

Arto Haaranen, Mika Keskisalo, Mikko Matveinen

Ainetta rikkomattomat (NDT) ja vähän rikkovat (SDT) tutkimusmenetelmät uusiokäytettävien puurakenteiden käyttökelpoisuuden arvioinnissa

Sahatavara, liimapuu ja CLT



Julkaisusarja	Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisu B: Oppimateriaaleja ja kokoomateoksia, 99
Tekijät	Arto Haaranen, Karelia-ammattikorkeakoulu Mika Keskisalo, Itä-Suomen yliopisto Mikko Matveinen, Karelia-ammattikorkeakoulu
Kansikuva	Adobe Stock

© Tekijät ja Karelia-ammattikorkeakoulu

Tämä julkaisu on lisensoitu Creative Commons Nimeä-
EiKaupallinen-JaaSamoin 4.0 Kansainvälinen -lisenssillä.

ISBN 978-952-275-465-3
ISSN 1797-383X

Karelia-ammattikorkeakoulu
Joensuu
2025

Kira Circularis - Kiinteistö- ja rakennusalan kiertotalouden tuotteet, palvelut ja
innovaatiot -hanke



**Euroopan unionin
osarahoittama**

Sisällys

1 Johdanto	9
2 Tutkimuksen rajaukset ja tausta	11
2.1 Tutkimuksen rajaukset	11
2.2 Puurakenteiden uudelleenkäyttö ja puumateriaalien uusiokäyttö	11
2.3 Ajantasaiset määräykset ja vaatimukset	12
3 Tutkimuksen nykytilanne ja tärkeimmät lähdeaineistot	14
3.1 Tuoreimmat artikkelit ja julkaisut puisten rakenneosien uudelleenkäytöstä	14
3.2 Ainetta rikkomattomat ja vähän rikkovat tutkimusmenetelmät	16
3.2.1 Resonanssifrekvenssimittaus	19
3.3 Ainetta rikkovat tutkimusmenetelmät	21
3.4 Kaupalliset sovellukset ja mittalaitteet puisten rakenneosien tutkimiseen	23
3.4.1 Mittalaite 1 puun kimmokertoimen ja tiheyden määrittämiseen	24
3.4.2 Mittalaite 2 puun kimmokertoimen ja tiheyden määrittämiseen	27
3.4.3 Porausvastuksen mittaus	28
3.4.4 Ruuvin ulosvetolaite	30
3.4.5 Ultraäänimittalaite puulle	32
3.5 Käyttö- ja testausrajaehdot	34
4 Tutkimustulosten priorisointi ja tietotarpeiden jäsentely	37
4.1 Tietotarpeet rakennetekniikan näkökulmasta	37
4.2 Tietotarpeet materiaalitekniikan näkökulmasta	38
4.2.1 Sovellettavat standardit ja testausolosuhteiden vakiointi	40

4.2.2 Keskeiset arvioitavat ominaisuudet	42
4.3 Tärkeimmät tietotarpeet uudelleenkäytön ja uusiokäytön kannalta	43
5 Tulosten tulkinta	47
5.1 Suositeltavat tutkimusmenetelmät uudelleenkäytölle	48
5.2 Suositeltavat tutkimusmenetelmät uusiokäytölle	49
6 Tutkimuksen luotettavuuden arviointi	51
6.1 Sidonnaisuudet ja riippuvuudet	51
6.2 Aineistonhankinnan tarkempi menetelmäkuvaus	51
7 Pohdinta ja jatkotutkimustarpeet	55

Esipuhe

Joidenkin arvioiden mukaan Suomen rakennuskanta koostuu jopa 45% puumateriaalista. Tämä selittyy pitkälti sillä, että rakennuskanta on ollut pitkään pientalovoittoinen. 2000-luvullakin puun osuus uudistalorakentamisen runkomateriaalina on pysynyt n. 30% rakennettuihin kuutioihin suhteutettuna. Tämä tekee puusta myös merkittävän, tai jopa merkittävimmän purkujättejakeen. Tällä hetkellä suurin osa puupohjaisesta rakennus- ja purkujätteestä käytetään energiantuotantoon, vaikkakin uudelleenkäytön mahdollisuudet ovat paljon monipuolisemmat. Uudelleen käytöllä tarkoitetaan purettavan materiaalin ja rakennusosan hyödyntämistä sellaisenaan uudessa käyttökohteessa.

Purettujen rakennusmateriaalien käyttö rakentamisessa on ollut ollut vähäistä muun muassa epäselvän regulaation vuoksi. Epäselvyyttä ovat aiheuttaneet erityisesti CE-merkintävaatimukset ja entisen Maankäyttö- rakennuslain ja Jätelain keskinäiset ristiriitaisuudet. Kuitenkin nykytiedon valossa uudelleen käyttö on mahdollista, mikäli tuotteen uusi sijoituspaikka ja käyttökohde voidaan osoittaa ennen varsinaista purkamista. Keskeistä on, että purettava materiaali ei missään vaiheessa päädy jätteeksi ja saa jätestatusta, jolloin uudelleenkäyttö hankaloituu edelleen. Jätestatuksen saanut materiaali vaatii Ei-Enää-Jätettämennettelyn (EEJ). Lisäksi mikäli purettava materiaali tai rakennusosa hyödynnetään sellaisenaan vastaavassa tai vähemmän vaativassa käyttökohteessa, tuotteen käyttö ei edellytä CE-merkintää.

Lainsäädäntö ei ole kuitenkaan ollut ainoa este uudelleenkäytön näkökulmasta. Uudelleenkäytettävien rakennusosien haitta-aineiden raja-arvopitoisuuksiin tai teknisten ominaisuuksien todentamiseen liittyviin menetelmiin ja prosesseihin ei ole vielä toistaiseksi olemassa valtakunnallisia yleispäteviä ohjeita. Lähtökohteisesti vanhoja rakennuksia ei ole myöskään suunniteltu purettavaksi ja purkamisesta aiheutuu manuaalista työtä ja siten ylimääräisiä kustannuksia. Lisäksi

purettujen rakennustuotteiden markkina ja ansaintalogiikat ovat vielä kehittämättömiä ja eikä uudelleen käytölle ole ollut varsinaisia kannustumia olemassa.

Uudelleenkäytettävän materiaalin tai rakennusosan käyttökelpoisuuden osoittaminen ei ole lineaarinen prosessi, vaan siihen vaikuttaa uudelleen käytettävän tuotteen ominaisuudet, kuten onko kyseessä helposti purettava siirrettävä tuote, esim. julkisivutiili, tai käytetäänkö tuote osittain, esim. palkit ja pilarit. Kelpoisuuden osoittaminen voi tapahtua ennen purkua, purun jälkeen purkupaikalla tai laboratoriossa. Näin ollen se, missä vaiheessa tuotteen kelpoisuus on järkevää ja kustannustehokasta määrittää, riippuu paljon uudelleen käytettävästä tuotteesta. Kuitenkin lähtökohtaisesti pyrkimys aloittaa kunnan todentamiseen liittyvät tutkimukset jo ennen varsinaista purkutyötä, voi olla perusteltua. Tällöin vältytään ehjänä purkamista aiheutuvista ylimääräisistä kustannuksista.

Tämä kirjallisuuskatsaus käsittelee ainetta rikkomattomia (NDT) ja vähän rikkovia (SDT) tutkimusmenetelmiä uusiokäytettävien puurakenteiden käyttökelpoisuuden arvioinnissa. Katsauksen tavoitteena on tarjota kattava yleiskuva näiden menetelmien soveltuvuudesta ja hyödyllisyydestä erityisesti liimapuun ja CLT-tuotteiden yhteydessä.

Kirjallisuuskatsaus on laadittu osana Kira Circularis - Kiinteistö- ja rakennusalan kiertotalouden tuotteet, palvelut ja innovaatiot -tutkimus- ja kehittämishanketta. Hankkeen päärahoittajana toimii Hämeen Elinkeino-, Liikenne- ja Ympäristökeskus EAKR-ohjelmasta.

Toivomme, että tämä kirjallisuuskatsaus tarjoaa hyödyllistä tietoa ja näkökulmia puurakenteiden ja puumateriaalien uusiokäytön ja uudelleenkäytön arviointiin.

Joensuussa 4.6.2025,

Mikko Matveinen
Senior Project Manager
Karelia-ammattikorkeakoulu

Käytetyt termit ja lyhenteet

CLT (Cross-Laminated Timber) Cross-Laminated Timber ristiinliimattu massiivipuu, kantava puuelementti, käytetään erityisesti seinä- ja lattiarakenteissa.

NDT (Non-destructive Testing) Non-Destructive Testing ainetta rikkomaton testausmenetelmä, joka ei vaurioita tutkittavaa kappaletta.

SDT (Semi-destructive Testing) Semi-Destructive Testing vähän rikkova testausmenetelmä, aiheuttaa vähäistä vauriota, kuten poraus tai ruuvin veto.

CKDR (Consentrated Knot Diameter Ratio) Oksien vaikutus kimmokertoimeen ja lujuuteen

MOE Modulus of Elasticity kimmokerroin, kuvaa materiaalin jäykkyyttä; tärkeä mekaaninen ominaisuus puurakenteiden mitoituksessa.

MOR Modulus of Rupture murtolujuus, kuvaa suurinta jännitystä, jonka materiaali kestää ennen murtumista.

EEJ Ei-Enää-Jätettä menettely, jolla materiaali voidaan siirtää jätteestä tuotteeksi (jättestatuksen päätyminen).

CO2e Hiilidioksidiekvivalentti ilmastovaikutusten yksikkö, jolla kuvataan kasvi-huonekaasujen yhteisvaikutusta.

INSTA 142 Pohjoismainen visuaalinen lajittelustandardi sahatavaralle.

