Tampereen yliopisto

Jon Töyrylä

PUUN MATERIAALIMALLIEN TEOREETTINEN JA KOKEELLINEN TARKASTELU

Tekniikan ja luonnontieteiden tiedekunta
Diplomityö
Huhtikuu 2020

TIIVISTELMÄ

Jon Töyrylä: Puun materiaalimallien teoreettinen ja kokeellinen tarkastelu
Diplomityö
Tampereen yliopisto
Konetekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma
Huhtikuu 2020

Työn tutkimusongelma on puun materiaalimallinnus. Materiaalimallin avulla voidaan selvittää, miten materiaali deformoituu siinä vaikuttavan jännityskentän alaisena ja millainen jännityskenttä siihen muodostuu tunnetussa deformaatiotilassa. Käytännössä deformaation mittana käytetään venymää, jolloin materiaalimallin avulla voidaan selvittää materiaalin jännitys-venymä -yhteys. Toimiva materiaalimalli on edellytys puurakenteiden lujuusanalyysien suorittamiseksi.

Materiaalimallin kehitys aloitettiin perehtymällä puun anatomiaan ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Työssä todettiin, että puun mekaanisten ominaisuuksien taustatekijänä on puusolujen kuituvahvistekomposiittimainen rakenne. Lisäksi solut muodostavat keskenään hunajakennomaisen rakenteen, mikä vaikuttaa merkittävästi puun mekaanisiin ominaisuuksiin. Puun mekaanisista ominaisuuksista tarkasteltiin elastisia ominaisuuksia ja lujuusominaisuuksia. Työssä todettiin, että puun elastisia ominaisuuksia voidaan mallintaa poikittaisisotrooppisella materiaalimallilla, jolloin elastiset ominaisuudet ovat erilaiset kuitujen suunnassa ja niihin nähden kohtisuoralla isotropiatasolla. Puun jännitys-venymä -yhteyden todettiin riippuvan kuormituksen suunnasta syihin nähden sekä kuormituksen tyypistä. Puun elastista käyttäytymistä rajaavien lujuusarvojen jälkeen puun jännitys-venymä -yhteys muuttuu epälineaariseksi. Puristuksen alaisena puu käyttäytyy sitkeästi ennen lopullista murtumaa. Vedossa ja leikkauksessa puu murtuu hauraasti. Puu on vahvimmillaan syiden suunnassa ja heikoimmillaan syihin nähden kohtisuorassa suunnassa.

Materiaalimallin kehittämiseksi tehtiin taustaselvitystä olemassa olevista materiaalimalleista. Materiaalimalli voidaan jakaa lineaariseen elastiseen osaan sekä lujuusarvojen jälkeiseen epälineaariseen osaan. Puun elastista osaa päätettiin mallintaa poikittaisisotrooppisella materiaalimallilla, joten materiaalimalleja tarkasteltaessa oltiin erityisesti kiinnostuneita epälineaarisen osan mallintamiseen käytetyistä menetelmistä.

Taustaselvitysten jälkeen työssä dokumentoitiin lukuvuoden 2019–2020 aikana suoritettujen lujuuskokeiden koejärjestelyt ja mittaustulokset. Lujuuskokeet suoritettiin yleisesti saatavilla olevasta puutavarasta, joka oli valmistettu männystä. Mittausdatan avulla määritettiin männyn elastiset ominaisuudet ja lujuusarvot. Mitattuja arvoja verrattiin muussa kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin ja mahdolliset virhelähteet pyrittiin ottamaan huomioon.

Työn viimeisessä osassa määriteltiin mäntypuun elastinen poikittaisisotrooppinen materiaalimalli. Materiaalimallin elastiset vakiot valittiin mahdollisuuksien mukaan mittaustulosten pohjalta ja loput arvot etsittiin muista lähteistä. Elastisen materiaalimallin lisäksi työssä esiteltiin puun epälineaarisen jännitys-venymä -yhteyden alkamista kuvaava vauriokriteeri. Puuta mallinnetiin elastoplastisena materiaalina, jolloin vauriokriteerinä käytettiin myötöpintaa. Myötöpinnan yhtälön kehitti Tampereen yliopiston teknillisen mekaniikan professori Reijo Kouhia. Kokeellisesti mitattujen lujuusarvojen avulla määritettiin myötöpinnan yhtälössä esiintyvät materiaaliparametrit ja myötöpinta piirrettiin pääjännitystilassa Matlab-ohjelmistoa käyttäen. Työn rajaamiseksi männyn materiaalimallin kehitys päätettiin myötöpinnan yhtälöön. Lisätutkimuksia tehdään kuitenkin parhaillaan mallin kehittämiseksi.

Avainsanat: puu, mänty, Pinus sylvestris, materiaalimalli, elastisuus, plastisuus, myötöehto, vauriokriteeri, lujuuskoe, mekaaniset ominaisuudet

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

ABSTRACT

Jon Töyrylä: Theoretical and experimental examination of material models of wood
Master's thesis
Tampere University
Master's degree program in mechanical engineering
April 2020

The topic of this thesis is material modelling of wood. Material model is used to determine stresses from a known state of deformation and vice versa. In practice, the measure of deformation is strain and material models are used to determine the stress-strain -relationship of the material. A proper material model is a requirement for strength analysis of wooden structures.

The development of the material model began from examining the material properties of wood. The topics of interests were anatomy of wood and its mechanical properties. It was found that the mechanical properties of wood originate from cellular level. The structure of individual cells resembles that of fiber-reinforced composite materials. Furthermore, the arrangement of cells into a honeycomb like structure greatly influence the mechanical properties of wood. The mechanical properties of interest were elastic properties and strength properties. It was found that the elastic properties of wood can me modelled by using a transversely isotropic material model. Hence, the elastic properties vary in the direction of the fibers and on the plane perpendicular to fibers. The stress-strain -relationship of wood was found to depend on the type of loading and the direction of loading with respect to grain. Wood behaves nonlinearly after the strength values of wood are reached. Compression leads to ductile failure. On the other hand, failure under shear and tension is brittle. The strength of wood is highest in the direction of grain and lowest perpendicular to grain.

Research regarding existing material models of wood was made before the development of a new material model. The stress-strain -response of wood can be divided into an elastic part and nonlinear part. The elastic part was to be modelled using transversely isotropic material model. Therefore, the research was focused on methods for modelling the nonlinear response.

During the academic year 2019–2020, several strength tests of wood were carried out. The wood samples were made from typical construction timber that were produced from Finnish pine. The test procedures were documented, and the results were analyzed. The goal was to determine the elastic constants and strength values of Finnish pine. The results were compared to values given in other literature and the possible sources of errors were evaluated.

In the final part of the thesis, an elastic transversely isotropic material model for Finnish pinewood was presented. Most of the elastic constants were selected from the experimental results. The values that couldn't be determined from the test were taken from the literature. In addition to elastic model, a failure criterion for the initiation of nonlinear behavior of Finnish pinewood was proposed. An elastoplastic material model was chosen for wood and the failure criterion was represented as a yield surface. The failure criterion was developed by the professor of applied mechanics of Tampere university, Reijo Kouhia. The material parameters of the failure criterion were determined from the experimental strength values and the yield surface representing the failure criterion was plotted in principal stress state using Matlab software. The thesis work was concluded after the development of the failure criterion. However, further research for expanding the proposed material model is in progress.

Keywords: wood, timber, pine, Pinus sylvestris, material model, elasticity, plasticity, yield criterion, failure criterion, mechanical testing, mechanical properties

The originality of this thesis has been checked using the Turnitin OriginalityCheck service.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Tampereen rakennetun ympäristön laitokselle. Työ on osa puun materiaalimallinnukseen liittyvää suurempaa hanketta. Tahdon kiittää ohjaajiani professori Sami Pajusta ja professori Reijo Kouhiaa työn aikaisesta tuesta, työn tarkastamisesta sekä mielenkiintoisen aiheen tarjoamisesta. Lisäksi haluan kiittää Heikki Alhoa sekä muuta koelaboratorion henkilöstöä tämän työn kannalta olennaisten puun lujuuskokeiden suorittamisesta ja suunnittelusta. Lopuksi haluan kiittää Jani Vilppoa tämän diplomityöaiheen ehdottamisesta.

Tampereella, 24.4.2020

Jon Töyrylä

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO 1
1.1 Tutkimusongelma 2
1.2 Työn rakenne 2
2. PUU MATERIAALINA 3
2.1 Puun anatomia 3
2.2 Elastiset ominaisuudet 7
2.3 Lujuusominaisuudet 10
2.4 Mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät 13
3. PUUN MATERIAALIMALLIT 16
3.1 Elastoplastiset mallit 16
3.2 Murtumismekaniikan mallit 21
3.3 Hilamallit 25
3.4 Vauriomekaniikan mallit 27
4. LABORATORIOKOKEET 34
4.1 Puristuskokeet syiden suunnassa 34
4.2 Puristuskokeet poikittaissuunnassa 40
4.3 Vetokokeet syiden suunnassa 44
4.4 Vetokokeet poikittaissuunnassa 49
4.5 Leikkauskokeet 49
5. MÄNTYPUUN POIKITTAISISOTROOPPINEN MATERIAALIMALLI 53
6. YHTEENVETO 62
LÄHTEET 65
LIITE A: PURISTUSKOKEET 70
LIITE B: VETOKOKEET 71
LIITE C: LEIKKAUSKOKEET 73

LYHENTEET JA MERKINNÄT

CLT	Cross Laminated Timber
CZM	Cohesive Zone Model
FEM	Finite Element Method
FPL	Forest Products Laboratory
LEFM	Linear Elastic Fracture Mechanics
$\boldsymbol{A}$	myötöpinnan matriisimuodossa esiintyvä matriisi
A	poikkipinta-ala
A^d	huokosten yhteispinta-ala ennalta määrätyllä tasolla vaurioituneessa materiaalissa.
a_{ij}	matriisin $\boldsymbol{A}$ alkio
b_i	myötöehdon matriisimuodossa esiintyvä vakiotermi
$\mathbb{C}$	4. kertaluvun elastinen komplianssitensori
$\boldsymbol{C^d}$	2. kertaluvun vaurioitunut komplianssimatriisi
$\boldsymbol{C^e}$	2. kertaluvun elastinen komplianssimatriisi
$\boldsymbol{D^d}$	2. kertaluvun vaurioitunut jäykkyysmatriisi
c_i	indeksiä i vastaava materiaaliparametri kehitetyssä myötöehdossa
$\boldsymbol{D^e}$	2. kertaluvun elastinen jäykkyysmatriisi
$\boldsymbol{D}$	2. kertaluvun vaurioparametreja sisältävä tensori
d_i	vaurioparametri. Mahdollisella alaindeksillä i erotellaan vaurioparametrit toisistaan anisotrooppisissa vauriomalleissa
E_i	kimmomoduuli indeksin i osoittamassa suunnassa
E_L	kimmomoduuli poikittaisisotrooppisessa mallissa syiden suunnassa
E_T	kimmomoduuli poikittaisisotrooppisessa mallissa isotropiatasolla
F	voima
F_{max}	voiman maksimiarvo
$F_{c,90,max}$	myötökuorman alkuarvaus myötölujuuden määrittämisessä poikittaissuunnan puristuskokeissa
F_{10}	Puristusvoima, joka on 10% arvosta $F_{c,90,max}$
F_{40}	Puristusvoima, joka on 40% arvosta $F_{c,90,max}$
$\bar{F}$	elementtien integrointipisteissä vaikuttavat ulkoiset voimat vektoriin koottuna
f^d	vauriokriteeri
f^p	myötöehto
f_{c0}	syiden suuntainen puristuslujuus
f_{c90}	syihin nähden poikittaissuuntainen puristuslujuus
f_{s0}	leikkauslujuus poikittaisisotrooppisessa mallissa kuituvahvistetasoilla
f_{s90}	leikkauslujuus poikittaisisotrooppisessa mallissa isotropiatasolla
f_{t0}	syiden suuntainen vetolujuus
f_{t90}	syihin nähden poikittaissuuntainen vetolujuus
G_{ij}	leikkausmoduuli indeksien i ja j osoittamalla tasolla
G_L	leikkausmoduuli poikittaisisotrooppisessa mallissa kuituvahvistetasoilla
G_T	leikkausmoduuli poikittaisisotrooppisessa mallissa isotropiatasolla
h	palkin poikkileikkauksen korkeus leikkauskokeissa
h_0	mittakellon pituus
$\boldsymbol{I}$	2. kertaluvun identiteettitensori
I_i	indeksiä i vastaava jännitysinvariantti
$\boldsymbol{J}$	Jacobin matriisi

J_i	indeksiä i vastaava deviaattorinen jännitysinvariantti
$\boldsymbol{K}$	jäykkyysmatriisi
$\boldsymbol{K_t}$	tangentiaalinen jäykkyysmatriisi
k	voima-siirtymä -kuvaajan elastisen osan kulmakerroin
k_s	leikkausvoima-siirtymä -kuvaajan lineaarisen osan kulmakerroin
$k_{\parallel}$	syiden suuntaisen venymä-aika kuvaajan lineaarisen osan kulmakerroin
$k_{\perp}$	syihin nähden poikittaissuuntaisen venymä-aika kuvaajan lineaarisen osan kulmakerroin
l	koekappaleen pituus kuormitussuunnassa
$\mathbb{M}$	4. kertaluvun vauriotensori
$\boldsymbol{M}$	materiaalimallin kuitujen suunnan huomioiva rakennetensori
$\boldsymbol{M^d}$	2. kertaluvun vauriotensori
m	iteraatiokierrosta kuvaava kokonaisluku elastoplastisissa algoritmeissa
m_o	koekappaleen kuivamassa
m_v	koekappaleen massa mittausolosuhteissa
$\bar{m}$	kuituvahvisteiden suuntainen yksikkövektori
n	tunnettua tilaa kuvaava kokonaisluku elastoplastisissa algoritmeissa
$\bar{n}$	yksikkönormaalivektori
$\bar{p}$	elastoplastisessa iterointiprosessissa käytettävä apusuure
$\bar{q}$	elastoplastisessa iterointiprosessissa käytettävä apusuure
r	korrelaatiokerroin
$\bar{u}$	elementtien integrointipisteiden siirtymät vektoriin koottuna
y_i	mittausdatan indeksiä i vastaava arvo
$\acute{y}_i$	mittausdatan indeksiä i vastaava sovitteen arvo
$\bar{y}$	mittausdatan keskiarvo
V_s	leikkausvoima
w	mitattua kuormitusvoimaa vastaava koekappaleen deformaatio
w_{avg}	mittakellojen keskimääräinen deformaatio leikkauskokeissa
w_1	mittakellon 1 deformaatio leikkauskokeissa
w_2	mittakellon 2 deformaatio leikkauskokeissa
w_{10}	puristusvoimaa F_{10} vastaava deformaatio mittausdatassa
w_{40}	puristusvoimaa F_{40} vastaava deformaatio mittausdatassa
α	leikkausmoduulin laskemisessa käytettävä korjauskerroin
γ_i	apusuure vaurioituneessa komplianssimatriisissa
Δ	merkinnän jälkeisen suureen muutos
δ	merkinnän jälkeisen suureen iteraatiokierrosta vastaava muutos elastoplastisessa algoritmissa
$\boldsymbol{\varepsilon}$	2. kertaluvun venymätensori
ε_{ij}	venymätensorin komponentti. Indeksillä i merkitään vaikutustason normaalin suuntaa ja indeksillä j komponentin vaikutussuuntaa
$\bar{\varepsilon}$	venymätensori Voigtin notaation mukaisessa vektorimuodossa
$\bar{\varepsilon}^e$	kokonaisvenymän elastinen osa Voigtin notaation mukaisessa vektorimuodossa
$\bar{\varepsilon}^p$	kokonaisvenymän plastinen osa Voigtin notaation mukaisessa vektorimuodossa
$\varepsilon_{\parallel}$	syysuuntainen venymä
$\varepsilon_{\perp}$	syihin nähden kohtisuora venymä
λ	konsistenssiparametri
ν_{ij}	Poissonin vakio. Indeksillä i merkitään kuorman suuntaa ja indeksillä j poikittaisvenymän suuntaa

ν_L	Poissonin vakio poikittaisisotrooppisessa mallissa. Kuorma vaikuttaa syiden suunnassa ja poikittaisvenymän suunta on isotropiatasolla
ν_T	Poissonin vakio poikittaisisotrooppisessa mallissa. Kuorma vaikuttaa syihin nähden kohtisuorassa suunnassa. Poikittaisvenymän suunta on isotropiatasolla mutta kohtisuorassa kuormaan nähden
$\boldsymbol{\sigma}$	2. kertaluvun jännitystensori
$\boldsymbol{\sigma_p}$	2. kertaluvun jännitystensorin hydrostaattista painetta kuvaava osa
$\boldsymbol{\sigma_s}$	2. kertaluvun deviaattorinen jännitystensori
$\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$	2. kertaluvun effektiivinen jännitystensori
σ_{ij}	jännitystensorin komponentti. Indeksillä i merkitään vaikutustason normaalin suuntaa ja indeksillä j komponentin vaikutussuuntaa
$\bar{\sigma}$	jännitystensori Voigtin notaation mukaisessa vektorimuodossa
$\bar{\tilde{\sigma}}$	effektiivinen jännitystensori Voigtin notaation mukaisessa vektorimuodossa
$\bar{\sigma}^t$	jännitystensorin yrite Voigtin notaation mukaisessa vektorimuodossa
ψ	venymäenergia
ψ^*	komplementaarinen venymäenergia.

1. JOHDANTO

Puu on yksi yleisimpiä rakennemateriaaleja rakennusteollisuudessa. Viime vuosikymmeninä puun käyttö on yleistynyt entisestään. Kestävän kehityksen asettamat vaatimukset, muuttunut rakennuslainsäädäntö sekä kehittyneet rakennustekniikat ovat mahdollistaneet puun käytön entistä vaativimmissa kohteissa [44,46,58,59]. Puun kestävä ja turvallinen soveltaminen rakennemateriaalina vaatii kuitenkin ymmärrystä sen mekaanisesta käyttäytymisestä. Modernit rakenteiden suunnittelussa käytetyt lujuusanalyysit perustuvat tyypillisesti elementtimenetelmään. Elementtimenetelmän soveltamisen edellytyksenä on toimiva materiaalimalli. Materiaalimalli kuvaa, miten kappale deformoituu siinä vaikuttavan jännityskentän alaisena. Materiaalimallin avulla voidaan myös selvittää, millainen jännityskenttä kappaleeseen muodostuu tunnetussa deformaatiotilassa. Käytännössä deformaation mittana käytetään venymää, jolloin materiaalimallin avulla voidaan selvittää materiaalin jännitys-venymä -yhteys.

Puu on anisotrooppinen materiaali, eli sen materiaaliominaisuudet riippuvat voimakkaasti tarkastelusuunnasta. Lisäksi puun käyttäytyminen puristuksen ja vedon alaisena on erilaista ja kuormitussuunnasta riippuvaa. Nämä ominaisuudet tekevät puun mallintamisesta haastavaa ja täysin kattavaa materiaalimallia ei ole vielä kehitetty. Joissakin suunnitteluohjelmistoissa, kuten Ansys, puulle esitetyt materiaalimallit ovat alkeellisia ja ne kykenevät mallintamaan vain puun elastista käyttäytymistä. Lisäksi mallit ovat voimassa vain muutamalle puulajille. Muille puulajeille elastiset ominaisuudet on määriteltävä erikseen. Puun elastista käyttäytymistä rajaavien lujuusarvojen jälkeen puun jännitys-venymä -yhteys muuttuu epälineaariseksi. Joissakin sovelluksissa puun mallintaminen pelkästään elastisena materiaalina ei ole riittävää ja epälineaariselle osalle tarvitaan erillinen mallinnusmenetelmä. Tällaisia sovelluksia ovat esimerkiksi puurakenteissa yleisesti käytetyt tappiliitokset, jotka voivat murtua hauraasti tai muokkautua voimakkaasti ennen lopullista murtumaa. Liitokset ovat tyypillisesti rakenteen heikoin kohta, minkä vuoksi niiden kuormankantokyvyn selvittäminen on ensiarvoisen tärkeää puurakenteiden suunnittelussa.

1.1 Tutkimusongelma

Työn tutkimusongelma on sopivan materiaalimallin kehittäminen männystä valmistetulle rakennepuulle. Materiaalimallin tulisi pystyä mallintamaan puun anisotrooppisuutta sekä lujuusarvojen jälkeistä epälineaarista käyttäytymistä veto-, leikkaus- ja puristuskuormitusten alaisena. Lisäksi malli tulisi olla implementoitavissa elementtimenetelmää soveltaviin ohjelmistoihin. Tässä työssä määritellään männystä valmistetun rakennepuun elastinen materiaalimalli. Lisäksi työssä esitellään puun epälineaarisen käyttäytymisen alkamista kuvaava vauriokriteeri. Männyn elastiset ominaisuudet sekä vauriokriteerin muodostamiseen tarvittavat lujuusarvot määritetään kokeellisesti.

1.2 Työn rakenne

Työn rakenne on jaettu neljään osaan. Luvussa 2 tarkastellaan puuta materiaalina lähtien liikkeelle sen anatomiasta. Tämän jälkeen selvitetään, miten puun elastisia ominaisuuksia mallinnetaan muussa kirjallisuudessa. Lisäksi tarkastellaan puun lujuusominaisuuksia eri materiaalisuunnissa sekä puulle tyypillistä elastisen osan jälkeistä epälineaarista käyttäytymistä. Lopuksi käydään lyhyesti läpi puun elastisiin ominaisuuksiin ja lujuusominaisuuksiin vaikuttavia tekijöitä.

Luvussa 3 tarkastellaan kirjallisuudessa esitettyjä materiaalimalleja. Tarkastelun kohteena ovat menetelmät, jotka pyrkivät mallintamaan puun lujuusarvojen jälkeistä epälineaarista käyttäytymistä vedossa, leikkauksessa ja puristuksessa. Tavoitteena on selvittää, millaisia menetelmiä puun materiaalimallinnuksessa on jo sovellettu, kuinka hyvin kyseiset menetelmät ovat toimineet ja minkälaisissa olosuhteissa ne ovat käyttökelpoisia.

Luvussa 4 on dokumentoitu lukuvuoden 2019–2020 aikana suoritettujen lujuuskokeiden koejärjestelyt. Kokeet on suoritettu männystä valmistetusta puutavarasta, jota käytetään yleisesti rakennusteollisuudessa. Mittausdatan pohjalta määritetään männyn lujuusarvot ja elastiset vakiot. Tuloksia verrataan muussa kirjallisuudessa esitettyihin arvoihin ja mahdolliset virhelähteet pyritään ottamaan huomioon.

Luvussa 5 muodostetaan lujuuskokeista määritettyjen elastisten ominaisuuksien avulla mäntypuun elastinen materiaaliyhtälö. Lisäksi luvussa esitellään puun epälineaarisen käyttäytymisen alkamista kuvaava vauriokriteeri. Mitattujen lujuusarvojen avulla määritellään vauriokriteerissä esiintyvät materiaaliparametrit.

2. PUU MATERIAALINA

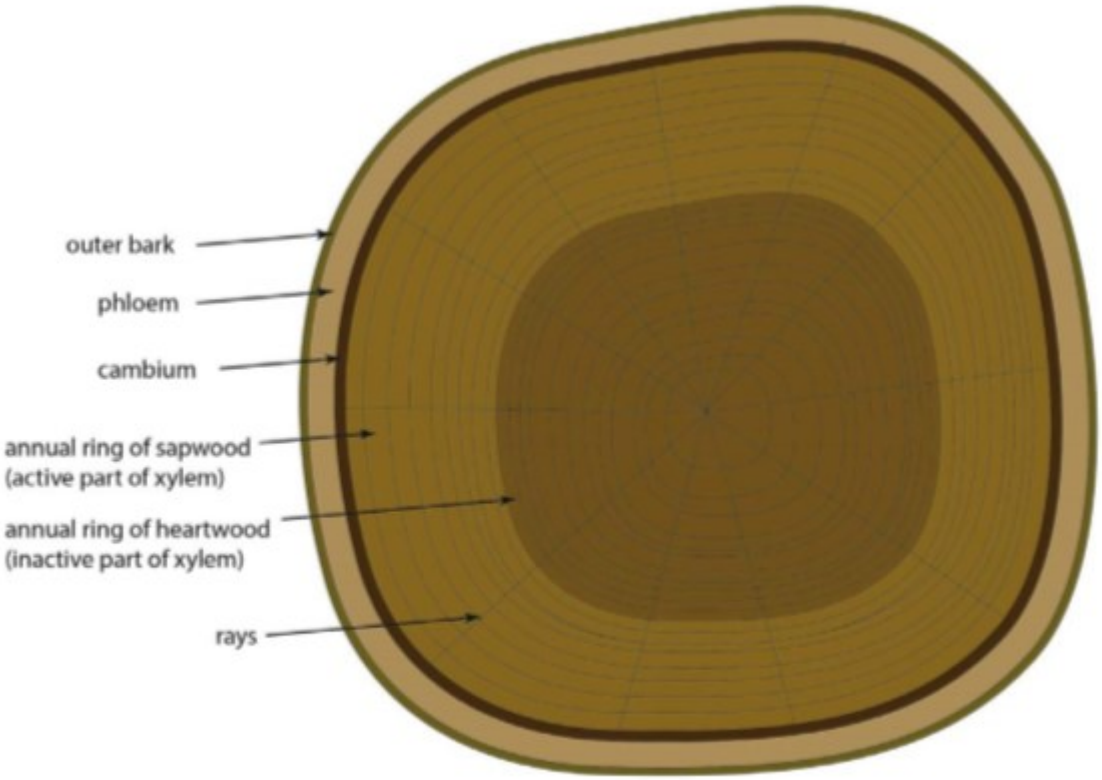
Puu on rakenteeltaan monimutkainen orgaaninen materiaali ja sitä voidaan tarkastella biologisista, kemiallisista ja fysikaalisista näkökulmista. Puun materiaalioppiin liittyvää kirjallisuutta on runsaasti, minkä vuoksi tässä työssä perehdytään vain materiaalimallinnuksen kannalta merkittäviin aiheisiin. Näitä ovat puun anatomia mikro- ja makroskooppisella tasolla, mekaaniset ominaisuudet sekä mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät. Mekaanisista ominaisuuksista tarkastellaan erityisesti materiaalimallissa käytettäviä elastisia vakioita ja lujuusominaisuuksia. Näiden ominaisuuksien tunteminen on perusedellytys toimivan materiaalimallin kehittämiselle. Puun anatomia on merkittävässä osassa mekaanisten ominaisuuksien taustatekijöiden hahmottamiselle, minkä vuoksi siihen perehdytään lyhyesti ennen varsinaisten mekaanisten ominaisuuksien käsittelyä.

2.1 Puun anatomia

Puun rungon poikkileikkauksessa esiintyviä makroskooppisia alueita on havainnollistettu kuvassa 1 ja ne voidaan jakaa karkeasti kuoriosaan (bark), jälsiin (cambium) ja puuosaan (xylem). Puun uloimman kerroksen kuoriosan muodostaa kaarna (outer bark) ja sen alla oleva nila (phloem). Kaarna suojaa puun sisäosia vaurioilta ja vähentää veden haihtumista ympäristöön. Nilaosassa lehdissä muodostuneet ravinteet kulkevat juurien, oksien ja rungon kasvaville alueille. Puun ainoaa soluja tuottavaa osaa kutsutaan nimellä jälsi ja se sijaitsee nilan ja puuosan välillä. Jälsi tuottaa soluja sekä sisemmille puuosille että nilaan. Lisäksi se on vastuussa puun säteissuuntaisesta kasvusta. Puun pituuskasvua aiheuttaa rungon kärjessä oleva erillinen solukko, apikaalinen meristeemi (apical meristem). [19 s. 5–8][46 s. 335]

Jälsin alla sijaitseva varsinainen puuosa koostuu puun keskellä olevasta ytimestä (pith) ja sen ympärille kasvaneista vuosirenkaiden muodostamista kerroksista. Vuosirenkaat muodostuvat kahdesta osasta: kevätpuusta (earlywood) ja kesäpuusta (latewood). Kevätpuukerros muodostuu vuotuisten kasvukausien alkuaikoina ja se on tyypillisesti paksumpi kuin myöhemmin muodostuva kesäpuu. Lisäksi näiden kerrosten solurakenne poikkeaa toisistaan eri kasvunopeuksien vuoksi. Visuaalisesti kevät- ja kesäpuukerrokset erottuvat toisistaan raitoina puun poikkileikkauksessa ja kesäpuun muodostamat alueet ovat väriltään tummempia. Joissakin lehtipuulajeissa, kuten koivussa, solurakenne on lähes samanlaista koko kasvukauden ajan. Tällöin jakoa kevät- ja kesäpuualueisiin ei ole havaittavissa. Vuosirenkaiden lisäksi poikkileikkauksessa voi esiintyä säteissuun-

taisia juovia, joita kutsutaan ydinsäteiksi (rays). Niiden tehtävänä on varastoida ja kuljettaa ravinteita puun sisäosista ulko-osiin. [13 s. 10–11][19 s. 5–7, s. 15][25 s. 2–6] [46 s. 335][62 s. 3–4]

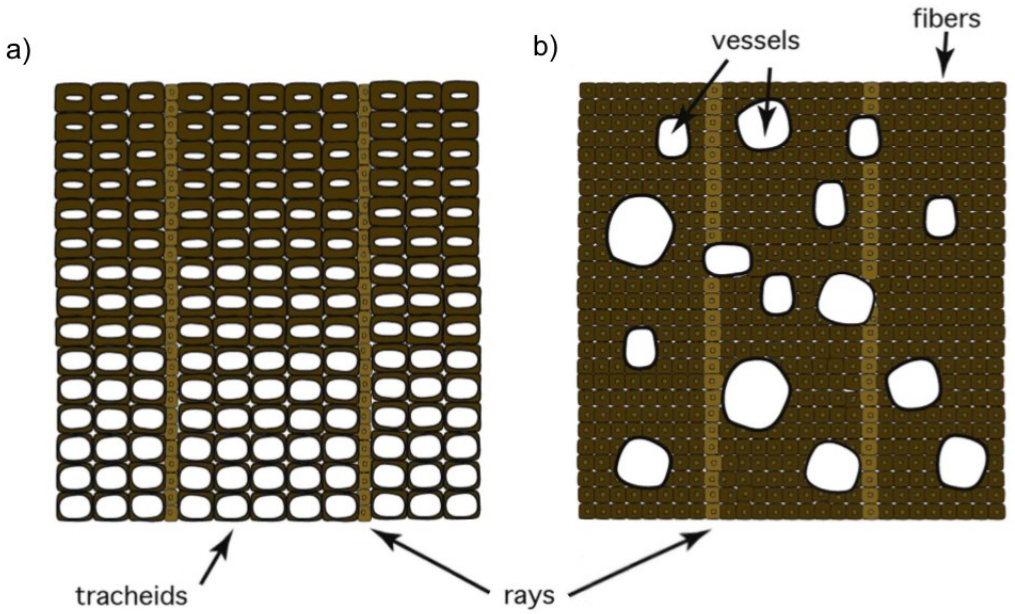


Kuva 1. *Tyypillinen puun rungon makroskooppinen rakenne [46 s. 335].*

Vanhoissa puissa puuosa voidaan jakaa sisemmillä vuosirengaskerroksilla sijaitsevaan sydänpuuhun (heartwood) ja ulompien kerroksien pintapuuhun (sapwood). Sydänpuussa sijaitsevat solut ovat puun ikääntymisen myötä lakanneet toimimasta ja ne toimivat varastoina erinäisille eritteille kuten pihkalle. Pintapuun solut kuljettavat nesteitä ja ravinteita puun yläosiin ja jälsille sekä varastoivat lehtien muodostamaa ravintoa. Puun kasvaessa pintapuun vanhimmat solut lakkaavat toimimasta ja sydänpuualue laajenee. Samalla uutta pintapuuta muodostuu jälsikerroksen alle. Mekaaniset ominaisuudet eroavat pinta- ja sydänpuun välillä. [13 s. 3][19 s. 8–10][25 s. 4][46 s. 335][62 s. 5]

Puun mekaanisten ominaisuuksien kannalta merkittävin alue on jälsin alla sijaitseva puuosa. Puuosan mikroskooppinen rakenne on erilainen havu- ja lehtipuilla. Havupuilla rakenne koostuu kahdesta solutyypistä, vesisoluista eli trakeideista (tracheids) sekä parenkyymisoluista (parenchyma). Parenkyymisolut sijaitsevat pääasiassa ydinsäteissä ja niiden tehtävänä on varastoida ravinteita. Havupuiden kokonaistilavuudesta noin 90–95% koostuu trakeideista. Trakeidit ovat rungon pituussuunnan suuntaisia putkimaisia,

pitkiä ja ohuita soluja. Niiden tehtävänä on tukea puuta sekä kuljettaa vettä ja ravinteita puun yläosiin. Niiden pituus on noin 2–4 mm ja leveys 20–40 µm. Lisäksi ne ovat päistään umpinaisia. Trakeidien seinämät ovat ohuimmillaan kevätpuussa ja ne paksunevat lähestyttäessä kesäpuuta. Yhdessä ne muodostavat hunajakennomaisen rakenteen, jota on havainnollistettu kuvassa 2a. [13 s. 8][19 s. 12][25 s. 10]

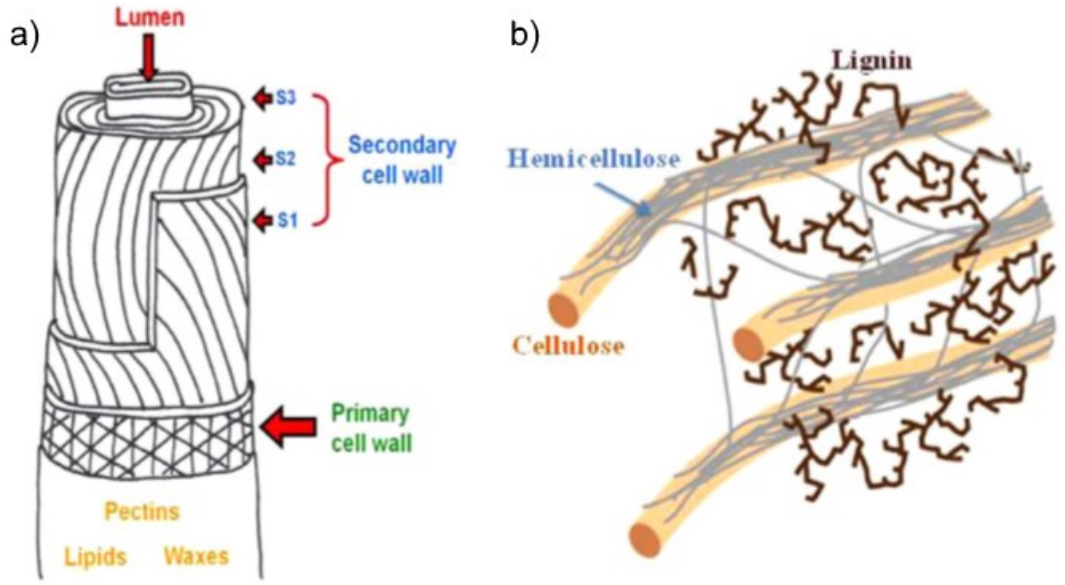


Kuva 2. *Havupuiden tyypillinen mikroskooppinen rakenne (a) ja vastaava lehtipuiden rakenne (b). Muokattu Ramage et al. julkaisusta. [46 s. 336]*

Lehtipuiden mikroskooppinen rakenne on monimutkaisempi ja se koostuu neljästä solutyypistä. Parenkyymisolut toimivat vastaavalla tavalla kuin havupuissa, mutta niitä esiintyy säteissuunnan lisäksi myös rungon pituussuunnassa. Trakeidien osuus lehtipuissa on pieni ja puuosan tuennasta vastaavat niiden sijasta kuidut (fibers), jotka ovat trakeidien tapaan onttoja, päistään umpinaisia, pitkiä ja ohuita soluja. Trakeideista poiketen kuidut ovat lyhyempiä ja ohuempia. Kuitujen pituus on noin 1–2 mm ja leveys noin 10–20 µm. Lisäksi kuitujen soluseinämät ovat paksumpia trakeideihin verrattuna. Lehtipuissa veden ja ravinteiden kuljetuksesta puun korkeussuunnassa vastaavat erilliset putkisolut (vessels). Ne ovat yleensä lyhyitä ja paksuja. Putkisolujen pituus on yleensä alle 1 mm ja halkaisija noin 60–300 µm. Lehtipuun rakennetta on havainnollistettu kuvassa 2b. Monissa lehtipuissa selkeää eroa kevät- ja kesäpuun välillä ei ole havaittavissa ja rakenne on yhtenäinen kaikkialla puuta kuvan 2b mukaisesti. Puulajeissa, joissa vuosirengasrakenne on havaittavissa, putkisolujen kokojakauma muuttuu selkeästi siirryttäessä kevätpuusta kesäpuuhun. [13 s. 8–11][19 s. 24][25 s. 4–6][46 s. 335–336]

Kennomaisen rakenteen vuoksi puun mekaaniset ominaisuudet ovat erilaisia solujen pituussuunnassa sekä kuvien 2a ja 2b poikkileikkaustasoilla. Lisäksi mekaaniset ominaisuudet kevätpuussa poikkeavat huomattavasti kesäpuun ominaisuuksista, mikä johtuu kesäpuun paksuseinäisemmästä soluverkostosta. Kuvissa 2a ja 2b solut ovat kohdakkain pysty- ja vaakasuunnissa. Todellisuudessa näin ei kuitenkaan ole ja solujen kokovaihtelun vuoksi rakenteessa esiintyy pientä epäjärjestystä [17 s. 463]. Tämän vuoksi mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat jonkin verran kuvien 2a ja 2b pysty- ja vaakasuunnissa. Materiaalisuuntien tarkempaan määrittelyyn palataan myöhemmin.

