksen kasvaessa. Kuvassa 2.14 on esitetty poikkileikkauksen leveyden merkitystä lujuuden kannalta. Suuremmissa poikkileikkauksessa oksan suhteellinen pinta-ala on huomattavasti pienempi alapinnalla.



Kuva 2.14. Poikkileikkauksen leveyden vaikutus oksan merkittävyyteen vikana. [8, s. 48]

2.4 Puun lujuuslajittelu

Puun lujuusominaisuudet vaihtelevat, eri suuntien lisäksi, saman puulajin edustajien välillä sekä yksittäisen puun sisällä. Tästä syystä kantavien rakenteiden sahatavara lujuuslajitellaan joko koneellisesti tai visuaalisesti. [7, s. A5/1] Ilman lujuuslajittelua iso osa sahatavaroiden lujuuskapasiteetista jäisi hyödyntämättä. Kuvan 2.15 kuvaajassa on esitetty vetolujuuden mukaan kolmeen lujuusluokkaan a, b ja c lajiteltu sahatavaraerä. Kuvan pystyakselilla on esiintymistiheys ja vaaka-akselilla on vetolujuus. Kuvasta voidaan nähdä, miten suuri osa sahatavaraerän lujuuskapasiteetista jäisi käyttämättä lajittelemattomana (ylin käyrä). Lisäksi kuvassa nähdään, miten lujuusluokkien kesken on päällekkäisyyksiä. Tämä johtuu siitä, että lujuuslajittelussa lujuus määritetään epäsuorasti, jolloin lajittelun mukainen lujuus ei täysin korreloi todellisuuden kanssa. Tästä syystä lajitteluun vaaditaan varmuutta. [7, s. A6/1-2]



Kuva 2.15. Vetolujuuden mukaan kolmeen eri lujuusluokkaan a, b ja c lajiteltu sahatavaraerä. [7, s. A6/2]

Lujuuslajittelun perustana on varmistaa, että sahatavara on lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiltaan riittävän kestävä. Tämä tehdään määrittämällä erilaisia raja-arvoja lujuuslajiteltavalle puutavaralle. Tällaisia raja-arvoja ovat esimerkiksi vikojen määrä, kierous, vuosirengasväli ja taivutuslajittelu. [7, s. A6/3] Puun ominaisarvojen perustues- sa alempaan 5 %:n fraktiiliin on mahdollista, että 5 % lujuusluokan puutavarasta on oi- kealta lujuudeltaan kyseistä lujuusluokkaa heikompia. Näiden epäsuotuisaan 5 %:iin kuuluvien puutavaroiden kestävyys varmistetaan vielä jakamalla puutavaran lujuudet ja kertomalla kuormat osavarmuusluvuilla. [21, s. 270]

Lujuuslajiteltu sahatavara voidaan jakaa standardin SFS-EN 338 [14] mukaisiin lujuus- luokkiin. Kyseisen standardin mukaiset havupuiden C-luokat ovat Suomessa yleisesti käytössä. Rakennusteollisuudessa käytetyin lujuusluokka Suomessa on C24. Ylemmistä lujuusluokista varsinkin C35 on yleisesti käytössä kattoristikoiden valmistuksessa. [22, s. 7-8] Taulukossa 2.4 on esitetty standardin SFS-EN 338 [14] mukaiset lujuusluokat ra- ja-arvoineen. Taulukon ominaistiheys, ominaiskimmomoduuli ja ominaislujuudet perus- tutuvat alempaan 5 %:n fraktiiliin. Kaikkien taulukon 2.4 ominaisarvojen laskenta suori- taan standardien SFS-EN 384 [15] ja SFS-EN 14358 [43] mukaan [14, s. 5-7][15, s. 3]. Kaikki taulukon arvot vastaavat standardiolosuhteiden (lämpötila 20 °C ja RH-% 65 %) mukaisia arvoja. Eli taulukon arvot ilmoitetaan sahatavaran kosteuspitoisuuden ollessa 12 %. Taulukon lujuusluokat ovat määritetty taivutuslujuuden ja tiheyden ominaisarvon sekä syiden suuntaisen kimmomoduuli keskiarvon mukaan. Lujuusluokkien muut lu- juusarvot on määritetty laskennallisesti standardin SFS-EN 384 [15] mukaan edellä mainituista tekijöistä. [14, s. 5-7]

Taulukko 2.4. Standardin SFS-EN 338 mukaiset lujuusluokat havupuille. [14, s. 7]

	Luokka	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Ominaislujuudet [N/mm²]													
Taivutuslujuus	$f_{m,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50
Vetolujuus	$f_{t,0,k}$	7,2	8,5	10	11,5	13	14,5	16,5	19	22,5	26	30	33,5
	$f_{t,90,k}$	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
Puristuslujuus	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
	$f_{c,90,k}$	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3
Leikkauslujuus	$f_{v,k}$	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4	4	4	4	4	4
Jäykkyysominaisuudet [kN/mm²]													
KA. kimmomoduuli	$E_{m,0,mean}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16
Ominaiskimmomoduuli	$E_{m,0,k}$	4,7	5,4	6	6,4	6,7	7,4	7,7	8	8,7	9,4	10	10,7
KA. kimmomoduuli	$E_{m,90,mean}$	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,4	0,43	0,47	0,5	0,53
Liukumoduuli	G_{mean}	0,44	0,50	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1
Tiheydet [kg/m³]													
Ominaiistiheys	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
KA. tiheys	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Lujuuslajittelussa puutavaran ominaisarvot, kuten ominaistaivutuslujuus ja -tiheys, määritetään aina otosjoukolle kerrallaan. Eli yksittäiselle sahatavarakappaleelle lujuusluokitusta ei anneta. Tarkemmin ottaen lujuuslajittelu tehdään yleisesti usealle eri otosjoukolle samaan aikaan, jotka jaetaan otosjoukoittain lujuusluokkiin. Näiden samaan aikaan testattavien otosjoukkojen tulee kuitenkin mahdollisimman homogeenisiä. Eli samaa puulajia edustavia saman ikäisiä yksilöitä samalta alueelta. [7, s. A7/1-7]

Käytännössä lujuuslajiteltava puu sisältää lähes aina puun erilaisia vikoja. Näin ollen myös taulukon 2.4 mukaiset lujuusluokat määritellään pääosin oksia ja muita vikoja sisältäville puukoekappaleille. Eli esimerkiksi taulukon 2.4 annetut taivutuslujuudet ovat vikoja sisältävien puiden lujuuksia. Taulukon ominaisuuksista poikkeus on tiheys, joka on virheettömän puun tiheys. Tämä selviää myös tarkastelemalla standardia SFS-EN 408 [23], jossa määritellään puun eri ominaisuuksien määrittystavat. Standardin ominaisuuksien määrittystavoissa ei puun vikojen määrää rajoiteta paitsi tiheyden kohdalla, joka määritellään aina virheettömälle puulle. [23]

2.4.1 Visuaalinen lujuuslajittelu

Visuaalisella lujuuslajittelulla voidaan lajitella standardin SFS-EN 338 [14] mukaiset havupuun lujuusluokat C14–C30 ja täydentää koneellista lujuuslajittelua. Visuaalinen lujuuslajittelu perustuu sahatavaran rakennevikojen ja vaurioiden kartoittamiseen sekä näiden rajoittamiseen. [2, s. 60–61] Standardissa SFS-EN 14081-1 [24] on määritetty eräitä raja-arvoja puun vioille, joilla voidaan täydentää koneellista lujuuslajittelua. Standardissa on raja-arvoja muun muassa oksien ko'oilte, halkeamille ja kaarevuudelle. Taulukossa 2.5 on esitetty koneellista lujuuslajittelua täydentävän visuaalisen lujuuslajittelun raja-arvot suurimmille oksille. [24, s. 9]

Taulukko 2.5. Koneellista lujuuslajittelua täydentävän visuaalisen lujuuslajittelun raja-arvot suurimmille oksille. [24, s. 9]

SFS EN 338 mukainen lujuusluokka	$\leq C18$	$> C18$
Suurin sallittu lapeoksan halkaisija	$\frac{\text{lapeen leveys}}{2}$	$\frac{\text{lapeen leveys}}{4}$
Suurin sallittu syrjäoksan halkaisija	$\frac{\text{syrjän leveys} \cdot 3}{4}$	$\frac{\text{syrjän leveys}}{2}$

Suomessa visuaalinen lujuuslajittelu tehdään pääosin pohjoismaisen standardin INSTA 142 mukaan. Standardissa on 4 eri lujuusluokkaa T0–T3, joille löytyy vastaavuudet standardin SFS-EN 338 [14] mukaisista havupuiden lujuusluokista. Kuvan 2.16 taulukossa on esitetty näiden lujuusluokitusten keskinäiset vastaavuudet.

Lujuusluokat standardin INSTA 142 mukaan	
kaikki lujuusluokat	T0, T1, T2, T3
vastaavuus EN 338 kanssa	T0 = C14, T1 = C18, T2 = C24, T3 = C30

Kuva 2.16. Standardin INSTA 142 lujuusluokkavastaavuudet standardissa SFS-EN 338. [25]

Eurokoodistandardissa SFS 5878 [26] on esitetty standardin INSTA 142 lajitteluvaatimuksia ja raja-arvoja eri tekijöille. Tällaisia tekijöitä ovat esimerkiksi oksien koko, vinosyisyys ja halkeamat. Standardi antaa lisäksi ohjeita näiden tekijöiden mittaamiseen. Kuvan 2.17 taulukossa on esitetty visuaalisen lujuuslajittelustandardin INSTA 142 mukaisia raja-arvoja lujuutta heikentäville tekijöille isokokoiselle sahatavaralle. [26, s. 10-25]

Ominaisuus	T3	T2	T1	T0
Yksittäiset oksat	Syrjä: Enintään 1/3 paksuudesta Lape: Enintään 1/6 leveydestä	Syrjä: Enintään 1/2 paksuudesta Lape: Enintään 1/4 leveydestä	Syrjä: Enintään 4/5 paksuudesta Lape: Enintään 2/5 leveydestä	Syrjä: Saa peittää koko syrjän Lape: Enintään 1/2 leveydestä
Poikaoksat	Ei sallita	Syrjä: Arvioidaan kuten yksittäinen oksa Lape: Pituus ei saa ylittää kappaleen leveyttä		Sallitaan
Oksaryhmät	Oksasumma enintään sallitun lape- ja syrjäoksan summa			
Parrun oksat	Enintään 1/5 sivusta	Enintään 2/5 sivusta	Enintään 3/5 sivusta	Enintään 4/5 sivusta
Parrun oksaryhmät	Oksasumma enintään 4 kertaa yksittäisen oksan sallittu arvo			
Vinosyisyys	Enintään 1:10	Enintään 1:8	Enintään 1:6	Enintään 1:4
Vuosirengasväli	Enintään 4 mm	Enintään 6 mm	Enintään 8 mm	Ei rajoitusta
Rengashalkeamat	Ei sallita	Leveys enintään 50 mm (syvyys 25 mm) Pituus enintään 0,5 m		Pituus enintään 1 m
Kuivumishalkeamat, ei läpimenevät (kokonaispituus)	Sallitaan rajoituksitta, jos halkeaman syvyys on enintään puolet paksuudesta			
	Sallitaan enintään 1 m pituisia ei kuitenkaan enempää kuin 1/4 kappaleen pituudesta Ei sallita särmää leikkaavia		Sallitaan enintään 1,5 m pituisia, ei kuitenkaan enempää kuin 1/2 kappaleen pituudesta Ei sallita särmää leikkaavia	Sallitaan
Kuivumishalkeamat, läpimenevät	Sallitaan ainoastaan kappaleen päissä, jos niiden pituus on enintään kappaleen leveys, ei kuitenkaan pidempiä kuin 150 mm			Sallitaan, jos kokonaispituus on enintään 0,5 m. Sallitaan kappaleen päissä, jos niiden pituus on enintään kappaleen leveys, ei kuitenkaan pidempiä kuin 150 mm
Latvavika ja syyhäiriö	Enintään 1/4 lappeen leveydestä, ei ulkoneljänneksellä	Enintään 1/2 lappeen leveydestä, ei ulkoneljänneksellä		Enintään 3/4 lappeen leveydestä
Puristusvika	Ei sallita			Sallitaan vähäisiä vikoja

Kuva 2.17. Standardin INSTA 142 mukaiset raja-arvot lujuutta heikentäville tekijöille isokokoiselle sahatavaralle. [26, s. 21]

2.4.2 Koneellinen lujuuslajittelu

Verrattuna visuaaliseen lujuuslajitteluun koneellinen lujuuslajittelu on huomattavasti nopeampaa. Lisäksi koneellisen lajittelun mukainen lujuus korreloi oikean lujuuden kanssa paremmin kuin visuaalinen lujuuslajittelu. Näin ollen koneellisella lujuuslajittelulla lujuusluokkien välisi päällekkäisyyksiä tulee vähemmän. Koneellisen lajittelun mukaisen lujuuden korrelaatiota oikean lujuuden kanssa voidaan edelleen parantaa ottamalla esimerkiksi taivutuslajitteluun lisäksi huomioon puun oksaisuus. Tämä voidaan selvästi nähdä kuvan 2.18 taulukosta, jossa on esitetty eri vikojen ja ominaisuuksien korrelaatiota lujuusominaisuuksiin lujuuslajittelussa. [7, s. A6/4-7]

Lajittelumuuttuja	Vastaavuus		
	f_m	$f_{r,0}$	$f_{c,0}$
Oksat	0,5	0,6	0,4
Vinosyisyys	0,2	0,2	0,1
Tiheys	0,5	0,5	0,6
Vuosilusto	0,4	0,5	0,5
Oksat + vuosilusto	0,5	0,6	0,5
Oksat + tiheys	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8
Kimmomoduuli E	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8
E + tiheys	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8	0,7 - 0,8
E + oksat	> 0,8	> 0,8	> 0,8

Kuva 2.18. Puun erilaisten vikojen ja ominaisuuksien korrelaatiot lujuusominaisuuksiin lujuuslajittelussa. [7, s. A6/6]

Tavallisin koneellinen lujuuslajittelutapa on määrittää taivutuslajitteluun lapetaivuttamalla sahatavarakappaleita. Nykyään tuotekehittelyn seurauksena on kuitenkin useita uusia tapoja toteuttaa koneellinen lujuuslajittelu. Tällaisia tapoja ovat muun muassa värähdys-, konenäkö- ja ultraäänimittaus. Uusien tapojen etuna on ollut, ettei kappaleen paksuudella ole rajoja. Lisäksi uusilla mittaustavoilla ei ole kappaleen vaurioitamisriskiä. [7, s. A6/4-5]

2.5 Puurakenteiden vaurioituminen

Puurakenne voi pääasiallisesti vaurioitua kahdella tavalla, joko biologisesti tai kuormitusperäisesti. Kuormitusperäinen vaurioituminen johtuu yleensä rakennukseen tehdyistä korjaus- ja muutostöistä, joiden seurauksena vanhojen rakenteiden kuormankantokyky on ylitetty. Tällaisia muutostöitä, joilla kuormankantokyky ylitetään, voi olla esimerkiksi uudet ripustukset, IV-koneasennukset tai uusien tilojen ottaminen käyttöön. Kuormitusperäinen vaurioituminen voi ilmetä liitoksiin syntyvinä rakoina tai siirtyminä, raken-

teen halkeiluna tai liian suurina taipumina. Myös puurakenteiden ajan myötä tapahtuvasta virumisesta aiheutuva lujuusominaisuuksien heikkeneminen lisää riskiä kuormankantokyvyn ylittymiseen. [1, s. 30–34]

Yleisimmät puun biologisen vaurion aiheuttajat Suomessa ovat home- ja lahottajasienet sekä tuohyhönteiset. Auringon lämpö- ja UV-säteilyn seurauksena puun pinta rapautuu ja halkeilee. Pinnan halkeilun ja rapautumisen seurauksena puuta vaurioittaville sienikasvustoille elintärkeä kosteus pääsee rakenteeseen. Auringon aiheuttamaa puupinnan vaurioitumista on usein nähtävissä aurinkoisilla eteläjulkisivuilla. Home- ja sinistäjäsienet eivät pääasiallisesti vaurioita puurakenteita, mutta ovat vahingollisia käyttäjän terveydelle. Rakenteissa home esiintyy yleensä ennen lahoa, sillä homesienet eivät vaadi aivan yhtä korkeaa kosteuspitoisuutta kuin lahottajasienet. [2, s. 74–75]

Puurakenteiden hyönteisvauriot esiintyvät hyvin usein lahovaurioiden yhteydessä, sillä suurin osa puun tuohyhönteisistä toimii vain kosteassa tai lahonneessa puussa. Tästä syystä hyönteisvaurio jää usein tulkitsemaatta. On kuitenkin myös hyönteislajeja, jotka voivat toimia myös kuivassa terveessä puussa. Nämä ovat kuitenkin harvinaisempia. Hyönteisvaurion erottaa lahovauriosta kuoriutuneiden kuoriaisten lentorei'istä. Lisäksi hyönteisvaurio kohdassa puu on usein muuntunut hienoksi pölyksi. [27, s.1-13] Koska Suomessa elävät tuohyhönteiset esiintyvät usein lahovaurioiden yhteydessä, ei niihin tässä työssä perehdytä syvemmin. Lahovaurio on kuitenkin vauriotyyppinä määräävämpi.

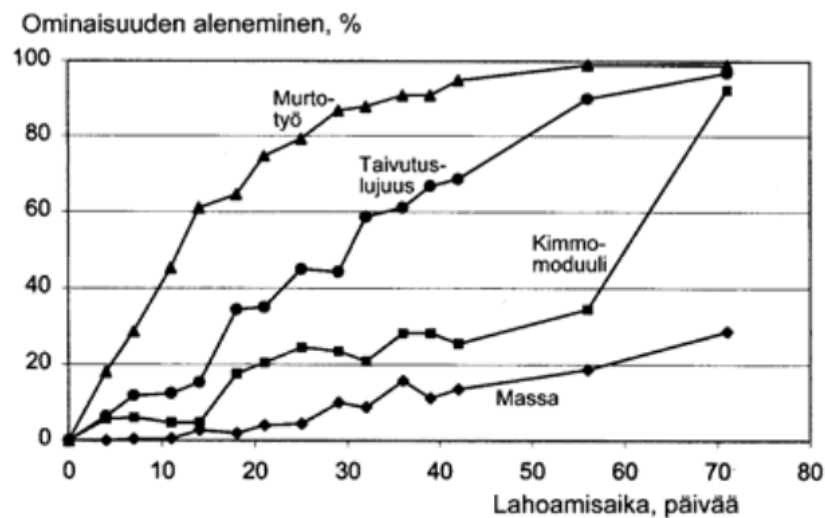
Merkittävimpiä puun vaurion aiheuttajia ovat lahottajasienet. Hajoamistavan mukaan lahotyyppejä on kolme erilaista: ruskolaho, valkolaho ja katkolaho. Näistä yleisin rakennuksissa on ruskolaho, sillä ruskolahoa aiheuttavat lahottajasienet ovat yleisiä havupuissa. [10, s. 165] Ruskolahosta antaa viitteitä puun saama ruskea väri. Sen vaikutuksesta puu haurastuu tasaisesti ja rikkoutuu helposti kuutioiksi. Tällainen kuutioitunut puu voi näyttää hiiltyneeltä. [11, s. 326]

Puun lahoaminen ja lahottajasienten kasvu edellyttävät ennen kaikkea sopivaa ja pitkäaikaista kosteutta ja lämpötilaa. Taulukossa 2.4 on esitetty lahottajasienten tyypillisiä kasvuolosuhteita. [2, s. 76] Kuten taulukosta voidaan nähdä, tarvitsevat lahottajasienet suuren kosteuspitoisuuden kasvun alkamiselle, mutta kasvun alettua kasvaa lahottajasieni voimakkaasti. Rihmastoillaan osa lahottajasienistä voi levittäytyä kosteammilta alueilta kuivalle puun alueelle. [11, s. 324]

Taulukko 2.6. Lahottajasienten tyypilliset kasvuolosuhteet. [2, s. 76]

Lahottajasieni	Puun kosteus-%	Lämpötila °C	Iilan suhteellinen kosteus RH-%
Kasvu alkaa	25..30	>0	95..98
Voimakas kasvu	30..80	+20..+25	>98
Kasvu pysähtyy	120..160	+25..+50	-
Lepotila	<18 ja >100..160	>0	-
Kuolee		+35..+70	-

Koska lahottajasienet syövät puun rakennusosia, alentavat ne puun massaa ja tällöin myös tiheyttä. Massan ja tiheyden aleneminen alentaa myös puun lujuusominaisuuksia, sillä kuten todettua lujuusominaisuuksilla on yhteys tiheyteen. Lujuusominaisuudet ja massa eivät kuitenkaan alene samassa tahdissa lahovaurioissa. Esimerkiksi n. 10 %:n massan aleneminen aiheuttaa jo noin 60 %:n taivutuslujuuden alenemisen ja noin 40 %:n syiden suuntaisen puristuslujuuden alenemisen. [11, s. 327] Kuvan 2.19 kuvaajassa esitetään eri lujuusominaisuuksien ja massan alenemistä lahoamisen seurauksena. Kuvasta voidaan nähdä, miten nopeasti lujuusominaisuudet alenevat massaan verrattuna.

**Kuva 2.19.** Lujuusominaisuuksien ja massan aleneminen lahoamisen seurauksena. [11, s. 328]

Koska puun tiheys alenee lahovaurion edetessä, on lahovaurioasteelle voitu muodostaa erilaisia laholuokituksia puun tiheyden, kovuuden ja silmämääräisen tarkastelun perusteella [28, s. 37–38][29, s. 21–23]. Kuvassa 2.20 on esitetty yhdenlainen laholuokitus sekä luokituksen perusteet.

Laholuokka	Mänty	Kuusi
	Tiheys (kg/m ³)	Tiheys (kg/m ³)
1.	381,1 (±15,7)	410,7 (±25,2)
2.	337,2 (±16,5)	354,2 (±17,9)
3.	258,8 (±28,1)	280,7 (±9,8)
4.	233,7 (±29,6)	191,3 (±12,6)
5.	141,8 (±13,6)	124,8 (±10,5)

Laholuokka	Laholuokan kuvaus
1.	Puu on kovaa ja tuoretta tai lähes tuoretta. Kaarna on kiinni rungossa. Puun oksat ovat paikallaan. Puu makaa osittain maan päällä. Puukko tunkeutuu vain muutaman millimetrin puun sisään.
2.	Puun ulommaiset osat alkavat pehmetä. Kaarna on löyhässä, mutta ei sirpaleinen. Sienirihmastot kaarnan alla pitkälle edenneitä. Puun oksat ovat paikallaan. Puukko tunkeutuu 1–2 cm puun sisään.
3.	Puun ulommaiset osat ovat pehmeitä, mutta ydin on kova. Kaarna on lähtenyt rungosta. Puukko tunkeutuu helposti 2–5 cm puun sisään.
4.	Puu on pehmeää läpi rungon. Ei oksia. Suurin osa puun pinnasta on sammaleen ja jäkälän peitossa. Puun ominaisuudet ovat jo kadonneet ja se on alkanut maatua osaksi maata. Puukko tunkeutuu helposti puuhun kokonaisuudessaan.
5.	Puu on pehmeää ja sirpaleista (puun yhtenäisyys kadonnut). Puun pinta on täynnä jäkälää, sammalta ja kääpiöpensaita. Puu rikkoutuu helposti käsinkin.

Kuva 2.20. Laholuokitus puun tiheyden, kovuuden ja silmämääräisen arvioinnin mukaan. Muokattu lähteestä [28, s. 37–38]

Kuvan 2.20 laholuokituksessa oleva tiheys on lahoavien puiden kolmessa eri kosteuspitoisuudessa mitattujen tiheyksien keskiarvo. Tiheyden perässä oleva virhe tulee puun kosteuspitoisuuden aiheuttamasta tiheyden vaihtelusta. [28, s. 38] Kuvan laholuokitus on tehty metsäteollisuuden tarpeisiin eli lähinnä elävän puun lahotarkasteluun.

3. PUURAKENTEIDEN KUNTOTUTKIMUS SUOMESSA

3.1 Kuntotutkimus ja sen merkitys

Kuntotutkimuksella määritellään rakenteen kunto, toimivuus ja korjaustarve. Kuntotutkimus on huomattavasti tarkempi ja yksityiskohtaisempi rakenteille tehtävä tutkimus kuin pelkästään visuaaliseen rakenteiden arvioimiseen perustuva kuntoarvio. [30, s. 8] Kuntotutkimuksilla saadaan tietoa rakenteiden vaurioista, niiden laajuudesta ja asteesta. Lisäksi kuntotutkimuksilla selvitetään, mitkä tekijät vaikuttavat vaurioiden syntymiseen. Kuntotutkimuksia voidaan tehdä lähes kaikenlaisille rakenteille. [31]

Kuntotutkimuksilla on suuri merkitys rakenteiden kunnolle ja niiden elinkaarelle. Kuntotutkimuksilla voidaan kartoittaa rakenteiden mahdolliset turvallisuusriskit ennen vahinkojen tapahtumista. Lisäksi kuntotutkimuksilla voidaan säästää rahaa ja luontoa, sillä niiden avulla voidaan rakenteille antaa sopivat korjausehdotukset ja pidentää rakennuksen elinikää. Kuntotutkimuksilla saadaan myös tärkeää tietoa rakenteista ja rakennusmateriaaleista korjaussuunnittelun tueksi. [31]

3.2 Puurakenteiden kuntotutkimuksen rakenne

Puurakenteiden kuntotutkimukset koostuvat tarvittavien lähtötietojen selvittämisestä, varsinaisista kohteella tehtävistä kenttätutkimuksista, mahdollisista laboratoriokokeista ja johtopäätöksien tekemisestä sekä raportoinnista [31][32]. Puun ominaisuuksien monivivahteikkaan luonteen takia sisältyy puurakenteiden tutkimustuloksiin ja -menetelmiin usein paljon epätarkkuustekijöitä. Rakennushistoriallisesti arvokkaissa kohteissa täytyy myös kiinnittää erityistä huomiota tutkimusmenetelmien valintaan sekä korjausehdotuksiin. Arvokohteiden tutkimukset tulisikin tehdä ainetta rikkomattomin keinoin. Näiden syiden takia on puurakenteiden kuntotutkimus hyvin tapauskohtaista ja usein haastavaa. [1, s. 35][31]

Kuntotutkimusta varten kerättävät lähtötiedot kerätään yleensä tutkimuksen tilaajalta, rakennusvalvontavirastolta, haastattelemalla rakennuksen käyttäjiä sekä omalla pinta-puolisella tutustumisella kohteeseen. Kaikkia tarvittavia lähtötietoja ei usein tutkittavasta kohteesta saada johtuen muun muassa rakennuksen pitkästä historiasta ja puuttuvista rakennepiirustuksista. [31][32] Kerättäviin kuntotutkimuksen lähtötietoihin kuuluvat muun muassa [31]:

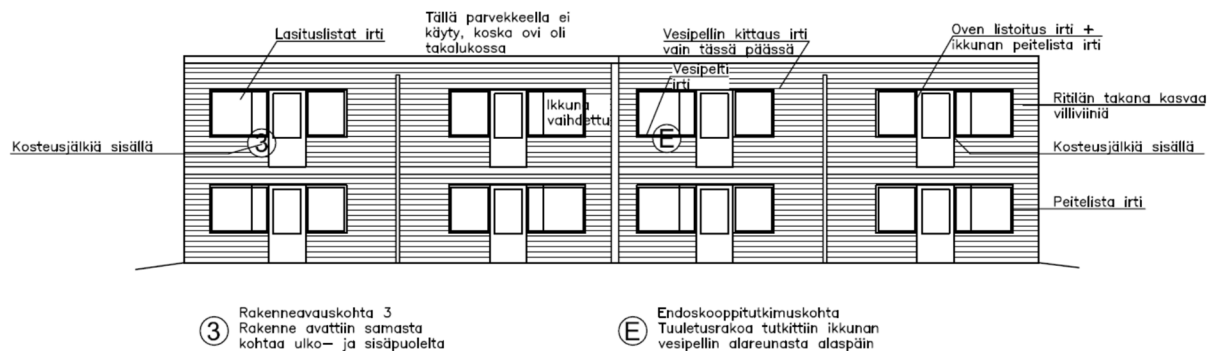
- rakentamisvuosi,
- rakennuksen elinkaaren aikana tehdyt korjaukset ja muutokset sekä aiempi tutkimushistoria,
- rakennepiirustukset,
- rakenteiden kuormitukset ja kuormitushistoria,
- rakennejärjestelmät ja niiden toimivuus,
- puurakenteiden ympäröivät rakenteet,
- rakenteiden dimensiot,
- liitostyypit ja niiden toimintatavat sekä
- sääolosuhteet.

Varsinainen kenttätutkimus tehdään tutkittavalla kohteella. Yleensä puurakenteiden kenttätutkimukset perustuvat paljolti aistinvaraiseen tutkimukseen. Aistinvaraisen tutkimuksen tärkeimmät välineet ovat tutkijan silmät ja nenä. Silmämääräisellä arvioinnilla kartoitetaan puurakenteissa esiintyviä halkeamia, siirtymiä ja muodonmuutoksia, kosteusjälkiä ja -vaurioita, sienirihmastoja sekä viitteitä lahovaurioista. Silmämääräisen tutkimuksen perusteella ja sen tueksi mitataan rakenteiden kosteuspitoisuutta pintakosteusmittarilla sekä rakenteiden lahovaurioita paikannetaan painelemalla niitä puukolla tai piikillä. [31][32] Pelkästään puukon ja silmämääräisen arvioinnin käyttö puurakenteen kunnan arvioimisessa on kuitenkin hieman ongelmallinen, sillä molemmat tutkimusmenetelmät riippuvat paljon itse tutkijasta. Puukotuksen ja silmämääräisen arvioinninperusteella on vaikea selkeästi jakaa vaurioituneita alueita niiden vaurioasteen mukaan. Lisäksi ne eivät tuota mitään konkreettista tutkimusaineistoa tutkimuksen tilaajalle. Kuvassa 3.1 on esitetty silmämääräisesti ja puukolla havaittu lahovaurio vesikatteen aluslaudoituksessa.



Kuva 3.1. Vesikatteen aluslaudoituksessa havaittu lahovaurio. [32]

Lahovaurioita voidaan tutkia myös poraamalla kapea reikä rakenteeseen. Rakenteen kuntoa voidaan tällöin tutkia arvioimalla porauslastuja ja porausvastusta. Tällä tutkimusmenetelmällä saadaan jo huomattavasti tarkempaa tietoa rakenteen mahdollisesta vaurioasteesta ja jäljellä olevasta toimivasta poikkileikkauksesta. Peitettyjä puurakenteita voidaan taas tutkia rakenneavauksin. Rakenneavauksen ja täyttökerrosten purkamisen tulee olla riittävän laaja, jotta rakenteen kunto nähdään selvästi. Myös rakenteiden dimensioita on hyvä mitata kenttätutkimuksissa. Tällöin rakenteet voidaan tarpeen vaatiessa mallintaa myöhemmin kantavuuksien arvioimiseksi ja mahdollisen korjaussuunnittelun tueksi. Rakenteet, niiden vauriokohtat ja näytteenottoapaikat tulee dokumentoida jo kentällä valokuvoin sekä julkisivupiirustuksiin merkkäämällä kuvan 3.2 mukaisesti. [31][32]



Kuva 3.2. Vauriokohtien ja näytteenottoapaikkojen dokumentointi julkisivupiirustuksiin kenttätutkimuksissa. [32]

Kenttätutkimusten jälkeen voidaan tehdä laboratoriokokeita ja tarkempia tutkimuksia kerätyille näytteille. Tyypillisimmät puurakenteiden kuntotutkimuksissa tehtävät laboratoriotutkimukset ovat mikrobi- ja haitta-aine tutkimukset. Viimeiseksi tutkimusten perusteella tehdään johtopäätökset rakenteiden toimivuudesta, turvallisuudesta, kantavuudesta ja vaurioista sekä määritellään korjaustarve, lämpö- ja kosteustekninen toimivuus ja lisätutkimustarve. [31][32]

3.3 Yleisimmin tutkittavat puurakenteet ja niiden vauriot

Tuntemalla yleisimmin vaurioituvat puurakenteet ja vaurioitumiseen johtavat syyt, voidaan tutkimuksia helpommin kohdentaa tietyille alueille sekä osataan antaa oikeat korjausohjeet. Kuten edellä on mainittu, johtuu puun vaurioituminen lähes aina joko liiallisesta kosteudesta tai kantavuuden ylittymisestä [1, s. 30]. Näiden vaurioitumistapojen syyt löytyvät usein huonosta rakenteiden suunnittelusta, rakennusvirheistä, huolto- ja korjaustoimenpiteiden puutteesta, käyttöiän ylittymisestä, kuormittavista sääolosuhteista sekä vääristä korjaustekniikoista [31][32]. Yleisimmin puurakenteiden kuntotutkimuksissa tutkittavia rakenteita muun muassa ovat [31]:

- kattorakenteet,
- lattiakannattajat,
- kantavat pilarit, palkit ja muut runkorakenteet,
- puuikkunat ja -ovet,
- ulkoparvekkeiden kantavat pilarit ja palkit sekä
- hirsirunkorakenteet.

Vesikattorakenteiden lahovauriot johtuvat yleensä rakennusvirheiden tai huolto- ja korjaustoimenpiteiden laiminlyönnin takia vuotavasta vesikatteesta tai vuotavista vesikatteen läpivienneistä. Tummat kosteusjäljet vesikattorakenteissa kertovat yleensä vesikatteen vuodoista. Yläpohjan puutteellinen tuuletus lisää rakenteiden vaurioitumisriskiä. [32] Vesikattorakenteiden kantavat osat, kuten muutkin kantavat rakenteet, saattavat vaurioitua myös korjaus- ja muutostöiden aiheuttamasta kuormitusten lisääntymisestä, kuten uusista ripustuksista tai tilan käytön muuttumisesta [1, s. 32]. Yksi yleinen vanhojen rakennusten lattiakannattajien sekä vesikaton kantavien rakenteiden vaurioitumista pa on tiilimuriin tuetun kannattajan pään lahovaurioituminen [31]. Tällainen puurakenteen vaurioituminen on esitetty kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Tiilimuriin tuetun kannattajan pään lahovaurioituminen. [32]

Puiset ikkunat ja parvekkeiden sekä katosten kantavat rakenteet altistuvat ulkoilmassa voimakkaasti auringon ja sateen rasituksille. Tästä syystä ulkoilmassa olevien puurakenteiden rakenteelliseen kosteuden torjuntaan ja puuta suojaavien pinnoitteiden toimivuuteen tulee kiinnittää huomiota. Esimerkiksi lyhyet räystäät, vesikaton puutteellinen vedenpoisto, maaperästä nouseva kosteus ja ikkunoiden vesipeltien puutteelliset kallistukset sekä liitokset voivat altistaa julkisivua suurelle kosteusrasitukselle. Julkisivuverhouksen ja runkorakenteen välisellä tuuletusvälillä on myös tärkeä tehtävä puurakenteiden rakenteellisessa suojauksessa. Puutteellinen tuuletusväli ei kuivata kastunutta julkisivun taustaa tai runkorakennetta. Se myös altistaa runkorakenteen julkisivusta kulkeu-

tuvalle kosteusrasitukselle. [32] Ulkoilmassa olevien puurakenteiden suojapintoitteen huoltotoimenpiteiden laiminlyönti voi myös altistaa puurakenteita vaurioitumiselle. Esimerkiksi ikkunoiden puitteiden ja julkisivuverhouksen maalipinnoite suojaa puuta auringonsäteilyn ja sadeveden rasituksilta. [2, s. 204]

Alapohjan kantavien rakenteiden ja rakennuksen rungon alaosan kosteusvauriot ovat yleensä suunnittelu-, rakennus- ja korjausvirheiden aikaansaannosta. Mikäli puurungon alajuoksun ja sokkelin tai betonilaatan välistä puuttuu kosteussulku, pääsee rungon alaosa vaurioitumaan kapillaarisesti nousevan veden takia. Tämä pätee muihinkin puu- ja betonirakenteiden liitoksiin. Lisäksi puurungon alaojhauspuun tulisi olla kokonaisuudessaan sokkelin ja betonisen alapohjalaatan yläpuolella kosteusvaurioiden välttämiseksi. Valesokkelirakenteissa rungon alaosa vaurioituu myös usein, sillä niissä usein ulkopuolinen maanpinta on liian korkealla runkoon ja lattiarakenteisiin nähden. [2, s. 225–256] Tuulettuvan alapohjan rakenteiden lahovauriot ovat yleensä puutteellisen alapohjan tuuletuksen seurausta. Vanhojen rakennusten tuulettuvien alapohjien puurakenteita onkin tuhottu melko paljon vääränlaisten korjaustekniikoiden takia. Korjausten yhteydessä on usein vanhan rakennuksen alapohjan tuuletusluukut laitettu umpeen tai korjattu alapohjarakenne liian tiiviiksi. Vanhoissa tuulettuvan alapohjan rakenteissa alapohja tuulettuu myös lattiarakenteen läpi, ja siksi alapohjan myöhempi tiivistäminen sekä lisälämmöneristäminen heikentävät sen tuulettumista. [33, s. 332–338] Kuvassa 3.4 on esitetty hirsirunkoisen rakennuksen rungon alaosan lahovaurio, joka on johtunut kapillaarikatkon puuttumisesta [32].



Kuva 3.4. Hirsirungon alaosan kapillaarikatkon puuttumisesta johtuva lahovaurio. [32]

Edellisten kappaleiden huomiot pätevät pääosin myös hirsirunkoisissa taloissa. Hirsirunkojen vaurioitumisessa ja tutkimisessa on kuitenkin muutamia erityispiirteitä. Hirsirunkoisen rakennuksenkin tavallisin hirsirungon vaurio on alimpien hirsien lahoaminen, joka johtuu maaperästä kapillaarisesti nousevasta kosteudesta ja roiskevesistä (ks. kuva 3.4). Muita hirsirungon yleisimpiä vauriokohtia ovat väli- ja yläpohjan liittymät, ulko-

seinien ulkonurkat, märkätilojen kohdat ja ikkunaliittymät. Hirsirungon sisäpuoliset eivät lämmitettävässä rakennuksessa yleensä ole vaurioalttiita. Märkätilojen kohdat ovat tietenkin poikkeus. Hirsirunkoinen rakennus kestää hyvin rungon vääntymistä ja pieniä hirsirungolle tyypillisiä painumia. Hirsirungon muodonmuutoksien syyt ovat kuitenkin aina hyvä tutkia tarkemmin. Eli johtuvatko ne normaalista hirsirungon painumisesta vai esimerkiksi perustuksien liikkeistä. Myös jälkikäteen hirsiseinien aukotuksiin kannattaa kiinnittää huomiota, sillä aukotetun seinän sidonnan puutteet voivat aiheuttaa seinän pullistumisia. [32][34, s. 5-8]

4. PILODYN-LAITE

4.1 Pilodyn-laitteen laitteisto

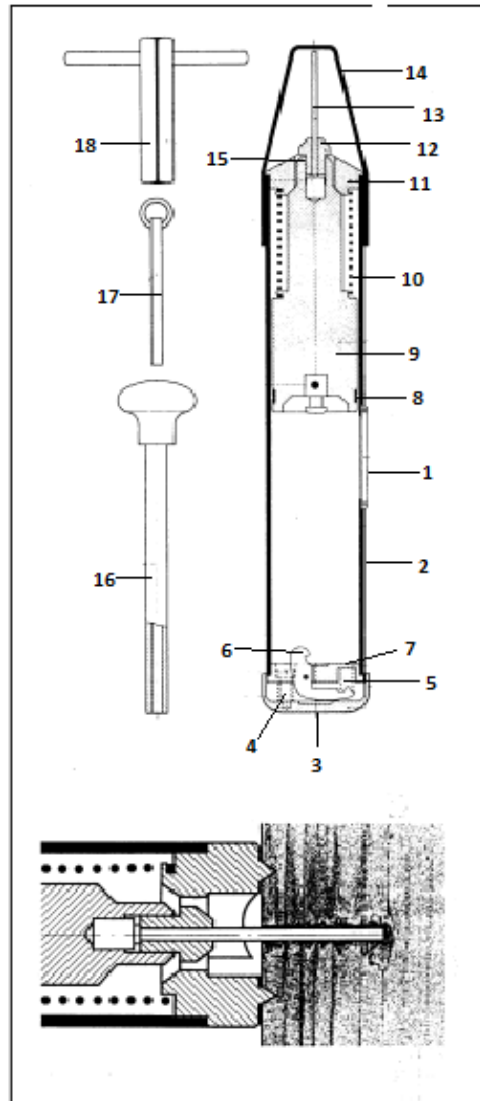
Alkujaan Pilodyn-laite on kehitetty Sveitsissä lahonneiden puhelinpylväiden kartoittamiseen, sillä sen tuottama mittaustulos korreloi puun tiheyden kanssa, jonka avulla taas voidaan arvioida puun lahoisuutta. Nykyään Pilodyn-laitteen käyttö on laajentunut myös elävien puiden ja puurakenteiden kunnan arvioimiseen, varsinkin Etelä-Euroopan maissa. Pilodyn-laitteita on muutamia erimalleja, kuten 6J, 12J ja 18J. [35, s. 18–19] Tässä työssä keskitytään, kuvassa 4.1 olevaan, malliin Pilodyn 6J. Kuvassa keskellä on varsinainen Pilodyn-laite, vasemmalla on latauspuikko ja oikealla näkyy laitteen neulan suojakorkki.



Kuva 4.1. Pilodyn 6J.

Pilodyn-laitteen käyttö perustuu jännitetyn jousen avulla vakiovoimalla ammutun tylppäpäisen neulan (halkaisija 2,5 mm) tunkeumasyydyden mittaamiseen. tunkeumasyydyden avulla voidaan arvioida paikallisesti puun tiheyttä. Mitä pienempi tunkeumasyydyys, sitä suurempi tiheys. Suoraan laite ei tiheyttä kuitenkaan kerro, mutta tiheydelle ja tunkeumasyydydelle voidaan tehdä kokeellisesti puulajista ja kosteudesta riippuva riippuvuussuhde. Tällä riippuvuussuhteella voidaan arvioida ja ennustaa puun ominaisuuksia laitteen tunkeumasyydyden avulla. Pilodyn-laitteen kyljessä on mitta-asteikko, josta

tunkeumasyyvyys voidaan lukea. Mitta-asteikko rajoittuu välille 0–40 mm. [36, s. 1–2] Koska mitta-asteikko ulottuu vain 40 mm:iin ja neula ammutaan puun pinnalta, antaa Pilodyn-laite tietoa vain paksujen puurakenteiden ulkokerroksista. Tämä voidaan yleisesti lukea laitteen heikkoudeksi. [35, s. 19–20] Kuvassa 4.2 on esitetty Pilodyn-laitteen osia.



- | | |
|-------------------|-------------------------------------|
| 1. Mitta-asteikko | 10. Latausjousi |
| 2. Ulkokuori | 11. Iskurin pää |
| 3. Laukaisin | 12. Iskurin neulan lukitusmutteri |
| 4. Puristusjousi | 13. Iskurin neula |
| 5. Salpajousi | 14. Suojakorkki |
| 6. Salpa | 15. Välikeneula |
| 7. Pohja | 16. Latauspuikko |
| 8. Mittamerkki | 17. Neulan lukitusmutterin lukitsin |
| 9. Iskuri | 18. Kuusioavain |

Kuva 4.2. Pilodyn-laitteen osat. Muokattu lähteestä [36, s. 2]

Pilodynin tunkeumasyyvyyteen vaikuttavat tiheyden kautta puulaji sekä puun rakenne, lahoisuus ja erilaiset viat. Lisäksi tunkeumasyyvyyteen vaikuttavat puun kosteuspitoisuus

ja kulma, jolla neula laukaistaan syihin nähden [37, s. 2]. Laitteen ja sen neulan tulee kuitenkin olla kohtisuorassa tutkittavaa pintaa vasten. Laukaisukulman vaikutus on helpposti selitettävissä puun ominaisuuksien vaihtelulla sen eri suunnissa. Thalerin et. al. tutkimuksessa [37] tutkittiin ruskolahon aiheuttaman massan vähentymisen ja Pilodynin tunkeumasyvyyden riippuvuussuhdetta ampumalla neula puuhun kahdessa eri kosteuspitoisuudessa ja eri kulmissa syiden suuntaan nähden. Tutkimuksessa huomattiin, että tunkeumasvyvyys on suurempi kosteammalla puutavaralla ja että laukaisukulma vaikuttaa tuloksiin [37, s. 3]. Puun kosteuspitoisuuden ylittäessä puun kyllästyspisteen, ei kosteuspitoisuus enää vaikuta Pilodynin mittaustuloksiin [36, s. 6]. Puun ominaisuuksien vaihtelu puun eri suunnissa selittää laukaisukulman vaikutuksen.

4.2 Pilodyn-laitteen käyttö

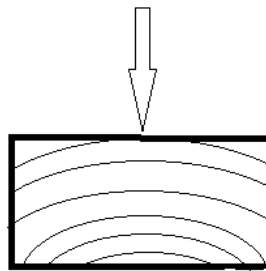
Pilodyn-laitteen käyttö on melko yksinkertaista ja nopeaa. Pilodyn-laitteen jousi ladataan toimintakuntoon latauspuikolla, joka asetetaan iskurin neulan ympärille. Latauspuikolla neula työnnetään laitteen sisälle niin syväälle, että kuuluu pieni ”klik” -ääni. Tällöin laukaisimen salpa on lukinnut iskurin. Ladattaessa neulaa laitteen sisälle, ei laukaisimesta saa painaa vastaan, sillä tällöin salpa ei lukitse iskuria. Laitetta ei saa kuljettaa koskaan ladattuna, ja laitteen ollessa ladattu ei sillä saa osoittaa itseään tai muita ihmisiä. [36, s. 3–4] Kuvassa 4.3 on esitetty Pilodyn-laite käytössä.



Kuva 4.3. *Pilodyn-laite käytössä. Mittaustulos on luettavissa kuvassa näkyvästä mitta-asteikosta.*

Pilodynin laukaisukohdassa ei tulisi olla puun vikaisuuksia, kuten oksia, halkeamia tai pihkakoloja, sillä nämä voivat vääristää tuloksia. Laite antaa siis tietoa vain virheettömästä puusta, missä ei ole vikoja. Laukaistaessa neula puuhun painetaan laitteen iskurin pää tukevasti kiinni puun pintaan, kuten kuvasta 4.3 näkyy. Tällöin laite ei pääse liik-

kumaan laukaisun aikana. [36, s. 3-4] Pilodyn tulisi pyrkiä laukaisemaan aina kohtisuoraan puun vuosilustojen tangenttisuuntaa vasten. Tällöin vuosilustojen suuntautuneisuuden aiheuttama tulosten heittely saadaan minimoitua. [35, s. 30] Kuvassa 4.4 on esitetty Pilodynin optimaalisin laukaisukulma. Kun iskuri on tukevasti kiinni puun pinnassa, painetaan iskurin vastaisessa päässä olevaa laukaisinta. Laukaisun jälkeen painetaan laitetta vielä puun pintaa vasten, kunnes mittaustulos on luettu laitteen mitta-asteikolta. Poistettaessa neulaa puun sisältä on oltava erityisen varovainen, ettei neula pääse taittumaan, sillä taittunut neula täytyy poistaa välittömästi käytöstä. Mittausten päätyttyä on suojakorkki aina laitettava takaisin iskurin päähän. [36, s. 4]



Kuva 4.4. *Pilodyn-laitteen optimaalisin laukaisukulma.*

Hansenin ohjeen [36] mukaan mitattavalle pisteelle tulee tehdä ainakin 2 mittausta. Kolmas mittausta tehdään, mikäli kahden ensimmäisen mittaustuloksen erotus on yli 3 mm. Tulokseksi merkitään näiden mittausten keskiarvo. Mikäli kolmesta mittauksesta yksi eroaa muista merkittävästi, jätetään se pois laskelmista. [36, s. 4] Feio puolestaan otti yhdestä mittauspisteestä vähintään 3 mittausta tutkiessaan historiallisten puurakenteiden tutkimista ja tutkintatapoja. Neljäs mittausta otettiin, mikäli kolme ensimmäistä mittaustulosta vaihtelivat toisistaan yli 2 mm. Mittauspisteen tulokseksi merkittiin näiden tulosten keskiarvo. [35, s. 30]

Kuten edellä on mainittu, vaikuttaa puun kosteuspitoisuus puun tiheyteen. Puun kosteuspitoisuus vaikuttaa myös Pilodyn-laitteen tuloksiin, minkä takia kosteuspitoisuus täytyy mitata aina mittauspisteestä [37, s. 3]. Tutkittavan puun lämpötilan ollessa alle 0 °C:tta ei Pilodyn-laitteella tulisi suorittaa mittauksia, sillä puurakenteen tulee olla kokonaisuudessaan sula ennen mittauksia. Tutkittavan puun lämpötilan ollessa yli 0 °C, ei lämpötilalla ole merkittävää vaikutusta mittaustuloksiin. [36, s. 6]

Pilodyn-laite on hyvä puhdistaa sekä tarkistaa ajoittain, ettei iskurin neula tai pää ole löystynyt mittausten johdosta. Laitteistoa ei saa öljytä. Laitteen neula tulee vaihtaa aina noin 5000 mittauksen jälkeen tai kun neula on taittunut. [36, s. 2] Pilodyn-laitteen tulosten vertailtavuus perustuu laitteen suuruudeltaan vakioon neulan laukaisuvoimaan. Saatavilla olevan aineiston mukaan Pilodyn-laitteelle ei tiettävästi ole kehitelty yleistä menetelmää laitteen laukaisuvoiman kalibrointiin tai suuruuden seurantaan. [35-39]

4.3 Pilodyn-laitteen aiemmat tutkimukset

Pilodyn-laitetta ja sen antamia tuloksia on tutkittu useaan kertaan niin metsätalouden tutkimuksissa kuin puurakenteidenkin tutkimuksissa. Pilodyn-laitteen käyttö puurakenteiden tutkimuksissa on painottunut vahvasti Etelä-Euroopan maihin, mutta metsätalouden tutkimuksissa laitteistoa on tutkittu ympäri maailman. Tutkimuksissa on yleensä selvitetty Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puun tiheyden, lahoisuuden tai lujuusominaisuuksien riippuvuussuhteita. Taulukkoon 4.1 on listattu muutamia tässä työssä käytettyjä tutkimuksia, joissa on tutkittu Pilodyn-laitteen käyttöä. Seuraavissa alaluvussa tutustutaan näiden kokeiden suorituksiin ja tuloksiin Pilodyn-laitteen osalta.