TOFD Time-of-Flight Diffraction aikaratakuvaukseen perustuva akustinen kuvantamismenetelmä.

b_{PL} geometrinen tieto, leveys

b_i CLT, lamellin tai lautojen leveys

h_{PL}	geometrinen tieto, korkeus
L_{PL}	geometrinen tieto, pituus
t_i	CLT, lamellikerrosten paksuus
t_{LAM}	Liimapuu, lamellin paksuus

1 Johdanto

Rakenneosien ja rakennusmateriaalien uudelleenkäyttöä sekä uusiokäyttöä rajoittaa usein se, että niistä ei ole saatavilla riittävästi tietoa, joiden perusteella hankkeen osapuolet voisivat tehdä perusteltuja päätöksiä ja ratkaisuja hankkeen aikana. Uudelleenkäytettävien ja uusiokäytettävien rakennusmateriaalien sekä rakenneosien pitäisi käytännössä täyttää samat vaatimukset, jotka asetetaan neitseellisille tuotteille. Toimintamalli *"Tutkitaan niin pitkään ja paljon, että mielipiteillä ei ole enää merkitystä, vaan kaikki päätökset voidaan tehdä tutkimustuloksiin viitaten"* voi johtaa kohtuuttomaan työmäärään, ja todennäköisesti myöskään hankkeiden aikataulut tai budjetit eivät mahdollistaisi näin kattavaa selvitystyötä. Vielä nykyään uudelleenkäytettävän rakenneosan hinta kohoaa korkeammaksi, kuin vastaavan uuden rakenneosan käyttö, ja kun kierrätystuotteen käyttöön liitetään lisäksi terveyteen ja turvallisuuteen kohdistuvaa epävarmuutta, niin on ymmärrettävää, että moni rakentaja päätyy uuden tuotteen käyttöön.

Ilmastotavoitteiden kannalta olisi kuitenkin tärkeää, että rakenneosien ja rakennusmateriaalien uusiokäyttö ja uudelleenkäyttö yleistyisi, koska rakentaminen tuottaa suuren osan maailman GWP- päästöistä (CO₂e). Edellä mainittuja terveyteen ja turvallisuuteen liittyviä epävarmuustekijöitä voidaan vähentää riittäväillä tutkimuksilla, joilla hankitaan tarvittavia tietoja kierrätystuotteesta uusio- ja uudelleenkäyttöön tai kierrätysmateriaaliksi. Koska kierrätystuotteen kustannuksia pitäisi pystyä pienentämään, niin on oleellista, että myös tutkimukset pystytään kohdentamaan tarkasti vain niihin kohtiin, joilla on oikeasti merkitystä. Materiaaliominaisuus tai muu tieto, jolle ei voida osoittaa perusteltua tarvetta voidaan nähdä juuri kustannuksia lisääväksi. Tutkimusten alussa tulisi tehdä päätös, kannattaako tutkittavaksi määriteltä rakenneosaa tai materiaalia ylipäätään tutkia kattavasti vai pystytäänkö heti ensinäkemältä toteamaan jonkun indikaattorin perusteella, että rakenneosaa tai materiaalia ei sovellu uusiokäyttöön tai uudelleenkäyttöön kustannustehokkaasti tai rakenteellisten turvallisuuden vaatimukset täyttävästi.

Voimmekin havaita selkeän tarpeen uusiokäytettävien ja uudelleenkäytettävien rakennustuotteiden tutkimusten priorisointiohjeelle. Kyseisessä ohjeessa tuotettiin esille missä järjestyksessä kierrätystuotteen ominaisuuksia kannattaa lähteä selvittämään ja mitä tutkimuksia kierrätystuotteelle ylipäättään on tarpeen tehdä tuleva käyttö huomioiden. Raportin tavoitteena on tunnistaa kenttätutkimuksiin soveltuvia mittalaitteistoja ja tutkimusmenetelmiä sekä arvioida niiden hyödynnettävyyttä mm. rakenneosien kunnon ja ominaisuuksien todentamisessa sekä kartoituksissa. Tässä selvitystyössä perehdyttiin ainetta rikkomattomiin ja vähän rikkoviin tutkimusmenetelmiin, joiden avulla pystytään selvittämään puun ja puutuotteiden materiaaliominaisuuksia. Selvitys kohdennettiin erityisesti kantavien puurakenteiden mitoituksessa tarvittaviin materiaaliominaisuuksiin.

Tutkimuksen aineistonhankinta aloitettiin systemaattisen kirjallisuuskatsauksen menetelmillä useista eri tietokannoista. Aineistonhankinnan aluksi määriteltiin hakutermit selvitystyön tekijöiden näkemyksen mukaisesti toisistaan riippumatta, jonka jälkeen hakutermit luetteloidaan verrattiin ja ne yhdistettiin. Aineistonhakukierrosten jälkeen hakutermit rajattiin ja tarkennettiin, ja havaittiin, että eri hakutermit antoivat usein samoja osumia. Tämän jälkeen systemaattisen kirjallisuuskatsauksen menetelmästä luovuttiin ja tutkimuksen lähteet valittiin edustavuuden perusteella. Näin ollen kirjallisuuskatsaus on viimeistely kuvailevana eikä systemaattisena, käyttäen löydettyä lähdeaineistoa. Kuvailevan kirjallisuuskatsauksen aineistoa täydennettiin kirjoitustyön aikana.

Laajan lähdeaineiston analysointiin käytettiin osin tekoälyä, jolla laadittiin tiivistelmät. Tekoälyä hyödynnettiin kouluttamalla OpenAI tekoälyversiota GPT-4o, jolle annettiin syötteenä valittu lähdeaineisto. Aineiston tiivistelmä koostui tekoälyn muodostamasta tekstistä, jota muokattiin keskustelemalla tekoälysoveluksen kanssa.

2 Tutkimuksen rajaukset ja tausta

2.1 Tutkimuksen rajaukset

Selvitystyö on kohdennettu ensisijaisesti liimapuu ja CLT tuotteiden materiaaliominaisuuksien selvitykseen, mutta menetelmien voidaan arvioida soveltuvan myös sahatavaralle, hirsille kuin muillekin massiivisille puutuotteille tai LVL-tuotteille. Selvityksessä arvioidaan lisäksi eri menetelmien soveltuvuutta kierrätystuotteen ominaisuuksien määrittämiseen alkuperäisessä sijainnissaan ennen purkua mm. työmaaolosuhteissa sekä purkamisen jälkeen välivarastossa tai laboratorio-olosuhteissa.

Selvitystyön osalta ei tarkastella tutkimusmenetelmiä haitta-aineiden tai mikrobivaurioiden tai muidenkaan rakennusterveyteen liittyvien näkökulmien osalta. Mahdollisten mikrobivaurioiden, värjäytymien ja lahovaurioiden vaikutuksia arvioidaan rakenneosan mekaanisen toiminnan kannalta.

2.2 Puurakenteiden uudelleenkäyttö ja puumateriaalien uusiokäyttö

Uudelleen käytettävistä puisista rakenneosista on selvittävää geometriset tiedot; korkeus (h_{PL}), leveys (b_{PL}) ja pituus (L_{PL}). Lisäksi liimapuusta on syytä selvittää lamellin paksuus (t_{LAM}) ja CLT tuotteista eri lamellikerrosten paksuudet (t_i) ja käytettyjen lautojen leveydet (b_i).

Tarvittaessa ja mahdollisuuksien mukaan tuotteista on syytä selvittää myös käytetty liimatyypin (lamellien välissä ja lamellien jatkoksissa) sekä CLT:n osalta myös, onko tuote syrjäliimattu vai ei. Liimatyypin selvityksen ja liimauksen tarkastelun tarve arvioidaan alkuperäisen käytön ja suunnitellun tulevan käyt-

tötarkoituksen perusteella. Rakenneosista on syytä myös selvittää kuormitus-historiatiedot (kuormituksen aikaluokat, suuruus, käyttöluokat sekä liittyvät suunnitteluasiakirjat). Jos rakenneosan alkuperäinen käyttöympäristö on ollut ulkotiloissa, niin yleensä voidaan olettaa, että käytetty liima on kosteudenkestävää. Toisaalta jos varasto- tai tuotantotiloissa aiemmin ollutta rakenneosaa aiotaan käyttää asuintiloissa, on syytä arvioida käytetyn liiman soveltuvuutta mahdollisten emissioiden osalta.

Jos rakenneosaa ei aiota hyödyntää alkuperäisessä muodossaan, vaan raken-nusmateriaalia aiotaan hyödyntää uuden rakenneosan valmistuksessa, huomioidaan mahdollisesti vaurioituneet tai kontaminoituneet osat ja ehjät/terveet osat erikseen. Esimerkiksi pieni paikallinen lahovaurio ei välttämättä estä raken-neosan uudelleenkäyttöä, jos kappale on erityisen massiivinen verrattuna vauriokohtaan tai se on poistettavissa.

2.3 Ajantasaiset määräykset ja vaatimukset

Puurakenteiden uudelleenkäyttöä ja puumateriaalien uusiokäyttöä ohjaavat kansalliset ja EU-tason säädökset, jotka määrittävät vaatimukset tuotteiden kelpoisuudelle, soveltuvuudelle ja turvalliselle käytölle uudessa rakennuskohteessa. Uudelleenkäytön teknisissä edellytyksissä korostuu erityisesti rakenteellisen turvallisuuden varmistaminen sekä soveltuvuus uuteen käyttötarkoitukseen ilman, että tuotetta olennaisesti muutetaan.

Keskeisin EU-tason säädös on Rakennustuoteasetus (EU) N:o 305/2011, jonka tarkoituksena on yhdenmukaistaa rakennustuotteiden ominaisuuksien ilmoittamista ja mahdollistaa näiden vertailtavuus EU:n sisämarkkinoilla. Asetus ei kuitenkaan estä kansallista sääntelyä siltä osin, kuin kyse on uudelleenkäytettävistä rakennusosista, joita ei CE-merkitä tai joiden ominaisuuksia ei muuteta olennaisesti uudelleenkäytön yhteydessä (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus 305/2011).

Suomessa uudelleenkäytön lainsäädännöllinen kehys määrittyy rakentamislaisissa (751/2023). Lain 16 §:ssä edellytetään purkumateriaali- ja rakennusjät selvityksen laatimista ennen purkutyötä. Selvityksen tavoitteena on tunnistaa uudelleenkäyttökelpoiset rakennusosat ja ohjata ne tarkoituksenmukaiseen hyödyntämiseen. Rakennusosien tulee olla suunniteltu ja toteutettu siten, että ne täyttävät olennaiset tekniset vaatimukset koko käyttöikänsä ajan (Rakentamislaki 751/2023, 6 §).