Kennomaisen solurakenteen lisäksi puun mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa merkittävästi yksittäisten solujen rakenne. Kasvisolut muodostuvat protoplastista ja sitä ympäröivästä soluseinästä. Protoplasti on solun elävä osa. Puuosassa täysin kehittyneet solut jälsin ulkopuolella ovat kuolleita eivätkä sisällä protoplastia lainkaan. Nämä solut koostuvat vain soluseinästä ja protoplastin paikalla olevaa onttoa osaa kutsutaan nimellä luumen. Nuorilla kasvavilla soluilla protoplasti on läsnä mutta se häviää solun kehittyessä. Kuvissa 2a ja 2b luumeneita on havainnollistettu solujen keskellä olevilla ontoilla alueilla. [62 s. 14–15]



Kuva 3. *Soluseinän rakenne (a) ja kuituvahvistus molekyylitasolla (b) [46 s. 337].*

Soluseinän rakenne kuiduissa ja trakeideissa on samankaltainen kaikilla puulajeilla. Rakenne muistuttaa kuituvahvisteista komposiittimateriaalia, jota on havainnollistettu kuvissa 3a ja 3b. Kuidut muodostuvat selluloosamolekyyleistä ja niitä paikallaan pitävä matriisi ligniinistä, hemiselluloosasta ja vedestä. Soluseinän rakenne on lisäksi kerroksellinen ja rakenne voidaan jakaa primääri- ja sekundääriseinämiin. [13 s. 14][19 s. 35–44][46 s. 336–339][62 s. 36–38]

Primääriseinämä on soluseinän uloin kerros ja se muodostuu ensimmäisenä solun syntyvaiheessa. Siinä selluloosakuidut ovat satunnaisesti suuntautuneita ja sen vaikutus puun mekaanisiin ominaisuuksiin on vähäinen. Primäärikerroksen päällä solujen välissä on välilamellikerros. Se on muista kerroksista poiketen kuituvahvistamaton ja siten solun mekaanisesti heikoin kerros. Välilamellin tehtävä on sitoa vierekkäiset solut toisiinsa. Solujen lujuus- ja jäykkyysominaisuudet aiheutuvat pitkälti primäärikerroksen alla olevasta sekundääriseinämästä, joka koostuu ulko-, keski- ja sisäkerroksesta. Näitä kutsutaan myös S1-, S2- ja S3-kerroksiksi. Merkittävä mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä on kuitujen suuntautuminen solun pituussuuntaan nähden. Kuitujen suuntautuminen vaihtelee kerroksesta toiseen ja se on puulajikohtainen ominaisuus. S2-kerros muodostaa noin 85% sekundääriseinämän paksuudesta ja sen vaikutus puun lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin on siten merkittävin. [13 s. 21–22][19 s. 37–40][25 s. 20–22][46 s. 336–339][62 s. 40–42]

2.2 Elastiset ominaisuudet

Elastisilla ominaisuuksilla tarkoitetaan puun elastisessa materiaalimallissa esiintyviä materiaalivakioita. Materiaalimalli kuvaa jännitysten ja venymien välistä yhteyttä kontinuumikappaleessa. Kontinuumi on matemaattinen approksimaatio materiaalista, joka koostuu äärettömän monesta materiaalipartikkelista. Tämä tarkoittaa sitä, että todellisessa materiaalissa esiintyviä diskreettejä rakenneosia, kuten atomeja ja molekyylejä ei mallinneta lainkaan. Jännitys kuvaa rakennetta koossa pitäviä sisäisiä voimia ulkoisen kuormituksen alaisena. Ulkoinen kuormitus voi olla esimerkiksi mekaanisesti vaikuttava voima tai lämpötilan muutos. Jännitys aiheuttaa rakenteen deformoitumista eli geometrista muutosta. Deformaation mittana voidaan käyttää venymää, joka määritellään tyypillisesti deformoituneen mitan suhteena johonkin vakiona pysyvään referenssipituuteen. Deformoitunut mitta voi olla esimerkiksi kahden materiaalipartikkelin siirtymä ja referenssipituus partikkelien välimatka ennen deformaatiota.

Lineaarisille elastisille materiaaleille materiaalimalli voidaan esittää muodossa

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbb{C}\colon \boldsymbol{\sigma}, \tag{1}$$

jossa $\mathbb{C}$ on 4. kertaluvun elastinen komplianssitensori. Toisen kertaluvun venymä- ja jännitystensoreita merkitään symboleilla $\boldsymbol{\varepsilon}$ ja $\boldsymbol{\sigma}$. Toista astetta suurempien tensoreiden käyttö on hankalaa minkä vuoksi yhtälö (1) esitetään usein Voigtin notaatiota käyttäen seuraavasti:

$$\bar{\varepsilon} = \boldsymbol{C^e}\bar{\sigma}, \tag{2}$$

jossa $\boldsymbol{C^e}$ on Voigtin notaatiolla määritelty 2. kertaluvun elastinen komplianssimatriisi. Venymät $\bar{\varepsilon}$ ja jännitykset $\bar{\sigma}$ on nyt esitetty vektorimuodossa. Jännitykset voidaan lausua venymien avulla, jolloin yhtälö (2) kirjoitetaan muodossa:

$$\bar{\sigma} = \boldsymbol{D^e}\bar{\varepsilon}, \tag{3}$$

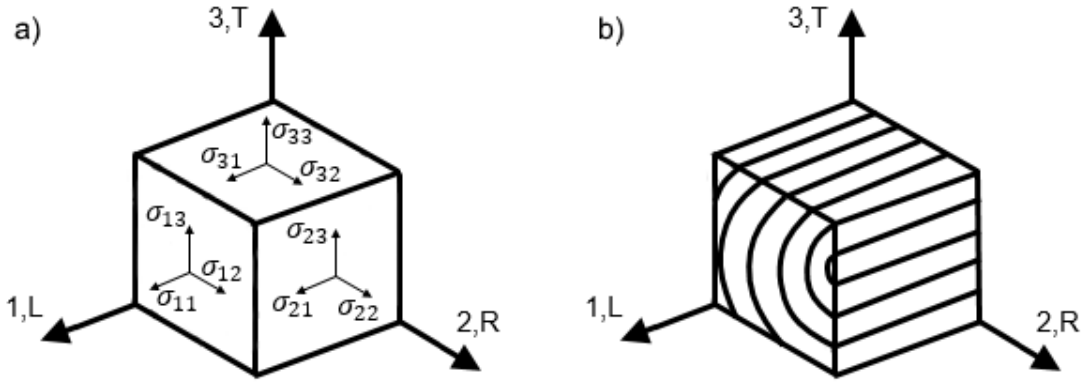
jossa $\boldsymbol{D^e}$ on elastinen jäykkyysmatriisi. Yhtälöissä (2) ja (3) vektorisuureiden $\bar{\varepsilon}$ ja $\bar{\sigma}$ komponentteja merkitään seuraavasti:

$$\bar{\varepsilon} = [\varepsilon_{11}\ \ \varepsilon_{22}\ \ \varepsilon_{33}\ \ \varepsilon_{12}\ \ \varepsilon_{13}\ \ \varepsilon_{23}]^T \tag{4}$$

ja

$$\bar{\sigma} = [\sigma_{11}\ \ \sigma_{22}\ \ \sigma_{33}\ \ \sigma_{12}\ \ \sigma_{13}\ \ \sigma_{23}]^T. \tag{5}$$

Yhtälössä (5) esiintyvien jännityskomponenttien suunnat on määritelty kuvassa 4a. Yhtälön (4) mukaisten venymäkomponenttien havainnollistaminen kuvana on hankalaa. Komponentit ε_{11}, ε_{22} ja ε_{33} kuvaavat venymää indeksejä vastaavissa suunnissa. Komponentit ε_{12}, ε_{13} ja ε_{23} kuvaavat leikkausvenymää indeksejä vastaavilla tasoilla. Kirjallisuudessa leikkausvenymäkomponenteista käytetään nimitystä liukuma.



Kuva 4. *Jännityskomponentit (a) ja puun materiaalisuunnat (b).*

Puuta kuvataan usein ortotrooppisena materiaalina. Tämä tarkoittaa sitä, että sillä on kolme toisiaan nähden kohtisuorassa olevaa suuntaa, jossa materiaaliominaisuudet ovat erilaisia. Puuta käsittelevissä julkaisuissa materiaalisuunnat valitaan tyypillisesti syiden perusteella. Syiksi nimitetään puun makrorakenteessa näkyviä kuituja, jotka muodostuvat edellisessä luvussa kuvatuista putkimaisista soluista ja jotka virheettömässä puussa ovat rungon suuntaisia. Syysuuntaa nimitetään L-suunnaksi ja syihin nähden kohtisuoria suuntia R- ja T-suunniksi [13 s. 28][25 s. 293]. Annetut nimitykset ovat vakiintuneita puuta koskevissa julkaisuissa, minkä vuoksi niitä käytetään myös tässä työssä. Puun materiaalisuuntia on havainnollistettu kuvassa 4b. Puun mallintaminen ortotrooppisena on sitä tarkempaa, mitä kauempaa puun keskeltä tarkasteltava kappale on valmistettu.

Tällöin vuosirenkaiden kaarevuus on pientä. Vuosirenkaiden kaareutuvuuden ollessa suurta, materiaalisuunnat muuttuvat kaarteiden pisteissä siten, että R-suunta on vuosirenkaiden normaalin suuntainen ja T-suunta tangentin suuntainen. Näin ei käytännössä kuitenkaan tehdä ja puulle käytetään vuosirenkaiden kaareutuvuudesta huolimatta vakiona pysyviä suuntia.

Yhtälöissä (4) ja (5) L-, R- ja T-suuntien jännitys- ja venymäkomponentteja on merkitty alaindekseillä 1, 2, 3. Tämä on toinen yleinen merkintätapa materiaalisuunnille. Merkintöjen helpottamiseksi L-, R- ja T-suuntia käytetään tekstissä ja yhtälöissä käytetään numeroindeksejä.

Puun elastiset ominaisuudet kytkeytyvät materiaalimalliin yhtälössä (2) esiintyvän komplianssimatriisin välityksellä. Elastiselle ortotrooppiselle materiaalille komplianssimatriisi esitetään muodossa

$$\boldsymbol{C^e} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_2} & -\frac{\nu_{31}}{E_3} & & & \\ -\frac{\nu_{12}}{E_1} & \frac{1}{E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_3} & & 0 & \\ -\frac{\nu_{13}}{E_1} & -\frac{\nu_{23}}{E_2} & \frac{1}{E_3} & & & \\ & & & \frac{1}{G_{12}} & & \\ & 0 & & & \frac{1}{G_{13}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_{23}} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

jossa E_i, G_{ij} ja ν_{ij} ovat kimmomoduuli, leikkausmoduuli ja Poissonin vakio alaindeksien osoittamilla materiaalisuunnilla ja -tasoilla [13 s. 79][16, 17, 20, 37, 41]. Poissonin vakio kuvaa poikittaissuuntaisen venymän suhdetta kuormitussuunnan venymään ja se määritetään seuraavasti:

$$\nu_{ij} = -\frac{\varepsilon_{jj}}{\varepsilon_{ii}}, \tag{7}$$

jossa indeksit i ja j voivat saada arvon 1, 2 tai 3 [13 s. 75][37 s. 33].

Monissa julkaisuissa materiaaliominaisuudet R- ja T-suunnissa oletetaan yhtä suuriksi, jolloin puuta mallinnetaan poikittaisisotrooppisena materiaalina [20, 36, 41, 56]. Todellisuudessa materiaaliominaisuudet R- ja T-suunnissa poikkeavat toisistaan mutta erot niiden välillä ovat hyvin pieniä L-suuntaan verrattuna, jossa ominaisuudet ovat suurimmillaan. Poikittaisisotrooppisessa materiaalimallissa merkitään

$$\begin{cases} E_1 = E_L \\ E_2 = E_3 = E_T \\ G_{12} = G_{13} = G_L \\ G_{23} = G_T \\ \nu_{12} = \nu_{13} = \nu_L \\ \nu_{23} = \nu_{32} = \nu_{T.} \end{cases} \tag{8}$$

Komplianssimatriisi on symmetrinen, minkä vuoksi voidaan kirjoittaa

$$\begin{cases} \frac{\nu_{21}}{E_2} = \frac{\nu_{12}}{E_1} \\ \frac{\nu_{31}}{E_3} = \frac{\nu_{13}}{E_1}. \end{cases} \tag{9}$$

[36 s. 15][56 s. 49]. Lisäksi leikkausmoduuli G_T voidaan esittää kimmomoduulin E_T ja Poissonin vakion ν_T avulla seuraavasti:

$$G_T = \frac{E_T}{2(1 + \nu_T)} \tag{10}$$

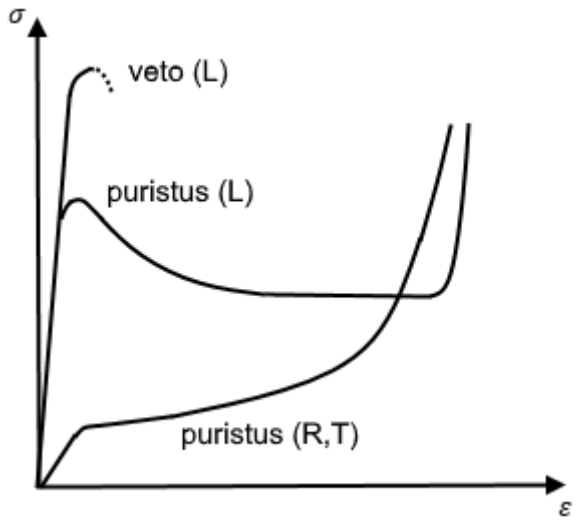
[36 s. 15][56 s. 49]. Koska komplianssimatriisi on symmetrinen, ortotrooppisella materiaalilla on yhdeksän toisistaan riippumatonta materiaalivakiota ja poikittaistrooppisella viisi.

2.3 Lujuusominaisuudet

Puun lujuusominaisuuksilla tarkoitetaan rajajännityksiä, joilla puun mekaaninen käyttäytyminen muuttuu. Myötölujuudella tarkoitetaan jännitystä, jolla materiaalin elastinen käyttäytyminen muuttuu plastiseksi. Tämä tarkoittaa sitä, että kuormituksen poistuttua materiaaliin jää pysyvä muodonmuutos. Murtolujuudella tarkoitetaan jännitystä, jolla materiaali murtuu. Puun lujuusarvot ja jälkielastinen käyttäytyminen ovat hyvin erilaisia puristuksessa ja vedossa. Lisäksi niihin vaikuttaa voimakkaasti kuormituksen suunta syihin nähden. Puun komposiittimaisen rakenteen vuoksi lujuusominaisuudet syiden suunnassa ovat suuremmat kuin poikittaissuunnissa. Kuvassa 5 on esitetty puulle tyypillinen jännitys-venymä -kuvaaja yksiaksiaalisissa kuormitustiloissa.

Syiden suuntainen vetolujuus on tyypillisesti suurempi kuin puristuslujuus. Vetolujuuden ylityttyä puun käyttäytyminen on kuitenkin haurasta. Vetolujuus on pienimmillään kuormituksen vaikuttaessa kohtisuorassa syitä vasten ja suurimmillaan syiden suunnassa. Monissa lähteissä haurasmurtuman on esitetty laskevan jyrkästi kohti arvoa nolla lineaarisen elastisen osan jälkeen [30 s. 207][49 s. 11][56 s. 49]. Joidenkin lähteiden mukaan puussa tapahtuu pientä lujittumista ennen haurasta vauriota, joka voidaan havaita jännityskäyrän kaareutumisena elastisen osa jälkeen [17 s. 465][19 s. 161]. Joissakin lähteissä lujittumista seuraa vielä pehmenemisalue, jossa jännitykset laskevat venymän

kasvaessa ennen lopullista murtumaa [19 s. 161]. Pehmenemistä on havainnollistettu kuvassa 5 katkoviivalla. Pehmenemisen vuoksi puun vetolujuutta voidaan kuvata kahdella eri lujuussuureella, joita kutsutaan nimelliseksi ja todelliseksi murtolujuudeksi. Nimellinen murtolujuus on suurin jännityksen saama arvo ennen pehmenemistä ja todellinen murtolujuus jännityksen arvo pehmenemisalueen lopussa murtohetkellä.



Kuva 5. *Puun jännitys-venymä -kuvaajia yksiaksiaalisissa veto- ja puristuskokeissa eri materiaalisuunnissa. Uudelleen piirretty ja muokattu Holmberg et al. julkaisusta. [17 s. 465]*

Puristuskuormituksen alaisena puu käyttäytyy sitkeästi L-, R- ja T-suunnissa. Plastinen käyttäytyminen L- suunnassa on kuitenkin erilaista R- ja T- suuntiin verrattuna. Puristusjännityksen kasvaessa L-suunnassa riittävän suureeksi jännitykset kääntyvät laskuun, eli materiaali pehmenee. Kuvassa 5 esitetyn pehmenemisosan muoto vaihtelee lähdekohtaisesti ja se on luultavasti myös puulajikohtainen ominaisuus [9 s. 8693–8695][17 s. 465][19 s. 192][39 s. 3363]. Pehmeneminen johtuu puun solurakenteen soluseinämien paikallisista nurjahduksista, joiden seurauksena kuormaa tukevien alueiden määrä vähenee. Nurjahtelu alkaa yleensä kevätpuussa, koska siellä solujen seinämien paksuus suhteessa luumenin halkaisijaan on pienempi kesäpuuhun verrattuna [19 s. 187][49 s. 15]. Kun venymät kasvavat riittävästi, joidenkin lähteiden mukaan jännityksissä tapahtuu jyrkkä nousu [17 s. 465][19 s. 192][49 s. 14]. Kaikissa lähteissä jännitysten kasvua ei kuitenkaan ole havaittavissa [9 s. 8693–8695][39 s. 3363][49 s. 14].

Plastinen käyttäytyminen R- ja T- suunnissa alkaa huomattavasti aikaisemmin L-suuntaan verrattuna. Myötölujuuden ylityttyä venymät kasvavat voimakkaasti pienillä kuorman lisäyksillä kuvan 5 mukaisesti. Venymien voimakas kasvu voidaan selittää puun kennomaisella rakenteella, jota on havainnollistettu kuvissa 2a ja 2b. Kun kuormitus kas-

vaa riittävästi, soluseinät nurjahtelevat sivusuunnissa ja painuvat vähitellen kasaan. Nurjahtelu on sitä voimakkaampaa, mitä pienempi on solujen keskimääräinen soluseinän paksuus suhteessa kennon halkaisijaan. Tämä suhde vaikuttaa myös myötörajaan. Yksittäisten solujen luumenit painuvat kasaan kuorman kasvaessa alkaen kevätpuusta ja edeten vähitellen kesäpuuhun. Kun valtaosa soluista on painunut kasaan, materiaalin joustavuus vähenee ja jännitykset kasvavat voimakkaasti. Erot R- ja T-suunnissa ovat pienet, minkä vuoksi niitä on havainnollistettu kuvassa 5 samalla käyrällä. [14 s. 5-2][17 s. 465][19 s. 193–195, s. 200][49 s. 14–16]

Leikkausjännitysten tiedetään johtavan vetokuormituksen tavoin haurasmurtumaan [19 s. 185][41 s. 1066][49 s. 17–19]. Puhdasta leikkausjännitystilaa on kuitenkin hyvin vaikea saavuttaa kokeellisesti, minkä vuoksi kuvassa 5 leikkausjännityksen aiheuttamaa vastetta ei ole esitetty. Leikkausjännitykset ovat kuitenkin usein läsnä sekä veto- että puristuskuormituksissa. Leikkausvauriot ilmenevät tyypillisesti LR- ja LT-tasoilla vuosirenkaita mukaillen [49 s. 17–19]. Vaurio etenee tällöin kevät- ja kesäpuualueiden rajapinnalla. Leikkausjännitykset voivat johtaa myös ns. ”rolling shear” vaurioon RT-tasolla, joka on yleinen vauriomuoto erityisesti CLT-levyissä [49 s. 17–19][62 s. 169].

Puun deformoituminen riippuu kuorman suuruuden lisäksi myös kuorman vaikutusajasta. Tällaista ominaisuutta kutsutaan viskoelastisuudeksi. Merkittävä viskoelastisuuden muoto puurakennuksessa on viruminen. Virumiseksi kutsutaan ilmiötä, jossa vakiokuorman alainen rakenne deformoituu ajan kuluessa. Kun kuorma poistetaan, osa virumisesta aiheutuneesta deformaatiosta palautuu ajan myötä ja osa jää pysyväksi. Deformoitumisen lisäksi rakenteen lujuusominaisuudet pienenevät virumisen edetessä. Tämän vuoksi puurakenteita suunniteltaessa on huomioitava staattisen lujuuden lisäksi kuorman vaikutusaika. Virumisen voimakkuuteen vaikuttaa ajan lisäksi ympäristöolosuhteet. Näistä merkittävimmät ovat lämpötila ja ilman suhteellinen kosteus [13 s. 99–100][14 s. 5-39][19 s. 237–238].

Virumista torjutaan mitoittamalla rakenteen kuormat ja ympäristöolosuhteet sellaisiksi, että virumisnopeus jää hyväksyttävään suuruusluokkaan. Toinen mitoitusmenetelmä perustuu rakenteen kestoiän rajaamiseen. Tällöin rakenne mitoitetaan siten, että siihen muodostuvat jännitykset eivät ylitä suunnitellulle kestoiälle mitattua lujuusarvoa. Rakenne tulee uusia tai poistaa käytöstä kestoiän ylityttyä. [19 s. 225–226]

Kuorman vaikutusajan lisäksi myös kuormitusnopeudella on merkitystä lujuusarvoihin. Joidenkin lähteiden mukaan kuormitusnopeuden nostaminen suurentaa lujuusarvoja [13 s. 125–126][14 s. 5-38][19 s. 202–203]. Myös elastisten ominaisuuksien on esitetty kasvavan kuormitusnopeutta lisätessä [19 s. 167].

2.4 Mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttavat tekijät

Puun lujuuteen ja elastisiin ominaisuuksiin vaikuttaa monta eri tekijää. Näitä ovat aikaisempien lukujen perusteella kuormituksen tyyppi, nopeus, kesto, suunta syihin nähden sekä puulajille ominainen solurakenne. Merkittävä puun solurakennetta kuvaava mekaaninen ominaisuus on tiheys. Tiheys määritellään massan ja tilavuuden suhteena. Puun massa muodostuu pääosin soluseinien yhteismassasta sekä luumeneissa olevasta vedestä ja eritteistä. Tilavuus puolestaan määräytyy luumenien ja soluseinien yhteistilavuudesta. Osoittautuu, että soluseinän tiheys on puulajista riippumaton vakio. Tästä syystä puun tiheys riippuu merkittävästi luumenien yhteistilavuudesta suhteessa muuhun puumassaan. Lisäksi tiheyteen vaikuttaa puun kosteus- ja eritepitoisuus. Tiheys ilmoitetaan tyypillisesti 12% kosteuspitoisuuksissa. Tämän vuoksi erot tiheydessä eri puulajien sekä saman lajin edustajien välillä riippuvat luumenien tilavuusosuuksista ja eritepitoisuuksista. Tiheys on erityisen hyvä suure puun lujuuden arvioimisessa. Lujuus tyypillisesti kasvaa tiheyden mukana, sillä tällöin puun solurakenteessa on pääsääntöisesti enemmän puuainesta suhteessa luumeneihin. Samasta syystä tiheyden kasvun on esitetty nostavan myös puun kimmomoduuleja. Poikkeuksia näihin sääntöihin kuitenkin esiintyy johtuen eroista eritepitoisuuksissa sekä eroista solujen kuituvahvisterakenteissa puulajien välillä. [13 s. 31–34, s. 81–83, s. 119][19 s. 133, s. 167–168, s. 204][25 s. 160–173, s. 305–309, s. 326–327, s. 342–343][62 s. 111–113, s. 174]

Tyypillisesti lujuusominaisuudet määritetään virheettömille puunäytteille. Puussa voi kuitenkin esiintyä lukuisia epätäydellisyyksiä. Tällaisia ovat esimerkiksi erilaiset kasvuviat kuten syyhäiriöt (cross grain), reaktiopuu (reaction wood) ja oksat. Syyhäiriöillä tarkoitetaan rungon pituussuunnasta poikkeavaa syyrakennetta. Näistä yleisimpiä kutsutaan spiraalisiksi (spiral grain) ja diagonaalisiksi (diagonal grain) syyrakenteiksi. Spiraalinen syyrakenne muodostuu luonnollisista kasvutekijöistä syiden kasvaessa kierremäiseksi rungon ympäri. Syiden kierteisyys muuttuu puun eliniän aikana ja se on tyypillisesti voimakkainta nuorilla puilla. Etäännyttäessä puun ytimestä kohti ulompia vuosirengaskerroksia, kierteisyys vähenee ja se voi vanhoilla puilla kääntyä vastakkaissuuntaiseksi. Diagonaalinen syyrakenne muodostuu tyypillisesti sahauksessa tukkien poikkileikkauksen kaventuessa voimakkaasti. Tällöin valmiiseen puutavaraan muodostuva syyrakenne on kalteva. Syyhäiriöt pienentävät erityisesti puun lujuutta. [13 s. 27–28, 14 s. 5–30, 25 s. 84–85]

Reaktiopuu on muusta rakenteesta poikkeavaa kudosta, jota muodostuu tyypillisesti kalteviin puunrunkoihin ja oksiin. Lehtipuissa reaktiopuuta kutsutaan vetopuuksi (tension wood) ja havupuissa lylyksi (compression wood) niissä vallitsevien veto- ja puristustilojen vuoksi [14 s. 5-31– 5-32][19 s. 107–111][46 s. 339]. Vetopuun on esitetty nostavan puun

vetomurtolujuutta ja pienentävän puristuslujuutta [13 s. 122–123]. Vastaavasti lyly nostaa puristuslujuutta ja pienentää vetomurtolujuutta [13 s. 122–123].

Tärkein kasvuvika puun mekaanisten ominaisuuksien kannalta on rungon sisään kasvaneet oksat. Syiden suunta vääristyy voimakkaasti oksien kohdalla, jolloin niihin muodostuu muuta rakennetta heikompi alue. Oksat pienentävät erityisesti puun vetolujuutta sekä taivutuslujuutta oksan sijaitessa vetorasitetulla puolella. Niiden vaikutus puristuslujuuteen on vähäisempi mutta merkittävä. Oksien vaikutus rakenteen lujuuteen riippuu niiden koosta, sijainnista ja lukumäärästä. [14 s. 5-26–5-28][25 s. 328, s. 370–373][46 s. 339]

Oksat voivat muodostuessaan olla eläviä tai kuolleita. Elävät oksat kasvavat kiinni ympäröivään runkoon ja kuolleet oksat jäävät irtonaisiksi rungon sisään. Kuolleiden oksien vaikutus mekaanisiin ominaisuuksiin on vähäisempi eläviin oksiin verrattuna. Tämä johtuu siitä, että syyhäiriötä muodostuu vähemmän kuolleiden oksien ympärille. Oksien ja syyvirheiden vaikutuksia lujuuteen arvioidaan tyypillisesti pienentämällä virheettömälle puulle ilmoitettuja lujuusarvoja sopivilla standardien mukaisilla varmuuskertoimilla. [14 s. 7-3–7-6]

Ympäristöolosuhteista merkittävin puun lujuuteen vaikuttava tekijä on kosteuspitoisuus. Kosteuspitoisuus määritellään puussa olevan veden ja uunikuivatun puun painojen suhteena. Puu luovuttaa tai absorboi vettä ympäröivän ilman lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mukaan. Vesi voi esiintyä puussa vapaana solujen sisällä luumeneissa tai kemiallisesti absorboituneena soluseinään. Tuoreen sahatun puun kosteuspitoisuus vaihtelee tavallisesti 30%-200% välillä ja kosteuspitoisuus on yleensä suurempi pintapuussa verrattuna sydänpuuhun. Puun kuivuessa luumeneissa oleva vapaa vesi haihtuu, kunnes saavutetaan tila, jossa vesi on sitoutuneena ainoastaan soluseinämiin. Tällaista tilaa vastaavaa kosteuspitoisuutta kutsutaan saturaatiopisteeksi. Puun lujuusominaisuudet paranevat, kun kosteuspitoisuus alittaa saturaatiopisteen. Tällöin vesi haihtuu soluseinämistä aiheuttaen solujen kutistumista ja tuoden soluseinien vahvistavia kuituja lähemmäksi toisiaan. [13 s. 37–42][14 s. 4-1–4-3][19 s. 117–126, s. 208–209]

Saturaatiopisteen alapuolella kosteuspitoisuuden pieneneminen kasvattaa lujuusominaisuuksien lisäksi myös kimmomoduuleita. Kosteuspitoisuuden pienenemisen vaikutukset leikkausmoduuleihin ja Poissonin vakioihin eivät kuitenkaan noudata selkeää trendiä ja ne riippuvat tarkasteltavista materiaalisuunnista [13 s. 85–87][25 s. 309–311]. Saturaatiopistettä vastaavan kosteuspitoisuuden on esitetty olevan keskimäärin 30% mutta puulajista riippuen se voi vaihdella usealla prosentilla [14 s. 4-2][19 s. 121][25 s. 199–200]. Rakennusteollisuudessa ja standardeissa tyypillinen kosteuspitoisuus puulle on noin

12%, mikä vastaa ilman suhteellista kosteutta 60% lämpötilassa 20°C [13 s. 42][54 s. 8]. Kyseinen arvo on huomattavasti saturaatiopistettä matalampi.