Taulukko 4.1. Pilodyn-laitteen aikaisempia tutkimuksia.

Tekijä	Tutkimuksen otsikko	Mitä tutkittiin Pilodyn-laitteen kannalta?	Tutkittava puulaji	Lähde
Feio, A	Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour	Feion tutkimuksessa tutkittiin muun muassa Pilodyn-laitteen käyttöä historiallisten puurakenteiden kunnan tutkimisessa sekä Pilodynin tunkeumasyvyyden riippuvuussuhdetta puun tiheyteen ja lujuusominaisuuksiin (muun muassa syiden suuntaiseen puristuslujuuteen).	Kastanja	[35]
Thaler, N et. al.	Correlation between brown rot decay and Pilodyn measurements	Thalerin et. al. tutkimuksessa tutkittiin Pilodynin tunkeumasyvyyden riippuvuussuhdetta ruskolahon aiheuttamaan massan vähentymiseen puurakenteissa. Tutkimukset suoritettiin kahdessa eri kosteuspitoisuudessa ja ampumalla Pilodynin neula kolmessa eri kulmassa puuhun.	Kuusi	[37]
Hofmeyer, P	Improving the efficiency of visual grading by means of the Pilodyn wood tester	Hofmeyerin tutkimuksessa tutkittiin Pilodynin tunkeumasyvyyden riippuvuussuhdetta lujuuslajiteltavan sahatavaran tiheyteen ja lujuusominaisuuksiin (taivutuslujuuteen sekä veto- ja puristuslujuuteen).	Kuusi	[38]
Henriques, D et. al.	Timber in Buildings: Estimation of Some Properties using Pilodyn® and Resistograph®	Henriquesin et. al. tutkimuksessa tutkittiin Pilodynin tunkeumasyvyyden riippuvuussuhdetta puurakenteiden tiheyteen ja syiden suuntaiseen puristuslujuuteen.	Portugalilainen mänty ja rannikkomänty	[39]
Piazza, M & Riggio, M	Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures	Piazzan & Riggion tutkimuksessa tutkittiin Pilodyn-laitteen korrelaatiota tiheyden kanssa.	Kuusi, Lehtikuusi ja Kastanja	[21]

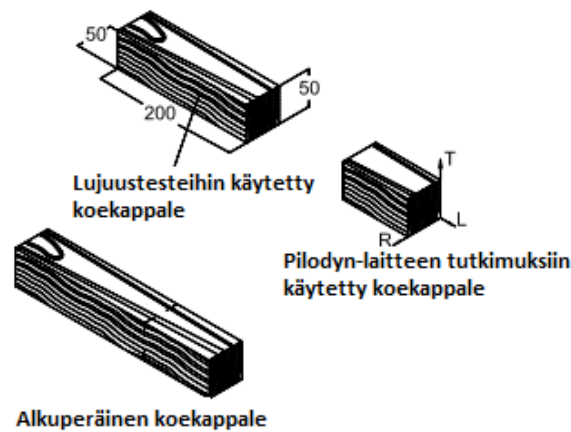
Kahden eri mitattavan asian riippuvuussuhdetta voi tarkastella korrelaatiokertoimen R^2 ($0 < R^2 < 1$) avulla. Esimerkiksi jos tutkitaan männyn sahatavaran tiheyden riippuvuussuhdetta Pilodynin tunkeumasyvyyteen, mitataan ensin sahatavarakappaleiden tiheydet ja Pilodynin tunkeumasyvyydet, jonka jälkeen asetetaan mittaustulokset tiheyden ja tunkeumasyvyyden kuvaajaan. Tämän jälkeen mittauspisteille sovitetaan suora. Mitä lähempänä mittauspisteet sijaitsevat suoraa, sitä korkeampi korrelaatiokerroin ja parempi riippuvuussuhde asioilla on. Taulukossa 4.2 on esitetty korrelaatiokertoimen arvon merkityksiä. [40]

Taulukko 4.2. Korrelaatiokertoimen tulkinta. [40]

Riippuvuussuhde	R^2
Voimakas	$\geq \pm 0,8$
Huomattava	$\geq \pm 0,6$ ja $< \pm 0,8$
Kohtalainen	$\geq \pm 0,3$ ja $< \pm 0,6$
Merkityksetön	$< \pm 0,3$

4.3.1 Tutkimusten suoritus

Tutkimuksissa suoritus on lähtenyt liikkeelle määrittelemällä testattava puulaji ja testikappaleiden koko [35, s. 70][39, s. 2]. Tutkimuksissa käytetyt puulajit on listattu taulukossa 4.1. Tutkimuksissa testikappaleiden koko vaihtelee jonkun verran. Tämä on täysin ymmärrettävää, sillä esimerkiksi puristuslujuuden ja taivutuslujuuden testaus vaatii hyvin erikokoisia kappaleita. Henriquesin et. al. käyttivät $30*60*180 \text{ mm}^3$ kokoisia kappaleita, tutkiessaan syiden suuntaisen puristuslujuuden korrelaatiota Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden kanssa [39, s. 2]. Standardissa SFS-EN 408 [23] ohjeistetaan puun lujuuskokeiden suorittamista eurokoodin mukaan. Kyseisen standardin mukaan syiden suuntaisessa puristuslujuuden testauksessa tulee koekappaleen pituuden olla kuusi kertaa niin pitkä kuin mitä poikkileikkauksen lyhyempi sivu on [23, s. 22]. Henriquesin et. al. tutkimuksissa [39] käyttämä testikappaleen koko vastaa siis standardin SFS-EN 408 [23] ohjeistusta. Feio puolestaan käytti $50*50*200 \text{ mm}^3$ kokoisia kappaleita, tutkiessaan syiden suuntaisen puristuslujuuden korrelaatiota Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden kanssa [35, s. 70]. Feion tutkimukset [35] eroavat myös toteutustavaltaan. Kyseisessä tutkimuksessa lujuuskokeet ja Pilodyn-laitteen mittaukset suoritettiin eri koekappaleille kuvan 4.5 mukaan [35, s. 70].



Kuva 4.5. Feion tutkimuksen [35] testauksissa käytetty koekappaleiden toteutus. [35, s.70]

Standardin SFS-EN 408 [23] mukaan puukappaleet tulisi tasapainottaa standardiolosuhteissa (20 ± 2) °C lämpötilassa ja (65 ± 5) %:n suhteellisessa kosteudessa [23, s. 8]. Kuten aiemmin on tullut ilmi, tämä vastaa likimain 12 %:n standardikosteuspitoisuutta. Sekä Feio että Henriquesin et. al. suorittivat kokeet puukappaleille kyseisen standardikosteuspitoisuuden vallitessa [35, s. 21][39, s. 4]. Piazza & Riggio käyttivät tutkimuksissaan [21] kosteudeltaan sekä standardiolosuhteissa tasaantunutta, että kyllästymispisteessä olevaa sahatavaraa [21, s. 274]. Hofmeyerin tutkimuksissa [38] käytettyjen koekappaleiden kosteuspitoisuutta ei kerrota, kuin tiheyden määrittämisen osalta. Kyseisessä tutkimuksessa tiheys on määritetty koekappaleiden kosteuspitoisuuden ollessa 15 % [38, s. 3].

Tutkimusten otantamäärään on syytä kiinnittää huomiota [35, s. 20]. Görlacherin tutkimuksen [41] mukaan saavutetaan sitä parempi riippuvuussuhde Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydelle ja puun tiheydelle mitä suurempi otantamäärä on [41, katso 35, s. 20]. Feio käytti tutkimuksissaan [35] syiden suuntaisen puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaation tutkimisen osalta 94 koekappaletta. Näistä koekappaleista osa oli uutta sahatavaraa ja osa jo rakennuksissa käytettyä vanhaa sahatavaraa. Henriquesin et. al. käyttivät tutkimuksissaan [39] 174 kappaleen otantamäärää. Myös he käyttivät sekä uusia että vanhoja koekappaleita. Lisäksi kyseisessä tutkimuksessa 30 koekappaletta altistettiin laholle. Molemmissa näissä tutkimuksissa kaikki koekappaleet olivat virheettömiä. Eli niissä ei ollut oksia tai muita puun rakennevikoja. [35, s. 70][39, s. 2-5] Muista tutkimuksista poiketen Piazza & Riggio käyttivät Pilodyn-laitteen testauksissa vain 12 koekappaletta [21, s. 276].

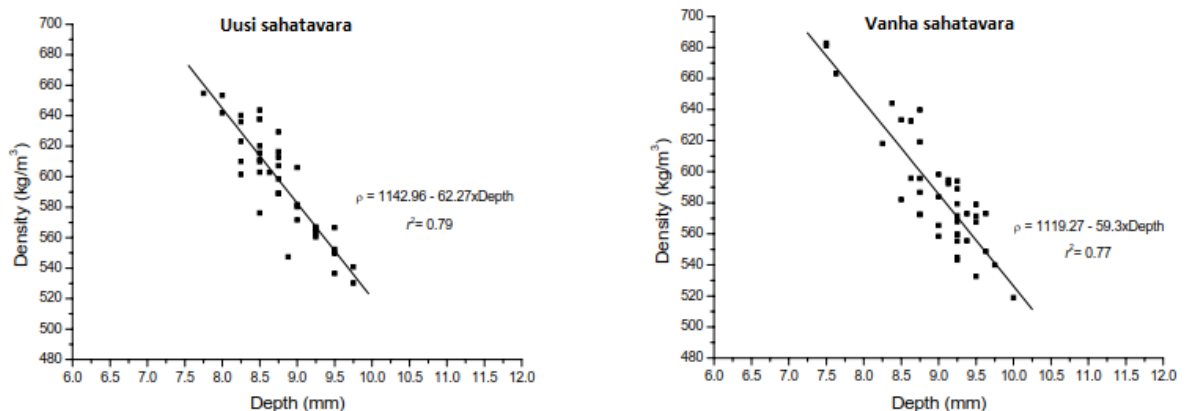
Useimmissa tutkimuksissa Pilodynin neula ammuttiin kohtisuoraan puun vuosilustojen tangenttisuuntaa vasten [35, s. 30][38, s. 3]. Thalerin et. al. [37, s. 2–3] tutkimuksessa neula ammuttiin puun vuosilustojen tangenttisuuntaa vasten kohtisuoran suunnan lisäksi vuosilustojen tangenttisuunnassa ja vuosilustojen pituussuunnassa. Tutkimuksessa saa-

vutettiin hyvä riippuvuussuhde, kohtisuoran suunnan lisäksi, vuosiluston tangenttisuunnan tunkeumasyydydelle ja massan vähentymiselle. Taas vuosiluston pituussuunnan tunkeumasyydydelle ja massan vähentymiselle saatiin vain kohtalainen riippuvuussuhde. [37, s. 2–3]

4.3.2 Tutkimuksista saatu aineisto

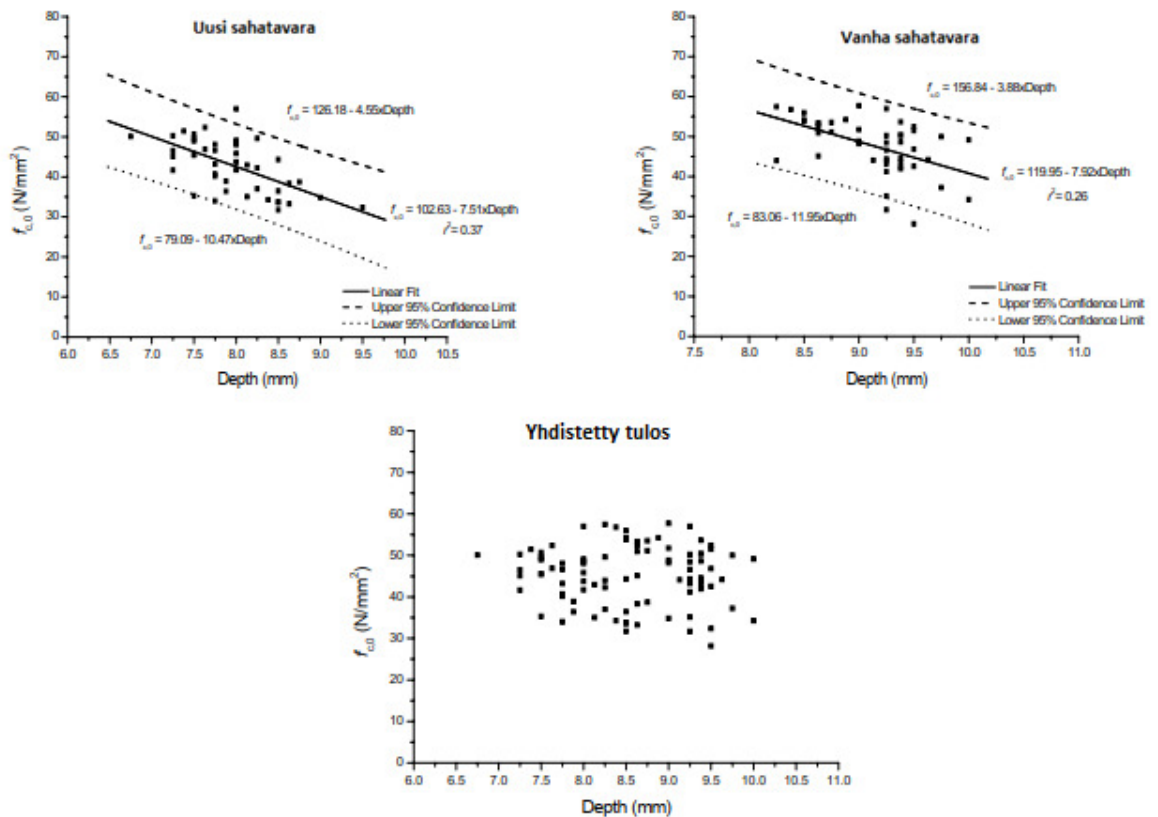
Kaikissa edellä mainituissa Pilodyn-laitteen tutkimuksissa tunkeumasyydyden ja puun eri ominaisuuksien riippuvuussuhdetta on tutkittu korrelaatiokerroimen avulla. Korrelaatiokerroin on määritetty tutkimustulosten ja niihin sovitetun suoran keskinäisen etäisyyden perusteella. Tutkimusten perusteella puun tiheydellä on melko hyvä riippuvuussuhde Pilodynin tunkeumasyydyden kanssa. Esimerkiksi Henriquesin et. al. [39] tutkimuksissa [39] saavutettiin 0,80 korrelaatiokerroin männyn tiheydelle ja Pilodynin tunkeumasyydydelle [39, s. 5]. Görlacher saavutti omista tutkimuksistaan [41] jopa 0,92 korrelaatiokerroimen tiheydelle ja tunkeumasyydydelle [41, katso, 19, s. 20]. Ainoa tutkimus, jossa merkittävää riippuvuussuhdetta tiheydelle ja tunkeumasyydydelle ei löydetty, on Piazzan & Riggion tutkimus [21]. Tässä kyseisessä tutkimuksessa otantamäärä oli myös selvästi pienin. Otantamäärän pienuus verrattuna muihin tutkimuksiin on varmasti osasyynä heikkoon korrelaatioon.

Kuvassa 4.5 on esitetty Feion tutkimuksessa [35] saatuja kastanjan tiheyden ja Pilodynin tunkeumasyydyden riippuvuussuhteita. Kuvasta voidaan nähdä sahatavaran tiheyden ja Pilodynin tunkeumasyydyden riippuvan myös hieman sahatavaran iästä, sillä vanhalla sahatavaralla on hieman pienempi korrelaatiokerroin, kuin mitä uudella on. Kuvasta nähdään myös, että sovitetulle suoralle on voitu johtaa yhtälö, jota voidaan käyttää referenssinä arvioidessa yksittäisten mittausten antamaa puun tiheyttä. Arvioinnissa on kuitenkin huomioitava, että puulajin ja kosteuspitoisuuden tulisi olla yhdenmukaiset referenssin kanssa.



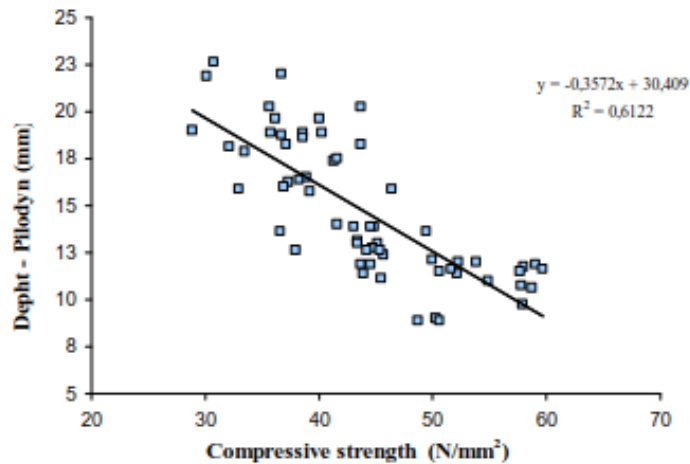
Kuva 4.6. Kastanjan tiheyden (y-akseli) ja Pilodynin tunkeumasyydyden (x-akseli) riippuvuussuhteita. Muokattu lähteestä [35, s. 60]

Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden riippuvuuksista eri lujuusominaisuuksien kanssa eniten tutkittu on riippuvuus syiden suuntaisen puristuslujuuden kanssa. Feion tutkimuksessa [35] syiden suuntaiselle puristuslujuudelle ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydelle löydettiin uudella sahatavaralla kohtalainen 0,37 ja vanhalla sahatavaralla merkityksetön 0,26 korrelaatio. Yhdistettynä samaan kuvaajaan nämä tulokset asetuttavat palloksi eikä korrelaatiota enää löydetä. [35, s. 91] Kuvassa 4.7 on esitetty Feion saamat tulokset syiden suuntaisen puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden riippuvuussuhteille. Kuvaajiin on merkattu, lineaarisen regressiosuoran lisäksi, 95 %:n luottamusrajat.



Kuva 4.7. Feion tutkimuksen [35] mukaiset riippuvuussuhteet syiden suuntaisen puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden välillä. [35, s. 91]

Henriques et. al. tutkimuksessa [39] tunkeumasyvyydelle ja syiden suuntaiselle puristuslujuudelle löydettiin kohtalainen riippuvuussuhde 0,61 [39, s. 5–6]. Kuvassa 4.8 on esitetty kyseisen tutkimuksen tulokset. Koska kyseisen tutkimuksen sahatavarat olivat kaikki oksattomia ja muutenkin virheetömiä, tuloksia ei voida suoralta käsin yhdistää puurakenteisiin [39, s. 5].



Kuva 4.8. Virheettömän ja vauriottoman männyn syiden suuntaisen puristuslujuuden (*x*-akseli) ja Pilodynin tunkeumasyvyyden (*y*-akseli) riippuvuussuhde. [39, s. 6]

Löydetyistä tutkimuksista ainoastaan Hofmeyerin tutkimuksessa [38] on Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden riippuvuussuhteita tutkittu muidenkin lujuusominaisuuksien kanssa kuin vain puristuslujuuden. Hofmeyer tutki Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden riippuvuutta puristuslujuuden lisäksi veto- ja taivutuslujuudesta. Tutkimuksissa ei kuitenkaan havaittu merkittäviä korrelaatioita lujuusominaisuuksien ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden välillä. [38, s. 3-4]

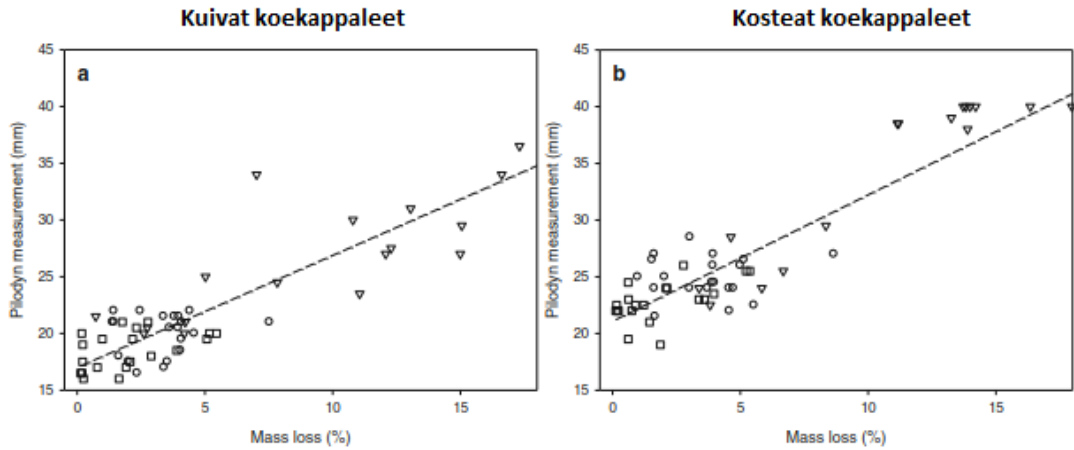
Thalerin et. al. [37, s. 2–3] tutkimuksessa löydettiin korkeat korrelaatiokertoimet ruskolahon aiheuttamalle massan vähentymiselle ja vuosiluston tangenttisuunnan sekä tangenttisuuntaa vasten kohtisuoralle tunkeumasyvyydelle. Tutkimuksessa huomattiin myös korrelaatiokertoimien olevan korkeampia kosteissa testikappaleissa, kuin mitä ne olivat kuivissa koekappaleissa. Taulukossa 4.3 on esitetty tutkimuksessa saadut korrelaatiokertoimet. [37, s. 2–3]

Taulukko 4.3. Ruskolahon aiheuttaman massan vähentymisen ja Pilodynin tunkeumasyvyyden korrelaatiokertoimet männyllä. [37, s. 3]

Pilodynin neulan laukaisukulma	R^2 kuiva näyte	R^2 kostea näyte
Vuosiluston tangenttisuunnassa	0,82	0,87
Vuosiluston tangentti suuntaa vasten kohtisuorassa	0,80	0,85
Vuosiluston pituussuunnassa	0,63	0,65

Vaikka ruskolahon aiheuttamalle massan vähentymiselle ja Pilodynin tunkeumasyvyydelle saatiin korkeat korrelaatiokertoimet, ei Thalerin et. al. [37, s. 3] mukaan tuloksia voi suoraan käyttää puurakenteiden tutkimuksissa, vaan referenssimittauksia täytyisi ottaa myös saman tai samanlaisen puurakenteen vauriottomasta osasta. Pilodyn-laitteen

mittausalueen rajallisuus (0–40 mm) aiheuttaa myös hieman virhettä Thalerin et. al. [37] mittaustuloksiin, sillä nyt osa mittaustuloksista päättyy 40 mm:iin, vaikka neula olisi voinut tunkeutua syvemmälle. Kuvassa 4.9 on esitetty ruskolahon aiheuttaman massan vähentymisen ja vuosiluston tangenttisuunnan tunkeumasyvyyden riippuvuuden kuvaajat kuivilla ja kosteilla koekappaleilla [37, s. 2].



Kuva 4.9. Ruskolahon aiheuttaman massan vähentymisen (x -akseli) ja vuosiluston tangenttisuunnan tunkeumasyvyyden (y -akseli) riippuvuussuhde kuusella. Muokattu lähteestä. [37, s. 2]

5. KOEJÄRJESTELYT

5.1 Yleistä

Kokeiden päätavoitteena oli tutkia, onko Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä yhteys puun lujuusominaisuuksiin. Lisäksi tavoitteena oli tutkia puun kosteuspitoisuuden vaikutuksia Pilodyn-laitteen tuloksiin ja laitteen käyttömahdollisuuksia puurakenteiden kuntotutkimuksissa. Tavoitteet pyrittiin toteuttamaan tutkimalla kolmella eri kosteuspitoisuudella, löytyykö tunkeumasyvyydelle ja puun tiheydelle sekä syiden suuntaiselle puristuslujuudelle riippuvuussuhdetta. Koetulosten pohjalta pohditaan Pilodyn-laitteella tehtävän puun kunnan ja lujuuden arvioinnin luotettavuutta. Tarkemmat kokeiden suoritusperiaatteet ja perustelut koevalinnoille on esitetty seuraavissa luvuissa. Kokeet suoritettiin soveltaen standardeja SFS-EN 384 [15], SFS-EN 408 [23], SFS-EN 13183-1 [42] ja SFS-EN 14358 [43]. Kaikki tutkimukset suoritettiin Tampereen teknillisen yliopiston rakennushallin tiloissa.

Kokeita suoritettiin sekä uudelle, että vanhalle puutavaralle. Ensin koekappaleet sahattiin määrämittoihinsa standardin SFS-EN 408 [23] mukaan. Sahauksen jälkeen koekappaleet laitettiin olosuhdehuoneisiin asettumaan haluttuihin kosteuspitoisuuksiin. Kokeita tehtiin kolmessa eri kosteuspitoisuudessa. Kun haluttu kosteuspitoisuus oli saavutettu, suoritettiin tarvittavat mittaukset Pilodyn-laitteella, jonka jälkeen koekappaleet puristettiin murtoon. Murtoon puristetuista koekappaleista sahattiin pienempi koeviipale tiheyden ja kosteuspitoisuuden määrittämistä varten. Saatua tunkeumasyvyy-, tiheys- ja puristuslujuustuloksia vertailtiin keskenään sekä tutkittiin tulosten riippuvuussuhteita eri kosteusolosuhteissa.

5.2 Koekappaleet

Kuten edellä mainittiin, kokeita suoritettiin sekä uudelle että vanhalle puutavaralle. Vanhan käytetyn puutavaran käyttö kokeissa on perusteltua, sillä puurakenteiden kuntotutkimuksissa käytännössä kaikki tutkittava puutavara on vanhaa. Vanhojen rakennusten kantavat puurakenteet ovat melko usein järeitä ja poikkileikkaukseltaan suuria. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi vanhat välipohjapalkit tai kattorakenteet. Esimerkiksi monikerroksisten rakennusten väli- ja yläpohjat kannateltiin lähes yksinomaan järeillä puupalkeilla aina 1920-luvulle asti. Rakennusten vesikattorakenteetkin olivat varsin järeitä poikkileikkaukseltaan aina 1920-luvulle asti. Tuolloin rakenteita alettiin mitoittaa laskenallisesti, minkä takia vesikaton puurakenteiden poikkileikkaukset pienenevät huo-

mattavasti. [5, s. 88-109][32] Vanhojen rakenteiden poikkileikkauksen järeydestä johtuen kokeisiin haluttiin nimenomaan järeää vanhaa sahatavaraa.

Aiempien Pilodyn-laitteen tutkimusten mukaan puun ominaisuuksille ja laitteen tunkeumasyvyydelle saadaan parempi riippuvuussuhde, kun kokeiden otantamäärä on suuri [35, s. 20]. Esimerkiksi Henriquesin et. al. käyttivät tutkimuksissaan [39] 174 kappaleen otantamäärää. Vanhan sahatavaran saatavuus ja siten vaadittavan suuren otantamäärän saavuttaminen osoittautuivat haasteelliseksi. Näin ollen varsinaisten riippuvuussuhteiden muodostamiseksi hankittiin uutta lujuuslajiteltua puutavaraa. Samalla päästiin vertailemaan vanhan ja uuden puutavaran ominaisuuksia keskenään. Yhteensä kokeissa oli vanhaa puutavaraa 24 kpl ja uutta puutavaraa 150 kpl. Vanhan puutavaran suppean otannan vuoksi sen tuloksia ei voida käyttää yleistettävänä tuloksina.

Kaikki tutkimuksissa käytetty puutavara oli havupuuta kuusta tai mäntyä, sillä mänty ja kuusi ovat käytetyimmät puulajit puurakenteissa Suomessa. Käytännön kuntotutkimusakin rakenteessa käytetyn puutavaran puulajin selvittäminen voi olla hankalaa. Lisäksi standardissa SFS-EN 338 [14] on lujuusluokituksessa mänty ja kuusi esitetty yhdessä samassa havupuiden C-luokassa [25]. Tästä syystä kokeissakaan ei tarkemmin eritelty oliko koekappale kuusta vai mäntyä. Näin ollen riippuvuussuhteita eri ominaisuuksien välillä tutkittiin männyllä ja kuusella yhteisesti.

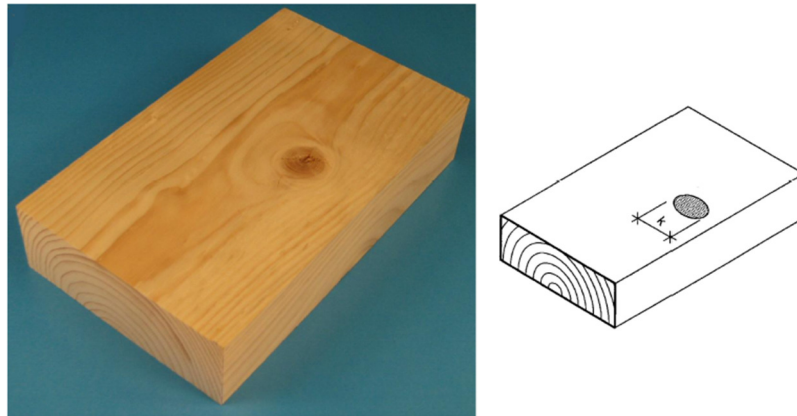
5.2.1 Koekappaleiden rakenneviat

Kuten aiemmin on tullut ilmi, Pilodyn-laite antaa tietoa vain virheettömästä puusta [36, s. 3]. Riippuvuussuhdetta laitteen tunkeumasyvyyden ja puun eri ominaisuuksien välillä tulee siis tutkia mahdollisimman virheettömälle puulle. Uudessa puutavarassa oksia oli niin tiheään, että täysin virheettömien koekappaleiden saamiseksi olisi tarvittu kohtuutoman paljon puutavaraa. Näin ollen kokeissa käytetyissä uuden puutavaran koekappaleissa sallittiin oksat, mutta vikojen määrää ja kokoa rajoitettiin. Puutavaran vikojen rajoituksissa keskityttiin vain oksien määrän ja koon rajoittamiseen. Tämä sen takia, että oksien vaikutus puurakenteen lujuuteen eri vioista on merkittävin [8, s. 38]. Lisäksi kaikkien puun vikojen mittaaminen ja rajoittaminen olisi ollut aika vievää sekä saatuun hyötyyn nähden tehotonta. Oksia rajoitettiin standardin INSTA 142 vaatimuksien mukaan. Kyseisen standardin vaatimuksista käytettiin isokokaisen sahatavaran (paksuus ≥ 45 mm ja leveys > 75 mm) lujuusluokan T3 raja-arvoja oksille. Raja-arvot on merkattu kuvaan 5.1. [26, s. 21] Uuden sahatavaran koekappaleet sahattiin soirojen kohdista, jotka täyttivät kyseiset raja-arvot ja muut kohdat hylättiin.

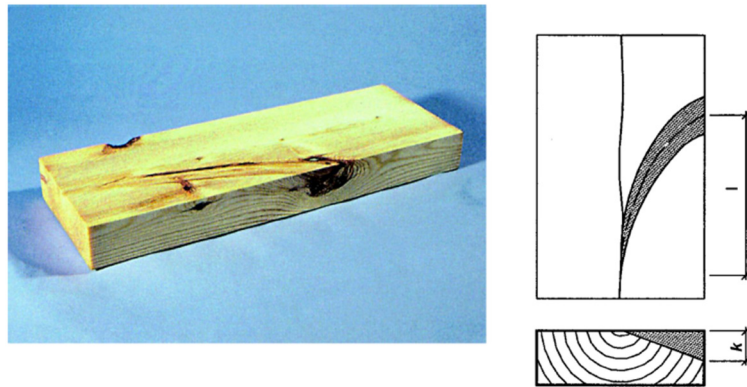
Ominaisuus	T3	T2	T1	T0
Yksittäiset oksat	Syrjä: Enintään 1/3 paksuudesta Lape: Enintään 1/6 leveydestä	Syrjä: Enintään 1/2 paksuudesta Lape: Enintään 1/4 leveydestä	Syrjä: Enintään 4/5 paksuudesta Lape: Enintään 2/5 leveydestä	Syrjä: Saa peittää koko syrjän Lape: Enintään 1/2 leveydestä
Poikaoksat	Ei sallita	Syrjä: Arvioidaan kuten yksittäinen oksa Lape: Pituus ei saa ylittää kappaleen leveyttä		Sallitaan
Oksaryhmät	Oksasumma enintään sallitun lape- ja syrjäoksan summa			
Parrun oksat	Enintään 1/5 sivusta	Enintään 2/5 sivusta	Enintään 3/5 sivusta	Enintään 4/5 sivusta
Parrun oksaryhmät	Oksasumma enintään 4 kertaa yksittäisen oksan sallittu arvo			

Kuva 5.1 Kokeissa käytetyt standardin INSTA 142 mukaiset raja-arvot oksille. Muokattu lähteestä [26, s. 21]

Oksien koon mittauksissa noudatettiin standardin INSTA 142 ohjeita. Alla olevissa kuvissa 5.2-5.4 on esitetty muutaman oksatyypin mittausten pääperiaatteita standardin INSTA 142 mukaan. Lisäohjeita oksien mittauksesta löytyy INSTA 142 standardista. Yleisesti oksat mitataan aina puun poikittaissuunnassa. Eli kohtisuoraan puutavaran pintaan nähden. Tästä poikkeuksena on poikaoksa, jonka mittaustapa esitetään kuvassa 5.3. Oksaryhmän ollessa kyseessä mitataan limittyvät oksat yhtenä oksana, kuten kuvassa 5.4 selviää. Limittyvien oksien kokoa verrataan suurimpiin sallittuihin oksiin, mutta niitä käsitellään oksaryhmänä. Tämä tarkoittaa sitä, että oksat lasketaan limittyviksi, mikäli niiden välinen etäisyys on kuvan 5.4 oksaryhmän mukainen. Oksan ympärillä oleva kuori mitataan aina osana oksaa. [26, s. 11-18]

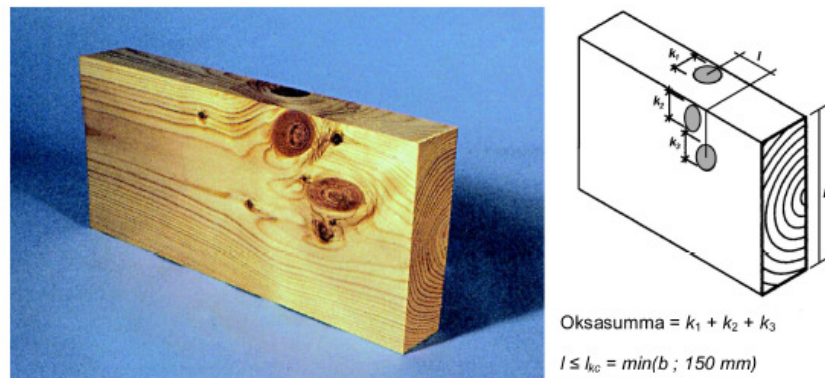


Kuva 5.2. Lape- tai syrjäoksan mittauksen pääperiaate. [26, s. 11]



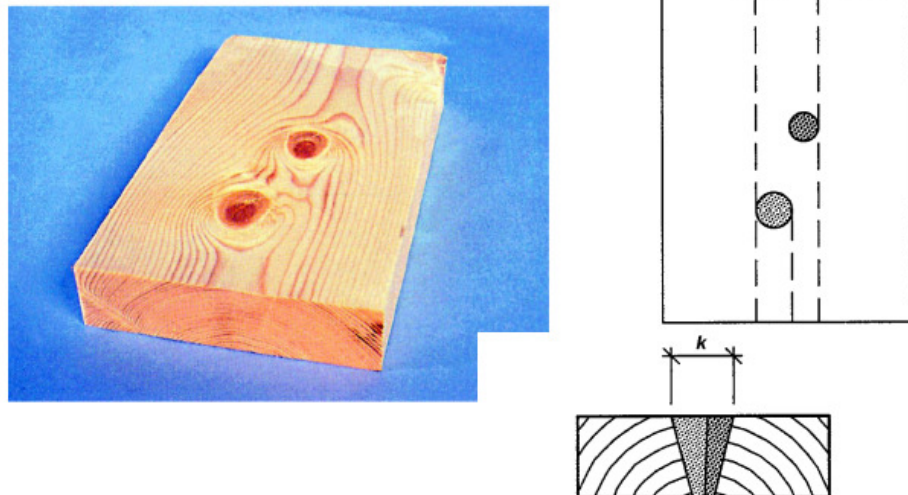
Oksa mitta = k , pituus = l

Kuva 5.3. Poikaoksen mittauksen pääperiaate. [26, s. 17]



Oksasumma = $k_1 + k_2 + k_3$

$l \leq l_{ko} = \min(b ; 150 \text{ mm})$



Oksan mitta = k , ainoastaan, kun oksat muodostavat ryhmän

Kuva 5.4. Limittyvien oksien ja oksaryhmän mittauksen periaate ja oksasumman laskenta. Muokattu lähteestä [26, s. 11-18]

Vanhan järeän sahatavaran oksaisuutta tai muiden vikojen määrää ei kokeissa rajoitettu. Tällöin kokeiden pohjalta voitiin arvioida karkeasti myös rajoittamattomasti vikoja sisältävän puun lujuusominaisuuksien yhteyttä Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen. Li-

säksi, mikäli vanhan puutavarankin oksaisuutta olisi rajoitettu, olisi näitä koekappaleita jouduttu huomattavasti pienentämään sahausin. Oksakohtia olisi pitänyt sahata pois, jolloin koekappaleen pituus olisi lyhentynyt. Tämä taas vaikuttaa standardin SFS-EN 408 [23] mukaiseen testattavan koekappaleen poikkileikkauksen kokoon, kuten seuraavassa luvussa tulee ilmi [23, s. 22]. Vanhan puutavaran poikkileikkauksen pieneminen taas olisi poistanut kokeista järeän puutavaran käyttäytymisen tutkimisen.

5.2.2 Koekappaleiden sahaus

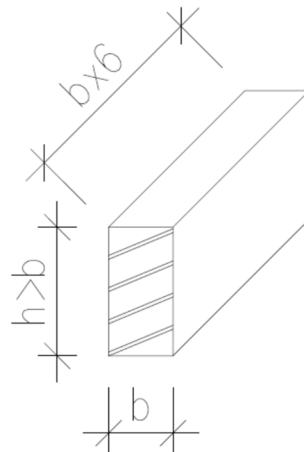
Vanha järeä sahatavara hankittiin kokeisiin Helsingissä sijaitsevan Aleksanterin teatterin purettavista kattorakenteista. Kyseisen osan puiset kattorakenteet ovat n. 140 vuotta vanhoja [1, s. 65]. Kattorakenteiden puutavara oli alkuperäiseltä poikkileikkaukseltaan noin 200x200 mm². Puutavarassa oli kuitenkin paikoin lahovaurioita. Kaikki lahovauriokohdat sahattiin pois ennen kokeiden suoritusta, sillä lahovauriot olisivat vaikuttaneet suuresti muihin koetuloksiin [11, s. 327]. Mikäli haluttaisiin tutkia myös lahonneisuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatiota, tarvittaisiin kaksi erillistä koesarjaa. Kahden samanlaisen koesarjan tekeminen sekä vauriottomalle että vaurioituneelle puutavaralle olisi kuitenkin ollut aivan liian raskas toteutettavaksi. Tästä syystä koekappaleita päädyttiin tekemään vain vauriottomalle puutavaralle. Lahovaurioiden poiston lisäksi vanha järeän puutavaran kaikki sivut oikaistiin suoraksi ja sahattiin toisiinsa nähden suoraan kulmaan. Näin poikkileikkauksen dimensioiden ja pinta-alan mittaaminen oli huomattavasti helpompaa. Sahausten jälkeen vanhan sahatavaran poikkileikkauksen sivujen pituudet vaihtelivat 90 mm:stä 181 mm:iin. Kuvassa 5.5 on esitetty oikosahattua vanhaa puutavaraa, jonka poikkileikkauksessa on lahovaurioita.



Kuva 5.5. Vanhan puutavaran lahovaurioita ja oikosahattua pintaa.

Testeissä käytetty uusi sahatavara koostui kolmen eri lujuusluokan puutavarasta. Näin lujuusominaisuuksiin saatiin tarvittavaa vaihtelua. Uuden testattavan sahatavaran lujuusluokat olivat C24, C30 ja C35. Luokan C24 sahatavara oli poikkileikkaukseltaan $48 \times 98 \text{ mm}^2$, C30 sahatavara oli $42 \times 72 \text{ mm}^2$ ja C35 sahatavara oli $42 \times 72 \text{ mm}^2$. Uuden sahatavaran eri lujuusluokkia oli testeissä mukana likimain suhteissa 3:2:1. Eniten testeissä mukana oli C24-luokkaa ja vähiten C35-luokkaa. Tämä johtui puhtaasti lujuusluokkien C30 ja C35 saatavuudesta.

Puut sahattiin määrämittoihinsa standardin SFS-EN 408 [23] mukaisesti. Kaikkien testattavien puutavarakappaleiden molemmat päät sahattiin standardin mukaan siten, että ne ovat ehdottoman suorat, samansuuntaiset toistensa kanssa ja kohtisuorassa puun syy-suuntaa vasten. Lisäksi standardin mukaan syiden suuntaisessa puristuksessa koekappaleen pituuden tulee olla 6 kertaa niin suuri kuin poikkileikkauksen pienempi mitta on, kuten kuvasta 5.6 nähdään [23, s. 22]. Näin ollen testattavien uusien sahatavarakappaleiden pituudeksi tuli noin 252-288 mm ja vanhojen sahatavarakappaleiden pituudeksi tuli noin 540-960 mm. Sekä uuden että vanhan puutavaran koekappaleet sahattiin kaikki määrämittoihinsa ennen niiden kosteuspuiteisuuden tasapainottamista. Standardin SFS-EN 408 [23] mukaan koekappaleet tulisi sahata vasta kosteuden tasapainottamisen jälkeen [23, s. 8]. Standardin ohjeistuksesta poikettiin hieman, sillä kaikkiin olosuhdehuoneisiin ei olisi mahtunut pitkiä koekappaleita. Lisäksi näin säästettiin melko paljon aikaa, kun koekappaleita ei tarvinnut sahata kahteen kertaan.



Kuva 5.6. Koekappaleen koko syiden suuntaisessa puristuslujuustestauksessa.

Uuden sahatavaran näytteet sahattiin 3,6-4,5 m pitkistä soiroista. Yhdestä soirosta sahattiin enintään 6 koekappaleita. Kokeita tehtiin kolmessa eri kosteuspuiteisuudessa. Yhdestä soirosta sahatut näytekappaleet jaettiin eri kosteuspuiteisuuksilla tehtäviin kokeisiin siten, että yhdessä kosteuspuiteisuudessa oli yhdestä soirosta enintään kaksi koekappaleita. Lisäksi nämä samasta soirosta sahatut koekappaleet, jotka testattiin samassa kosteuspuite-

toisuudessa, otettiin mahdollisimman kaukaa toisistaan. Tällä tavalla näytteiden ominaisuuksien hajonta saatiin pysymään mahdollisimman suurena.

5.3 Koekappaleiden kosteuspitoisuus

Kosteudella on suuri merkitys puun eri ominaisuuksiin ja sitä kautta myös Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen. Lisäksi puun lujuusominaisuuksista syiden suuntainen puristuslujuus vaihtelee eniten kosteuspitoisuuden mukaan. [7, s. A4/15-16] Tästä syystä testauksia tehdessä tuli huomioida myös testattavien kappaleiden kosteuspitoisuus ja mitata se. Mitatuille puun syiden suuntaiselle puristuslujuudelle ja tiheydelle on standardissa SFS-EN 384 [15] esitetty kosteuspitoisuuden huomioivat tulosten korjauskaavat. Korjauskaavoilla voidaan eri kosteuspitoisuuksissa mitatut tulokset siirtää vastamaan standardikosteutta $\omega_{ref} = 12\%$. Standardin SFS-EN 384 [15] mukaiset korjauskaavat syiden suuntaiselle puristukselle ja tiheydelle ovat seuraavat [15, s. 9]

$$f_{c.0.\omega_{ref}} = f_{c.0.\omega_i} * (1 + 0,03(\omega_i - \omega_{ref})) \quad (5.1)$$

$$\rho_{\omega_{ref}} = \rho_{\omega_i} * (1 - 0,005(\omega_i - \omega_{ref})), \quad (5.2)$$

missä $f_{c.0.\omega_{ref}}$ ja $\rho_{\omega_{ref}}$ ovat standardikosteuden ($\omega_{ref} = 12\%$) mukaiset syiden suuntainen puristuslujuus ja tiheys, $f_{c.0.\omega_i}$ ja ρ_{ω_i} ovat kokeen aikana puissa vallitsevan kosteuspitoisuuden ω_i mukaiset syiden suuntainen puristuslujuus sekä tiheys ja ω_{ref} on standardikosteuspitoisuus. Puristuslujuuden korjauskaavassa 5.1 kokeen aikana vallitsevana kosteuspitoisuutena voidaan käyttää $\omega = 8-18\%$. Mikäli kokeen aikana vallitseva kosteuspitoisuus on suurempi kuin 18% , käytetään puristuslujuuden korjauskaavassa 5.1 kokeen aikana vallitsevana kosteuspitoisuutena $\omega = 18\%$. [15, s. 9] Kyllästymispisteen $\omega = 28\%$ alapuolella puun tilavuuden ja massan muutos kosteuden johdosta on likimain lineaarista. Tästä syystä tiheydellä tiheyden korjauskaavaa 5.2 voidaan käyttää, kun kokeen aikana vallitseva kosteuspitoisuus on alle syiden kyllästymispisteen ($0\% < \omega < 28\%$). [7, s. A4/8]

Standardin SFS-EN 384 [15] mukaan korjauskaavat voidaan muodostaa myös itse kokeista saaduilla kertoimilla, mikäli mahdollista [15, s. 9]. Esimerkiksi jos kokeita tehdään samankaltaisille otoksille useassa eri kosteuspitoisuudessa, jotka sijaitsevat ominaisuuksien kannalta lineaarisella alueella, saadaan näistä laskettua korjauskertoimet.

Pilodyn-laitteella samankaltaisia kosteuspitoisuuden korjauskaavoja ei ole olemassa, kuin mitä tiheydellä ja puristuslujuudella on. Pilodyn-laitteen tulosten korjauskaavan muodostamiseksi tehtiin uusille sahatavarakappaleille kokeita kolmessa eri kosteuspitoisuudessa. Johtuen vanhan puutavaran huonosta saatavuudesta, korjauskaavan muodostus tehtiin uudella puutavaralla. Puun kosteuspitoisuuden ja lujuusominaisuuksien

riippuvuus toisistaan on likimain lineaarinen, kun kosteuspitoisuus on 8-20 % [7, s. A4/15]. Tällä välillä myös tiheyden ja kosteuspitoisuuden riippuvuus toisistaan on likimain lineaarista [7, s. A4/8]. Näin ollen Pilodyn-laitteen tulosten korjauskaavassa oletettiin tulosten ja kosteuden välisen riippuvuuden olevan likimain lineaarista, kun kosteuspitoisuus on välillä 8-20 %.

5.3.1 Koekappaleiden kosteuspitoisuudet ja niiden tasapainotus

Kosteusluokiksi (kosteuspitoisuudet, joita testauksissa käytettiin) valittiin taulukon 5.1 mukaiset kosteuspitoisuudet. Taulukkoon on myös kirjattu miten kappalemääräisesti koekappaleet jakautuvat eri kosteusluokkiin. Standardikosteuspitoisuus $\omega_{ref} = 12\%$ valikoitui mukaan sen vuoksi, että tässä kosteuspitoisuudessa ilmoitetut puun ominaisuusarvot ovat perustana kaikelle suunnittelulle ja vertailulle [7, s. A4/17]. Toiseksi käytettäväksi kosteuspitoisuudeksi valittiin $\omega = 18\%$. Kyseinen kosteuspitoisuus valittiin sen takia, että se sijaitsee kosteuspitoisuuden ja puun lujuusominaisuuksien kannalta lineaarisella alueella [7, s. A4/15]. Tällöin korjauskaavan muodostaminen Pilodyn-laitteen tuloksille on mahdollista. Lisäksi nähdään miten puun eri ominaisuudet korreloivat kosteammissa olosuhteissa. Kolmanneksi käytettäväksi kosteuspitoisuudeksi valittiin $\omega = 24\%$. Kyseinen kosteuspitoisuus valittiin, että nähdään, miten Pilodyn-laitteen tulokset käyttäytyvät kosteuspitoisuus välillä $\omega = 20-28\%$. Nämä valitut kosteusluokat vastaavat kosteuspitoisuudeltaan myös likimain puurakenteiden mitoituksessa käytettäviä käyttöluokkia [19, s. 15].

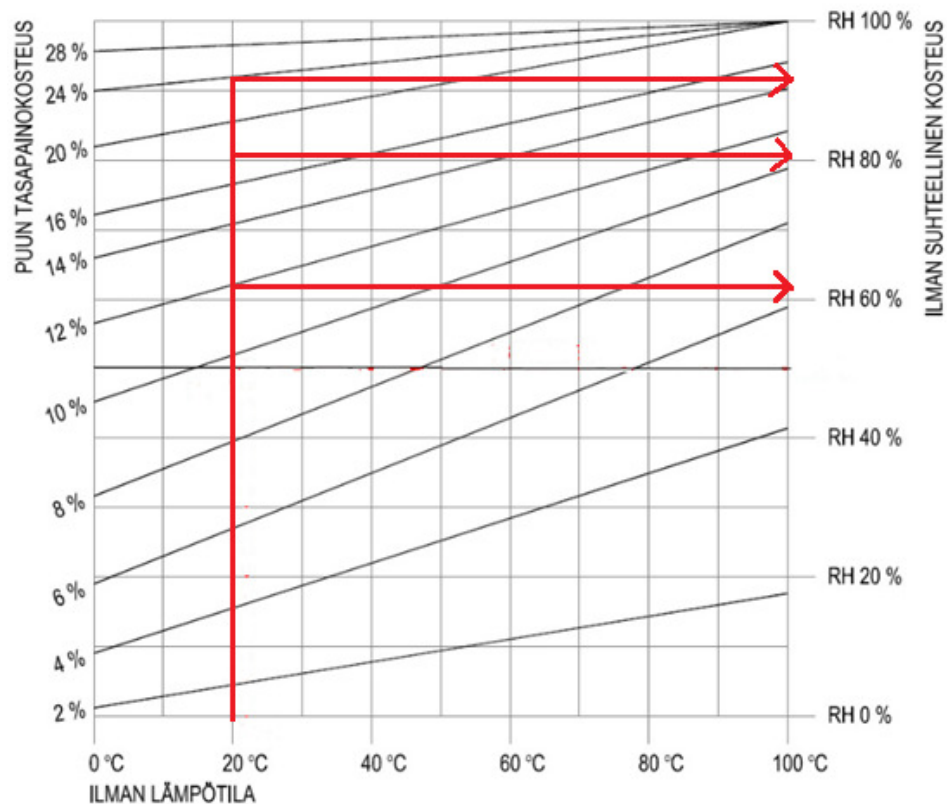
Taulukko 5.1. Testauksissa käytettävien kosteusluokkien tavoitellut kosteuspitoisuudet ja koekappaleiden määrä kosteusluokittain.