Ympäristöministeriön julkaiseman oppaan mukaan uudelleenkäytettävän rakennusosan kelpoisuus ja soveltuvuus osoitetaan tapauskohtaisesti. Rakennustuotetta ei tarvitse CE-merkitä uudelleen, mikäli sen ominaisuuksia ei ole olennaisesti muutettu ja käyttötarkoitus säilyy samankaltaisena. Tällöin voidaan

soveltaa niin kutsuttua rakennuspaikkakohtaista varmentamismenettelyä, jota ohjaavat Laki eräiden rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä (954/2012) ja sitä täydentävä Ympäristöministeriön asetus 555/2013. Menettelyssä tuotteelle määritetään hyväksyntä nimenomaan kyseiseen rakennuskohteeseen.

Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että rakennusvalvontaviranomainen voi hyväksyä rakennusosan käytön ilman CE-merkintää, mikäli soveltuvuus voidaan osoittaa luotettavasti esimerkiksi dokumentoidun käyttöhistorian, visuaalisen tarkastelun ja teknisten mittausten avulla. Tuotteet voidaan hyväksyä myös kansallisen tuotehyväksynnän kautta, jos CE-merkintää ei ole, eikä tuotteen kelpoisuutta ole muuten osoitettu.

Lisäksi puurakenteiden uusiokäyttö on sidoksissa jätelain (646/2011) ja valtioneuvoston asetuksen jätteistä (978/2021) vaatimuksiin. Jätelain mukaan rakennusosien uudelleenkäyttö tulee ensisijaisesti harkita ennen kierrätys- tai lopputuotteen vaihtoehtoja (Finlex, 2011). Tämän mukaisesti purkutyötä ohjaavassa selvityksessä on osoitettava ne osat, joita voidaan käyttää uudelleen joko sellaisenaan tai uusiotuotteina. Ympäristöministeriön mukaan jäte ei muutu automaattisesti tuotteeksi, vaikka sillä olisi teknisiä ominaisuuksia vaan uusiokäytön hyväksyttävyyys tulee osoittaa tuotekohtaisesti.

Yhteenveto keskeisistä säädöksistä

Lainsäädäntö/asetus	Soveltuvuus ja merkitys
Rakennustuoteasetus EU 305/2011	Yhteinen viitekehys tuotteen suorituskyvyn ilmoittamiselle. CE-merkintä ei pakollinen, jos ominaisuuksia ei muuteta.
Rakentamislaki (751/2023)	Purkumateriaalien ja rakennusosien uudelleenkäytön edellytykset. Purkumateriaaliselvitys.
Laki rakennustuotteiden tuotehyväksynnästä (954/2012)	Mahdollistaa rakennuspaikkakohtaisen hyväksymisen.
Jätelaki (646/2011)	Ensisijaisuusperiaate uudelleenkäytölle ennen kierrätystä.
VN-asetus jätteistä (978/2021)	Jättestatuksen päättyminen ja materiaalin palautuminen tuotteeksi.

3 Tutkimuksen nykytilanne ja tärkeimmät lähdeaineistot

Ainetta rikkomattomassa tutkimuksessa voidaan huomata tutkimuksen keskittyvän restaurointi sekä kenttätutkimuksiin historiallisten kohteiden tai rakennelmien osalta. Tavoitteena tutkimuksissa on arvioida joko rakenteen kuntoa, kestävyyttä, vaurioitumisastetta tai mahdollista uusimistarvetta. Toisaalta tutkimuksen osalta voidaan nähdä suuntauksia, joissa tutkitaan menetelmien soveltuvuutta.

3.1 Ajantasainen tutkimus

Puurakenteiden uudelleenkäyttö on noussut merkittäväksi tutkimusalueeksi erityisesti rakennussektorin siirtyessä kohti vähähiilisiä ja kiertotaloutta tukevia ratkaisuja. Kansainvälisessä tutkimuksessa on painotettu erityisesti mekaanisten ominaisuuksien säilyvyyttä sekä uusien ainetta rikkomattomien tutkimusmenetelmien (NDT) sovellettavuutta vanhojen rakenteiden kunnon ja käyttökelpoisuuden arviointiin. Samalla kansallisessa ohjeistuksessa on alettu käsitellä elinkaaren aikaisia vaikutuksia ja uudelleenkäytön teknisiä edellytyksiä: RIL 269-2015 korostaa rakenteellisen turvallisuuden seurantaa ja RIL 277-2024 puolestaan integroi uudelleenkäytön osaksi puukerrostalojen elinkaarisuunnittelua.

Tutkimuskirjallisuuden perusteella yksi keskeinen havainto on, että käytetyn puun murtolujuus (MOR) voi laskea merkittävästi (60 %) käyttöhistorian, mikrobiologisten vaurioiden tai kosteusvaihtelujen seurauksena, kun taas kimmokerroin (MOE) säilyy usein vakaampana. Tästä syystä menetelmät, jotka perustuvat MOE:n arviointiin, kuten stressiaaltoanalyysi ja resonanssifrekvenssimittaus, ovat erityisen käyttökelpoisia rakenneosien käyttökelpoisuuden esivalinnassa .

Yu et al. (2020) esittivät kokeellisen mallin, jossa ultraäänimittaukset ja mikroporausanalyysi yhdistettiin puristuslujuuden ennustamiseen historiallisissa puupylväissä. Malli osoittautui tehokkaaksi erityisesti tilanteissa, joissa visuaalinen tarkastelu ei tarjonnut riittävää tarkkuutta. Lisäksi Rajeev et al. (2021) osoittivat, että resonanssi- ja modaalianalyysiin perustuvat menetelmät soveltuvat erinomaisesti CLT- ja LVL-elementtien dynaamisten ominaisuuksien arviointiin, kunhan mittaukset suoritetaan kosteuspitoisuuden ollessa vakaa.

Zhang et al. (2015) kokosivat sadoista tutkimuksista analyysin, joka tuotti keskiarvo- ja hajontalukuja käytetyn puun mekaanisille ominaisuuksille eri käyttöikäen ja vauriotyyppien mukaan. Tulokset korostavat tarvetta valita liitostekniikat ja kuormitustasot huolellisesti yhdistettäessä vanhoja ja uusia rakenteita.

Kansallisella tasolla uudelleenkäyttöön liittyviä teknisiä haasteita on tarkasteltu useissa ohjeissa ja tutkimuksissa. VTT:n julkaisu Rakennusten suunnittelu uudelleenkäyttöä ja kierrätystä varten (2014) painottaa modulaarisuutta ja liitosten purettavuutta. Puurakenteiden uudelleenkäyttömahdollisuudet -raportti (Tampereen teknillinen yliopisto, 2018) nostaa esiin erityisesti käytännön ongelmat, kuten mittatoleranssit, naulojen ja kiinnikkeiden poiston sekä puhtausvaatimukset. Valtioneuvoston selvityksessä (2022) korostetaan turvallisuuden ja terveellisyyden arviointia purkumateriaalien osalta, erityisesti tilanteissa, joissa materiaali aiotaan ottaa uudelleen rakenteelliseen käyttöön.

Lisäksi RIL 216-2013 tarjoaa kehyksen rakenteiden elinkaaren hallintaan ja arviointiin erityisesti uudelleenkäytön näkökulmasta, kun taas Purkutyöt -opas tekijöille ja teettäjiä (Ympäristöministeriö, 2019) ja UURAKET-hankkeen tuottama aineisto tarjoavat käytännönläheisiä ohjeita uudelleenkäytön toteutukseen.

Yhdysvaltalaisen Forest Products Laboratoryn julkaisut sekä Build Reuse -verkoston EPD-profiilit osoittavat, että uudelleenkäytettävän puun ympäristöhätydyt ovat merkittäviä. Niiden luotettava kvantifiointi kuitenkin edellyttää mittausprosessien standardointia ja jatkuvaa validointia.

Puurakenteiden uudelleenkäytön tutkimus ja ohjeistus nojaavat yhä vahvemmin yhdistelmämenetelmiin, joissa NDT-tekniikat yhdistetään materiaalin historiatietoon, kansallisiin ohjeisiin ja laskennalliseen analyysiin. Kansainvälisesti huomioitava foorumi näiden ainetta rikkomattomia testaus- ja arviointimenetelmiä (NDT/NDE menetelmien kehittämisessä on International Nondestructive Testing and Evaluation of Wood Symposium, jonka järjestää Forest Products Society yhteistyössä muiden organisaatioiden kanssa.

3.2 Ainetta rikkomattomat ja vähän rikkovat tutkimusmenetelmät

Ainetta rikkomattomia (NDT) ja vähän rikkovia (SDT) tutkimusmenetelmiä hyödynnetään laajasti puurakenteiden kuntotutkimuksessa erityisesti silloin, kun rakenteita ei haluta vaurioittaa mekaanisesti tai esteettisesti. Näiden menetelmien tavoitteena on tuottaa luotettavaa tietoa puumateriaalin lujuus- ja materiaaliominaisuuksista sekä rakenteellisesta eheydestä ilman rakenteiden vaurioittamista tai käyttökelpoisuuden heikentämistä.

Stressiaalto- ja ultraäänimenetelmät muodostavat keskeisen osan akustisista NDT-menetelmistä. Niiden avulla voidaan arvioida puun dynaaminen kimmokerroin (MOE) mittaamalla äänen etenemisnopeus materiaalissa. Tämä riippuvuus voidaan esittää kaavalla 1:

$$E_d = \rho * C^2 \quad (1)$$

E_d = dynaaminen kimmokerroin [Pa]

ρ = puun tiheys [kg/m^3]

C = stressiaallon nopeus [m/s]

(International NDT Symposium, 2024)

Menetelmä on osoittautunut luotettavaksi erityisesti homogeenisissa materiaaleissa, kuten liimapuussa ja uudelleenkäytettävissä massiivipuurakenteissa. Ultraäänimenetelmät ovat käyttökelpoisia myös kenttäolosuhteissa, kun mitausgeometria, lämpötila ja kosteuspitoisuus ovat hallittuja (International NDT Symposium, 2024).