Kosteuspitoisuuden lisäksi puun mekaanisiin ominaisuuksiin vaikuttaa vähemmässä määrin lämpötila. Lämpötilan nostaminen pienentää puun kimmomoduuleja ja lujuusominaisuuksia. Kirjallisuudessa lämpötilan vaikutusta verrataan usein huoneenlämpötilaan 20°C koska osoittautuu, että puun kosteuspitoisuuden vaihtelu ei vaikuta merkittävästi mekaanisiin ominaisuuksiin kyseisessä lämpötilassa. Huoneenlämpötilaa pienemmillä lämpötiloilla puun lujuus ja kimmomoduulit kasvavat. Vastaavasti suuremmilla lämpötiloilla ne pienenevät. Lämpötilan vaikutus on sitä voimakkaampaa, mitä suurempi on puun kosteuspitoisuus. [13 s. 88–89, s. 123–125][14 s. 5-35–5-37][62 s. 175–176]

Joissakin lähteissä kasvupaikan on väitetty vaikuttavan puun ominaisuuksiin. Puun kasvunopeutta rajoittavat maaperän ravinnepitoisuus ja kasvukauden pituus. Hidas kasvunopeus johtaa tiheämpään puuainekseen kapeiden vuosirenkaiden vuoksi, mikä parantaa puun lujuusominaisuuksia. [19 s. 213–214, 42] Tiheyden kasvu johtuu tiheämmän kesäpuuaineksen osuuden lisääntymisestä suhteessa kevätpuuhun vuosirenkaiden ohentuessa. Poikkeuksena on kuitenkin hyvin pohjoisilla leveysasteilla kasvavat puut, joilla lyhyt kasvukausi johtaa hyvin ohuisiin vuosirenkaisiin ja tiheyden pienenemiseen [13 s. 119–120]. Tämän perusteella kasvunopeudella on raja, jonka alittuessa havupuiden mekaaniset ominaisuudet kääntyvät laskuun. Vuosirengasrakenteen omaavilla lehtipuulajeilla kasvunopeuden kasvattaminen johtaa havupuista poiketen tiheämpään vuosirengasrakenteeseen ja siten parempiin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin [13 s.119–120]. Kasvunopeudella on kuitenkin raja, jonka ylityttyä tiheämmän kesäpuun osuus vuosirenkaissa vähenee ja mekaaniset ominaisuudet kääntyvät laskuun [13 s.119–120]. Lehtipuulajeilla, joilla merkittävää vuosirengasrakennetta ei ole, kasvunopeudella ei ole merkitystä.

3. PUUN MATERIAALIMALLIT

Puun elastisten ominaisuuksien mallintamista on käsitelty luvussa 2.2. Puun elastinen käyttäytyminen muuttuu epälineaariseksi jännitysten saavuttaessa kuormitustyypille ja -suunnalle ominaiset lujuusarvot kuten luvussa 2.3 on todettu. Erilainen epälineaarinen käyttäytyminen puristuksessa, vedossa ja eri materiaalisuunnissa tekevät puusta vaikean materiaalin mallintaa. Epälineaarisen käyttäytymisen mallintamiseksi on esitetty useita menetelmiä kirjallisuudessa. Tässä luvussa tarkastellaan puun epälineaariselle käyttäytymiselle esitettyjä materiaalimalleja, jotka soveltavat elementtimenetelmää. Elementtimenetelmä, eli FEM (finite element method), on differentiaaliyhtälöiden numeeriseen ratkaisemiseen käytetty menetelmä. Rakenteiden lujuutta analysoitaessa taustalla oleva differentiaaliyhtälö on tyypillisesti kontinuumille materiaalille johdettu liikeyhtälö, joka perustuu Newtonin 2. lakiin. Ratkaistavia suureita ovat tyypillisesti rakenteen siirtymät, venymät ja jännitykset. FEM-analyysissä analysoitava rakenne jaetaan rakenneosiin eli elementteihin ja elementit kiinnitetään toisiinsa elementtiverkoksi. Koko systeemiä kuvaava liikeyhtälö diskretisoidaan yksittäisille elementeille ja yhtälöt liitetään toisiinsa elementtien välisten yhteensopivuusehtojen avulla. Lopputuloksena päädytään matriisimuotoiseen yhtälöön, joka voidaan ratkaista rakenteelle asetettujen kuormitusten ja reunaehtojen avulla.

3.1 Elastoplastiset mallit

Puun mallintaminen pelkästään ortotrooppisena tai poikittaisisotrooppisena elastisena materiaalina yhtälöiden (2) ja (3) avulla on hyvä approksimaatio silloin, kun jännitykset ovat pieniä. Jännitysten kasvaessa riittävästi puu kuitenkin käyttäytyy epälineaarisesti kuvan 5 esittämällä tavalla. Puristuksesta aiheutuvaa sitkeää käyttäytymistä mallinnetaan tyypillisesti plastisuusteorian avulla. Yksiaksiaalisessa jännitystilassa plastisoituminen alkaa, kun jännitys ylittää materiaalille ominaisen myötölujuuden. Kun useampia jännityskomponentteja on läsnä, plastisen käyttäytymisen alkamista kuvataan myötöehdon avulla. Myötöehto on skalaarisuure ja se voidaan esittää seuraavasti:

$$f^p(\bar{\sigma}) = 0 \tag{11}$$

[6 s. 597][20 s. 748][27 s. 6]. Jännityskomponenttien lisäksi myötöehdossa on tyypillisesti läsnä lujittumiseen liittyviä parametreja ja materiaaliparametreista riippuvia suureita, kuten lujuusarvoja.

Yhtälö (11) määrittää pinnan jännitysavaruudessa. Kun $f^p < 0$, jännitystila on pinnan sisällä ja materiaali käyttäytyy elastisesti. Plastinen muodonmuutos alkaa kun $f^p = 0$. Tällöin jännitystila sijaitsee myötöpinnan reunalla. Jännitystila ei voi sijaita yhtälön (11) määräämän pinnan ulkopuolella jolloin $f^p > 0$. Sen sijaan pinta voi siirtyä jännitysavaruudessa tai sen koko voi muuttua. Kyseistä ilmiötä kutsutaan lujittumiseksi. Tällöin jännitystila pysyy pinnan reunalla ja ehto $f^p = 0$ on voimassa. Kun materiaaliin kohdistuva kuormitus poistetaan, jännitystila palaa pinnan sisälle jolloin $f^p < 0$. Jos materiaali käyttäytyy ideaaliplastisesti, eli lujittumista ei esiinny lainkaan, jännityskomponentit voivat muuttua vain siten, että jännityspiste liukuu myötöpinnan reunalla. [6 s. 597][27 s. 6–7]

Plastisuusteoriassa kokonaisvenymä jaetaan elastiseen ja plastiseen osaan. Tämä tehdään tyypillisesti inkrementaalisessa muodossa seuraavasti

$$\Delta\bar{\varepsilon} = \Delta\bar{\varepsilon}^e + \Delta\bar{\varepsilon}^p, \tag{12}$$

jossa $\bar{\varepsilon}^e$ ja $\bar{\varepsilon}^p$ ovat Voigtin notaation mukaiset kokonaisvenymän $\bar{\varepsilon}$ elastiset ja plastiset osat. Plastinen venymän muutos määritellään yhtälöllä

$$\Delta\bar{\varepsilon}^p = \Delta\lambda \frac{\partial f^p}{\partial \bar{\sigma}}, \tag{13}$$

jossa suuretta λ kutsutaan konsistenssiparametriksi [6 s. 597][20 s. 749][27 s. 12][56 s. 54][62]. Yhtälöä (13) kutsutaan virtaussäännöksi ja se voidaan ymmärtää $\Delta\lambda$ pituisena myötöpinnan normaalin suuntaisena vektorina. Yhtälössä (13) suureet $\bar{\varepsilon}^p$ ja λ esitetään toisinaan myös aikaderivaatan avulla nopeusmuodossa [21–23, 30]. Kun yhtälö (13) esitetään myötöpinnan f^p avulla, puhutaan assosiatiivisesta virtaussäännöstä. Virtaussääntö voidaan esittää myös myötöpinnan sijasta erillisellä plastisella potentiaalifunktiolla, jolloin puhutaan epäassosiatiivisesta virtaussäännöstä. Puuta koskevissa julkaisuissa virtaussäännössä on kuitenkin pääasiassa käytetty myötöehtoa. Myötöehdon ja virtaussäännön lisäksi plastisoitumisen kuvaamiseen käytetään yleensä lujittumisyhtälöä, joka kuvaa myötöpinnan muuttumista plastisen muodonmuutoksen edetessä. Lujittumisyhtälö on osana myötöehtoa.

Lineaarisissa FEM-analyyseissä rakenteen siirtymät, venymät ja jännitykset voidaan ratkaista elementtiformulaationa lausutusta tasapainoyhtälöstä, joka on muotoa

$$\boldsymbol{K}\bar{u} = \bar{F}. \tag{14}$$

Yhtälössä (14) $\boldsymbol{K}$ on koko rakenteen jäykkyyttä kuvaava globaali jäykkyysmatriisi, joka on muodostettu yhteensopivuusehtojen avulla yksittäisten elementtien jäykkyysmat-

riiseista. Suureet $\bar{u}$ ja $\bar{F}$ ovat vektorimuotoon kootut elementtien integrointipisteiden siirtymät ja niissä vaikuttavat ulkoiset voimat. Yhtälö (14) on voimassa materiaalin ollessa lineaarielastinen ja analysoitavan rakenteen siirtymien ollessa pieniä. [6 s. 485]

Elastoplastisissa malleissa jännitykset ja venymät ratkaistaan inkrementoimalla rakenteeseen kohdistuvia kuormia. Tällöin yhtälö (14) lausutaan ns. tangentiaalisen jäykkyysmatriisin $\boldsymbol{K_t}$ avulla seuraavasti:

$$\boldsymbol{K_t}\Delta\bar{u} = \Delta\bar{F}, \tag{15}$$

jossa $\Delta\bar{u}$ ja $\Delta\bar{F}$ ovat elementtien integrointipisteiden siirtymän- ja voiman muutokset vektoriin koottuna. Tangentiaalinen jäykkyysmatriisi $\boldsymbol{K_t}$ muodostetaan jäykkyysmatriisista $\boldsymbol{K}$. Rakenteen tunnettua tilaa voidaan kuvata indeksillä n ja kuorman lisäyksen jälkeistä tuntematonta tilaa indeksillä $n+1$. Tällöin suureet $\Delta\bar{u}$ ja $\Delta\bar{F}$ kuvaavat tilojen n ja $n+1$ välistä muutosta. Osoittautuu, että $\boldsymbol{K_t}$ riippuu analysoitavan rakenteen materiaaliominaisuuksista ja geometriasta tilassa n. Lisäksi $\Delta\bar{F}$ tunnetaan ja se asetetaan analyysin alussa sopivasti. Koska kaikki muut suureet tunnetaan, yhtälöstä (15) voidaan ratkaista suure $\Delta\bar{u}$ ja sitä kautta elementtikohtaiset kokonaisvenymän muutokset $\Delta\bar{\varepsilon}$. [6 s. 492–493][27 s. 22]

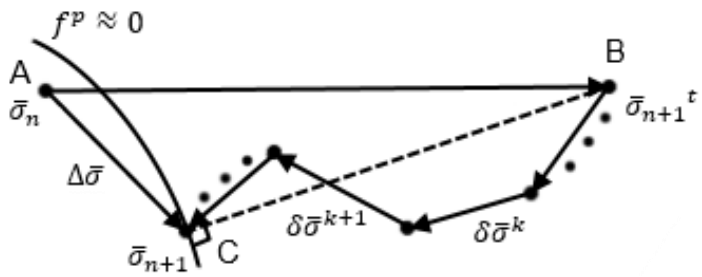
Kun $\Delta\bar{\varepsilon}$ tunnetaan, jännitykset sekä kokonaisvenymän elastiset ja plastiset osuudet ratkaistaan numeerisesti jonkinlaisella algoritmilla. Kirjallisuudessa usein käytetty menetelmä perustuu ns. elastisen ennustajan ja plastisen korjaajan käyttöön [21–23, 27, 30, 39, 56, 62]. Siinä plastisen käyttäytymisen alkamista arvioidaan ns. jännitysyriteellä

$$\bar{\sigma}_{n+1}{}^{t} = \bar{\sigma}_n + \boldsymbol{D^e}\Delta\bar{\varepsilon} \tag{16}$$

[27 s. 25][56 s. 54][62]. Jännitysyrite sijoitetaan myötöehtoon (11). Jos $f^p < 0$, kokonaisvenymä koostuu vain elastisesta osasta ja jännitykset $\bar{\sigma}_{n+1}$ saadaan suoraan yhtälöstä (16). Tällöin voidaan merkitä

$$\begin{cases} \bar{\sigma}_{n+1} = \bar{\sigma}_{n+1}{}^{t} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}{}^{e} = \Delta\bar{\varepsilon} \\ \Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}{}^{p} = 0. \end{cases} \tag{17}$$

Tilanteessa, jossa $f^p \geq 0$, suureet $\bar{\sigma}_{n+1}$, $\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}{}^{e}$ ja $\Delta\bar{\varepsilon}_{n+1}{}^{p}$ tulee ratkaista iteratiivisesti. Iteratiivista prosessia on havainnollistettu kuvassa 6. Elastisella alueella sijaitsevasta pisteestä A siirrytään jännitysyritteen $\bar{\sigma}_{n+1}{}^{t}$ avulla pisteeseen B, joka sijaitsee myötöpinnan ulkopuolella. Iteraatioprosessin tavoitteena on saada jännityspiste B myötöpinnalla sijaitsevalle pisteelle C.



Kuva 6. *Iterointiprosessi elastisella ennustaja-askeleella ja plastisella korjauksella. Uudelleen piirretty ja muokattu Krabbenhøftin julkaisusta. [27 s. 28]*

Jännitysyritteen sijaitessa myötöpinnan ulkopuolella, sitä korjataan virtaussäännön avulla yhtälöllä

$$\bar{\sigma}_{n+1} = \bar{\sigma}_{n+1}{}^t - \Delta\lambda \boldsymbol{D^e} \frac{\partial f^p}{\partial \bar{\sigma}}(\bar{\sigma}_{n+1}), \tag{18}$$

jossa suluissa merkitty termi tarkoittaa arvoa, jolla sulkuja edeltävä funktio evaluoidaan [27 s. 28][56 s. 54][62]. Yhtälössä (18) konsistenssiparametrin $\Delta\lambda$ sisältävää termiä kutsutaan myös plastiseksi korjaajaksi. Yhtälöiden (16) ja (18) avulla voidaan kirjoittaa:

$$\bar{p} = \Delta\bar{\sigma} - \boldsymbol{D^e}\Delta\bar{\varepsilon} + \Delta\lambda \boldsymbol{D^e} \frac{\partial f^p}{\partial \bar{\sigma}}(\Delta\bar{\sigma} + \bar{\sigma}_n) = 0, \tag{19}$$

jossa merkitään

$$\Delta\bar{\sigma} = \bar{\sigma}_{n+1} - \bar{\sigma}_n \tag{20}$$

[27 s. 26][56 s. 54] [62]. Yhtälö (19) riippuu kahdesta tuntemattomasta suureesta, jotka ovat Voigtin notaation mukaisesti esitetty jännitystensorin muutos $\Delta\bar{\sigma}$ ja konsistenssiparametrin muutos $\Delta\lambda$. Jännitystilan $\bar{\sigma}_{n+1}$ tulee sijaita myötöpinnalla, josta saadaan ehto

$$q = f^p(\bar{\sigma}_{n+1}) = 0 \tag{21}$$

[27 s. 27][56 s. 53][62]. Yhtälöiden (19) ja (21) nollakohtien löytämiseen käytetään tyypillisesti iteratiivista Newton-Raphson menetelmää. Tällöin voidaan kirjoittaa

$$\boldsymbol{J}^m \begin{pmatrix} \delta\bar{\sigma}^m \\ \delta\lambda^m \end{pmatrix} = -\begin{pmatrix} \bar{p}^m \\ q^m \end{pmatrix}, \tag{22}$$

jossa $\delta\bar{\sigma}^m$ ja $\delta\lambda^m$ ovat iteraatiokierrosta m vastaavat muutokset arvoille $\Delta\bar{\sigma}$ ja $\Delta\lambda$. Yhtälössä (22) esiintyvä Jacobin matriisi $\boldsymbol{J}$ määritellään seuraavasti:

$$\boldsymbol{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\bar{p}}{\partial\Delta\bar{\sigma}} & \frac{\partial\bar{p}}{\partial\Delta\lambda} \\ \frac{\partial q}{\partial\Delta\bar{\sigma}} & \frac{\partial q}{\partial\Delta\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{I} + \Delta\lambda \boldsymbol{D^e} \frac{\partial^2 f^p}{\partial\bar{\sigma}^2}(\Delta\bar{\sigma} + \bar{\sigma}_n) & \boldsymbol{D^e} \frac{\partial f^p}{\partial\bar{\sigma}}(\Delta\bar{\sigma} + \bar{\sigma}_n) \\ \frac{\partial f^p}{\partial\bar{\sigma}}(\Delta\bar{\sigma} + \bar{\sigma}_n) & 0 \end{bmatrix} \tag{24}$$

[27 s. 27]. Yhtälöstä (22) ratkaistaan suureet $\delta\bar{\sigma}^m$ ja $\delta\lambda^m$ ja seuraavan iterointikierroksen suureet ratkaistaan yhtälöistä

$$\Delta\bar{\sigma}^{m+1} = \Delta\bar{\sigma}^{m} + \delta\bar{\sigma}^{m}, \qquad \Delta\lambda^{m+1} = \Delta\lambda^{m} + \delta\lambda^{m} \tag{25}$$

[27 s. 27]. Tämän jälkeen ${\bar{\sigma}_{n+1}}^{m+1}$ lasketaan yhtälöstä (20) ja sijoitetaan myötöehtoon (11). Mikäli $f^p > 0$, iteraatiokierrosta m kasvatetaan arvolla 1 ja iteraatio suoritetaan uudelleen. Iteraatiota jatketaan, kunnes myötöehto on riittävän lähellä arvoa nolla. Plastinen venymä voidaan tämän jälkeen ratkaista virtausyhtälöstä (13). Lopuksi elastinen venymä ratkaistaan kokonaisvenymän ja plastisen osan avulla yhtälöstä (12).

Rakenteen ollessa tasapainossa, jännitysten $\bar{\sigma}_{n+1}$ avulla laskettujen sisäisten voimien tulee olla yhtä suuret rakennetta kuormittavien ulkoisten voimien kanssa. Mikäli näin ei ole, yhtälössä (15) olevaa suuretta $\Delta\bar{F}$ korjataan sisäisten ja ulkoisten voimien erotuksen osoittamalla määrällä ja siirtymän muutos $\Delta\bar{u}$ määritellään uudelleen. Tämän jälkeen yhtälöiden (16)–(25) mukainen iteraatioprosessi suoritetaan uudelleen. Suureen $\Delta\bar{F}$ korjausta toistetaan, kunnes tasapainotila saavutetaan riittävän hyvällä tarkkuudella. Edellä esitetyissä yhtälöissä ei ole huomioitu myötöpinnan lujittumista iteraatioprosessin aikana. Lujittumisen huomioon ottaminen monimutkaistaa algoritmia mutta periaate säilyy samana. [6 s. 493–494][27 s. 23]

Puun plastista käyttäytymistä on mallinnettu myös ilman edellä kuvattua myötöehtoon, virtaussääntöön ja lujittumisyhtälöön perustuvaa lähestymistapaa. Varhaisessa Patton-Mallory et al. julkaisussa sovelletaan plastisuusteorian sijasta lineaarielastista materiaaliyhtälöä (2). Plastisoitumisen alkaa, kun syy- tai leikkaussuuntien venymäkomponentit saavuttavat ennalta määrätyn kriittisen arvon. Plastisoitumisen etenemistä mallinnetaan pienentämällä komplianssimatriisin syysuunnan kimmomoduulia ja leikkausmoduuleja. Tällainen menetelmä johtaa kuitenkin fysikaalisesti mahdottomiin Poissonin vakioihin plastisoitumisen edetessä. Tästä huolimatta mallia on sovellettu onnistuneesti syiden suuntaisesti kuormitetun yksitappiliitoksen mallintamisessa. [41]

Pääsääntöisesti elastoplastisia malleja on sovellettu puun sitkeän puristuskäyttäytymisen kuvaamiseen. Puun haurasta käyttäytymistä vedossa ja leikkauksessa on mallinnettu esimerkiksi murtumismekaniikan, vauriomekaniikan ja hilamallien avulla, joihin palataan seuraavissa luvuissa. Muunlaisiakin lähestymistapoja on esitetty kirjallisuudessa mutta niitä ei käsitellä syvemmin tässä työssä [20, 34, 64, 65]. Monissa julkaisuissa pyritään mallintamaan sekä puristusta että vetoa, minkä vuoksi elastoplastisia malleja ja edellä mainittuja muita menetelmiä on sovellettu samanaikaisesti. Poikkeuksia kuitenkin löytyy kirjallisuudesta. Esimerkiksi Oudjene et al. julkaisuissa on mallinnettu pelkkää puristumiskäyttäytymistä [39]. Murtumismekaniikkaa ja hilamalleja on puolestaan usein sovellettu pelkän hauraskäyttäytymisen mallintamiseen.

Puun sitkeän puristumiskäyttäytymisen lisäksi plastisuusteoriaa on yritetty soveltaa myös haurasmurtuman mallintamiseen. Mackenzie-Helnwein et al. esittämässä mallissa syy- ja poikittaissuunnan puristus- ja vetokäyttäytymistä on mallinnettu neljällä paloittain määritellyllä myötöpinnalla, jotka yhdessä muodostavat suljetun myötöpinnan jännitysavaruudessa. Yksittäisten myötöpintojen lausekkeet pyrkivät mallintamaan niihin liitetyn kuormitussuunnan ja -tyypin epälineaarisen käyttäytymisen alkamista. Epälineaarisen osan etenemistä mallinnetaan virtaussäännön ja lujittumisyhtälöiden avulla. Haurasta käyttäytymistä ja syiden suuntaiselle puristukselle ominaista pehmenemistä mallinnetaan lujittumisyhtälöiden sijasta myötöehtoihin liitettyjen pehmenemisfunktioiden avulla. [30] Mackenzie-Helnwein et al. julkaisemia numeerisella analyysillä saatuja tuloksia ei kuitenkaan ole verrattu kokeellisiin arvoihin ja jatkotutkimuksia mallin verifioimiseksi ei ole saatavissa, minkä vuoksi mallin käyttökelpoisuus on kyseenalaista.

3.2 Murtumismekaniikan mallit

Kuormitetun rakenteen jännitysjakauma muuttuu särön ollessa läsnä. Tällöin särön reunoille muodostuu jännityskeskittymiä. Tätä ilmiötä kutsutaan kirjallisuudessa jännityssingulariteetiksi [2][53 s. 87]. Jännityskeskittymien vuoksi vaurioituneen rakenteen todellinen kuormankantokyky on pienempi ehjään rakenteeseen verrattuna. Perinteiset kontinuumimallit eivät kykene ennustamaan jännityssingulariteetin olemassaoloa. Tämän vuoksi on kehitetty murtumismekaniikkaan perustuvia malleja. Murtumismekaniikassa särön etenemismekanismi luokitellaan moodeihin I, II ja III [2][8 s. 6][15 s. 187]. Moodi I kuvaa särön pintojen erkanemista toisistaan jännityksen vaikuttaessa kohtisuorassa särön poikkileikkaustasoon nähden. Moodit II ja III kuvaavat leikkausjännitysten aiheuttamaa särön etenemistä särön poikkileikkaustasossa. Särön etenemiseen voi vaikuttaa samanaikaisesti myös useampi moodi.

Tyypillisimpiä puulle sovellettuja murtumismekaniikan malleja ovat LEFM- (linear-elastic fracture mechanics) ja CZM-mallit (cohesive zone model). LEFM-mallit perustuvat olettamukseen, jossa särön kärkiin muodostuva plastinen vyöhyke on pieni. Tämä olettamus on voimassa rakenteilla, jotka ovat suuria suhteessa särön kokoon. Lisäksi särön kärjen on oltava terävä, mikä on tyypillistä haurasmurtumiin johtavissa säröissä. Sitkeissä murtumissa särön kärjet muokkautuvat ja tylpistyvät särön kasvaessa, jolloin LEFM ei ole käyttökelpoinen [2].

LEFM-teoriassa särön kasvun alkamista voidaan kuvata jännitysintensiteettikertoimen (stress intensity factor) tai energian vapautumisnopeuden (energy release rate) avulla [2][53 s. 87–88]. Fysikaalisessa mielessä jännitysintensiteettikerroin kuvaa särön kär-

jissä esiintyvän jännityssingulariteetin jyrkkyyttä. Särön eteneminen alkaa, kun jännitysintensiteettikerroin ylittää materiaalille ominaisen murtumissitkeyden. Jännitysintensiteettikertoimen määritys vaatii tietoa särön koosta, sijainnista, kuormitusten sijainnista ja tutkittavan rakenteen geometriasta. Energian vapautumisnopeus määritellään rakenteen potentiaalienergian muutoksena särön pinta-alan muutosta kohti. Potentiaalienergia muodostuu materiaaliin varastoituneesta kimmoenergiasta ja rakenteeseen vaikuttavien ulkoisten voimien tekemästä työstä. Jännitysintensiteettikertoimen tavoin energian vapautumisnopeudelle on olemassa materiaalille ominainen kriittinen arvo, jonka ylittyessä särön eteneminen aikaa.

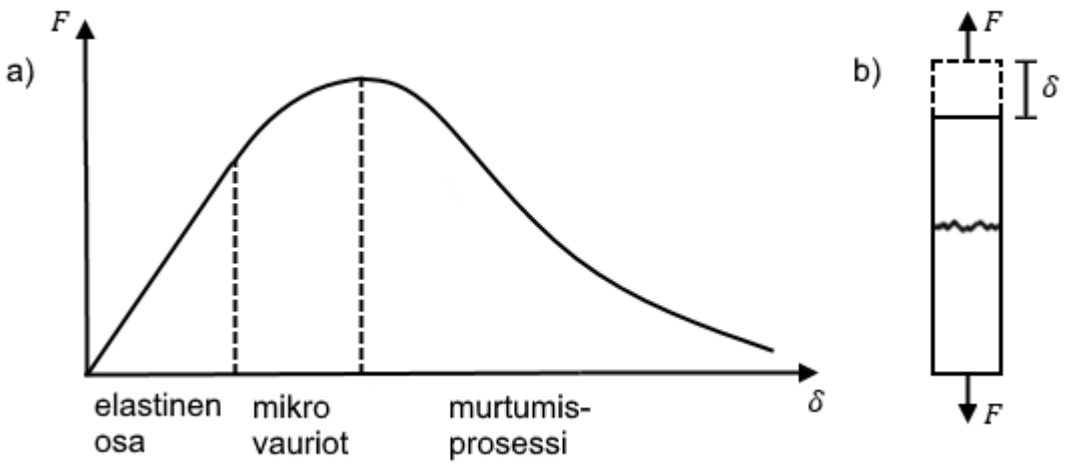
LEFM-mallit voidaan jakaa ns. klassisiin menetelmiin ja yleistettyihin menetelmiin [53 s. 87–88]. Klassisissa menetelmissä rakenteessa on läsnä alkeissärö ja rakenteen rajakuorma määritetään jännitysintensiteettikertoimen tai energian vapautumisnopeuden avulla. Yleistetyissä menetelmissä alkeissärön läsnäoloa ei tarvita lainkaan. LEFM-menetelmiä on sovellettu tyypillisesti 2D-jännitystiloihin, joka on sovelias approksimaatio tutkittavan rakenteen ollessa riittävän ohut.

Klassisia analyyttisiä malleja puulle on esitetty esimerkiksi van Der Putin teoksessa erilaisille tappiliitoksille ja taivutetuille palkeille [45]. Tällaiset LEFM-mallit soveltuvat ainoastaan ennalta määritettyihin geometrioihin ja kuormitustapauksiin. Klassisia LEFM-malleja on sovellettu myös numeerisissa analyyseissä erityisesti syihin nähden kohtisuorasti kuormitettujen tappiliitosten mallintamiseen [4, 11]. Tällöin alkeissärö asetetaan kohtaan, jolle särön ajatellaan muodostuvan ja simulaatiot tehdään usealle särökoolle. Tällaisten analyysien avulla voidaan tutkia erilaisten liitosparametrien, kuten tapin koon ja tapin reunaetäisyyksien vaikutusta liitoksen kuormankantokykyyn.

Yleistettyjä menetelmiä on sovellettu muun muassa Yasumura et al. julkaisemassa artikkelissa, jossa on tutkittu monitappiliitoksen kuormankantokykyä syihin nähden kohtisuorassa kuormituksessa [66]. Särön muodostuminen jaetaan kahteen osaan: alkeissärön muodostumiseen ja särön etenemiseen. Alkeissärö muodostuu, kun FEM-analyysillä määritetyn jännitysjakauman keskiarvo ennalta määrätyllä tasolla saavuttaa materiaalin murtolujuuden. Tällöin alkeissärö asetetaan tasolle, jolla keskiarvo on laskettu ja rakenteen kuormankantokyky ratkaistaan moodille I johdetun jännitysintensiteettikertoimen ja murtumissitkeyden avulla. Julkaisussa ei kuitenkaan ole määritelty, miten alkeissärön koko valitaan sen muodostuessa. Lisäksi menetelmä on käyttökelpoinen vain moodin I murtumalle. Julkaisujen niukkuuden vuoksi voidaan myös todeta, että yleistettyjen LEFM-mallien soveltaminen ei ole suuressa suosiossa puuhun liittyvissä julkaisuissa.

Viimeaikaisimpia murtumismekaniikan sovelluksia puun materiaalimallinnuksessa ovat ns. CZM-mallit (cohesive zone models). Ensimmäiset CZM-mallit on kehitetty 1960-luvulla Dugdalen ja Barenblatten toimesta, mutta ensimmäiset puuta käsittelevät sovellukset näyttäisivät olevan peräisin 1990-luvulta [2][10 s. 137]. CZM-malleissa särön muodostuminen alkaa materiaaliin mallinnetun kuvitteellisen särön pintojen erkaantumisena. Kuvitteellisen särön reunoilla vaikuttaa pintoja kiinni pitävä jännitysjakauma eli ns. koheesio vyöhyke (cohesive zone). Koheesio vyöhyke kuvaa särön kärjissä vaikuttavaa plastista aluetta, joka LEFM-malleissa oletetaan merkityksettömäksi. CZM-mallien etuna on, että ne eivät rajoitu koheesio vyöhykkeen vuoksi suuriin rakenteisiin ja ne kykenevät mallintamaan terävien säröjen lisäksi sitkeisiin murtumiin johtavia tylppiä säröjä. CZM-mallit eivät myöskään vaadi alkeissärön läsnäoloa. Toisaalta pinta, jolle särö muodostuu, on tunnettava etukäteen.

CZM-malleissa kuvitteelliselle särölle määritellään muusta geometriasta erillinen materiaaliyhtälö. Tällaisen materiaaliyhtälön mukaista voima-siirtymä -riippuvuutta yksiaksiaalisessa vetokokeessa on havainnollistettu kuvassa 7a [8 s. 12][51 s. 574]. Materiaali käyttäytyy elastisesti myötölujuutta pienemmillä jännityksillä. Elastisen vasteen päätyttyä materiaali lujittuu murtolujuuteen asti, jonka jälkeen jännitykset kääntyvät laskuun ja materiaali pehmenee. Joidenkin lähteiden mukaan vaurioituminen alkaa mikrotasolla lujittumisvaiheessa ja materiaalin pehmetessä lujittumisen aikana muodostuneet mikrosäröt alkavat aukeamaan ja kasvamaan [8 s. 12–13][16 s. 83]. Vaurio lokalisoituu kuvan 7b mukaisen sauvan poikkileikkaustasoon jännitysten saavuttaessa murtolujuuden [8 s. 12–13]. Tällöin kuvan 7a pehmenemisalueella tapahtuva deformaatio ilmenee yksinomaan särön avautumisena särön poikkileikkaustasolla. CZM-malleissa kuvitteellinen särö ja sitä kuvaava materiaaliyhtälö asetetaan tällaiselle lokalisoituneelle alueelle. Kuvan 7b mukainen murtumisprosessi vastaa moodia I. Vastaavalla analogialla moodeille II ja III voidaan määrätä omat materiaaliyhtälöt. Kuvan 7a pehmenemisosan muoto on lähdekohtaista. Joissain lähteissä koko käyrää mallinnetaan lineaarisesti kasvavalla elastisella osalla sekä murtolujuuden jälkeisellä lineaarisesti laskevalla pehmenevällä osalla [15, 49, 50]. Tällöin materiaaliyhtälön muodostamiseen tarvitaan tietoa vain kimmokertoimesta, murtolujuudesta ja murtumisenergiasta. Murtumisenergia määritellään kuvassa 7a havainnollistetun käyrän laskevan osan alle jäävänä pinta-alana ja se on materiaalikohtainen suure.