Luokat	Tavoiteltu kosteuspitoisuus (ω)	Käytettävät koe kappaleet
Kosteusluokka 1	~12 %	Uusi C24 25 kpl Uusi C30 16 kpl Uusi C35 9 kpl Vanha sahatavara 24 kpl
Kosteusluokka 2	~18 %	Uusi C24 25 kpl Uusi C30 17 kpl Uusi C35 8 kpl
Kosteusluokka 3	~24 %	Uusi C24 25 kpl Uusi C30 17 kpl Uusi C35 8 kpl

Uutta sahatavaraa käytettiin kaikkien kosteuspitoisuuksien testeissä. Vanhaa järeää sahatavaraa käytettiin vain standardikosteuspitoisuudessa tehdyissä testauksissa, johtuen sen pienestä määrästä verrattuna uuteen sahatavaraan. Kaikki kokeet suoritettiin kos-

teusluokkien mukaisissa koe-erissä aina yhdelle koe-erälle kerrallaan. Ainoastaan kosteusluokka 1 jaettiin kahteen eri koe-erään. Toisessa oli vanha puutavara ja toisessa uusi puutavara. Koe-erien tunnuksissa UP tarkoitti uutta puutavaraa ja VP vanhaa puutavaraa. Uuden puutavaran koe-erät saivat lisäksi kosteusluokkatunnuksen 1, 2 tai 3. Uuden puutavaran kosteusluokkien mukaisista koe-eristä kaikki ovat lähes vastaavia koekappaleityypeiltään (lujuusluokka ja koko). Lisäksi kunkin uuden puutavaran koe-erän koekappaleet on sahattu samoista pidemmistä soiroista melko läheltä toisiaan. Näin ollen uuden puutavaran kosteusluokkien mukaiset koe-erät vastaavat hyvin toisiaan ja ne ovat vertailukelpoisia keskenään. Tämä on tärkeää, sillä muuten kosteuspitoisuuden korjauskaavoja ei Pilodyn-laitteen tuloksille voitaisi muodostaa.

Haluttu sama kosteuspitoisuus yhden kosteusluokan kaikkiin koekappaleisiin saatiin asettamalla kunkin luokan koekappaleet yhteen olosuhdehuoneeseen. Olosuhdehuoneisiin asetettiin halutun kosteuspitoisuuden mukaiset olosuhteet ja jäätin odottelemaan puun kosteuspitoisuuden tasautumista ympäristön kanssa. Halutun mukaiset olosuhteet olosuhdehuoneisiin pyrittiin asettamaan kuvan 5.7 mukaisesti. Kuvasta nähdään minkälaisen ympäröivän ilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan kukin kosteusluokka vaatii [16].



Kuva 5.7. Haluttujen kosteuspitoisuuksien mukaiset olosuhteet. Muokattu lähteestä [16]

Kosteusluokilla 2 ja 3 vaaditut olosuhteet päästiin toteuttamaan olosuhdehuoneisiin. Kosteusluokalla 1 vaadittuja olosuhteita ei päästy täysin toteuttamaan. Olosuhdehuoneiden vähäisen määrän vuoksi kosteusluokan 1 koekappaleet olivat isommassa yleisessä olosuhdehuoneessa, jossa oli muiden kokeiden koekappaleita jo tasoittumassa tiettyyn kosteuspitoisuuteen. Kyseisessä olosuhdehuoneessa lämpötila oli noin 22 °C ja suhteellinen kosteus noin 57 %. Kuvan 5.7 kuvaajan mukaan tämä vastaa noin 11 %:n kosteuspitoisuutta, joka on hyvin lähellä alkuperäistä suunnitelmaa. Kosteusluokkien 1 ja 2 olosuhdehuoneissa olosuhteet luotiin koneellisesti. Kosteusluokan 3 olosuhdehuoneessa ilman suuri suhteellinen kosteus luotiin haihduttamalla vettä laaja-alaisesti olosuhdehuoneessa ja estämällä haihtuneen veden ulospääsy olosuhdehuoneesta. Käytännössä tämä toteutettiin täyttämällä suuren muovikaukalon pohjalle noin 200 mm:n kerros vettä ja muovittamalla kaukalon kansi tiivistä. Koekappaleet asetettiin muovikaukaloon vedenpinnan yläpuolelle nostetuille telineille. Kuvissa 5.8-5.10 on esitetty kosteusluokkien olosuhdehuoneet.



Kuva 5.8. Vanhan puutavaran koekappaleet kosteusluokan 1 olosuhdehuoneessa.



Kuva 5.9. Uuden puutavaran koekappaleita kosteusluokan 2 olosuhdehuoneessa.



Kuva 5.10. Uuden puutavaran koekappaleita kosteusluokan 3 olosuhdehuoneessa.

Puun kosteuspitoisuuden muutosta ja tasautumista seurattiin elektronisella kosteusmittarilla. Mittarin käyttö perustui kahden elektrodin lyömiseen puun pintaan. Kuten aiemmin tuli ilmi tällaisen mittarin kosteuspitoisuuden tulos voi heittää $\pm 2\%$ ja kosteusmittari mittaa vain pintaosien kosteuspitoisuutta [7, s. A4/9–10]. Tästä syystä koekappaleiden tasoittuminen olosuhteiden mukaiseen kosteuspitoisuuteen varmistettiin punnitsemalla näytteitä standardin SFS-EN 408 [23] mukaan. Kyseisen standardin mukaan puukoekappaleen kosteuspitoisuuden voidaan todeta olevan tasoittunut, kun kahden 6 tunnin välein tehdyn punnituksen erotus on enintään 0,1 %. [23, s. 8] Kaikkien koekappaleiden kosteuspitoisuuden tasoittumista ei punnitsemalla tarkastettu aikataulullisista

syistä. Jokaisen kosteusluokan puutavarasta valittiin 6 koekappaletta, jotka punnittiin. Kosteusluokasta 1 valittiin 6 koekappaletta sekä uudesta että vanhasta puutavarasta ja näiden erien kosteuden tasapainottuminen todettiin erikseen. Kun jokainen kuudesta valitusta punnittavasta koekappaleesta täytti edellä mainitut vaatimukset, oletettiin koko kyseisen erän kosteuspitoisuuden tasapainottuneen. Punnittaviksi koekappaleiksi pyrittiin valitsemaan mahdollisimman erilaisia koekappaleita niin poikkileikkaukseltaan kuin vuosilustojen tiheydeltään. Tällöin punnittavien koekappaleiden ajateltiin edustavan mahdollisimman hyvin koko koe-erää. Lisäksi kunkin koe-erän koekappaleet olivat olleet samassa tilassa useamman viikon ennen olosuhdehuoneisiin laittamista.

5.3.2 Kosteuspitoisuuden määrittäminen

Kaikkien koekappaleiden kosteuspitoisuus määritettiin muiden testauksien jälkeen. Kosteuspitoisuusmittaukset suoritettiin standardien SFS-EN 408 [23] ja 13183-1 [42] mukaan. Standardin SFS-EN 13183-1 [42] mukaisesti koekappaleiden kosteuspitoisuus määritetään punnitus-kuivausmenetelmällä. Menetelmässä koekappaleesta sahattu viipalenäyte punnitaan määritettävässä kosteuspitoisuudessa, jonka jälkeen se kuivataan uunissa ja punnitaan uudelleen. Standardin mukaan viipalenäytteitä kuivattiin uunissa noin 103 ± 2 °C lämpötilassa. Näytteiden kuivumista seurattiin aika ajoin punnitsemalla näytteet kaksi kertaa, niin että punnitusten väli oli vähintään kaksi tuntia. Kun vähintään kahden tunnin välein tehtyjen punnitusten tulos erosi toisistaan enintään 0,1 %, voitiin viipalenäytteen kuivapaino merkitä ylös. Kun viipalenäytteen massa oli määritetty kuivana ja määritettävässä kosteuspitoisuudessa, voitiin näytteen kosteuspitoisuus laskea kaavalla 2.3 standardin SFS-EN 13183-1 [42] mukaisesti. [42, s. 5] Kuvassa 5.11 on esitetty uuden koekappaleen punnitseminen sahausen jälkeen. Kaikkien viipalenäytteiden massan määrittämisessä eri vaiheissa käytettiin tarkkuudeltaan 0,01 g vaakaa.



Kuva 5.11. Uuden puutavaran koekappaleen viipalenäytteen punnitus sahauksen jälkeen.

Edellisessä kappaleessa mainittujen molempien standardien mukaan kosteuspitoisuuden määrittämiseen sahatussa viipalenäytteessä ei saa olla oksia tai pihkarakoja [42, s. 4][23, s. 8]. Standardin SFS-EN 13183-1 [42] mukaan viipalenäytteen tulee olla vähintään 20 mm paksu ja käsittää koko koekappaleen poikkileikkaus. Lisäksi viipalenäyte tulisi ottaa joko 300 mm:n etäisyydeltä koekappaleen päästä tai koekappaleen pituuden ollessa alle 600 mm sen keskeltä. [42, s. 4] Standardin SFS-EN 408 [23] mukaan viipalenäyte tulisi ottaa lujuustesteissä mahdollisimman läheltä murtokohtaa, missä ei ole vaurioita tai edellä mainittuja vikoja [23, s. 8]. Tästä syystä viipalenäytteen otossa noudatettiin muilta osin standardia SFS-EN 13183-1 [42] paitsi otettavan näytteen sijainnin määrittämisessä. Kuvassa 5.12 on esitetty vanhan puutavaran koekappaleesta otettavan viipalenäytteen määritetty sijainti.



Kuva 5.12. Sahattavan viipalenäytteen mahdollisimman lähellä murtokohtaa määritetty sijainti.

Standardin SFS-EN 13183-1 [42] mukaan viipalenäyte tulisi punnita välittömästi sen sahaus ja uunista ottamisen jälkeen. Mikäli sitä ei voida välittömästi punnita sahaus jälkeen, tulisi se sulkea ilmatiiviiseen astiaan, jotta kosteuspitoisuus ei pääse vaihtelevaan. [42, s. 5] Olosuhdehuoneiden ulkopuolella tehtävät puristusmurtokokeet tehtiin 2-3 koekappaleelle kerrallaan. Olosuhdehuoneen ulkopuolella koekappaleita pidettiin mahdollisimman ilmatiiviisti suljetussa muovisessa jätessä, elleivät ne olleet puristusmurtokokeessa. Myös murtoon puristuksen jälkeen koekappale laitettiin jätessäkin, kunnes kaikki kyseisen koesarjan koekappaleet oli puristettu murtoon ja viipalenäytteet voitiin sahata. Näin toimittiin, jotta koekappaleiden olosuhdehuoneissa saavuttama kosteuspitoisuus olisi säilynyt kokeiden ajan mahdollisimman hyvin. Puristusmurtokokeet ja viipalenäytteiden sahaus sekä punnitus olisi voitu suorittaa myös jokaiselle koekappaleelle yksitellen. Tällöin koekappaleiden olosuhdehuoneen ulkopuolella viettämä aika ennen viipalenäytteen punnitsemista olisi ollut mahdollisimman pieni. Tällaisella järjestyksellä kokonaisuudessa kokeisiin kulunut aika olisi kuitenkin kasvanut huomattavasti, minkä takia puristusmurtokokeet päätettiin tehdä useamman koekappaleen sarjoissa.

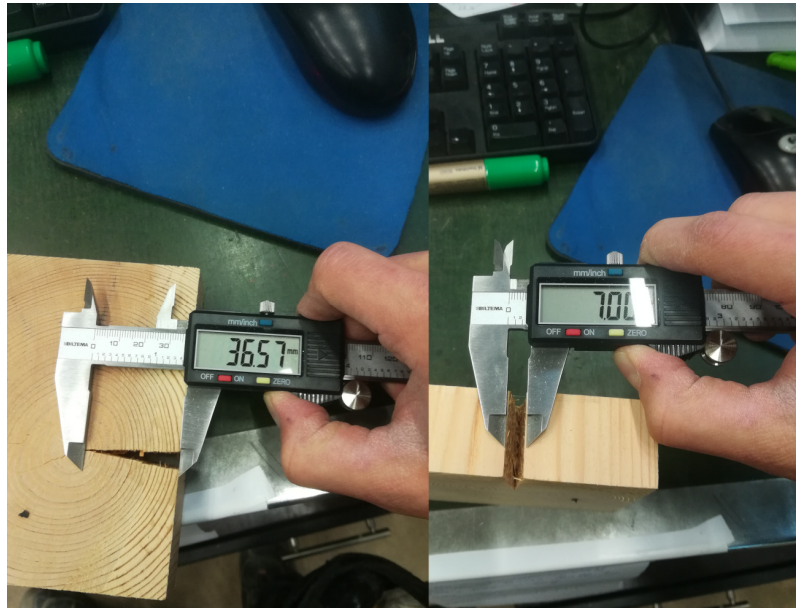
Standardin SFS-EN 13183-1 [42] mukaan viipalenäytettä voi pitää enintään 2 tuntia ilmatiiviissä astiassa ennen punnitsemista [42, s. 5]. Taas standardin SFS-EN 408 [23] mukaan suojaamaton koekappale saadaan ottaa tuntia ennen lujuskokeita ulos olosuhdehuoneesta. Koska kokeissa käytetty muovinen jätessäkki ei ollut täysin ilmatiivis, pidettiin yhden 2-3 koekappaleen koesarjan läpimenon maksimiaikana yhtä tuntia. Näin molempien standardien vaatimukset täyttyvät arviolta riittävällä tarkkuudella.

5.4 Koekappaleiden tiheys

Puun tiheydellä ja puun lujuusominaisuuksilla, kuten puristuslujuudella on selvä yhteys. Tästä syystä tiheys onkin yhtenä vaatimuksena standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokituksissa [7, s. A4/7]. Kuten aiemmin on tullut ilmi, on puun tiheydellä myös yhteys Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden kanssa [39, s. 3]. Tästä syystä on hyvin perusteltua ottaa tiheys kokeisiin yhdeksi tutkittavaksi ominaisuudeksi, kun pyritään selvittämään Pilodyn-laitteen ja lujuusominaisuuksien välistä yhteyttä. Kuten luvussa 2.4 tuli ilmi on vaatimuksena standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokituksissa annetut tiheydet aina virheettömän puun tiheyksiä [23, s. 6-8]. Lisäksi Pilodyn-laite antaa tietoa nimenomaan virheettömästä puusta. Tästä syystä tavoiteltu Pilodyn-laitteen standardin SFS-EN 338 [14] mukainen puun lujuustaulukointi pyritäänkin muodostamaan tiheyden kautta. Vaikka Pilodyn-laitteella on tunnettu yhteys useiden puulajien tiheyksien kanssa, ei se anna suoraan puun tiheystuloksia. Tiheyden määrittämiseksi Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydelle ja tiheydelle tulee määrittää kokeellisesti puulajista ja kosteudesta riippuva riippuvuussuhde. [36, s. 1-4]

Puun tiheys määritettiin standardin SFS-EN 408 [23] mukaan. Tiheys määritettiin samasta näyteviipaleesta puristuslujuustestien jälkeen, kuin mistä kosteuspitoisuuskin määritettiin. Näin voitiin tehdä, sillä viipalenäytteellä on hyvin samankaltaiset vaatimukset tiheyden ja kosteuspitoisuuden määrittämisessä. Tiheyttä varten viipalenäytteestä mitattiin sen poikkileikkauksen ja paksuuden dimensiot 0,1 mm:n tarkkuudella. Mittaukset suoritettiin digitaalisella työntömitalla. Mikäli viipalenäytteen paksuuden tai poikkileikkaussuureiden mitat vaihtelivat, otettiin tulokseksi kolmen mittauksen keskiarvo. [23, s. 8] Näyteviipaleiden dimensioilla voitiin yksinkertaisella kertolaskulla laskea näytteen tilavuus. Kaikkien dimensioiden mittaus suoritettiin viipalenäytteen massan punnitsemisen jälkeen. Koekappaleiden tiheys laskettiin aiemmin esitetyllä kaavalla 2.1.

Vanhan puutavaran koekappaleet olivat huomattavasti suurempia poikkileikkaukseltaan kuin uuden puutavaran koekappaleet. Suuresta poikkileikkauksesta johtuen vanhan puutavaran koekappaleet sisälsivät yleisesti puun ytimen säteen suuntaisia kuivumishalkeamia. Näiden halkeamien vaikutus viipalenäytteen tilavuuden laskentaan otettiin huomioon yksinkertaistetusti laskemalla halkeaman pohjan ala kolmiona. Kuvassa 5.13 on esitetty halkeaman tilavuuden määrittästä. Kuten kuvasta nähdään, suoritettiin halkeamienkin mittaus digitaalisella työntömitalla.



Kuva 5.13. Halkeamien tilavuuden määrittäminen.

5.5 Koekappaleiden puristuslujuus

Pilodyn-laite antaa tietoa vain virheettömästä puusta, minkä takia puun lujuusominaisuuksien ja laitteen tunkeumasyvyyden yhteyttä tulee tutkia mahdollisimman virheettömällä puulla [36, s. 3]. Lujuusominaisuuksista taivutuslujuus on standardissa SFS-EN 338 [14] lujuusluokitusten vaatimuksena [7, s. A7/5]. Standardin SFS-EN 408 [23] mukaan taivutuslujuuskokeissa koekappaleen pituuden tulisi olla vähintään 19 kertaa sen poikkileikkauksen korkeus [23, s. 32]. Näin ollen pitkillä uuden sahatavaran koekappaleilla oksien koon rajoittaminen tai oksattoman koekappaleen hankinta on hyvin hankalaa. Esimerkiksi näissä kokeissa vanhaa sahatavaraa ei ollut lainkaan saatavilla taivutuslujuuskokeiden vaatimassa pituudessa. Lisäksi oksien vaikutus taivutuslujuuteen on huomattavasti merkittävämpi kuin syiden suuntaiseen puristuslujuuteen [17, s. 43]. Tällöin koekappaleen oksaisuuden rajoituksista huolimattakin virheettömän puun taivutuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden yhteyden tutkiminen olisi ollut hankalaa. Näistä syistä tässä työssä tutkitaan puun lujuusominaisuuksista juuri syiden suuntaisen puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden yhteyttä.

Standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokituksessa annetut arvot perustuvat tiheyttä lukuun ottamatta vikoja sisältävän puun arvoihin [23]. Tästä syystä uuden puutavaran koe-erien puristuslujuustuloksia ei voida suoraan yhdistää standardin SFS-EN 338 [14] arvoihin, sillä kyseisten koe-erien koekappaleiden oksaisuutta rajoitettiin. Tämä ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaistakaan, sillä Pilodyn-laitteella tehtävä standardin SFS-EN 338 [14] mukainen lujuustaulukointi tehdään tiheyden kautta. Koe-erällä VP vertailla standardin SFS-EN 338 [14] ja koetulosten välillä voidaan tehdä, sillä kyseisen koe-erän vikojen määrää ei rajoitettu.

Syiden suuntainen puristuslujuus mitattiin standardin SFS-EN 408 [23] mukaan. Puristuskokeet suoritettiin ensimmäisenä koekappaleiden olosuhdehuoneista poiston jälkeen. Ennen varsinaista puristuskokeen aloitusta mitattiin näytteen poikkileikkauksen mitat 0,1 mm:n tarkkuudella, kun koekappaleet olivat tasapainottuneet haluttuun kosteuspitoisuuteen [23, s. 8]. Samalla mitattiin ja taulukoitiin myös poikkileikkauksen pinta-alan laskentaan vaikuttavat halkeamat. Halkeamien alan mittaaminen suoritettiin samalla tapaa, kuin tiheyden määrittämisessä. Kaikissa mittauksissa käytettiin digitaalista työntömittaa. Poikkileikkausmittojen mittaamisen yhteydessä määritettiin ja kirjattiin koekappaleiden suurimmat oksat, mahdolliset halkeamat ja muut seikat, jotka voivat vaikuttaa koekappaleen puristuslujuuteen.

Puristuslujuuden mittauksessa käytettiin hydraulista tunkkia, joka puristaa koekappaleen yksiakselisesti murtoon. Tunkki mittaa kuorman (kN), jolla se kuormittaa kappaletta ja tallentaa suurimman vaikuttaneet kuorman. Yksinkertaistettuna puristuslujuuskokeessa koelaitteessa laitettiin tunkin kahden levyn väliin syysuunta kohtisuoraan levyjen pintoja päin, jonka jälkeen levyjä painettiin tunkilla toisiaan päin koekappaleen murtoon asti. Ennen kokeen aloitusta koekappale tuli kohdistaa keskellä levyjä, jotta kuormitus olisi keskeinen eikä syntyisi epäkeskisen kuorman aiheuttamaa momenttia. Kuvassa 5.14 on esitetty puristuslujuuskokeiden laitteisto käytössä.



Kuva 5.14. Puristuslujuuskokeiden laitteisto käytössä.

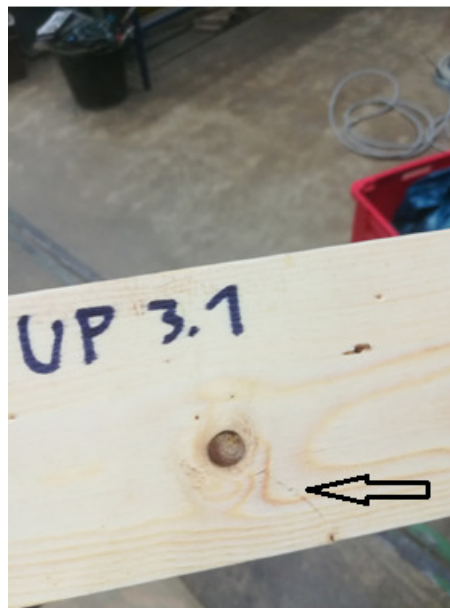
Standardin SFS-EN 408 [23] mukaan koekappaleen tulee murtua 300 (\pm 120) s kuluessa. Kuormitusnopeus säädettiin esikokeilla. Esikokeissa puristettiin koekappaleiden kanssa samankaltaisia puukappaleita murtoon ja varmistettiin että murto tapahtui vaadi-

tun ajan puitteissa. Mikäli koekappale murtui sallitun aikavälin ulkopuolella, kirjattiin se ylös ja pohdittiin tuloksen luotettavuutta. Kun koekappale murtui, voitiin sen murttoon johtanut puristusjännitys laskea seuraavalla kaavalla [23, s. 22-23]

$$f_{c.0} = \frac{F_{max}}{b_i * h_i}, \quad (5.3)$$

missä $f_{c.0}$ on syiden suuntainen puristusjännitys, F_{max} on koekappaleen murtokuorma ja b_i sekä h_i ovat koekappaleen poikkileikkauksen leveys ja korkeus. Koekappaleen murtokuorma (kN) kirjattiin ylös 0,01 kN tarkkuudella.

Lähestulkoon kaikkien koekappaleiden murtotapa oli oksakohdan lähellä tapahtunut syiden nurjahdus. Tällainen murtotapa on esitetty kuvassa 5.15. Vanhan puutavaran koe-erässä VP havaittiin myös olevan halkeaman repeämisen aiheuttamia murtoja. Murtokuorman lisäksi koekappaleen murtotapa kirjattiin ylös. Mikäli murtotapa oli puhdas syiden nurjahtaminen ilman oksakohtaa, merkattiin se puhtaaksi murreksi.



Kuva 5.15. Uuden sahatavaran koekappaleen oksakohdan läheinen syiden nurjahdus.

5.6 Ominaisarvojen laskenta

Standardin SFS-EN 338 [14] lujuustaulukossa (ks. taulukko 2.4) lujuusluokkien kaikki ominaisarvot ja ominaistiheydet perustuvat alempaan 5 %:n fraktiiliin. Kokeista saaduille tuloksille ominaisarvot voidaan laskea standardin SFS-EN 14358 [43] mukaan, jolloin varsinkin tiheyden arvoja voidaan verrata standardissa SFS-EN 338 [14] esitettyihin arvoihin. Standardin SFS-EN 14385 [43] mukaan lujuustekijät oletetaan olevan logaritmisesti normaalijakautuneet ja tiheys oletetaan normaalijakautuneeksi. Taulukoon 5.2 on listattu kyseisen standardin mukaiset kaavat 5 %:n fraktiilin ominaisarvojen

laskentaan. Taulukon tekijöissä y_{mean} on otoksen keskiarvo, s_y on keskihajonta, n on otoksen kappalemäärä, m_i on yhden koekappaleen koetulos ja m_k on otosjoukon koetuloksen 5 %:n fraktiiliin mukainen ominaisarvo. [43, s. 4-6]

Taulukko 5.2. Koetulosten ominaisarvojen laskenta standardin SFS-EN 14358 mukaan [43, s. 5-6].

	Logaritmisesti normaalijakautunut	Normaalijakautunut
Keskiarvo	$y_{mean} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n \ln m_i$	$y_{mean} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n m_i$
Keskihajonta	$s_y = \text{m\ddot{e}k} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (\ln m_i - y_{mean})^2}, 0,05 \right\}$	$s_y = \text{m\ddot{e}k} \left\{ \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{i=1}^n (m_i - y_{mean})^2}, 0,05 * y_{mean} \right\}$
5 %:n alempi fraktiili	$m_k = \exp (y_{mean} - k_s * s_y)$	$m_k = y_{mean} - k_s * s_y$

Ominaisarvon määrittäminen tehdään aina otosjoukolle. Eli useammalle kuin yhdelle näytteelle. Mitä enemmän näytteitä on, sitä luotettavampi otosjoukkoa edustava ominaisarvo saadaan. Taulukon 5.2 kaavoissa esiintyvä kerroin k_s ottaa laskuissa huomioon otosjoukon koon. Mitä vähemmän näytteitä on, sitä suuremmaksi kerroin k_s määriytyy. Taulukkoon 5.3 on listattu kertoimen k_s arvoja eri otosmäärillä. [43, s. 4-6]

Taulukko 5.3. Otoksen koekappaleiden määrän huomioiva kerroin k_s [43, s. 6].

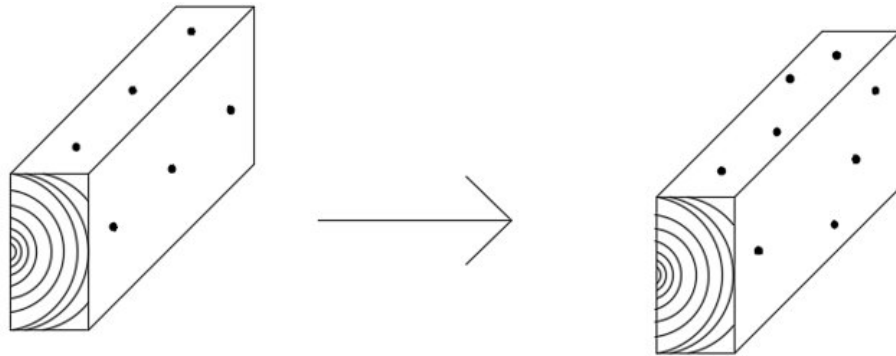
Koekappaleiden määrä (n)	Kerroin (k_s)
3	3,15
5	2,46
10	2,10
15	1,99
20	1,93
30	1,87
50	1,81
100	1,76
500	1,69
∞	1,64

5.7 Koekappaleiden Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys

Kuten edellä on tullut ilmi, on kokeiden ja tämän työn päätavoitteena ollut tutkia juuri Pilodyn-laitetta ja sen tunkeumasyyvyyden yhteyttä puun eri ominaisuuksiin. Kokeissa käytettiin laitemallia Pilodyn 6J, joka on esitetty kuvassa 4.1. Luvussa 4 on käyty läpi laitteen toimintaa ja miten laitetta on käytetty aiemmissa laitetta koskevissa tutkimuksissa. Tässä työssä Pilodyn-laitteella tehdyt tutkimukset suoritettiin soveltamalla aiempien tutkimusten tapoja.

Pilodyn-laitteen mittaukset suoritettiin ennen puristuskokeita, kun koekappaleet olivat tasoittuneet haluttuihin kosteuspitoisuuksiinsa. Kosteusluokan 1 koekappaleet voitiin testata Pilodyn-laitteella olosuhdehuoneen sisällä. Kosteusluokkien 2 ja 3 koekappaleilla tämä ei ollut mahdollista, sillä näiden olosuhdehuoneissa ei tilaa testaukseen ollut. Näin ollen kosteusluokkien 2 ja 3 koekappaleilla Pilodyn-laitteen testaukset suoritettiin neljän koekappaleen erissä olosuhdehuoneiden ulkopuolella. Kun yksi koekappaleista oli testauksissa, pidettiin muut kolme koekappaleita mahdollisimman ilmatiiviisti suljettussa muovisessa jätessä. Lisäksi testaukset tehtiin siten, että neljän koekappaleen erä oli enintään yhden tunnin olosuhdehuoneen ulkopuolella. Näin koekappaleissa pyrittiin pitämään koko testauksien ajan tasapainotettu kosteuspitoisuus. Kosteusluokkien 2 ja 3 kosteuspitoisuuden tasapainottuminen varmistettiin vielä uusinta punnituksilla luvun 5.3.2 mukaan ennen puristuslujuustestauksiin siirtymistä.

Useamman lähteen mukaan Pilodyn-laitteen neula tulisi laukaista aina puun ytimen säteen suuntaisesti. Tällöin neula lävistää mahdollisimman monen vuosiluston. [35, s. 30][36, s. 4] Toisaalta Thalerin et. al. [37] tutkimuksessa löydettiin korkeat korrelaatiot laitteen tunkeumasyyvyydelle ja lahon aiheuttamalle massan vähenemiselle laukaistaessa neula myös syiden tangenttisuuressa. Lisäksi ammuttaessa neulaa tiukasti vain ytimen säteen suuntaisesti jää suuri osa tutkittavan kappaleen poikkileikkauksesta tutkimatta (ks. kuva 5.16). Yksinkertaistetusti syiden suuntaisessa puristuksessa koko poikkileikkauksessa vallitsee tasainen jatkuva jännitys [8, s. 42]. Tästä syystä varsinkin syiden suuntaisessa puristuslujuudessa koko poikkileikkauksen toimivuus tulisi ottaa testauksessa huomioon. Sama pätee puun tiheyteen, joka koostuu koko poikkileikkauksen muodostamasta tiheydestä. Taivutusrasituksessa tilanne on erilainen, sillä kyseisessä rasitusmuodossa jännitys ei ole yhtä suuri koko poikkileikkauksessa. Taivutusrasituksessa suurimmat jännitykset sijaitsevat poikkileikkauksen ylä- ja alareunoissa. [17, s. 39] Koska tutkimuksissa tutkitaan nimenomaan puun tiheyden ja puristuslujuuden yhteyttä Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden kanssa, laukaistiin Pilodyn-laitetta kattavammin ympäri poikkileikkausta. Kuvassa 5.16 on esitetty vasemmalla puolella puhdas säteen suuntainen laukaisutyylä ja oikealla näissä kokeissa käytetty vapaampi sekä kattavampi laukaisutyylä. Kuvassa mustat pisteet edustavat laitteen neulan laukaisupisteitä.



Kuva 5.16. *Pilodyn-laitteen kaksi erilaista laukaisupisteiden sijoitustapaa. Oikeanpuoleinen tapa oli käytössä näissä tutkimuksissa.*

Koska koekappaleiden poikkileikkaus haluttiin tutkia kattavasti Pilodyn-laitteella, ammuttiin neulaa molemmille syrjä- ja lapesivuille. Koekappaleen päätyihin (vuosilustojen suuntaisesti) neulaa ei ammuttu. Pääosin mittauksia tehtiin 4 mittausta per sivu kuvan 5.16 oikeanpuoleisen koekappaleen mukaisesti. Kolme mittausta yhdestä sivusta riitti siinä tapauksessa, kun näiden kolmen mittauksen tulokset olivat kaikki 1 mm:n sisällä. Mikäli jokin neljästä yhden sivun mittaustuloksesta heitti yli 2 mm, suoritettiin 1-2 lisämittausta. Ja mikäli jokin yhden sivun mittaustuloksesta erosi huomattavasti (>5 mm) muista mittaustuloksista, ei tätä huomioitu keskiarvon laskennassa. Näin tehtiin, sillä huomattavasti eroava mittaustulos voi kertoa siitä, että laitteen neula on osunut johonkin puun vikaan, kuten oksaan tai halkeamaan.

Jokaiselle koekappaleen sivulle laskettiin oma Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden keskiarvo mitatuista tuloksista ja yhdeksi tulokseksi merkattiin näiden kaikkien sivujen keskiarvojen keskiarvo. Näin eri sivujen tuloksia, niiden eroavaisuuksia ja niiden yhteyksiä puun ominaisuuksien kanssa voitiin vertailla keskenään. Mittaustulokset luettiin laitteen asteikolta 0,5 mm:n tarkkuudella. Kaikki Pilodyn-laitteen mittaukset tehtiin kohtiin, missä ei ollut mitään vikoja, kuten oksia tai halkeamia.

6. KOKEIDEN TULOKSET

6.1 Koekappaleiden kosteuspitoisuus

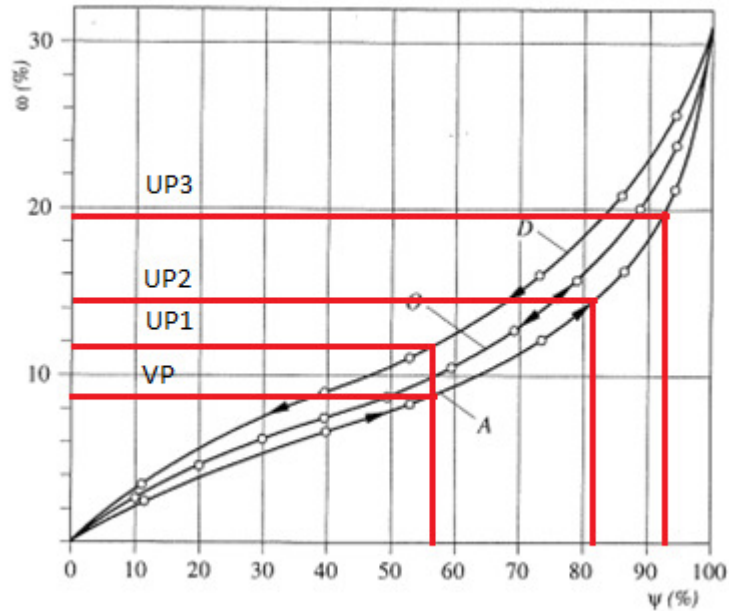
Koekappaleiden tavoitellut kosteuspitoisuudet esiteltiin aiemmin taulukossa 5.1. Kokeissa saavutetut kosteuspitoisuudet eivät täysin vastanneet tavoiteltuja kosteuspitoisuuksia. Kosteusluokan 1 koekappaleilla tämä oli jo tiedossa, sillä nämä olivat yleisessä tiettyyn kosteuspitoisuuteen säädetyssä olosuhdehuoneessa. Kosteusluokan 1 koekappaleista uuden sahatavaran koekappaleet vastaavat lähes täydellisesti kyseisen olosuhdehuoneen olosuhteiden (lämpötila 22 °C ja suhteellinen kosteus 57 %) mukaista kosteuspitoisuutta (ks. kuva 5.4). Kokeissa saavutetut kosteuspitoisuudet on esitelty alla olevassa taulukossa 6.1. Kyseiseen taulukkoon on kirjattu kunkin koe-erän koekappaleiden kosteuspitoisuuksien keskiarvo ja keskihajonta. Taulukossa merkintä UP tarkoittaa uuden puutavaran ja VP vanhan puutavaran koe-eriä. Kunkin koe-erän kaikkien koekappaleiden kosteuspitoisuuksien tulokset ovat nähtävissä liitteessä B.

Taulukko 6.1. Koekappaleiden saavutetut kosteuspitoisuudet.

Luokat/Koe-erät	Tavoiteltu kosteuspitoisuus (ω)	Kosteussäilytysaika	Saavutettu kosteuspitoisuus (ω)	Saavutetun kosteuspitoisuuden keskihajonta
Kosteusluokka 1 (VP ja UP1)	~12 %	VP 21 vrk	VP 8,8 %	VP 0,66 %
		UP1 26 vrk	UP1 11,1 %	UP1 0,17 %
Kosteusluokka 2 (UP2)	~18 %	21 vrk	14,8 %	0,42 %
Kosteusluokka 3 (UP3)	~24 %	55 vrk	19,3 %	0,74 %

Tavoiteltujen ja saavutettujen kosteuspitoisuuksien eroavaisuudet ovat melko helposti selitettävissä. Kuten luvussa 2.2.3 tuli ilmi, riippuu puun tasapainokosteus suuresti siitä, tapahtuuko kosteuden tasapainottuminen kuivumisen vai kostumisen kautta. Puun saavuttaessa tasapainokosteutensa kosteutta imemällä jää tasapainokosteuden arvo huomattavasti alemmaksi, kuin mikäli tasapainokosteus saavutettaisiin kuivumalla. Kuvassa 6.1 on esitetty kuusen tasapainokosteuden riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta vakio- λ -lämpötilassa 20 °C, kuten kuvassa 2.6. Kuvaan 6.1 on lisätty punaisin viivoin hahmotelmat, joiden kautta tasapainokosteuden saavuttaminen on koekappaleilla tapahtu-

nut. Näin selvästi nähdään, että kaikkien muiden koe-erien tasapainokosteus saavutettiin kosteutta imemällä paitsi koe-erän UP1. Kuvan 6.1 mukaiset tasapainokosteuden tulokset ovat hyvin lähellä saavutettuja kosteuspitoisuuksia.



Kuva 6.1. Kuusen tasapainokosteuden riippuvuus ilman suhteellisesta kosteudesta ja kylläisyyskosteudesta 20 °C. Muokattu lähteestä [7, s. A4/11]

Koekappaleiden kosteuspitoisuuksien hajonnat ovat todennäköisimmin pääosin puun heterogeenisuudesta johtuvaa, sillä puun kosteuskäyttäytyminen on erilaista puulajien ja saman lajin yksilöidenkin välillä [8, s.31]. Mikäli tarkastellaan vain uuden sahatavaran koekappaleita, saavutettujen kosteuspitoisuuksien keskihajonta kasvaa, kun mennään kosteampiin näytteisiin. Tähän löytyy selitys kuvasta 2.5. Kyseisessä kuvassa esitettiin puun tasapainokosteuden riippuvuus ilman lämpötilasta ja ilman suhteellisesta kosteudesta. Mitä suurempaan ilman suhteelliseen kosteuteen kuvassa mennään, niin sitä tiuhempaan tasapainokosteuden käyrät kuvassa osuvat. Eli tällöin tasapainokosteuden heitely on paljon herkempää, kun ilman suhteellinen kosteus on korkea.

Olosuhdehuoneiden sekä puristuslujuus- ja tiheyskoepaikan olosuhteiden eroavaisuudet voivat myös aiheuttaa jonkin verran heittoa tuloksiin. Keskimääräisesti koepaikalla valitseva lämpötila oli noin 19 °C ja ilman suhteellinen kosteus noin 35 %. Tämä vastaa noin 6-7 %:n tasapainokosteutta. Tällöin vaikutus on suurin kosteampiin koekappaleisiin ja tämänkin vuoksi hajonta kasvaa, kun mennään kosteampiin koekappaleisiin. Kaikki koekappaleet, niin uudet kuin vanhatkin, olivat koeolosuhteissa reilusti alle sallitun ajan (yksi tunti). Lisäksi, kuten aiemmin tuli ilmi, puutavaran tasapainottuminen ympäröivän ilman mukaiseen kosteuspitoisuuteen on hyvin hidasta [7, A4/10]. Tästä

syystä olosuhdehuoneiden ja koeolosuhteiden eron aiheuttama virhe tuloksiin on todennäköisesti merkityksetön.

Aikaa koe-erien kosteuspitoisuuksien tasapainottumiseen kului hyvin vaihtelevasti. Esimerkiksi vanhan puutavaran tasapainottuminen kosteusluokkaan 1 kesti 21 päivää, kun uuden puutavaran tasapainottuminen kosteusluokkaan 3 kesti lähes 2 kuukautta. Tämä johtuu todennäköisesti siitä, että vanhat koekappaleet olivat huomattavasti lähempänä olosuhdehuoneen mukaista kosteuspitoisuutta, kuin mitä esimerkiksi kosteusluokan 3 puutavara oli. Taulukosta 6.1 huomataan, että vanhojen koekappaleiden kosteuspitoisuuden hajonta on suhteellisesti suurempaa, kuin uusilla koekappaleilla. Näin ollen on myös mahdollista, että poikkileikkaukseltaan järeämpien vanhojen koekappaleiden keskiosat eivät ole täysin tasapainottuneet haluttuun kosteuteen. Toisaalta vanhat koekappaleet erittivät huomattavasti enemmän pihkaa kuivattaessa kuin uudet koekappaleet. Tällöin osasta vanhoista koekappaleista pihkaa valui pois kuivausprosessissa, mikä on vaikuttanut näiden kuivapainoon ja siten saatuun kosteuspitoisuuteen. Tämä osaltaan selittää koe-erän VP suurempaa hajontaa.

Suurimmillaan kosteusluokan 3 olosuhdehuoneen ilman suhteellinen kosteus oli noin 96 %. Näin korkea ilman suhteellinen kosteus voi jo aiheuttaa puun lahoamista, kuten taulukosta 2.6 voidaan lukea. Tässä tilanteessa puutavaran tasapainottuminen tapahtui kuitenkin kostumisen kautta, jolloin puun kosteuspitoisuus jäi alle 25 %. Kosteusluokan 3 uudessa puutavarassa ei havaittu lahoa, mutta mikrobikasvustoa koekappaleiden pinnoilla havaittiin melko yleisesti. Kuten aiemmin tuli ilmi, ei homesienten kasvu vaadi yhtä korkeaa kosteuspitoisuutta kuin lahottajasienet. Kuvassa 6.2 on esitetty yksi tällainen koekappale, jonka pinnalla on havaittavissa homesienikasvustoa.



Kuva 6.2. Mikrobikasvustoa kosteusluokan 3 koekappaleen pinnalla.

6.2 Koekappaleiden tiheys

Kunkin koe-erän sisällä tiheyden tuloksia voidaan vertailla muiden koekappaleesta mitattujen ominaisuuksien kanssa. Kun eri kosteuspitoisuuksissa tehtyjen kokeiden tiheystuloksia ja muita ominaisuuksia halutaan verrata, täytyy tiheydelle muodostaa kosteuspitoisuuden korjauskaava. Kuten aiemmin luvussa 5.3 mainittiin, korjauskaavan voi muodostaa omista koetuloksista tai ottamalla standardista SFS-EN 384 [15] valmiin kaavan [15, s. 9]. Koska nyt uudelle puutavarelle (UP1-3) kokeita tehtiin otoksiltaan yhteiselle useille eri koe-erille ja useassa eri kosteuspitoisuudesta, korjauskaavat laskettiin itse. Kaavan pohjana käytettiin standardin SFS-EN 384 [15] valmista kaavaa 5.2. Kaavaa muodostaessa tekijän 0,005 suuruutta iteroitiin niin, että koe-erien korjattujen tiheyksien keskiarvot olisivat kaikilla lähes yhtä suuret. Koe-erien korjatut tiheydet olivat lähimpänä toisiaan, kun korjauskaavan kosteuspitoisuuksien erotuksen kerroin vastasi täysin kaavan 5.2 kerrointa. Näin ollen tiheyksien korjauskaavassa tekijää 0,005 ei muutettu. Tiheyden korjauskaavojen muodostus tehtiin uuden puutavaran koe-erillä, mutta samoja kaavoja käytettiin myös vanhan puutavaran koe-erälle. Taulukkoon 6.2 on listattu kunkin koe-erän alkuperäisten ja korjattujen tiheyksien keskiarvot ja vaihteluvälit. Taulukkoon on lisätty myös taulukkojen 5.2 ja 5.3 mukaan lasketut tiheyden ominaisarvot. Kertoimena k_s on koe-erille UP1-3 käytetty arvoa 1,83 (50 kpl) ja koe-erälle VP 1,91 (24 kpl). Yksittäisten koekappaleiden alkuperäiset ja korjatut tiheydet on esitetty koe-erittäin liitteessä D.

Taulukko 6.2. Koe-erien alkuperäisten ja korjattujen tiheyksien keskiarvot sekä vaihteluväli.

Koe-erä	Kosteuspitoisuus kokeissa	Alkuperäisen tiheyden keskiarvo	Korjatun tiheyden keskiarvo	Korjatun tiheyden vaihteluväli	Tiheyden ominaisarvo
VP	8,8 %	448,1 kg/m ³	455,2 kg/m ³	392,9 -642,1 kg/m ³	339,96 kg/m ³
UP1	11,1 %	450,3 kg/m ³	452,3 kg/m ³	359,7 -545,9 kg/m ³	361,75 kg/m ³
UP2	14,8 %	452,4 kg/m ³	446,1 kg/m ³	353,3 -541,0 kg/m ³	358,96 kg/m ³
UP3	19,3 %	472,7 kg/m ³	455,4 kg/m ³	357,7 -547,1 kg/m ³	369,37 kg/m ³

Kun vertaillaan taulukon 6.2 uuden puutavaran koe-erien korjattujen tiheysarvojen tuloksia, huomataan selkeä yhteys koe-erien välillä. Näin ollen koe-erät ovat otoksiltaan vertailukelpoisia, koska uuden puutavaran koe-erien tulokset toimivat lineaarisesti. Ainoastaan koe-erän UP2 korjattu tiheyden keskiarvo poikkeaa hieman muista. Myös vanhan puutavaran koe-erän korjatun tiheyden keskiarvo osui lähelle uuden puutavaran

koe-erien tiheyksiä. Tämä kuitenkin on puhdasta sattumaa, sillä vanhan puutavaran koe-erä oli otokseltaan täysin erilainen kuin uuden puutavaran koe-erä.

Standardin SFS-EN 338 [14] havupuun lujuusluokituksessa tiheydelle on raja-arvot niin keskiarvotiheytenä kuin 5 %:n fraktiilin mukaisena ominaistiheytenä. Nämä standardin mukaiset tiheyden raja-arvot on listattu taulukkoon 6.3. Kun vertaillaan taulukon 6.2 mukaisia standardikosteuspitoisuuteen korjattuja tiheyden ominaisarvoja taulukon 6.3 arvoihin, asettuvat koe-erät UP1 ja UP3 taulukon 6.3 lujuusluokkaan C27. Koe-erä UP2 jää niukasti lujuusluokan C27 alapuolelle ja kuuluu taulukon 6.3 mukaan luokkaan C24. Selkeästi muista koe-eristä eroava ominaistiheys on koe-erällä VP. Tämän koe-erän ominaistiheyden lujuusluokka olisi C20. Keskiarvotiheydeltään taas kaikki koe-erät ovat hyvin lähekkäin toisiaan. Eroavaisuudet ominaistiheyksien välillä onkin selitettävissä koekappaleiden sisäisellä vaihtelulla eli keskihajonnalla. Koe-erällä VP on selkeästi muita koe-eriä suurempi keskihajonta, jolloin sen ominaistiheys jää alhaisemmaksi.

Keskiarvotiheyksiä ja taulukon 6.3 tuloksia vertaamalla koe-erille saataisiin osin hieman erilaisia luokituksia. Kokeissa saatuja keskiarvotiheyksiä ja taulukon 6.3 keskiarvotiheyksiä ei kuitenkaan tule vertailla. Taulukossa 6.3 annetut keskiarvotiheydet ovat nimittäin ominaistiheydestä kertoimella määritettyjä [15, s. 13]. Lisäksi koekappaleista määritetty ominaistiheys antaa huomattavasti luotettavamman tulkinnan otosjoukon tilanteesta, sillä se huomioi otosjoukon heikommatkin tulokset.

Taulukko 6.3. Standardin SFS-EN 338 mukaisten lujuusluokkien tiheyden raja-arvot havupuulle. [14, s. 7]

		Tiheydet [kg/m ³]											
Luokka		C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Ominaistiheys	ρ_k	290	310	320	330	340	350	360	380	390	400	410	430
KA. tiheys	ρ_{mean}	350	370	380	400	410	420	430	460	470	480	490	520

Koekappaleiden tiheyden mittauksissa ei merkittäviä tuloksiin vaikuttavia virhetekijöitä havaittu. Kosteuspitoisuuden vaikutus tiheystuloksiin on melko pieni, sillä koe-erien alkuperäisten tiheyksien keskiarvojen erot ovat pieniä ja tiheyden korjauskaavan kerroin on pieni. Näin ollen kosteuspitoisuusmittauksen virheet eivät merkittävästi vaikuta tiheyksiin. Uuden puutavaran koekappaleilla viipalenyttteen sahaaminen, niin, ettei se sisällä mitään puun vikoja, oli melko helppoa. Viipalenyttteen ollessa pelkästään puhdasta puuta ei tästäkään synny virhettä tuloksiin. Vanhan puutavaran osalta tilanne on hieman erilainen. Kuten aiemmin tuli ilmi, osa vanhan puutavaran koekappaleista oli melko pihkaisia. Näin ollen vanhan puutavaran pihkaisuus on voinut aiheuttaa hieman virhettä tuloksiin.