Toinen keskeinen SDT-menetelmä on porausvastusmittaus. Tässä menetelmässä analysoidaan porauksen aikana mitattua vastusarvoa, joka kuvaa puun tiheyden vaihteluita ja mahdollisia sisäisiä vaurioita. Resistograph-laitteet mahdollistavat yksityiskohtaisten profiilien muodostamisen rakenteen sisäosista ilman merkittävää vauriota (Çel & Güler, 2016)

SDT-menetelmistä ruuvin ulosvetotesti on käyttökelpoinen erityisesti pintakerrosten mekaanisten ominaisuuksien arviointiin. Testissä mitataan se voima, joka vaaditaan ruuvin vetämiseksi ulos puusta. Testitulokset voidaan yhdistää tiheyteen ja lujuuteen perustuvien korrelaatioiden avulla (Ross, 2010).

Erikoistuneemmista tekniikoista mainittakoon termografia ja ilmakytkentäinen ultraäänikuvaus (air-coupled ultrasonics), jotka mahdollistavat nopean skannaamisen suurista pinnoista ilman fyysistä kontaktia. Näitä menetelmiä on sovel-

lettu erityisesti puutuotteiden laadunvalvontaan tuotantoprosesseissa ja vaurioanalyysiin (Fang et al., 2019).

Kansainvälisessä tutkimuksessa yhdistelmämittausmenetelmiä on hyödynnetty CLT-rakenteiden arvioinnissa. Esimerkiksi Cheng et al. (2020) yhdistivät stressialto- ja porausvastusmenetelmiä arvioidessaan uudelleenkäytettävyyttä massiivipuorakenteissa.

Kaikkiaan NDT- ja SDT-menetelmät ovat keskeisiä työkaluja nykyaikaisessa puorakenteiden kuntotutkimuksessa. Niiden avulla voidaan edistää uudelleenkäytön turvallisuutta ja kustannustehokkuutta sekä mahdollistaa materiaalitehokas purku ja uudelleenasetus.

Lähteet:

Çel, Bilgin and Güler, Gürçan (2016) "Nondestructive determination of spruce lumber wood density using drilling resistance (Resistograph) method," Turkish Journal of Agriculture and Forestry: Vol. 40: No. 6, Article 10. <https://doi.org/10.3906/tar-1606-76>

Cheng, Q., Zhang, J., Wang, X., Chen, X., Wang, J. and Zuo, Y. (2020). Theoretical and Experimental Research on Moisture Content and Wood Property Indexes Based on Nondestructive Testing. *BioResources*, 15(1), pp.1600-1616.

Fang, Y., Lin, L., Feng, H., Lu, Z., Emms, G., (2017) Review of the use of air-coupled ultrasonic technologies for nondestructive testing of wood and wood products, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 137, pp. 79-87, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.03.015>.

Huuhka, S., Köliö, A., Annala, P., Poti, A., (2018). *Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 165*. Tampereen teknillinen yliopisto. <https://trepo.tuni.fi/handle/10024/116548>

International Nondestructive Testing Symposium (2024). Modulus of Elasticity and NDT Evaluation of CLT Specimens. *Proceedings of the 23rd International NDT Symposium*.

Rajeev, P., et al. (2021). Condition assessment tool for timber utility poles using stress wave propagation technique. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 36(3), 336-356. DOI: 10.1080/10589759.2020.1728267

RIL 216-2013. (2013). *Rakenteiden elinkaaren hallinta ja arviointi*. Rakennustieto Oy.

RIL 269-2015. (2015). *Korjausrakentamisen suunnitteluohjeet*. Rakennustieto Oy.

RIL 277-2024. (2024). Puurunkoisten kerrostalojen suunnitteluohje. Rakennustieto Oy.

Ross, R.J. (ed.) (2010). Nondestructive Evaluation of Wood, Second Edition. USDA Forest Service, FPL-GTR-238.

Talja, A 2014, Rakennusten suunnittelu uudelleenkäyttöä ja kierräystä varten. VTT Tutkimusraportti, vol. VTT-R-00736-14, VTT Technical Research Centre of Finland, Espoo. <https://publications.vtt.fi/julkaisut/muut/2014/VTT-R-00736-14.pdf>

Valtioneuvosto (2019). Purkutyöt – opas tekijöille ja teettäjiille. Ympäristöministeriön julkaisuja 29/2019. Saatavilla: <https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/handle/10024/161884>

Yu, T., Sousa, H.S., Branco, J.M. et al. (2020). Combination of non-destructive tests for assessing decay in existing timber elements. Nondestructive Testing and Evaluation, 35(1), 29–47. DOI: 10.1080/10589759.2019.1635593

Taulukko 1. Materiaalien ominaisuudet suhteessa mitattaviin ominaisuuksiin

Ominaisuus (Property)	Tarkasteltavat fyysiset ominaisuudet (Basic physical principles)	Mitattavat ominaisuudet (Measurable properties)
Mekaaniset ominaisuudet (Mechanical properties)	Porausvastus, kovuus Vuosisirenkaiden analyysi (Fractometer computed tomography)	Lahovaurion havainnointi, tiheys
Sähkönjohtavuus tai vastus (Electrical properties)	Sähkövastus (electrical resistance)	Kosteuspitoisuus Lahovaurion havainnointi
Akustiset ominaisuudet (Acoustical properties)	Äänen nopeus, vahvuus, heijastuminen, emissiivisyys Ominaistaajuus (eigenfrequency) Ultraääni	Elastic constants (E, G) Vaurioiden havainnointi (oksat, halkeamat, delaminoituminen)
Lämpötekniiset ominaisuudet (Thermal properties)	Lämpösäteily (thermography), lämmonjohtavuus	Vauriot pinta-kerroksissa.
Partikkelit	Neutronisäteily	Allocation of humidity Puun suoja- ja käsittely-aineet
Elektromagneettiset aallot (electromagnetic waves)	Mikroaallot Infrapuna-aallot (IF/NIR) Näkyvä aallonpituus/ valo Röntgen (absorptio ja hajonta)	Syysuunta Tiheys Kosteuspitoisuus Värimuunnokset Mikrotason rakenteet

Taulukko 2. Tutkimusmenetelmien kuvaus ja soveltuvuus

Tutkimusmenetelmä-kategoria	Soveltuvuus rakenteessa olevalle rakenneosalle kentällä	Soveltuvuus rakenteesta irrotetulle rakenneosalle kentällä	Soveltuvuus rakenteesta irrotetulle rakenneosalle laboratorio-olosuhteissa
Visuaalinen ja aistinvarainen tarkastus (ihmisen tekemä ja konenäkö)	Soveltuu hyvin	Soveltuu hyvin	Soveltuu hyvin
Resonanssi-frekvenssimittaus	Ei sovellu	Soveltuu	Soveltuu hyvin
Ultraääni	Soveltuu	Soveltuu hyvin	Soveltuu hyvin
Röntgen	Soveltuu	Soveltuu hyvin	Soveltuu hyvin
Porausvastusmittaus	Soveltuu hyvin	Soveltuu	Soveltuu
Sähkönjohtavuuteen perustuvat menetelmät	Soveltuu hyvin	Soveltuu hyvin	Soveltuu hyvin

3.2.1 Resonanssifrekvenssimittaus

Resonanssifrekvenssimenetelmä perustuu tutkittavan kappaleen luonnollisten taajuuksien mittaamiseen ja värähtelykäyttäytymisen analysointiin. Menetelmä on luonteeltaan ainetta rikkomaton ja soveltuu erityisen hyvin pitkänomaisille puuelementeille, kuten liimapalkit ja CLT-paneelit, joiden rakennegeometria on säännöllinen ja mittasuhteiltaan tunnettu.

Mittauksessa kappaleelle aiheutetaan hallittu mekaaninen heräte, useimmiten kevyt isku tai tärähdys, minkä jälkeen taajuusvaste mitataan kiihtyvyy- tai siirtymäanturilla. Saatua signaali analysoidaan Fourier-muunnoksen avulla, josta tunnistetaan resonanssitaajuuudet. Ensimmäinen taivutusmoodi eli perusresonanssitaajuus on ensisijainen muuttuja kimmokertoimen (MOE) laskennassa (Wang et al., 2014; USDA Forest Products Laboratory, 2011)

$$E_d = \frac{m * L^3 * f_1^2}{I * C} \quad (2)$$

E_d = dynaaminen kimmokerroin [Pa]

f_1 = ensimmäinen resonanssitaajuus [Hz]

m = näytteen/kappaleen massa [kg]

L = näytteen/kappaleen pituus [m]

I = poikkileikkauksen neliommentti [m⁴]

C = vakio riippuen tukiehoista ja muotovakioista

Resonanssimenetelmässä saatu MOE heijastaa rakenteen jäykkyyttä, mutta ei suoraan murtolujuutta (MOR). Tämän vuoksi menetelmää käytetään usein yhdessä muiden arviointitekniikoiden, kuten visuaalisen luokituksen esim. INSTA-142 (SFS, 2010) tai porausvastusmittausten kanssa. Tuloksia voidaan kalibroida käyttämällä tunnettuja vertailumateriaaleja tai samasta rakenteesta saatavia referenssinäytteitä (USDA, 2011)

Correa et al. (2022) osoittivat, että resonanssifrekvenssianalyysi on käyttökelpoinen erityisesti CLT:n kerroskohtaisten mekaanisten ominaisuuksien arvioinnissa, kunhan mittaukset tehdään vakioituissa kosteusolosuhteissa. ISO 554 sekä ASTM D4933-16 edellyttävätkin, että ennen taajuusanalyysiä materiaalin suhteellinen kosteus ja lämpötila vakautetaan, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia.

Menetelmän etuina ovat nopeus, ei-invasiivisuus ja mahdollisuus soveltaa sitä sekä laboratoriossa ja kenttäolosuhteissa. Haasteena on kuitenkin herkkyysolosuhteille ja mittausasetelmalle: tukien sijainti, mittauspisteiden tarkkuus ja ulkoisten häiriöiden suodatus voivat vaikuttaa merkittävästi saatuun taajuusspektriin. Tästä syystä standardoitu testausasettelu ja kalibrointi ovat välttämättömiä erityisesti silloin, kun tuloksia käytetään rakenteellisen lujuuden arviointiin (Wang et al., 2014)

Kehitteillä olevissa sovelluksissa resonanssianalyysiä käytetään myös vaurioiden paikallistamiseen seuraamalla taajuusvasteen muutoksia ajan myötä. Tätä lähestymistapaa voidaan hyödyntää osana elinkaari pohjaista kunnonseurantaa erityisesti pitkäikäisissä tai huollon kannalta kriittisissä puurakenteissa.