Kuva 7. *Tyypillinen pehmenemiskäyrä (a) ja vetorasitetun sauvan vaurioituminen (b). Uudelleen piirretty ja muokattu Boströmin väitöskirjasta [8 s. 12].*

Varhaisimpia puulle sovellettuja CZM-malleja on käsitelty Boströmin väitöskirjassa moodilla I etenevän särön mallintamiseen. Siinä kuvitteellista säröä on mallinnettu jousien avulla. Jännitysten ollessa murtolujuutta pienemmät, jousien jäykkyys asetetaan suureksi ja muu kontinuumeilla elementeillä mallinnettu rakenne deformoituu elastisesti. Kun jännitys jousien kohdalla saavuttaa murtolujuuden, jousien jäykkyyttä pienennetään niille määritellyn materiaaliyhtälön avulla ja rakenne deformoituu ainoastaan jousten kohdalta. Särön muodostuessa kuormitetuimman jousen jäykkyys saavuttaa arvon nolla ja särön edetessä jäykkyys häviää vähitellen myös muista jousista. [8]

Franke et. al ja dos Santos et al. julkaisuissa CZM-malleja on sovellettu tappiliitosten mallintamisessa Ansys-ohjelmistoa käyttäen. Jousien sijasta säröjä mallinnetaan kontaktielementtien avulla, joiden materiaaliyhtälö on otettu suoraan Ansyksen materiaalikirjastosta. Kontaktielementeissä käytetty materiaaliyhtälö kykenee mallintamaan moodeja I ja II sekä niiden yhteisvaikutusta. Kontaktielementit kykenevät jousista poiketen mallintamaan myös särön avautumista. Puun sitkeää puristuskäyttäytymistä mallinnetaan erillisellä elastoplastisella mallilla, joka on asetettu rakenteen muulle osalle. [15, 50]

Franke et al. ja dos Santos et al. soveltama mallinnustekniikka on käyttökelpoinen syiden suuntaisesti etenevien säröjen mallintamiseen 2D-jännitystilassa. Myös muutamia kolmiulotteisia CZM-malleja on esitetty kirjallisuudessa. Niitä on sovellettu onnistuneesti taivutuksen alaisiin palkkirakenteisiin, joissa särö etenee syiden suuntaisesti. [10, 51]

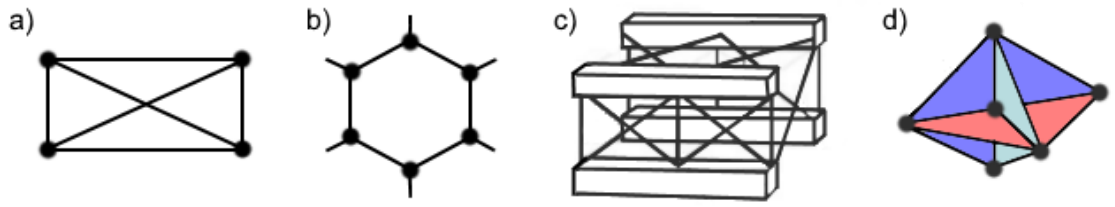
Edellä tarkasteltujen julkaisujen perusteella voidaan päätellä, että murtumismekaniikkaa voidaan soveltaa parhaiten rakenteisiin, joissa särö muodostuu hauraasti syiden suuntaisesti. Tämän tyyppisiä rakenteita ovat esimerkiksi syihin nähden kohtisuorasti kuormi-

tetut tappiliitokset ja taivutetut puupalkit. LEFM-malleja voidaan soveltaa FEM-analyyseissä ja analyyttisten ratkaisujen muodostamiseen alkeissärön sisältävien rakenteiden kuormankantokyvylle. Niiden käyttökelpoisuutta rajoittaa kuitenkin edellytys terävästä ja pienestä säröstä suhteessa analysoitavan rakenteen kokoon. Lisäksi niitä on yleensä sovellettu vain 2D-jännitystiloihin. Malleja, joissa alkeissärön läsnäoloa ei vaadita, on esitetty kirjallisuudessa. Niiden suosio näyttäisi kuitenkin olevan vähäistä. CZM-mallit kykenevät LEFM-malleista poiketen huomiomaan särön kärjissä ilmenevän plastisen vyöhykkeen, minkä vuoksi niiden käyttö ei rajoitu pelkästään pienille ja teräville säröille. Lisäksi niiden soveltaminen ei vaadi alkeissärön läsnäoloa. CZM-malleja voidaan myös soveltaa suoraan FEM-ohjelmistoissa olemassa olevilla jousi- ja kontaktielementeillä. Vaurion mallintamiseksi tarvitaan kuitenkin tietoa alueesta, johon särö muodostuu. Lisäksi särön etenemistä voidaan mallintaa vain tasolla.

3.3 Hilamallit

Diskreettejä elementtejä soveltavissa materiaalimalleissa eli ns. hilamalleissa (lattice model) puun mekaaniset ominaisuudet määritellään yksittäisille elementeille. Yksittäiset elementit voivat puun tapauksessa edustaa esimerkiksi kuitukimppuja. Rakenneosia kuvaavat elementit kiinnitetään toisiinsa muilla elementeillä kuten jousilla. Jokaiselle elementille määritellään jäykkyys- ja lujuusominaisuudet. Menetelmä, jolla elementtien ominaisuudet määritellään, vaihtelee lähdekohtaisesti. Jännityksen ylittäessä elementtikohtaisen lujuusarvon, kyseinen elementti poistetaan analyysistä ja laskenta suoritetaan uudelleen päivitetyllä elementtiverkostolla.

Hilamallit voidaan jakaa 2D- ja 3D-malleihin. Kaksiulotteisia malleja on sovellettu esimerkiksi Davids et al. julkaisuissa syy- ja poikittaissuuntaisten vetokuormitusten sekä leikkauskuormitusten alaisten rakenteiden mallintamisessa. Rakennetta kuvaava elementtiverkosto muodostetaan kuitukimppuja kuvaavista sauva- tai palkkielementeistä. Peräkkäiset kuitujen suuntaiset sauvaelementit kiinnitetään toisiinsa elementtien päissä sijaitsevista solmupisteistä. Lisäksi vierekkäiset kuitukimppuelementit kiinnitetään toisiinsa solmupisteistä lähtevillä diagonaalisilla ja poikittaissuuntaisilla sauvoilla tai jousilla. Tällaista kaksiulotteista elementtiä on havainnollistettu kuvassa 8a. Davis et al. esittämät mallit kykenevät hyvällä tarkkuudella ennustamaan rakenteen murtokuorman sekä jäykkyyden elastisella alueella yksiaksiaalisissa veto- ja leikkaustiloissa. [12, 28]



Kuva 8. *Erilaisia hilaelementtejä. Uudelleen kuvitettu aihetta koskevista julkaisuista. [12 s. 122][47 s. 5-27][52 s. 623][63 s. 599]*

Kaksiulotteisia hilamalleja on sovellettu myös Wittel at al. artikkelissa särön muodostumisen ja etenemisen mallintamisessa mikrotasolla syihin nähden poikittaissuuntaisissa vetokuormituksissa. Mallissa käytetty hilarakenne muodostuu toisiinsa kiinnitetyistä heksagoneista. Heksagonien sivuja on mallinnettu jousi-palkkielementeillä, jotka voivat venyä pituussuunnassa sekä taipua. Tällaisella rakenteella pyritään mallintamaan puun solurakennetta ja sitä on havainnollistettu kuvassa 8b. Wittel et al. esittämä malli soveltuu haurasmurtuman yksityiskohtaisen etenemisen mallintamiseen solutasolla. Rakenteiden lujuusanalyysien kannalta sillä on kuitenkin vähän painoarvoa. [63]

Kolmiulotteisia hilamalleja on sovellettu onnistuneesti Sedighi-Gilani et al. julkaisussa, jossa on tarkasteltu moodin I murtumaa lovellisessa puurakenteessa. Aluetta, jolle särön ajatellaan syntyvän, mallinnetaan palkkielementtiverkostona ja ehjänä säilyvää aluetta perinteisenä kontinuumirakenteena. Tällaista palkkielementtiverkostoa on havainnollistettu kuvassa 8c. Paksuilla poikkileikkaukseltaan neliön muotoisilla palkeilla mallinnetaan kuituja ja niihin nähden kohtisuorilla palkeilla ydinsäteitä. Diagonaalit palkit edustavat kuitujen välistä välilaminaattia. Julkaisussa on saavutettu tarkkoja tuloksia analysoitavan rakenteen voima-siirtymä -kuvaajalle. Kuvassa 8c havainnollistettujen elementtien mekaanisia ominaisuuksia on kuitenkin säädetty siten, että mallinnustulokset vastaavat rakenteelle mitattuja kokeellisia tuloksia. Näin ollen on kyseenalaista, miten tarkasti elementeille määritetyt mekaaniset ominaisuudet vastaavat puun todellisia mikromekaanisia ominaisuuksia. Lisäksi lisätutkimuksia mallin soveltamiseksi muunlaisiin rakenteisiin ei ole löydettävissä. [52]

Kolmiulotteisia hilamalleja on yritetty soveltaa myös tappiliitosten mallintamisessa Reichertin väitöskirjassa. Yksittäisten elementtien mallintamiseen on käytetty jousia, jotka on kiinnitetty toisiinsa kuvassa 8d havainnollistetulla tavalla. Eriväriset alueet edustavat koordinaatistotasoja. Keskisolmusta lähtevillä ortogonaalisesti asetetuilla jousilla mallinnetaan puun materiaaliominaisuuksia L-, R- ja T-suunnissa. Diagonaaleilla jousilla mallinnetaan leikkausjännityksiä kussakin koordinaatistotasossa. Jouset pyrkivät huomioimaan vedossa ilmenevän hauraan käyttäytymisen lisäksi myös plastisoitumisen puris-

tuksessa. Jousien ominaisuudet määritellään erikseen jokaiselle materiaalisuunnalle. Lisäksi niitä varioidaan normaalijakauman avulla puun heterogeenisyyden mallintamiseksi. Laskenta-ajan tehostamiseksi hilaelementtejä sovelletaan vain analysoitavien rakenteiden kriittisillä alueilla. Alueet, joilla särö ei etene, mallinnetaan kontinuumina. Reichertin esittämien mallinnustulosten perusteella puristuskäyttäytymisen implementointi hilamalleihin on ongelmallista. Lisäksi 3D-hilamallin soveltaminen tappiliitoksen mallintamisessa johti erittäin pitkiin laskenta-aikoihin ja lopulta analyysi keskeytettiin. [47]

Uusien julkaisujen vähäisen lukumäärän ja Pan et al. viime aikoina julkaiseman koosteen perusteella hilamallien soveltaminen puun materiaalimallinnuksessa vaikuttaisi hiipuneen viimeisen vuosikymmenen aikana. Puun lisäksi hilamalleja on sovellettu haurasmurtumien mallinnuksessa esimerkiksi betonille, kivelle ja joillekin metalleille. [40] Hilamallien etuna on, että ne kykenevät yksityiskohtaisesti mallintamaan puun heterogeenisyyttä sekä särön muodostumista ja etenemistä. Lisäksi ne kykenevät linkittämään mikrotasolla tapahtuvat ilmiöt makroskaalan ominaisuuksiin, kuten lujuuteen ja jäykkyyteen. Niiden haittapuolena ovat kuitenkin pitkät laskenta-ajat elementtiverkoston jatkuvan päivittämisen ja vapausasteiden suuren lukumäärän vuoksi. Lisäksi hilamallit kykenevät tehokkaasti mallintamaan vain haurasmurtumia. Puristuksen aiheuttamaa plastista muodonmuutosta ei vielä ole tehokkaasti implementoitu. Lisäksi materiaaliparametrien määritys yksittäisille elementeille on monimutkaista ja aikaa vievää.

3.4 Vauriomekaniikan mallit

Vauriomekaniikan soveltaminen puun materiaalimallinnuksessa on melko uusi lähestymistapa ja tieteellisiä artikkeleita aiheeseen liittyen on niukasti. Komposiittimateriaaleille teoria on kuitenkin varsin pitkälle kehittynyt, ja monet olemassa olevat puun materiaalimallit soveltavat komposiiteille johdettuja tuloksia. Vaurio määritellään mikro-onkaloiden ja -säröjen muodostumisena ja kasvuna materiaalissa [29 s. 1]. Huokoset heikentävät materiaalin elastisia ominaisuuksia kuten kimmokerrointa, leikkausmoduulia ja Poissonin vakioita [29 s. 7]. Vauriomekaniikassa tällainen huokosia sisältävä vaurioitunut kappale redusoidaan ehjäksi kontinuumikappaleeksi. Tällaisessa kuvitteellisessa kappaleessa vaikuttavaa jännitystä kutsutaan effektiiviseksi jännitykseksi. Vaurioituneessa kappaleessa vallitseva todellinen jännitys saadaan effektiivisen jännityksen avulla sopivan tensorimuunnoksen avulla. Kirjallisuudessa tällainen muunnos esitetään usein 4. kertaluvun vauriotensorilla $\mathbb{M}$ seuraavasti:

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = \mathbb{M} : \boldsymbol{\sigma}, \tag{26}$$

jossa $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ on effektiivinen jännitys ja $\boldsymbol{\sigma}$ todellinen jännitys [29 s. 6][35 s. 34]. Yhtälössä (26) jännitykset $\tilde{\boldsymbol{\sigma}}$ ja $\boldsymbol{\sigma}$ on esitetty 2. kertaluvun tensoreina. Helpompi esitystapa saadaan Voigtin notaatiolla, jolloin yhtälö (26) voidaan kirjoittaa muodossa:

$$\bar{\tilde{\sigma}} = \boldsymbol{M^d}\bar{\sigma}, \tag{27}$$

jossa $\boldsymbol{M^d}$ on toisen kertaluvun vauriotensori. Suureet $\bar{\tilde{\sigma}}$ ja $\bar{\sigma}$ ovat vektorimuodossa esitetyt effektiiviset ja todelliset jännitykset, joiden komponentit ovat yhtälön (5) mukaiset. Konstitiivinen yhtälö vaurioituneelle materiaalille voidaan esittää elastisen materiaalin tavoin muodossa:

$$\bar{\varepsilon} = \boldsymbol{C^d}\bar{\sigma}, \tag{28}$$

jossa $\boldsymbol{C^d}$ on ns. vaurioitunut komplianssimatriisi, joka muodostetaan vauriotensorin $\boldsymbol{M^d}$ avulla [33 s. 133][35 s. 52][49 s. 71]. Yhtälö (28) voidaan esittää myös muodossa:

$$\bar{\sigma} = (\boldsymbol{C^d})^{-1}\bar{\varepsilon} = \boldsymbol{D^d}\bar{\varepsilon}, \tag{29}$$

jossa $\boldsymbol{D^d}$ vaurioitunut jäykkyysmatriisi. Vaurioituneet komplianssi- ja jäykkyysmatriisit muodostetaan vaurioparametrien avulla. Vaurioparametri on skalaarisuure, joka pienentää materiaalin elastisia ominaisuuksia vaurion edetessä. Tällaisia ominaisuuksia ovat kimmo- ja leikkausmoduulit sekä joissain tapauksissa Poissonin vakiot [33 s. 133][35 s. 52][62]. Vaurioparametri voi olla mallinnustavasta riippuen sisäinen suure, jolloin se kuvaa vaurion etenemistä ilman selkeää fysikaalista tulkintaa [24 s. 53][35 s. 38–40][49 s. 69]. Se voidaan määrittää myös geometrisesti huokosten yhteispinta-alan ja kokonaispinta-alan suhteena mielivaltaisella poikkileikkaus tasolla. Tällöin vaurioparametri esitetään muodossa

$$d(\bar{n}) = \frac{A_d}{A}, \tag{30}$$

jossa d on vaurioparametri, A tarkasteltavan poikkileikkaus tason pinta-ala ja A_d vauriota kuvaavien huokosten yhteenlaskettu pinta-ala kyseisellä tasolla [29 s. 3][35 s. 17]. Vektori $\bar{n}$ on tarkasteltavan tason yksikkönormaalivektori. Määritelmästä riippumatta vaurioparametri voi saada arvoja 0 ja 1 väliltä. Arvo 0 tarkoittaa sitä, että kappale on täysin ehjä ja arvolla 1 kappale on täysin vaurioitunut. Yhtälön (30) mukainen vaurion määritelmä riippuu suunnasta $\bar{n}$. Jos vaurioparametri ei riipu suunnasta $\bar{n}$, vaurioituminen on isotrooppista. Muulloin vaurioituminen on ansiotrooppista.

Isotrooppisen vaurion käsittelyssä materiaaliyhtälön johto perustuu ns. venymän ekvivalenssiperiaatteeseen ja effektiiviseen pinta-alan käsitteeseen [29 s. 5][35 s. 16–18]. Venymän ekvivalenssiperiaatteessa muunnos todellisesta, vaurioituneesta kappaleesta ku-

vitteelliseen ehjään kappaleeseen tehdään olettamalla samanlainen deformaatiotila molemmille konfiguraatioille. Myös kappaleita kuormittavat ulkoiset voimat asetetaan yhtä suuriksi ja samansuuntaisiksi. Tällöin voidaan kirjoittaa:

$$\bar{\varepsilon} = \boldsymbol{C^e}\bar{\tilde{\sigma}} = \boldsymbol{C^d}\bar{\sigma}. \tag{31}$$

Muunnosta kuvitteellisesta kappaleesta vauriota sisältävään todelliseen kappaleeseen on havainnollistettu kuvassa 9. Kuvitteellista kappaletta vastaavaa pinta-alaa tarkastelu tasolla kutsutaan effektiiviseksi pinta-alaksi. Effektiivinen pinta-ala määritellään yhtälön (30) avulla seuraavasti:

$$\tilde{A} = A - A_d = (1 - d)A. \tag{32}$$

Fysikaalisessa mielessä effektiivinen pinta-ala kuvaa sitä aluetta tarkasteltavassa poikkileikkauksessa, joka vastustaa kappaleeseen kohdistuvaa ulkoista kuormitusta. Tätä voidaan havainnollistaa kuvassa 9 esitetyn vetokuormituksen alaisen sauvan avulla. Kun ulkoista kuormitusta ei ole ja sauva on ehjä, tilanne on kuvan 9a mukainen. Voiman F alaisena sauva deformoituu ja vaurio ilmenee huokosten muodostumisena kuvan 9b mukaisesti. Yhtälön (31) avulla vaurioitunut sauva voidaan redusoida kuvitteelliseksi ehjäksi sauvaksi, jota kuormitetaan yhtä suurella voimalla F. Tällaisen kuvitteellisen sauvan poikkipinta-ala vastaa effektiivistä pinta-alaa $\tilde{A}$ ja siinä vaikuttava jännitys effektiivistä jännitystä $\tilde{\sigma}$. Tällaista kuvitteellista sauvaa on havainnollistettu kuvassa 9c.

Todelliselle ja kuvitteelliselle konfiguraatiolle voidaan kirjoittaa:

$$F = \sigma A = \tilde{\sigma}\tilde{A}. \tag{33}$$

Sijoittamalla yhtälöön (33) effektiivisen pinta-ala määritelmä (32), saadaan

$$\sigma = (1 - d)\tilde{\sigma}. \tag{34}$$

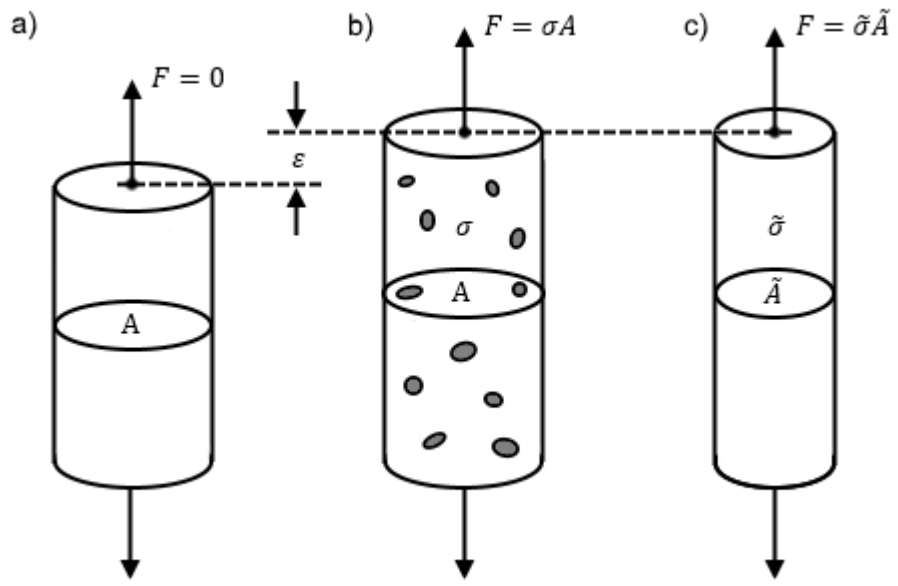
Isotrooppisen vaurion määritelmän perusteella yhtälö (34) voidaan yleistää moniaksiaaliseen jännitystilaan. Tällöin vauriotensoriksi saadaan määritelmän (27) perusteella

$$\boldsymbol{M^d} = (1 - d)^{-1}\mathbf{I}, \tag{35}$$

jossa $\mathbf{I}$ on 2. kertaluvun identiteettitensori. Vaurioituneelle komplianssimatriisille voidaan Voigtin notaatiolla kirjoittaa yhtälöiden (31) ja (34) avulla

$$\boldsymbol{C^d} = (1 - d)^{-1}\boldsymbol{C^e} \tag{36}$$

[24 s. 50][35 s. 32]. Yksinkertaisesta esitystavasta huolimatta isotrooppisia vauriomalleja on sovellettu onnistuneesti puun materiaalimallinnuksessa [21–23, 56].



Kuva 9. *Vetorasitettu sauva kuormittamattomana ehjässä tilassa (a), kuormitettuna vaurioituneessa tilassa (b) ja kuormitettuna kuvitteellisessa konfiguraatiossa (c). Uudelleen piirretty ja muokattu Murakamin teoksesta. [35 s. 18]*

Anisotrooppisen vaurion kuvaaminen on haastavaa. Tämä johtuu siitä, että vaurion kuvaamiseen ei riitä yksi skalaarinen vaurioparametri d. Vaurioparametreja on toisinaan kuvattu vektorin avulla:

$$\bar{d} = \frac{A_d}{A}\bar{n}, \tag{37}$$

jossa merkinnät ovat kaavan (30) mukaiset [24, 60]. Yleisempi tapa anisotrooppisen vaurion kuvaamiseen on käyttää 4. ja 2. kertaluvun vauriotensoreita $\mathbb{M}$ ja $\boldsymbol{M^d}$, jolloin päädytään useita vaurioparametreja sisältäviin vaurioituneisiin jäykkyys- ja komplianssimatriiseihin. Ansiotrooppisen vaurioituneen komplianssimatriisin muotoa voidaan havainnollistaa esimerkiksi Sandhaasin puulle esittämän materiaalimallin avulla, jossa:

$$\boldsymbol{C^d} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\gamma_1 E_1} & -\frac{\nu_{21}}{E_1} & -\frac{\nu_{31}}{E_1} & & & \\ -\frac{\nu_{12}}{E_2} & \frac{1}{\gamma_2 E_2} & -\frac{\nu_{32}}{E_2} & & 0 & \\ -\frac{\nu_{13}}{E_3} & -\frac{\nu_{23}}{E_3} & \frac{1}{\gamma_3 E_3} & & & \\ & & & \frac{1}{\gamma_4 G_{12}} & & \\ & 0 & & & \frac{1}{\gamma_5 G_{13}} & \\ & & & & & \frac{1}{\gamma_6 G_{23}} \end{bmatrix} \tag{38}$$

[49 s. 72]. Yhtälössä (38) merkitään

$$\gamma_{\mathrm{i}} = 1 - d_i. \tag{39}$$

Yhtälössä (38) jokaiselle kimmo- ja leikkausmoduulille on määritelty omat vaurioparametrinsa. Mallinnustavasta riippuen vaurioparametrien lukumäärä voi vaihdella ja niitä voi olla myös muualla kuin yhtälön (38) diagonaalielementeillä. Vaurioparametrit vaikuttavat suoraan materiaalin elastisiin vakioihin pienentäen niitä vaurion edetessä.

Vaurioitunut jäykkyys- ja komplianssimatriisi voidaan muodostaa esimerkiksi venymän ekvivalenssiperiaatteella tai ns. venymäenergian ekvivalenssiperiaatteella [33 s. 133][35 s. 36–41]. Venymän ekvivalenssiperiaatetta sovellettaessa yhtälö (34) voidaan yleistää muodossa

$$\tilde{\boldsymbol{\sigma}} = (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1}\boldsymbol{\sigma} \tag{40}$$

[29 s. 6][35 s. 25]. Vaurioparametreja kuvaavan 2. kertaluvun tensorin $\mathbf{D}$ ominaisarvot kuvaavat kuvassa 9 esitetyn lieriön sijasta suorakulmaisen tetraedrin sivujen pinta-alan muunnosta todellisen ja kuvitteellisen konfiguraation välillä. Osoittautuu, että vaurioparametreja kuvaava tensori $\mathbf{D}$ ei ole symmetrinen, mikä johtaa epäsymmetriseen effektiiviseen jännitystensoriin [24 s. 52][33 s. 133][35 s. 25]. Määritelmän mukaisesti jännitystensorin on oltava symmetrinen, minkä vuoksi yhtälön (40) symmetrisointiin on kehitetty useita menetelmiä. Tällöin kuitenkin pinta-alamuunnos todellisen ja kuvitteellisen konfiguraation välillä menetetään. Lisäksi yhtälön (40) avulla voidaan kuvata enimmillään vauriota kolmessa ortogonaalisessa suunnassa. Venymän ekvivalenssiperiaatetta on sovellettu muun muassa Matzenmiller et al. kuitulujitettuja komposiittimateriaaleja koskevassa julkaisussa, jossa vaurioitunut komplianssimatriisi muodostetaan symmetrisoidun effektiivisen jännitystensorin pohjalta. Vaurioituneen komplianssimatriisin alkioita on kuitenkin muokattu vastaamaan paremmin kokeellisia tuloksia. [33]

Toinen menetelmä vaurioituneen materiaalin materiaaliyhtälön muodostamiselle on ns. energian ekvivalenssiperiaate, jota on sovellettu monessa komposiittimateriaaleja ja puuta käsittelevissä julkaisuissa [1, 16, 31, 49]. Energian ekvivalenssiperiaatteen mukaan kimmoenergiatiheydet kuvan 9 mukaisessa todellisessa ja kuvitteellisessa konfiguraatiossa ovat yhtä suuret [35 s. 38–40]. Vaurioitunut komplianssimatriisi voidaan muodostaa, kun kimmoenergiatiheyden lauseke tunnetaan. Kimmoenergiatiheyttä käytettäessä vauriota voidaan kuvata useammassa kuin kolmessa suunnassa ja se johtaa symmetriseen effektiiviseen jännitystensoriin [35 s. 38]. Yhtälön (40) mukainen geometrinen tulkinta vaurioparametreille kuitenkin menetetään.

Kirjallisuudessa esitetyt vauriomallit eivät aina perustu edellä mainittuihin ekvivalenssiperiaatteisiin. Esimerkiksi Murrayn puulle esittämässä poikittaisisotrooppisessa materiaalimallissa vauriota mallinnetaan kahdella vaurioparametrilla, jotka kuvaavat vauriota syiden suunnassa ja isotropiatasolla. Vaurioparametrit on asetettu vaikuttamaan niitä vastaavien todellisten ja effektiivisten jännityskomponenttien välille yhtälön (34) mukaisesti. Isotropiatasoa kuvaava vaurioparametri voi kuitenkin vaihdella riippuen siitä, eteneekö vaurio syiden suunnassa vai isotropiatasolla. Murrayn mukaan vaurio syiden suunnassa johtaa myös vaurioon isotropiatasolla. Tällöin vauriota mallinnetaan syysuunnan lisäksi isotropiatasolla syysuunnan vaurioparametrilla. Vaurion edetessä vain isotropiatasolla, vaurioparametriksi valitaan isotropiatason vaurioparametri. Tällöin vauriota ei mallinneta lainkaan syiden suunnassa. [36 s. 37–38]

Toisinaan materiaaliyhtälön alkuperää ei ole esitetty lainkaan. Esimerkiksi Wang et al. esittämässä mallissa on sovellettu komposiittimateriaalille johdettua vaurioitunutta komplianssimatriisia, jonka taustateoriaa ei ole esitetty myöskään alkuperäisessä lähteessä [62]. Joissakin elastoplastisissa malleissa plastisoitumista ja haurasmurtumaa on mallinnettu suoraan kimmo- ja leikkausmoduuleja pienentämällä [41, 65–66]. Näissä malleissa elastiset vakiot pienenevät suoraan johonkin arvoon, mikä eroaa vauriomekaniikasta lähinnä siinä, että vauriomekaniikan malleissa elastisten vakioiden pieneneminen tapahtuu vähitellen vaurioparametrien välityksellä. Edellä esitettyjen julkaisujen perusteella voidaan päätellä, että vaurioituneen komplianssi- ja jäykkyysmatriisin muodostamiseksi ei välttämättä tarvita monimutkaista taustateoriaa.

Vaurioituneen komplianssimatriisin lisäksi tarvitaan ehto vaurion alkamiselle sekä yhtälöt vaurioparametreille vaurion edetessä. Vaurion alkamista kuvataan vauriokriteerillä ja se on tyypillisesti effektiivisistä jännityskomponenteista riippuva positiivinen skalaarisuure. Vauriokriteerin ollessa pienempi kuin nolla, materiaali käyttäytyy elastisesti yhtälön (2) mukaisesti. Kun vauriokriteeri saavuttaa arvon 0, vaurion katsotaan alkaneeksi ja tällöin jännitys-venymä -yhteys määräytyy vaurioituneen komplianssimatriisin tai jäykkyysmatriisin avulla. Elastoplastisten mallien tavoin vauriokriteerille f^d voidaan kirjoittaa:

$$f^d(\bar{\tilde{\sigma}}) = 0. \tag{41}$$

Joissakin malleissa vauriokriteereihin sisältyy myös lujittumisehto, joka kuvaa vauriopinnan muuttumista vaurion edetessä [21–23, 56, 62]. Puulle sovelletuissa materiaalimalleissa vauriokriteerit ovat lähdekohtaisia. Tämä johtuu siitä, että tarkkaa vauriokriteeriä puulle ei ole. Puun vauriokäyttäytyminen on hyvin erilaista eri jännitystiloissa, minkä vuoksi käyttökelpoisen vauriokriteerin valinta on hankalaa.

Anisotrooppisissa vauriomalleissa sovelletaan tyypillisesti useaa vauriokriteeriä vauriotyyppien erittelemiseen [16, 36, 49, 62]. Vaurioparametrien kasvu arvosta 0 kohti arvoa 1 alkaa, kun niitä vastaava vauriokriteeri täyttyy. Yksittäinen vauriokriteeri voi samanaikaisesti vaikuttaa useampaan vaurioparametriin ja sama vaurioparametri voi liittyä useampaan vauriokriteeriin [16 s. 82–83][49 s. 67]. Tämä monimutkaistaa vaurioparametrien lukumäärään ja vauriokriteerien valintaa.

Vauriokriteeri ilmoittaa vaurion alkamisen ja vaurion etenemistä kuvataan vaurioparametreilla. Murrayn mukaan vaurioparametrien lausekkeet voivat perustua venymään, jännitykseen tai energiaan [36 s. 36]. Puun vauriomalleissa on sovellettu erityisesti venymäenergiaan ja jännityksiin perustuvia formulaatioita [21–23, 36, 62]. Toisinaan vaurioparametrien lausekkeet on formuloitu erillisten sisäisten muuttujien avulla [16, 49, 56].