6.3 Koekappaleiden puristuslujuus

Puristuslujuudenkin osalta muodostettiin uuden puutavaran koetuloksista kosteuspitoisuuden huomioiva korjauskaava. Korjauskaava muodostettiin puristuslujuudelle vastaavalla tavalla kuin tiheydelle. Standardin SFS-EN 384 [15] mukaan puun lujuusominaisuudet käyttäytyvät lineaarisesti kosteuspitoisuuden ollessa välillä 8-18 % [15, s. 9]. Toisaalta muiden lähteiden mukaan puun lujuusominaisuudet käyttäytyvät lineaarisesti kosteuspitoisuuden ollessa välillä 8-20 % [7, s. A4/15]. Tästä syystä koe-erän UP 3 puristuslujuuden korjauskaavassa käytettiin sekä kokeissa saatua keskiarvokosteuspitoisuutta 19,3 % että standardin mukaista kosteuspitoisuutta 18 %. Puristuslujuuden osalta kaavan pohjana käytettiin standardin SFS-EN 384 [15] valmista kaavaa 5.1, josta vain tekijän 0,03 suuruutta muutettiin iteroimalla. Koe-erien korjatut puristuslujuudet olivat lähimpänä toisiaan, kun se oli kaavan 6.1 mukainen.

$$f_{c,0,\omega_{ref}} = f_{c,0,\omega_i} * (1 + 0,085(\omega_i - \omega_{ref})) \quad (6.1)$$

Kuten tiheydessäkin, puristuslujuudessa vanhan puutavaran koe-erälle käytettiin samaa korjauskaavaa kuin uudella koe-erällä. Taulukkoon 6.4 on listattu kunkin koe-erän alkuperäisten ja korjattujen puristuslujuuksien keskiarvot ja vaihteluvälit. Taulukkoon on lisätty myös taulukkojen 5.2 ja 5.3 mukaan lasketut puristuslujuuden ominaisarvot. Kertoimena k_s on koe-erille UP1-3 käytetty arvoa 1,83 (50 kpl) ja koe-erälle VP 1,91 (24 kpl). Yksittäisten koekappaleiden alkuperäiset ja korjatut puristuslujuudet sekä murtotavat on esitetty koe-erittäin liitteessä E.

Taulukko 6.4. Koe-erien alkuperäisten ja korjattujen puristuslujuuksien keskiarvot sekä vaihteluväli.

Koe-erä	Kosteuspitoisuus kokeissa	Alkuperäisen puristuslujuuden KA	Korjatun puristuslujuuden KA	Korjatun puristuslujuuden vaihteluväli	Puristuslujuuden ominaisarvo
VP	8,8 %	37,25 N/mm ²	27,24 N/mm ²	21,49 -36,76 N/mm ²	19,83 N/mm ²
UP1	11,1 %	40,67 N/mm ²	37,59 N/mm ²	26,48 -48,72 N/mm ²	28,71 N/mm ²
UP2	14,8 %	31,12 N/mm ²	38,42 N/mm ²	28,71 -50,38 N/mm ²	30,03 N/mm ²
UP3	19,3 %	22,35 N/mm ²	36,20 N/mm ²	25,31 -50,03 N/mm ²	27,76 N/mm ²
	18 %		33,75 N/mm ²	23,60 -46,65 N/mm ²	25,88 N/mm ²

Standardin SFS-EN 384 [15] mukaan kosteuspitoisuuden ollessa yli 18 % tulee puristuslujuuden korjauskaavassa käyttää kosteuspitoisuutta 18 % [15, s. 9]. Tuloksia ver-

taamalla huomataan, että tulokset asettuvat lähemmäksi puristuslujuuden lineaarisen kosteusalueen tuloksia, kun korjauskaavassa käytetään kokeiden mukaista kosteuspitoisuutta 19,3 %. Näin ollen näiden tutkimuksien mukaan puristuslujuuden tulokset käyttäytyvät lähes lineaarisesti alle 20 % kosteuspitoisuuksilla.

Murtotavat vaihtelivat koe-erittäin kosteuspitoisuuden mukaan. Mitä suuremmassa kosteuspitoisuudessa testattu koe-erä, sitä useammin murto tapahtui puhtaasti. Taas pienemmissä kosteuspitoisuuksissa testatut koekappaleet murtuivat hyvin usein suurimman oksan kohdalta. Tulokset tukevat hyvin kuvan 2.9 kuvaajaa, jonka mukaan virheiden merkitys lujuteen pienenee kosteuspitoisuuden kasvaessa [7, s. A4/16]. Vanhoilla koekappaleilla, joilla oksien kokoa ei rajoitettu murto tapahtui lähes aina suurimpien oksien kohdalta. Murtotavat on esitetty koekappaleittain liitteessä E.

Standardin SFS-EN 408 [23] mukaan koekappaleen tuli murtua $300 (\pm 120)$ s kuluessa. Mikäli murto ei tapahdu tuli se ilmoittaa tulosten yhteydessä. [23, s. 23] Kokeissa koekappaleen VP 4 osalta murtoaika hieman ylittyi (28 s) ja koekappaleen UP 2.1 osalta aika hieman alittui (28 s). Molempien koekappaleiden tulokset kuitenkin hyväksyttiin, sillä tulokset eivät erotu muista tuloksista. Lisäksi kyseisten koekappaleiden tulokset asettuvat hyvin myöhemmin esitettävälle korrelaatio-suorille. Koekappaleiden murtoajat on esitetty koekappaleittain liitteessä E.

Taulukon 6.4 tuloksia vertailtaessa huomataan vanhojen koekappaleiden tulosten selvästi eroavan uusien koekappaleiden tuloksista. Vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatut tulokset jäävät selvästi uusien koekappaleiden tulosten alapuolelle. Kyseisen koe-erän kohdalla oksien kokoa ei rajoitettu ja koekappaleet sisälsivät suuresta poikkileikkauksesta johtuen myös leveitä halkeamia. Nämä tekijät ovat varmasti tiputtaneet puristuslujuuden tuloksia muihin koe-eriin nähden. Puun eri vikojen merkitys on ollut myös merkittävämpi kuin muilla koe-erillä, sillä vikojen merkitys on suurempi pienemmillä kosteuspitoisuuksilla [7, s. A4/16]. Toinen mahdollinen syy koe-erän VP pienempiin puristuslujuuksiin on mahdollisesti ajan myötä heikentyneet lujuusominaisuudet. Kuten luvussa 2.3.3 tuli ilmi, voivat puun lujuusominaisuudet heikentyä ajan myötä eri syistä [7, s. A4/17-18][20, s. 1-24][11, s.230-232]. On esimerkiksi mahdollista, että vanhan puutavaran koekappaleita valmisteltaessa on koekappaleisiin jäänyt alkavaa tai alkavana pysähtynyttä lahovauriota, joita ei silmämäärin ole havaittu.

Uusien koekappaleiden osalta korjatut tulokset ovat lähellä toisiaan. Koe-erän UP 3 osalta korjatut puristuslujuustulokset ovat hieman alhaisempia kuin koe-erien UP 1-2. Lisäksi koe-erän UP 3 korjattujen puristuslujuustulosten vaihteluväli on suurempi kuin muilla koe-erillä. Kyseisen koe-erän vaihtelun suuruus johtuu varmasti saman koe-erän kosteuspitoisuuden suuresta hajonnasta (ks. taulukko 6.1). Koe-erän UP 3 alhaisempi korjattu puristuslujuustulos on kuitenkin pieni yllätys, sillä virheiden merkitys puristuslujuustulokseen pienenee suuremmilla kosteuspitoisuuksilla [7, s. A4/16]. Tämä vikojen

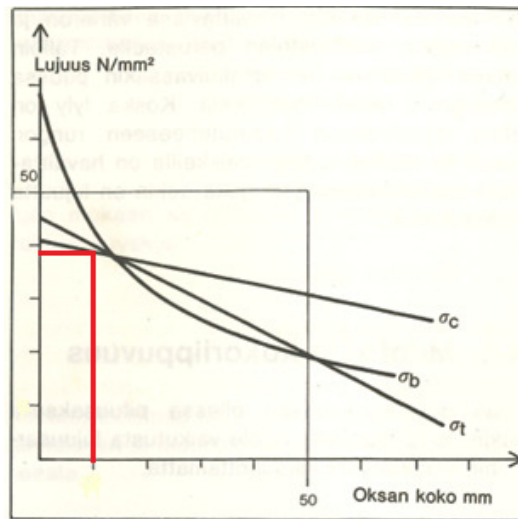
merkityksen pienentyminen kosteuspitoisuuden kasvaessa on nähtävissä vertailtaessa UP 1 ja UP 2 korjattujen puristuslujuustulosten eroa sekä koe-erän UP 3 murtotavoissa liitteessä E.

Vertailemalla kokeissa saatujen koe-erien UP1-3 ominaispuristuslujuuksia ja taulukon 6.5 arvoja huomataan saatujen ominaispuristuslujuuksien asettuvan lujuusluokituksessa melko korkealle. Kaikki uuden puutavaran koe-erät olisivat vähintään lujuusluokkaa C40. Verrattuna koe-erien ominaistiheyksillä saavutettuihin lujuusluokkiin ovat ominaispuristuslujuudet huomattavasti suurempia. Yksi selittävä tekijä tälle ilmiölle on, että kokeiden uuden puutavaran vikoja rajoitettiin, kun taas Standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokituksessa annetut arvot perustuvat tiheyttä lukuun ottamatta vikoja sisältävän puun arvoihin [23]. Tästä syystä uuden puutavaran koe-erien puristuslujuustuloksia ei kuitenkaan voida suoraan yhdistää taulukossa 6.5 esitettyjen lujuusluokittelustandardin SFS-EN 338 [14] tulosten kanssa, kuten luvussa 5.5 mainittiin. Taulukon 6.4 ominaispuristuslujuuksista ainoa taulukon 6.5 arvoihin yhdistettävä ominaispuristuslujuus on koe-erän VP. Ominaispuristuslujuuden mukaan kyseinen koe-erä asettuu lujuusluokittelustandardin SFS-EN 338 [14] mukaisesti koe-erään C20, kuten ominaistiheyden mukaisesti.

Taulukko 6.5. Standardin SFS-EN 338 mukaiset lujuusluokat havupuille puristuslujuuden perusteella. [14, s. 7]

Puristuslujuudet [N/mm ²]													
	Luokka	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50
Syiden suuntainen pur.lujuus	$f_{c.0.k}$	16	17	18	19	20	21	22	24	25	27	29	30
Syitä vastaan kohtisuora pur.lujuus	$f_{c.90.k}$	2	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,5	2,7	2,7	2,8	2,9	3

Tiheyteen verrattuna puristuslujuuden määrittäminen sisältää enemmän virhelähteitä ja nämä virhelähteet ovat hieman merkittävimpiä. Lähtökohtaisesti uuden puutavaran koe-erillä haluttiin tietää virheettömän puun puristuslujuus. Tämä kuitenkin osoittautui käytännössä mahdottomaksi, jolloin koekappaleilla sallittiin pienet oksat. Oksien vaikutusta tuloksiin voidaan arvioida karkealla tarkkuudella kuvan 2.13 avulla. Kaikki uuden puutavaran koekappaleilla sallitut oksat olivat <10 mm. Piirtämällä kyseiseen kuvaan puristuslujuus-suoran 10 mm:n kohdalle leikkaavan vaakasuoran viivan saadaan karkea arvio oksan aiheuttamasta virheen merkityksestä. Kuvaa 6.3 tarkasteltaessa voidaan koe-erien UP 1-3 jätettyjen oksien arvioida vaikuttavan tuloksiin 0-2 N/mm². Täytyy kuitenkin ottaa huomioon, että osassa koekappaleista ei merkittäviä puun vikoja tai oksia ollut sekä melko iso osa murtui virheettömästä poikkileikkauksesta.



Kuva 6.3. Kokeissa sallittujen pienten oksien merkittävyys puristuslujuustuloksissa. Muokattu lähteestä [17, s. 43]

Kosteuspitoisuuden virhelähteiden vaikutukset puristuslujuuteen ovat tiheyteen verrattuna suuremmat. Pelkästään kosteuspitoisuuden korjauskaavan kerrointa tarkastelemalla huomataan, että kosteuspitoisuudella on suurempi merkitys puristuslujuuteen kuin tiheyteen. Toisaalta kuitenkin kosteuspitoisuudesta aiheutuva virhe kumpaankin näihin ominaisuuksiin on hyvin pieni. Kuten kappaleessa 6.1 tuli ilmi olivat kosteuspitoisuuden virhelähteet uudella puutavaramalla olemattomat. Muita merkittäviä virhelähteitä puristuslujuustuloksiin ei ole. Koekappaleet valmistettiin hyvin tarkasti standardin SFS-EN 408 [23] mukaan ja esimerkiksi poikkileikkauksen mittauksissa oltiin hyvin tarkkoja, jolloin niistä aiheutuvat mahdolliset virheet ovat hyvin mitättömiä.

Kokeissa käytetyssä puristuslujuustunkissa koekappale puristettiin kahden jäykästi kiinnitetyn levyn väliin, mikä voi aiheuttaa tuloksiin virhettä, sillä jäykästi kiinnitetyt levyt voivat mahdollistaa jännitysten uudelleen jakaantumisen syiden nurjahtaessa toisin kuin nivelellisesti kiinnitetyt levyt. [7, s. B2/6] Virheen merkittävydestä ei kuitenkaan ole tietoa saatavilla. Puristuslujuuden koelaitteiston tyypin merkitystä tuloksiin ei tunnettu ennen kokeiden suoritusta.

6.4 Koekappaleiden Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys

Kuten aiemmin on tullut ilmi, Pilodyn-laitteelle kosteuspitoisuuden huomioivaa korjauskaavaa ei ole olemassa. Pilodyn-laitteen korjauskaavan muodostamisessa noudatettiin samoja toimintatapoja, kuin puristuslujuudella ja tiheydelläkin. Eli uuden puutavaran koe-erien Pilodyn-laitteen korjattujen tuloksien keskiarvot pyrittiin saamaan yhtä suuriksi. Koska laitteen tuloksilla oli tunnettu yhteys puun tiheyden kanssa, oletettiin niidenkin käyttäytyvän likimain lineaarisesti kosteuspitoisuuden ollessa alle kyllästyspisteen. Näin ollen korjauskaavaa muodostaessa huomioitiin kaikki uuden puutavaran

koe-erät UP 1-3. Koe-erien UP 1-3 korjatut Pilodyn-laitteen tunkeumasyydydet olivat lähimpänä toisiaan, kun se oli seuraavan kaavan mukainen

$$P_{\omega_{ref}} = P_{\omega_i} * (1 + 0,017(\omega_i - \omega_{ref})), \quad (6.2)$$

missä $P_{\omega_{ref}}$ on standardikosteuspitoisuuteen korjattu tunkeumasyydyys ja P_{ω_i} on alkuperäinen tunkeumasyydyys. Kuten aiemmilla ominaisuuksilla, vanhan puutavaran koe-erälle käytettiin samaa korjauskaavaa kuin uudella koe-erällä. Taulukkoon 6.6 on listattu kunkin koe-erän alkuperäisten ja korjattujen tunkeumasyydyksien keskiarvot ja vaihteluvälit. Yksittäisten koekappaleiden alkuperäiset ja korjatut Pilodyn-laitteen tunkeumasyydydet on esitetty koe-erittäin liitteessä C.

Taulukko 6.6 Koe-erien alkuperäisten ja korjattujen tunkeumasyydyksien keskiarvot sekä vaihteluväli.

Koe-erä	Kosteuspitoisuus kokeissa	Alkuperäisen tunkeumasyydyden KA	Korjatun tunkeumasyydyden KA	Korjatun tunkeumasyydyden vaihteluväli
VP	8,8 %	16,5 mm	17,4 mm	13,6-18,8 mm
UP1	11,1 %	14,3 mm	14,5 mm	11,1-18,7 mm
UP2	14,8 %	15,2 mm	14,5 mm	11,3 -19,1 mm
UP3	19,3 %	16,9 mm	14,8 mm	11,7-18,9 mm

Taulukon 6.6 tuloksista on nähtävissä koe-erien UP1-3 samankaltaisuus, kun katsotaan korjatun tunkeumasyydyden keskiarvoa tai vaihteluväliä. Tästä on pääteltävissä, että Pilodyn-laitteen tunkeumasyydyys käyttäytyy likimain lineaarisesti kosteuspitoisuuksilla 8-20 %. Vaikka tuloksissa uuden puutavaran kokeita ei suoritettu alle 11 %:n kosteuspitoisuuksilla, voidaan lineaarinen alue luotettavasti ulottaa 8 %. Tämä on perusteltua, sillä lähtökohtaisesti puun tiheys, kimmoisuus ja kaikki lujuusominaisuudet käyttäytyvät lineaarisesti 8 %:n kosteuspitoisuuteen asti [15, s. 9].

Vanhan puutavaran koe-erän tunkeumasyydyden korjattu keskiarvo oli huomattavasti suurempi muihin koe-eriin verrattuna. Verrattuna uuden puutavaran koe-eriin vanhan puutavaran koe-erän Pilodyn-laitteen tulokset käyttäytyvät likimain samalla tavalla kuin puristuslujuudenkin tulokset. Tulokset ovat huonompia eli Pilodyn-laitteen tunkeumasyydyys on suurempi ja puristuslujuus pienempi. Näiden ominaisuuksien huommat tulokset ovat pienoinen yllätys, sillä kaikkien koe-erien korjattujen tiheyksien keskiarvot (ks. taulukko 6.2) olivat kuitenkin likimain samaa suuruusluokkaa. Vaikuttaisi siltä, että kuormitetun puurakenteen ikääntyessä sen tunkeumasyydyys kasvaa samoin, kun puristuslujuus pienenee. Taas tiheys pysyy näihin ominaisuuksiin verrattuna

likimain samana. Tosin vanhan puutavaran koe-erän pienempiin puristuslujuustuloksiin ovat osaltaan varmasti vaikuttaneet myös näiden oksaisuuden ja virheiden rajoittamattomuus. Lisäksi tässä yhteydessä tulee muistaa, että vanhan puutavaran koe-erä on otokseltaan huomattavasti pienempi kuin muut koe-erät. Eikä suoria johtopäätöksiä voida näin ollen tehdä.

Ensimmäisenä suoritettussa koe-erässä UP2 mittauksia tehtiin ensin vähemmän kattavammin, kuin mitä luvussa 5.7 on mainittu. Kyseisessä koe-erässä Pilodyn-laitteen mittauksia suoritettiin ensin 2-3 kpl/sivu ja mittaustulos hylättiin jo, mikäli se erosi yli 3 mm muista tuloksista. Mittaustapaa päädyttiin muuttamaan kesken koe-erän UP2 luvussa 5.7 mainittuun tapaan. Näin toimittiin, sillä Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja eri ominaisuuksien korrelaatioiden huomattiin suurenevan, mitä kattavammin mittauksia tehtiin. Tällainen kattavampi mittaustapa vähentää huomattavasti laitteen mittausteknisiä virhelähteitä. Mikäli tutkittavaan kohtaan suoritetaan vain muutama mittaus tai eroavia tuloksia poistetaan keskiarvon laskennasta liian herkästi, kasvaa mittausteknisten virheiden merkitys. Kun mittauksia on useampia, ei keskiarvon laskennassa yhden tuloksen 1 mm:n virhe ole enää merkittävä. Lisäksi kattavammalla mittaustavalla saadaan paremmin tietoa koko puurakenteen poikkileikkauksesta.

Kosteuspitoisuuden vaikutus virhelähteenä Pilodyn-laitteen tuloksiin on merkittävyydeltään arviolta puristuslujuuden ja tiheyden välistä. Tämä huomataan jo pelkästään kosteuspitoisuuden korjauskaavan kerrointa tarkkailemalla. Toisaalta, kuten edellä on mainittu, kosteuspitoisuudesta aiheutuva virhe on kaikkiin kokeissa mitattuihin ominaisuuksiin hyvin pieni. Muut Pilodyn-laitteen tuloksiin vaikuttavat virhelähteet ovat lähinnä mittausteknisiä. Esimerkiksi tulos saatetaan lukea laitteen mitta-asteikolta väärin.

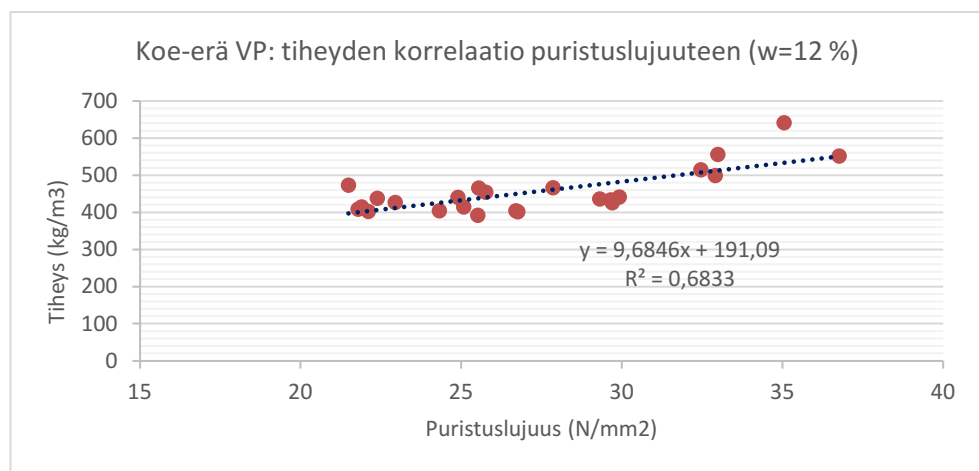
6.5 Koetulosten korrelaatiot

Kuten aiemmin on tullut ilmi, on työn yhtenä päätavoitteena ollut tutkia riippuvuussuhteita eri puun ominaisuuksien ja Pilodyn-laitteen välillä. Riippuvuussuhteita tutkittiin Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puun tiheyden sekä puristuslujuuden välillä.

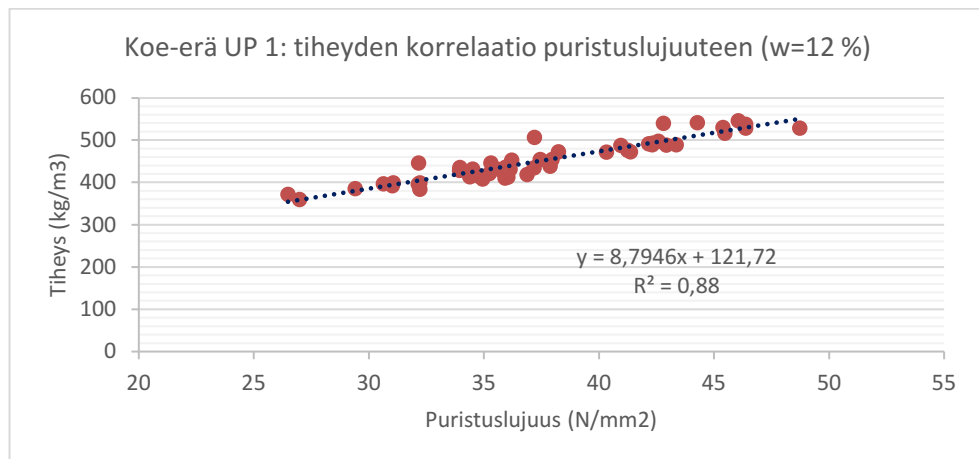
Korrelaatiota tarkasteltiin asettamalla koekappaleiden tulokset x-y-kuvaajaan. Tulospisteiden avulla kuvaajaan sovitetaan lineaarinen regressiosuora, jonka avulla tuloksia voidaan ennustaa. Kuvaajassa tunnus R^2 kuvaa korrelaation tai riippuvuussuhteen voimakkuutta (ks. taulukko 4.2). Lisäksi kuvaajaan on merkattu suoran yhtälö, jonka avulla puun ominaisuuksia voidaan ennustaa, kun toinen kuvaajan ominaisuuksista tunnetaan. Alla olevissa kappaleissa on esitettyinä standardikosteuspitoisuuteen ($\omega = 12\%$) korjattujen tuloksien kuvaajat. Alkuperäisten koe-erien kosteuspitoisuuksien mukaiset kuvaajat ovat nähtävissä liitteessä F-H.

6.5.1 Puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio

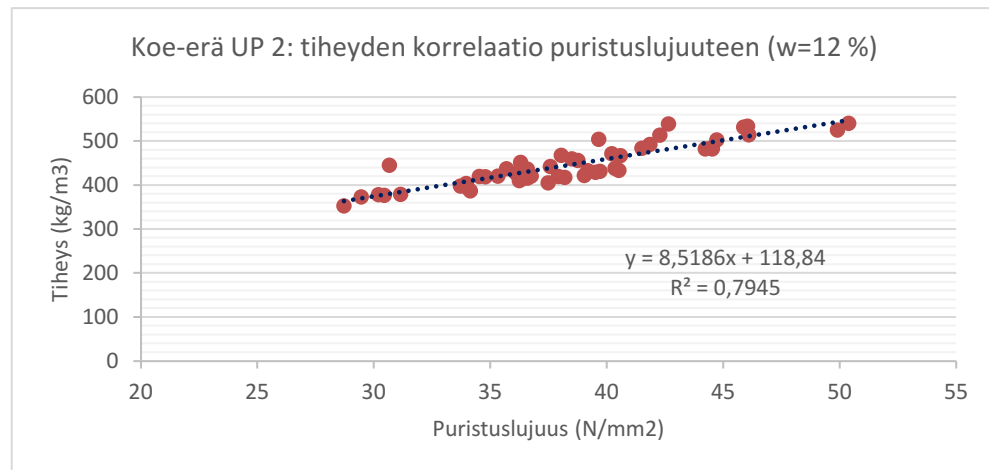
Virheettömän puun puristuslujuudella ja tiheydellä tiedettiin jo ennen tutkimuksia olevan vahva korrelaatio. Näiden puun ominaisuuksien riippuvuussuhteita tutkittiin, jotta Pilodyn-laitteen tuloksien ja puun ominaisuuksien korrelaation vahvuutta voitaisiin verrata tällaiseen yleisesti tunnettuun vahvaan korrelaatioon. Puristuslujuuden ja tiheyden kuvaajat on esitetty kuvissa 6.4-6.7. Kuvaajissa tiheys on y-akselilla ja puristuslujuus x-akselilla. Koe-erässä UP3 kosteuspitoisuuden korjauskaavassa on käytetty kokeiden mukaista kosteuspitoisuutta 19,3 %. Tämä sen takia, että tämän huomattiin asettuvan lähemmäksi puristuslujuuden lineaarisen kosteusalueen tuloksia.



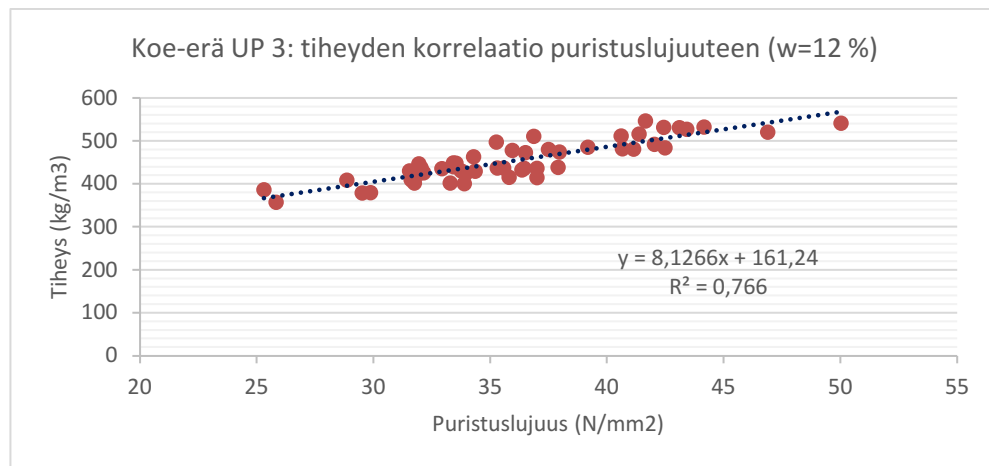
Kuva 6.4. Vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatun puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio.



Kuva 6.5. Uuden puutavaran koe-erän UP 1 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio.

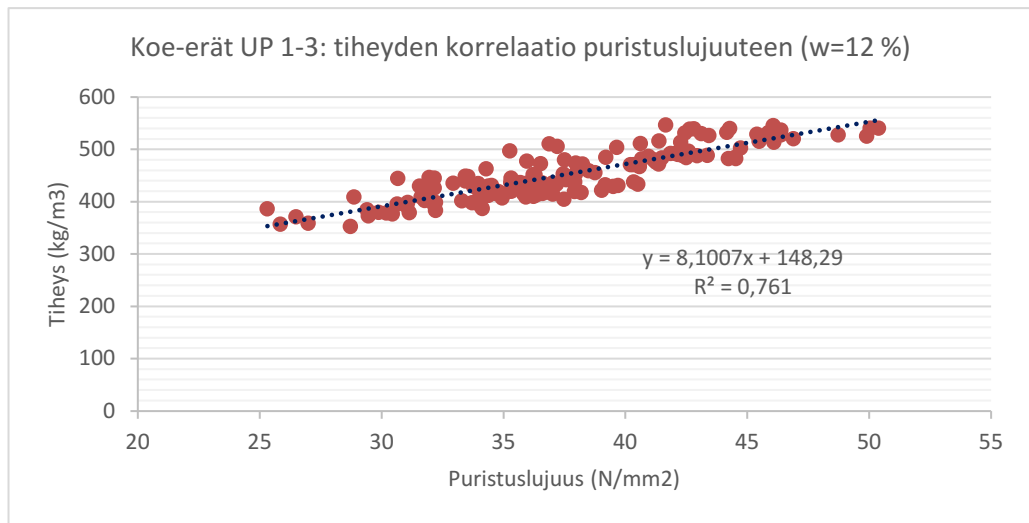


Kuva 6.6. Uuden puutavaran koe-erän UP 2 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio.

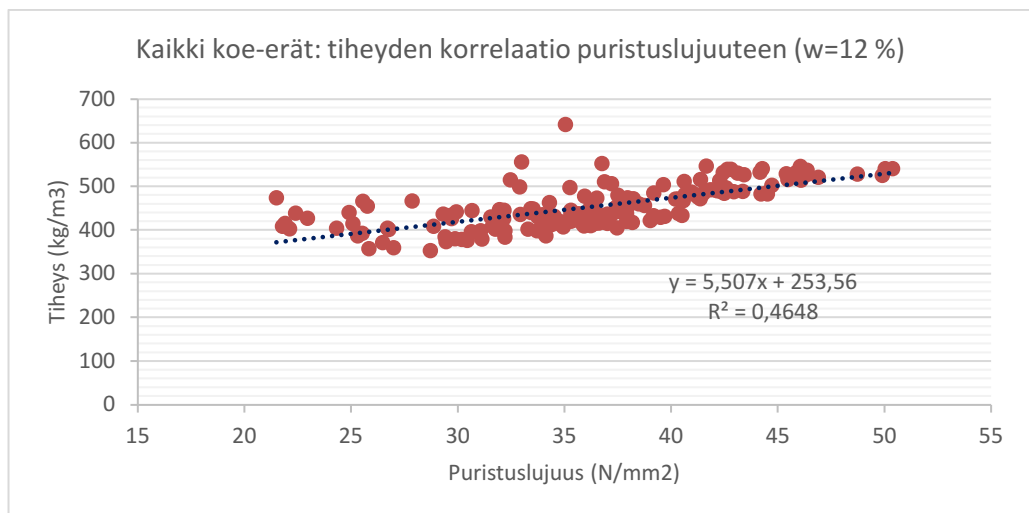


Kuva 6.7. Uuden puutavaran koe-erän UP 3 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio.

Kuvien kuvaajien korrelaatiokertoimista nähdään, että riippuvuussuhde näiden kahden ominaisuuden välillä vaihtelee voimakkaasta huomattavaan. Myös koe-erällä VP riippuvuussuhde on huomattava, vaikka kyseisessä koe-erässä ei oksien tai muiden puun vikojen olemassaoloa rajoitettu. Nämä tulokset vahvistavat entuudestaan tunnetun puun tiheyden ja eri lujuusominaisuuksien vahvan riippuvuuden toisistaan. Koe-erän VP hieman pienempi korrelaatiokerroin on todennäköisimmin seurausta edellä mainitusta oksien ja muiden vikojen rajoittamattomuudesta. Kuvien 6.8 ja 6.9 kuvaajissa on yhdistetty kosteuskorjattujen koe-erien tuloksia samaan kuvaajaan. Toisessa kuvaajassa ovat kaikki uuden puutavaran koe-erien tulokset ja toisessa kaikkien koe-erien tulokset.



Kuva 6.8. Uuden puutavaran koe-erien UP 1-3 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio.



Kuva 6.9. Kaikkien koe-erien kosteuskorjatun puristuslujuuden ja tiheyden korrelaatio.

Kuvan 6.8 kuvaajan korrelaatiokertoimesta nähdään, että uudella puutavaralla yhdistetyillä tuloksilla riippuvuussuhde näiden kahden ominaisuuden välillä on huomattava. Lisäksi vertaamalla kuvien 6.5-6.7 kuvaajia kuvan 6.8 kuvaajaan huomataan uuden puutavaran koe-erien samankaltaisuus. Tämä nähdään siitä, että yhdistetyillä koe-erien tuloksilla riippuvuussuhde on samaa luokkaa kuin yksittäisillä uuden puutavaran koe-erillä.

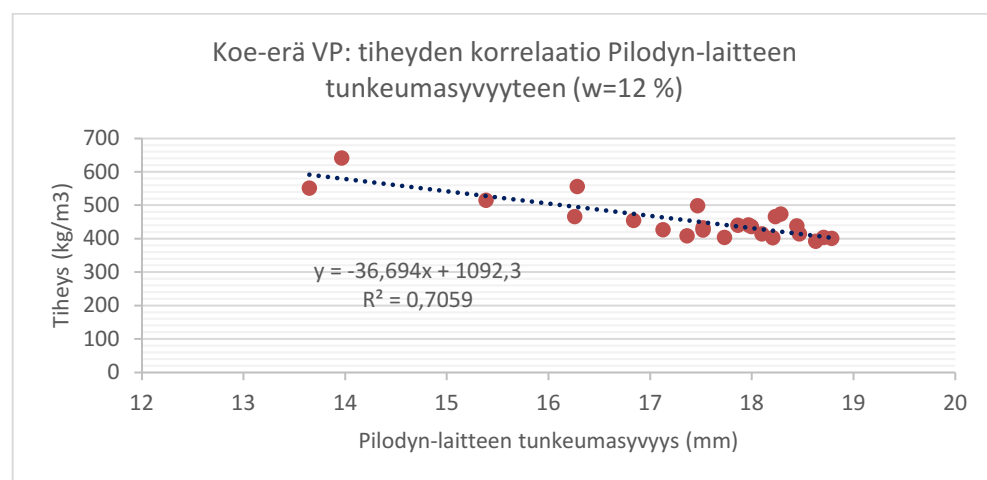
Kuvan 6.9 kuvaajasta puolestaan huomataan, että vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatut tulokset eroavat uuden puutavaran koe-eristä UP1-3. Tämä on nähtävissä kuvan 6.9 kuvaajan heikommasta korrelaatiokertoimesta, jonka mukaan riippuvuussuhde on kohtalainen. Tämä voi johtua puun ikääntymisen seurauksena tapahtuvasta lujuusominaisuuksien alenemisesta tiheyteen verrattuna tai vanhan puutavaran erilaisu-

desta uuteen puutavaraan verrattuna. Vanhan puutavaran oksaisuuden rajoittamattomuus ei yksistään tätä ilmiötä selitä, sillä Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys oli tiheyteen verrattuna suurempi kuin uudella puutavaralla. Toisaalta myös Pilodyn-laitteen ammunnat tehtiin virheettömään puuhun. Yksi syy voi olla siinä, että koe-erän VP puutavara on alkuperäisiltä ominaisuuksiltaan hyvin erilainen uuden puutavaran koe-eriin verrattuna.

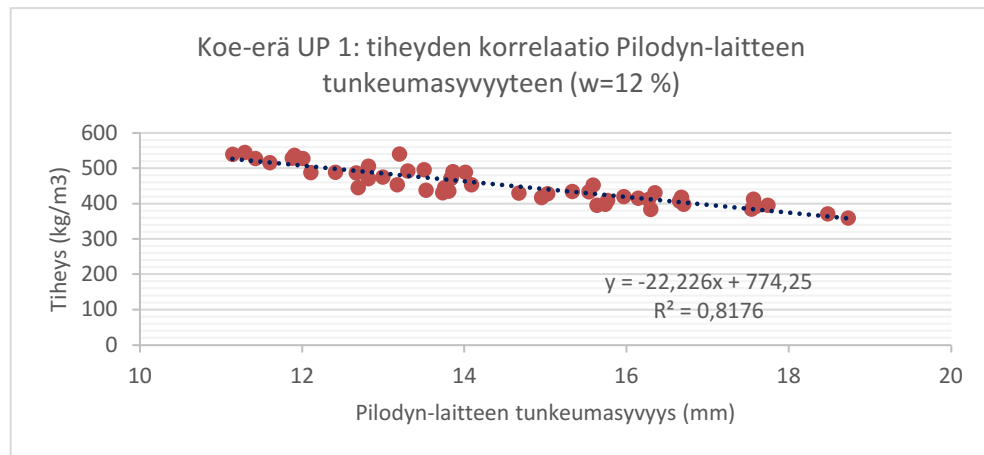
Kuten luvussa 2.3.3 tuli ilmi, ei puun ikääntymisen vaikutuksia tunneta täysin eikä näitä voida tarkkaan arvioida ilman puutavaran historian tarkkaa tuntemista. Lisäksi nyt koeksissa ollut vanhan puutavaran koe-erä VP oli otokseltaan melko pieni, jolloin sen tulokset eivät ole yhtä luotettavia uuden puutavaran koe-erien kanssa. Tästä syystä vanhan puutavaran käyttäytymisen arvioimiseksi tarvitaan lisätutkimuksia.

6.5.2 Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden ja tiheyden korrelaatio

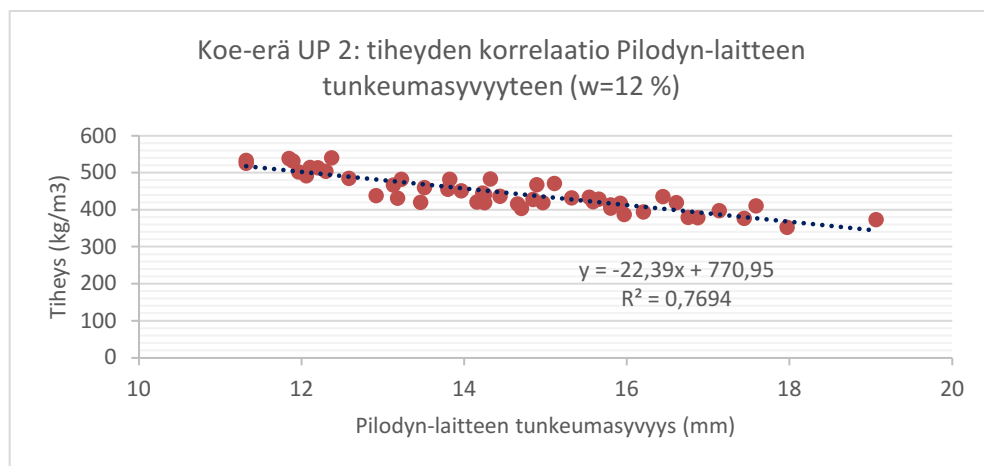
Virheettömän puun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden välisen korrelaation tarkastelulla on koko työn kannalta olennainen merkitys. Tavoiteltu Pilodyn-laitteen mukainen puun lujuustaulukointi pyritään muodostamaan juuri tiheyden kautta. Lisäksi vaikka Pilodyn-laitteella on tunnettu yhteys useiden puulajien tiheyksien kanssa, ei Pilodyn-laite antanut suoraan puun tiheystuloksia. Tiheyden määrittämiseksi Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyydelle ja tiheydelle tulee määrittää kokeellisesti puulajista ja kosteudesta riippuva riippuvuusuhde [36, s. 1]. Tiheyden ja tunkeumasyyvyyden kuvaajat on esitetty kuvissa 6.10-6.13. Kuvaajissa koekappaleiden tiheys on y-akselilla ja tunkeumasyyvyys x-akselilla. Kuvaajissa Pilodyn-laitteen tulokset asetetaan koekappaleen mitattujen tunkeumasyyvyksien keskiarvon mukaan (ks. liite C).



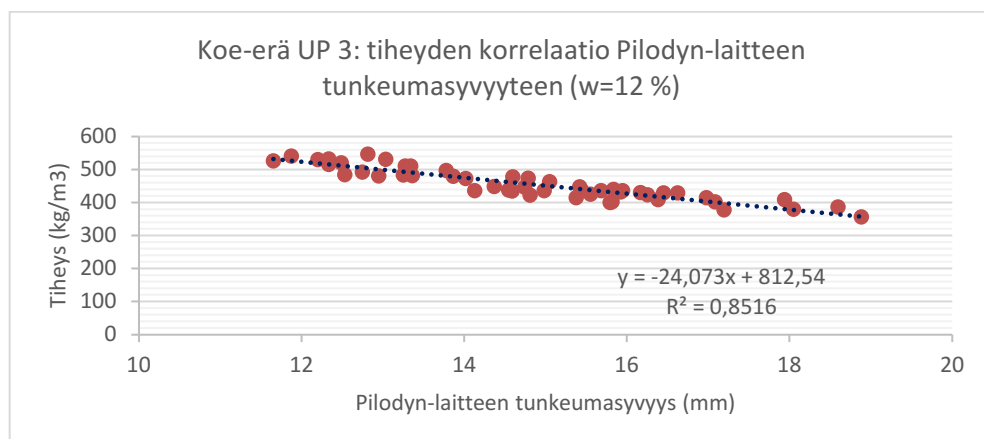
Kuva 6.10. Vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden korrelaatio.



Kuva 6.11. Uuden puutavaran koe-erän UP 1 kosteuskorjatun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.



Kuva 6.12. Uuden puutavaran koe-erän UP 2 kosteuskorjatun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.

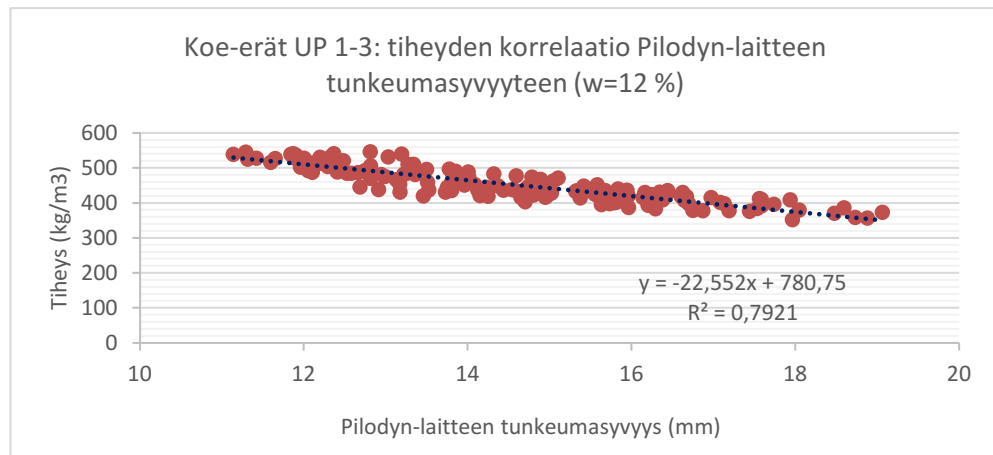


Kuva 6.13. Uuden puutavaran koe-erän UP 3 kosteuskorjatun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.

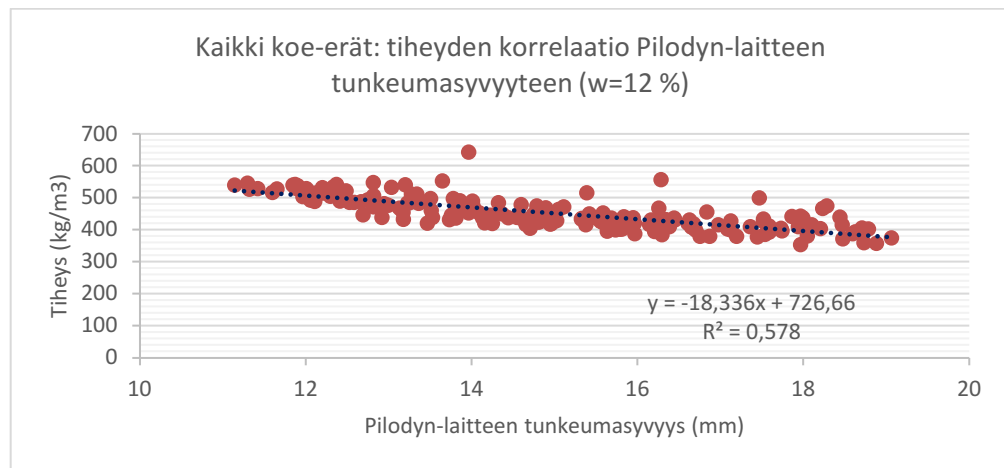
Kuvien kuvaajien korrelaatiokertoimista nähdään, että riippuvuussuhde näiden kahden ominaisuuden välillä vaihtelee voimakkaasta huomattavaan kaikilla koe-erillä. Keskimäärin riippuvuussuhde on jopa voimakkaampi, kuin tiheydellä ja syiden suuntaisella puristuslujuudella. Nämä tulokset kertovat puun tiheyden ja Pilodyn-tuloksen tunkeumasyvyyden vahvasta riippuvuussuhteesta. Koe-erän UP2 hieman pienempi korrelaatiokerroin muihin uuden puutavaran koe-eriin verrattuna voi johtua koe-erän alussa käytetystä Pilodyn-laitteen mittaustavasta (ks. luku 6.4). Kyseisen koe-erän ensimmäisissä koekappaleissa Pilodyn-laitetta ammuttiin koekappaleeseen suppeammin kuin muissa koe-erissä. Pilodyn-laitteen ammuntaa muutettiin kattavammaksi koe-erän sisällä, sillä tämän huomattiin parantavan ominaisuuksien välistä korrelaatiota.

Vanhan puutavaran koe-erän VP korrelaatiokerroin on hieman heikompi uuden puutavaran koe-eriin verrattuna. Tämä johtuu todennäköisesti pääosin koe-erän VP pienemmästä otosmäärästä. Kuten aiemmin on tullut ilmi, saavutetaan sitä korkeampi riippuvuussuhde Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydelle ja puun tiheydelle mitä suurempi otantamäärä on [41, katso 19, s. 20]. Toinen koe-erän VP korrelaatiota heikentävä tekijä on koekappaleiden poikkileikkauksen suuruus. Vanhan puutavaran testauksissa Pilodyn-laitteen tunkeumasvyys oli suurimmillaan 20,3 mm. Tästä syystä vanhan puutavaran testauksissa poikkileikkauksen sisäosista ei saatu Pilodyn-laitteella kattavasti tietoa, vaikka neulaa ammuttiin puuhun joka sivulta. Lisäksi, kuten aiemmin on tullut ilmi, puun säteen suunnassa poikkileikkauksen tiheys ei ole vakio. Puun tiheys kasvaa säteen suunnassa, kun tullaan ulommas ytimestä. [8, s.25] Tiheyden määrittämistä varten koekappaleesta otettu viipalenäyte käsitti koko koekappaleen poikkileikkauksen. Näin ollen on mahdollista, että osan koekappaleiden Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puun tiheyden välillä on hieman ristiriitaisuutta. Vanhan puutavaran koe-erän oksaisuuden rajoittamattomuus ei ole tähän tulokseen vaikuttanut, sillä tiheyden tai tunkeumasyvyyden oksaisuus ei vaikuta.

Kuvien 6.14 ja 6.15 kuvaajissa on yhdistetty kosteuskorjattujen koe-erien tuloksia samaan kuvaajaan. Toisessa kuvaajassa ovat kaikki uuden puutavaran koe-erien tulokset ja toisessa kaikkien koe-erien tulokset.



Kuva 6.14. Uuden puutavaran koe-erien UP 1-3 kosteuskorjatun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.



Kuva 6.15. Kaikkien koe-erien kosteuskorjatun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.

Kuvan 6.14 kuvaajan korrelaatiokertoimesta nähdään, että uudella puutavaramalla yhdistetyillä tuloksilla riippuvuussuhde näiden kahden ominaisuuden välillä on lähes voimakas. Korrelaatiokerroin 0,79 on samaa suurusluokkaa näiden kahden ominaisuuden välillä, kuin luvussa 4.3.2 mainituissa Pilodyn-laitteen aiemmissa tutkimuksissa. Verrattaessa kuvien 6.8 ja 6.14 kuvaajia sekä korrelaatiokertoimia huomataan tässäkin Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä ja puun tiheydellä vahvempi riippuvuussuhde kuin puun tiheydellä ja puun puristuslujuudella.

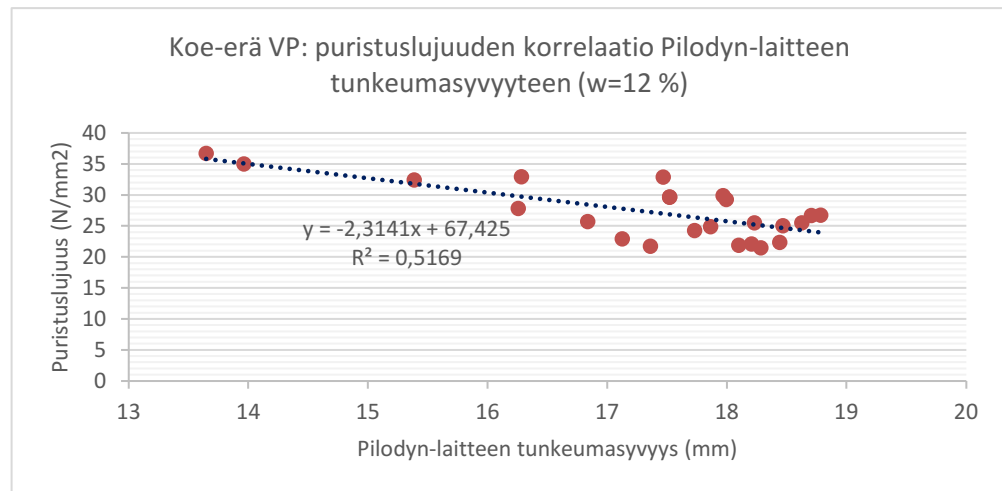
Taas kuvan 6.15 kuvaajasta huomataan, että vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatut tulokset eroavat uuden puutavaran koe-eristä UP1-3. Tämä on nähtävissä kuvan 6.15 kuvaajan pienemmästä korrelaatiokertoimesta, jonka mukaan riippuvuussuhde on kohtalainen. Syyt tähän ilmiöön ovat todennäköisimmin hyvin samankaltaiset kuin kuvan 6.9 kuvaajassa. Verrattaessa kuvien 6.9 ja 6.15 kuvaajia huomataan kuitenkin, että tässä tilanteessa korrelaatio on hieman korkeampi. Tämä voi johtua siitä, että Pilodyn-

laitteen ja tiheyden välisessä riippuvuussuhteessa oksaisuudella ei ole merkitystä, jolloin yksi koe-eriä erottava tekijä jää pois.