Yhteenvedona voidaan todeta, että resonanssifrekvenssimittaus on käyttökelpoinen menetelmä puumateriaalien mekaanisen suorituskyvyn arvioinnissa, erityisesti dynaamisen jäykkyyden näkökulmasta. Menetelmä tarjoaa luotettavaa ja toistettavaa tietoa, kun mittaukset suoritetaan vakioituissa olosuhteissa ja mittalaitteiden kalibrointi on tehty huolellisesti.

Lähteet:

Correa, Laurice Mara Spinelli; França, Frederico José Nistal; Shmulsky, Rubin; Seale, R. Daniel; Ross, Robert J.; Senalik, Christopher. (2022). Evaluation of modulus of elasticity and modulus of rupture of cross-laminated timber with longitudinal vibration NDE techniques. Research Paper FPL-RP-714. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 9 p. <https://doi.org/10.2737/FPL-RP-714>.

SFS 5878 INSTA 142. 2010. Sahatavaran visuaalisen lujuuslajittelun pohjoismaiset säännöt. Helsinki. Suomen standardoimisliitto SFS.

USDA Forest Products Laboratory (2015). Nondestructive Evaluation of Wood: Second Edition. General Technical Report FPL-GTR-238.

Wang, X., Ross, R. J. and Carter, P. (2014). Dynamic testing and evaluation of modulus of elasticity of SPF dimensional lumber. *BioResources*, 9(3), pp. 38693882.

3.3 Ainetta rikkovat tutkimusmenetelmät

Ainetta rikkovat testausmenetelmät muodostavat vakiintuneen käytännön puumateriaalien mekaanisten ominaisuuksien määrittämiseen. Näissä menetelmissä tutkittava kappale kuormitetaan murtopisteeseen saakka, joka soveltuu vertailuarvojen määrittämiseen, standardointiin ja materiaalien väliseen lujuusluokitteluun. Puurakenteiden uudelleenikäytön näkökulmasta näitä menetelmiä sovelletaan lähinnä edustavien näytteiden avulla arvioimaan suurempien rakenneseosien kelpoisuutta tai kalibroimaan ainetta rikkomattomien mittausten tuloksia.

Yleisimpiä ainetta rikkovia testausmenetelmiä ovat taivutuslujuuden (modulus of rupture, MOR) ja kimmokertoimen (modulus of elasticity, MOE) määrittäminen kolmen tai neljän pisteen taivutuskokeella sekä puristuslujuuden määrittäminen joko puun syiden suuntaisesti tai kohtisuoraan syitä vastaan (EN 408:2010 + A1:2012; EN 384:2016).

Lisäksi liimasauman kestävyyttä voidaan arvioida erillisillä kokeilla, kuten keitto-testauksella ja pitkittäisen leikkauslujuuden määrittämisellä. SFS-EN 302-1:2023 -standardissa määritellään, kuinka kuormitusta kantaviin puuliimasaumoihin kohdistuva leikkauslujuus testataan standardoidusti (SFS-EN 302-1:2023). Helsingin kiertotalouden klusteriohjelmassa kehitettiin myös kenttäolosuhteisiin perustuvaa testausmenetelmää. Työmaatestimenetelmä perustuu liimapalkista porattuun tappinäytteeseen ja sen liimasauman mekaaniseen leikkaustestaukseen. Menettely noudattaa osin EN 14080 -standardia (TimberWolves, 2023). Testitulokset arvioidaan visuaalisesti määrittämällä, kuinka suuri osa murtumasta tapahtuu puussa eikä liimasaumassa, minkä perusteella voidaan arvioida liimauksen eheyttä (Finotrol, 2023). Tämän jälkeen näytettä voidaan silmämääräisesti arvioida silmämääräisesti ja prosentuaalista osuutta liimasaumassa leikkaantuneesta puusta.

Standardoiduista ohjeista erityisesti SFS-EN 408 ja SFS-EN 789 määrittelevät yksityiskohtaisesti näytteiden mitat, testausnopeuden, kosteuspitoisuuden kontrolloinnin ja tulosten laskentamenetelmät (EN 408:2010 + A1:2012; EN 789:2004).

Lisäksi ASTM D198-09 ja ISO 3349 tarjoavat kansainvälisiä rinnakkaisohjeita erityisesti liimapuulle ja massiivipuulle (Wang et al., 2016).

Historiallisissa tai vanhoissa puurakenteissa ainetta rikkovia menetelmiä hyödynnetään erityisesti kalibrintiin: niillä määritetään rakenteista irrotettujen pienten näytteiden mekaaniset ominaisuudet, joita voidaan korreloida ei-rikottuihin osiin. Näiden testien avulla voidaan esimerkiksi validoida ultraääni-, stressiaalto- tai porausvastusmittausten tuottamia arvioita puun käyttökelpoisuudesta (Chen & Guo, 2016).

Viimeaikaisissa tutkimuksissa on kehitetty pienikokoisia testikappaleita, joilla voidaan saavuttaa luotettavia tuloksia myös silloin, kun käytettävissä oleva materiaali on rajallista tai vaurioitumiselle altista. Tätä lähestymistapaa on hyödynnetty mm. vanhojen poikkileikkausten reunavyöhykkeistä irrotetuissa näytteissä, joiden avulla voidaan arvioida puun jäännöslujuus ilman koko rakenteen tuhoamista (Chen & Guo, 2016).

Yhteenvetona voidaan todeta, että ainetta rikkovat menetelmät tarjoavat tarkkaa tietoa puumateriaalien lujuusominaisuuksista ja toimivat vertailuarvopohjana muille testausmenetelmille. Vaikka ne eivät ole ensisijaisia työkaluja kenttäarvioinnissa, niillä on keskeinen rooli menetelmien validoinnissa ja materiaalien laatuoluokituksessa uudelleenkäytön mahdollistamiseksi.

Lähteet:

ASTM D198-09. (2009). Standard Test Methods of Static Tests of Lumber in Structural Sizes. ASTM International.

Chen, Y. & Guo, J. (2016). Mechanical properties evaluation of two wood species of ancient timber structure with nondestructive testing methods. *BioResources*, 11(3), 6600-6612.

EN 384:2016. Structural timber Determination of characteristic values of mechanical properties and density. CEN European Committee for Standardization.

EN 408:2010 + A1:2012. Timber structures Structural timber and glued laminated timber Determination of some physical and mechanical properties. CEN European Committee for Standardization.

Finotrol Oy. (2023). Liimasauman työmaatesti -tutkimusraportti. [Luottamuksellinen asiakirja].

EN 789:2004. Timber structures Test methods Determination of mechanical properties of wood-based panels. CEN European Committee for Standardization.

TimberWolves. (2023). Liimasauman työmaatestaus -esite.

ISO 3349. Wood Determination of modulus of elasticity in static bending. International Organization for Standardization.

SFS-EN 302-1:2023. Adhesives for load-bearing timber structures Test methods Part 1: Determination of longitudinal tensile shear strength. Finnish Standards Association (SFS).

Wang, Z., Zhou, J., Gong, M., Chui, Y. H., and Lu, X. (2016). "Evaluation of modulus of elasticity of laminated strand lumber by non-destructive evaluation technique," BioRes. 11(1), 626-633.

3.4 Kaupalliset sovellukset ja mittalaitteet puisten rakenteosien tutkimiseen

Edellä kuvattuja tutkimusmenetelmiä hyödyntäviä kaupallisia mittalaitteita on ollut saatavilla jo pitkään ja myös uusia menetelmiä on otettu käyttöön. Laitteet mittaavat tavoiteltavaa materiaaliominaisuutta koekappaleesta tai rakenteosasta suoraan, tai ne voivat määrittellä tavoitellun materiaaliominaisuuden epäsuorasti, jos mitattavan suureen ja tavoiteltavan materiaaliominaisuuden välillä on luotettava korrelaatio.

Laitteet on suunniteltu kenttäolosuhteisiin soveltuviksi, ja ne tarjoavat nopeita ja toistettavia mittaustuloksia esimerkiksi puun tiheydestä, kosteuspitoisuudesta ja mekaanisista ominaisuuksista.

Tyypillisimmät kaupalliset laitteet voidaan luokitella viiteen pääryhmään:

- 1) dynaamisiin kimmokertoimen mittalaitteisiin,
- 2) porausvastuslaitteisiin,
- 3) ruuvien ulosvetolaitteisiin,
- 4) ultraäänimittalaitteisiin ja
- 5) kosteuden ja tiheyden mittalaitteisiin.

Useimmat kaupalliset dynaamisen MOE:n mittalaitteet hyödyntävät resonanssi- tai stressiaaltoperusteista mittausta. Esimerkiksi MTG (Microtec Goldeneye), Fakopp Ultrasonic Timer ja Brookhuis Strength Grader ovat vakiinnuttaneet asemansa sahateollisuuden ja rakenteiden kunnonarvioinnin kenttälaitteina. Näillä

mittalaitteilla saadaan dynaaminen MOE nopeasti ja voidaan arvioida rakenteiden jäykkyyttä suhteessa standardiarvoihin.

Porausvastusmittauslaitteista tunnetuimpia ovat IML-Resi PD -sarjan instrumentit sekä Rinntech Resistograph, joiden avulla voidaan muodostaa jatkuva profiili puun sisäisestä vastuksesta porauksen aikana. Mittaus perustuu pyörivän terän kohtaamaan mekaaniseen vastukseen ja tarjoaa tietoa mahdollisista sisäisistä vaurioista, kuten lahokohdista tai tiheyseroista.

Ruuvien ulosvetolaitteet, kuten Proceq DY-216 ja Fakopp Screw Withdrawal Force Meter, mahdollistavat mittauksen, jossa puuhun ruuvattu kiinnike vedetään ulos sekä mitataan siihen vaadittu voima. Tämä korreloi hyvin puun pinnan vetolujuuden ja tiheyden kanssa ollen hyödyllinen silloin, kun halutaan arvioida rakenteen kantavuutta tai liitosten kuntoa.