Puuta käsittelevät vauriomallit voidaan jakaa elastisiin ja elastoplastisiin vauriomalleihin. Molemmissa malleissa elementtikohtaiset jännitykset ratkaistaan tunnetuista kokonaisvenymistä. Elastiset vauriomallit eivät kykene huomioimaan materiaalissa tapahtuvia pysyviä muodonmuutoksia, mutta ne ovat toimintaperiaatteeltaan yksinkertaisempia. Niissä jännitykset ratkaistaan yhtälön (29) avulla suoraan kokonaisvenymän ja vaurioituneen jäykkyysmatriisin avulla [16, 49]. Elastoplastisissa vauriomalleissa sovelletaan plastisuusteoriaa plastisten muodonmuutosten mallintamiseksi [36, 56, 62]. Venymän elastiset ja plastiset osat ratkaistaan soveltamalla erikseen määriteltyä myötöehtoa, virtaussääntöä ja lujittumisyhtälöä. Kun kokonaisvenymän elastinen osa on ratkaistu, effektiivinen jännitystensori voidaan laskea yhtälöstä (3) korvaamalla kokonaisvenymätensori elastisella venymätensorilla. Tämän jälkeen vaurion eteneminen tarkistetaan vauriokriteereistä ja todelliset jännitykset ratkaistaan yhtälöstä (29) vaurioituneen jäykkyysmatriisin avulla. Khelifa et al. esittämissä malleissa vaurion mallintamiselle sovelletaan virtausyhtälön (13) kaltaista evoluutioyhtälöä, jossa myötöehdon sijasta sovelletaan kimmoenergiatiheyttä [21–23]. Tällöin vaurio ja plastinen muodonmuutos ratkaistaan samanaikaisesti myötöehdon, virtaussääntöjen ja lujittumisyhtälön avulla.

Vauriomekaniikkaan perustuvien mallien etuna on, että analysoitavan rakenteen vaurioitumista voidaan mallintaa tavallisilla elementeillä ilman tietoa särön koosta tai paikasta. Vauriomallien mielekkyyttä vähentää vaurioparametrien lukumäärän, vaurioparametrien yhtälöiden ja vauriokriteerien määrittäminen erityisesti anisotrooppista vauriota kuvatessa. Lisäksi vauriomekaniikan avulla ei voida mallintaa särön aukeamista. Toisaalta särön etenemistä voidaan mallintaa vaurioparametrien avulla [23][49 s. 108]. Tällöin särön voidaan ajatella muodostuneen alueille, joissa vaurioparametri saavuttaa arvon yksi. Vauriomekaniikan avulla on saavutettu hyviä tuloksia erityyppisten rakenteiden käyttäytymisen kuvaamiseen [21–23, 56, 62].

4. LABORATORIOKOKEET

Tampereen yliopistossa suoritettiin lukuvuosien 2019–2020 aikana joukko puun lujuuskokeita. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää kehitteillä olevassa poikittaisisotrooppisessa materiaalimallissa tarvittavien materiaaliparametrien arvot. Tutkittavat materiaaliparametrit olivat syy- ja poikittaissuuntaiset kimmokertoimet sekä veto- ja puristuslujuudet vastaavissa suunnissa. Lisäksi kokeissa määritettiin leikkausmoduuli syiden suunnassa sekä Poissonin vakiot syy- ja poikittaissuuntaisessa kuormituksessa.

Kokeissa käytetty puutavara oli mäntyä ja sen lujuusluokka C24. Kyseinen lujuusluokka valittiin, koska sitä vastaavaa puutavaraa oli helposti saatavissa puutavaramyymälöissä ja lisäksi se on yleisimpiä lujuusluokkia rakentamisessa. Koekappaleet merkattiin ja niitä vastaavat koetulokset dokumentoitiin. Lisäksi koejärjestelyt ja murtuneet koekappaleet valokuvattiin. Koejärjestelyissä noudatettiin pääasiassa standardien SFS-EN 384 ja SFS-EN 408 mukaisia suosituksia [54, 55].

Tutkittavien näytteiden annettiin saavuttaa tasapainotila vallitsevissa olosuhteissa ennen mittauksia. Koekappaleet punnittiin ja kokeet suoritettiin koekappaleiden massan asettuessa vakioarvoon. Kokeiden jälkeen näytteet kuivattiin kuivamassan selvittämiseksi ja punnittujen massojen avulla selvitettiin puun kosteuspitoisuus.

4.1 Puristuskokeet syiden suunnassa

Puristuskokeita syiden suunnassa tehtiin yhteensä 19 kappaletta. Koekappaleet sahattiin puutavarasta ja niiden dimensiot pyrittiin pitämään vakioina. Koekappaleen poikkileikkaus oli neliön muotoinen ja sivun pituus noin 45 mm. Koekappaleiden pituudet valittiin standardin mukaisesti kuusinkertaiseksi poikkileikkausmittoihin nähden ja lopullinen pituus oli noin 271 mm [55 s. 21]. Kokeet suoritettiin puristamalla koekappaleita vakionopeudella syiden suuntaisesti hydraulipuristimella. Mittauksissa käytettiin eri puristusnopeuksia. Ensimmäiset 10 näytettä testattiin nopeudella 0,8 mm/min ja loput näytteet nopeuksilla 4 mm/min, 7 mm/min ja 9,99 mm/min. Puristusnopeudella 0,8 mm/min suoritetuissa kokeissa koekappaleiden sivuille liimattiin venymäliuska-anturit poikittaisten venymien mittaamiseksi. Venymäliuskat asetettiin koekappaleen vastakkaisille pinnoille noin puoliväliin pituussuunnassa. Puristusvoimaa ja puristavan männän sijaintia mitattiin puristimen omalla mittarilla ajan funktiona. Muilla puristusnopeuksilla tehdyissä mittauksissa poikittaissuuntaisia venymiä ei mitattu lainkaan ja kokeet suoritettiin kolme kertaa. Kuva koelaitteistoista ja koekappeleista on esitetty liitteessä A.

Mitatuista voima-siirtymä -kuvaajista määritettiin syiden suuntainen kimmokerroin ja myötölujuus standardissa SFS-EN 408 esitetyillä tavoilla. Myötölujuus syiden suuntaisessa puristuksessa määritettiin suoraan mittausdatan maksimiarvosta yhtälöstä

$$f_{c0} = \frac{F_{max}}{A}, \tag{42}$$

jossa F_{max} on kuormitusvoiman maksimiarvo mittausdatassa ja A koekappaleen poikkipinta-ala. Kimmokerroin syiden suunnassa määritettiin yhtälöstä

$$E_L = \frac{l}{A}\frac{\Delta F}{\Delta w} = \frac{l}{A}k, \tag{43}$$

jossa l on koekappaleen pituus kuormitussuunnassa, ΔF puristusvoiman muutos mittausdatan elastisella alueella ja Δw puristusvoiman muutosta vastaava deformaation muutos. Suure k on voima-siirtymä -kuvaajan kulmakerroin elastisella alueella. [55 s. 21–22]

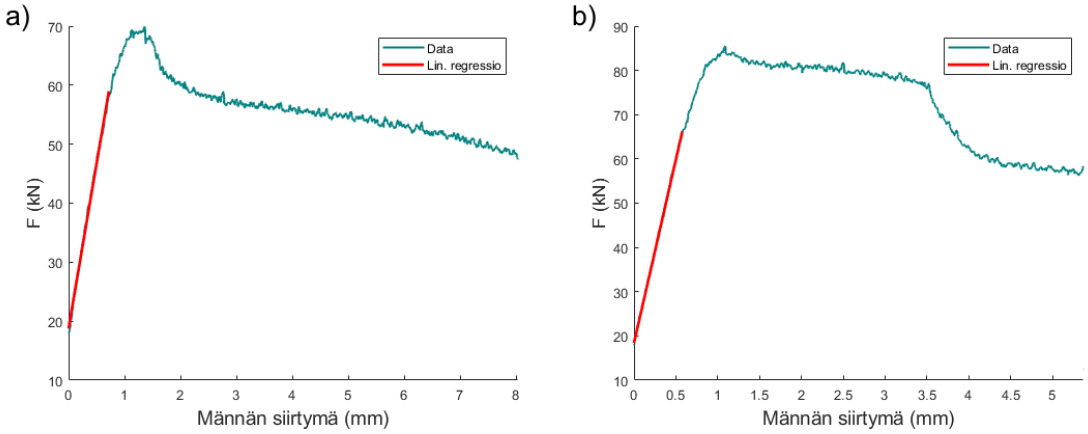
Yhtälössä (43) esiintyvä suure k määritettiin lineaarisen regression avulla mittausdataan sovitetun suoran kulmakertoimesta. Sovitteen määrittämiseen käytettiin apuna korrelaatiokerrointa. Korrelaatiokerroin kuvaa kuinka hyvin sovite asettuu mittausdataan ja se määritellään Matlab-ohjelmiston dokumentaatiossa kaavalla:

$$r = \sqrt{1 - \frac{\sum_i (y_i - \acute{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}}, \tag{44}$$

jossa y_i on datapisteen i arvo, $\acute{y}_i$ vastaava dataan sovitetun suoran arvo ja $\bar{y}$ mittausdatan keskiarvo [32]. Korrelaatiokerroin voi saada arvoja 0 ja 1 väliltä. Arvo 1 tarkoittaa täydellistä osuvuutta mittausdataan. Etäännyttäessä arvosta 1 mittausdatan hajonta sovitteen ympärillä kasvaa. Sovitetun suoran pituutta muutettiin, kunnes datan ja sovitteen avulla laskettu korrelaatiokerroin oli standardin SFS-EN 408 mukaisesti suurempi kuin 0,99 [55 s. 22]. Suoran pituus pyrittiin valitsemaan mahdollisimman suureksi riittävän datamäärän takaamiseksi. Tyypillistä mittausdataa ja kimmokertoimen määritystä on havainnollistettu kuvassa 10, jossa puristusvoima on esitetty puristimen männän siirtymän funktiona.

Kaikissa koekappaleissa esiintyi kuvan 10 mukainen lineaarinen elastinen alue, jonka jälkeen näytteet lujittuivat epälineaarisesti. Maksimipuristusvoiman saavutettuaan kappaleet pehmenivät ja mitattu puristusvoima kääntyi laskuun kuvan 10a mukaisesti. Kahdessa koekappaleessa esiintyi runsasta, lähes ideaaliplastista muokkautumista ennen merkittävää pehmenemistä kuvan 10b osoittamalla tavalla. Pehmenemisosan muoto vaihteli näytekohtaisesti ja puristusvoiman pieneneminen oli noin 15–35 MPa näytteestä

riippuen. Mitattujen voima-siirtymä -kuvaajien muodot ovat yhdenmukaisia muiden lähteiden kanssa [9 s. 8693–8695][17 s. 465][19 s. 192]. Kuvan 5 mukaista suurilla siirtymillä esiintyvää jyrkkää puristusvoiman kasvua ei kuitenkaan havaittu ja mittaukset lopetettiin näytteiden vaurioituessa silmin havaittavasti.



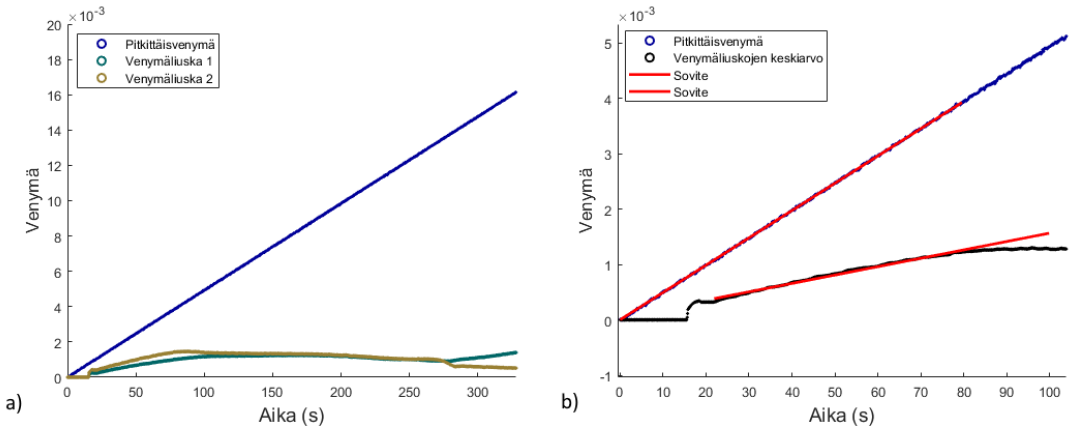
Kuva 10. *Puristusvoima männän siirtymän funktiona syiden suuntaisissa puristuskokeissa. Lineaarista regressiota on havainnollistettu punaisella suoralla.*

Poissonin vakioiden määrittämistä varten poikittaissuuntaiset venymät mitattiin venymäliuskojen avulla. Venymäliuskojen toimintaperiaate perustuu liuskan sähköisen resistanssin muutokseen sen deformoituessa. Resistanssin muutos on puolestaan suoraan verrannollinen venymään. Resistanssin muutos mitattiin kokeen aikana ajan funktiona ja saadut tulokset muunnettiin liuskojen valmistajan ilmoittamalla muunnoskertoimella venymän arvoiksi. Syy- ja poikittaissuuntaisten venymien arvot piirrettiin ajan funktiona samaan kuvaajaan kuvassa 11 esitetyllä tavalla. Poissonin vakiot laskettiin määritelmän (7) mukaisesti venymädatan lineaarisiin osiin sovitettujen suorien kulmakertoimien suhteesta. Elastisille venymille arvioitiin lineaarinen yhteys seuraavasti

$$\nu_L = \frac{\varepsilon_\perp}{\varepsilon_\parallel} = \frac{k_\perp t}{k_\parallel t} = \frac{k_\perp}{k_\parallel}, \tag{45}$$

jossa $\varepsilon_\parallel$ ja $\varepsilon_\perp$ ovat syy- ja poikittaissuuntaiset venymät. Suureet $k_\parallel$ ja $k_\perp$ ovat niitä vastaavat kulmakertoimet mittausdatan lineaarisesti kasvavassa osassa ja t aika. Mittauksen aikaista raakadataa on havainnollistettu kuvassa 11a. Mittausdatan perusteella syiden suuntainen venymä kasvaa lineaarisesti ajan funktiona, mistä voidaan todeta, että tasainen kuormitusnopeus 0,8 mm/min on saavutettu onnistuneesti. Venymäliuskojen 1 ja 2 alkuosassa esiintyy alue, jossa venymä on likimain nolla. Tämä johtuu siitä, että venymäliuskojen virta on käynnistetty hieman puristuskokeen aloittamisen jälkeen, mikä näkyy kuvassa 11 liuskojen venymäarvojen hyppäyksenä. Venymävaste liuskoilla on mittausten alkuvaiheilla lähes lineaarista. Lineaarisen osan jälkeisessä epälineaarisessa

vasteessa ei havaittu säännönmukaisuuksia koekappaleiden välillä. Käyrien epälineaarisuus alkoi likimääräisesti samalla hetkellä, kun kuvan 10 mukaisissa voima-siirtymä -kuvaajissa saavutettiin puristusvoiman maksimiarvo. Näin ollen kuvissa 11a ja 11b näkyvien epälineaaristen osien voidaan arvioida liittyvän puun muokkautumiseen ja lopulliseen vaurioitumiseen. Poissonin vakioiden määrittämisen kannalta niillä ei ole merkitystä.



Kuva 11. *Esimerkki Poissonin vakioiden määrittelyssä käytetystä mittausdatasta (a) ja sovitteista (b).*

Venymät liuskoilla ovat kuvan 11a perusteella erisuuret. Tämän vuoksi venymäliuskoilta kerätty data keskiarvoistettiin ja Poissonin vakiot määritettiin keskiarvoistetuista käyristä kuvan 11b mukaisesti. Syynä venymäliuskojen lukemien vaihteluun voi olla kuiturakenteen heterogeenisyys koekappaleessa, joka oli selkeästi havaittavissa vuosirenkaiden kaareutumisena koekappaleiden poikkileikkauksissa.

Mitattujen kosteuspitoisuuksien, myötölujuuksien, kimmokertoimien ja Poissonin vakioiden keskiarvot ja hajonnat on esitetty taulukossa 1. Kosteuspitoisuus määritettiin kaavalla

$$\frac{m_v - m_0}{m_0} \times 100\%, \tag{46}$$

jossa m_v on koekappaleen massa mittausolosuhteissa ja m_0 kuivamassa [19 s. 118]. Kosteuspitoisuudeksi mitattiin noin 14 %. Kuivamassat mitattiin ainoastaan puristusnopeudella 0,8 mm/min testatuilla koekappaleilla. Kosteuspitoisuus oli kuitenkin likimain yhtä suuri muissa mittauksissa, sillä koekappaleita säilytettiin samoissa olosuhteissa.

Lujuusarvojen hajonta puristusnopeutta 0,8 mm/min suuremmilla nopeuksilla oli huomattavasti suurempaa nopeudella 0,8 mm/min suoritettuihin kokeisiin verrattuna. Tähän vaikutti oleellisesti mittausten vähäisempi lukumäärä. Koska eri puristusnopeuksilla mitatut keskiarvot ovat melko lähellä toisiaan ja hajonta suurta, puristusnopeuden vaikutuksesta

myötölujuuteen ei voida tehdä selkeitä johtopäätöksiä. Eri puristusnopeuksilla mitattujen kimmokertoimien keskiarvot ovat myös lähellä toisiaan, mutta hajonta on huomattavasti pienempää lujuusarvoihin verrattuna. Mittausten perusteella puristusnopeudella ei vaikuttaisi olevan merkittävää vaikutusta kimmokertoimeen. Puristusnopeuden vaikutuksen varmentamiseksi muita nopeuksia tulisi testata enemmän.

Taulukko 1. *Kosteuspitoisuus ja mittaustulosten keskiarvot syiden suuntaisessa puristuskokeessa. Hajonta on merkitty suluissa.*

	Kuormitusnopeus (mm/min)	Mittausten lkm.	Kosteus (%)	f_{c0} (MPa)	E_L (GPa)	ν_L
Mittaus	0,8	10	13,6	37,47 (2,41)	9,29 (1,20)	0,29 (0,08)
	4	3	–	35,43 (12,68)	10,88 (1,08)	–
	7	3	–	31,90 (14,39)	9,47 (0,76)	–
	9,99	3	–	38,88 (6,04)	9,27 (1,76)	–

Taulukkoon 2 on koottu kirjallisuudesta löytyviä vertailuarvoja. Mäntylajiksi pyrittiin mahdollisuuksien mukaan valitsemaan *Pinus sylvestris (Scots pine)* koska se vastaa Suomessa ja muissa Pohjoismaissa luonnonvaraisena kasvavaa mäntylajia. Poikkeuksena on FPL:n ja Kollmann et al. julkaisemat arvot. FPL:n julkaisemassa puuoppaassa on listattu useita, pääosin Yhdysvalloissa esiintyviä mäntylajeja [14]. Kollmann et al. julkaisemista arvoista ei puolestaan käy ilmi mäntylaji [25].

Lähteissä esitetyt kosteuspitoisuudet vaihtelevat välillä 9,7–12%, mikä on hieman pienempi kuin mittauksissa käytetty kosteuspitoisuus. Kossakowskin ja puuinfon julkaisemissa arvoissa kosteuspitoisuutta ei ole esitetty lainkaan [26, 43]. Koetulokset näyttäisivät noudattavan melko hyvin kirjallisuusarvoja myötölujuuden ja kimmokertoimen osalta. Dinwoodien ja Kollmann et al. esittämät arvot kimmokertoimelle ovat kuitenkin huomattavasti mitattuja arvoja suuremmat [13, 25]. Puuinfon web-sivuilla on esitetty kolme arvoa myötölujuudelle ja kimmokertoimelle. Näitä arvoja ei ole kuitenkaan perusteltu tarkemmin.

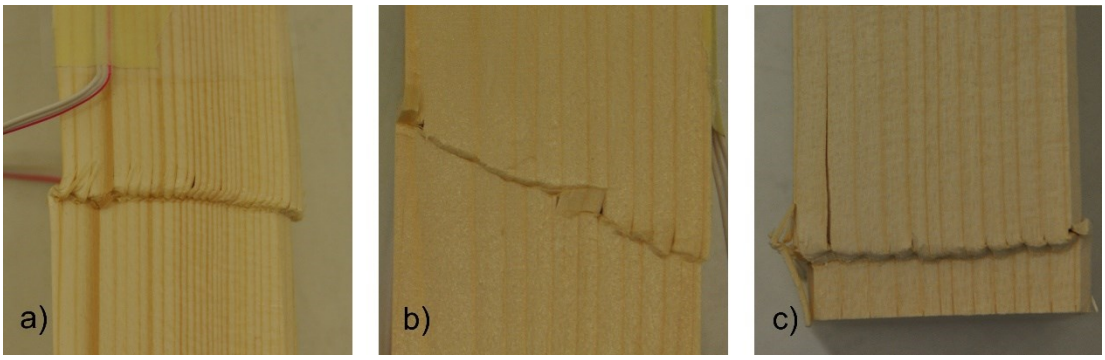
Mitattu Poissonin vakio on pääasiassa pienempi muihin lähteisiin verrattuna. Poissonin vakiot on usein esitetty kirjallisuudessa ortotrooppisille materiaaleille usealla materiaalitasolla. Tuloksia on verrattu ortotrooppisiin arvoihin ν_{12} ja ν_{13}, jotka yhtälön (8) perusteella vastaavat poikittaisisotrooppista Poissonin vakiota ν_L. Koska ne ovat erisuuret,

voidaan todeta, että poikittaisisotrooppinen oletus puusta ei ole tarkasti voimassa. Taulukkoon 2 on merkitty molemmat arvot. Selkeää trendiä siitä, kumpi on suurempi ei ole havaittavissa ja erot ovat puulajikohtaisia. FPL:n puuoppaasta on valittu siinä esitettyjen mäntylajien suurimmat ja pienimmät arvot, minkä vuoksi merkityt ääriarvot eivät vastaa yhden mäntylajin Poissonin vakioiden vaihtelua. Lopuksi on syytä huomata, että mitatut Poissonin vakiot eivät vastaa kirjallisuusarvoista poiketen puhdasta LR- tai LT-tasoa vaan mittaustulokset asettuvat niiden väliin. Syyrakenteeseen on vaikea vaikuttaa, johtuen saatavilla olevasta puutavarasta. Jos halutaan mitata ortotrooppisen ainemallin Poissonin vakiot, näyte tulisi sahata mahdollisimman paksun tukin reuna-alueelta, jossa vuosirenkaiden kaareutuvuus on pientä.

Taulukko 2. *Muista lähteistä koottuja vertailuarvoja männylle syiden suuntaisessa puristuksessa. Mahdollinen lähteissä esitetty hajonta on esitetty suluissa. [13 s. 82, s.110–111][14 s. 5–3, s. 5-7–5-8][18 s. 36][25 s. 294, s. 328][26 s. 745][43]*

	f_{c0} (MPa)	E_L (GPa)	ν_L
Dinwoodie	$47{,}4\ (9{,}25)$	$16{,}3$	$0{,}42 - 0{,}51$
FPL	$16{,}8 - 58{,}4$	$7{,}48 - 15{,}07$	$0{,}280 - 0{,}444$
Jalava	$40{,}3 - 51{,}0$	$10{,}3 - 15{,}7$	$-$
Kollmann et al.	$30{,}8 - 39{,}5$	$16{,}3$	$0{,}44 - 0{,}46$
Kossakowski	$-$	$6{,}91$	$0{,}375 - 0{,}388$
Puuinfo	$34 - 54 - 92$	$6{,}8 - 11{,}8 - 19{,}7$	$-$

Koekappaleiden pääsääntöistä murtumistapaa on havainnollistettu kuvassa 12. Koekappaleisiin muodostui selkeästi silmin havaittava sauma, jota pitkin kappale deformoitui. Sauman kohdalla syyt näyttäisivät nurjahtaneen ja lisäksi joissakin kappaleissa materiaalia kuoriutui irti saumojen reunoilla. Sauman muoto vaihteli koekappaleiden ja tarkasteltavien sivujen välillä. Joissakin koekappaleissa sauma oli sivusta riippuen lähes vaakasuora, kuten kuvissa 12a ja 12c. Toisinaan sauma oli selkeästi kallistunut kuvan 12b osoittamalla tavalla, mikä viittaa leikkausjännitysten aiheuttamaan deformaatioon. Osaan koekappaleista muodostui myös syiden suuntaisia säröjä kuvan 12c mukaisesti. Tällaisissa koekappaleissa kuormitusta on todennäköisesti viety muita kappaleita pidemmälle. Monissa koekappaleissa syiden suuntaiset säröt ydintyivät oksan kohdalta. Sauman sijainnissa koekappaleen pituussuunnassa ei havaittu yhdenmukaisuuksia ja osassa koekappaleista se saattoi muodostua jopa lähelle koekappaleen päätyjä kuten kuvassa 12c. Monissa tapauksissa sauma muodostui oksan kohdalle sellaisen ollessa läsnä. Oksan läsnäolo ei kuitenkaan ollut edellytys sauman muodostumiselle.



Kuva 12. *Syiden suuntaisissa puristuskokeissa havaittuja vauriomuotoja.*

Kuvan 12 mukaisia vauriopintoja on raportoitu monissa lähteissä. Esimerkiksi ASTM D143-94 standardissa kuvan 12 mukaiset vauriot on luokiteltu vaakasuoriin ”murskautumisvaurioihin” ja vinoihin leikkausvaurioihin [3 s. 9]. Tällainen luokittelu ei kuitenkaan ole yksiselitteistä johtuen siitä, että sauman muoto on usein erilainen eri sivuilla. Hyvin samankaltaisia vauriokuvioita on raportoitu myös muussa kirjallisuudessa [9][13 s. 132–134]. Tulosten perusteella voidaan todeta, että syiden suuntainen puristus ei johda äkilliseen katastrofaaliseen rakenteen murtumiseen. Koska puun myötölujuus syiden suunnassa on huomattavasti suurempi kuin kohtisuorassa suunnassa, rakenne on edullista suunnitella syiden suuntaisen puristuskuormituksen alaiseksi, mikäli se on mahdollista.

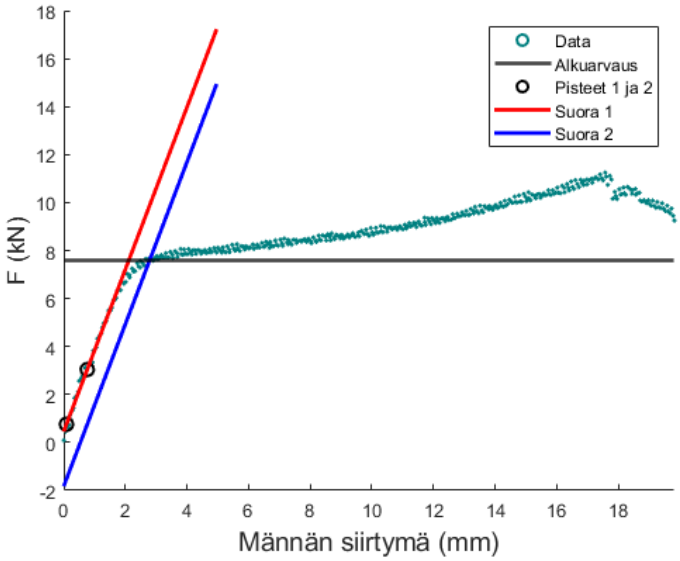
4.2 Puristuskokeet poikittaissuunnassa

Puristuskokeita syihin nähden kohtisuorassa suunnassa tehtiin yhteensä 6 kappaletta. Koekappaleet olivat standardin SFS-EN 408 mukaisesti suorakulmaisen särmiön muotoisia. Koekappaleiden poikkileikkausmitat olivat noin 45 mm ja 70 mm. Kappaleiden korkeus puristussuunnassa oli noin 90 mm. Koekappaleet valmistettiin siten, että vuosirengasrakenne oli jokaisella kappaleella likimain samanlainen. [55 s. 24]

Kokeet suoritettiin puristamalla koekappaleita syihin nähden kohtisuorassa suunnassa hydraulipuristimella. Kaikki kokeet suoritettiin vakiopuristusnopeudella 3 mm/min. Koekappaleen molemmille pinnoille kiinnitettiin venymäliuskat syiden suuntaisten venymien mittaamiseksi. Puristusvoimaa ja männän siirtymää mitattiin puristimen omalla mittarilla. Kuva koelaitteistoista ja koekappeleista on esitetty liitteessä A.

Myötölujuuden määrittäminen ei ole yhtä suoraviivaista kuin syiden suuntaisissa puristuskokeissa. Tämä johtuu puun lujittumiskäyttäytymisestä poikittaissuuntaisen puristuksen alaisena, minkä vuoksi selkeää myötörajaa ei voida määrittää koetuloksista suoraan. Standardin SFS-EN 408 mukaan myötöraja määritetään iteratiivisesti valitsemalla myötökuorman alkuarvaus $F_{c90,max}$ koedatasta. Tämän jälkeen koedatasta määritellään kuorman arvoja $0{,}4 \times F_{c90,max}$ ja $0{,}1 \times F_{c90,max}$ vastaavat pisteet 1 ja 2. Näiden kahden

pisteen välille piirretään suora 1. Suoran 1 viereen piirretään yhdensuuntainen suora 2, jonka vaakasuora etäisyys suorasta 1 on 1% koekappaleen korkeudesta, eli noin 0,9 mm. Suoran 2 ja mittausdatan leikkauspistettä verrataan alkuarvaukseen. Mikäli niiden suhde on vähemmän kuin 5%, iteraatio voidaan lopettaa ja myötökuormaksi valitaan sen hetkinen alkuarvaus. [55 s. 28]



Kuva 13. *Myötölujuuden ja kimmokertoimen määritys mittausdatasta poikittaissuuntaisessa puristuskokeessa*

Iteraatioprosessia ja tyypillistä koedataa on havainnollistettu kuvassa 13, jossa puristusvoima on esitetty puristimen männän siirtymän funktiona. Suora 1 määritettiin koedatasta lineaarisen regressioanalyysin avulla, jolloin se oli alkuarvauksesta riippumaton. Suora 2 määritettiin suoran 1 avulla edellä kuvatulla tavalla ja myötökuorma $F_{c90,max}$ määritettiin mittausdatan ja suoran 2 leikkauspisteestä. Standardin vaatimusten tarkistamiseksi tuli todeta, että pisteet 1 ja 2 sijaitsivat samanaikaisesti sekä suoralla 1 että mittausdatassa. Tämä voitiin tehdä valitsemalla alkuarvaus yhtä suureksi kuin suoran 2 ja mittausdatan leikkauspiste. Kuvasta 13 voidaan todeta, että pisteet 1 ja 2 täyttävät selvästi edellä mainitut vaatimukset.

Myötölujuus syihin nähden kohtisuorassa puristuksessa määritettiin SFS-EN 408 standardin mukaisesti yhtälöstä

$$f_{c90} = \frac{F_{c90,max}}{A}. \tag{47}$$

Kimmokerroin syihin nähden kohtisuorassa puristuksessa määritettiin yhtälöstä

$$E_T = \frac{(F_{40} - F_{10})l}{(w_{40} - w_{10})A}, \tag{48}$$

jossa F_{10} ja F_{40} vastaavat kuvan 13 pisteiden 1 ja 2 puristusvoimia. Suuret w_{40} ja w_{10} ovat kyseisiä pisteitä vastaavat männän siirtymät. Kaavan (47) mukainen kimmokertoimen määritys vastaa Hooken lakia, jossa kimmokerroin määritellään jännitys-venymä -kuvaajan elastisen osan kulmakertoimena. Kimmokertoimet määritettiin kaavaa (48) soveltaen kuvassa 13 havainnollistetun suoran 1 kulmakertoimen avulla. [55 s. 27–28]

Mitatuissa voima-siirtymä -kuvaajissa oli havaittavissa selkeä lineaarinen alue, jonka jälkeen koekappaleet lujittuivat. Lujittuminen oli lyhyen epälineaarisen kasvun jälkeen pääasiassa lineaarista. Osassa mittauksista jännitysten kasvu vaihtui epälineaariseksi suurilla siirtymillä kuvan 13 mukaisesti. Mitatut voima-siirtymä -kuvaajat ovat yhdenmukaisia muiden kirjallisuuslähteiden kanssa [17 s. 465][19 s. 162][49 s. 14]. Kuvan 5 mukaista jyrkkää lujittumista suurilla siirtymillä ei kuitenkaan ollut havaittavissa. Sen sijaan kaikissa näytteissä mitatut puristusvoimat kääntyivät laskuun.

Mittaustulokset on esitetty taulukossa 3. Näytteiden kosteuspitoisuudet määritettiin yhtälöstä (46) ja niiden keskiarvo oli noin 13,5%. Mitattu myötölujuuden keskiarvo on noin 2,4 MPa ja kimmokertoimen keskiarvo noin 0,10 GPa. Nämä ovat noin 7% ja 1% vastaavista syiden suuntaisista myötölujuuden ja kimmokertoimen arvoista. Tulosten hajonta on syiden suuntaisiin puristuskokeisiin verrattuna hyvin pientä.

Taulukko 3. *Kosteuspitoisuus ja mittaustulosten keskiarvot syihin nähden poikittaissuuntaisessa puristuskokeessa. Hajonta on merkitty suluissa.*

Kuormitus-nopeus (mm/min)	Mittaus-ten lkm.	Kosteus (%)	f_{c90} (MPa)	E_T (GPa)	ν_T
3	6	13,5	2,44 (0,05)	0,10 (0,005)	–

Taulukossa 4 on esitetty kirjallisuudesta löytyviä vertailuarvoja kosteuspitoisuudessa 9,7–20%. Pääasiallisesti arvot pyrittiin etsimään mäntylajille *Pinus sylvestris (Scots pine)*, joka esiintyy luonnonvaraisena Pohjoismaissa. Poikkeuksena on Kollmann et al. esittämät arvot, jossa mäntylajia ei ole määritelty [25]. FPL:n puuoppaassa on puolestaan esitetty arvot vain Yhdysvalloissa kasvaville lajeille [14].