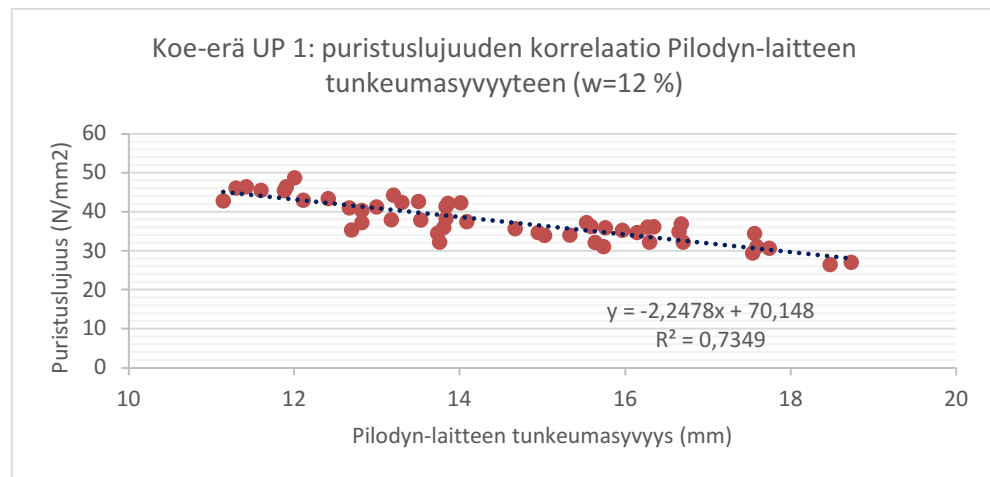
Tässä tutkimuksessa saavutetut puun tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatiot ovat laitteen vanhojen tutkimuksien kanssa hyvin samansuuntaisia. Esimerkiksi Feio sai tutkimuksissaan [35] kastanjan tiheydelle ja tunkeumasyvyydelle korrelaatioita väliltä 0,75-0,81 ja Henriques et. al. sai tutkimuksissaan [39] 0,80 korrelaation portugalilaisen männyn tiheydelle ja tunkeumasyvyydelle [35, s. 60-85][39, s. 5]. Vaikka ominaisuuksien korrelaatioita on tutkimuksissa tutkittu eri puulajeilla, samankaltaiset tulokset vahvistavat havaittua puun tiheyden ja tunkeumasyvyyden välistä yhteyttä. Ainoa selkeä eroavaisuus tämän ja aiempien tutkimuksien tiheyden ja tunkeumasyvyyden korrelaatioiden välillä koski vanhaa puutavaraa. Esimerkiksi Feio sai tutkimuksissaan [35] vanhan sekä uuden puutavaran tiheydelle ja tunkeumasyvyydelle hyvin samankaltaiset tulokset ja korrelaatiot (ks. kuva 4.6) [35, s. 60]. Puolestaan tässä tutkimuksessa vanhan ja uuden puutavaran tulokset erosivat toisistaan melko paljon. Tässä tulee kuitenkin huomioda se, että tässä tutkimuksessa käytetty vanhan puutavaran koe-erä oli otannaltaan huomattavasti pienempi kuin tämän tutkimuksen uuden puutavaran koe-erä tai Feion käyttämät koe-erät [35, s.70].

6.5.3 Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puristuslujuuden korrelaatio

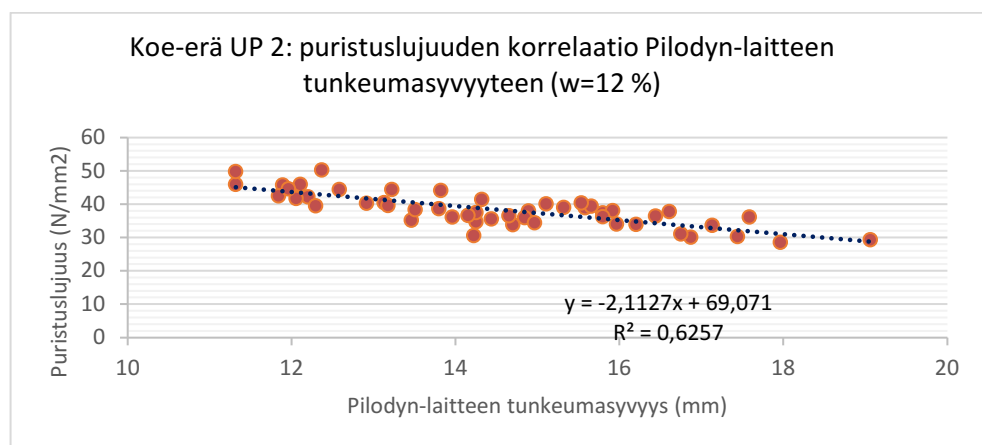
Syiden suuntaisen puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden välisen korrelaation tarkastelulla voidaan arvioida tunkeumasyvyyden riippuvuutta myös puhtaisiin puun lujuusominaisuuksiin eikä vain tiheyteen. Laitteen tunkeumasyvyyden yhteyttä lujuusominaisuuksiin olisi standardin SFS-EN 338 [14] kannalta luontevinta tutkia taivutuslujuuden kautta, mutta luvussa 5.5 mainituista koeteknisistä syistä päädyttiin tutkimaan asiaa syiden suuntaisen puristuslujuuden kautta. Käytännössä kuitenkin lokaalisti tarkasteltuna taivutuslujuus koostuu taivutetun pinnan vetolujuudesta ja vastakkaisen pinnan puristuslujuudesta [8, s. 34-35]. Standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokituksessa annetut arvot perustuvat tiheyttä lukuun ottamatta vikoja sisältävän puun arvoihin [23]. Tästä syystä uuden puutavaran koe-erien puristuslujuustuloksia ei voida suoraan yhdistää standardin SFS-EN 338 [14] taulukossa 6.5 esitettyihin arvoihin, sillä kyseisten koe-erien koekappaleiden oksaisuutta rajoitettiin. Tästä huolimatta vertailtaessa nyt saatuja puristuslujuuden arvoja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen saadaan arvokasta tietoa tunkeumasyvyyden yhteydestä virheettömän puun lujuusominaisuuksiin. Lisäksi kokeissa saatujen puristuslujuusarvojen vertailu taulukon 6.5 ei ole tarkoituksenmukaista, sillä Pilodyn-laitteella tehtävä standardin SFS-EN 338 [14] mukainen lujuustaulukointi tehdään tiheyden kautta. Puristuslujuuden ja tunkeumasyvyyden kuvaajat on esitetty kuvissa 6.16-6.19. Kuvaajissa puristuslujuus on y-akselilla ja tunkeumasyvyyden x-akselilla.



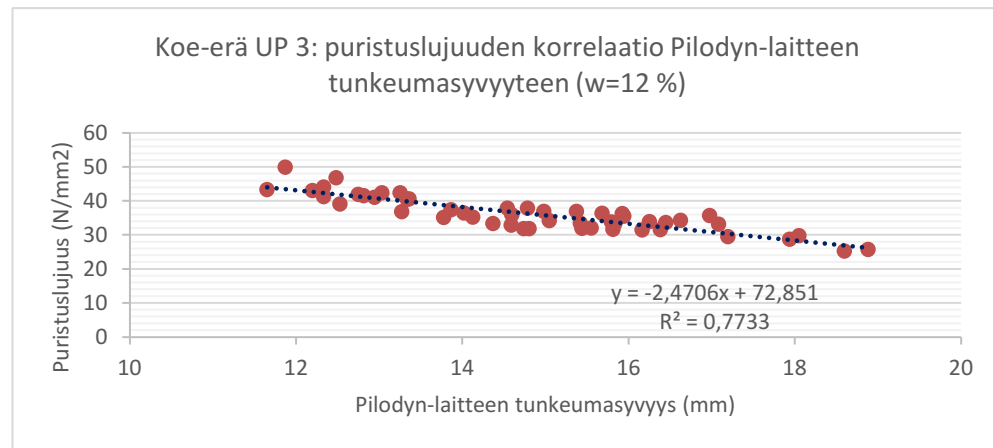
Kuva 6.16. Vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatun puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.



Kuva 6.17. Uuden puutavaran koe-erän UP 1 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.



Kuva 6.18. Uuden puutavaran koe-erän UP 2 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.

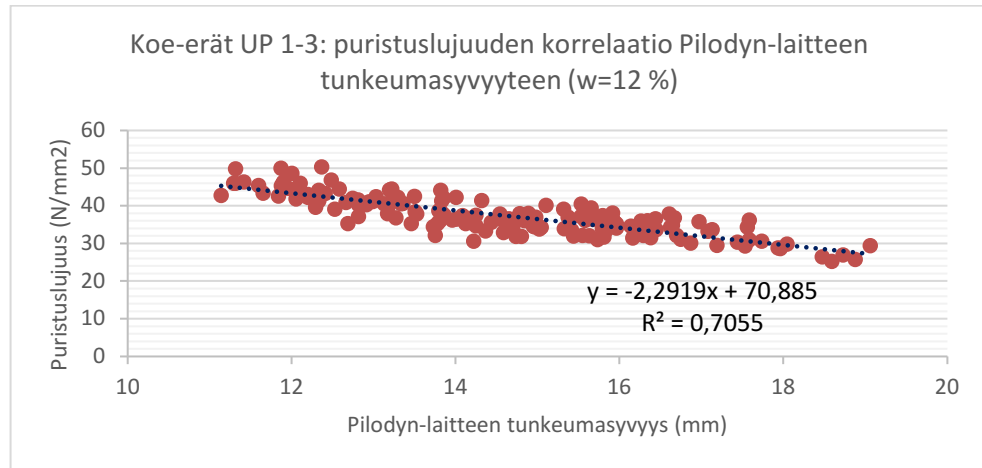


Kuva 6.19. Uuden puutavaran koe-erän UP 3 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.

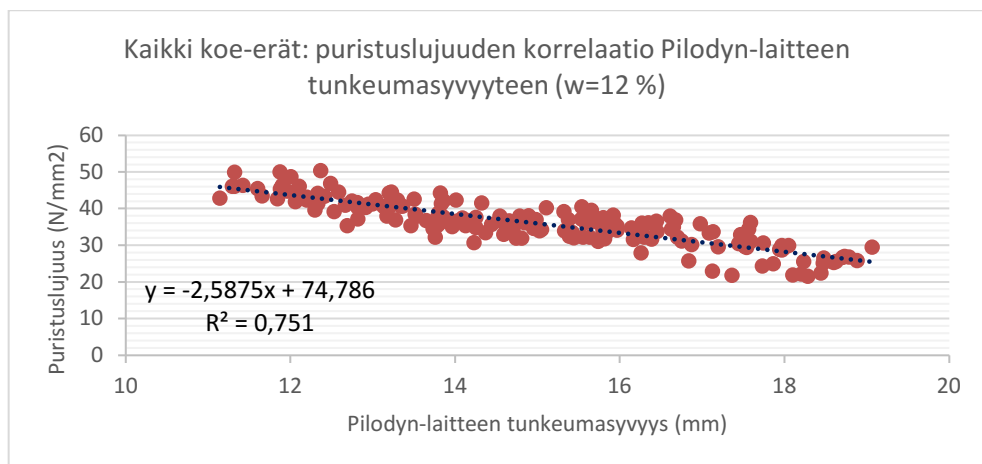
Kuvien kuvaajien korrelaatiokertoimista nähdään, että riippuvuussuhde näiden kahden ominaisuuden välillä on kaikilla uuden puutavaran koe-erillä huomattava. Keskimäärin riippuvuussuhde näillä ominaisuuksilla jää hieman alhaisemmaksi aiempien lukujen riippuvuussuhteisiin verrattuna. Ero ei kuitenkaan ole merkittävä. Eroa tiheyden ja tunkeumasyvyyden välisiin riippuvuuksiin on voinut syntyä siitä, että nyt puristuksen murto tapahtui lähes aina oksan kohdalta, vaikka uuden puutavaran koe-erillä oksaisuutta rajoitettiin. Eli kyseessä ei ole täysin virheettömän puun puristuslujuus ja taas Pilodyn-laitte ammuttiin aina virheettömään puuhun. Oksaisuuden vaikutukset selittäisivät myös koe-erien VP vielä suuremman korrelaatioiden eron näiden ominaisuusparien välillä. Puristuslujuuden ja tunkeumasyvyyden väliset korrelaatiot ovat myös pienempiä tiheyden ja puristuslujuuden välisiin korrelaatioihin verrattuna. Tämä johtuu todennäköisesti tiheyden ja puristuslujuuden vahvemmassa yhteydestä, sillä koekappaleiden oksaisuuden vaikutukset pätevät myös tiheyden ja puristuslujuuden riippuvuussuhteisiin.

Vertailemalla vanhan koe-erän kuvan 6.16 kuvaajaa uuden puutavaran koe-erien kuvien 6.17-6.19 kuvaajiin huomataan ensin mainitun korrelaation olevan selkeästi heikompi. Tämä on hyvin linjassa kahden ensimmäisen ominaisuusparin kanssa, joissa korrelaatiot olivat pienempiä uuden puutavaran koe-eriin verrattuna. Selkeimmät syyt koe-erän VP heikommalle korrelaatiolle ovat todennäköisimmin oksien rajoittamattomuus ja otantamäärän pienuus. Koe-erän UP2 pienempi korrelaatiokerroin johtuu todennäköisesti koe-erän alussa käytetystä Pilodyn-laitteen mittaustavasta (ks. luku 6.4) samoin kuin edellisessä luvussa. Kyseisen koe-erän ensimmäisissä koekappaleissa Pilodyn-laitetta ammuttiin koekappaleeseen suppeammin kuin muissa koe-erissä. Pilodyn-laitteen ammuntaa muutettiin kattavammaksi koe-erän sisällä, sillä tämän huomattiin parantavan ominaisuuksien välistä korrelaatiota. Tästäkin huolimatta koe-erän UP2 puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden välinen korrelaatio on huomattava.

Kuvien 6.20 ja 6.21 kuvaajissa on yhdistetty kosteuskorjattujen koe-erien tuloksia samaan kuvaajaan. Toisessa kuvaajassa ovat kaikki uuden puutavaran koe-erien tulokset ja toisessa kaikkien koe-erien tulokset.



Kuva 6.20. Uuden puutavaran koe-erien UP 1-3 kosteuskorjatun puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.



Kuva 6.21. Kaikkien koe-erien kosteuskorjatun puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden korrelaatio.

Kuvan 6.20 kuvaajan korrelaatiokerroimesta nähdään, että uudella puutavaralla yhdistetyillä tuloksilla riippuvuussuhde näiden kahden ominaisuuden välillä on huomattava. Korrelaatiokerroin 0,71 ei juurikaan jää kuvan 6.8 kuvaajan tiheyden ja puristuslujuuden tunnetusta vahvasta yhteydestä. Näin ollen on perusteltua sanoa, että Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä ja virheettömän puun lujuusominaisuuksilla on selkeä yhteys. Lisäksi nyt koe-erät UP1-3 sisälsivät oksia, vaikka niiden kokoa ja määrää rajoitettiin. On siis todennäköistä, että korrelaatio olisi vieläkin parempi, mikäli puu olisi täysin virheetöntä.

Kuvan 6.21 kuvaajasta huomataan, että vanhan puutavaran koe-erän VP kosteuskorjatut tulokset eivät juurikaan eroa uuden puutavaran koe-eristä UP1-3, vaan tulokset asettuvat lineaarisesti. Vielä jopa parantaen kuvan 6.20 kuvaajan korrelaatiota. Näin ollen vaikuttaisi, että vanhan puutavaran Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys ja puristuslujuus käyttäytyvät hyvin samankaltaisesti uuden puutavaran koe-erien kanssa. Tämä saattaa vahvistaa luvussa 6.4 tehtyä havaintoa, että kuormitetun puurakenteen ikääntyessä sen tunkeumasyyvyys kasvaa samoin, kun puristuslujuus pienenee ja taas puun tiheys pysyy likimain muuttumattomana. Johtopäätöksiä tehdessä tulee kuitenkin ottaa huomioon, ettei vanhan käytetyn puutavaran lujuusominaisuuksien sekä Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden käyttäytymisestä ei vielä tiedetä tarpeeksi ja lisätutkimuksia tarvitaan.

Tässä tutkimuksessa saavutetut puristuslujuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden korrelaatiot olivat Pilodyn-laitteen vanhoihin tutkimuksiin verrattuna korkeampia. Esimerkiksi Feio sai tutkimuksissaan [35] kastanjan puristuslujuudelle ja tunkeumasyyvyydelle alle 0,40 korrelaatioita [35, s. 60]. Henriques et. al. puolestaan sai tutkimuksissaan [39] 0,61 korrelaation portugalilaisen männyn puristuslujuudelle ja tunkeumasyyvydelle, mikä on melko lähellä tämän tutkimuksen tuloksia [39, s. 6]. Feion ja tämän tutkimuksen tuloksia verrattaessa tulee kuitenkin huomioida, että myös puristuslujuudelle ja tiheydelle saatiin Feion tutkimuksissa [35] selvästi huonommat korrelaatiot kuin tässä tutkimuksessa [35, s. 82]. Puolestaan Henriquesin et. al. tutkimuksissa [39] saatiin tämän tutkimuksen kanssa samansuuntainen korrelaatio myös puristuslujuuden ja tiheyden välille [39, s. 4].

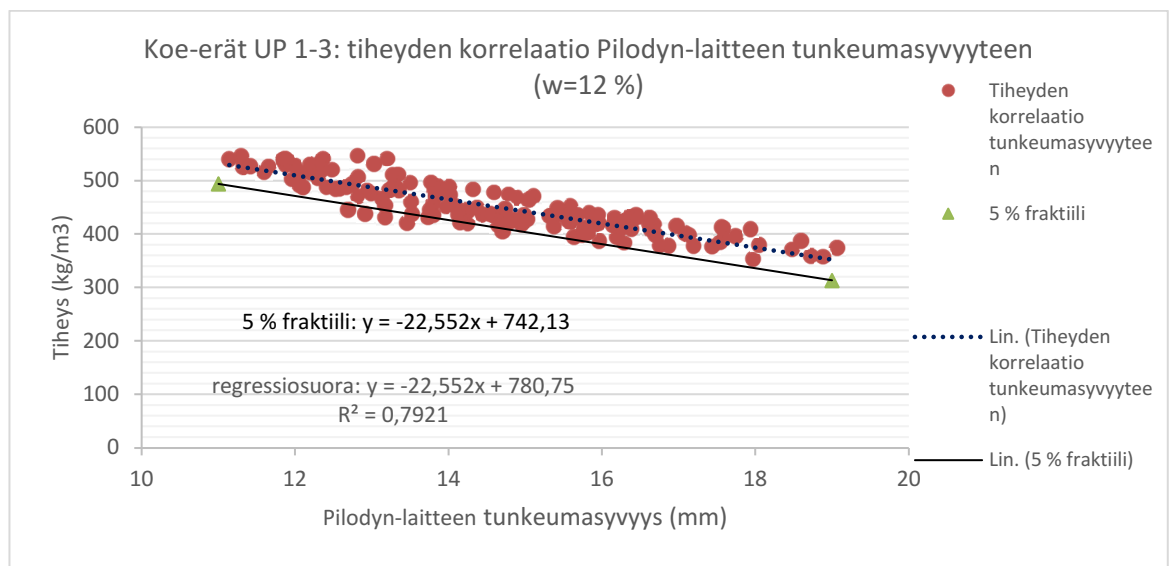
6.6 Lujuustaulukointi koetulosten perusteella

Yhtenä tämän työn päätavoitteena oli selvittää Pilodyn-laitteen ja lujuusominaisuuksien mahdollista yhteyttä sekä tehdä laitteen tulosten mukainen lujuustaulukointi. Kokeiden tuloksista ja luvun 6.5 kuvaajista on helppo huomata Pilodyn-laitteen ja virheettömän puun lujuusominaisuuksien sekä tiheyden vahva yhteys. Se, että koekappaleet eivät olleet täysin virheettömiä, kertoo vain vahvemmassa Pilodyn-laitteen ja puristuslujuuden välisestä yhteydestä. Näin ollen puun lujuuksia voidaan taulukoida Pilodyn-laitteen avulla luotettavasti. Taulukoinnissa lujuudet annetaan standardin SFS-EN 338 [14] C-luokituksen mukaisesti. Taulukon lujuusluokitus tehdään tiheyden kautta, sillä se on yhtenä kyseisen standardin vaatimuksena [7, s. A4/7]. Lujuusluokat annetaan puun tiheyden ja tunkeumasyyvyyden lisäksi sen oksaisuutta tarkastelemalla.

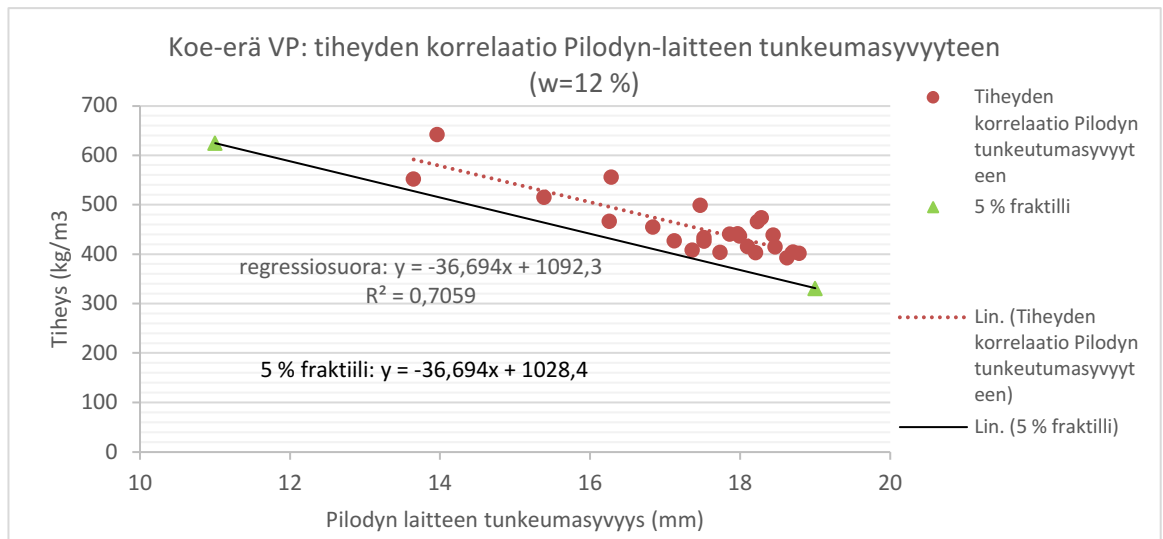
Tarkastellaan esimerkiksi kuvan 6.14 kuvaajaa. Kuvaajaan piirrettyä lineaarista regressiosuoraa voidaan pitää tiheyden ja Pilodyn-laitteen välisenä keskiarvosuorana. Kuten luvussa 5.6 tuli ilmi, 5 %:n fraktiilin mukaisen ominaisarvon määrittäminen tehdään aina otosjoukosta laskettavan keskiarvon perusteella [43, s. 4-6]. Yksinkertaistettuna kuvan 6.14 kuvaajalle voidaan myös laskea 5 %:n fraktiilin mukainen ominaisarvosuora. Tämä

voidaan tehdä valitsemalla regressiosuoralta kaksi pistettä. Esimerkiksi Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden kohdat 11 mm ja 19 mm. Näille kahdelle lasketaan regressiosuoran yhtälön ja tunkeumasyvyyksien avulla tiheyden arvot. Koska regressiosuora on ikään kuin otosjoukon keskiarvoviiva, voidaan näitä tiheyksien pisteitä pitää paikallisina otoksen keskiarvoina. Taulukoiden 5.2 ja 5.3 mukaisesti laskemalla saadaan näille keskiarvotiheyksien pisteille laskettua alemman 5 %:n fraktiilin mukainen tiheys. Yhdistämällä nämä pisteet kuvaajaan tehdyllä suoralla saadaan kuvaajaan 5 %:n fraktiilin mukainen ennustesuora. Tämän suoran yhtälön avulla voidaan Pilodyn-laitteen tuloksilla määrittää tiheyden 5 %:n fraktiilin mukaisia ominaistiheyksiä. Keskiarvotiheyksien 5 %:n fraktiilin mukaisia tiheyksiä laskettaessa tulee taulukon 5.2 kaavassa otosjoukon keskihajonnan tilalla kaavassa käyttää regressiosuoran regressioanalyysin mukaista keskivirhettä. Tämä regressiosuoran keskivirhe toimii käytännössä suoran keskihajontana eli keskimääräisenä poikkeamana keskiarvosta.

Kuvan 6.15 kuvaajassa havaittavan uuden ja vanhan puutavaran koe-erien eroavaisuudesta johtuen näitä koe-eriä käsitellään tässä yhteydessä erillään. Yhdistämällä tulokset koe-erille saavutetut tiheyden ja tunkeumasyvyyden korrelaatiot heikkenisivät. Kuvissa 6.22 ja 6.23 on esitetty muokatut versiot kuvien 6.10 ja 6.14 koe-erien UP1-3 ja VP kuvaajista. Kyseisiin kuvaajiin on molemmille otosjoukoille piirrettyä 5 %:n fraktiilin mukainen ennustesuora ja ennustesuoran suoran yhtälö, johon Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyksiä voidaan syöttää. Ennustesuorasta saatu ominaistiheys voidaan yhdistää suoraan standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokituksiin.



Kuva 6.22. Koe-erien UP 1-3 tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen 5 %:n fraktiilin ennustesuoralla.



Kuva 6.23. Koe-erän VP tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen 5 %:n fraktiilin ennustesuoralla.

Nyt kuvien 6.22 ja 6.23 kuvaajista 5 %:n fraktiilien mukaiset ominaistiheyden ennustesuorien yhtälöt ovat seuraavat

$$y_{UP} = -22,552 * x_{UP} + 742,13 \quad (6.1)$$

$$y_{VP} = -36,694 * x_{VP} + 1028,4, \quad (6.2)$$

missä y on ominaistiheyden arvo ja x on Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden arvo. Kaavan 6.1 alaindeksi UP tarkoittaa, että kaava on tarkoitettu käytettäväksi uudella puutavaralla. Kaavan 6.2 alaindeksi taas tarkoittaa, että kaava on tarkoitettu käytettäväksi vanhalla puutavaralla. Vanhan puutavaran kaavaa 6.2 tulee käyttää harkiten yleistettävänä kaavana, johtuen koe-erän VP suppeasta otannasta.

Kuvaajasta 6.16 nähdään, että koe-erän VP oksien rajoittamattomuus on selkeästi pienentänyt Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puristuslujuuden korrelaatiota. Lisäksi Pilodyn-laite antaa tietoa vain virheettömän puun lujuusominaisuuksista ja varsinkin puun oksaisuudella on suuri merkitys puun lujuuteen [36, s. 3][17, s. 43]. Näin ollen lujuustaulukointia tehdessä tulee Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden lisäksi huomioida mittausalueen puun oksaisuus. Tämä voidaan yksinkertaisimmillaan tehdä soveltamalla visuaalisen lujuuslajittelustandardin INSTA 142 mukaisia oksaisuuden raja-arvoja. Kuten uuden puutavaran koekappaleiden vikojen rajoittamisessakin, on Pilodyn-laitteen mukaisessa lujuustaulukoinnissakin järkevintä keskittyä vain oksien koon mittaamiseen. Tämä sen takia, että oksien vaikutus puurakenteen lujuuteen eri vioista on merkittävin [8, s. 38]. Lisäksi kaikkien puun vikojen mittaaminen olisi huomattavan aikaa vievää ja koska tämä työ keskittyy Pilodyn-laitteen käyttöön käytännön kuntotutkimuksissa, tulisi työn suorituksen olla melko tehokasta.

Standardin INSTA 142 mukaan puutavara voidaan lujuuslajitella neljään eri luokkaan, jotka ovat nähtävissä kuvassa 2.16. Näistä neljästä luokasta yleisimmät lujuusluokat ovat C18, C24 ja C30. Tästä syystä nämä kolme lujuusluokkaa otetaan myös Pilodyn-laitteen mukaiseen lujoustaulukointiin lujuusluokiksi. Taulukossa 6.7 on esitettyä Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden sekä puun oksaisuuden mukaan laadittu ja standardin SFS-EN 338 [14] lujuusluokitusta vastaava lujoustaulukointi. Taulukon Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden raja-arvot on laskettu kaavoilla 6.1 ja 6.2 pyöristäen tuloksia alaspäin. Kaavoihin on syötetty standardissa SFS-EN 338 [14] esitettyjen lujuusluokkien C18, C24 ja C30 ilmoitetut ominaistiheydet ρ_k (ks. taulukko 6.3). Taulukon 6.7 lujuusluokan C30 tunkeumasyvyyden raja-arvoja päädyttiin pyöristämään reilummin alaspäin. Näin saadaan Suomessa yleisimmin käytetyn lujuusluokan C24 tunkeumasyvyyden raja-arvojen väliä kasvatettua ja lujuusluokan C30 raja-arvoihin lisää varmuutta. Taulukossa merkintä UP tarkoittaa uuden puutavaran ja VP vanhan puutavaran mukaisia tunkeumasyvyyden raja-arvoja.

Taulukko 6.7. Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja oksaisuuden mukainen ja standardin SFS-EN 338 lujuusluokitusta vastaava lujoustaulukointi. [26, s. 21]

Ominaisuus	C30	C24	C18
Pilodyn-laitteen tunkeumasvyys (mm)	UP: ≤ 15 mm	UP: ≥ 15 mm ja ≤ 17 mm	UP: ≥ 17 mm ja $\leq 18,5$ mm
	VP: ≤ 16 mm	VP: ≥ 16 mm ja ≤ 18 mm	VP: ≥ 18 mm ja ≤ 19 mm
Yksittäiset oksat (puutavaran toinen sivu <75 mm)	Syrjä: $\leq 1/3$ paksuudesta	Syrjä: $\leq 1/2$ paksuudesta	Syrjä: $\leq 4/5$ paksuudesta
	Lape: $\leq 1/6$ leveydestä	Lape: $\leq 1/4$ leveydestä	Lape: $\leq 2/5$ leveydestä
Poikaoksat (puutavaran toinen sivu <75 mm)	Ei sallita	Syrjä: Arvioidaan kuten yksittäinen oksa (yllä) Lape: Pituus ei saa ylittää kappaleen leveyttä	
Oksaryhmät (puutavaran toinen sivu <75 mm)	Oksasumma \leq sallitun lape- ja syrjäoksan summa		
Parrun yksittäiset oksat (molemmat sivut >75 mm)	$\leq 1/5$ sivun pituudesta	$\leq 2/5$ sivun pituudesta	$\leq 3/5$ sivun pituudesta
Parrun oksaryhmät (molemmat sivut >75 mm)	Oksasumma ≤ 4 kertaa yksittäisen oksan sallittu arvo		

Kuvien 6.10 ja 6.14 kuvaajien tiheyden ja tunkeumasyvyyden korrelaatiokertoimia vertailemalla huomataan uuden puutavaran kuvaajan korrelaation olevan huomattavasti vanhan puutavaran korrelaatiota korkeampi. Kuvan 6.14 uuden puutavaran otosjoukko on myös huomattavasti suurempi, jolloin sen tulos on tilastollisesti luotettavampi. Näiden lisäksi taulukon 6.7 uuden ja vanhan puutavaran tunkeumasyvyyksien raja-arvoja tarkkailemalla huomataan vanhan puutavaran koe-erän raja-arvojen olevan löyhempää.

Näin ollen on luotettavampaa käyttää uuden puutavaran (UP) mukaisia raja-arvoja kaikelle tutkivalle puutavaralle.

Taulukon 6.7 tunkeumasyyvyyden raja-arvoja käytettäessä tulee muistaa, että vertailtava tunkeumasyyvyys on aina yhden mittauspisteen tuloksien keskiarvo. Tämän tutkimuksen mukaan yhdelle mittauspisteelle lujuustaulukon käytön kannalta luotettava tunkeumasyyvyyden tulos saadaan, kun mittauksia suoritetaan vähintään 4 kpl per tutkittavan kohdan sivu. Tarkemmin Pilodyn-laitteen mittauksien otannasta on kerrottu luvun 8 ohjeistuksissa.

Järeän poikkileikkauksen tapauksessa Pilodyn-laitteella ei saada kattavasti poikkileikkauksen keskiosista. Tämä tulee ottaa huomioon aksiaalisesti jännitetyissä (veto- tai puristusjännitys) rakenteissa, sillä näissä rakenteissa koko poikkileikkauksessa on tasainen jännitys ja Pilodyn laitteella saadaan tietoa vain pintaosista [8, s. 41-42]. Lisäksi puun ulko-osat ovat sisäosia lujempia, jolloin mahdollisuus virhetulkintoihin on olemassa [8, s. 83]. Taas taivutusrasituksilla tämä ongelma ei ole kovin merkittävä, sillä taivutusrasitus koostuu lokaalisti tarkasteltuna taivutetun pinnan veto- ja vastakkaisen pinnan puristusjännityksestä [8, s. 34-35]. Ja nämä veto- ja puristusjännityksen maksimit sijaitsevat juuri ulkopinnoilla [8, s. 34-35].

7. CASE-TUTKIMUKSET

7.1 Yleistä

Tutkimuksia, joissa Pilodyn-laitetta on käytetty tämän työn mukaisesti, on tehty muutamia vuosien 2018-2020 välisenä aikana. Pääosin tutkimukset ovat olleet puurakenteiden lahovauriokartoituksia. Näistä tutkimuksista on kertynyt jo jonkin verran kokemusperäistä tietoa, miten käytännön tutkimukset laitteella kannattaa suorittaa. Alla olevissa luvuissa on esitetty erilaisia esimerkkikohteita, joissa Pilodyn-laitteella on suoritettu tutkimuksia. Lukuihin on listattu huomioita sekä hyväksi havaittuja työtapoja Pilodyn-laitteella suoritettavan tutkimuksen tekemiseen. Nämä kaikki tarkemmin esitetyt tutkimukset on tehty kesän 2018, syksyn 2019 ja talven 2019-2020 aikana.

Yleisesti ottaen tutkimuksien luonne riippuu todella paljon kohteesta ja tutkimuksen tavoitteesta. Esimerkiksi osassa tutkittavista kohteista tutkittavat rakenteet voivat olla muiden rakenteiden takana piilossa, jolloin on suoritettava tarvittava määrä rakenneavauksia. Rakenneavauksien määrä ja sijainnit riippuvat pitkälti tutkimuksen laajuudesta sekä siitä ollaanko tekemässä lujuuskartoitusta vai lahovauriokartoitusta. Lisäksi avauksien määrään vaikuttaa myös tilaajan tahtotila.

Tämän työn yhteydessä tehdyissä lahovauriotutkimuksissa on havaittu, että pelkästään Pilodyn-laitteella tehtävä kartoitus olisi suoritettavuudeltaan todella työläs ja tehoton. Parhaisiin lopputuloksiin ollaan päästy yhdistämällä Pilodyn-laitteen käyttöä ja perinteisiä koemenetelmiä, kuten puukotusta, puurakenteen porausta ja aistinvaraista tutkimusta. Tutkimuksien mukaan ensimmäisenä tutkittavat rakenteet kannattaa kartoittaa aistinvaraisesti ja puukottamalla rakenteita. Aistinvaraisen tutkimuksen perusteella kartoitetaan tarkemmin Pilodyn-laitteella ja kosteusmittauksilla tutkittavat kohdat. Tutkimuksien perusteella tarkemmin tutkittaviksi kohdiksi kannattaa valita lahonneisuuden mukaan eriasteisia kohtia sekä rajatapauksia, joissa puun vaurioitumisesta tai sen asteesta ei olla varmoja. Lisäksi Pilodyn-laitteella ja kosteusmittauksilla kannattaa tutkia vertailuksi myös aistinvaraisesti terveeseen puun kohtia. Näiden kohtien tuloksia voidaan käyttää vertailuna, kun määritetään lahovaurion vakavuutta. Case-tutkimuksien mukaan usein tarkemmin tutkittavissa vauriokohdissa on suositeltavaa varmistaa puuporauksilla vaurion lahosyvyyttä. Lisäksi pitkällä poranterällä puurakennetta poraamalla saadaan tietoa rakenteista, mihin Pilodyn-laitteella ei päästä tutkimaan. Esimerkiksi puisten väliseinäpalkkien liittymää tiili- tai hirsiseinään ei Pilodyn-laitteella päästä tutkimaan ja se on

hyvin yleinen vauriokohta [32]. Tällaisessa kohdassa on pitkällä poranterällä seinän sisäisen palkin osan poraaminen paras tapa saada tietoa liittymän kunnosta.

Lujuuskartoitusten käytännön suorittamisesta ei vielä ole juurikaan kokemusperäistä tietoa. Lähtökohtaisesti puhtaassa lujuuden tutkimisessa muiden tutkimusmenetelmien kuin Pilodyn-laitteen ja kosteusmittauksien, käyttö ei kuitenkaan ole tarkoituksenmukaista. Tämä siksi, että puukotuksella tai porauksella ei puun lujuudesta saada minkäänlaista tarkkaa tietoa. Pilodyn-laitteen ja kosteusmittauksien lisäksi voidaan lujuuskartoituksen tutkimusmenetelmiksi lukea rakenneanalyysin teko ja oksaisuuden kartoitus sekä kriittisten kohtien oksien koon mittaus. Kuten taulukosta 6.7 käy ilmi, on oksaisuus yksi lujuusluokituksen raja-arvo.

7.2 Fiskars Uusi Kasarmi

Fiskarsin Uusi Kasarmi on vuonna 1852 alun perin ruukinalueen työntekijöille valmistunut kaksikerroksinen tiilirunkoinen rakennus. Kohteen väli- ja yläpohjan sekä vesikaton puurakenteita tutkittiin kesien 2018 ja 2019 aikana. Tutkimuksien tavoitteena oli selvittää kohteen väli- ja yläpohjan sekä vesikaton puurakenteiden kunto korjaustöiden yhteydessä. Kuvassa 7.1 Fiskarsin Uusi Kasarmi on esitetty ulkoapäin. [32]



Kuva 7.1. Fiskarsin Uusi Kasarmi. [32]

Kohteen väli- ja yläpohjat ovat puupalkkirakenteisia. Tutkimuksia tehtäessä väli- ja yläpohjan pintarakenteet ja täytteet olivat suurelta osin purettu, jolloin kantavat puupalkit olivat näkyvissä ja helposti kattavasti tarkastettavissa. Puupalkistot ovat tuettu tiilimuu-

rin sisään. Tiilimuurien sisällä olevat puupalkkien päät oli vuorattu tuohilla. Vesikaton kantavan puurakenteen muodostavat niin sanotut ruotsalaiset kattotuolit. [32] Kuvassa 7.2 on esitetty yleiskuva kohteen yläpohjan ja vesikaton puurakenteista sekä näiden liittymästä tiilimuriin.



Kuva 7.2. Yläpohjan ja vesikaton puurakenteita. [32]

Tutkimuksia tehtäessä rakenteita tutkittiin ensin kattavasti Pilodyn-laitteella. Pian kuitenkin huomattiin, että tällainen tutkimustapa on tehoton ja työläs. Lisäksi tutkittavien kohtien määrittäminen ei tällä tavalla ollut selkeää. Näin ollen tutkimustapaa muutettiin sellaiseksi, jossa ensin tehdään alustava rakenteiden kartoitus aistinvaraisesti ja puurakenteita puukottamalla. Tämän alustavan kierroksen perusteella valittiin tarkemmin Pilodyn-laitteella tutkittavat kohdat luvussa 7.1 kerrotun mukaisesti. Tutkimustapaa muuttamalla tutkimuksen teko tehostui ja selkeytyi huomattavasti.

Kohteen tutkimuksissa havaittiin myös tiiliseinien sisään tukeutuvien puurakenteiden huolellisen tutkimisen tärkeys. Tutkimuksissa puukotuksen ja Pilodyn-laitteen tuloksien mukaan tiiliseinän sisään tukeutuva puupalkki saattoi olla aivan tiiliseinän juuressa huonetilan puolella täysin hyväkuntoinen, mutta tiiliseinän sisäisen osan porauksien perusteella selkeästi vaurioitunut. Tästä syystä piilossa olevat kiviaineisten rakenteiden sisäiset kantavat puurakenteet tulisi tutkimuksen mukaan tutkia kattavasti.

Tutkimuksen tekoaikana kosteuspitoisuuden korjauskaavaa ei oltu vielä muodostettu. Koska kohteen puurakenteet olivat sisätiloissa samankaltaisissa olosuhteissa, näiden kosteuspitoisuudet olivat pääosin 2 %:n sisällä. Tästä syystä kohteen Pilodyn-laitteen tuloksia voitiin verrata kohdekohtaisesti keskenään. Ampumalla Pilodyn-laitetta alusta-

vassa kartoituksessa havainnoituihin pintalahon, selkeän lahon ja terveen puun kohtiin tutkimuksissa huomattiin puun lahonneisuuden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden välillä selkeää yhteyttä.

7.3 Munkkiniemen vanha seurakuntatalo

Munkkiniemen vanha seurakuntatalo on alun perin vuonna 1870-luvulla pystytetty hirsirunkoinen rakennus. Nykyiselle paikalleen Helsingin Munkkiniemeen se on siirretty vuonna 1932. [32] Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kohteen hirsirungon kunto ja määrittellä sen korjaustarve. Käytännössä hirsirungolle tehtiin lahovauriokartoituksen tyyppinen tutkimus. Kuvassa 7.3 Munkkiniemen vanha seurakuntatalo on esitettyä ulkoapäin.



Kuva 7.3. Munkkiniemen vanha seurakuntatalo. [32]

Kuten kuvasta nähdään, on rakennuksen hirsirunko ulkopinnoiltaan tikkurapattu. Lisäksi hirsirungon sisäpinnoissa oli kauttaaltaan puukoolaus ja kipsilevytys. Näin ollen kohteen lahovauriokartoitus jouduttiin tekemään täysin rakenneavauksista. Rakenneavauksia tehtiin ulko- ja sisäpuolelle tyypillisimpiin vauriokohtiin yhteensä 37 kappaletta. Hirsirunkorakenteissa tällaisia kohtia ovat sokkeli-, välipohja- ja yläpohjaliittymät sekä ikkunoiden alapuoliset osat [34, s. 5-6]. Avauskohtien määrittämisessä huomioitiin myös pintarakenteiden vauriot. Varsinkin ulkopuolen rappauksen vauriot, sillä ne kertovat usein taustan hirsirungon vaurioista [32]. Lisäksi kohteella tehtiin satunnaisavauksia selkeästi hyväkuntoisille alueille, jotta saatiin terveestä hirsirungosta vertailutietoa. Kuvassa 7.4 on esitettyä kohteella tehty tyypillinen sokkeliliittymän avauskohta. Avauskohdat päädyttiin peittämään peltisillä peitelevyillä, jolloin avauksen laajuus määräytyi suoraan peitelevyn saatavuuden mukaan.



Kuva 7.4. Hirsirungon sokkeliliittymän tyypillinen avauskohta. [32]

Tutkimuksen kohteessa Pilodyn-laitteen mittauksia suoritettiin kaikkiin tutkittaviin avauskohtiin, koska hirsirungon alustavaa aistinvaraista havainnointikierrosta ei voitu tehdä. Muutoin kohteen tutkimukset tehtiin pääosin luvussa 7.1 mainitulla tavalla. Tästäkin tutkimuksessa Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä ja puun lahonneisuuden eri asteilla havaittiin yhteys, kun tunkeumasyvyyden tuloksia verrattiin muiden tutkimusmenetelmien havaintoihin. Lisäksi selkeästi lahovaurioituneita kohtia poraamalla huomattiin, että Pilodyn-laitteen yli 25 mm:n tunkeumasyvyyksillä porauksen perusteella selkeää lahovauriota oli 15-20 mm:n syvyydellä.

Tutkimuksissa huomattiin poikkeavia kosteuspitoisuuden tuloksia, kun kosteusmittauksia tehtiin lahovaurioituneihin kohtiin. Tähän on helppo löytää perustelu, sillä sähköisen kosteusmittarin asetukset ovat puulajikohtaisia ja ne riippuvat tiheydestä. Lahovaurioituneen puun tiheys on muuttunut, jolloin se ei enää vastaa tiheydeltään kosteusmittarin puulajikohtaista asetusta. Näin ollen kosteusmittaukset tulee aina suorittaa terveestä puusta. Kosteusmittauksia suoritettiin 2 kpl ja lopulliseksi tulokseksi merkattiin näiden tuloksien keskiarvo.

7.4 Kosken kartano päärakennus

Kosken kartanon päärakennus on Salossa sijaitseva 1700-luvulla pystytetty hirsirunkoinen rakennus [32]. Rakennus on kaksikerroksinen ja sen välipohja on puupalkkirakenteinen. Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää kohteen välipohjapalkkien kunto ja määrittellä sen korjaustarve. Käytännössä välipohjapalkkeille tehtiin lahovauriokartoituksen tyyppinen tutkimus.

Tutkimuksia tehtäessä välipohjan pintarakenteet ja täytteet oli poistettu. Eli välipohjapalkit olivat kauttaaltaan paljastettuina. Näin ollen tämä tutkimus suoritettiin täysin luvussa 7.1 mainitulla tavalla. Kuvassa 7.5 on esitettyä kohteen paljastettua välipohjaa. Kuten kuvasta nähdään, tukeutuvat välipohjapalkit hirsirungon sisään.



Kuva 7.5. Kosken kartanon päärakennuksen avattua välipohjaa. [32]

Tässäkin tutkimuksessa Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä ja puun lahonneisuuden eri asteilla havaittiin yhteys, kun tunkeumasyvyyden tuloksia verrattiin muiden tutkimusmenetelmien havaintoihin. Lisäksi jälleen kohdissa, joissa Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyks oli yli 25 mm, havaittiin porauksen perusteella selkeää lahovauriota noin 15-20 mm:n syvyydellä.

Tässä tutkimuksessa kosteusmittauksissa oli käytössä kaksi erilaista puun kosteusmittausanturia juntattava anturi (Gann M 18) ja lyötävä anturi (Gann M 20). Käyttämällä lyötävää mittausanturia anturin piikit jäävät usein lähelle puurakenteen pintaa. Samassa yhteydessä huomattiin, että lyötävällä anturilla saatujen kosteuspitoisuustuloksien välillä on jopa 2 % heittoa yhdellä tutkittavalla alueella. Lisäksi lyötävällä anturilla saatiin muutamia huomattavasti poikkeavia kosteuspitoisuuden tuloksia. Sen sijaan juntattavaa anturia käytettäessä anturin piikit saatiin helpommin syvemmälle puurakenteeseen. Juntattavalla anturilla anturin piikit lyötiin 10-20 mm:n syvyyteen. Tällöin kosteuspitoisuuden mittauksissa huomattiin huomattavasti vähemmän heittelyä mittauksien välillä kuin, mitä lyötävällä anturilla havaittiin. Lisäksi merkittävästi keskiarvosta poikkeavia tuloksia ei saatu. Saattaa olla, että tietyissä tapauksissa puun pintaosat ovat liian herkkiä ympäröivän ilman olosuhteiden muutokselle. Hieman pintaa syvemmällä olevat puukerrokset puolestaan reagoivat huomattavasti hitaammin olosuhteiden äkillisiin muutoksiin ja antavat näin ollen tasaisemman sekä paremmin kokonaisuutta vastaavan tuloksen. Siten kosteusmittauksissa on suositeltavaa käyttää juntattavaa puuanturia (esim. Gann M 18)

ja lisäksi anturin piikit tulisi iskeä noin 10-20 mm:n syvyyteen. Tämä on hyvin perusteltua, sillä Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden arvot ovat usein myös 10-20 mm:n välillä.

Edellä mainitusta kosteuspitoisuuden käyttäytymisestä saatiin viitteitä myös aiemmissa tutkimuksissa, esimerkiksi Munkkiniemen vanhan seurakuntatalon tutkimuksien yhteydessä. Kyseisessä tutkimuksessa osa mittauskohtien kosteuspitoisuuksista olivat aistinvaraiseen havainnointiin nähden melko korkeita sekä erosivat saman kohdan muista mittauksista. Tällöin korkeampi kosteuspitoisuuden tulos suurensi mittauskohdan kosteuspitoisuuden keskiarvoa, jolloin kosteuspitoisuuden korjauskaava korjasi Pilodyn-laitteen tulosta liian hyväksi. Kyseisissä tutkimuksissa eroavat korkeammat tulokset hylättiin.

Tässäkin tutkimuksessa kosteusmittauksia suoritettiin 2 kpl per tutkittava kohta ja lopulliseksi tulokseksi merkattiin näiden tuloksien keskiarvo. Kuten edellä mainittiin, voi kosteuspitoisuuksien mittauksessa olla suurtakin heittoa yhden tutkittavan kohdankin sisällä. Varsinkin lyötävää mittausanturia käytettäessä. Näin ollen tämän tutkimuksen perusteella kosteusmittauksia on parempi suorittaa vähintään 3 kpl per tutkittava kohta, sillä näin kosteusmittauksista aiheutuvaa virhettä saadaan hieman pienennettyä. Lisäksi kosteusmittauksien suorittaminen on hyvin nopeaa, joten yhden ylimääräisen mittauksen tekeminen ei syö paljoa tutkimusaikaa.

7.5 Vallisaaren Luotsitalo

Vallisaareen on suunnitteilla Biennaalinäyttely kesälle 2020. Näyttelytiloja on suunniteltu ympäri saarta myös Luotsitaloon. Tästä syystä tutkimuksen tavoitteena oli selvittää Vallisaaren Luotsitalon välipohjapalkkien lujuus ja kunto ennen näyttelyn alkamista. Täysimittaista palkkien lujuuskartoitusta ei kohteessa tehty. Luotsitalo on vuonna 1878 Helsingin Vallisaareen valmistunut tiilirakenteinen rakennus [44]. Luotsitalon välipohjat ovat puupalkkirakenteisia. Kuvassa 7.6 on esitetty Luotsitalo ulkoapäin kuvattuna.