Ultraäänimittalaitteet, kuten Sylvatest Duo ja Fakopp Ultrasonic Timer, mittaavat ääniaallon etenemisnopeutta puussa ja laskevat sen perusteella puun jäykkyyden. Ilmakytkentäiset anturit (air-coupled) mahdollistavat mittauksen ilman suoraa kontaktia, mikä nopeuttaa työskentelyä ja vähentää pintavaurioita. Tämä tekee menetelmästä käyttökelpoisen myös suojelluissa tai historiallisesti arvokkaissa kohteissa.

Kosteus- ja tiheysmittarit, kuten Delmhorst ja Wagner MMC220, mahdollistavat materiaalin kosteuspitoisuuden nopean arvioinnin. Koska puun mekaaniset ominaisuudet ovat herkkiä kosteudelle, on kriittistä vakioda tai korjata lujuusarvot mittaushetken suhteellisen kosteuden perusteella (ASTM D4933-16).

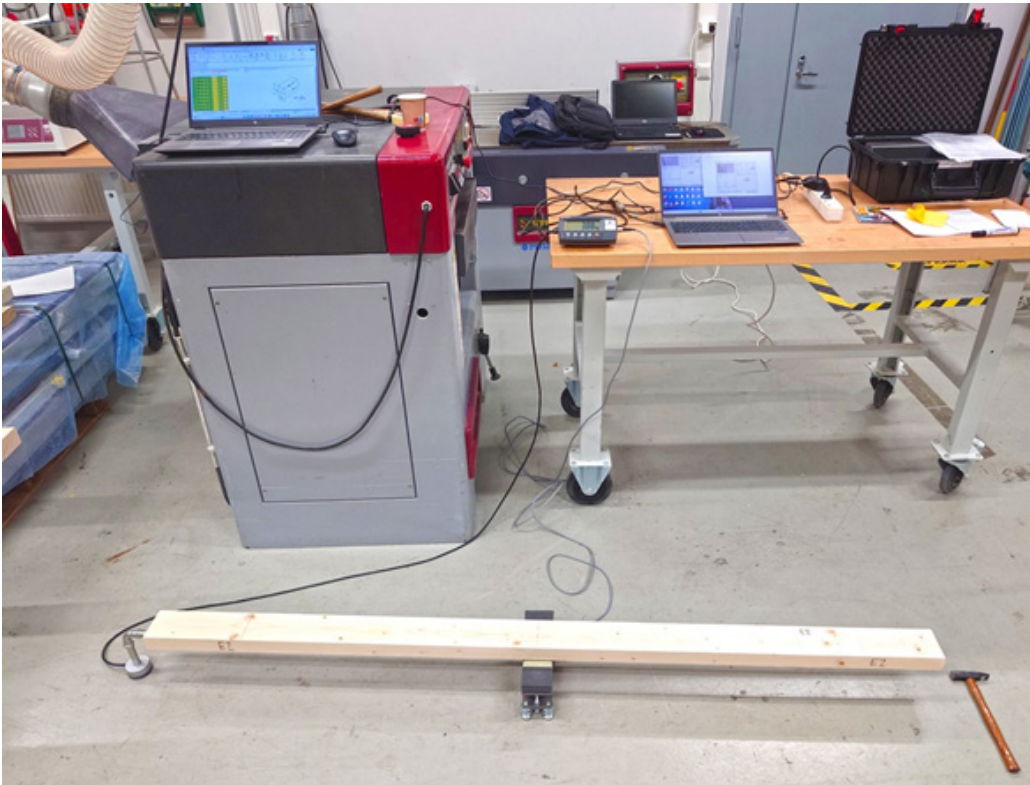
Mittalaitteiden käyttökelpoisuus riippuu mittaustarkkuuden lisäksi niiden ergonomiasta, akkukestosta, ympäristöolosuhteiden sietokyvystä sekä ohjelmistotuesta. Useisiin laitteisiin on integroitu langaton tiedonsiirto ja GPS-paikannus, mikä mahdollistaa laajamittaisten rakennekartoitusten toteuttamisen digitaalisessa muodossa.

Esitellään seuraavaksi puun materiaaliominaisuuksien määrittämiseen soveltuvat mittalaitteet, jotka Karelia-ammattikorkeakoululla on tällä hetkellä käytössä. Osa näistä mittalaitteistoista on lainassa Itä-Suomen yliopistolta ja osa on ammattikorkeakoulun omaa kalustoa.

3.4.1 Mittalaite 1 puun kimmokertoimen ja tiheyden määrittämiseen

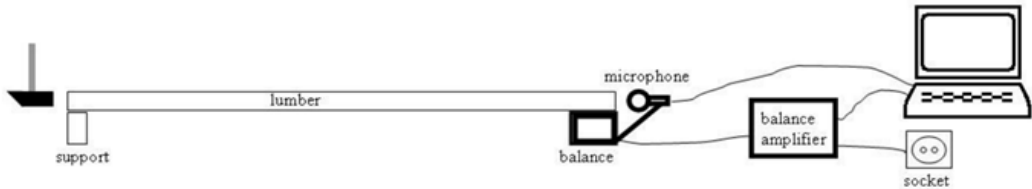
Laboratorio-olosuhteissa puun kimmokerroin määritetään standardin SFS-EN 408 mukaisesti, kuten luvussa 3.3 on kerrottu. Standardin mukainen testaus ei kuitenkaan sovellu käytännössä rakenteesta irrotettujen rakenneosien tutkimiseen, koska tämä vaatisi ylimääräistä kuljetusta sekä mittalaitteiston sovittamista erikokoisille koekappaleille.

Yhtenä kenttämittauksiin soveltuvana laitteena tässä selvityksessä tunnistettiin Unkarilaisen Fakopp Enterprise Bt. yrityksen Portable Lumber Grader (Kuva 1), jolla pystytään määrittämään puumateriaalin kimmokerroin syyn pituussuuntaan kulkevan värähtelyn perusteella. Mittalaite soveltuu lehtipuisen ja havupuisen sahataran tutkimuksiin. Tässä työssä tarkastellaan vain havupuisen sahataran luokittelua. Luvun 3.4.1. lähteenä on käytetty tarkasteltavan mittalaitteen esittelyaineistoa sekä käyttöohjetta (Fakop, Portable Lumber Grader Software and hardware guide Version 2.0, Ladattu 14.02.2025)



Kuva 1. Portable Lumber Grader (Kuva: Arto Haaranen)

Kuvassa 2 on laitevalmistajan käyttöohjeessa esitetty kaavio mittausjärjestelystä. Käytännössä mittaus etenee siten, että koekappale tuetaan vaa'an päälle, koekappaleen toiseen päähän sijoitetaan mikrofoni ja toiseen päähän kopautetaan vasaralla. Ohjelmisto määrittelee koekappaleen kimmokertoimen laskennallisesti pituussuuntaisen värähtelyn taajuuden perusteella, kaavan 1 mukaisesti.



Kuva 2. Portable Lumber Grader (Fakopp, Ladattu 14.02.2025, 16s.)

$$\rho = \frac{m}{l * w * h * (1 + \frac{u}{100})} \quad (3)$$

ρ =ominaistiheys [kg/m³]

l =kappaleen pituus [cm]

w =kappaleen leveys [cm]

h =kappaleen korkeus [cm]

u =puun kosteuspitoisuuden erotus vertailuarvosta 18%

$$MOE_{mea} = \frac{m * (2 * l * f)^2 * 0,92 * (1 + \frac{u}{50})}{l * w * h} \quad (4)$$

MOE_{mea} =mitattu kimmokerroin [GPa]

f =mitattu pituussuuntainen värähtelytaajuus [Hz]

Muilta osin merkinnät ja yksiköt samat, kuin kaavassa 3.

Kaavat 3 ja 4. Mitattu kimmokerroin ja tiheys (Fakopp, Ladattu 14.02.2025, 16s.)

Mitatusta (mea =measured) kimmokertoimen arvosta [GPa] saadaan laskennallisesti puumateriaalin lujuusluokitteluun soveltuva kimmokertoimen arvo [GPa]. Laskennallisen kimmokertoimen määrittelyyn tarvitaan lisäksi CKDR (Concentrated Knot Diameter Ratio) arvo, joka on välillä 0...1 [-] ja joka ottaa huomioon puun oksien vaikutuksen puun lujuusominaisuuksiin.

$$MOE = MOE_{mea} - 6,2 * CKDR \quad (5)$$

MOE =luokitteluun käytettävä kimmokerroin [GPa]

MOE_{mea} =mitattu kimmokerroin [GPa]

CKDR=Concentrated Knot Diameter Ratio [-] (0...1)

Kaava 5. Luokitteluun käytettävä kimmokerroin (Fakopp, Ladattu 14.02.2025, 16s.)

Kaavan 3 mukaisesti lasketun kimmokertoimen ja kaavan 1 mukaisesti määritetyn tiheyden perusteella laite luokittelee tarkasteltavan koekappaleen standardin SFS-EN 338 mukaisesti havupuisen sahatavaran lujuusluokkiin (C14...C30).

Käyttöohjeen mukaan mittalaite soveltuu 0,5m–10m pituisille rakenneosille. Koekappaleen massan on oltava alle 2 kertaa vaa’an kapasiteetti eli käyttöohjeen mukaisella laitteistolla koekappaleen paino voi olla enintään $2 \cdot 30\text{kg} = 60\text{kg}$. Laittevalmistaja nettisivuilla on maininta, että koekappaleen paino voisi olla enintään 500kg, joten todennäköisesti laitteistoon on saatavilla eri kapasiteetin vaa’oja. Vaa’an tarkkuudeksi on ilmoitettu $\pm 10\text{g}$.