Kimmokertoimet on tyypillisesti määritelty erikseen R- ja T-suunnille, minkä vuoksi taulukkoon 4 on listattu molemmat arvot. Sama pätee myös Poissonin vakioille ja taulukkoon on poimittu yhtälön (8) mukaiset arvot ν_{23} ja ν_{32}. FPL:n puuoppaassa edellä mainitut arvot on esitetty usealle mäntylajille, joten taulukkoon 4 on koottu niiden suurimmat ja pienimmät arvot. Näin ollen ne eivät edusta muista kohdista poiketen yhden mäntylajin elastisten ominaisuuksien vaihtelua. Kimmokertoimet T-suunnassa (E_3) ovat kaikissa

lähteissä R-suuntaa (E_2) pienempiä. Vastaavasti Poissonin vakio ν_{23} on hieman suurempi arvoon ν_{32} verrattuna.

Taulukko 4. *Muista lähteistä koottuja vertailuarvoja männylle syihin nähden poikittaissuuntaisessa puristuksessa. [13 s. 82][14 s. 5-2–5-3, s. 5-7-5-8][25 s. 294, s. 298][26 s. 745][61 s. 164]*

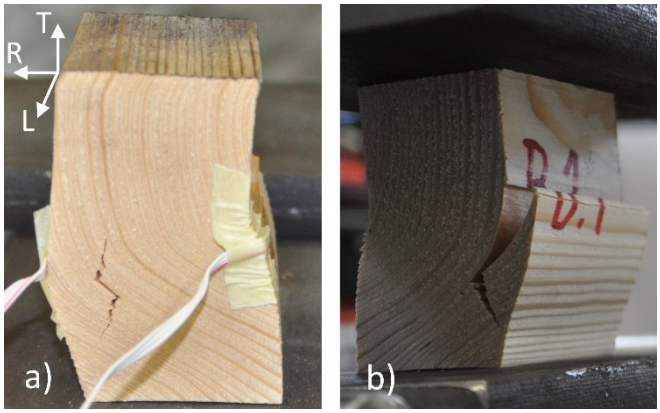
	f_{c90} (MPa)	E_T (GPa)	ν_T
Dinwoodie	–	$0{,}570 - 1{,}100$	$0{,}31 - 0{,}68$
FPL	$1{,}3 - 7{,}0$	$0{,}422 - 1{,}537$	$0{,}308 - 0{,}469$
Kollmann et al.	–	$0{,}569 - 1{,}098$	$0{,}310 - 0{,}605$
Kossakowski	–	$0{,}271 - 0{,}450$	$0{,}278 - 0{,}462$
Tsoumis	$7{,}5$	–	–

Mitattu poikittaissuuntainen kimmokerroin on selkeästi pienempi kuin muussa kirjallisuudessa esitetyt arvot. Poikittaissuuntaiset kimmokertoimet ovat kuitenkin muun kirjallisuuden perusteella hyvin pieniä verrattuna syiden suuntaiseen kimmokertoimeen. Näin ollen mitatun kimmokertoimen ja kirjallisuusarvojen välinen ero ei liene mallinnuksen kannalta kovin merkittävä.

Myötölujuuden arvoja poikittaissuuntaiselle puristukselle on heikosti löydettävissä kirjallisuudesta. Mittauksissa koekappaleet pullistuivat voimakkaasti sivusuunnissa kuvan 14 mukaisesti. Tähän saattoi vaikuttaa koekappaleiden epäsymmetrisesti kaareutuva vuosirengasrakenne, joka on selkeästi havaittavissa kuvassa 14. Basta et al. suorittamien puristuskokeiden perusteella vuosirenkaiden orientaatiolla on merkittävä vaikutus vauriokäyttäytymiseen [5]. Tämän perusteella on syytä epäillä, että näytteen vuosirengasrakenteen kaareutuvuuden muuttuessa myös lujuusominaisuudet muuttuvat erilaisen jännitystilan muodostuessa mekaanisesti heikommille kevätpuualueille. Tämä selittäisi myös kirjallisuudesta löytyvien vertailuarvojen niukkuuden.

Poissonin vakiota ν_T yritettiin virheellisesti määrittää mittaamalla venymää syysuunnassa kuormituksen vaikuttaessa poikittaissuunnassa. Tällaista Poissonin vakiota ν_{21} (tai ν_{31}) ei voitu määrittää käytössä olevilla laitteistoilla. Tämä johtui siitä, että syiden suuntaisen venymän mittaus osoittautui hankalaksi. Koekappaleet deformoituivat voimakkaasti venymäliuskojen kohdalta kuvan 14a mukaisesti, minkä vuoksi venymäliuskojen antamat lukemat eivät olleet järkeviä. Syiden suuntaisia venymiä yritettiin mitata myös mittakellojen avulla. Tällainen koejärjestely on esitetty liitteessä A. Laitteiston tarkkuus ei kuitenkaan riittänyt venymien mittaamiseen. Mittakellojen mittaustarkkuus oli

0,01 mm, josta voidaan päätellä, että syiden suuntainen venymä syihin nähden kohtisuorassa puristuksessa on erittäin pieni. Kirjallisuudessa esitetyt arvot Poissonin vakiolle myös tukevat tätä väitettä, sillä sen arvon on esitetty vaihtelevan Kossakowskin julkaisussa välillä 0,015–0,024 ja Kollmann et al. teoksessa välillä 0,015–0,031 [25 s. 298][26 s. 745]. FPL:n puuoppaassa se on vain todettu hyvin pieneksi [14 s. 5-2]. Suure ν_T voitaisiin selvittää mittaamalla poikittaisvenymää kuvan 14a mukaisella RT-tahkolla LT-tahkon sijaan. Ajallisten resurssien vuoksi lisämittauksia ei kuitenkaan tehty.



Kuva 14. *Koekappaleet poikittaissuuntaisten puristuskokeiden päätyttyä. Poissonin vakiot pyrittiin mittaaman kuvassa a näkyvillä venymäliuskoilla mutta kappaleen pullistumisen vuoksi järkevää koedataa ei saatu. Kuvassa b siipisärö muodostuu selkeästi kevät- ja kesäpuukerrosten väliin lohkaisten palan näytteestä.*

Murtumiskäyttäytyminen oli samankaltaista kaikissa koekappaleissa. Särö eteni ns. siipisärön tapaan, joka on yleinen murtumismekanismi erityisesti hauraissa materiaaleissa kuten betonissa [24 s. 124]. Särö ydintyi kevät- ja kesäpuukerrosten välille ja sen kärjistä lähtevät siivekkeet etenivät puukerrosten läpi kuvan 14 mukaisesti. Osassa koekappaleista särö eteni niin pitkälle, että se lohkaisi palan näytteestä kuvan 14b mukaisesti. On kuitenkin syytä huomata, että murtumiskäyttäytyminen on hyvin erilaista vuosirengasrakenteen kaarevuuden muuttuessa kuvan 14a RT-tasolla [5].

4.3 Vetokokeet syiden suunnassa

Vetokokeita tehtiin yhteensä 12 kappaletta. Standardissa SFS-EN 408 ei ole määritelty koekappaleen dimensioita, minkä vuoksi kokeet tehtiin yleisesti vetokokeissa käytetyillä keskeltä kavennetuilla koekappaleilla. Kavennukseen muodostuu täysimittaista kappaletta suurempi jännitystila, mikä pienentää murtamiseen tarvittavaa voimaa ja kiinnityksiltä vaadittavaa kitkaa. Lisäksi jännitysjakauma kavennuksessa on tasaisempi, mikä tarkentaa vetolujuuden mittausta. Kavennuksen poikkileikkaus oli suorakulmio ja sen sivu-

jen mitat vaihtelivat valmistusteknisistä syistä 26–36 mm ja 45–47 mm välillä. Kavennuksen pituus vaihteli välillä 320–460 mm. Koekappaleen muoto ja mitat on esitetty liitteessä B.

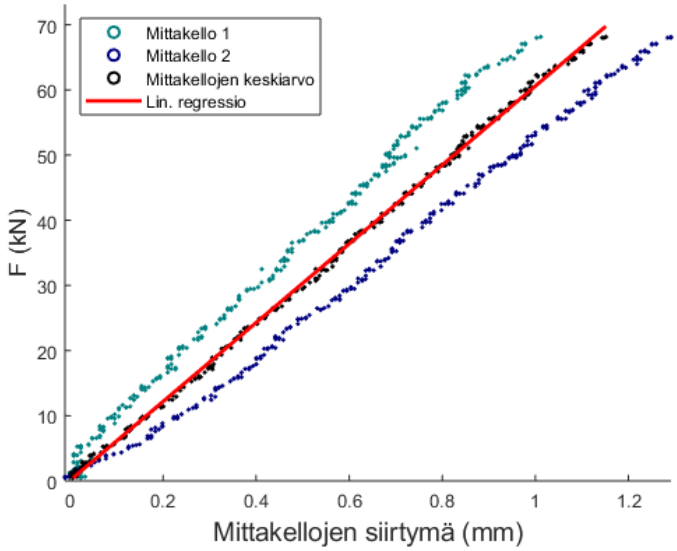
Tutkittavat koekappaleet kiinnitettiin toisesta päädystä lattiaan ja vapaata päätyä vedettiin hydrauliavusteisesti lattiatasoon nähden kohtisuorassa suunnassa. Kiinnitykset lattiaan ja koelaitteistoon tehtiin koekappaleiden päätyihin liitettyjen teräslevyjen välityksellä. Koekappaleiden päädyt asetettiin levyjen väliin ja levyt puristettiin kiinni toisiinsa pulteilla. Liukumisen vähentämiseksi levyjen sisäpinnalla oli piikkejä ja kitkaa parantava pintakerros. Teräslevyt kiinnitettiin siten, että koekappaleiden testattava alue muodostui pääasiassa kavennetusta osasta. Kiinnitysten liukumisen vuoksi koekappaleiden venymää ei voitu mitata puristuskokeiden tavoin tunkin siirtymien avulla. Tämän vuoksi kavennuksen vastakkaisille sivuille kiinnitettiin mittakellot, joilla mitattiin kavennuksen venymää. Kuva koejärjestelystä on esitetty liitteessä B.

Standardin SFS EN 408 mukaan kokeissa käytettävä kuormitusnopeus tulee määrittää kokeellisesti. Valinta tulee tehdä siten, että mitatun maksimi kuormitusvoiman saavuttamiseen kuluva aika asettuu välille (300 ± 120)s [55 s. 21]. Kokeissa käytettyä kuormitusnopeutta nostettiin vähitellen arvosta 0,5 mm/min kunnes maksimi kuormitusvoiman saavuttamiseen kulunut aika asettui standardin mukaiselle välille. Lopulliseksi kuormitusnopeudeksi valittiin 1,5 mm/min. Kokeita tehtiin yhteensä 12 kappaletta, joista 8 tehtiin nopeudella 1,5 mm/min. Muilla nopeuksilla mittaukset tehtiin kerran optimaalisen kuormitusnopeuden löytämiseksi.

Tyypillistä mittausdataa on havainnollistettu kuvassa 15, jossa kuormitusvoima on esitetty mittakellojen siirtymien funktiona. Mittausdatasta määritettiin kimmokerroin ja vetolujuus. Mittakellojen siirtymät keskiarvoistettiin ja kimmokerroin E_L määritettiin lineaarisen regression avulla keskiarvoistetun mittausdatan kulmakertoimesta yhtälön (43) avulla. Vetolujuus syiden suunnassa määritettiin kuvaajien maksimiarvosta kaavalla

$$f_{t0} = \frac{F_{max}}{A}. \tag{49}$$

Molempien arvojen määrityksessä käytettiin koekappaleiden kavennetun osan poikkileikkausdimensioita. Kimmokertoimen määrityksessä käytettiin yhtälössä (43) esiintyvän suuren l arvona mittakellojen mittausväliä, joka oli noin 300 mm. Koekappaleet murtuivat hauraasti, mikä näkyy kuvassa 15 kuormitusvoiman lähes lineaarisen kasvun katkeamisena. Joissakin lähteissä ja kuvassa 5 esitettyä plastisoitumista ei koetulosten perusteella ole havaittavissa [17][19 s. 190].



Kuva 15. *Tyypillistä koedataa syiden suuntaisessa vetokokeessa. Kimmokerroin määritettiin punaisella merkityn sovitteen kulmakertoimesta*

Mitattujen murtolujuuksien ja kimmokertoimien keskiarvot on esitetty taulukossa 5. Koekappaleita säilytettiin samoissa olosuhteissa kuin syiden suuntaisissa puristuskokeissa, minkä vuoksi kosteuspitoisuutta ei mitattu erikseen. Tulokset analysoitiin pelkästään nopeudella 1,5 mm/min kuormitetuilla kappaleilla. Yksi mittauksista hylättiin tarkastelusta, sillä koekappaleessa oli selkeästi havaittava oksa, joka johti huomattavasti pienempiin lujuusarvoihin. Mittaustulosten keskiarvot ovat lähellä nopeudella 0,8 mm/min suoritettujen syiden suuntaisten puristuskokeiden arvoja. Lujuusarvojen hajonta on kuitenkin suurempaa vetokokeissa. Tämä johtuu puun mikrorakenteen mekaanisten ominaisuuksien tilastollisesta vaihtelusta [30 s. 209]. Erityisesti yksittäisten kuitujen murtolujuus voi vaihdella merkittävästi. Mittaustulosten hajonnasta voidaan todeta, että kimmokerroin vedossa on melko lähellä vastaavaa puristuksessa mitattua arvoa. Väitettä ei voida kuitenkaan yleistää muille puulajeille.

Taulukko 5. *Kosteuspitoisuus ja mittaustulosten keskiarvot syiden suuntaisessa vetokokeessa. Hajonta on merkitty suluissa.*

Mittausten lkm.	Kosteus (%)	f_{t0} (MPa)	E_L (GPa)
7	14	40,08 (6,61)	10,8 (1,86)

Taulukkoon 6 on koottu muissa lähteissä esitettyjä vertailuarvoja murtolujuudelle. Puulajiksi on pyritty valitsemaan edellisten lukujen tavoin *Pinus sylvestris (Scots pine).* FPL:n puuoppaasta poimitut arvot vastaavat Yhdysvalloissa kasvavia mäntylajeja [14]. Kollmann et al. ja swedishwoodin esittämistä arvoista ei puolestaan käy ilmi mäntylaji [25, 57]. Kosteuspitoisuus FPL:n, Dinwoodien ja Tsoumisin esittämissä arvoissa vaihtelee välillä 10-20% [13, 14, 61]. Muissa lähteissä sitä ei ole ilmoitettu lainkaan. Kollmann et al. esittämät lujuusarvot on määritelty hyvin oksaiselle, pienioksaiselle, ja virheettömälle männylle, minkä vuoksi lujuusarvoja on kolme [25]. Puuinfon web-sivuilla on esitetty kolme lujuusarvoa, ja niiden välistä suurta hajontaa ei ole perusteltu lainkaan [43]. Taulukosta 6 nähdään, että mitattu vetolujuus on pääsääntöisesti huomattavasti pienempi muihin lähteisiin verrattuna.

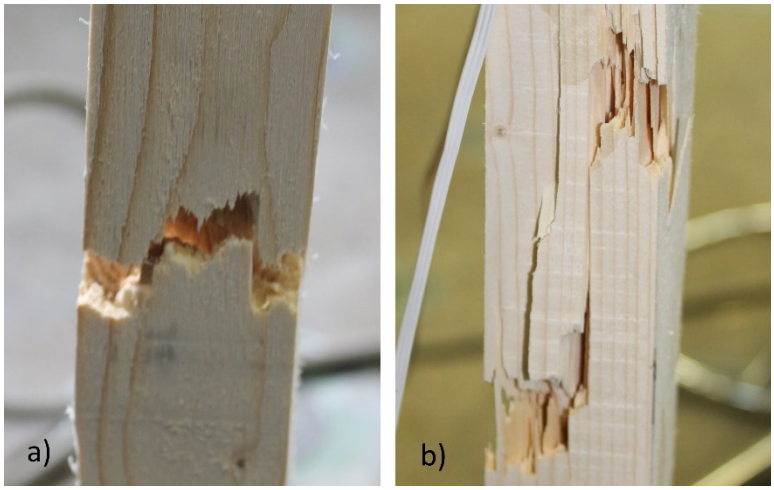
Taulukko 6. *Muista lähteistä löytyviä männyn lujuusarvoja syiden suuntaisessa vedossa. [13 s. 113][14 s. 5-26, s. 5-7–5-8][25 s. 328][43][57][61 s. 164]*

	f_{t0} (MPa)
Dinwoodie	$92 - 110$
FPL	$57{,}9 - 94{,}5$
Kollmann et al.	$11{,}6;\ 37{,}7;\ 76{,}5$
Puuinfo	$34 - 102 - 192$
Swedishwood	104
Tsoumis	102

Lähteissä ilmoitettujen lujuusarvojen määrittämiseen käytettyjä menetelmiä on harvoin eritelty. FPL:n julkaisemat tulokset perustuvat ASTM D143 standardin mukaisiin koejärjestelyihin, jotka ovat hyvin samankaltaiset kuin tässä työssä [14 s. 5-25]. Merkittävin ero on koekappaleen koko, joka on ASTM standardissa huomattavasti pienempi [3]. Lisäksi FPL:n esittämät lujuusarvot on mitattu virheettömille ja suorasyisille koekappaleille [14 s. 5-25]. Sama näyttäisi pätevän myös Tsoumisin ilmoittamille arvoille [61 s. 164]. Tässä työssä käytetyt koekappaleet vastasivat kooltaan yleisesti saatavilla olevaa puutavaraa,

minkä vuoksi niissä esiintyi epätäydellisyyksiä kuten oksia ja syyvirheitä. Luontaiset rakennevirheet voisivat selittää vertailulähteitä pienemmät arvot. Kollmann et al. teoksessa julkaistut tulokset tukevat tätä väitettä. Heidän mukaansa pienenkin oksan läsnäolo voi johtaa jopa 50 % pienempään vetolujuuteen. Oksien vaikutus on merkittävää vedossa mutta puristuksessa vaikutus on vähäisempi. Virheettömän männyn vetolujuudeksi on ilmoitettu 76,5 MPa ja pienioksaiselle näytteelle 37,7 MPa, joka on hyvin lähellä mitattua arvoa [25 s. 328]. Mittaustuloksista ja vertailuarvoista voidaan päätellä, että vetolujuuden yksiselitteinen määritys on hyvin hankalaa ja se riippuu voimakkaasti koekappaleen mahdollisista rakenteellisista epätäydellisyyksistä, joiden esiintymisen todennäköisyys kasvaa koekappaleen koon kasvaessa.

Kimmokertoimen arvoja ei yleensä eritellä erikseen puristukselle ja vedolle. FPL:n puuoppaan mukaan kimmokertoimet määritellään yleensä puristuskokeilla [14 s. 5-2]. Tämä on järkevää, sillä puristuskoe on huomattavasti helpompi suorittaa vetokokeeseen verrattuna. Joillakin puulajeilla kimmokerroin on kuitenkin erilainen vedossa ja puristuksessa [19 s. 166]. Taulukkoihin 1 ja 5 koottujen mittaustulosten perusteella erot ovat kuitenkin pieniä mäntypuulla.



Kuva 16. *Pääsääntöiset murtumiskuviot syiden suuntaisissa vetokokeissa*

Kaikki tulosten analysoinnissa käytetyistä koekappaleista murtuivat kavennuksen kohdalta. Kolmella ylijäämäkappaleella särö muodostui levennyksen kohdalle. Niillä kuormitusnopeus poikkesi aiemmin määritellystä arvosta 1,5 mm/min. Pääsääntöiset murtumiskuviot on esitetty kuvissa 16a ja 16b. Särö eteni aaltoilevasti syiden suuntaisesti ja niiden poikki kuvan 16a mukaisesti. Koekappaleen keskelle muodostui usein myös pitkä leikkaussärö kuvan 16b osoittamalla tavalla. Murtumiskuviot johtuvat puun mikrorakenteen heterogeenisyydestä. Särö etenee heikoimpien kuitujen läpi murtumalla ja kuitujen välisessä välilamellissa leikkautumalla riippuen siitä kumpi on heikompi [19 s. 252–253][30 s. 209].

4.4 Vetokokeet poikittaissuunnassa

Poikittaissuunnan vetokokeita ei saatu suoritettua loppuun vuonna 2020 valinneen Korona-virus epidemian vuoksi. Kokeiden tarkoituksena oli määrittää männyn murtolujuus syihin nähden kohtisuorassa suunnassa. Standardin SFS-EN 408 mukaan kokeet suoritetaan suorakulmaisen särmiön muotoisilla koekappaleilla. Koekappaleiden poikkileikkausmitat ovat 45 mm ja 70 mm. Koekappaleen korkeus kuormitussuunnassa on 180 mm. Koekappaleiden pienten dimensioiden vuoksi syiden suuntaisten vetokokeiden kaltaista kiinnitystä ei voida käyttää. Sen sijaan koekappaleet liimataan kiinni teräs- tai puulevyihin, joita vedetään murtoon asti. Murtolujuus määritetään kuormitusvoiman maksimiarvosta yhtälöiden (42) ja (49) mukaisesti. Kuva koekappaleista ja koejärjestelystä on esitetty liitteessä B. [55 s. 23–27].

Sopivan liiman valinta aiheutti kokeissa ongelmia. Ensimmäiset kokeet suoritettiin teräslevyjen avulla ja liimana käytettiin standardin mukaisesti epoksia [55 s. 37]. Kappaleita vedettiin hydrauliavusteisesti siten, että toinen pääty kiinnitettiin pulteilla jäykkään alustaan. Liiman vahvuus ei kuitenkaan ollut riittävä ja koekappaleet murtuivat liimasauman kohdalta. Liimasaumaa pyrittiin vahvistamaan ruuvaamalla teräslevyjen pinnalle vanerilevyt puu-puu kontaktin mahdollistamiseksi. Tällaista kontaktia varten hankittiin erikoisvahvaa puuliimaa. Kyseinen liima oli nimeltään Titebond Original ja sen vetolujuus vaahterakontaktissa oli valmistajan mukaan noin 25 MPa. Männyn murtolujuus on noin 3 MPa, joten liiman lujuuden pitäisi olla riittävä [43, 57][61 s. 164]. Puuliimalla vahvistettua liitosta ei kuitenkaan ehditty testaamaan.

4.5 Leikkauskokeet

Leikkauskokeissa määritettiin puun leikkausmoduuli syiden suunnassa (G_L). Standardissa SFS-EN 408 on esitetty kaksi menetelmää leikkauskokeiden suorittamiseksi, jotka ovat vääntö- ja taivutuskoe [55]. Vääntökokeeseen tarvittavaa välineistöä ei ollut saatavilla, minkä vuoksi leikkausmoduuli määritettiin taivutuskokeella. Koekappaleet olivat poikkileikkaukseltaan suorakulmaisia palkkeja. Palkkien sivun mitat olivat noin 47 mm ja 195 mm. Palkit asetettiin kyljelleen kahden tuen päälle ja niitä taivutettiin kahdella hydraulipuristimella, jotka sijaitsivat symmetrisesti palkin keskiosassa. Puristimien väliset etäisyydet ja tukien jännevälit olivat standardin mukaisesti noin 1,2 m ja 3,6 m [55 s. 17]. Koekappaleet kiinnitettiin molemmista päistään ja keskeltä haarukkatuilla kiepahduksen estämiseksi. Lisäksi koekappaleiden molempiin päätyihin kiinnitettiin ristiin kaksi mittakelloa päävenymien mittaamiseksi. Koekappaleita painettiin yhtä suurilla voimilla murtoon asti. Kuva koelaitteistosta ja mittakellojen sijainnista on esitetty liitteessä C.

Leikkausmoduuli määritettiin standardissa SFS-EN 408 ilmoitetulla kaavalla

$$G_L = \alpha \frac{h_0}{A} \frac{\Delta V_s}{\Delta \mathrm{w}_{avg}} = \alpha \frac{h_0}{A} k_s, \tag{50}$$

jossa h_0 on mittakellon pituus, ΔV_s leikkausvoiman muutos ja Δw_{avg} diagonaalisesti asetettujen mittakellojen keskimääräisen siirtymän muutos. Suure k_s on leikkausvoima-deformaatio -kuvaajan kulmakerroin. Keskimääräinen siirtymä lasketaan kaavalla

$$w_{avg} = \frac{|w_1| + |w_2|}{2}, \tag{51}$$

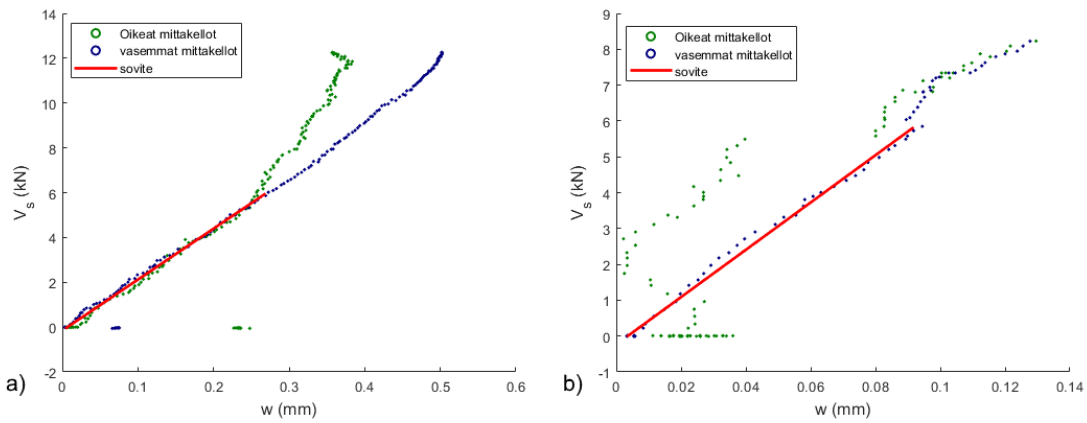
jossa w_1 ja w_2 ovat ristiin kiinnitetyillä mittakelloilla 1 ja 2 mitatut siirtymät. Koska mittakelloja on yhteensä neljä, suure w_{avg} on määritelty erikseen palkin molemmille päädyille. Kerroin α määritellään kaavalla

$$\alpha = \frac{3}{2} - \frac{{h_0}^2}{4h^2}, \tag{52}$$

jossa h on palkin korkeus (noin 195 mm). [55 s. 19]

Kaavan (50) mukaisessa leikkausmoduulin määrittelyssä tehdään oletus, että koekappaleen poikkileikkauksessa vaikuttava jännitystila on puhdas leikkaustila. Tämä ei kuitenkaan pidä täysin paikkaansa, sillä taivutuksesta aiheutuu myös normaalijännitystä. Normaalijännitys on kuitenkin pieni koekappaleiden päädyissä sijaitsevien mittakellojen kohdalla. Lisäksi leikkausjännitys ei ole vakio poikkileikkauksessa vaan se noudattaa paraabelimaista jakaumaa. Leikkausjännitys on suurimmillaan poikkileikkauksen keskellä ja nolla poikkileikkauksen reunoilla. Kaavassa (50) leikkausjännitysjakauman vaikutus leikkausmoduulin määrittelyssä on ilmeisesti yritetty ottaa huomioon kertoimen α avulla. Tätä ei kuitenkaan ole vahvistettu standardissa.

Tyypillistä mittausdataa on havainnollistettu kuvissa 17a ja 17b, jossa leikkausvoima V_s on esitetty mittakellojen keskimääräisen deformaation w_{avg} funktiona. Työläiden koejärjestelyjen vuoksi mittauksia tehtiin vain kolme. Kahdessa kokeista mittausdata molemmissa päädyissä asettui lähes samalle suoralle kuvan 17a mukaisesti. Vaurion edetessä datapisteet lopulta erkaantuivat toisistaan. Kaavassa (50) esiintyvä kulmakerroin k_s määritettiin tällöin molempien päätyjen keskiarvoistetusta mittausdatasta lineaarisen regression avulla. Yhden koekappaleen kohdalla oikeasta päädystä ei mitattu järkeviä tuloksia. Leikkausmoduuli määritettiin tällöin pelkästään vasemman päädyn mittausdatasta kuvan 17b mukaisesti.



Kuva 17. *Kulmakertoimen k_s määritys lineaarisen regression avulla kokeellisesti määritetyistä leikkausvoima-deformaatio -kuvaajista. Kahdessa mittauksista molemmista päädyistä mitattu data asettui samalle suoralle (a). Kolmannessa mittauksessa vain vasemmasta päädystä saatiin järkeviä tuloksia (b).*

Kosteuspitoisuus, mittauksista määritettyjen leikkausmoduulien keskiarvo ja leikkausmoduulien hajonta on esitetty taulukossa 7. Koekappaleiden suuren koon vuoksi kosteuspitoisuus määritettiin sahaamalla testatusta koekappaleesta näyte, jonka avulla määritettiin märkä- ja kuivamassat. Kosteuspitoisuus voitiin tällöin määrittää yhtälön (46) avulla ja sen keskiarvo oli noin 12,5%. Leikkausmoduulin keskiarvoksi mitattiin 1,12 GPa ja hajonnaksi 0,56 GPa. Hajonta on melko suurta. Tähän vaikutti olennaisesti mittausten vähäinen lukumäärä. Kuvasta (17) voidaan kuitenkin havaita, että sovitteiden korrelaatio mittausdataan yksittäisissä kokeissa on erittäin hyvä. Näin ollen koejärjestelyt on suoritettu onnistuneesti ja erot mitattujen leikkausmoduulien välillä johtuvat koekappaleiden välisistä eroista, kuten oksaisuudesta.

Taulukko 7. *Koekappaleiden kosteuspitoisuus ja mitattujen leikkausmoduulien keskiarvo. Hajonta on merkitty suluissa.*

Mittausten lkm.	Kosteus (%)	G_L (GPa)
3	12,5	1,12 (0,56)

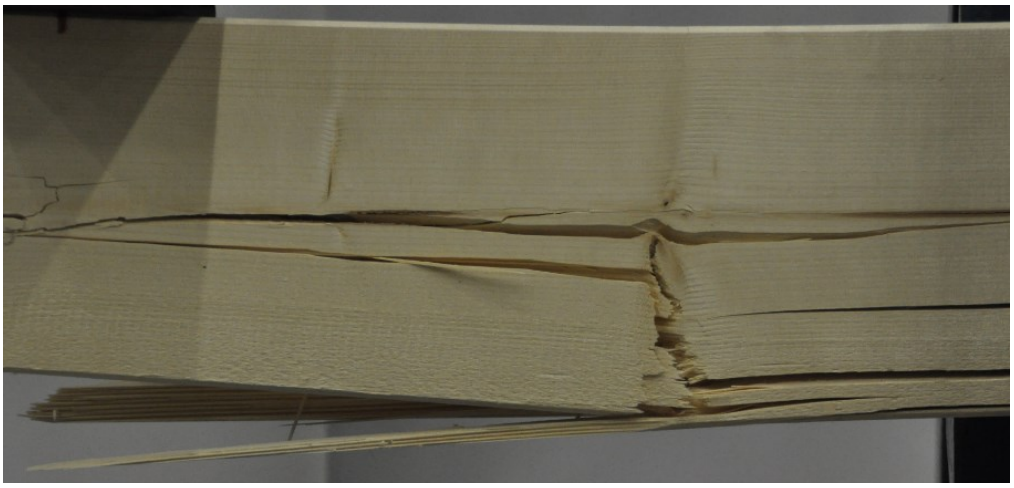
Kirjallisuudessa leikkausmoduulin arvot on usein eritelty LR-, LT- ja RT- tasoille. Vuosirenkaiden kaareutuvuuden vuoksi mittauksissa käytettyjen palkkien leikkaustasoa ei voida määrittää puhtaaksi LR- tai LT-tasoksi vaan se on jotakin niiden väliltä. Taulukkoon 8 on koottu muissa lähteissä esitettyjä ortotrooppisen materiaalin leikkausmoduulien G_{12} ja G_{13} arvoja. Osoittautuu, että leikkausmoduuli G_{12} on suurempi kuin G_{13}. FPL:n puuoppaassa on ilmoitettu usean mäntylajin leikkausmoduulit ja niiden ääriarvot on esitetty taulukossa 8 [14]. Ne eivät kuitenkaan kuvasta leikkausmoduulien vaihtelua yksittäisissä puulajeissa. Kossakowskin ilmoittamia arvoja lukuun ottamatta mittaustulosten keskiarvo

näyttäisi olevan järkevää suuruusluokkaa. Lisämittausten tekeminen olisi ollut kuitenkin suotavaa tarkempien tulosten saavuttamiseksi.