Kuva 7.6. Vallisaaren Luotsitalo. [32]

Kohteen kaikki rakenneavaukset olivat jo tehtynä, kun tutkimukset aloitettiin. Rakenneavauksia oli vain muutamia noin 1 kpl per kerros, mikä on kohteen laajuuteen nähden todella vähän. Lähtökohtaisesti kohteen lattian pintarakenteita ei ollut tarkoitus purkaa, joten avauksia ei haluttu tehdä enempää. Lisäksi tavoitteena ei ollut palkkien täysimittainen lujuskartoitus. Tarkoituksena oli saada suuntaa antavaa tietoa välipohjapalkkien kunnosta ja lujuudesta mahdollisten jatkotoimenpidepäätöksiä tueksi. Kuvassa 7.7 on esitettyä yksi rakenneavauskohta.



Kuva 7.7. Vallisaaren Luotsitalon välipohjan tyypillinen avauskohta. [32]

Johtuen tutkimuksen luonteesta ja avauksien vähäisestä määrästä tutkimuksessa päädyttiin määrittämään lujuus vain tiheyden kautta. Eli puun oksaisuutta tutkimuksissa ei mitattu. Pelkällä tiheydellä määritettyä lujuutta voidaan yleistää paremmin kaikkiin väli-

pohjapalkkeihin. Kyseistä menetelmää käytettäessä tulee kuitenkin muistaa, ettei se anna täysin luotettavaa tietoa puurakenteen lujuudesta. Tästä syystä tutkitulle välipohjapalkin kohdalle tuloksessa annettiin vain tiheyden mukainen suuntaa antava lujuusluokitus. Tutkimuksen suuntaa antavan luonteen vuoksi lujuusluokituksessa sovellettiin taulukon 6.7 uuden puutavaran luokituksia siten, että luokituksessa tulos joko täytti tai ei täyttänyt lujuusluokan C24 tiheyden vaatimusta. Myös lujuusluokan C24 tunkeumasyvyyden raja-arvoksi määritettiin varmalle puolelle 16 mm.

Pelkässä lujuuskartoituksessa ei lähtökohtaisesti välttämättä tarvittaisi Pilodyn-laitteen ja kosteusmittauksien lisäksi muita havainnointi välineitä. Tässä kyseisessä kohteessa rakenneavauksesta havainnoitiin puurakenteen kuntoa ja mahdollisia lahovaurioita myös muilla tavoilla, kuten porauksella ja puukotuksella. Näin toimittiin tutkimuksen erikoislaatuisen luonteen vuoksi, sillä suuntaa antavaa tietoa haluttiin myös yleisesti puupalkkien kunnosta. Tämän työn aikana tehdyistä case-tutkimuksista Luotsitalon tutkimus on tällä hetkellä ainoa Pilodyn-laitteella tehty tutkimus, jossa pääpaino on ollut kantavan puurakenteen lujuuden tutkimisessa.

8. PÄÄTELMÄT

8.1 Yleistä

Ominaisuuksiltaan monivivahteikkaalla puulla on pitkät perinteet suomalaisessa rakentamisessa. Tämän takia Suomessa on lukuisia arvokkaita puurakennuksia, joiden säilymisen vuoksi niitä pitää aika ajoin korjata. Rakennuksen kunto ja korjaustarve voidaan määritellä niille tehtävillä kuntotutkimuksilla [30, s. 8]. Tällä hetkellä puurakenteiden kuntotutkimus perustuu lähinnä aistinvaraiseen havainnointiin, kosteusmittauksiin ja rakenteen puukotukseen sekä poraukseen. Yhtenä työn päätavoitteena olikin selvittää Pilodyn-laitteen käyttömahdollisuuksia puurakenteiden kuntotutkimuksissa.

Pilodyn-laitteen käyttömahdollisuuksia lähdettiin selvittämään laitteen aiempia tutkimuksia läpikäymällä. Aiemmista tutkimuksista selvisi, että laitteen tunkeumasyvyydellä on puulajista riippuva yhteys puun tiheyden kanssa. Tunkeumasyvyyden yhteydestä puun lujuusominaisuuksien kanssa taas oli saatavilla ristiriitaista tietoa. Näin ollen työssä päädyttiin tekemään koesarjoja suomalaisille havupuukoekappaleille tunkeumasyvyyden ja virheettömän puun tiheyden sekä lujuuden yhteyden löytämiseksi. Kaikki kokeet tehtiin soveltaen aikaisempia Pilodyn-laitteen tutkimuksia sekä standardeja SFS-EN 384 [15], SFS-EN 408 [23], SFS-EN 13183-1 [42] ja SFS-EN 14358 [43]. Kuten luvun 6 tuloksista tuli ilmi, on Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydellä vahva yhteys virheettömän puun tiheyden ja lujuuden kanssa.

Puun heterogeenisestä luonteesta johtuen pelkästään virheettömästä puusta saatava tieto ei yksistään riitä puun lujuuden arvioimiseen ja Pilodyn-laite antaa tietoa vain virheettömästä puusta. Tästä syystä puun oksaisuus tulee ottaa tutkimuksissa myös huomioon. Oksien vaikutukset huomioidaan soveltamalla visuaalista lujuuslajittelustandardia INSTA 142 (ks. taulukko 6.7). Oksien lisäksi puun lujuuteen vaikuttaa suuresti sen kosteuspitoisuus. Tästä syystä yhtenä työn päätavoitteista oli tutkia puun kosteuspitoisuuden vaikutuksia Pilodyn-laitteen tuloksiin. Lisäksi työssä määritettiin kosteuspitoisuuden korjauskaava Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydelle. Korjauskaavalla saadaan kaikki tulokset muutettua samaan kosteuspitoisuuteen, jolloin ne ovat vertailtavissa.

Työssä tehdyillä case-tutkimuksilla aiemmin työssä tehtyjä havaintoja laitteella tehtävästä tutkimuksesta vietiin itse kenttätutkimuksiin ja kokeiltiin niiden toimimista käytännössä. Case-tutkimuksien perusteella Pilodyn-laitteella tehtävien tutkimuksien ohjeistusta tarkennettiin. Tutkimuksen luonteesta riippumatta yhden mittauspisteen Pilodyn-laitteen yleiset työvaiheet vaihejärjestyksessä ovat:

1. tutkittavan kohdan tulee olla vapaa puun vioista esimerkiksi oksista ja halkeamista,
2. mitattavan alueen pituus voi maksimissaan olla noin 300 mm tai poikkileikkauksen suuremman sivun mitta,
3. yksittäiset Pilodyn-laitteen mittaustulokset luetaan 0,5 mm:n tarkkuudella,
4. Pilodyn-laitteen mittauksia suoritetaan pääosin 4 kpl/sivu ja mikäli jokin neljästä yhden sivun mittaustuloksesta heittää yli 2 mm, suoritetaan 1-2 lisämittausta,
 - a. 3 mittausta per sivu riittää, mikäli mittaustulokset ovat 1 mm:n sisällä
 - b. mikäli jokin yhden sivun mittaustuloksista eroaa muista tuloksista huomattavasti (>5 mm), jätetään tämä mittaustulos huomioimatta
5. laitteen neula tulee ampua kotisuoraan vuosilustoja vasten vuosiluston säteen tai tangentin suuntaan,
6. kosteusmittauksissa tulee käyttää kalibroitua sähköistä kosteusmittaria (esim. Gann RTU 600), joka säädetään puulajikohtaisilla asetuksilla,
7. kosteusmittauksissa puuanturi tulee lyödä 10-20 mm:n syvyyteen puun pinnasta luotettavan tuloksen aikaansaamiseksi,
 - a. puuantureina suositellaan käytettävän mieluiten juntattavia puuantureita (esim. Gann M 18) riittävän mittaussyvyyden saavuttamiseksi
8. kosteusmittaukset tulee suorittaa terveestä ei lahovaurioituneesta kohdasta Pilodyn-laitteen mittauksien välittömästä läheisyydestä,
9. yksittäiset kosteusmittauksien tulokset luetaan 0,1 %:n tarkkuudella,
10. kosteusmittauksia suoritetaan 3 kpl tutkittavalle alueelle ja lopulliseksi tulokseksi merkataan näiden tuloksien keskiarvo,
 - a. lujuuskartoituksessa kosteusmittauksia tehdään yhteensä myös 3 kpl, mutta niitä hajautetaan eri sivuille.

Tämä ohjeistus on suuntaa antava ja sitä voidaan joutua soveltamaan tapauskohtaisesti. Ohjeistus pätee vain tämän tutkimuksen mukaisessa Pilodyn-laitteella suoritettavassa lujuuskartoituksessa ja lahovauriokartoituksessa. Seuraavissa kappaleissa on esitettyinä Pilodyn-laitteella suoritettavan lujuus- ja lahovauriokartoituksen tarkemmat ohjeistukset. Toisaalta nämä kaksi eri tutkimusta liittyvät hyvin vahvasti toisiinsa, sillä lahonneisuus vaikuttaa ratkaisevasti puun lujuuteen [11, s. 327]. Tästä syystä nämä kaksi eri tutkimusta sekoittuvatkin usein keskenään samaksi kokonaisuudeksi.

8.2 Pilodyn-laitteella tehtävä lujuusluokitus ja kantavuuden arviointi

Kuten aiemmin mainittiin, oli yhtenä työn päätavoitteena selvittää Pilodyn-laitteen ja lujuusominaisuuksien yhteys sekä tehdä laitteen tulosten mukainen lujuustaulukointi. Muodostetulla lujuustaulukoinnilla 6.7 voidaan tutkimuksen perusteella ennustaa luotettavasti puurakenteen pistemäisen kohdan standardin SFS-EN 338 [14] mukainen lujuus-

luokka. Kuvan 2.18 mukaan lujuuslajittelussa oksien ja tiheyden määrittelyllä saadaan yhtä hyvät korrelaatiot kuin koneellisella lujuuslajittelulla, jossa yleisimmin määritellään kimmomoduuli ja tiheys. Vaikka nyt määrittelyssä lujuustaulukoinnissa tiheys määritetään epäsuorasti Pilodyn-laitteella, tulee muistaa, että muussakin lujuuslajittelussa ominaisuuksia voidaan määrittää epäsuorasti. Esimerkiksi tiheys määritetään aina epäsuorasti. Lisäksi nyt uuden puutavaran koe-erille saavutettiin erittäin hyvä korrelaatio tiheyden ja Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden välille. Oksien ja tunkeumasyvyyden mukaisella tiheyden määrittelyllä lujuusluokituksen korrelaatio on joka tapauksessa selvästi parempi kuin visuaalisen lajittelun keinoilla, joilla kuvan 2.18 mukaan päästään vain 0,6 korrelaatioon. Visuaalisella lujuuslajittelulla puutavara voidaan kuitenkin yksistäänkin lajitella taulukon 6.7 mukaisesti luokkiin. [2, s. 60–61][7, s. A6/4-5]

Tutkittavat rakenteet ovat käytännössä aina vanhoja jo kuormitettuja rakenteita. Ne ovat käyttöikänsä aikana kestäneet tietyn kuormitushistorian ja suurimman osan sen kantavuuslaskennassa käytettyjen varmuuskertoimien suuruuteen vaikuttavista rasituksista. Tällöin rakenteen käyttö- ja kuormitushistoria toimii ikään kuin todisteena sen kestävydestä, ellei käyttöikänsä aikana ole jonkinlaista vaurioitumista tapahtunut. [45, s. 49-50] Näin ollen puurakenteen kantavuuden tai lujuuden arvioimisessa oheisen lujuustaulukoinnin avulla ei lisävarmuuskertoimien käyttö ole tutkimuksen perusteella tarpeellista, kun käytetään uuden puutavaran (UP) mukaisia raja-arvoja kaikelle tutkivalle puutavarakalle. Lisävarmuuskertoimien käyttö tulee kuitenkin pohtia kohdekohtaisesti rakenteen kuormitushistoria huomioiden.

Pilodyn-laitetta käytettäessä tulee muistaa, että se antaa vain melko pistemäistä tietoa puurakenteesta. Koska yhteen pistemäiseen kohtaan joudutaan laitteella suorittamaan useita yksittäisiä mittauksia, rakenteen kokonaisvaltainen tutkiminen on hyvin aikaa vievää. Tästä syystä puurakenteen lujuuden tai kantavuuden arvioinnissa on ensiarvoisen tärkeää tunnistaa rakenteen rasitetuimmat alueet ja kohdistaa mittaukset näille alueille. Esimerkiksi jos ajatellaan yleistä yksiaukkoista välipohjapalkkia, on sen rasitetuimmat ja näin ollen tutkimuksen kannalta mielenkiintoisimmat kohdat momentin maksimi jännevälillä keskellä ja leikkausrasitus tukien läheisyydessä. Rasitetuimpien kohtien lisäksi tulee huomioida myös puun oksaisuus, sillä suuri oksa voi olla kantavuuden kannalta myös merkitsevin, vaikka se ei sijaitisi aivan rasitetuimmassa kohdassa. Edellä mainitut kohdat edellyttävät mittauksen suorittajalta hyvää rakennusstatiikan ja -mekaniikan tuntemusta sekä puun ominaisuuksien ja käyttäytymisen tuntemusta rakennusmateriaalina.

Rakennanalyysiä tehdessä on myös tärkeää tunnistaa, minkälaisia jännityksiä rakenteessa vallitsee. Erilaiset jännitykset nimittäin vaikuttavat Pilodyn-laitteella suoritettavaan ammuntaan. Aksiaalissa rasituksessa koko poikkileikkauksessa vallitsee tasainen jännitys [8, s. 41-42]. Näin ollen aksiaalisen jännityksen tapauksessa mittauksia tulee

suorittaa kattavasti kaikille neljälle sivulle. Taivutusrasituksessa taas riittää veto-, puristuspinna tai molempien tutkiminen aivan pinnan läheisyydestä kolmelta sivulta. Taivutuksessa suurimmat jännitykset sijaitsevat aivan veto- ja puristuspintojen läheisyydessä [8, s. 34-35].

Lujuuskartoituksen suoritettavat työvaiheet vaihejärjestyksessä ovat:

1. rakenteeseen ja sen kuormitukseen tutustuminen,
2. rakenneanalyysin tekeminen ja rakenteen kriittisimpien kohtien määrittäminen oksaisuus ja rasitukset huomioiden,
3. alustava rakenteen aistinvarainen lahovauriotarkastus,
 - a. mikäli lahovaurioita löytyy, on tärkeää määrittää niiden toimiva poikkeus Pilodyn-laitteella, porauksilla tai veistämällä lahonnut osa pois
4. Pilodyn-laitteen ammunnan suunnittelu jännityksien mukaan,
5. tutkittavan kohdan oksien mittaus,
6. tutkittavien kriittisimpien kohtien tutkiminen Pilodyn-laitteella ja kosteuspitouuden mittaus luvun 8.1 luettelon kohtien 1.-10. mukaisesti,
 - a. lujuuskartoituksessa mittauksia suoritetaan aksiaalisessa jännityksessä joka sivulle ja taivutusjännityksessä kolmelle sivulle ja lopulliseksi tulokseksi merkataan näiden sivujen mittaustuloksien keskiarvojen keskiarvo
7. satunnaisten lisämittausten suorittaminen aistinvaraisesti terveistä kohdista vertailuksi poikkeavuuksien määrittämiseksi luvun 8.1 luettelon kohtien 1.-8. mukaisesti,
8. Pilodyn-laitteen tulosten korjaaminen standardikosteuspitoisuuteen kaavaa 6.2 käyttämällä,
9. analyysin teko ja lujuusluokituksen antaminen tutkittavalle kohdalle taulukon 6.7 mukaan.

Tämä ohjeistus on suuntaa antava ja sitä voidaan joutua soveltamaan tapauskohtaisesti. Esimerkiksi osassa tutkittavista kohteista tutkittavat rakenteet voivat olla muiden rakenteiden takana piilossa, jolloin suoritetaan tarvittava määrä rakenneavauksia. Tällöin rakenneavaukset kannattaa kohdistaa rakenneanalyysin mukaisiin rasitetuimpiin kohtiin, sillä koko rakenteen oksaisuudesta ei voida olla varmoja ilman koko rakenteen avaamista. Lisäksi kyseinen ohjeistus pätee vain tämän tutkimuksen mukaisessa Pilodyn-laitteella suoritettavassa lujuuskartoituksessa. Ohjeistusta käytettäessä Pilodyn-laitteen käyttäjällä tulee olla riittävä kokemus laitteella suoritettavasta tutkimuksesta.

8.3 Pilodyn-laitteella tehtävä lahovauriokartoitus

Koska lahottajasienet syövät puun rakennusosia, alentavat ne puun massaa ja tällöin myös tiheyttä [11, s. 327]. Näin ollen voidaan Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puun lahonaisuudellakin välillä olettaa olevan vahva yhteys. Tästä saatiin myös vahvoja viitteitä tehdyissä case-tutkimuksissa ja laitteen aikaisemmassa Thalerin et. al. tutkimuksessa [39]. Toisaalta puurakenteen kunnan tulkinta voidaan tehdä myös pelkästään perinteisiä tutkimusmenetelmiä puukotusta ja porausta käyttäen. Pilodyn-laitteen tulokset ovat kuitenkin perinteisiin tutkimusmenetelmiin verrattuna selkeämmin tulkittavia ja niiden avulla johtopäätöksiä voidaan yhdenmukaistaa.

Lujuustaulukoinnin (ks. 6.7) ja case-tutkimuksien perusteella Pilodyn-laitteen mukaisille tuloksille tehtiin kolmiasteinen kuntoluokitus. Puurakenteen Pilodyn-laitteen mukainen kuntoluokitus on esitetty taulukossa 8.1. Kuntoluokituksella saadaan puurakenteen kunto määriteltyä selkeän ja helposti mitattavan Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden raja-arvon kautta. Taulukon Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyydet vastaavat standardikosteuspitoisuuden ($\omega = 12\%$) mukaista tunkeumasyvyyttä.

Taulukko 8.1. Puurakenteen kuntoluokitus Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden mukaan.

Kuntoluokka	Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyys (mm)	Selite
KL1	≤ 17 mm	terve puu, tiheyden mukainen lujuusluokka C24
KL2	≥ 17 mm ja ≤ 25 mm	normaalia pehmeämpi tai pintavaurioitunut puu, tiheyden mukainen lujuusluokka $< C24$,
KL3	≥ 25 mm	selkeästi vaurioitunut puu, puun toimiva poikkeileikkaus pienentynyt huomattavasti

Taulukon 8.1 kuntoluokkien raja-arvot perustuvat vahvasti lujuustaulukoinnin 6.7 ja kuvan 6.22 kuvaajan tuloksiin. Esimerkiksi terveen puun luokka KL1 voidaan luotettavasti antaa taulukon 6.7 C24 mukaiselle puutavarakkeelle. Taulukon 8.1 raja-arvoissa myös case-kohteiden havainnot on huomioitu. Esimerkiksi kuntoluokan KL3 raja-arvo on pitkälti määräytynyt case-kohteissa aistinvaraisesti selkeästi lahoon kohtaan tehtyjen mitaushavaintojen perusteella. Lisäksi puurakenteen toimenpidemahdollisuudet ovat huomioon otettuina luokituksessa. Ensisijaisesti kuntoluokan 2 puutavaran toimenpideehtotuksena on vaurioituneen kohdan veistäminen tai muunlainen poistaminen. Taas kuntoluokan 3 ensisijainen toimenpideehtotus on rakenteen uusiminen tai vahvistaminen. Puurakenteen veistämisen, vahvistamisen tai uusimisen toimenpideehtotukset tulee kuitenkin harkita tapauskohtaisesti. Esimerkiksi hyvin järeässä rakenteessa ei 25 mm:n paksuisen kerroksen poistaminen rakenteen ympäriltä kauttaaltaan vielä välttämättä edellytä rakenteen uusimista tai vahvistamista. Toisaalta taas helposti toteutetta-

vassa kohdassa voi puurakenteen uusiminen olla kaikkein kustannustehokkainta, vaikka lahovaurio ei olisi kovin vakava.

Pelkästään Pilodyn-laitteella tehtävässä kartoituksessa useat kriittiset paikat jäisivät tutkimatta. Esimerkiksi puisten väliseinäpalkkien liittymä tiili- tai hirsiseinään on yleinen vauriokohta ja lähes aina palkki liittyy seinän sisään, jolloin sitä ei päästä Pilodyn-laitteella tutkimaan [32]. Tällaisessa kohdassa on pitkällä poranterällä seinän sisäisen palkin osan poraaminen paras tapa saada tietoa liittymän kunnosta. Lisäksi pelkästään Pilodyn-laitteella tehtävä kartoitus olisi suoritettavuudeltaan todella työläs ja tehoton. Case-tutkimuksien perusteella parhaaseen lopputulokseen päästään yhdistämällä Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden mittaamista ja perinteisiä koemenetelmiä. Näin ollen tämän työn perusteella lahovauriokartoituksen työvaiheet vaihejärjestyksessä ovat:

1. alustava rakenteiden tarkastus aistinvaraisesti sekä rakenteita puukottaen ja tarkemmin tutkittavien kohtien määrittäminen,
 - a. kaikkien vaurioituneiden kohtien tarkemmin tutkiminen ei ole tarkoituksenmukaista eikä tehokasta, alustavan tarkastuksen mukaisesti samankaltaiset kohdat voidaan luokituksessa yhdistää muutamalla tarkemmin tutkittavalla kohdalla
 - b. alustavan tarkastuksen mukaiset kahden kuntoluokan välillä olevat rajatapaukset
 - c. vertailun vuoksi myös aistinvaraisesti terveitä kohtia mukaan
2. seinien tms. sisällä piilossa olevien tukialueiden kartoitus poraamalla,
 - a. varsinkin kiviaineisten rakenteiden sisällä olevat kantavat puurakenteet tulee tutkia kattavasti
3. tarkemmin tutkittavien kohtien tutkiminen Pilodyn-laitteella ja kosteuspitoisuuden mittaaminen luvun 8.1 luettelon kohtien 1.-10. mukaisesti,
 - a. lahovauriokartoituksessa Pilodyn-laitteen mittauksia suoritetaan yhteen valittuun kohtaan tai sivuun ja lopulliseksi tulokseksi merkataan tämän kohdan tai sivun mittaustuloksien keskiarvo
4. tarvittaessa tutkittavan kohdan lahosyvyyden tarkempi tutkiminen poraamalla,
5. Pilodyn-laitteen tulosten korjaaminen standardikosteuspitoisuuteen kaavaa 6.2 käyttämällä,
6. kuntoluokituksen antaminen tutkittavalle kohdalle taulukon 8.1 mukaan,
7. analyysin teko ja toimenpide-ehdotuksien antaminen,
8. lahovauriokartan piirtäminen.

Tämä ohjeistus on suuntaa antava ja sitä voidaan joutua soveltamaan tapauskohtaisesti. Esimerkiksi osassa tutkittavista kohteista tutkittavat rakenteet voivat olla muiden rakenteiden takana piilossa, jolloin suoritetaan tarvittava määrä rakenneavauksia. Tällöin ensin tutkittavan rakenteen pintarakenteet tarkastellaan mahdollisten näkyvien vaurioiden

varalta. Rakenneavauskohdat määritetään sitten tarkasti valittuihin kohtiin, kuten rakenneiden eri rakenneliittyimiin, pintarakenteiden vauriokohtiin ja vertailuksi vauriottomilta vaikuttaviin kohtiin. Lisäksi kyseinen ohjeistus pätee vain tämän tutkimuksen mukaisessa Pilodyn-laitteella suoritettavassa lahovauriokartoituksessa. Ohjeistusta käytettäessä Pilodyn-laitteen käyttäjällä tulee olla riittävä kokemus laitteella suoritettavasta tutkimuksesta

8.4 Lisätutkimustarve

Tämän työn tutkimuksissa huomattiin vanhan puutavaran koe-erän ja uuden puutavaran koe-erien ominaisuuksien välillä eroavaisuutta. Näin ollen vanhan käytetyn puutavaran ominaisuuksien käyttäytymistä tulisi tutkia tarkemmin laajemmilla koe-erillä. Kyseisissä koe-erissä lujuuskokeet voitaisiin suorittaa mahdollisimman virheetömälle puulle ja lisäksi koe-eriä voitaisiin suorittaa useammassa eri kosteuspitoisuudessa, kuten nyt uudella puutavaralla tehtiin. Tällaisilla tutkimuksilla varmistettaisiin vanhalla puutavaralla Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyden korjauskaavan toimintaa ja virheetömän puun lujuuden sekä tunkeumasyyvyyden yhteyttä. Lisäksi saataisiin tietoa siitä, miten puurakenteen ikääntyminen vaikuttaa sen ominaisuuksiin ja onko näissä ominaisuuksissa todella ero uuteen puutavaraan verrattuna. Yleisesti ottaen uusi samankaltaisesti toteutettu koesarja olisi hyvä lisävarmistus, kuinka hyvin nyt saatuja tuloksia voidaan yleistää kaikelle puutavaralla.

Toinen hyödyllinen lisätutkimus olisi taivutuslujuustestien tekeminen standardin SFS-EN 408 [23] mukaisesti täysimittaisille koekappaleille, joiden vikoja ei rajoiteta. Kyseisissä testeissä rakenneanalyysillä sekä visuaalisella tarkastelulla havainnoitaisiin kriittisimmät paikat jännityksien ja oksaisuuden mukaan. Tämän jälkeen kriittisimpien kohtien Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvydellä ja visuaalisella tarkastelulla arvioitaisiin koekappaleen lujuusluokkaa taulukon 6.7 mukaan. Nyt taivuttamalla koekappale murtoon voidaan tarkastella rakenneanalyysin ja taulukon 6.7 mukaisesti arvioidun lujuusluokan toteutuvuutta.

Laitteen laukaisuvoiman kalibrointiin tai seurantaan ei saatavilla olevan aineiston mukaan ollut yleistä menetelmää [35-39]. Laukaisuvoiman suuruuden seuranta voitaisiin tehdä esimerkiksi ampumalla laitetta aina samanlaiseen homogeeniseen aineeseen ja vertailemalla saatuja tunkeumasyyvyksiä. Laukaisuvoiman seuranta olisi hyvä suorittaa aina ennen uusia tutkimuksia, jotta voidaan varmistua laitteen tulosten vertailtavuudesta aiempien tutkimuksien tuloksien kanssa. Laitteen kalibrointi puolestaan edellyttää todennäköisimmin laitteen jousen kiristämistä tai sen vaihtamista. Laitteen kalibrointi ja laukaisuvoiman seuranta vaatii kuitenkin vielä lisäselvityksiä.

LÄHTEET

- [1] J. Lätti, Arvokohteiden puisten kattoristikoiden vahvistaminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2017.
- [2] U. Siikanen, Puurakentaminen, Rakennustieto Oy, 2008.
- [3] U. Siikanen, Rakennusaineoppi, Rakennustieto Oy, 2001.
- [4] Kullaan kirkko. Wikipedia. Saatavissa (viitattu 14.10.2017): https://fi.wikipedia.org/wiki/Kullaan_kirkko.
- [5] P. Neuvonen, E. Mäkiö, M. Malinen, Kerrostalot 1880-1940, Rakennustieto Oy, 2019.
- [6] E. Mäkiö, Kerrostalot 1960-1975, Rakennustieto Oy, 2016.
- [7] Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Step: 1, Puurakenteet: suunnitteluperusteet, materiaaliominaisuudet, rakenneosat, liitokset, Rakennustieto Oy, 1996.
- [8] T. Pihlajamaa, J. Jantunen, Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet, Maatalousteknologian tutkimuslaitos, 1995
- [9] Puukoulu. Rakentaja. Saatavissa (viitattu 15.10.2017): https://www.rakentaja.fi/artikkelit/755/puukoulu_1_yleista.htm.
- [10] A. Aikivuori, RIL 184 Rakennusmateriaalien ja -osien kestävyys, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 1991
- [11] M. Kärkkäinen, Puun rakenne ja ominaisuudet, Metsäkustannus Oy, 2007.
- [12] Sahatavaran laatuluokitus oksien perusteella. Puuinfo. Saatavissa (viitattu 17.10.2017): <http://www.puuinfo.fi/sites/default/files/content/info/rakennesahatavara/Sahatavaran%20520laatuluokitus%2520okkien%2520perusteella.pdf>.
- [13] Puulajit. Puuinfo. Saatavissa (viitattu 23.10.2017): <http://www.puuinfo.fi/puutieto/puulajit>.
- [14] Structural timber. Strength classes, Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 338, Helsinki, 2016.

- [15] Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density, Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 384, Helsinki, 2016.
- [16] Kosteusteknisiä ominaisuuksia. Puuinfo. Saatavissa (viitattu 25.10.2018): <https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/kosteusteknisi%C3%A4-ominaisuuksia>
- [17] U. Saarelainen, Puurakenteet, Puu materiaalina, Puuinformaatio Oy, 1981.
- [18] R. Stöd, Harvennusmännystä saatavan sahatavaran lujuus ja jäykkyys, Metsäntutkimuslaitos, 2005. Saatavissa (viitattu 25.10.2017): http://www.isojoensaha.fi/images/metla_fin.pdf.
- [19] A. Kevarinmäki, Puurakenteiden suunnittelu, Eurokoodi 5 Lyhennetty suunniteluohje, neljäs painos, Puuinfo Oy, 2018.
- [20] A. Cavalli, D. Cibecchini, M. Togni, H. Sousa, A review on the mechanical properties of aged wood and salvaged timber, *Construction and Building Materials*, vol. 114, University of Florence & University of Minho, 2016.
- [21] M. Piazza, M. Riggio, Visual strength-grading and NDT of timber in traditional structures, *Journal of Building Appraisal*, vol 3, Trento University, 2008.
- [22] J. Kuusisto, Lujuusparametrien määrittäminen C20-lujuusluokalle, Insinööriyö, Lahden ammattikorkeakoulu, 2017.
- [23] Timber structures. Structural timber and glued laminated timber. Determination of some physical and mechanical properties, Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 408, Helsinki, 2012.
- [24] Timber structures. Strength graded structural timber with rectangular cross section. Part 1: General requirements, Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 14081-1, Helsinki, 2016.
- [25] Sahatavaran lujuuslajittelu. Puuinfo. Saatavissa (viitattu 28.11.2018): <https://www.puuinfo.fi/puutieto/sahatavara/sahatavaran-lujuuslajittelu-0>
- [26] Sahatavaran visuaalisen lujuuslajittelun pohjoismaiset säännöt, Suomen standardisoimisliitto, SFS 5878 INSTA 142, Helsinki, 2010.
- [27] J. Turpeinen, Puurakennusten hyönteisvauriot, Tuuma, 2005.
- [28] K. Köster, M. Metslaid, J. Engelhart, E. Köster, Dead wood basic density, and the concentration of carbon and nitrogen for main tree species in managed hemiboreal-forests, *Forest Ecology and Management*, Vol. 354, 2015, s. 35–42.
- [29] F. Sandström, H. Petersson, N. Kruys, G. Ståhl, Biomass conversion factors (density and carbon concentration) by decay classes for dead wood of *Pinus sylvestris*,

Picea abies and *Betula* spp. in boreal forests of Sweden, *Forest Ecology and Management*, Vol. 243, 2007, s. 19–27.

[30] M. Pentti, J. Mattila, J. Lahdensivu, M. Haukijärvi, *Betonijulkisivun kuntotutkimus 2002*, BY 42, Suomen Betoniyhdistys r.y., 2002.

[31] T. Ranki, rakennusinsinööri, Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, Turku. Haastattelu 31.10.2017.

[32] Insinööritoimisto Lauri Mehto Oy, kuntotutkimusaineisto, Helsinki. Saatavissa rajoitetusti.

[33] P. Kaila, Talotohtori, WSOY, Porvoo, 1997.

[34] H. Puurunen, Hirsitalon rungon korjaus, Museoviraston korjauskortisto, Museovirasto, 2000.

[35] A. Feio, *Inspection and Diagnosis of Historical Timber Structures: NDT Correlations and Structural Behaviour*, väitöskirja, University of Minho, Portugal, 2005.

[36] C. Hansen, *Application of the Pilodyn in Forest Tree Improvement*, Danida Forest Seed Centre, 2002.

[37] N. Thaler, B. Lesar, M. Humar, *Correlation between brown rot decay and Pilodyn measurements*, Springer-Verlag, 2012, s. 1–3.

[38] P. Hofmeyer, *Improving the efficiency of visual grading by means of the Pilodyn wood tester*, Technical University of Denmark, 1981, s.1–12.

[39] D. Henriques, L. Nunes, J. Machado, J. de Brito, *Timber in Buildings: Estimation of Some Properties using Pilodyn® and Resistograph®*, XII DBMC, 2011, s. 1–8.

[40] Korrelaatio. Otavan opisto. Saatavissa (viitattu 3.11.2017):
http://opinnot.internetix.fi/fi/muikku2materiaalit/lukio/maa/maa06/maa6_05_korrelaatio.pdf?C:D=1818993.

[41] R. Görlacher, *Non destructive testing of wood: an in-situ method for determination of density*, *Holz as Roh- und Werkstoff*, Vol. 45, 1987, s. 273–278.

[42] *Moisture content of a piece of sawn timber. Part 1: Determination by oven dry method*, Suomen standardisoimisliitto, SFS-EN 13183-1, Helsinki, 2002.

[43] *Timber structures. Calculations and verification of characteristic values*, SFS-EN 14358, Helsinki, 2016.

[44] Vallisaaren luotsit. Vallisaari. Saatavissa (viitattu 2.3.2020):
<https://vallisaari.fi/nahtavyynet/vallisaaren-luotsit/>.

[45] V. Kari, Teräsbetonisten runkorakenteiden kantavuuden selvittäminen ja vahvistaminen, diplomityö, Tampereen teknillinen yliopisto, 2018.

LIITE A

Koekappaleiden ja viipalenäytteiden dimensiot

Vanhan puutavaran koe-erä VP

Koekappaleen tunnus	PL leveys (mm)	PL korkeus (mm)	Koekappaleen pituus (mm)	Halkeamien ym. ala (mm ²)	PL pinta-ala (mm ²)	Viipalänäytteen PL leveys (mm)	Viipalänäytteen PL korkeus (mm)	Viipalänäytteen pituus (mm)	Viipalänäytteen tilavuus (mm ³)	Halkeamien ym. tilavuus (mm ³)
VP1	105,0	126,0	630,0	83,0	13230,0	106,1	126,0	30,2	401398,7	2333,0
VP2	120,3	159,5	720,0	216,0	19187,9	120,2	158,1	26,3	492612,2	7183,0
VP3	130,2	155,6	780,0	45,0	20259,1	129,7	155,2	33,9	681328,0	1060,0
VP4	110,2	160,0	660,0	10,0	17632,0	109,3	159,9	31,1	543286,9	250,0
VP5	139,8	180,5	840,0	55,0	25233,9	139,6	180,8	25,7	648114,8	545,0
VP6	115,3	160,0	690,0	25,0	18448,0	115,2	159,6	30,0	551542,6	35,0
VP7	138,9	181,1	829,0	120,0	25154,8	81,2	168,8	37,3	510824,7	430,0
VP8	110,1	140,3	660,0	30,0	15447,0	110,0	140,3	31,2	481181,6	328,0
VP9	115,0	139,5	690,0	120,0	16042,5	114,9	139,1	28,2	447551,0	3158,0
VP10	108,0	114,0	648,0	34,0	12312,0	107,8	114,0	25,2	309532,8	155,0
VP11	108,0	114,0	648,0	16,0	12312,0	108,0	114,2	29,4	361945,8	662,0
VP12	133,4	139,3	798,0	175,0	18582,6	133,3	139,5	31,6	580533,1	7080,0
VP13	90,0	100,0	540,0	48,0	9000,0	89,6	100,2	25,0	222454,0	1994,0
VP14	159,7	170,5	954,0	102,0	27228,9	159,5	170,3	31,0	839759,4	2289,0
VP15	124,6	138,4	744,0	357,0	17244,6	124,4	138,0	30,4	509658,9	12224,0
VP16	100,0	116,0	600,0	50,0	11600,0	100,1	115,9	30,4	350970,3	1718,0
VP17	149,4	160,7	888,0	107,0	24008,6	148,9	160,2	31,6	749287,4	4492,0
VP18	96,0	122,0	576,0	-	11712,0	96,2	121,7	26,2	306665,5	72,0
VP19	160,8	161,8	960,0	286,0	26017,4	160,8	161,5	32,7	837854,8	11338,0
VP20	107,0	120,0	642,0	10,0	12840,0	107,5	120,4	30,5	394701,5	60,0
VP21	129,3	130,1	774,0	141,0	16821,9	129,2	129,8	36,9	615506,9	3312,0
VP22	115,4	128,5	690,0	170,0	14828,9	115,5	128,4	30,1	442646,0	3743,0
VP23	127,9	143,0	768,0	102,0	18289,7	127,6	142,9	30,6	554711,6	3250,0
VP24	120,8	145,2	720,0	72,0	17540,2	120,7	145,0	31,4	543861,1	5686,0

Uuden puutavaran koe-erä UP1

Koekappaleen tunnus	PL leveys (mm)	PL korkeus (mm)	Koekappaleen pituus (mm)	Halkeamien ym. ala (mm ²)	PL pinta-ala (mm ²)	Viipalenäytteen PL leveys (mm)	Viipalenäytteen PL korkeus (mm)	Viipalenäytteen pituus (mm)	Viipalenäytteen tilavuus (mm ³)	Halkeama ym. tilavuus (mm ³)	Huom
UP1.1	41,4	71,8	252,0	3,0	2969,5	41,5	71,8	30,9	91980,0	92,7	C35
UP1.2	41,3	71,6	252,0	3,0	2954,1	41,4	71,4	28,7	84750,0	86,1	C35
UP1.3	41,3	71,9	252,0	3,0	2966,5	41,2	72,0	31,1	92161,7	93,3	C35
UP1.4	41,3	72,0	252,0	3,0	2970,6	41,3	71,5	32,8	96758,4	98,4	C35
UP1.5	41,4	72,0	252,0	3,0	2977,8	41,4	71,9	31,1	92480,8	93,3	C35
UP1.6	41,4	71,9	252,0	3,0	2973,7	41,3	71,6	29,1	85963,7	87,3	C35
UP1.7	41,3	71,3	252,0	3,0	2941,7	41,4	70,9	31,4	92073,0	94,2	C35
UP1.8	41,3	71,9	252,0	3,0	2966,5	41,3	71,7	30,2	89337,9	90,6	C35
UP1.9	41,3	71,9	252,0	3,0	2966,5	41,3	71,9	30,4	90180,7	91,2	C35
UP1.10	40,9	71,8	252,0	6,0	2930,6	40,8	71,8	31,4	91796,0	188,4	C30
UP1.11	40,9	71,7	252,0	6,0	2926,5	40,8	71,7	31,4	91667,9	188,4	C30
UP1.12	40,8	72,0	252,0	6,0	2931,6	40,8	71,9	32,5	95064,4	275,0	C30
UP1.13	41,2	72,4	252,0	6,0	2976,9	41,0	72,3	29,5	87269,9	177,0	C30
UP1.14	40,9	72,2	252,0	6,0	2947,0	40,9	71,9	34,9	102421,4	209,4	C30
UP1.15	40,8	72,3	252,0	6,0	2943,8	40,9	71,9	30,6	89802,1	183,6	C30
UP1.16	41,0	72,0	252,0	6,0	2946,0	40,9	72,0	30,5	89633,4	183,0	C30
UP1.17	40,9	72,1	252,0	6,0	2942,9	40,8	72,0	30,7	90000,1	184,2	C30
UP1.18	40,6	71,8	252,0	6,0	2909,1	40,6	71,8	31,0	90181,5	186,0	C30
UP1.19	41,1	72,3	252,0	6,0	2965,5	41,0	72,3	30,5	90228,2	183,0	C30
UP1.20	41,0	71,9	252,0	6,0	2941,9	40,9	71,8	30,9	90556,2	185,4	C30
UP1.21	40,9	72,1	252,0	6,0	2942,9	41,0	71,9	32,5	95611,8	195,0	C30
UP1.22	41,0	72,3	252,0	6,0	2958,3	41,0	72,1	30,5	89978,1	183,0	C30
UP1.23	41,0	72,2	252,0	6,0	2954,2	40,9	72,0	30,6	89777,3	333,6	C30
UP1.24	41,0	72,0	252,0	6,0	2946,0	40,9	72,0	30,3	89045,6	181,8	C30
UP1.25	41,1	72,3	252,0	6,0	2965,5	41,0	72,2	30,1	88921,4	180,6	C30
UP1.26	47,6	97,6	288,0	6,0	4639,8	47,5	97,4	30,7	141779,4	254,2	C24
UP1.27	47,6	97,3	288,0	6,0	4625,5	47,5	97,2	30,2	139252,2	181,2	C24
UP1.28	47,6	97,2	288,0	6,0	4620,7	47,5	97,1	30,8	141762,5	294,8	C24
UP1.29	47,6	97,4	288,0	6,0	4630,2	47,5	97,4	30,5	140925,3	183,0	C24
UP1.30	47,5	96,6	288,0	6,0	4582,5	47,5	96,7	30,6	140369,9	183,6	C24
UP1.31	47,5	97,3	288,0	6,0	4615,8	47,5	97,2	30,7	141557,7	184,2	C24
UP1.32	47,6	97,3	288,0	6,0	4625,5	47,5	97,2	30,9	142439,9	225,4	C24
UP1.33	47,6	97,0	288,0	6,0	4611,2	47,5	96,7	31,2	143122,2	187,2	C24
UP1.34	47,4	97,1	288,0	6,0	4596,5	47,3	96,9	31,4	143729,4	188,4	C24
UP1.35	47,7	97,4	288,0	6,0	4640,0	47,6	97,2	30,8	142318,2	184,8	C24
UP1.36	47,5	97,5	288,0	6,0	4625,3	47,5	97,4	29,9	138153,0	179,4	C24
UP1.37	47,7	97,4	288,0	6,0	4640,0	47,6	97,2	31,7	146476,8	190,2	C24
UP1.38	47,6	97,3	288,0	6,0	4625,5	47,6	97,2	29,2	134925,0	175,2	C24
UP1.39	47,7	97,4	288,0	6,0	4640,0	47,7	97,3	29,2	135348,1	175,2	C24
UP1.40	47,7	97,4	288,0	6,0	4640,0	47,6	97,3	35,2	162816,9	211,2	C24
UP1.41	47,8	97,6	288,0	6,0	4659,3	47,8	97,4	31,0	144141,3	186,0	C24
UP1.42	47,8	97,7	288,0	6,0	4664,1	47,6	97,4	31,1	144000,5	186,6	C24
UP1.43	47,5	97,2	288,0	6,0	4611,0	47,5	97,1	31,6	145557,5	189,6	C24
UP1.44	47,5	97,3	288,0	6,0	4615,8	47,4	97,0	30,3	139131,5	181,8	C24
UP1.45	47,5	97,4	288,0	6,0	4620,5	47,4	97,3	30,4	140023,0	182,4	C24
UP1.46	47,4	97,3	288,0	6,0	4606,0	47,3	97,1	29,6	135770,2	177,6	C24
UP1.47	47,5	97,2	288,0	6,0	4611,0	47,4	97,4	31,4	144777,9	188,4	C24
UP1.48	47,6	97,4	288,0	6,0	4630,2	47,6	97,4	30,5	141222,3	183,0	C24
UP1.49	47,5	97,1	288,0	6,0	4606,3	47,5	96,9	29,6	136063,8	177,6	C24
UP1.50	47,5	97,2	288,0	6,0	4611,0	47,5	97,1	30,4	140030,0	182,4	C24

Uuden puutavaran koe-erä UP2

Koekappaleen tunnus	PL leveys (mm)	PL korkeus (mm)	Koekappaleen pituus (mm)	Halkeama ym. ala (mm ²)	PL pinta-ala (mm ²)	Viipalennäytteen PL leveys (mm)	Viipalennäytteen PL korkeus (mm)	Viipalennäytteen pituus (mm)	Viipalennäytteen tilavuus (mm ³)	Halkeama ym. tilavuus (mm ³)	Huom
UP2.1	41,9	72,2	252,0	3,0	3022,2	41,8	72,6	28,0	84887,0	84,0	C35
UP2.2	42,0	73,0	252,0	3,0	3063,0	41,8	72,8	25,0	76001,0	75,0	C35
UP2.3	41,9	72,9	252,0	3,0	3051,5	41,8	72,9	24,3	73974,5	72,9	C35
UP2.4	41,7	72,0	252,0	3,0	2999,4	41,6	71,9	23,8	71115,4	71,4	C35
UP2.5	41,9	72,0	252,0	3,0	3013,8	41,9	72,1	30,7	92652,3	92,1	C35
UP2.6	41,9	72,0	252,0	3,0	3013,8	41,8	72,0	29,1	87492,1	87,3	C35
UP2.7	42,0	72,1	252,0	3,0	3025,2	41,9	72,0	31,6	95236,1	94,8	C35
UP2.8	41,9	71,0	252,0	3,0	2971,9	41,9	71,5	30,6	91581,2	91,8	C35
UP2.9	41,4	73,0	252,0	6,0	3016,2	41,4	72,9	30,5	91867,8	183,0	C30
UP2.10	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,5	73,0	30,1	91007,4	180,6	C30
UP2.11	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,5	73,0	30,4	91914,4	182,4	C30
UP2.12	41,6	73,1	252,0	6,0	3035,0	41,4	73,1	30,6	92422,4	183,6	C30
UP2.13	41,5	73,0	252,0	6,0	3023,5	41,4	72,9	30,1	90663,0	180,6	C30
UP2.14	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,4	73,0	25,8	77818,0	154,8	C30
UP2.15	41,5	73,3	252,0	6,0	3036,0	41,4	73,0	29,7	89581,1	178,2	C30
UP2.16	41,2	73,0	252,0	6,0	3001,6	41,4	73,0	31,0	93502,2	186,0	C30
UP2.17	41,4	73,0	252,0	6,0	3016,2	41,3	73,0	29,9	89966,1	179,4	C30
UP2.18	41,4	73,0	252,0	6,0	3016,2	41,4	72,9	30,8	92771,4	184,8	C30
UP2.19	41,4	73,0	252,0	6,0	3016,2	41,5	73,2	30,5	92469,9	183,0	C30
UP2.20	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,5	73,0	31,3	94635,6	187,8	C30
UP2.21	41,4	73,1	252,0	6,0	3020,3	41,3	73,0	27,9	83948,3	167,4	C30
UP2.22	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,5	73,1	29,9	90526,7	179,4	C30
UP2.23	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,4	73,0	29,9	90184,4	179,4	C30
UP2.24	41,5	73,2	252,0	6,0	3031,8	41,5	73,1	30,6	92646,1	183,6	C30
UP2.25	41,5	73,1	252,0	6,0	3027,7	41,5	73,2	31,1	94289,0	186,6	C30
UP2.26	48,1	98,3	288,0	6,0	4722,2	48,2	98,2	30,3	143235,4	181,8	C24
UP2.27	48,2	98,3	288,0	6,0	4732,1	48,0	98,2	30,5	143578,8	186,0	C24
UP2.28	48,0	98,5	288,0	6,0	4722,0	48,1	98,2	30,6	144353,1	183,6	C24
UP2.29	48,0	98,2	288,0	6,0	4707,6	48,0	98,1	30,8	144846,2	184,8	C24
UP2.30	48,0	98,1	288,0	6,0	4702,8	48,0	98,1	31,1	146257,1	186,6	C24
UP2.31	48,3	98,3	288,0	6,0	4741,9	48,1	98,3	31,2	147333,6	187,2	C24
UP2.32	47,9	98,2	288,0	6,0	4697,8	47,9	98,3	30,9	145309,4	185,4	C24
UP2.33	48,2	97,5	288,0	6,0	4693,5	48,1	98,2	30,5	143881,3	183,0	C24
UP2.34	47,9	98,1	288,0	6,0	4693,0	47,9	98,0	30,3	142052,5	181,8	C24
UP2.35	48,0	98,4	288,0	6,0	4717,2	47,9	98,1	31,8	149237,1	190,8	C24
UP2.36	47,8	98,3	288,0	6,0	4692,7	47,7	98,2	30,6	143151,1	183,6	C24
UP2.37	48,1	98,4	288,0	6,0	4727,0	48,1	98,3	29,3	138361,3	175,8	C24
UP2.38	48,2	98,4	288,0	6,0	4736,9	48,0	98,3	31,2	147026,9	187,2	C24
UP2.39	48,1	98,4	288,0	6,0	4727,0	48,1	98,3	31,1	146861,4	186,6	C24
UP2.40	48,3	98,3	288,0	6,0	4741,9	48,1	98,2	31,2	147183,5	187,2	C24
UP2.41	48,1	98,2	288,0	6,0	4717,4	47,9	98,3	30,9	145309,4	185,4	C24
UP2.42	48,1	98,0	288,0	6,0	4707,8	48,1	97,8	30,7	144234,1	184,2	C24
UP2.43	48,3	97,5	288,0	6,0	4703,3	48,3	97,4	31,4	147530,4	188,4	C24
UP2.44	48,2	98,2	288,0	6,0	4727,2	48,1	98,1	30,2	142320,8	181,2	C24
UP2.45	48,2	98,1	288,0	6,0	4722,4	48,0	97,9	30,7	144081,2	184,2	C24
UP2.46	48,1	98,2	288,0	6,0	4717,4	48,1	98,1	31,1	146562,2	186,6	C24
UP2.47	48,3	98,3	288,0	6,0	4741,9	48,1	98,1	30,3	142792,1	181,8	C24
UP2.48	48,2	98,6	288,0	6,0	4746,5	48,1	98,4	31,0	146538,2	186,0	C24
UP2.49	48,2	98,7	288,0	6,0	4751,3	48,2	98,4	31,2	147790,7	187,2	C24
UP2.50	48,4	98,4	288,0	6,0	4756,6	48,2	98,4	30,3	143527,5	181,8	C24