Suhteellisen pieni painoraja tulee nopeasti laitteen hyödynnettävyyttä rajoittavaksi tekijäksi, erityisesti suuremmilla liimapuu ja CLT kappaleilla. Näin ollen käyttöohjeen mukainen laitteisto sopisikin ehkä isommasta koekappaleesta irrotetun koepalan ominaisuuksien määrittämiseen ja suuremmalla vaa’alla varustettu mittalaitteisto kokonaisten rakenneosien tutkimiseen. Toisena huomiona käyttöohjeesta nousee esille myös mahdolliset yhteensopivuusongelmat nykyisten tietokoneiden kanssa, koska käyttöohjeessa mainituista yhteensopivista käyttöjärjestelmistä tuorein on Windows 7, jonka tuki on päättynyt jo vuonna 2020. Lisäksi käyttöohjeen mukaan laitteisto voidaan liittää tietokoneen USB porttiin, mutta väliin tarvitaan adapteri (RS-232 -> USB).

Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että laitteisto soveltuu suoraan sahatavaran tutkimuksiin ja laitteiston soveltuvuus liimapuun sekä CLT:n osalta pitää arvioida erikseen vertailututkimuksen perusteella. Valmistajan esittelyaineiston perusteella arvioituna testauksen pystyisi tekemään myös ”kenttäolosuhteissa”, kunhan rakenneosa on irrotettu rakenteesta. Rakenteessa paikallaan olevan rakenneosan testaus ei tällä laitteistolla onnistu, koska rakenneosa on asetettava mittauksessa vaa’an päälle. Tulosten luotettavuutta ja laitteiston käyttäjän osuutta mittaustuloksiin on syytä arvioida vertailututkimuksella, jossa samaa koekappaletta tarkastellaan standardin mukaisella testillä sekä tällä laitteistolla.

3.4.2 Mittalaite 2 puun kimmokertoimen ja tiheyden määrittämiseen

Kaupallisesti saatavilla olevista laitteista puun dynaamisen kimmokertoimen (MOE) määrittämiseen on Hitman HM200. Hitman HM200 soveltuu paikan päällä suoritettaviin mittauksiin, joissa halutaan nopeasti arvioida elementtien uudelleenkäyttökelpoisuus ilman näytteiden irrottamista tai laboratoriotestausta. Laite hyödyntää akustisen aallon etenemisnopeutta puuaineksessa jäykkyyden arvioimiseksi, ja se soveltuu sekä sahausprosessien että työmaakäytön tarpeisiin. Laitteen käyttö perustuu stressiaallon aikaansaamiseen ja sen etenemisnopeuden mittaamiseen puun pituussuuntaan (Fibre-gen, 2018).

Laite toimii seuraavasti: käyttäjä painaa mittapäätä puutavaran päätä vasten, jonka jälkeen näyttöön ilmestyy komento ”HIT”. Tämän jälkeen käyttäjä lyö puun

päätä vasaralla, jolloin laite tallentaa akustisen signaalin, laskee etenemisnopeuden (m/s tai km/s) sekä arvioi mittauksen luotettavuuden prosentteina. Näytössä esitetään myös kappaleen pituus sekä siihen perustuva lujuusluokka (Fibre-gen, 2018).

Dynaaminen MOE voidaan laskea seuraavan kaavan mukaisesti:

$$MOE = \rho * v^2 \quad (6)$$

MOE=dynaaminen kimmokerroin [Pa]

ρ =tiheys [kg/m³]

v =akustisen aallon etenemisnopeus [m/s]

HM200 mahdollistaa nopean ja ei-invasiivisen arvioinnin, ja sen tarkkuus on todettu hyväksi etenkin suoraviivaisissa ja ehjissä puuelementeissä. Tulosten toistettavuus on hyvä erityisesti kuivissa ja vakioiduissa olosuhteissa, ja mittaukset voidaan tallentaa ja siirtää analysoitavaksi tietokoneelle USB- tai sarjaporttityh-
teyden kautta (Fibre-gen, 2018).

Laitteessa voidaan määrittää:

- Pituus (2 metriä-50 metriä),
- Aaltovauhti (esim. 3,62 km/s),
- Mittauksen luotettavuus (Confid 0-99 %. Suositus 20-99 %),
- Luokitusvärit ja raja-arvot, esim. "Grade: RED / GREEN / BLUE" käyttäjän määrittelemien nopeusrajojen mukaan.

Haasteina voidaan pitää mittauksen herkkyyttä tukipisteisiin, mittauskulmaan sekä mahdollisiin poikkeamiin poikkileikkauksen muodossa tai massan jakou-
massa. Lisäksi laitteen optimaalinen käyttö edellyttää, että puun päätä voidaan iskeä esteettömästi ja pinta on riittävän ehjä akustisen vasteen tuottamiseksi.

3.4.3 Porausvastuksen mittaus

Porausvastusta mittaavaksi laitteeksi tarkasteluun valittiin IML-RESI Power-Drill, joka näkyy kuvassa 3. Laitteiston valmistaja on saksalainen IML Instrumenta
Mechanik Labor GmbH. Laitteiston esittelyaineiston perusteella, laite soveltuu elävien puiden lisäksi myös puurakenteiden kunnon tutkimiseen. Rakenteista erikseen on mainittuna pylväät, puiset leikkivälineet sekä rakennusten ja silto-
jen puurakenteet. Luvun 3.4.3. lähteenä on käytetty tarkasteltavan mittalaitteen esittelyaineistoa sekä käyttöohjeita (IML, Ladattu 16.02.2025)



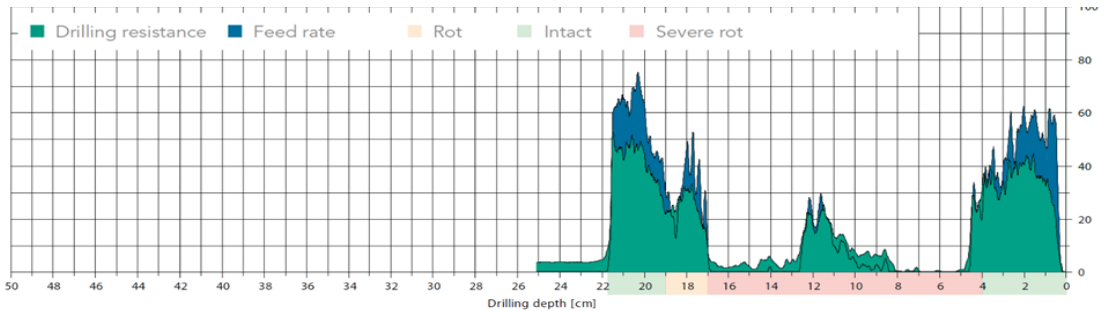
Kuva 3. IML-RESI Power-Drill (Kuva: Mikko Matveinen)

Laitteiston esittelyaineiston mukaan, laite mittaa porausvastusta pyörimisen ja poran etenemiseen tarvittavan voiman perusteella. Poran muoto on määritetty siten, että poran varren kitka ei vaikuta mittaustuloksiin; poran kärki on 3mm leveä ja poran varsi on halkaisijaltaan 1,5mm. Poran kärki on nähtävissä kts. kuva 4. Laitteella pystytään havaitsemaan erityisesti lahovauriot jo vaurioitumisen alkuvaiheessa.



Kuva 4. IML-RESI Power-Drill poran kärki (IML, ladattu 16.02.2025)

Mittalaitteen tuloksista pystytään lukemaan erikseen porausvastus (pyöritys) sekä syöttövoima, joiden perusteella laite piirtää kuvaajan. Laitteen ominaisuuksista riippuen kuvaaja piirtey paperille tai se voidaan saada sähköisessä muodossa. Kuvassa 5 on esitetty ulkoleikkipaikan puurakenteen testausraportti. Kuvasta pystytään lukemaan, että rakenneosan paksuus on ollut noin 22cm ja porauksen aloitusreunalla (kuvassa oikea reuna) on ollut ensin ehjää puuta noin 4cm. Syvemmällä (keskialueella) puu on pahasti lahovaurioitunut 13cm alueelta. Tämän jälkeen on vielä 2cm alue, jossa on havaittavissa lievempää lahovauriota ja loppu 3cm on taas luokiteltu ehjäksi puuksi.

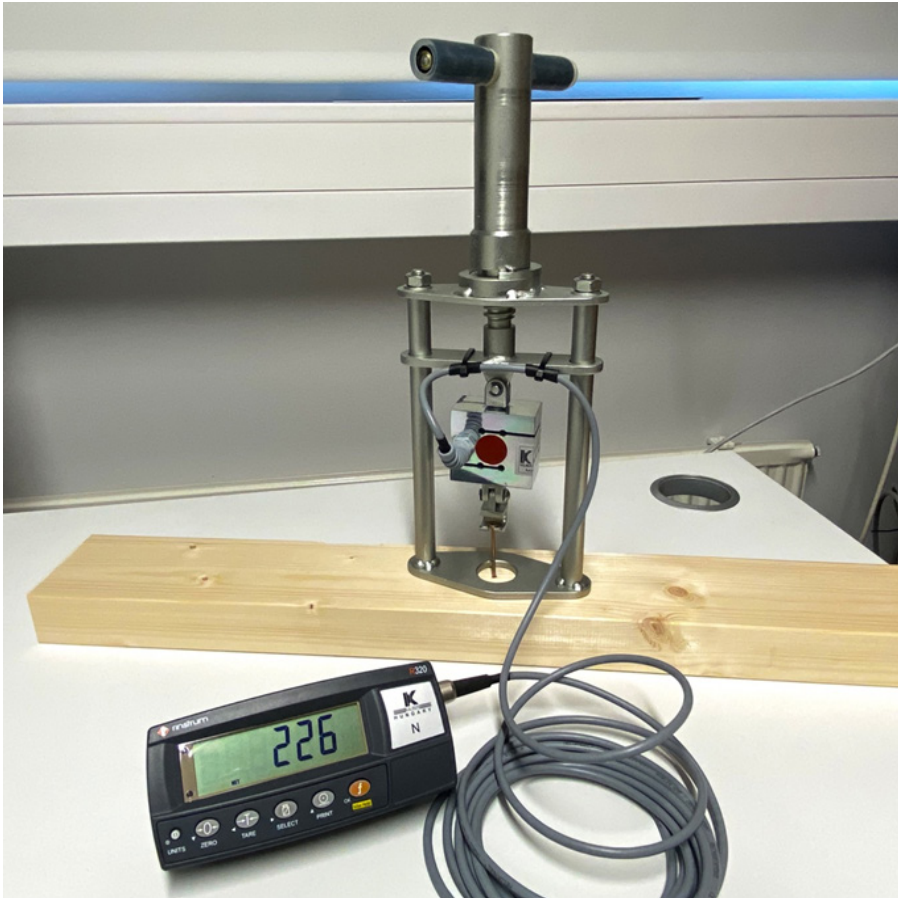


Kuva 5. IML-RESI Power-Drill poran mittaustulokset (IML, ladattu 16.02.2025)

Esittelyaineiston perusteella arvioituna laitteisto soveltuu hyvin kenttämittauksiin, mutta tarjoaa varsin suppeasti tietoa tutkittavasta rakenteesta. Tieto sisäisistä lahovaurioista on toki tarpeellista, mutta usein rakennuksissa olevien puurakenteiden lahovauriot näkyvät rakenteen pinnassa ja ne pystytään toteamaan esimerkiksi piikillä tai puukolla painamalla. Puusiltojen tai esimerkiksi puisten laiturirakenteiden tutkimisessa porausvastusmittaus voisi tarjota hyödyllistä tietoa rakenteen kunnosta.