Taulukko 8. *Männyn leikkausmoduuleille esitettyjä vertailuarvoja LR- ja LT-tasoilla (G_{12} ja G_{13}). [13 s. 82][14 s. 5-2][25 s. 294][26 s. 745]*

	G_L (GPa)
Dinwoodie	$0{,}68 - 1{,}16$
FPL	$0{,}47 - 1{,}35$
Kollmann et al.	$0{,}67 - 1{,}75$
Kossakowski	$0{,}26 - 0{,}35$

Koekappaleiden tyypillistä murtopintaa on havainnollistettu kuvassa 18. Koekappaleet murtuivat hauraasti palkin alaosasta. Tämä johtui todennäköisesti siitä, että palkin alapintaan muodostui vetojännitystila teknisen taivutusteorian mukaisesti. Särö eteni vaihtelevasti syiden suuntaisesti ja niiden poikki samankaltaisesti kuin syiden suuntaisessa vetokokeessa.



Kuva 18. *Tyypillinen murtopinta taivutuskokeissa*

5. MÄNTYPUUN POIKITTAISISOTROOPPINEN MATERIAALIMALLI

Työn tarkoituksena on kehittää materiaalimalli männystä valmistetulle rakennepuulle. Tässä luvussa määritetään männyn elastista käyttäytymistä kuvaava materiaaliyhtälö sekä siinä käytettävät elastiset vakiot edellisessä luvussa dokumentoitujen lujuuskokeiden pohjalta. Tämän lisäksi työssä pyritään mallintamaan puun epälineaarisen käyttäytymisen alkamista sopivalla vauriokriteerillä.

Puuta mallinnetaan poikittaisisotrooppisena materiaalina. Ajatuksena on, että syitä mallinnetaan kuituvahvisteina ja niitä yhdessä pitävää materiaalia isotrooppisena matriisina. Puun elastiselle käyttäytymiselle sovelletaan lineaarielastista materiaaliyhtälöä (2). Tällöin yhtälön (6) mukainen elastinen komplianssimatriisi voidaan esittää muodossa:

$$C^e = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_\mathrm{L}} & -\frac{\nu_\mathrm{L}}{E_\mathrm{L}} & -\frac{\nu_\mathrm{L}}{E_\mathrm{L}} & & & \\ -\frac{\nu_\mathrm{L}}{E_\mathrm{L}} & \frac{1}{E_\mathrm{T}} & -\frac{\nu_\mathrm{T}}{E_\mathrm{T}} & & 0 & \\ -\frac{\nu_\mathrm{L}}{E_\mathrm{L}} & -\frac{\nu_\mathrm{T}}{E_\mathrm{T}} & \frac{1}{E_\mathrm{T}} & & & \\ & & & \frac{1}{G_\mathrm{L}} & & \\ & 0 & & & \frac{1}{G_\mathrm{L}} & \\ & & & & & \frac{1}{G_\mathrm{T}} \end{bmatrix}. \tag{53}$$

Taulukoissa 2, 4 ja 8 esitetyistä vertailuarvoista voidaan havaita, että poikittaisisotrooppinen oletus puulle ei ole tarkasti voimassa. Esimerkiksi kimmomoduulit R- ja T-suunnissa sekä leikkausmoduulit LR- ja LT-tasoilla ovat erisuuret. Tyypillisesti jäykkyys R-suunnassa on suurempi kuin T-suunnassa. Syysuuntaan verrattuna erot ovat kuitenkin hyvin pieniä. Yhtälössä (53) R- ja T-suunnan kimmomoduuleja on merkitty suureella E_T. Vastaavasti leikkausmoduuli LR-tasolla on suurempi kuin LT-tasolla mutta yhtälössä (53) molempia merkitään suureella G_L. Vastaavanlaista vaihtelua on havaittavissa myös ortotrooppisissa Poissonin vakioissa. Taulukon 4 yhteydessä todettiin, että suure ν_{23} on hieman suurempi arvoon ν_{32} verrattuna mutta yhtälössä (53) molempia merkitään suureella ν_T. Taulukon 2 yhteydessä todettiin, että selkeää trendiä suureiden ν_{12} ja ν_{13} välillä ei ole havaittavissa ja erot ovat puulajikohtaisia. Näitä suureita on merkitty yhtälössä (53) suureilla ν_L.

Männylle valitut elastiset vakiot on koottu taulukoon 9. Valinnoissa käytettiin lujuuskokeissa mitattuja arvoja. Lopullinen syiden suuntainen kimmomoduuli E_L valittiin taulukoissa 1 ja 5 esitettyjen puristus- ja vetokokeiden keskimääräisten kimmomoduulien keskiarvosta. Puristusnopeuksilla 4, 7 ja 9,99 mm/min esitettyjä arvoja ei otettu huomioon vähäisen mittausdatan vuoksi.

Taulukko 9. *Männyn elastiset vakiot. Tulokset on määritelty luvussa 4 dokumentoitujen lujuuskokeiden pohjalta. Poikkeuksena Poissonin vakio ν_T, joka määritettiin taulukossa 4 esitettyjen vertailuarvojen avulla. Suure G_T laskettiin yhtälöstä (10) ja sen arvoksi saatiin 0,035 GPa.*

E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_L (GPa)	ν_L	ν_T
10	0,10	1,1	0,29	0,43

Suureet ν_L, E_T ja G_L valittiin taulukoihin 1, 3 ja 7 kootuista keskiarvoista. Suureen E_T mitattu keskiarvo todettiin taulukon 4 yhteydessä vertailuarvoja pienemmäksi. Mittausten hajonta oli hyvin pientä, mikä viittaa eroihin tässä työssä ja vertailuarvojen määrittelyssä käytettyjen koekappaleiden välillä. Eroja saattoi aiheuttaa koekappaleiden vuosirengasrakenne. Koekappaleita, joilla vuosirengasrakenteen kaareutuvuus on erilaista, tulisi testata vuosirengasrakenteen vaikutuksen selvittämiseksi.

Suuretta ν_T ei voitu mitata ja mittauksissa esiintyneitä ongelmia on kuvattu luvussa 4.2. Tämän vuoksi sen arvoksi valittiin taulukkoon 4 listatuista vertailuarvoista laskettu keskiarvo, joka oli noin 0,43. Saatu arvo on kuitenkin melko paljon suurempi mitattuun arvoon ν_L verrattuna. Käyttämällä suureen ν_L määrittelyssä taulukossa 2 esitettyjä vertailuarvojen keskiarvoa, tulokseksi saadaan $0{,}41$. Tämän perusteella näyttäisi siltä, että merkittävää vaihtelua suureiden ν_L ja ν_T välillä ei ole. Näin ollen lisämittauksia tulee tehdä esimerkiksi luvussa 4.2 esitetyllä tavalla arvon ν_T selvittämiseksi.

Isotropiatason leikkausmoduuli G_T laskettiin yhtälöstä (10), joka on voimassa poikittaisisotrooppisille materiaaleille ja sen arvoksi saatiin 0,035 GPa. Muissa lähteissä se on kuitenkin suurempi. Dinwoodien ja Kollmann et al. teoksissa leikkausmoduuli G_T on lähes kaksinkertainen [13 s. 82][25 s. 294]. Toisaalta mahdolliset epätarkkuudet arvoissa E_T ja ν_T vaikuttavat merkittävästi leikkausmoduulin G_T lopulliseen arvoon.

Männylle valitut lujuusarvot on esitetty taulukossa 10. Lujuusarvoja tarvitaan erityisesti vauriokriteerin määrittelyssä. Valinnat on tehty pääsääntöisesti luvussa 4 dokumentoitujen lujuuskokeiden pohjalta. Syy- ja poikittaissuuntaiset lujuusarvot on määritetty mittaustulosten keskiarvoista, jotka on esitetty taulukoissa 1, 3 ja 5. Syiden suuntaisessa puristuslujuuden määrittelyssä on otettu huomioon ainoastaan kuormitusnopeudella 0,8

mm/min suoritetut kokeet johtuen mittausdatan niukkuudesta suuremmilla puristusnopeuksilla.

Taulukko 10. *Männyn lujuusarvot. Osa lujuusarvoista on valittu luvussa 4 dokumentoitujen lujuuskokeiden pohjalta. Leikkauslujuudet (f_{s0} ja f_{s90}) ja poikittaissuunnan vetolujuus (f_{t90}) on määritelty muista lähteistä [13 s. 110–111][14 s. 5-15][43][57][61 s. 164].*

f_{c0} (MPa)	f_{c90} (MPa)	f_{t0} (MPa)	f_{t90} (MPa)	f_{s0} (MPa)	f_{s90} (MPa)
37,5	2,44	40,1	2,9	10,6	2,5

Poikittaissuuntaisissa puristuskokeissa mittaustulosten hajonta oli pientä. Tulosten käsittelyn yhteydessä kuitenkin todettiin, että lujuusarvo voi riippua jonkin verran koekappaleen vuosirengasrakenteesta. Lisäksi vertailuarvoja on esitetty niukasti. Voidaan kuitenkin todeta, että poikittaissuunnan puristuslujuus on pieni syysuuntaan verrattuna.

Mitatuissa syiden suuntaisissa vetolujuuksissa esiintyi eniten hajontaa. Lisäksi oksien läsnäololla todettiin olevan erittäin suuri vaikutus vetolujuuteen. Pienessä, oksattomassa ja syyvirheettömässä koekappaleessa vetolujuus voi olla yli kaksinkertainen kokeellisesti mitattuun arvoon verrattuna. Lopulliseksi lujuusarvoksi valittiin taulukossa 5 esitetty vetokokeiden keskiarvo, joka on määritelty luonnollisia kasvuvirheitä sisältävälle rakennepuulle.

Syihin nähden poikittaissuuntaista vetolujuutta f_{t90} ei ehditty määrittämään lainkaan. Tämän vuoksi lopulliseksi arvoksi on valittu eri lähteissä ilmoitettujen lujuusarvojen keskiarvo 2,9 MPa [43, 57][61 s. 164]. Merkittävää hajontaa lähteiden ilmoittamien arvojen välillä ei ole havaittavissa ja lisäksi ne ovat pieniä syysuuntaan verrattuna, minkä vuoksi valittu arvo lienee riittävän lähellä todellista arvoa.

Vauriokriteerin kehittämisen yhteydessä todettiin, että syy- ja poikittaissuuntaisten lujuusarvojen lisäksi tarvitaan tietoa leikkauslujuuksissa syytasoilla (f_{s0}) sekä isotropiatasolla (f_{s90}). Kokeita näiden määrittämiseksi ei ole tehty, minkä vuoksi niiden valinnassa käytettiin muita lähteitä. Syytason leikkauslujuudelle (LR ja LT) löytyi melko hyvin vertailuarvoja muista lähteistä ja niiden vaihtelu oli melko pientä. Näistä arvoista laskettiin keskiarvo, joka oli 10,6 MPa. [13 s. 110–111][43, 57][61 s. 164].

Isotropiatason (RT) leikkauslujuudesta on hyvin niukasti tietoa muissa lähteissä ja puun on esitetty vaurioituvan ns. ’’rolling shear’’ mekanismilla ennen varsinaista leikkausta [61 s. 169]. FPL:n puuoppaan mukaan lujuus ”rolling shear” vauriolle on noin 18–28% syytasojen leikkauslujuudesta [14 s. 5-15]. Tämän vuoksi isotropiatason leikkauslujuudeksi valittiin 2,5 MPa, joka vastaa noin 24% syytason leikkauslujuudesta. Leikkausvauriot isotropiatasolla vaikuttaisivat olevan melko harvinaisia ja ne ovat merkityksellisiä lähinnä

puusta valmistetuissa CLT-komposiiteissa [49 s. 91]. Leikkauslujuuden valinnan taustatekijöihin palataan vielä myöhemmin.

Poikittaisisotrooppinen materiaali voidaan luokitella ns. hyperelastiseksi materiaaliksi. Hyperelastisille materiaaleille oletetaan, että on olemassa skalaarinen venymäenergiafunktio (strain energy) ψ tai komplementaarinen venymäenergiafunktio (complementary strain energy) ψ^*, joiden avulla materiaaliyhtälö voidaan lausua. Tällöin voidaan kirjoittaa

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \dfrac{\partial \psi}{\partial \varepsilon_{ij}} \\ \varepsilon_{ij} = \dfrac{\partial \psi^*}{\partial \sigma_{ij}} \end{cases} \tag{54}$$

[48 s. 165]. Venymäenergia on ns. objektiivinen funktio, mikä tarkoittaa sitä, että se on tarkastelukoordinaatistosta riippumaton. Tämä voidaan osoittaa matemaattisesti tai perustella yksinkertaisella ajatuskokeella. Koordinaatiston muuttaminen tarkasteltavan kappaleen ympärillä on ekvivalenttia jäykän kappaleen liikkeen kanssa. Jäykän liikkeen alaisena kappale ei deformoidu ja venymäenergia pysyy vakiona. Näin ollen venymäenergia on riippumaton siitä, miten tarkastelukoordinaatisto valitaan. Jännityskomponentit yhtälössä (54) eivät ole koordinaatistosta riippumattomia. Tämän vuoksi venymäenergiat esitetään jännitys- tai venymäinvarianttien avulla. Invariantit ovat skalaarisuureita, jotka eivät riipu käytetystä koordinaatistosta.

Poikittaisisotrooppisen materiaalin komplementaarinen venymäenergiafunktio riippuu viidestä jännitysinvariantista I_1–I_5, jotka määräävät täysin mielivaltaisen jännitystilan. Komplementaarinen venymäenergiafunktio voidaan tällöin lausua muodossa

$$\psi^* = \psi^*(\boldsymbol{\sigma}, \boldsymbol{M}) = \psi^*(I_1, I_2, I_3, I_4, I_5), \tag{55}$$

jossa $\boldsymbol{M}$ on 2. kertaluvun rakennetensori, jonka avulla huomioidaan kuitujen suunta materiaalimallissa. Se voidaan lausua muodossa

$$\boldsymbol{M} = \overline{m} \otimes \overline{m}, \tag{56}$$

jossa $\overline{m}$ on kuituvahvisteiden suuntainen yksikkövektori. Invariantit I_1–I_5 voidaan esittää monella eri tavalla ja eräs mahdollinen invarianttikanta on

$$\begin{cases} I_1 = tr(\boldsymbol{\sigma}) \\ I_2 = \dfrac{1}{2} tr(\boldsymbol{\sigma}^2) \\ I_3 = \dfrac{1}{3} tr(\boldsymbol{\sigma}^3) \\ I_4 = tr(\boldsymbol{\sigma}\boldsymbol{M}) \\ I_5 = tr(\boldsymbol{\sigma}^2\boldsymbol{M}). \end{cases} \tag{57}$$

Yhtälöiden (54), (55) ja (57) avulla lineaarielastinen materiaalimalli saadaan muotoon

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{\partial \psi^*}{\partial \sigma_{ij}} = \frac{\partial \psi^*}{\partial I_1}\boldsymbol{I} + \frac{\partial \psi^*}{\partial I_2}\boldsymbol{\sigma} + \frac{\partial \psi^*}{\partial I_4}\boldsymbol{M} + \frac{\partial \psi^*}{\partial I_5}(\boldsymbol{\sigma M} + \boldsymbol{M\sigma}). \tag{58}$$

Kun huomioidaan, että yhtälön (58) summatermit voivat riippua vain lineaarisesti jännityksistä, päädytään lopulta yhtälön (53) mukaiseen komplianssimatriisiin. [7 s. 58–63][38 s. 137–138]

Kirjallisuudessa käytetään usein edellä mainittujen jännitysinvarianttien I_i ohella ns. deviaattorisia jännitysinvariantteja [7, 38, 48]. Deviaattorinen jännitys $\boldsymbol{\sigma_s}$ kuvaa puhdasta leikkaustilaa ja se muodostetaan vähentämällä jännitystilasta $\boldsymbol{\sigma}$ hydrostaattisen paineen aiheuttama osuus $\boldsymbol{\sigma_p}$ seuraavasti

$$\boldsymbol{\sigma_s} = \boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\sigma_p} = \boldsymbol{\sigma} - \frac{1}{3}tr(\boldsymbol{\sigma})\boldsymbol{I} \tag{59}$$

[48 s. 51–52]. Jännitysinvarianttien I_1–I_5 avulla voidaan muodostaa deviaattoriset invariantit J_1–J_5, jotka kuvaavat mielivaltaista deviaattorista jännitystilaa. Deviaattoriset jännitysinvariantit voidaan esittää jännitysinvarianttien tavoin muodossa

$$\begin{cases} J_1 = tr(\boldsymbol{\sigma_s}) = 0 \\ J_2 = \frac{1}{2}tr(\boldsymbol{\sigma_s}^2) \\ J_3 = \frac{1}{3}tr(\boldsymbol{\sigma_s}^3) \\ J_4 = tr(\boldsymbol{\sigma_s M}) \\ J_5 = tr(\boldsymbol{\sigma_s}^2\boldsymbol{M}). \end{cases} \tag{60}$$

Yhtälö (55) voidaan tällöin esittää deviaattoristen invarianttien avulla esimerkiksi muodossa

$$\psi^* = \psi^*(I_1, J_2, J_3, I_4, J_5), \tag{61}$$

sillä invariantit J_2, J_3 ja J_5 riippuvat invarianteista I_2, I_3 ja I_5.

Venymäenergia ψ ja komplementaarinen venymäenergia ψ^* ovat positiivisia suureita jännitystilan ollessa erisuuri kuin nolla. Tästä seuraa, että elastisen jäykkyys- ja komplianssimatriisin on oltava positiividefiniitti [37 s. 34][38 s. 75]. Yhtälön (53) mukainen komplianssimatriisi on positiividefiniitti jos sen kaikki alideterminantit ovat positiivisia. Tällöin poikittaisisotrooppiselle materiaalimallille voidaan muotoilla ehdot

$$\begin{cases} E_L > 0 \\ E_T > 0 \\ G_L > 0 \\ -\sqrt{\frac{E_L}{E_T}} < \nu_L < \sqrt{\frac{E_L}{E_T}} \\ -\sqrt{\frac{E_L(1-\nu_T)}{2E_T}} < \nu_L < \sqrt{\frac{E_L(1-\nu_T)}{2E_T}} \\ -1 < \nu_T < 1. \end{cases} \tag{62}$$

Taulukkoon 9 kootut elastiset vakiot toteuttavat yhtälöryhmän (62). Näin ollen voidaan todeta, että männylle kokeellisesti määritelty elastinen materiaalimalli toteuttaa venymäenergialle asetetut termodynaamiset rajoitteet.

Puun epälineaarisen käyttäytymisen kuvaamiseen sovelletaan luvussa 3.1 käsiteltyä plastisuusteoriaa, jolloin vauriokriteeriä kuvaa myötöehto. Myötöehdon yhtälö riippuu jännitystilasta ja sen tulee olla komplementaarisen venymäenergian tavoin invariantti suure. Koska poikittaisisotrooppisen materiaalin mielivaltainen jännitystila voidaan esittää jännitysinvarianttien avulla, myös myötöehto on jännitysinvarianteista riippuva suure. Tämän tiedon perusteella määriteltiin yhtälö, joka pääjännitystilassa muodostaa ellipsoidimaisen suljetun pinnan. Lisäksi määritetty myötöehto sievenee von Misesin myötöehtoon lujuusarvojen ollessa yhtä suuret vedossa ja puristuksessa kaikissa materiaalisuunnissa. Leikkauslujuudet ovat tällöin von Misesin myötöehdon mukaisesti $f_{t0}/\sqrt{3}$. Myötöehdon kehitti Tampereen yliopiston teknillisen mekaniikan professori Reijo Kouhia ja se voidaan esittää muodossa

$$f^p = \sqrt{3J_2 + c_1 J_5 + c_2(I_4 + c_4)^2 + c_3(I_1 - I_4 + c_5)^2} - c_6 = 0. \tag{63}$$

Yhtälössä (63) esiintyvät materiaaliparametrit c_1, c_2, c_3, c_4, c_5 ja c_6 voidaan määrittää yksiaksiaalisten puristus- ja vetotilojen sekä puhtaiden leikkaustilojen avulla soveltamalla taulukossa 10 esitettyjä lujuusarvoja. Kun kuituvahvisteille valitaan suunta

$$\bar{m} = [1\ 0\ 0]^T, \tag{64}$$

Saadaan materiaaliparametreiksi

$$
\begin{cases}
c_1 = 3\left[\left(\frac{f_{s90}}{f_{s0}}\right)^2 - 1\right] \\
c_2 = 3\frac{{f_{s90}}^2}{f_{c0}f_{t0}} - \frac{4}{3}\left(\frac{f_{s90}}{f_{s0}}\right)^2 + \frac{1}{3} \\
c_3 = 3\frac{{f_{s90}}^2}{f_{c90}f_{t90}} - \frac{1}{3}\left(\frac{f_{s90}}{f_{s0}}\right)^2 - \frac{2}{3} \\
c_4 = \dfrac{\frac{1}{2}(f_{c0} - f_{t0})}{1 - \frac{4f_{c0}f_{t0}}{9{f_{s0}}^2} + \frac{f_{c0}f_{t0}}{9{f_{s90}}^2}} \\
c_5 = \dfrac{\frac{1}{2}(f_{c90} - f_{t90})}{1 - \frac{f_{c90}f_{t90}}{9{f_{s0}}^2} - \frac{2f_{c90}f_{t90}}{9{f_{s90}}^2}} \\
{c_6}^2 = \frac{3{f_{s90}}^2}{4}\left[4 + \dfrac{(f_{c0} - f_{t0})^2}{f_{c0}f_{t0}\left(1 - \frac{4f_{c0}f_{t0}}{9{f_{s0}}^2} + \frac{f_{c0}f_{t0}}{9{f_{s90}}^2}\right)} + \dfrac{(f_{c90} - f_{t90})^2}{f_{c90}f_{t90}\left(1 - \frac{f_{c90}f_{t90}}{9{f_{s0}}^2} - \frac{2f_{c90}f_{t90}}{9{f_{s90}}^2}\right)}\right]
\end{cases}
\tag{65}
$$

Myötöehdon (63) mukainen myötöpinta on esitetty kuvassa 19a pääjännitystilassa. Osoittautuu, että pinta on suljettu vain tietyillä lujuusarvoilla. Kriittisin lujuusarvo on isotropiatason leikkauslujuus f_{s90}. Sen ollessa alle 2,5 MPa, pinnasta tulee avoin kuvan 19b mukaisesti. Kyseinen arvo on myös kyseenalaisin kaikista taulukossa 10 esitetyistä arvoista, sillä leikkaus isotropiatasolla on melko harvinaista ja vertailuarvoja kirjallisuudesta löytyy niukasti. FPL:n oppaassa mainittu minimiarvo 18% syytasojen leikkauslujuudesta ei johda suljettuun pintaan taulukkoon 10 kootuilla lujuusarvoilla. Pienimmillään se voi olla noin 24%. Tämä arvo asettuu kuitenkin FPL:n esittämälle vaihteluvälille [14 s. 5-15]. Ensimmäiset kehitelmät myötöehdolle sisälsivät vain neljä materiaaliparametria, jotka olivat luvussa 4 selvitetyt syy- ja poikittaissuunnan lujuusarvot. Osoittautui kuitenkin, että neljä materiaaliparametria ei riittänyt suljetun pinnan muodostamiseen.

Myötöpinnan sulkeutumista voidaan tarkastella pääjännitystilassa pääjännitysten σ_1, σ_2 ja σ_3 avulla. Myötöehto (63) voidaan tällöin esittää matriisimuodossa seuraavasti:

$$
f^p = \begin{pmatrix} \sigma_1 - b_1 \\ \sigma_2 - b_2 \\ \sigma_3 - b_3 \end{pmatrix}^T \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 - b_1 \\ \sigma_2 - b_2 \\ \sigma_3 - b_3 \end{pmatrix} + vakiotermit = 0, \tag{66}
$$

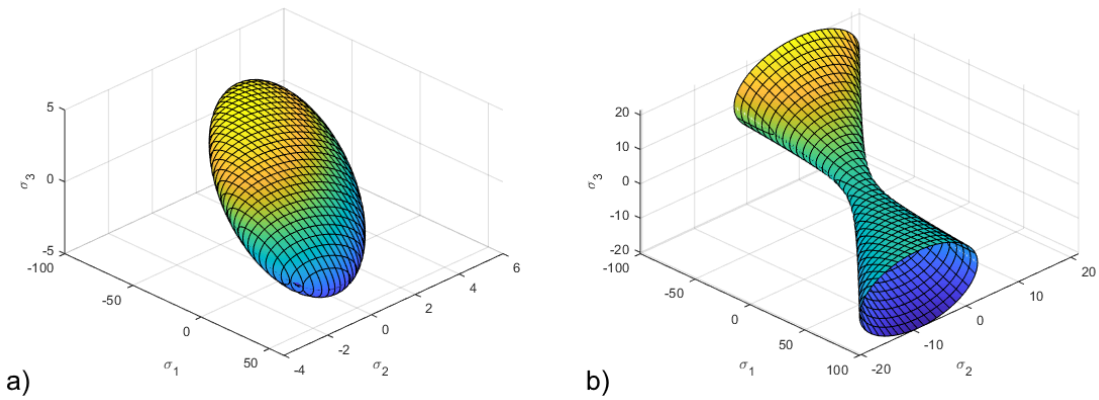
jossa termit b_1, b_2 ja b_3 ovat vakioita. Myötöpinta on suljettu, kun matriisi

$$
\boldsymbol{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{13} & a_{23} & a_{33} \end{bmatrix} \tag{67}
$$

on positiividefiniitti. Matriisin $\boldsymbol{A}$ alkioille voidaan johtaa lausekkeet

$$\begin{cases} a_{11} = 1 + \frac{4}{9}c_1 + c_2 \\ a_{22} = a_{33} = 1 + \frac{1}{9}c_1 + c_3 \\ a_{12} = a_{13} = -\frac{1}{2}\left(1 + \frac{4}{9}c_1\right) \\ a_{23} = -\frac{1}{2}\left(1 - \frac{2}{9}c_1 - 2c_3\right). \end{cases} \tag{68}$$

Matriisi $\boldsymbol{A}$ positiividefiniitti, kun sen kaikki alideterminantit ovat positiivisia. Laskemalla alideterminantit voidaan selvittää, onko pinta suljettu valituilla lujuusarvoilla. Kuvan 19a tapauksessa kaikki alideterminantit ovat positiivisia ja pinta on suljettu. Kuvan 19b lujuusarvoilla osa alideterminanteista on negatiivisia ja pinta on avoin.



Kuva 19. *Yhtälön (63) mukainen myötöpinta pääjännitystilassa poikittaissuuntaisen leikkauslujuuden f_{s90} ollessa 2,5 MPa (a) ja FPL:n oppaan ilmoittamassa minimissä 1,9 MPa (b).*

Työn rajaamiseksi materiaalimallin kehitys on päätetty myötöehtoon. Lisätutkimuksia tehdään kuitenkin parhaillaan mallin kehittämiseksi. Tähän asti esitetyssä materiaalimallissa puun epälineaarisen käyttäytymisen alkamista pyritään ennustamaan yksittäisellä myötöpinnalla. Epälineaarisen osan etenemisen mallintamiseen sovelletaan elastoplastisille malleille ominaista epäassosiatiivista virtaussääntöä (13). Tätä varten on kehitteillä myötöehdosta poikkeava plastinen potentiaalifunktio plastisten venymien ratkaisemiseksi. Kun plastiset venymät on ratkaistu, niitä käytetään veto- ja puristuskäyttäytymisen erottamiseen syiden suunnassa ja poikittaissuunnassa. Näille neljälle vasteelle valitaan omat lujittumis- ja pehmenemisyhtälöt, jotka määräävät miten epälineaarinen osa lähtee etenemään. Suuri haaste mallin kehittämisessä on ymmärtää, miten puristus- ja vetokäyttäytyminen vaikuttavat toisiinsa eri materiaalisuunnissa. Esimerkiksi tietoa siitä, miten puun vetolujuus muuttuu, kun sitä ensin kuormitetaan myötöön asti puristuksessa, ei voida päätellä tähän asti suoritetuista kokeista. Lisäksi moniaksiaalisten kuormitustilojen epälineaarisen osan mallintaminen voi olla hankalaa.

Tässä työssä muodostettu elastinen poikittaisisotrooppinen materiaalimalli (53) voidaan siirtää suoraan FEM-ohjelmistoihin kuten Ansykseen. Epälineaarista käyttäytymistä kuvaavan osan implementoiminen FEM-ohjelmistoihin on kuitenkin tehtävä erillisenä aliohjelmana. Yhtälön (63) mukaisen myötöehdon soveltuvuus puun epälineaarisen käyttäytymisen alkamisen mallintamisessa voidaan varmentaa vasta muun mallin ja aliohjelman valmistuttua. Tällöin mallia voidaan testata luvun 4 mukaisten kuormitustapausten mallintamiseen ja mallinnustuloksia verrata kokeista kerättyyn mittausdataan.

6. YHTEENVETO

Työn alussa tutustuttiin puun anatomiaan, elastisiin ominaisuuksiin ja lujuusominaisuuksiin. Puu todettiin solurakenteeltaan kuituvahvisteiseksi komposiitiksi. Puulajille ominainen solurakenne ja solujen keskenään muodostama kennomainen rakenne todettiin puun mekaanisten ominaisuuksien taustatekijöiksi. Elastisilta ominaisuuksiltaan puun todettiin olevan ortotrooppinen materiaali. Tällöin sillä on kolme materiaalisuuntaa, jossa elastiset ominaisuudet ovat erilaiset. Näitä nimitettiin L-, R- ja T-suunniksi. Erot R- ja T-suunnissa oletetaan kuitenkin usein pieniksi, jolloin puuta mallinnetaan poikittaisisotrooppisena materiaalina. Tällöin mallinnuksen kannalta merkittäviä materiaalisuuntia on kaksi. Puun puristumis- ja vetokäyttäytymisen todettiin olevan hyvin erilaista. Vedossa ja leikkauksessa puu murtuu hauraasti ja puristuksessa se käyttäytyy sitkeästi. Lisäksi syiden suunnalla kuormitussuuntaan nähden on suuri vaikutus. Puu on heikoimmillaan kuorman vaikuttaessa kohtisuorassa syihin nähden ja vahvimmillaan sen vaikuttaessa syiden suunnassa.

Työssä tarkasteltiin olemassa olevia puun materiaalimalleja. Elastoplastiset mallit soveltavat plastisuusteoriaa puun sitkeän puristuskäyttäytymisen mallintamiseksi. Joissain julkaisuissa plastisuusteoriaa on yritetty soveltaa myös hauraan vetokäyttäytymisen mallintamiseen. Hauraan veto- ja leikkauskäyttäytymisen mallintamiseen on esitetty useita menetelmiä ja elastoplastisia malleja sovelletaan usein samanaikaisesti puristusosan mallintamiseen. Hauraskäyttäytymisen kuvaamiseen sovelletut menetelmät on jaettu tässä työssä murtumismekaniikan malleihin, hilamalleihin ja vauriomekaniikan malleihin.

Murtumismekaniikan avulla voidaan mallintaa särön ympäristöön muodostuvia jännityskeskittymiä, jotka vaikuttavat särön kasvuun. Murtumismekaniikan mallit jaettiin LEFM- ja CZM-malleihin. LEFM-mallit edellyttävät toimiakseen olemassa olevan alkeissärön ja lisäksi ne soveltuvat yleensä vain haurasmurtumien mallinnukseen 2D-jännitystiloissa. CZM-malleja voidaan soveltaa ilman tietoa alkusäröstä ja lisäksi niitä on mahdollista yleistää 3D-jännitystiloihin ja sitkeiden murtumien mallintamiseen. Ne tarvitsevat kuitenkin ennakkotietoa särön paikasta, mikä ei aina ole mahdollista. Puulle esitetyt murtumismekaniikan mallit soveltuvat parhaiten syiden suuntaisesti etenevien säröjen mallintamiseen. Tällainen särö muodostuu tyypillisesti taivutetuissa rakenteissa ja syihin nähden kohtisuorasti kuormitetuissa tappiliitoksissa liitosgeometrian ollessa sopiva. Murtumismekaniikkaa voidaan tällöin soveltaa rakenteen kuormankantokyvyn tai voima-siirtymä -kuvaajan mallintamisessa.

Hilamalleissa yksittäisiä rakenneosia, kuten kuitukimppuja, mallinnetaan diskreeteillä elementeillä. Elementit kiinnitetään toisiinsa yhteensopivuusehtojen ja rakenteen reunaehtojen avulla elementtiverkoston muodostamiseksi. Vaurion edetessä yksittäisiä elementtejä poistetaan elementtiverkostosta jonkin niihin liitetyn vauriokriteerin täyttyessä. Laskenta suoritetaan tämän jälkeen uudelleen päivitetyllä elementtiverkostolla. Hilamallien etuna on, että ne kykenevät mallintamaan särön etenemistä hyvin yksityiskohtaisesti. Haittapuolena on pitkät laskenta-ajat. Lisäksi sitkeää puristuskäyttäytymistä ei ole vielä tarkasteltujen lähteiden perusteella onnistuttu implementoimaan. Hilamallien kehitys puun materiaalimallinnuksessa näyttäisi hidastuneen viimeisen kymmenen vuoden aikana.