Uuden puutavaran koe-erä UP3

Koekappaleen tunnus	PL leveys (mm)	PL korkeus (mm)	Koekappaleen pituus (mm)	Halkeama ym. ala (mm ²)	PL pinta-ala (mm ²)	Viipalenyhteen PL leveys (mm)	Viipalenyhteen PL korkeus (mm)	Viipalenyhteen pituus (mm)	Viipalenyhteen tilavuus (mm ³)	Halkeama ym. tilavuus (mm ³)	Huom
UP3.1	42,4	74,3	252,0	3,0	3147,3	42,2	74,0	30,6	95465,9	91,8	C35
UP3.2	42,5	74,2	252,0	3,0	3150,5	42,4	74,0	30,1	94351,5	90,3	C35
UP3.3	42,5	74,3	252,0	3,0	3154,8	42,3	74,0	30,3	94754,2	90,9	C35
UP3.4	42,5	73,1	252,0	3,0	3103,8	42,4	73,1	30,7	95060,7	92,1	C35
UP3.5	42,3	74,0	252,0	3,0	3127,2	42,1	73,8	30,6	94981,8	91,8	C35
UP3.6	42,5	73,2	252,0	3,0	3108,0	42,2	73,0	30,6	94174,6	91,8	C35
UP3.7	42,5	72,8	252,0	3,0	3091,0	42,3	72,8	29,6	91062,6	88,8	C35
UP3.8	42,3	73,5	252,0	3,0	3106,1	42,3	73,4	30,3	93985,1	90,9	C35
UP3.9	42,0	74,0	252,0	6,0	3102,0	41,9	73,8	30,9	95364,2	185,4	C30
UP3.10	42,0	73,9	252,0	6,0	3097,8	42,0	73,8	30,7	94973,5	184,2	C30
UP3.11	42,2	74,1	252,0	6,0	3121,0	42,0	73,8	31,3	96829,7	187,8	C30
UP3.12	42,2	74,1	252,0	6,0	3121,0	41,9	73,9	30,4	93948,5	182,4	C30
UP3.13	42,3	74,7	252,0	6,0	3153,8	42,2	74,5	30,3	95078,4	181,8	C30
UP3.14	42,2	74,8	252,0	6,0	3150,6	42,0	74,4	30,8	96059,0	184,8	C30
UP3.15	42,2	74,2	252,0	6,0	3125,2	42,0	74,0	31,0	96162,0	186,0	C30
UP3.16	41,9	74,4	252,0	6,0	3111,4	41,8	74,0	30,6	94468,3	183,6	C30
UP3.17	42,0	73,9	252,0	6,0	3097,8	41,7	73,6	30,1	92199,9	180,6	C30
UP3.18	41,8	73,7	252,0	6,0	3074,7	41,5	73,6	30,5	92976,2	183,0	C30
UP3.19	42,2	74,1	252,0	6,0	3121,0	42,1	74,1	30,5	94965,1	183,0	C30
UP3.20	42,2	73,8	252,0	6,0	3108,4	41,9	73,7	31,0	95542,9	186,0	C30
UP3.21	42,1	74,2	252,0	6,0	3117,8	41,9	74,0	30,6	94694,8	183,6	C30
UP3.22	42,1	74,3	252,0	6,0	3122,0	41,9	74,1	30,6	94823,0	183,6	C30
UP3.23	42,2	74,1	252,0	6,0	3121,0	42,0	73,8	28,2	87239,5	169,2	C30
UP3.24	42,2	74,7	252,0	6,0	3146,3	42,0	74,3	30,3	94352,4	201,8	C30
UP3.25	42,1	74,5	252,0	6,0	3130,5	41,9	74,1	30,6	94823,0	183,6	C30
UP3.26	48,6	99,5	288,0	6,0	4829,7	48,3	99,3	30,5	146100,8	183,0	C24
UP3.27	49,1	99,4	288,0	6,0	4874,5	48,8	99,3	30,9	149551,1	185,4	C24
UP3.28	48,9	99,4	288,0	6,0	4854,7	48,6	99,3	29,7	143153,4	178,2	C24
UP3.29	48,7	99,5	288,0	6,0	4839,7	48,7	99,2	30,3	146198,7	181,8	C24
UP3.30	48,7	99,0	288,0	6,0	4815,3	48,4	98,8	29,8	142322,4	178,8	C24
UP3.31	48,6	99,1	288,0	6,0	4810,3	48,4	99,0	30,9	147875,0	185,4	C24
UP3.32	48,8	100,2	288,0	6,0	4883,8	48,6	99,6	31,3	151321,7	187,8	C24
UP3.33	49,0	99,8	288,0	6,0	4884,2	48,7	99,4	29,7	143593,0	178,2	C24
UP3.34	48,9	100,0	288,0	6,0	4884,0	48,8	99,8	31,0	150791,4	186,0	C24
UP3.35	49,0	99,1	288,0	6,0	4849,9	48,6	98,8	30,7	147227,4	184,2	C24
UP3.36	48,9	99,5	288,0	6,0	4859,6	48,6	99,0	30,8	148006,3	184,8	C24
UP3.37	48,9	99,0	288,0	6,0	4835,1	48,5	98,8	30,5	145966,9	183,0	C24
UP3.38	49,2	99,4	288,0	6,0	4884,5	48,9	99,4	29,9	145154,3	179,4	C24
UP3.39	49,2	99,8	288,0	6,0	4904,2	48,7	99,4	29,9	144559,9	179,4	C24
UP3.40	48,6	99,7	288,0	6,0	4839,4	48,4	99,5	31,0	149103,8	186,0	C24
UP3.41	48,8	99,6	288,0	6,0	4854,5	48,5	99,2	30,2	145117,0	181,2	C24
UP3.42	48,8	99,6	288,0	6,0	4854,5	48,7	99,5	30,8	149061,2	184,8	C24
UP3.43	48,8	99,6	288,0	6,0	4854,5	48,6	99,2	31,3	150713,3	187,8	C24
UP3.44	48,8	99,2	288,0	6,0	4835,0	48,7	99,1	31,0	149425,3	186,0	C24
UP3.45	48,7	99,3	288,0	6,0	4829,9	48,6	99,0	30,6	147045,2	183,6	C24
UP3.46	49,0	99,6	288,0	6,0	4874,4	48,8	99,4	30,9	149701,8	185,4	C24
UP3.47	49,1	99,4	288,0	6,0	4874,5	48,7	99,3	30,7	148278,2	184,2	C24
UP3.48	49,0	99,5	288,0	6,0	4869,5	48,5	99,5	30,4	146520,4	182,4	C24
UP3.49	49,1	100,1	288,0	6,0	4908,9	49,0	99,8	31,1	151898,6	186,6	C24
UP3.50	48,8	99,6	288,0	6,0	4854,5	48,7	99,4	29,9	144559,9	179,4	C24

LIITE B

Koekappaleiden kosteuspitoisuus

Vanhan puutavaran koe-erä VP			
Koekappaleen tunnus	Massa märkänä (g)	Massa kuivana (g)	Kosteuspitoisuus (%)
VP1	158,84	146,22	7,95 %
VP2	269,92	246,59	8,64 %
VP3	312,9	284,75	9,00 %
VP4	275,63	248,98	9,67 %
VP5	290,4	264,75	8,83 %
VP6	300	270,91	9,70 %
VP7	268,78	243,655	9,35 %
VP8	207,93	189,73	8,75 %
VP9	188,04	173,24	7,87 %
VP10	122,97	113,17	7,97 %
VP11	144,27	132,65	8,05 %
VP12	285,41	260,55	8,71 %
VP13	95	87,42	7,98 %
VP14	343,6	309,67	9,87 %
VP15	202,96	186,53	8,10 %
VP16	135,76	124,85	8,04 %
VP17	306,25	276,82	9,61 %
VP18	133,11	120,08	9,79 %
VP19	352,79	320,75	9,08 %
VP20	158,94	143,75	9,56 %
VP21	264,81	241,15	8,93 %
VP22	192,54	175,99	8,60 %
VP23	255,1	231,97	9,07 %
VP24	253,92	230,77	9,12 %
	Keskiarvo		8,84 %
	Keskihajonta		0,66 %

Uuden puutavaran koe-erä UP1			
Koekappaleen tunnus	Massa märkänä (g)	Massa kuivana (g)	Kosteuspitoisuus (%)
UP1.1	39,52	35,13	11,11 %
UP1.2	39,77	35,31	11,21 %
UP1.3	48,59	43,05	11,40 %
UP1.4	49,74	44,15	11,24 %
UP1.5	36,74	32,63	11,19 %
UP1.6	33,87	30,13	11,04 %
UP1.7	38,26	34,01	11,11 %
UP1.8	48,55	42,96	11,51 %
UP1.9	47,42	42,05	11,32 %
UP1.10	43,17	38,37	11,12 %
UP1.11	43,46	38,59	11,21 %
UP1.12	46,14	40,99	11,16 %
UP1.13	35,44	31,63	10,75 %
UP1.14	49,79	44,26	11,11 %
UP1.15	43,72	38,89	11,05 %
UP1.16	38,44	34,13	11,21 %
UP1.17	39,94	35,41	11,34 %
UP1.18	48,47	42,96	11,37 %
UP1.19	39,16	34,82	11,08 %
UP1.20	44,1	39,19	11,13 %
UP1.21	43,23	38,5	10,94 %
UP1.22	42,32	37,69	10,94 %
UP1.23	45,25	40,24	11,07 %
UP1.24	39,53	35,17	11,03 %
UP1.25	38,81	34,52	11,05 %
UP1.26	54,2	48,18	11,11 %
UP1.27	68,35	60,6	11,34 %
UP1.28	57,84	51,44	11,07 %
UP1.29	57,86	51,48	11,03 %
UP1.30	54,78	48,72	11,06 %
UP1.31	59,29	52,74	11,05 %
UP1.32	52,68	46,86	11,05 %
UP1.33	64,66	57,42	11,20 %
UP1.34	77,39	68,84	11,05 %
UP1.35	56,16	50	10,97 %
UP1.36	52,95	47,03	11,18 %
UP1.37	66,01	58,57	11,27 %
UP1.38	56,22	50,02	11,03 %
UP1.39	55,64	49,47	11,09 %
UP1.40	64,69	57,49	11,13 %
UP1.41	62,46	55,41	11,29 %
UP1.42	61,45	54,63	11,10 %
UP1.43	62,92	55,8	11,32 %
UP1.44	59,72	52,92	11,39 %
UP1.45	69,27	61,4	11,36 %
UP1.46	56,28	50,1	10,98 %
UP1.47	70,74	62,72	11,34 %
UP1.48	50,57	44,97	11,07 %
UP1.49	71,59	63,72	10,99 %
UP1.50	74,9	66,53	11,17 %
	Keskiarvo		11,11 %
	Keskihajonta		0,17 %

Uuden puutavaran koe-erä UP2			
Koekappaleen tunnus	Massa märkänä (g)	Massa kuivana (g)	Kosteuspitoisuus (%)
UP2.1	37,65	32,04	14,90 %
UP2.2	32,41	27,63	14,75 %
UP2.3	38,57	32,57	15,56 %
UP2.4	29,15	24,73	15,16 %
UP2.5	37,04	31,55	14,82 %
UP2.6	37,24	31,78	14,66 %
UP2.7	40,19	34,32	14,61 %
UP2.8	47,78	40,51	15,22 %
UP2.9	43,93	37,11	15,52 %
UP2.10	44,57	37,86	15,05 %
UP2.11	37,79	32,47	14,08 %
UP2.12	36,3	31,27	13,86 %
UP2.13	45,29	38,21	15,63 %
UP2.14	39,8	33,85	14,95 %
UP2.15	40,2	34,25	14,80 %
UP2.16	42,22	35,62	15,63 %
UP2.17	48,58	41,1	15,40 %
UP2.18	50,75	42,97	15,33 %
UP2.19	43,93	37,23	15,25 %
UP2.20	44,15	37,56	14,93 %
UP2.21	38,85	32,92	15,26 %
UP2.22	42,92	36,55	14,84 %
UP2.23	38,51	32,85	14,70 %
UP2.24	40,57	34,68	14,52 %
UP2.25	41,94	35,83	14,57 %
UP2.26	57,88	49,48	14,51 %
UP2.27	70,29	60,14	14,44 %
UP2.28	61,2	52,48	14,25 %
UP2.29	55,66	47,29	15,04 %
UP2.30	71,8	61,36	14,54 %
UP2.31	63,11	53,93	14,55 %
UP2.32	55,57	47,59	14,36 %
UP2.33	65,94	56,29	14,63 %
UP2.34	76,97	65,76	14,56 %
UP2.35	56,57	48,3	14,62 %
UP2.36	55,1	47,2	14,34 %
UP2.37	60,76	51,98	14,45 %
UP2.38	65,09	55,48	14,76 %
UP2.39	62,52	53,41	14,57 %
UP2.40	61,32	52,41	14,53 %
UP2.41	61	52,11	14,57 %
UP2.42	62,67	53,72	14,28 %
UP2.43	62,8	53,96	14,08 %
UP2.44	62,01	52,8	14,85 %
UP2.45	63,44	54,02	14,85 %
UP2.46	74,77	63,94	14,48 %
UP2.47	70,33	60,04	14,63 %
UP2.48	52,49	44,86	14,54 %
UP2.49	78,81	67,68	14,12 %
UP2.50	78,74	67,46	14,33 %
		Keskiarvo	14,76 %
		Keskihajonta	0,42 %

Uuden puutavaran koe-erä UP3			
Koekappaleen tunnus	Massa märkänä (g)	Massa kuivana (g)	Kosteuspitoisuus (%)
UP3.1	47,37	37,82	20,16 %
UP3.2	52,1	41,54	20,27 %
UP3.3	53,8	43,09	19,91 %
UP3.4	50,47	40,33	20,09 %
UP3.5	39,69	31,58	20,43 %
UP3.6	41,39	33,3	19,55 %
UP3.7	48,81	39,02	20,06 %
UP3.8	51,44	41,57	19,19 %
UP3.9	46,96	37,82	19,46 %
UP3.10	47,46	38,47	18,94 %
UP3.11	40,32	32,89	18,43 %
UP3.12	47,35	38,14	19,45 %
UP3.13	49,1	38,58	21,43 %
UP3.14	43,9	34,86	20,59 %
UP3.15	43,68	34,61	20,76 %
UP3.16	43,85	35,18	19,77 %
UP3.17	50,82	40,79	19,74 %
UP3.18	49,34	39,64	19,66 %
UP3.19	45,68	36,59	19,90 %
UP3.20	44,58	36,05	19,13 %
UP3.21	47,21	38,35	18,77 %
UP3.22	46,58	37,61	19,26 %
UP3.23	38,99	31,36	19,57 %
UP3.24	42,69	34,26	19,75 %
UP3.25	43,01	34,93	18,79 %
UP3.26	61,01	49,9	18,21 %
UP3.27	74,86	60,67	18,96 %
UP3.28	61,71	50,63	17,95 %
UP3.29	63,06	51,49	18,35 %
UP3.30	63,94	52,23	18,31 %
UP3.31	67	54,89	18,07 %
UP3.32	60,79	48,92	19,53 %
UP3.33	64,13	51,86	19,13 %
UP3.34	83,43	67,76	18,78 %
UP3.35	57,9	47,14	18,58 %
UP3.36	58,4	47,78	18,18 %
UP3.37	62,01	50,48	18,59 %
UP3.38	65,84	53,27	19,09 %
UP3.39	64,57	51,95	19,54 %
UP3.40	65,67	53,54	18,47 %
UP3.41	61,7	49,81	19,27 %
UP3.42	69,44	55,84	19,59 %
UP3.43	66,71	54,11	18,89 %
UP3.44	67,72	54,8	19,08 %
UP3.45	66,94	54,13	19,14 %
UP3.46	76,58	62,21	18,76 %
UP3.47	74,59	60,86	18,41 %
UP3.48	54,39	43,99	19,12 %
UP3.49	82,13	66,91	18,53 %
UP3.50	81,22	66,01	18,73 %
		Keskiarvo	19,29 %
		Keskihajonta	0,74 %

LIITE C

Koekappaleiden Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyys

Vanhan puutavaran koe-erä VP

Koekappaleen tunnus	Pilodyn lukema 1 (mm)	Pilodyn lukema 2 (mm)	Pilodyn lukema 3 (mm)	Pilodyn lukema 4 (mm)	Pilodyn lukema keskiarvo (mm)	Kosteuskorjattu Pilodyn lukema keskiarvo (mm)
VP1	18,5	17,3	18,5	17	17,8	18,8
VP2	14,7	16,3	15,5	15,3	15,5	16,3
VP3	14	24	15,7	15,5	17,3	18,2
VP4	18,5	14,5	13,7	11,7	14,6	15,4
VP5	15,7	19,5	14	14,7	16,0	16,8
VP6	12	14,5	12,1	13,2	13,0	13,6
VP7	14,7	14,3	13,5	10,5	13,3	14,0
VP8	19	15,7	15	20,3	17,5	18,4
VP9	16,6	17,5	13,7	18,7	16,6	17,5
VP10	18,3	15,3	17,2	18,3	17,3	18,2
VP11	17	19	17	18	17,8	18,7
VP12	17	15,8	17	16,5	16,6	17,5
VP13	14,5	17,3	15,7	19	16,6	17,5
VP14	18	18,4	15,3	17	17,2	18,1
VP15	18	16,3	16,5	16,5	16,8	17,7
VP16	18,7	17	15,7	19,3	17,7	18,6
VP17	17	18,9	17,2	17	17,5	18,5
VP18	16,8	21	14,5	15,5	17,0	17,9
VP19	15,3	15,8	17,3	16,6	16,3	17,1
VP20	19	17,3	15,3	14,3	16,5	17,4
VP21	17	18	17,8	15,5	17,1	18,0
VP22	16,5	17,7	17,3	16,7	17,1	18,0
VP23	14,5	15,5	14,7	17	15,4	16,3
VP24	17,4	15,7	17,8	18,5	17,4	18,3
				Keskiarvo	16,5	17,4
				Keskihajonta	1,3	1,4

Uuden puutavaran koe-erä UP1

Koekappaleen tunnus	Pilodyn lukema 1 (mm)	Pilodyn lukema 2 (mm)	Pilodyn lukema 3 (mm)	Pilodyn lukema 4 (mm)	Pilodyn lukema keskiarvo (mm)	Kosteuskorjattu Pilodyn lukema keskiarvo (mm)
UP1.1	14	14	14,8	11,3	13,5	13,7
UP1.2	11,3	11,7	11,3	16,2	12,6	12,8
UP1.3	11,6	11,5	12,2	11,5	11,7	11,9
UP1.4	12,1	10,8	12,6	10,2	11,4	11,6
UP1.5	15,3	15,6	14,3	16,8	15,5	15,7
UP1.6	15,8	14,8	17,5	13,5	15,4	15,6
UP1.7	15,6	15,8	15,5	12	14,7	14,9
UP1.8	12	10,4	12,3	9,8	11,1	11,3
UP1.9	11,5	12,8	11	9,7	11,3	11,4
UP1.10	15,4	14,4	12,5	12,2	13,6	13,8
UP1.11	13,3	13,8	12,8	11,3	12,8	13,0
UP1.12	14,3	13	10,9	11,7	12,5	12,7
UP1.13	17,5	17,1	14,4	16,6	16,4	16,6
UP1.14	13,9	12,7	10,3	10,8	11,9	12,1
UP1.15	13,6	12,8	11,7	10,8	12,2	12,4
UP1.16	18	13,8	13,3	12,7	14,5	14,7
UP1.17	15,5	13,1	13,3	12,3	13,6	13,8
UP1.18	11,4	12,8	9,2	10,5	11,0	11,1
UP1.19	15,3	13,8	13	12,3	13,6	13,8
UP1.20	14,1	15	12,5	13,6	13,8	14,0
UP1.21	13,5	13,9	12,2	12,3	13,0	13,2
UP1.22	14,6	14	11,7	14,2	13,6	13,8
UP1.23	12,5	15,2	10,8	12	12,6	12,8
UP1.24	14,4	13,3	10	12,3	12,5	12,7
UP1.25	15,8	13,5	11,8	12,2	13,3	13,5
UP1.26	18	15,1	14,3	16,8	16,1	16,3
UP1.27	15	12,8	12,3	12,3	13,1	13,3
UP1.28	16,3	17,9	13,4	14,5	15,5	15,8
UP1.29	17,2	19,6	14,8	12,5	16,0	16,3
UP1.30	17,4	17,9	17,4	16,6	17,3	17,6
UP1.31	19	14,3	13,6	16	15,7	16,0
UP1.32	21,2	16,4	16,9	18,3	18,2	18,5
UP1.33	15,3	15,3	12,1	12,8	13,9	14,1
UP1.34	13,2	12,6	13	13,2	13,0	13,2
UP1.35	17,1	17,1	17,7	18	17,5	17,7
UP1.36	16,8	17,6	16,9	17,8	17,3	17,5
UP1.37	15,9	14,2	16,5	14,8	15,4	15,6
UP1.38	16,3	16,5	14,4	18,5	16,4	16,7
UP1.39	18,8	14,6	18,5	17,3	17,3	17,6
UP1.40	17,3	16,3	15,7	16,5	16,5	16,7
UP1.41	15,3	15,3	15	14,8	15,1	15,3
UP1.42	12,5	17	13,4	16,3	14,8	15,0
UP1.43	17,9	13,8	14,3	15,2	15,3	15,5
UP1.44	16,9	16,4	15,3	15,8	16,1	16,3
UP1.45	12,4	13,6	13,7	13,5	13,3	13,5
UP1.46	17,1	14,5	15,6	16,4	15,9	16,1
UP1.47	14,7	12,4	14,2	13,3	13,7	13,9
UP1.48	20,2	15	17,6	21	18,5	18,7
UP1.49	11,6	12,9	10,8	12	11,8	12,0
UP1.50	14,1	12,5	10,3	10	11,7	11,9
				Keskiarvo	14,3	14,5
				Keskihajonta	2,0	2,0

Uuden puutavaran koe-erä UP2

Koekappaleen tunnus	Pilodyn lukema 1 (mm)	Pilodyn lukema 2 (mm)	Pilodyn lukema 3 (mm)	Pilodyn lukema 4 (mm)	Pilodyn lukema keskiarvo (mm)	Kosteuskorjattu Pilodyn lukema keskiarvo (mm)
UP2.1	15	14,3	16,3	15	15,2	14,4
UP2.2	14,7	14,7	14,6	12,5	14,1	13,5
UP2.3	12,2	13,2	14,5	11,3	12,8	12,2
UP2.4	17,3	18,5	13,7	12,2	15,4	14,7
UP2.5	17,2	15	23	12,8	17,0	16,2
UP2.6	14,3	18,2	12,3	15	15,0	14,2
UP2.7	16,5	16	14,7	14,3	15,4	14,7
UP2.8	12	12,5	11	15,3	12,7	12,1
UP2.9	15,7	16,3	16	15,4	15,9	15,1
UP2.10	14,7	15,3	11,3	14,2	13,9	13,2
UP2.11	18,2	18,5	13,8	15,8	16,6	15,8
UP2.12	16,5	17,7	18,3	14,5	16,8	16,0
UP2.13	13,5	14,2	11,2	11,7	12,7	12,1
UP2.14	14,3	14	11,1	12,2	12,9	12,3
UP2.15	16,2	14,3	14	15,3	15,0	14,2
UP2.16	15,5	14,7	14,8	14,7	14,9	14,2
UP2.17	13,8	14,8	11,3	10	12,5	11,9
UP2.18	13,4	12,8	12,8	10,7	12,4	11,8
UP2.19	16,7	15	14,3	16,5	15,6	14,9
UP2.20	15	14,7	14	13	14,2	13,5
UP2.21	15,3	14,3	13,5	14,8	14,5	13,8
UP2.22	15	14,8	12,5	12,8	13,8	13,1
UP2.23	15,4	15,8	13,3	14,9	14,9	14,2
UP2.24	14,2	15,6	13,5	12	13,8	13,2
UP2.25	14,7	15,2	12	12,3	13,6	12,9
UP2.26	17	21,5	17,2	16,2	18,0	17,1
UP2.27	15,5	16,8	13,7	12	14,5	13,8
UP2.28	17,2	19,5	14,7	15,4	16,7	15,9
UP2.29	18,8	18	15	19	17,7	16,9
UP2.30	15	17	14,5	13,6	15,0	14,3
UP2.31	17,7	16,8	15,6	15,3	16,4	15,6
UP2.32	18,3	22,8	17,3	14,8	18,3	17,4
UP2.33	15,3	17,3	12,8	13,2	14,7	14,0
UP2.34	11,5	12,3	12,5	11,2	11,9	11,3
UP2.35	19,7	20,7	18,3	21,3	20,0	19,1
UP2.36	19	17,3	17	17	17,6	16,8
UP2.37	15,7	16,4	15,7	16,5	16,1	15,3
UP2.38	16,8	16,7	17,5	18	17,3	16,4
UP2.39	15,8	16,3	17,7	19,9	17,4	16,6
UP2.40	20,8	18,7	17	17,3	18,5	17,6
UP2.41	18,2	16,3	16,9	14,9	16,6	15,8
UP2.42	17,5	14,3	14,5	16	15,6	14,8
UP2.43	16,3	15,8	16,8	13,9	15,7	15,0
UP2.44	17,2	17,7	17	13,8	16,4	15,7
UP2.45	17,7	17,4	15,3	14,8	16,3	15,5
UP2.46	13	13,6	11,8	11,8	12,6	12,0
UP2.47	15,3	13	12,2	12,3	13,2	12,6
UP2.48	17,5	19,7	18,7	19,5	18,9	18,0
UP2.49	12,8	12	11,2	11,5	11,9	11,3
UP2.50	15,3	13,8	11,3	11,5	13,0	12,4
					Keskiarvo	14,5
					Keskihajonta	1,9

Uuden puutavaran koe-erä UP3

Koekappaleen tunnus	Pilodyn lukema 1 (mm)	Pilodyn lukema 2 (mm)	Pilodyn lukema 3 (mm)	Pilodyn lukema 4 (mm)	Pilodyn lukema keskiarvo (mm)	Kosteuskorjattu Pilodyn lukema keskiarvo (mm)
UP3.1	15,3	15,5	18	15	16,0	14,0
UP3.2	15,4	13,9	16,3	13,9	14,9	13,0
UP3.3	14,8	13,9	15,5	14,3	14,6	12,8
UP3.4	14,8	15,6	14,3	16,2	15,2	13,3
UP3.5	18,1	20,1	18,1	15,9	18,1	15,8
UP3.6	16,9	18,8	15,6	16,3	16,9	14,8
UP3.7	13,3	15,1	15,4	12,5	14,1	12,3
UP3.8	13,1	13,5	14,6	12	13,3	11,7
UP3.9	17	15,9	16,4	18,2	16,9	14,8
UP3.10	13,8	16,5	13,5	15,3	14,8	12,9
UP3.11	19,8	17,5	17,6	17,2	18,0	15,8
UP3.12	14,4	16,5	13,3	13	14,3	12,5
UP3.13	15	17,1	15,1	15,7	15,7	13,8
UP3.14	18	17,6	18,4	18,3	18,1	15,8
UP3.15	18,2	17,3	16	19	17,6	15,4
UP3.16	16,8	16,5	16	18	16,8	14,7
UP3.17	14,9	15	12,9	12,9	13,9	12,2
UP3.18	16	13,6	16	15	15,2	13,3
UP3.19	17,6	16,9	17,8	16,4	17,2	15,0
UP3.20	16,6	17,9	14,9	16,2	16,4	14,4
UP3.21	15,6	16,5	15,4	15,8	15,8	13,9
UP3.22	16,6	16,3	15,3	15,8	16,0	14,0
UP3.23	18,5	20,5	17,5	17,3	18,5	16,2
UP3.24	17,8	18	15,8	15	16,7	14,6
UP3.25	15,8	16,9	16,4	15,4	16,1	14,1
UP3.26	18,3	21,2	19	19,5	19,5	17,1
UP3.27	16,8	14,6	14,3	15,3	15,3	13,4
UP3.28	18	17,3	16,3	18,6	17,6	15,4
UP3.29	18,3	21,3	18,9	19	19,4	17,0
UP3.30	18,9	17,4	17,8	18,6	18,2	15,9
UP3.31	17,5	18,3	18	17,8	17,9	15,7
UP3.32	22,6	21,3	19,2	21,8	21,2	18,6
UP3.33	19,8	18,1	20	18	19,0	16,6
UP3.34	14	15,1	14,4	12,8	14,1	12,3
UP3.35	18,8	19,4	19	21,3	19,6	17,2
UP3.36	20,6	22,1	20,4	19,3	20,6	18,0
UP3.37	20,9	21,4	18,5	21,1	20,5	17,9
UP3.38	21	16,5	17,8	17,5	18,2	15,9
UP3.39	18,6	16,9	18,8	20,8	18,8	16,4
UP3.40	18,9	20	18,9	16,4	18,6	16,3
UP3.41	19,4	18,4	18,5	18,5	18,7	16,4
UP3.42	18,1	19,2	16,6	16,5	17,6	15,4
UP3.43	19,5	17,4	17,8	16,3	17,8	15,6
UP3.44	17,1	15,7	18,1	17,5	17,1	15,0
UP3.45	17	16,1	15,5	17,8	16,6	14,5
UP3.46	13,5	18,1	13,1	13,5	14,6	12,7
UP3.47	14,3	18,5	13,8	13,9	15,1	13,3
UP3.48	19,5	22,1	20,9	23,7	21,6	18,9
UP3.49	13,9	16,3	12,5	14,3	14,3	12,5
UP3.50	13,1	14	14,1	13	13,6	11,9
				Keskiarvo	16,9	14,8
				Keskihajonta	2,1	1,8

LIITE D

Koekappaleiden tiheys

Vanhan puutavaran koe-erä VP				
Koekappaleen tunnus	Viipalenyttien tilavuus (mm3)	Massa märkänä (g)	Tiheys (kg/m3)	Kosteuskorjattu tiheyden arvo (kg/m3)
VP1	401398,72	158,84	395,72	401,97
VP2	492612,21	269,92	547,94	556,59
VP3	681328,02	312,90	459,25	466,51
VP4	543286,88	275,63	507,34	515,35
VP5	648114,78	290,40	448,07	455,15
VP6	551542,60	300,00	543,93	552,52
VP7	425187,81	268,78	632,14	642,13
VP8	481181,60	207,93	432,12	438,95
VP9	447551,04	188,04	420,15	426,79
VP10	309532,84	122,97	397,28	403,55
VP11	361945,84	144,27	398,60	404,89
VP12	580533,06	285,41	491,63	499,40
VP13	222454,00	95,00	427,05	433,80
VP14	839759,35	343,60	409,16	415,63
VP15	509658,88	202,96	398,23	404,52
VP16	350970,34	135,76	386,81	392,92
VP17	749287,45	306,25	408,72	415,18
VP18	306665,55	133,11	434,06	440,91
VP19	837854,84	352,79	421,06	427,72
VP20	394701,50	158,94	402,68	409,05
VP21	615506,90	264,81	430,23	437,03
VP22	442646,02	192,54	434,98	441,85
VP23	554711,62	255,10	459,88	467,14
VP24	543861,10	253,92	466,88	474,26
	Keskiarvo		448,08	455,16
	Keskihajonta		59,38	60,32

Uuden puutavara koe-erä UP1				
Koekappaleen tunnus	Viipalenyttien tilavuus (mm3)	Massa märkänä (g)	Tiheys (kg/m3)	Kosteuskorjattu tiheyden arvo (kg/m3)
UP1.1	91980,03	39,52	429,66	431,57
UP1.2	84749,95	39,77	469,26	471,35
UP1.3	92161,74	48,59	527,23	529,57
UP1.4	96758,36	49,74	514,06	516,35
UP1.5	92480,83	36,74	397,27	399,04
UP1.6	85963,73	33,87	394,00	395,76
UP1.7	92072,96	38,26	415,54	417,39
UP1.8	89337,94	48,55	543,44	545,86
UP1.9	90180,69	47,42	525,83	528,17
UP1.10	91796,02	43,17	470,28	472,37
UP1.11	91667,90	43,46	474,10	476,21
UP1.12	95064,40	46,14	485,36	487,52
UP1.13	87269,85	35,44	406,10	407,90
UP1.14	102421,38	49,79	486,13	488,29
UP1.15	89802,13	43,72	486,85	489,01
UP1.16	89633,40	38,44	428,86	430,77
UP1.17	90000,12	39,94	443,78	445,75
UP1.18	90181,48	48,47	537,47	539,86
UP1.19	90228,15	39,16	434,01	435,94
UP1.20	90556,16	44,10	486,99	489,16
UP1.21	95611,75	43,23	452,14	454,15
UP1.22	89978,05	42,32	470,34	472,43
UP1.23	89777,28	45,25	504,03	506,27
UP1.24	89045,64	39,53	443,93	445,91
UP1.25	88921,42	38,81	436,45	438,39
UP1.26	141779,35	54,20	382,28	383,99
UP1.27	139252,20	68,35	490,84	493,02
UP1.28	141762,50	57,84	408,01	409,82
UP1.29	140925,25	57,86	410,57	412,40
UP1.30	140369,85	54,78	390,25	391,99
UP1.31	141557,70	59,29	418,84	420,70
UP1.32	142439,90	52,68	369,84	371,49
UP1.33	143122,20	64,66	451,78	453,79
UP1.34	143729,42	77,39	538,44	540,84
UP1.35	142318,18	56,16	394,61	396,36
UP1.36	138152,95	52,95	383,27	384,98
UP1.37	146476,82	66,01	450,65	452,66
UP1.38	134925,02	56,22	416,68	418,53
UP1.39	135348,13	55,64	411,09	412,92
UP1.40	162816,90	64,69	397,32	399,09
UP1.41	144141,32	62,46	433,32	435,25
UP1.42	144000,46	61,45	426,73	428,63
UP1.43	145557,50	62,92	432,27	434,19
UP1.44	139131,54	59,72	429,23	431,14
UP1.45	140023,01	69,27	494,70	496,91
UP1.46	135770,17	56,28	414,52	416,37
UP1.47	144777,86	70,74	488,61	490,78
UP1.48	141222,32	50,57	358,09	359,68
UP1.49	136063,80	71,59	526,15	528,49
UP1.50	140030,00	74,90	534,89	537,27
	Keskiarvo		450,32	452,33
	Keskihajonta		49,82	50,04

Uuden puutavara koe-erä UP2				
Koekappaleen tunnus	Viipalenyttien tilavuus (mm ³)	Massa märkänä (g)	Tiheys (kg/m ³)	Kosteuskorjattu tiheyden arvo (kg/m ³)
UP2.1	84887,04	37,65	443,53	437,41
UP2.2	76001,00	32,41	426,44	420,56
UP2.3	73974,55	38,57	521,40	514,20
UP2.4	71115,35	29,15	409,90	404,24
UP2.5	92652,29	37,04	399,77	394,26
UP2.6	87492,06	37,24	425,64	419,76
UP2.7	95236,08	40,19	422,00	416,18
UP2.8	91581,21	47,78	521,72	514,52
UP2.9	91867,83	43,93	478,19	471,59
UP2.10	91007,35	44,57	489,74	482,98
UP2.11	91914,40	37,79	411,14	405,47
UP2.12	92422,40	36,30	392,76	387,34
UP2.13	90663,01	45,29	499,54	492,65
UP2.14	77817,96	39,80	511,45	504,39
UP2.15	89581,14	40,20	448,76	442,56
UP2.16	93502,20	42,22	451,54	445,31
UP2.17	89966,11	48,58	539,98	532,53
UP2.18	92771,45	50,75	547,04	539,49
UP2.19	92469,90	43,93	475,07	468,52
UP2.20	94635,55	44,15	466,53	460,09
UP2.21	83948,31	38,85	462,78	456,40
UP2.22	90526,74	42,92	474,11	467,57
UP2.23	90184,38	38,51	427,01	421,12
UP2.24	92646,09	40,57	437,90	431,86
UP2.25	94288,98	41,94	444,80	438,66
UP2.26	143235,37	57,88	404,09	398,51
UP2.27	143578,80	70,29	489,56	482,80
UP2.28	144353,05	61,20	423,96	418,11
UP2.29	144846,24	55,66	384,27	378,97
UP2.30	146257,08	71,80	490,92	484,14
UP2.31	147333,58	63,11	428,35	422,44
UP2.32	145309,41	55,57	382,43	377,15
UP2.33	143881,31	65,94	458,29	451,97
UP2.34	142052,46	76,97	541,84	534,36
UP2.35	149237,08	56,57	379,06	373,83
UP2.36	143151,08	55,10	384,91	379,60
UP2.37	138361,34	60,76	439,14	433,08
UP2.38	147026,88	65,09	442,71	436,60
UP2.39	146861,35	62,52	425,71	419,83
UP2.40	147183,50	61,32	416,62	410,87
UP2.41	145309,41	61,00	419,79	414,00
UP2.42	144234,13	62,67	434,50	428,51
UP2.43	147530,39	62,80	425,68	419,80
UP2.44	142320,82	62,01	435,71	429,69
UP2.45	144081,24	63,44	440,31	434,23
UP2.46	146562,17	74,77	510,16	503,12
UP2.47	142792,08	70,33	492,53	485,74
UP2.48	146538,24	52,49	358,20	353,26
UP2.49	147790,66	78,81	533,25	525,90
UP2.50	143527,46	78,74	548,61	541,04
		Keskiarvo	452,39	446,14
		Keskihajonta	48,84	48,17

Uuden puutavara koe-erä UP3				
Koekappaleen tunnus	Viipalenyttien tilavuus (mm ³)	Massa märkänä (g)	Tiheys (kg/m ³)	Kosteuskorjattu tiheyden arvo (kg/m ³)
UP3.1	95465,88	47,37	496,20	478,11
UP3.2	94351,46	52,10	552,19	532,06
UP3.3	94754,16	53,80	567,79	547,09
UP3.4	95060,71	50,47	530,92	511,57
UP3.5	94981,79	39,69	417,87	402,64
UP3.6	94174,56	41,39	439,50	423,48
UP3.7	91062,62	48,81	536,00	516,47
UP3.8	93985,15	51,44	547,32	527,37
UP3.9	95364,20	46,96	492,43	474,48
UP3.10	94973,52	47,46	499,72	481,50
UP3.11	96829,68	40,32	416,40	401,22
UP3.12	93948,46	47,35	504,00	485,63
UP3.13	95078,37	49,10	516,42	497,59
UP3.14	96059,04	43,90	457,01	440,35
UP3.15	96162,00	43,68	454,23	437,68
UP3.16	94468,32	43,85	464,18	447,26
UP3.17	92199,91	50,82	551,19	531,10
UP3.18	92976,20	49,34	530,67	511,33
UP3.19	94965,11	45,68	481,02	463,49
UP3.20	95542,93	44,58	466,60	449,59
UP3.21	94694,76	47,21	498,55	480,38
UP3.22	94822,97	46,58	491,23	473,33
UP3.23	87239,52	38,99	446,93	430,64
UP3.24	94352,38	42,69	452,45	435,96
UP3.25	94822,97	43,01	453,58	437,05
UP3.26	146100,80	61,01	417,59	402,37
UP3.27	149551,06	74,86	500,56	482,32
UP3.28	143153,41	61,71	431,08	415,36
UP3.29	146198,71	63,06	431,33	415,61
UP3.30	142322,42	63,94	449,26	432,89
UP3.31	147875,04	67,00	453,09	436,57
UP3.32	151321,73	60,79	401,73	387,08
UP3.33	143592,97	64,13	446,61	430,33
UP3.34	150791,44	83,43	553,28	533,11
UP3.35	147227,38	57,90	393,27	378,93
UP3.36	148006,32	58,40	394,58	380,20
UP3.37	145966,90	62,01	424,82	409,34
UP3.38	145154,33	65,84	453,59	437,05
UP3.39	144559,92	64,57	446,67	430,39
UP3.40	149103,80	65,67	440,43	424,38
UP3.41	145117,04	61,70	425,17	409,68
UP3.42	149061,22	69,44	465,85	448,87
UP3.43	150713,26	66,71	442,63	426,49
UP3.44	149425,27	67,72	453,20	436,68
UP3.45	147045,24	66,94	455,23	438,64
UP3.46	149701,85	76,58	511,55	492,90
UP3.47	148278,24	74,59	503,04	484,70
UP3.48	146520,40	54,39	371,21	357,68
UP3.49	151898,62	82,13	540,69	520,98
UP3.50	144559,92	81,22	561,84	541,36
		Keskiarvo	472,65	455,43
		Keskihajonta	49,34	47,54

LIITE E

Koekappaleiden puristuslujuus

Vanhan puutavaran koe-erä VP						
Koekappaleen tunnus	PL pinta-ala (mm ²)	Puristus murto- tokuorma (kN)	Kuormitusaika	Murtotapa	Puristuslujuus (N/mm ²)	Kosteuskorjattu puristus- lujuuden arvo (N/mm ²)
VP1	13230,00	484,02	6min 13s	Oksan kohta.	36,59	26,76
VP2	19187,85	865,49	5min 27s	Oksan kohta.	45,11	32,99
VP3	20259,12	707,58	4min 28s	Oksan kohta.	34,93	25,55
VP4	17632,00	782,52	7min 28s*	Oksan kohta.	44,38	32,46
VP5	25233,90	888,84	3min 57s	Oksan kohta.	35,22	25,76
VP6	18448,00	927,24	6min 34s	Oksan kohta.	50,26	36,76
VP7	25154,79	1205,40	5min 23s	Kulmat lohkesivat. Lähes koko kappale tuhoutui.	47,92	35,05
VP8	15447,03	472,97	4min 18s	Oksan kohta.	30,62	22,39
VP9	16042,50	651,51	4min 35s	Oksan kohta.	40,61	29,70
VP10	12312,00	372,15	4min 43s	Oksan kohta.	30,23	22,11
VP11	12312,00	449,51	5min 40s	Osin puhdas osin oksan kohta.	36,51	26,70
VP12	18582,62	835,99	5min 10s	Oksan kohta.	44,99	32,90
VP13	9000,00	364,91	4min 40s	Osin halkeama repesi osin puhdas.	40,55	29,66
VP14	27228,85	815,36	3min 35s	Oksan kohta.	29,94	21,90
VP15	17244,64	573,43	3min 37s	Oksan kohta.	33,25	24,32
VP16	11600,00	404,67	5min 18s	Osin halkeama repesi osin oksan kohta.	34,89	25,52
VP17	24008,58	823,25	3min 41s	Oksan kohta.	34,29	25,08
VP18	11712,00	398,74	5min 10s	Oksan kohta.	34,05	24,90
VP19	26017,44	816,48	3min 43s	Oksan kohta.	31,38	22,95
VP20	12840,00	382,52	4min 42s	Oksan kohta.	29,79	21,79
VP21	16821,93	674,21	4min 13s	Oksan kohta.	40,08	29,31
VP22	14828,90	606,69	4min 37s	Oksan kohta.	40,91	29,92
VP23	18289,70	696,75	4min 24s	Oksan kohta.	38,10	27,86
VP24	17540,16	515,41	3min 10s	Oksan kohta.	29,38	21,49
				Keskiarvo	37,25	27,24
				Keskihajonta	6,08	4,45

*) Puristusmurto tapahtunut sallitun kuormitusajan ulkopuolella.

Uuden puutavaran koe-erä UP1						
Koekappaleen tunnus	PL pinta-ala (mm ²)	Puristus murtokuorma (kN)	Kuormitus aika	Murtotapa	Puristuslujuus (N/mm ²)	Kosteuskorjattu puristuslujuuden arvo (N/mm ²)
UP1.1	2969,52	110,88	3min 52s	Osin puhdas osin oksan kohta.	37,34	34,51
UP1.2	2954,08	128,87	4min 39s	Puhdas.	43,62	40,32
UP1.3	2966,47	145,68	5min 8s	Osin puhdas osin oksan kohta.	49,11	45,39
UP1.4	2970,60	146,15	5min 3s	Oksan kohta.	49,20	45,48
UP1.5	2977,80	100,08	3min 40s	Oksan kohta.	33,61	31,06
UP1.6	2973,66	103,41	3min 54s	Puhdas.	34,77	32,14
UP1.7	2941,69	110,21	4min 1s	Oksan kohta.	37,47	34,63
UP1.8	2966,47	147,81	5min 16s	Oksan kohta.	49,83	46,06
UP1.9	2966,47	148,81	5min 17s	Oksan kohta.	50,17	46,37
UP1.10	2930,62	131,15	4min 46s	Puhdas.	44,75	41,37
UP1.11	2926,53	130,57	4min 40s	Puhdas.	44,62	41,24
UP1.12	2931,60	129,86	4min 43s	Puhdas.	44,30	40,95
UP1.13	2976,88	112,51	3min 55s	Puhdas.	37,79	34,94
UP1.14	2946,98	136,87	4min 54s	Puhdas.	46,44	42,93
UP1.15	2943,84	138,08	4min 56s	Osin puhdas osin oksan kohta.	46,90	43,36
UP1.16	2946,00	113,65	3min 49s	Puhdas.	38,58	35,66
UP1.17	2942,89	102,39	3min 33s	Oksan kohta.	34,79	32,16
UP1.18	2909,08	134,71	4min 35s	Oksan kohta.	46,31	42,80
UP1.19	2965,53	115,33	3min 53s	Oksan kohta.	38,89	35,95
UP1.20	2941,90	134,69	4min 30s	Osin puhdas osin oksan kohta.	45,78	42,32
UP1.21	2942,89	120,84	4min 7s	Oksan kohta.	41,06	37,96
UP1.22	2958,30	122,36	4min 12s	Puhdas.	41,36	38,23
UP1.23	2954,20	118,89	4min 4s	Puhdas.	40,24	37,20
UP1.24	2946,00	112,52	3min 47s	Puhdas.	38,19	35,31
UP1.25	2965,53	121,52	4min 7s	Puhdas.	40,98	37,88
UP1.26	4639,76	161,69	4min	Puhdas.	34,85	32,21
UP1.27	4625,48	211,81	5min 17s	Puhdas.	45,79	42,33
UP1.28	4620,72	179,53	4min 28s	Puhdas.	38,85	35,91
UP1.29	4630,24	180,55	4min 31s	Puhdas.	38,99	36,04
UP1.30	4582,50	153,80	3min 49s	Oksan kohta.	33,56	31,02
UP1.31	4615,75	175,96	4min 29s	Osin puhdas osin oksan kohta.	38,12	35,24
UP1.32	4625,48	132,51	3min 15s	Oksan kohta.	28,65	26,48
UP1.33	4611,20	186,82	4min 38s	Oksan kohta.	40,52	37,45
UP1.34	4596,54	220,16	5min 30s	Puhdas.	47,90	44,27
UP1.35	4639,98	153,75	3min 50s	Puhdas.	33,14	30,63
UP1.36	4625,25	147,11	3min 39s	Oksan kohta.	31,81	29,40
UP1.37	4639,98	181,76	4min 37s	Oksan kohta.	39,17	36,21
UP1.38	4625,48	184,49	4min 35s	Puhdas.	39,89	36,87
UP1.39	4639,98	172,57	4min 18s	Puhdas.	37,19	34,38
UP1.40	4639,98	161,72	3min 59s	Oksan kohta.	34,85	32,22
UP1.41	4659,28	171,18	4min 12s	Osin puhdas osin oksan kohta.	36,74	33,96
UP1.42	4664,06	171,22	4min 9s	Oksan kohta.	36,71	33,93
UP1.43	4611,00	185,46	4min 35s	Puhdas.	40,22	37,18
UP1.44	4615,75	180,45	4min 27s	Puhdas.	39,09	36,14
UP1.45	4620,50	212,86	5min 18s	Puhdas.	46,07	42,58
UP1.46	4606,02	172,78	4min 18s	Puhdas.	37,51	34,67
UP1.47	4611,00	210,28	5min 15s	Puhdas.	45,60	42,15
UP1.48	4630,24	135,15	3min 18s	Osin puhdas osin oksan kohta.	29,19	26,98
UP1.49	4606,25	242,79	6min 2s	Puhdas.	52,71	48,72
UP1.50	4611,00	231,36	5min 45s	Oksan kohta.	50,18	46,38
				Keskiarvo	40,67	37,59
				Keskihajonta	5,77	5,34

*) Puristusmurto tapahtunut sallitun kuormitusajan ulkopuolella.

Uuden puutavaran koe-erä UP2

Koekappaleen tunnus	PL pinta-ala (mm ²)	Puristus murtokuorma (kN)	Kuormitus aika	Murtotapa	Puristuslujuus (N/mm ²)	Kosteuskorjattu puristuslujuuden arvo (N/mm ²)
UP2.1	3022,18	87,37	2min 32s*	Osin puhdas osin oksan kohta.	28,91	35,69
UP2.2	3063,00	87,62	3min 5s	Pääosin puhdas osin oksan kohta.	28,61	35,32
UP2.3	3051,51	104,48	4min 22s	Pääosin puhdas osin oksan kohta.	34,24	42,27
UP2.4	2999,40	82,50	3min 30s	Puhdas.	27,50	33,96
UP2.5	3013,80	83,06	3min 25s	Oksan kohta.	27,56	34,03
UP2.6	3013,80	84,91	3min 34s	Oksan kohta.	28,17	34,78
UP2.7	3025,20	89,68	3min 47s	Oksan kohta.	29,64	36,60
UP2.8	2971,90	110,94	4min 37s	Puhdas.	37,33	46,09
UP2.9	3016,20	98,22	4min 10s	Puhdas.	32,56	40,20
UP2.10	3027,65	109,18	4min 33s	Puhdas.	36,06	44,52
UP2.11	3027,65	91,88	3min 58s	Puhdas.	30,35	37,47
UP2.12	3034,96	83,91	3min 25s	Puhdas.	27,65	34,13
UP2.13	3023,50	102,49	4min 23s	Oksan kohta.	33,90	41,85
UP2.14	3027,65	97,20	3min 59s	Oksan kohta.	32,11	39,64
UP2.15	3035,95	92,38	3min 54s	Oksan kohta.	30,43	37,57
UP2.16	3001,60	74,54	3min 11s	Oksan kohta.	24,83	30,66
UP2.17	3016,20	112,05	4min 32s	Puhdas.	37,15	45,87
UP2.18	3016,20	104,16	4min 20s	Oksan kohta.	34,53	42,63
UP2.19	3016,20	92,93	3min 55s	Oksan kohta.	30,81	38,04
UP2.20	3027,65	94,38	5min 55s	Puhdas.	31,17	38,48
UP2.21	3020,34	94,80	3min 54s	Puhdas.	31,39	38,75
UP2.22	3027,65	99,50	3min 58s	Puhdas.	32,86	40,57
UP2.23	3027,65	90,10	3min 25s	Puhdas.	29,76	36,74
UP2.24	3031,80	97,48	3min 42s	Oksan kohta.	32,15	39,70
UP2.25	3027,65	98,93	3min 47s	Puhdas.	32,67	40,34
UP2.26	4722,23	128,94	4min 11s	Puhdas.	27,30	33,71
UP2.27	4732,06	169,48	5min 56s	Osin puhdas osin oksan kohta.	35,81	44,22
UP2.28	4722,00	146,04	5min 7s	Oksan kohta.	30,93	38,18
UP2.29	4707,60	115,11	4min 2s	Osin puhdas osin oksan kohta.	24,45	30,19
UP2.30	4702,80	158,07	5min 33s	Puhdas.	33,61	41,50
UP2.31	4741,89	149,89	4min 26s	Oksan kohta.	31,61	39,03
UP2.32	4697,78	115,82	4min 9s	Oksan kohta.	24,66	30,44
UP2.33	4693,50	137,99	3min 58s	Puhdas.	29,40	36,30
UP2.34	4692,99	174,98	5min 13s	Puhdas.	37,28	46,03
UP2.35	4717,20	112,53	4min 4s	Puhdas.	23,85	29,45
UP2.36	4692,74	118,35	3min 58s	Oksan kohta.	25,22	31,14
UP2.37	4727,04	149,98	5min 1s	Puhdas.	31,73	39,17
UP2.38	4736,88	140,34	4min 40s	Oksan kohta.	29,63	36,58
UP2.39	4727,04	145,14	5min 3s	Oksan kohta.	30,70	37,91
UP2.40	4741,89	139,16	4min 59s	Osin puhdas osin oksan kohta.	29,35	36,23
UP2.41	4717,42	138,91	4min 43s	Oksan kohta.	29,45	36,35
UP2.42	4707,80	137,60	4min 11s	Osin puhdas osin oksan kohta.	29,23	36,08
UP2.43	4703,25	131,51	3min 56s	Oksan kohta.	27,96	34,52
UP2.44	4727,24	151,25	4min 30s	Puhdas.	32,00	39,50
UP2.45	4722,42	154,94	4min 39s	Puhdas.	32,81	40,51
UP2.46	4717,42	170,87	5min 1s	Oksan kohta.	36,22	44,72
UP2.47	4741,89	170,92	5min 4s	Puhdas.	36,05	44,50
UP2.48	4746,52	110,38	3min 17s	Puhdas.	23,26	28,71
UP2.49	4751,34	192,03	5min 45s	Puhdas.	40,42	49,90
UP2.50	4756,56	194,10	5min 46s	Oksan kohta.	40,81	50,38
				Keskiarvo	31,12	38,42
				Keskihajonta	4,08	5,04

*) Puristusmurto tapahtunut sallitun kuormitusajan ulkopuolella.

Uuden puutavaran koe-erä UP3

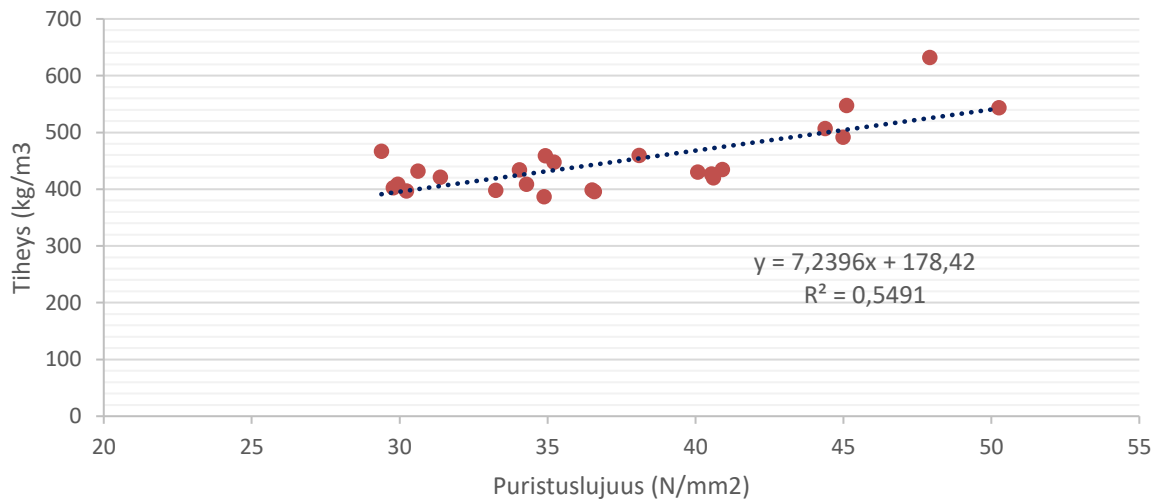
Koekappaleen tunnus	PL pinta-ala (mm ²)	Puristus murtokuorma (kN)	Kuormitus aika	Murtotapa	Puristuslujuus (N/mm ²)	Kosteuskorjattu puristuslujuuden arvo (N/mm ²)
UP3.1	3147,32	69,86	4min 4s	Oksan kohta.	22,20	35,95
UP3.2	3150,50	82,55	4min 44s	Puhdas.	26,20	42,44
UP3.3	3154,75	81,13	4min 38s	Oksan kohta.	25,72	41,65
UP3.4	3103,75	77,83	4min 28s	Puhdas.	25,07	40,61
UP3.5	3127,20	61,33	3min 36s	Puhdas.	19,61	31,76
UP3.6	3108,00	61,24	3min 31s	Oksan kohta.	19,70	31,91
UP3.7	3091,00	78,97	4min 34s	Puhdas.	25,55	41,38
UP3.8	3106,05	83,27	4min 49s	Puhdas.	26,81	43,42
UP3.9	3102,00	72,70	4min 12s	Puhdas.	23,44	37,96
UP3.10	3097,80	78,69	4min 29s	Puhdas.	25,40	41,14
UP3.11	3121,02	65,33	3min 30s	Puhdas.	20,93	33,90
UP3.12	3121,02	75,52	4min 20s	Puhdas.	24,20	39,19
UP3.13	3153,81	68,66	3min 48s	Puhdas.	21,77	35,26
UP3.14	3150,56	65,02	3min 50s	Puhdas.	20,64	33,43
UP3.15	3125,24	61,82	3min 33s	Puhdas.	19,78	32,04
UP3.16	3111,36	61,37	3min 37s	Puhdas.	19,72	31,95
UP3.17	3097,80	82,46	4min 43s	Oksan kohta.	26,62	43,11
UP3.18	3074,66	70,00	4min 11s	Osin puhdas osin oksan kohta.	22,77	36,87
UP3.19	3121,02	66,08	3min 48s	Puhdas.	21,17	34,29
UP3.20	3108,36	64,15	3min 40s	Oksan kohta.	20,64	33,43
UP3.21	3117,82	72,20	4min 11s	Puhdas.	23,16	37,51
UP3.22	3122,03	70,40	4min 11s	Puhdas.	22,55	36,52
UP3.23	3121,02	60,79	3min 30s	Puhdas.	19,48	31,55
UP3.24	3146,34	63,98	3min 45s	Osin puhdas osin oksan kohta.	20,33	32,93
UP3.25	3130,45	68,23	3min 55s	Oksan kohta.	21,80	35,30
UP3.26	4829,70	99,27	3min 56s	Oksan kohta.	20,55	33,29
UP3.27	4874,54	122,37	4min 54s	Puhdas.	25,10	40,66
UP3.28	4854,66	110,93	4min 24s	Puhdas.	22,85	37,01
UP3.29	4839,65	107,04	4min 14s	Puhdas.	22,12	35,82
UP3.30	4815,30	108,12	4min 20s	Oksan kohta.	22,45	36,37
UP3.31	4810,26	108,28	4min 14s	Osin puhdas osin oksan kohta.	22,51	36,46
UP3.32	4883,76	76,31	3min 2s	Osin puhdas osin oksan kohta.	15,63	25,31
UP3.33	4884,20	103,64	4min 4s	Puhdas.	21,22	34,37
UP3.34	4884,00	133,17	5min 17s	Puhdas.	27,27	44,16
UP3.35	4849,90	88,42	3min 35s	Puhdas.	18,23	29,53
UP3.36	4859,55	89,64	3min 35s	Puhdas.	18,45	29,88
UP3.37	4835,10	86,15	3min 30s	Puhdas.	17,82	28,86
UP3.38	4884,48	107,29	4min 20s	Puhdas.	21,97	35,58
UP3.39	4904,16	102,21	4min 2s	Oksan kohta.	20,84	33,76
UP3.40	4839,42	101,46	4min 1s	Puhdas.	20,97	33,96
UP3.41	4854,48	94,77	3min 45s	Puhdas.	19,52	31,62
UP3.42	4854,48	100,51	4min 2s	Puhdas.	20,70	33,53
UP3.43	4854,48	96,37	3min 50s	Puhdas.	19,85	32,15
UP3.44	4834,96	110,49	4min 23s	Puhdas.	22,85	37,01
UP3.45	4829,91	113,07	4min 27s	Puhdas.	23,41	37,92
UP3.46	4874,40	126,52	5min 6s	Puhdas.	25,96	42,04
UP3.47	4874,54	127,88	5min 6s	Puhdas.	26,23	42,49
UP3.48	4869,50	77,68	3min 5s	Puhdas.	15,95	25,84
UP3.49	4908,91	142,13	5min 39s	Puhdas.	28,95	46,89
UP3.50	4854,48	149,97	6min 1s	Puhdas.	30,89	50,03
				Keskiarvo	22,35	36,20
				Keskihajonta	3,16	5,12

*) Puristusmurto tapahtunut sallitun kuormitusajan ulkopuolella.

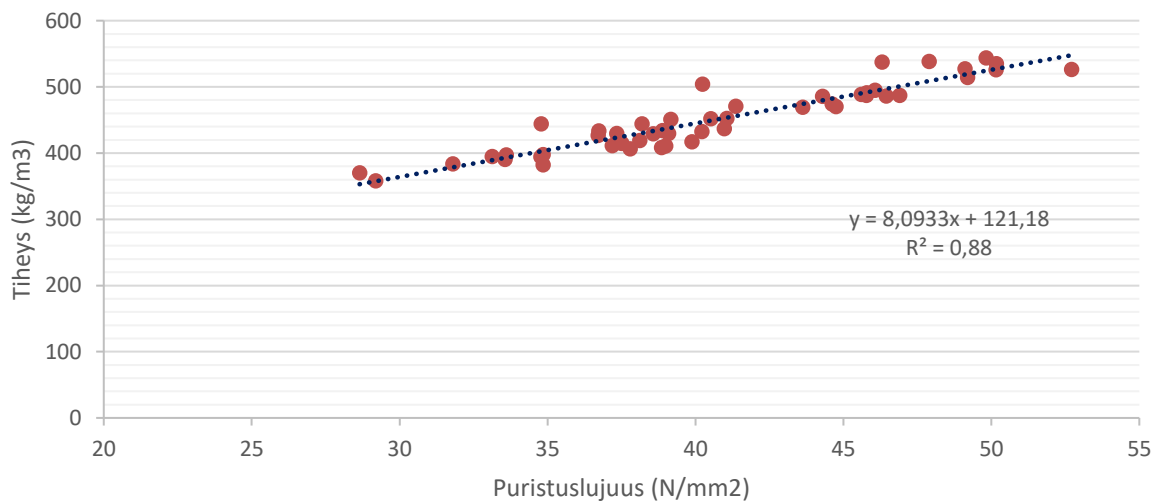
LIITE F

Koekappaleiden alkuperäisten ja kosteuskorjattujen puristuslujuuden ja tiheyden kuvaajat

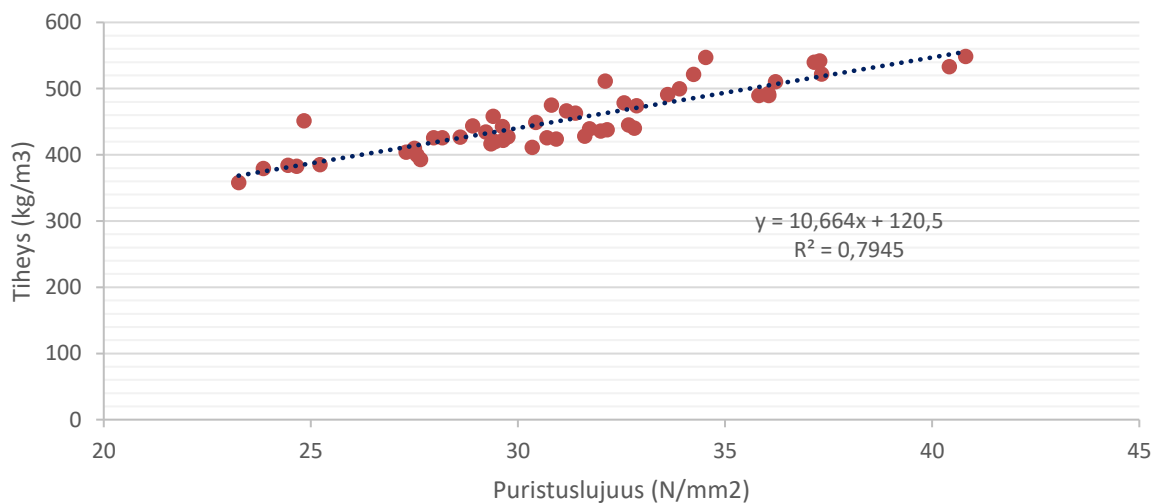
Koe-erä VP: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=8,84 %)



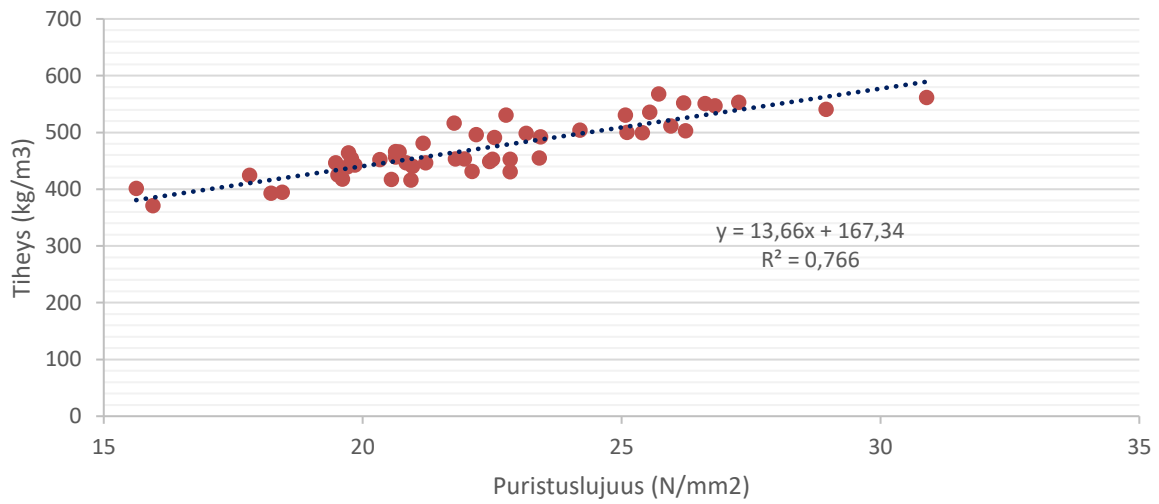
Koe-erä UP 1: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=11,11 %)



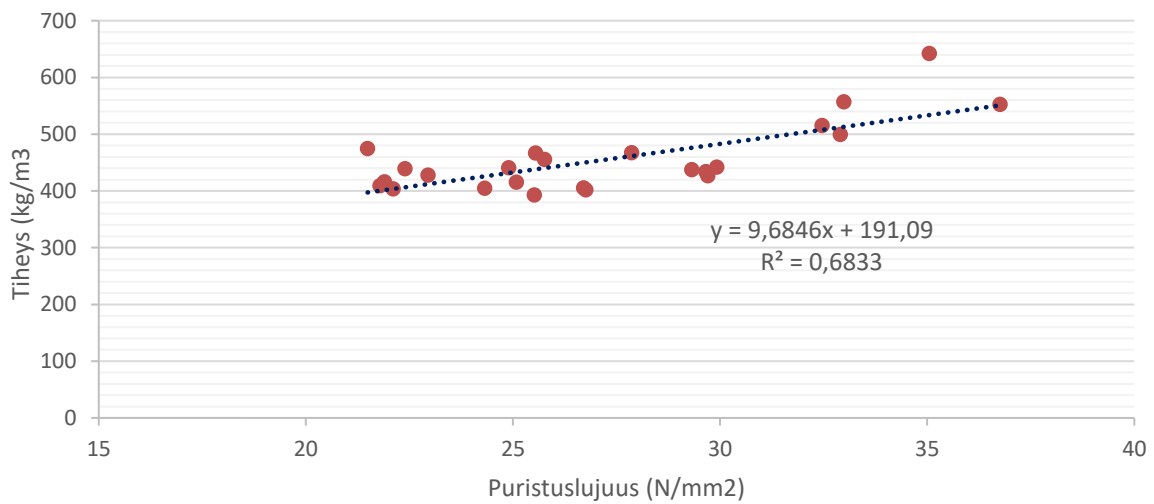
Koe-erä UP 2: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=14,76 %)



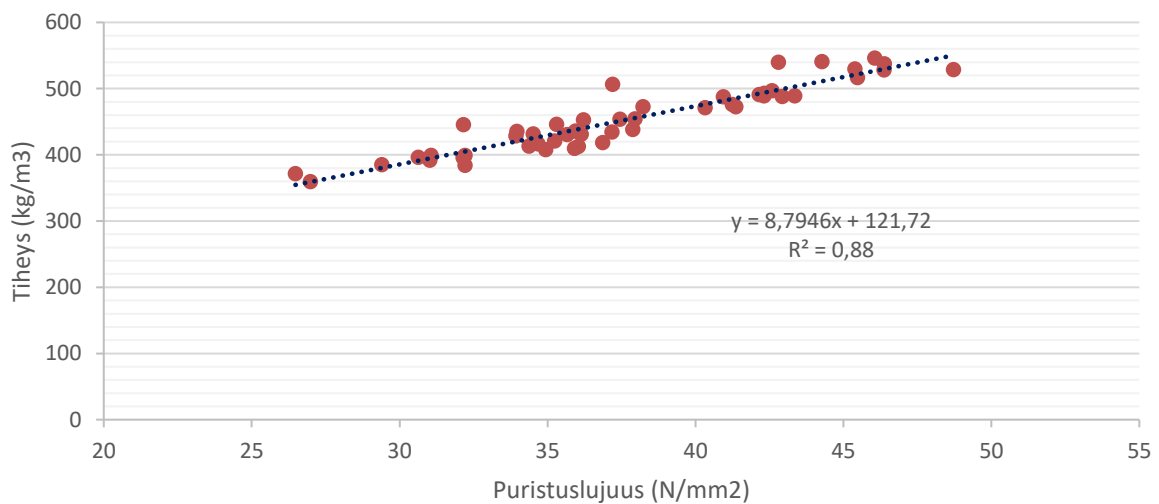
Koe-erä UP 3: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=19,29 %)



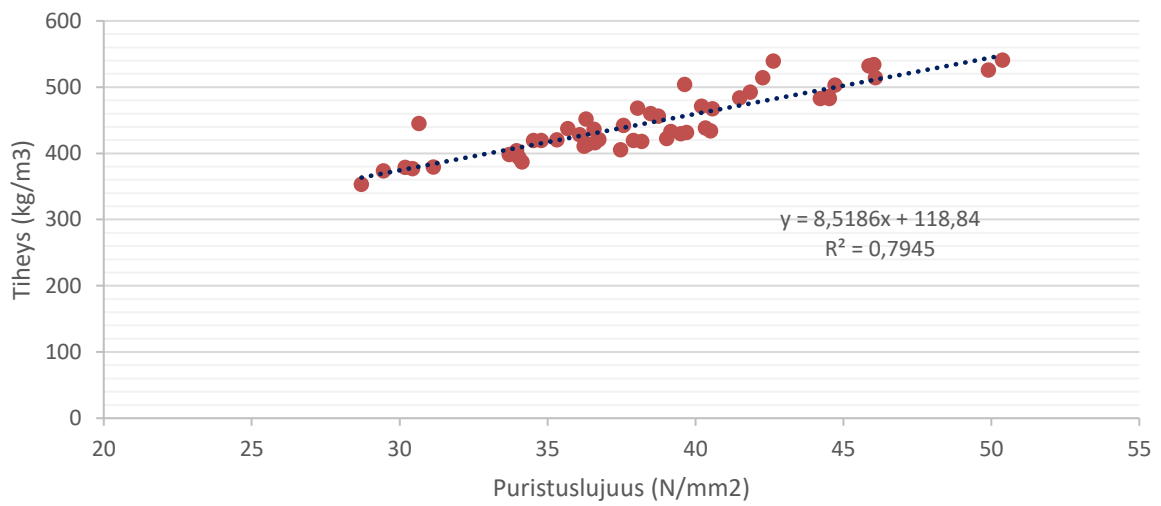
Koe-erä VP: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=12 %)



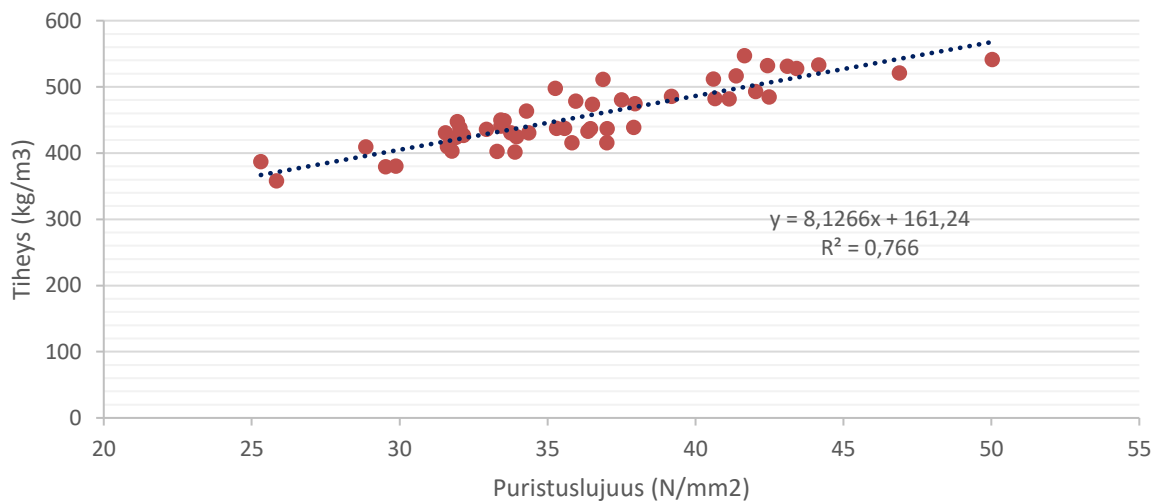
Koe-erä UP 1: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=12 %)



Koe-erä UP 2: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=12 %)



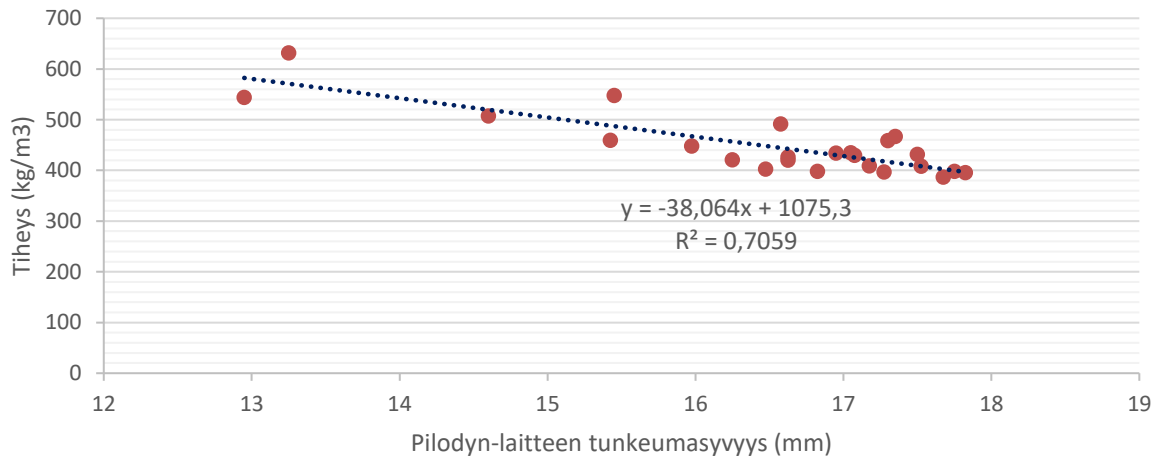
Koe-erä UP 3: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=12 %)



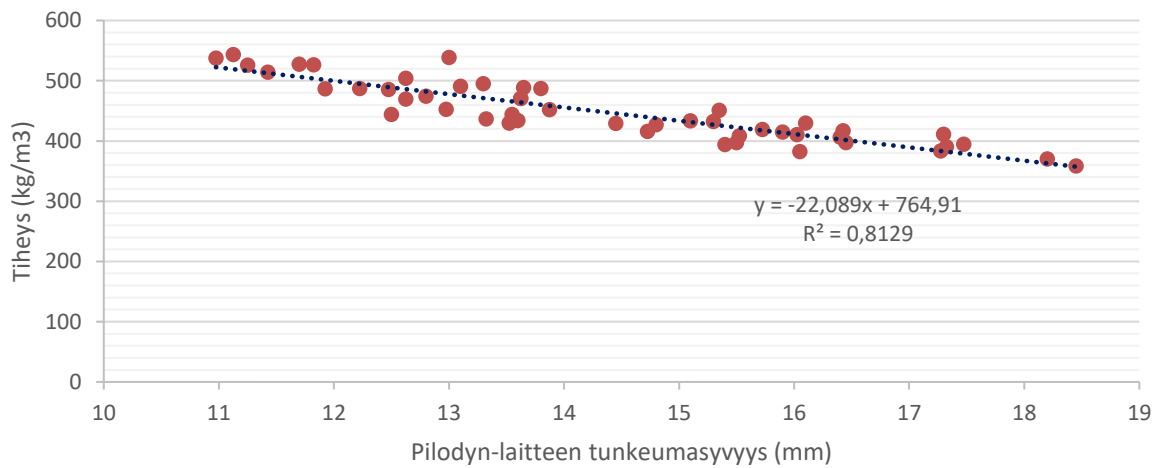
LIITE G

**Koekappaleiden alkuperäisten ja kosteuskorjattujen Pilodyn-laitteen
tunkeumasyvyyden ja tiheyden kuvaajat**

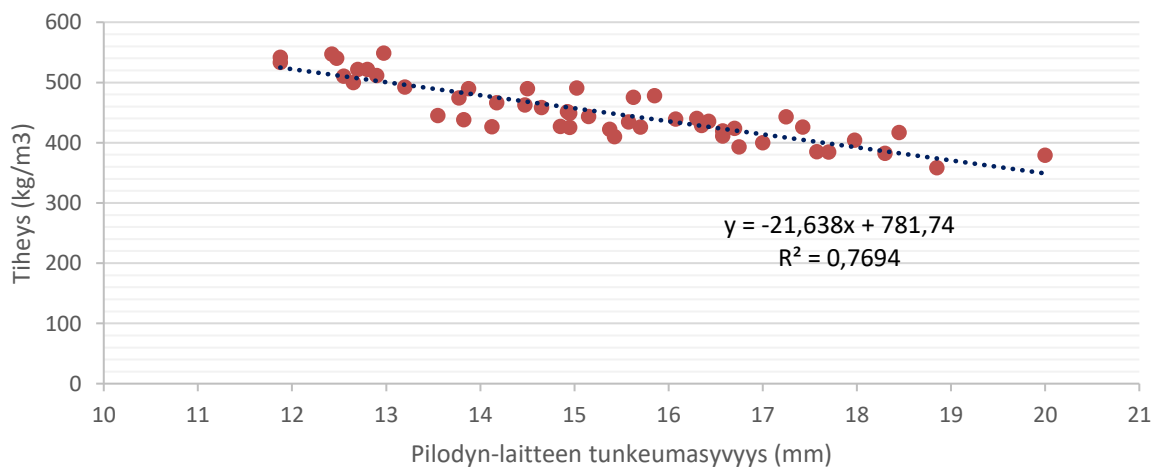
Koe-erä VP: tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyteen
(w=8,84 %)



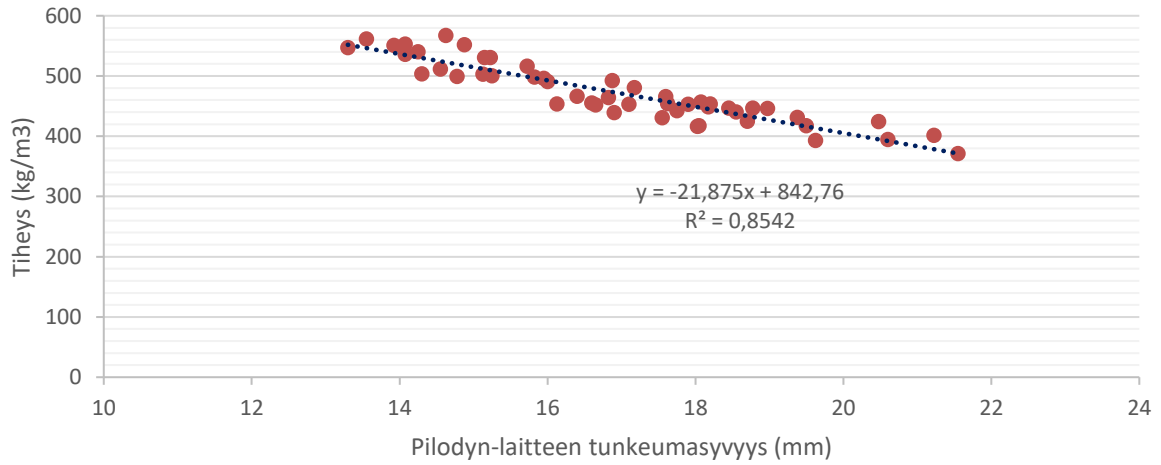
Koe-erä UP 1: tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyteen
(w=11,11 %)



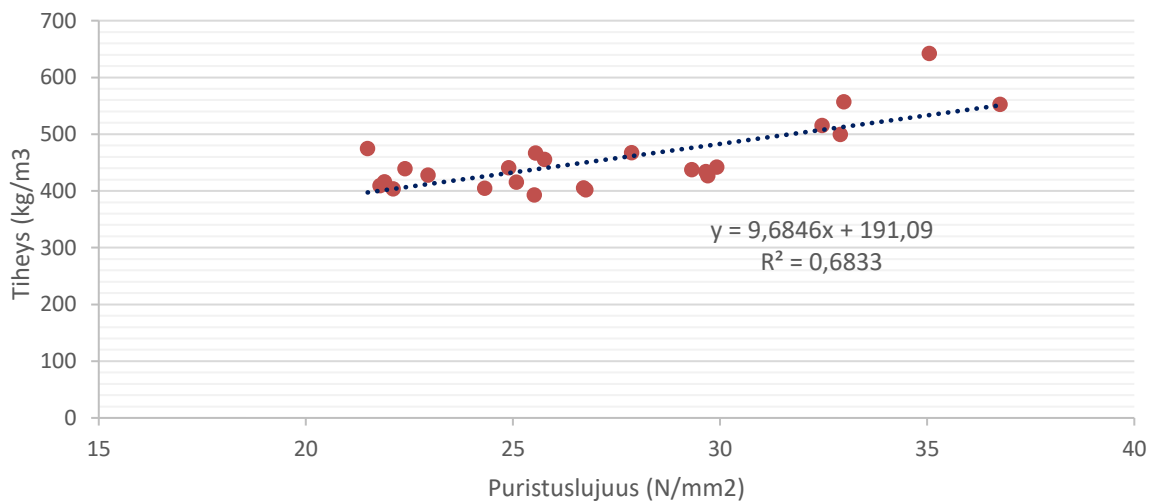
Koe-erä UP 2: tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyteen
(w=14,76 %)



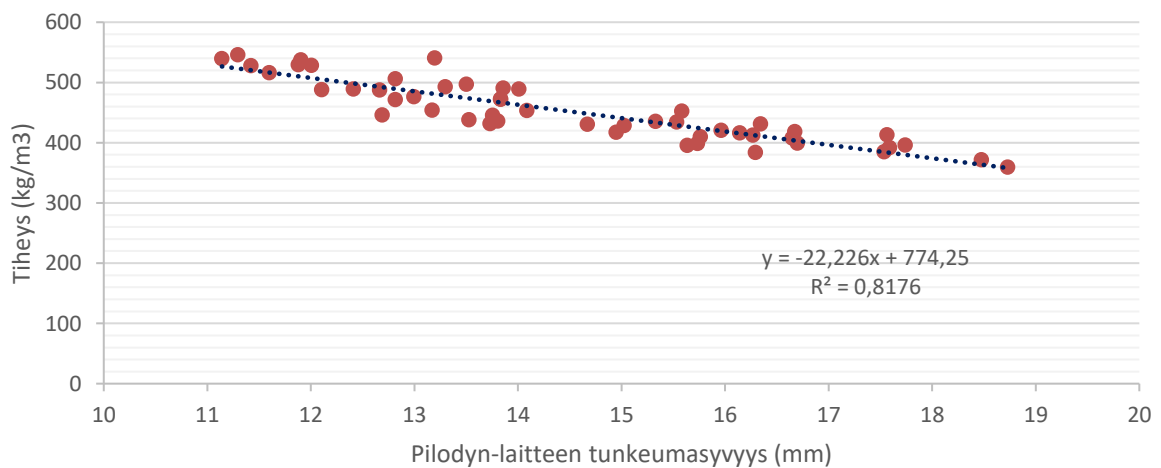
Koe-erä UP 3: tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen
(w=19,29 %)

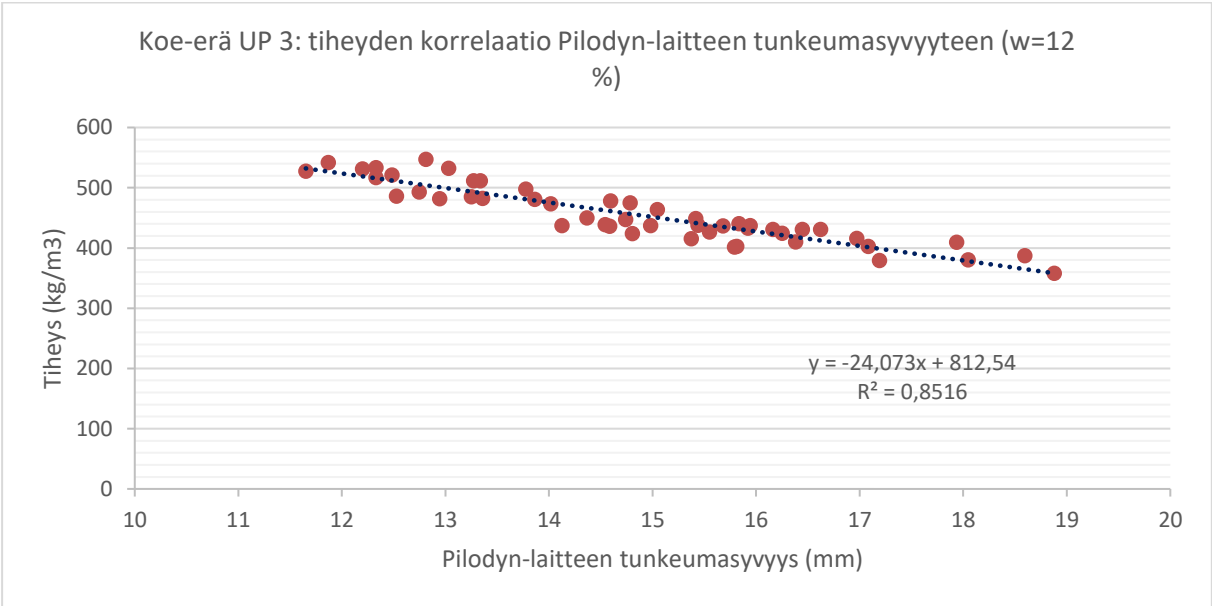
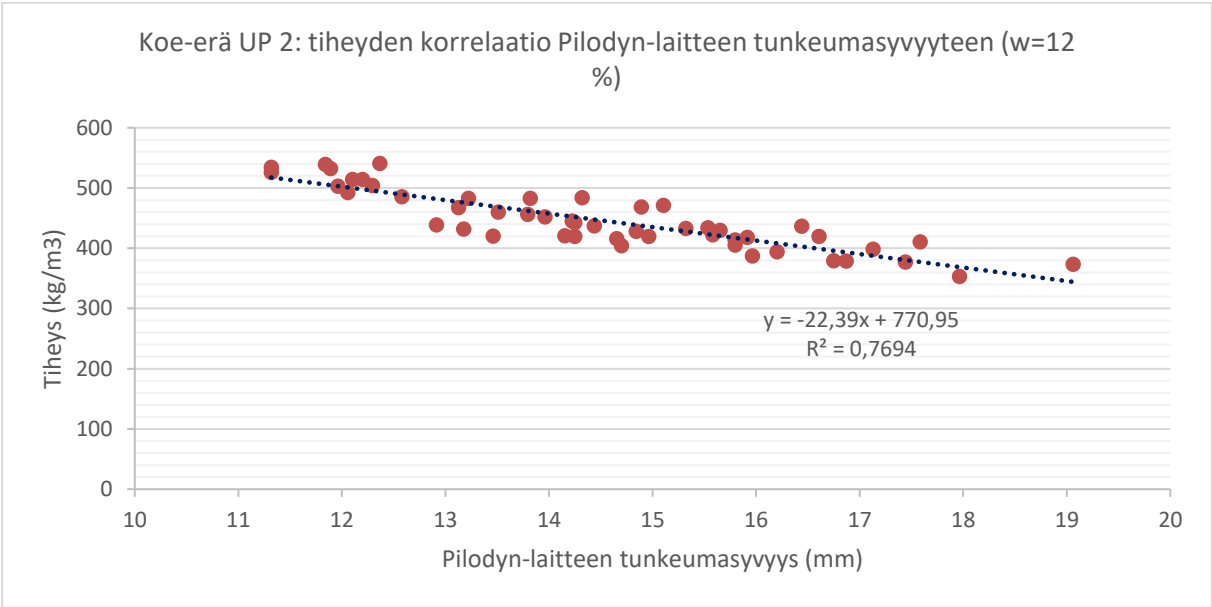


Koe-erä VP: tiheyden korrelaatio puristuslujuuteen (w=12 %)



Koe-erä UP 1: tiheyden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyteen (w=12 %)

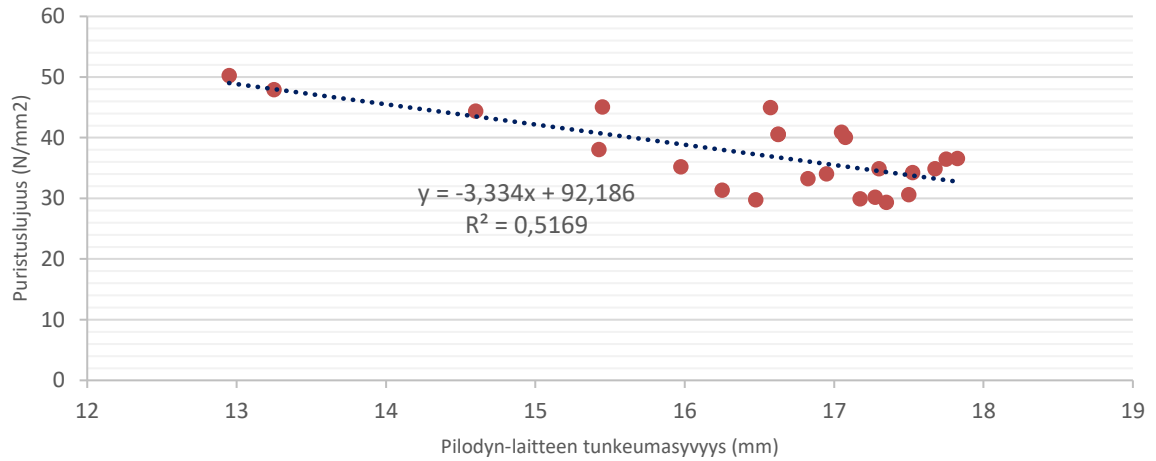




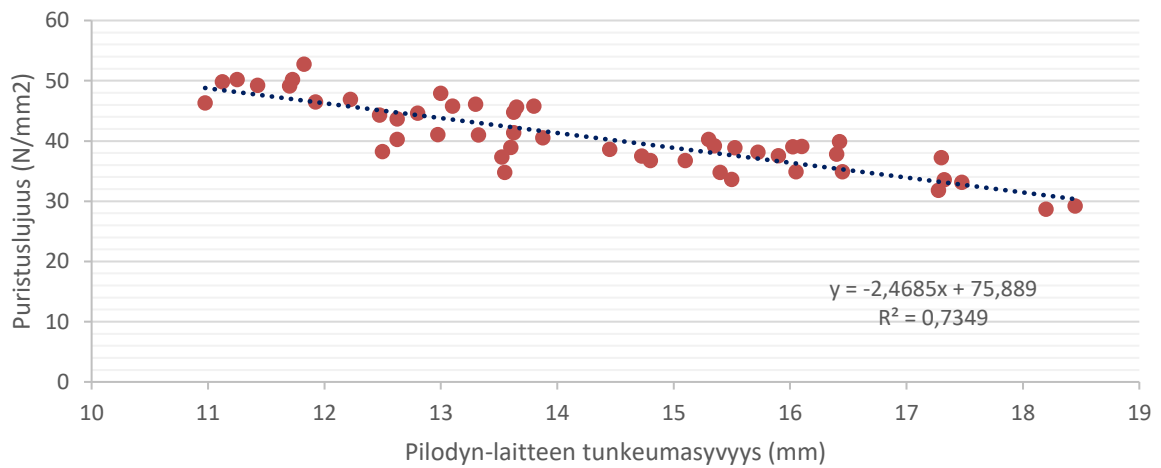
LIITE H

Koekappaleiden alkuperäisten ja kosteuskorjattujen Pilodyn-laitteen tunkeumasyvyyden ja puristuslujuuden kuvaajat

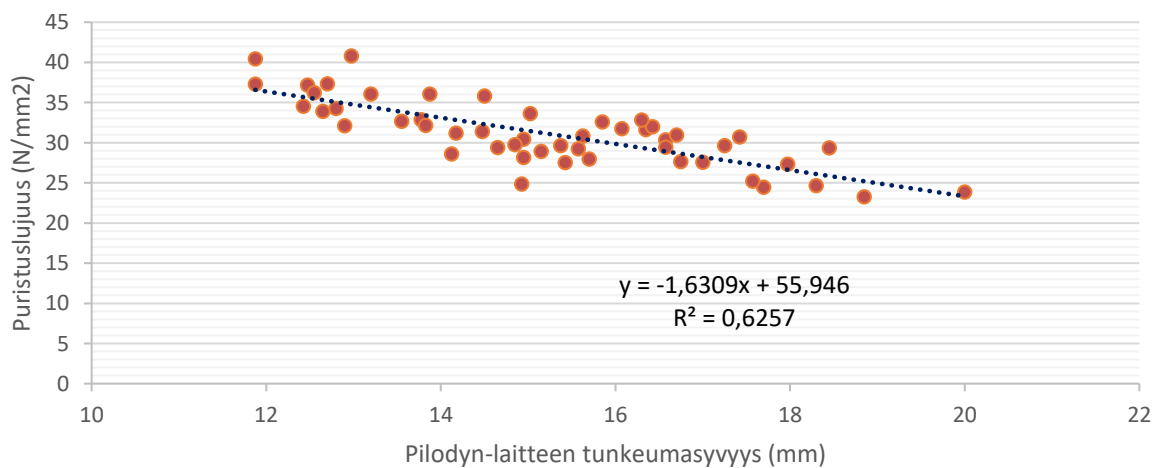
Koe-erä VP: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyteen
(w=8,84 %)



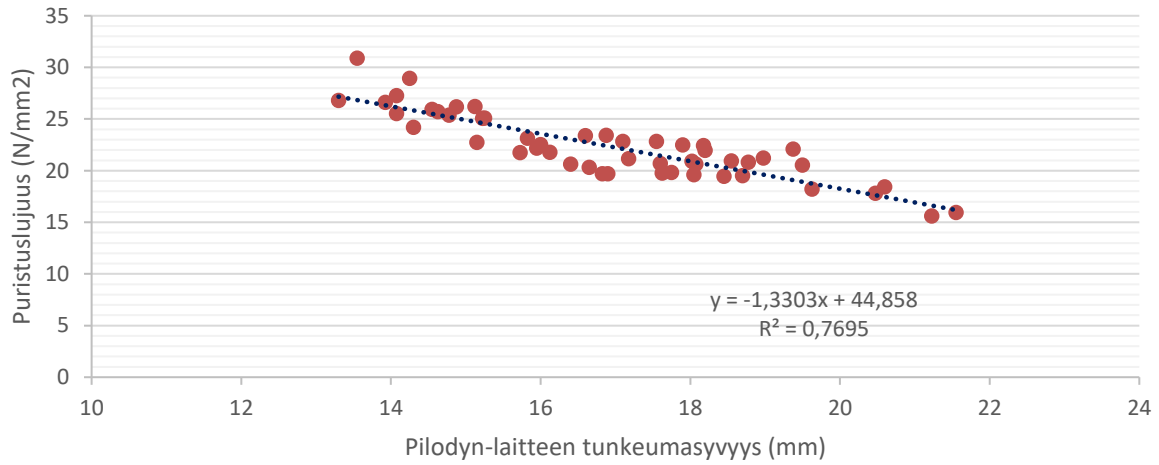
Koe-erä UP 1: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyteen
(w=11,11 %)



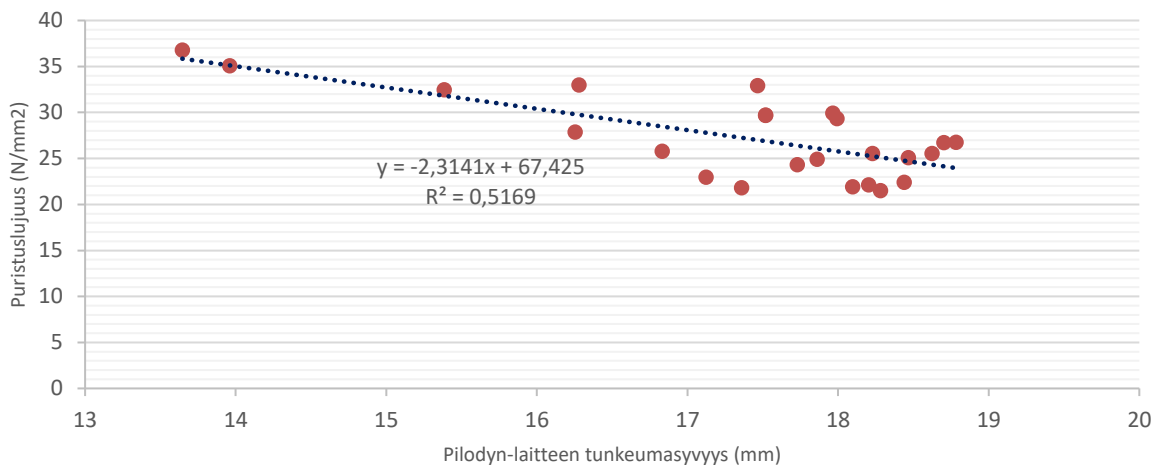
Koe-erä UP 2: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyteen
(w=14,76 %)



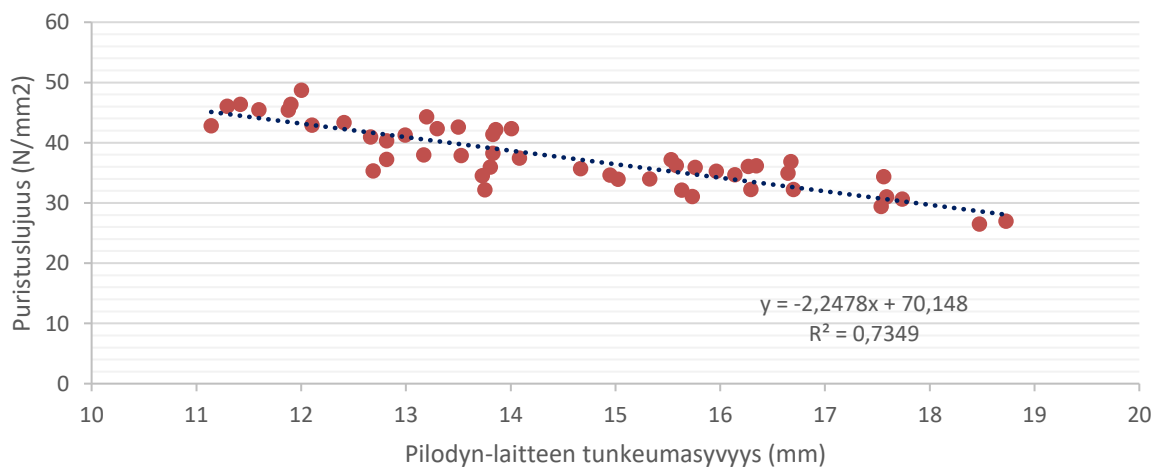
Koe-erä UP 3: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyteen
(w=19,29 %)



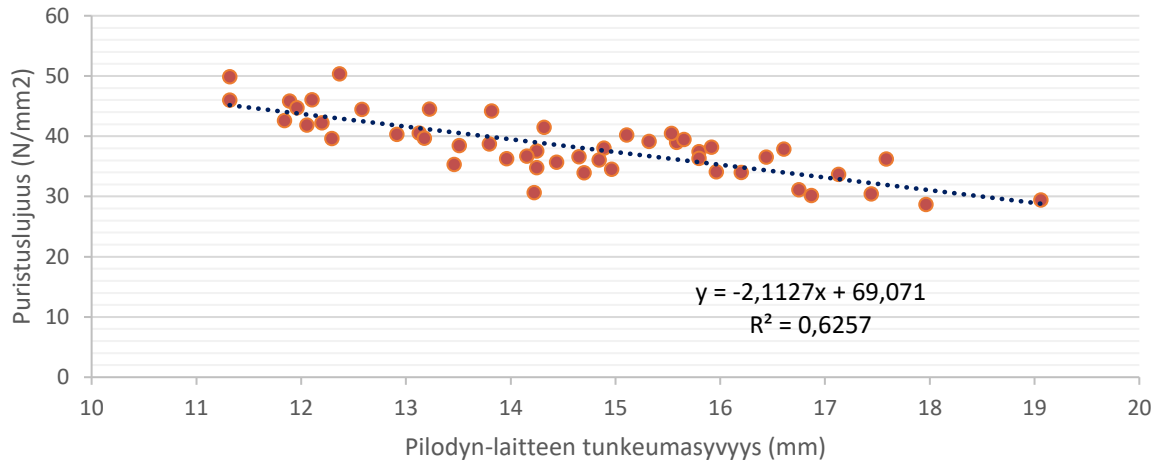
Koe-erä VP: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyteen
(w=12 %)



Koe-erä UP 1: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyteen
(w=12 %)



Koe-erä UP 2: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyteen
(w=12 %)



Koe-erä UP 3: puristuslujuuden korrelaatio Pilodyn-laitteen tunkeumasyyvyyteen
(w=12 %)