Vauriomekaniikan malleissa vaurioitunut kappale redusoidaan ehjäksi kontinuumiksi kuvitteelliseksi kappaleeksi. Erikseen määritellyn vauriokriteerin täyttyessä kappaleen vaurioituminen alkaa ja vaurion etenemistä mallinnetaan vaurioparametrien avulla. Vaurioparametrien avulla pienennetään kuvitteellisen kappaleen elastisia ominaisuuksia, kuten kimmomoduuleja, leikkausmoduuleja ja Poissonin vakioita. Elastisten ominaisuuksien pieneminen kuvaa vaurion etenemistä todellisessa kappaleessa. Monet vauriomallit kykenevät mallintamaan samanaikaisesti myös puun sitkeää käyttäytymistä elastoplastisten mallien avulla. Vauriomekaniikan perustuvat mallit eivät kykene mallintamaan särön aukeamista, sillä ne mallintavat rakennetta kontinuumina. Niitä voidaan kuitenkin soveltaa rakenteen voima-siirtymä -vasteen määrittämiseen.

Työssä dokumentoitiin lukuvuoden 2019–2020 aikana suoritettujen puun lujuuskokeiden koejärjestelyt ja analysoitiin kokeista kerättyä mittausdataa. Kokeiden tarkoituksena oli selvittää yleisesti rakennusmateriaalina käytetyn mäntypuun veto- ja puristuslujuudet syiden suunnassa ja niihin nähden kohtisuorassa suunnassa. Lisäksi kokeiden avulla selvitettiin männyn elastiset vakiot, jotka olivat kimmomoduulit syiden suunnassa ja syihin nähden kohtisuorassa suunnassa. Kokeiden avulla määritettiin myös leikkausmoduuli syiden suuntaisella tasolla sekä Poissonin vakio syiden suuntaisessa kuormituksessa. Ajallisten resurssien ja Korona-virus epidemian vuoksi syihin nähden poikittaissuuntaista vetolujuutta ei mitattu lainkaan. Koejärjestely ja -kappaleet ovat kuitenkin valmiina testien suorittamiseksi tilanteen parannuttua. Lisäksi Poissonin vakio syihin nähden poikittaissuuntaisessa kuormituksessa jäi selvittämättä koejärjestelyissä tehtyjen virheiden ja edellä mainittujen ajallisten resurssien vuoksi. Kokeet on kuitenkin helppo suorittaa ja koejärjestelyä on käyty läpi luvussa 4.2. Mittaustuloksissa ilmeni melko paljon eroja lähteistä löytyviin vertailuarvoihin verrattuna. Tulosten perusteella merkittävimmät erot ilmenivät poikittaissuuntaisissa puristuskokeissa. Koekappaleiden vuosirengasrakenteella voi olla merkittävä vaikutus mitattuihin suureisiin, sillä puun mikrorakenteessa

vaikuttava jännitystila riippuu vuosirenkaiden kaareutuvuudesta. Lisäksi syiden suuntaisen vetolujuuden määrittäminen osoittautui ongelmalliseksi puussa ilmenevien luonnollisten kasvuvikojen, kuten oksien ja syyvirheiden vuoksi.

Kokeiden avulla mitattuja elastisia ominaisuuksia käytettiin mäntypuun elastisen poikittaisisotrooppisen materiaalimallin muodostamiseen. Elastinen malli voidaan suoraan siirtää olemassa oleviin FEM-ohjelmistoihin kuten Ansykseen. Muissa lähteissä ilmoitettuja elastisia ominaisuuksia tarkasteltaessa todettiin, että poikittaisisotrooppinen materiaalimalli ei ole tarkasti voimassa. Lisäksi poikittaisisotrooppisen materiaalimallin mukainen isotropiatason leikkausmoduuli todettiin muiden lähteiden ilmoittamia arvoja pienemmäksi. Kokeissa ilmenneiden ongelmien vuoksi Poissonin vakio syihin nähden poikittaissuuntaisessa kuormituksessa jouduttiin määrittämään muista lähteistä. Osoittautui, että lähteiden avulla määritetyn poikittaissuuntaisen kuormituksen Poissonin vakion ja syiden suuntaisessa kuormituksessa mitatun Poissonin vakion välillä oli melko suuri ero, jota lähteiden perusteella ei ole. Tämän vuoksi lisämittauksia Poissonin vakion selvittämiseksi syihin nähden poikittaissuuntaisessa kuormituksessa tulisi tehdä esimerkiksi luvussa 4.2 esitetyllä tavalla.

Elastisen materiaalimallin lisäksi työssä määriteltiin puun epälineaarisen käyttäytymisen alkamista kuvaava myötöehto, jota voidaan soveltaa kehitteillä olevassa poikittaisisotrooppisessa elastoplastisessa materiaalimallissa. Kyseistä mallia ei ole kokonaisuudessaan esitetty tässä työssä ja työ rajattiin myötöehdon ja siinä esiintyvien materiaaliparametrien määrittämiseen. Myötöehdon muodostamiseksi tarvittiin tietoa puun lujuusarvoista, joista osa selvitettiin kokeellisesti. Lopuille arvoille sovellettiin muissa lähteissä esitettyjä arvoja. Isotropiatason leikkauslujuus todettiin ongelmalliseksi suureeksi myötöehdon määrittelyssä ja myötöpinta muuttui avonaiseksi kyseisen lujuusarvon laskiessa riittävän pieneksi. Lopullisen myötöpinnan määrittelyssä käytetty leikkauslujuus oli kuitenkin muiden lähteiden perusteella riittävän suuri ja suljettu myötöpinta saatiin muodostettua. Myötöehdon soveltuvuus epälineaarisen käyttäytymisen alkamisen mallintamiseen on vielä kyseenalaista ja sitä voidaan testata vasta muun mallin valmistuttua. Lisäksi malli on liitettävä FEM-ohjelmistoon ulkoisena aliohjelmana, jonka implementointi on työlästä.

LÄHTEET

[1] Allix O., Feissel P., Thévenet P. A delay damage mesomodel of laminates under dynamic loading: basic aspects and identification issues. Computers and Structures 81 (2003) 1177–1191.

[2] Anderson T.L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. Boca Raton 2017, CRC Press/Taylor & Francis Group. 661 s.

[3] ASTM D 143 – 94. Standard Test Methods for Small Clear Specimens of Timber. West Conshohocken, Pennsylvania 2000, ASTM International. 31 s.

[4] Ballerini M., Rizzi M. Numerical analyses for the prediction of the splitting strength of beams loaded perpendicular-to-grain by dowel-type connections. Materials and Structures 40 (2007) 139–149.

[5] Basta C.T., Gupta R., Leichti R.J., Sinha A. Characterizing perpendicular-to-grain compression (CH) behavior in wood construction. Holzforschung 65(6) (2011) 845–853.

[6] Bathe K. Finite Element Procedures. Upper Saddle River, New Jersey 1996, Prentice-Hall, Inc. 1037 s.

[7] Boehler J.P. Applications of Tensor Functions in Solid Mechanics. Wien 1987, Springer-Verlag. 299 s.

[8] Boström L. Method for determination of the softening behaviour of wood and the applicability of a nonlinear fracture mechanics model. Lund 1992, Division of Building Materials, LTH, Lund University. Väitöskirja. 132 s.

[9] Da Silva A., Kyriakides S. Compressive response and failure of balsa wood. International Journal of Solids and Structures 44 (2007) 8685–8717.

[10] Danielsson H., Gustafsson P.J. A three dimensional plasticity model for perpendicular to grain cohesive fracture in wood. Engineering Fracture Mechanics 98 (2013) 137–152.

[11] Daudeville L., Davenne L., Yasumura M. Prediction of the load carrying capacity of bolted timber joints. Wood Science and Technology 33 (1999) 15–29.

[12] Davids W.G., Landis E.N., Vasic S. Lattice models for the prediction of load-induced failure and damage in wood. Wood and fiber science: journal of the Society of Wood Science and Technology 35(1) (2003) 120–134.

[13] Dinwoodie J.M. Timber, its nature and behavior. New York 1981, Van Nostrand Reinhold Company Ltd. 190 s.

[14] FPL (Forest Products Laboratory). Wood Handbook - Wood as an Engineering Material (Centennial Edition). General Technical Report FPL–GTR–190. Madison, Wisconsin 2010, U.S. Department of Agriculture. 508 s.

[15] Franke B., Quenneville P. Numerical Modeling of the Failure Behavior of Dowel Connections in Wood. Journal of Engineering Mechanics 137(3) (2011) 186–195.

[16] Gharib M., Hassanieh A., Valipour H., Bradford M.A. Three-dimensional constitutive modelling of arbitrarily orientated timber based on continuum damage mechanics. Finite Elements in Analysis and Design 135 (2017) 79–90.

[17] Holmberg S., Persson K., Petersson H. Nonlinear mechanical behaviour and analysis of wood and fibre materials. Computers and Structures 72 (1999) 459–480.

[18] Jalava M. Suomalaisen männyn, kuusen, koivun ja haavan lujuusominaisuuksista. Helsinki 1945, Valtioneuvoston kirjapaino. 66 s.

[19] Kettunen P.O. Wood: Structure and Properties. Uetikon-Zuerich 2006, Trans Tech Publications Ltd. 401 s.

[20] Kharouf N., McClure G., Smith I. Elasto-plastic modeling of wood bolted connections. Computers and Structures 81 (2003) 747–754.

[21] Khelifa M. Numerical analysis of damage evolution of 3D timber-steel hybrid beams in bending. World Conference on Timber Engineering 2016.

[22] Khelifa M., Khennane A. Numerical Analysis of the Cutting Forces in Timber. Journal of Engineering Mechanics 140(3) (2014) 523–530.

[23] Khelifa M., Khennane A., El Ganaoui M., Celzard A. Numerical damage prediction in dowel connections of wooden structures. Materials and Structures 49 (2016) 1829–1840.

[24] Kolari K. Damage mechanics model for brittle failure of transversely isotropic solids. Finite element implementation. Espoo 2007, VTT. Väitöskirja. 202 s.

[25] Kollmann F.F.P, Côté W.A. Principles of Wood Science and Technology. Volume 1: Solid wood. Berlin 1984, Springer-Verlag. 592 s.

[26] Kossakowski P.G., Influence of anisotropy on the energy release rate G(i) for highly orthotropic materials. Journal of Theoretical and Applied Mechanics 45(4) (2007) 739–752.

[27] Krabbenhøft K. Basic computational plasticity. Technical University of Denmark 2002. Opintomoniste. 40 s.

[28] Landis E.N., Vasic S., Davids W.G., Parrod P. Coupled Experiments and Simulations of Microstructural Damage in Wood. Experimental Mechanics 42 (2002) 389–394.

[29] Lemaitre J., Desmorat R. Engineering damage mechanics: Ductile, creep, fatigue and brittle failures. Berlin 2005, Springer-Verlag. 380 s.

[30] Mackenzie-Helnwein P., Eberhardsteiner J., Mang H.A. A multi-surface plasticity model for clear wood and its application to the finite element analysis of structural details. Computational Mechanics 31 (2003) 204–218.

[31] Maimí P., Camanho P.P., Mayugo J.A., Dávila C.G. A continuum damage model for composite laminates: Part 1 - Constitutive model. Mechanics of Materials 39 (2007) 897–908.

[32] Mathworks. Linear Regression. [Viitattu 4.3.2020] Saatavissa: https://www.mathworks.com/help/matlab/data_analysis/linear-regression.html

[33] Matzenmiller A., Lubliner J., Taylor R.L. A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. Mechanics of Materials 20 (1995) 125–152.

[34] Moses D.M., Prion H.G.L. A three-dimensional model for bolted connections in wood. Canadian Journal of Civil Engineering 30(3) (2003) 555–567.

[35] Murakami S. Continuum Damage Mechanics: A Continuum Mechanics Approach to the Analysis of Damage and Fracture. Dordrecht 2012, Springer Science+Business Media. 402 s.

[36] Murray Y.D. Manual for LS-DYNA Wood Material Model 143: Publication No. FHWA-HRT-04-097. McLean, Virginia 2007, U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration.

[37] Obara P. Verification of Orthotropic Model of Wood. Archives of Civil Engineering 64(3) (2018) 31–44.

[38] Ottosen N.S., Ristinmaa M. The Mechanics of Constitutive Modeling. Amsterdam 2005, Elsevier Ltd. 735 s.

[39] Oudjene M., Khelifa M. Elasto-plastic constitutive law for wood behavior under compressive loadings. Construction and Building Materials 23 (2009) 3359–3366.

[40] Pan Z., Ma R., Wang D., Chen A. A review of lattice type model in fracture mechanics: theory, applications, and perspectives. Engineering Fracture Mechanics 190 (2018) 382–409.

[41] Patton-Mallory M., Cramer S.M, Smith F.W., Pellicane P.J. Nonlinear Material Models for Analysis of Bolted Wood Connections. Journal of Structural Engineering 123(8) (1997) 1063–1070.

[42] Puuinfo. Lujaa puuta pohjoiselta havumetsävyöhykkeeltä. [Viitattu 5.3.2020] Saatavissa: https://www.puuinfo.fi/puutieto/puu-materiaalina/lujaa-puuta-pohjoiselta-havumets%C3%A4vy%C3%B6hykkeelt%C3%A4

[43] Puuinfo. Puulajit. [Viitattu 13.3.2020]. Saatavissa: https://www.puuinfo.fi/puutieto/puulajit

[44] Puuinfo. Puurakentamisen asema ja mahdollisuudet Suomessa. [Viitattu 20.3.2020]. Saatavissa: https://www.puuinfo.fi/puutieto/puurakentaminen/puurakentamisen-asema-ja-mahdollisuudet-suomessa

[45] van der Put T.A.C.M. A New Fracture Mechanics Theory of Wood. Extended Second Edition. New York 2017, Nova Science Publishers, Inc. 239 s.

[46] Ramage M.H., Burridge H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D.U., Wu G., Yu L., Fleming P., Densley-Tingley D., Allwood J., Dupree P., Linden P.F., Scherman O. The wood from the trees: The use of timber in construction. Renewable and Sustainable Energy Reviews 68 (2017) 333–359.

[47] Reichert T. Development of 3D lattice models for predicting nonlinear joint behavior. Edinburgh Napier University 2009. Väitöskirja. 317 s.

[48] Salmi T., Virtanen S. Materiaalien mekaniikka. Tampere 2008, Pressus Oy. 413 s.

[49] Sandhaas C. Mechanical behaviour of timber joints with slotted-in steel plates. Zutphen 2012, Wöhrmann Print Service. Väitöskirja. 287 s.

[50] dos Santos C.L., Morais J.J.L., de Jesus A.M.P. Mechanical behaviour of wood T-joints. Experimental and numerical investigation. Frattura ed Integrità Strutturale 31 (2015) 23–37.

[51] Schmidt J., Kaliske M. Models for numerical failure analysis of wooden structures. Engineering Structures 31 (2009) 571–579.

[52] Sedighi-Gilani M., Navi P. Micromechanical approach to wood fracture by three-dimensional mixed lattice-continuum model at fiber level. Wood Science and Technology 41(7) (2007) 619–634.

[53] Serrano E., Gustafsson P.J. Fracture mechanics in timber engineering – Strength analyses of components and joints. Materials and Structures 40 (2006) 87–96.

[54] SFS-EN 384:2016 + A1:2018. Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density. CEN 2018. 18 s.

[55] SFS EN 408:2010+A1. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties. CEN 2012. 38 s.

[56] Sirumbal-Zapata L.F., Málaga-Chuquitaype C., Elghazouli A.Y. A three-dimensional plasticity-damage constitutive model for timber under cyclic loads. Computers and Structures 195 (2018) 47–63.

[57] Swedishwood. Properties of softwood. [Viitattu 5.3.2020] Saatavissa: https://www.swedishwood.com/wood-facts/about-wood/from-log-to-plank/properties-of-softwood/

[58] Swedishwood. Timber Construction Systems. [Viitattu 20.3.2020]. Saatavissa: https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/the-age-of-wooden-high-rises/timber-construction-systems/

[59] Swedishwood. Sustainability. [Viitattu 20.3.2020]. Saatavissa: https://www.swedishwood.com/building-with-wood/construction/the-age-of-wooden-high-rises/sustainability/

[60] Talreja R. Damage mechanics of composite materials. DCAMM Report S 32. Lyngby 1986, The Technical University of Denmark. 43 s.

[61] Tsoumis G. Science and technology of wood: structure, properties, utilization. New York 1991, Van Nostrand Reinhold. 494 s.

[62] Wang M., Song X., Gu X. Three-Dimensional Combined Elastic-Plastic and Damage Model for Nonlinear Analysis of Wood. Journal of Structural Engineering 144(8) (2018)

[63] Wittel F.K., Dill-Langer G., Kröplin B. Modeling of damage evolution in soft-wood perpendicular to grain by means of a discrete element approach. Computational Materials Science 32 (2005) 594–603.

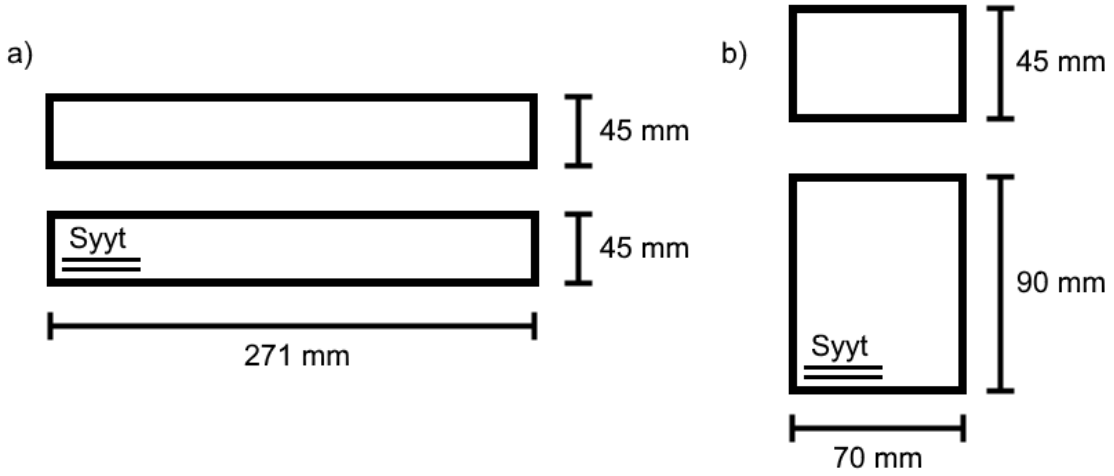
[64] Xu B.H., Bouchaïr A., Taazount M., Racher P. Numerical simulation of embedding strength of glued laminated timber for dowel-type fasteners. Journal of Wood Science 59 (2013) 17–23.

[65] Xu B.H., Taazount M., Bouchaïr A., Racher P. Numerical 3D finite element modelling and experimental tests for dowel-type timber joints. Construction and Building Materials 23 (2009) 3043–3052.

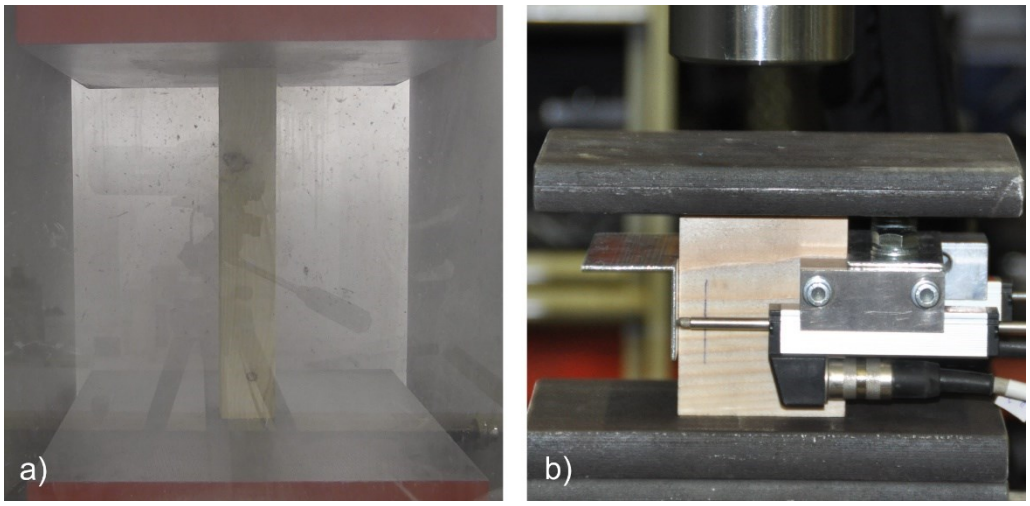
[66] Yasumura M., Daudeville L. Fracture of multiply-bolted joints under lateral force perpendicular to wood grain. Journal of Wood Science 46 (2000) 187–192.

LIITE A: PURISTUSKOKEET

Puristuskokeissa käytettyjen koekappaleiden dimensiot on esitetty kuvassa 20a syysuunnan kokeille ja kuvassa 20b poikittaissuunnan kokeille. Todellisissa mitoissa ilmeni valmistusteknisistä syistä pientä hajontaa. Syiden suuntaisissa puristuskokeissa käytetty koelaitteisto on esitetty kuvassa 21a ja poikittaissuuntaisissa puristuskokeissa käytetty laitteisto kuvassa 21b. Poissonin vakioita yritettiin mitata venymäliuskoilla molemmissa koejärjestelyissä. Poikittaissuunnassa ei kuitenkaan saatu järkeviä tuloksia koekappaleiden voimakkaan muokkautumisen vuoksi (kuva 14). Poissonin vakioita pyrittiin mittaamaan myös kuvassa 21b näkyvillä mittakelloilla mutta laitteiston tarkkuus ei ollut riittävä.



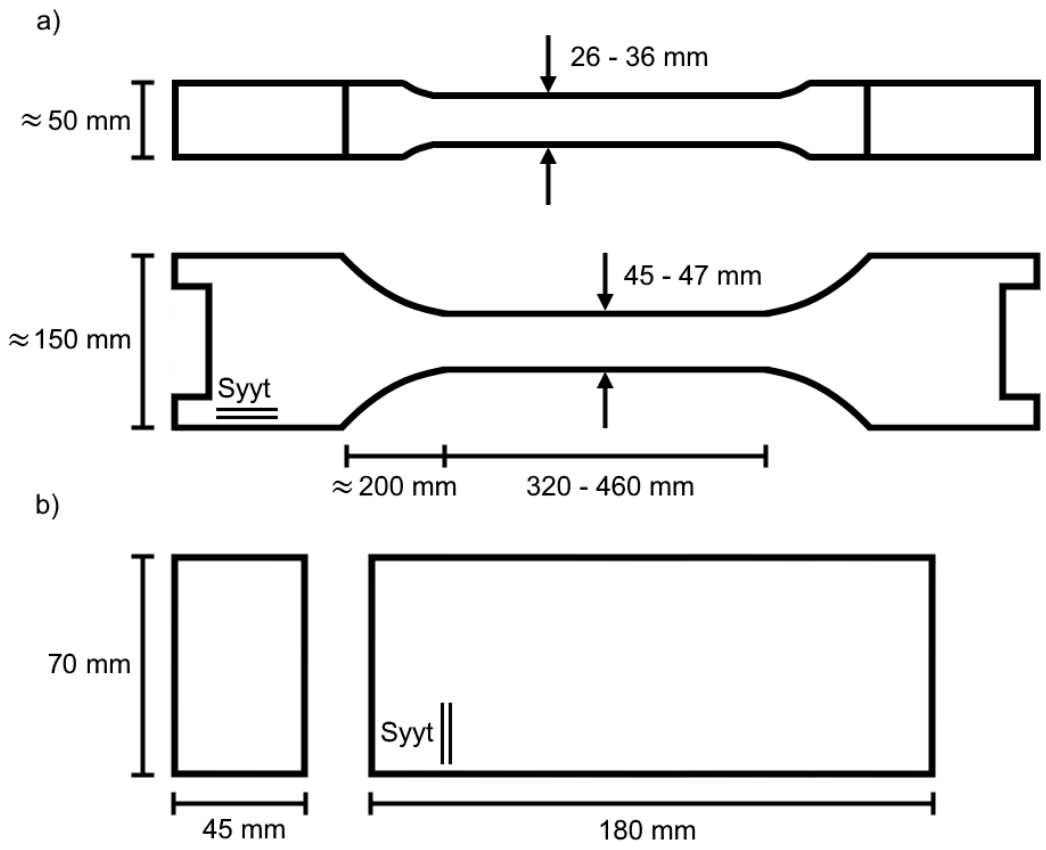
Kuva 20. *Puristuskokeissa käytetyt koekappaleet syysuuntaisessa puristuksessa (a) ja poikittaissuuntaisessa puristuksessa (b).*



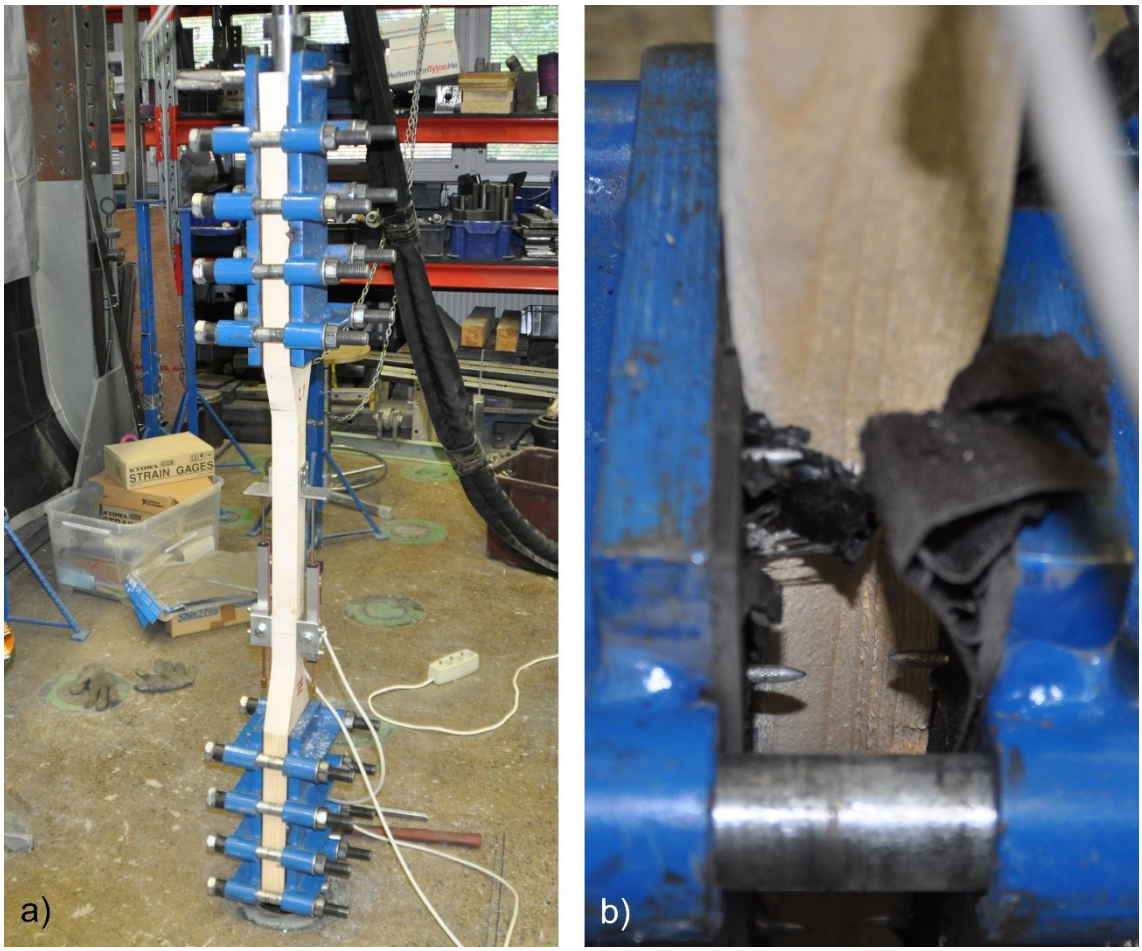
Kuva 21. *Syiden suuntaisissa (a) ja poikittaissuuntaisissa (b) puristuskokeissa käytetyt koelaitteistot.*

LIITE B: VETOKOKEET

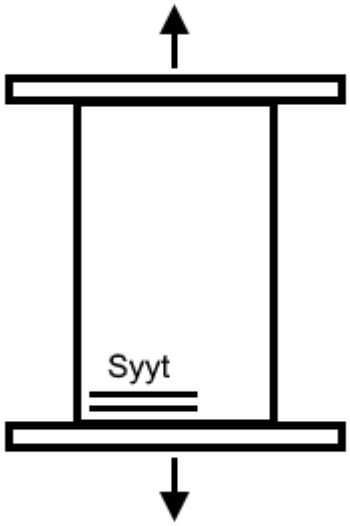
Syiden suuntaisissa vetokokeissa käytettyjen koekappaleiden hahmotelma on esitetty kuvassa 22a. Leveiden päätyjen ja kavennuksen välinen alue kaventui ensimmäisessä koekappaleessa lineaarisesti. Lineaarinen kaventuma johti kuitenkin jännityspiikkeihin, jolloin koekappale murtui kavennuksen juuresta. Tämän vuoksi lineaarisesti kapenevasta alueesta tehtiin kaareva. Koekappaleet valmistettiin valmiista puutavarasta silmämääräisesti vannesahalla, minkä vuoksi leveiden päätyjen ja kavennuksen välisen alueen mitat vaihtelivat kappalekohtaisesti. Poikittaissuuntaisissa vetokokeissa käytettyjen koekappaleiden dimensiot on esitetty kuvassa 22b. Vetokokeissa käytetty koejärjestely on esitetty kuvassa 23a ja koekappaleitten kiinnitystä on havainnollistettu kuvassa 23b. Kiinnikkeiden sisäpinnoilla oli kitkaa parantava kerros sekä piikkejä, jotka upotettiin koekappaleeseen. Poikittaissuuntaisen vetokokeen koejärjestelyä on havainnollistettu kuvassa 24.



Kuva 22. *Vetokokeissa käytettyjen koekappaleiden dimensiot syy- (a) ja poikittaissuuntaisissa (b) kokeissa.*



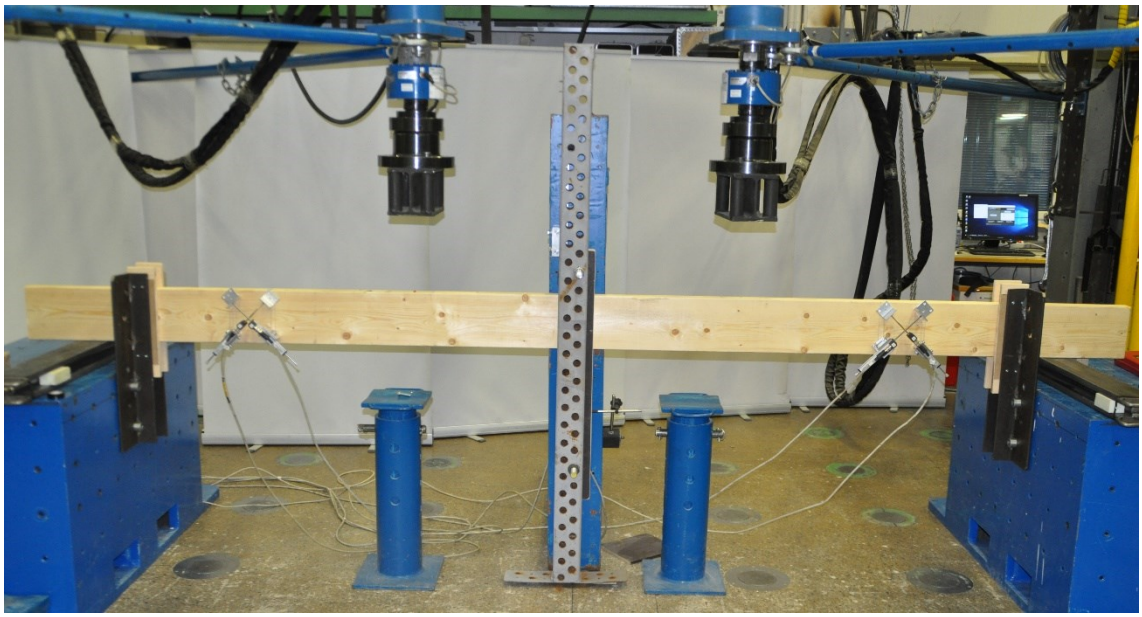
Kuva 23. *Syiden suuntaisissa vetokokeissa käytetty koelaitteisto (a) ja koekappaleiden kiinnitykset (b).*



Kuva 24. *Poikittaissuuntaisissa vetokokeissa käytetyn koelaitteiston hahmotelma. Koekappaleiden molempiin päätyihin liimattiin teräslevyt. Alempi levyistä kiinnitettiin pulteilla jäykkään alustaan ja ylempää levyä vedettiin hydrauliavusteisesti.*

LIITE C: LEIKKAUSKOKEET

Kuvassa 25 on esitetty leikkauskokeissa käytetty koelaitteisto. Palkkia painettiin symmetrisesti yhtä suurilla voimilla kahdella hydraulipuristimella. Puristimien välimatka oli noin 1,2 m ja tukien jänneväli noin 3,6 m. Palkin poikkileikkausmitat olivat noin 47 mm ja 195 mm. Palkit tuettiin molemmista päistä ja keskeltä haarukkatuilla kiepahduksen estämiseksi. Palkin deformaatiota mitattiin neljällä mittakellolla, jotka kiinnitettiin ristiin palkin molempiin päihin kuvan 25 mukaisesti.



Kuva 25. *Leikkauskokeissa käytetty koelaitteisto.*