3.4.4 Ruuvien ulosvetolaite

Luvussa 3.4.1 esitellyn unkarilaisen Fakopp Enterprise Bt. yrityksen laitevalikoimasta löytyy myös mittalaitte Screw Withdrawal Resistance Meter, joka mittaa nimensä mukaisesti kuinka suuri voima tarvitaan, jotta syytä vastaan kohtisuorasti puuhun asennettu ruuvi irtoaa suoraan kannasta vetämällä. Kuvassa 6 on esitetty mittalaitteisto ja koejärjestely.



Kuva 6. Screw Withdrawal Resistance Meter (Kuva: Mikko Matveinen.)

Kuvan perusteella arvioituna laitteistossa on ruuvin kantaan tarttuva osa, joka on kytketty voima-anturiin. Voima-anturin toisessa päässä on kahvalla varustettu kierretanko, jolla saadaan aikaan ulosvetävä voima. Luvun 3.4.4. lähteenä on käytetty tarkasteltavan mittalaitteen esittelyaineistoa sekä käyttöohjetta (Fakopp, Ladattu 14.02.2025)

Käyttöohjeen mukaan ruuvin ulosvetokestävyys korreloi ainakin puumateriaalin lujuusarvojen, tiheyden sekä leikkauslujuuden kanssa, korrelaatiokertoimen ollessa mainituilla ominaisuuksilla välillä 0,72...0,86. Käyttöohjeessa havupuulle sopivaksi ruuviksi mainitaan halkaisijaltaan 4 mm ruuvi, jonka kierteisen osan pituus (kaiketi kokonaan puuhun upotetun) on 18 mm.

Testi antaa koekappaleesta mittaustuloksen vain paikallisesti, joten mittaus on suositeltavaa tehdä koekappaleelle useampaan kohtaan. Mittauskohtien valinnassa on syytä huomioida, että ruuvi ei osu esimerkiksi oksan tai halkeaman kohdalle.

Mittalaitteiston (anturin) suositelluksi maksimiarvoksi ilmoitetaan 5kN, mutta anturi kestää ohjekirjan mukaan kuitenkin 10kN voiman. Mittausanturin tarkkuudeksi ilmoitetaan $\pm 5N$, mutta tarkkuuden osalta ei ole ilmoitettu mittausaluetta, jolla tämä tarkkuus saavutetaan.

Peruskoejärjestelyllä mittaus kohdistuu vain puun pintaan ja vain pistemäisille alueille. Koejärjestelyllä voisi mitata ulosvetokestävyyttä myös syvemmältä puusta, jos puuhun poraisi ensin isomman apureiän ($\varnothing 15...20$ mm), jonka pohjalta ulosvedettävä ruuvi asennetaan ohjeen mukaisesti siten, että kierteinen osa uppoaa puuhun saman verran kuin pintaan asennettu ruuvi (18 mm). Apureiän porauksessa esimerkiksi poranterän kärkipiikin vaikutusta sekä syiden pituus-suuntaista kuormanjakokykyä ulosvetolujuuteen on syytä arvioida. Syvemmälle upotetun ruuvin pituutta kasvatetaan siten, että kanta ylittää ulos puun pinnasta ja mittaus voidaan suorittaa itse mittalaitetta muokkaamatta.

Isommasta koekappaleesta mittauspisteiden määrä ja sijoittelu olisi syytä määrittää siten, että tulokset ovat tilastollisesti merkittäviä ja niiden avulla pystytään määrittämään luotettavasti puun materiaaliominaisuudet. Tuloksia pystyisi ehkä vertaamaan eri lujuusluokkien taulukoituihin lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin. Tarkasteltavan laitteen ilmoittamat ruuvien ulosvetolujuudet olisi syytä varmentaa muilla laitteistoilla ja samoin ruuvien ulosvetotestillä tutkitut koekappaleet olisi syytä tutkia standardien mukaisilla testeillä. Karelia ammattikorkeakoululla on käytössä Ametek Lloyd LD50 puristus-/vetokoelaitte, jolla voisi määrittää ruuvien ulosvetokestävyyskierrosten vertailuarvot sekä suurempi puristin, jolla pystyisi tekemään muut standardien mukaiset testit tutkittaville koekappaleille.

Tarkastelun perusteella voidaan todeta, että laitteisto voisi olla hyödyllinen erityisesti sellaisten puisten rakenneosien tutkimiseen, joita ei vielä ole irrotettu rakennuksesta. Näin olisi mahdollista hankkia uusiokäyttöä ja uudelleenkäyttöä varten tarvittavaa suunnittelun lähtötietoa kantavista rakenteista jo siinä vaiheessa, kun rakennus on vielä käytössä, mutta käytöstä poistoa ja purkamista jo suunnitellaan. Tulosten luotettavuutta ja laitteiston käyttäjän osuutta mittaustuloksiin on syytä arvioida vertailututkimuksella, jossa samaa koekappaletta tarkastellaan standardin mukaisella testillä sekä tällä laitteistolla.

3.4.5 Ultraäänimittalaite puulle

Ultraäänimittaus on ainetta rikkoman tutkimusmenetelmä, jolla pystytään saamaan tietoa materiaalin tasalaatuisuudesta, materiaaliominaisuuksien muutoksista sekä mahdollisista halkeamista, rei'istä tai tyhjätiloista rakenteen sisällä. Tähän selvitykseen tarkasteltavaksi laitteeksi valittiin sveitsiläisen Screening Eagle Technologies AG:n mittalaite Pundit 200.



Kuva 7. Ultraäänimittalaite Pundit 200 (Kuva: Juuso Kokkonen)

Ultraäänimittausmenetelmät perustuvat akustisen aallon etenemisnopeuden mittaamiseen puumateriaalissa. Näitä menetelmiä hyödynnetään laajalti erityisesti NDT-sovelluksissa puun kimmokertoimen (MOE) arviointiin sekä sisäisten vaurioiden tai tiheyserojen paikantamiseen. Ultraäänilaitteita on saatavilla sekä kontaktipohjaisina että ilmakytkentäisinä (air-coupled) versioina.

Tunnetuimpia kaupallisia laitteita ovat Fakopp Ultrasonic Timer, Sylvatest Duo sekä Sonelastic System. Laitteet mittaavat äänen kulkuaikaa kahden anturin välillä, ja tuloksista lasketaan aallon etenemisnopeus. Tätä voidaan käyttää kimmokertoimen arviointiin seuraavalla kaavalla:

$$E=p*v^2 \quad (7)$$

E=dynaaminen kimmokerroin [Pa]

p=puun tiheys [kg/m³]

v=ultraääniaallon etenemisnopeus [m/s]

Ultraäänitekniikan keskeisiä vahvuuksia ovat sen ei-invasiivisuus, mittausten nopeus ja toistettavuus. Tekniikka on erityisen hyödyllinen homogeenisissa ja suorakaiteen muotoisissa rakenteissa. Ilmakytkentäiset versiot mahdollistavat

mittauksen ilman suoraa kontaktia puupintaan, mikä vähentää virheitä, joita voi aiheutua epätasaisista tai likaisista pinnoista.

Haasteita ultraäänimittauksissa aiheuttavat puun anisotropia, kosteuspitoisuus ja lämpötilavaihtelut. Äänen etenemisnopeus on nopeampi puun syiden suuntaan ja hitaampi kohtisuorassa suunnassa, mikä vaatii huolellista mittaussuunnan valintaa ja kalibrointia. Myös puun sisäiset halkeamat ja ontelot voivat vaikuttaa tuloksiin aiheuttamalla signaalin heikkenemistä tai viiveitä.

Sylvatest Duo -laitteessa on integroitu algoritmi, joka korjaa tuloksia puun kosteuspitoisuuden mukaan. Tämä tekee siitä erityisen käyttökelpoisen vanhojen ja vaihtelevissa olosuhteissa olevien puurakenteiden arviointiin. Laite on myös varustettu Bluetooth- ja GPS-toiminnoilla, mikä helpottaa tietojen dokumentointia ja paikannusta kentällä.

Laitteiden mittaamenetelmiä voidaan täydentää visualisointitekniikoilla, kuten aikaratakuvauksella (time-of-flight diffraction, TOFD) tai akustisella tomografialla, joilla voidaan muodostaa kolmiulotteisia rakenteellisia profiileja esimerkiksi pylväiden tai liimarakenteiden sisäisestä eheydestä.

Yhteenvetona ultraäänimittaus on vakiintunut ja monipuolinen NDT-menetelmä, joka tarjoaa tarkkaa ja nopeasti saatavilla olevaa tietoa puun mekaanisista ominaisuuksista. Se soveltuu hyvin sekä yksittäisten komponenttien arviointiin että laajojen rakenteiden kartoitukseen, edellyttäen kuitenkin huolellista mittaasetelmaa ja olosuhdehallintaa.

3.5 Käyttö- ja testausrajaehdot

Kaikille edellä esitellyille laitteistoille ja tutkimusmenetelmille on olemassa laitteen käytön kannalta suositeltavat lämpötila- ja kosteusolosuhteet. Puun materiaaliominaisuudet ja puurakenteen dimensiot muuttuvat myös puun kosteus- ja lämpötilapitoisuuden sekä ympäristön olosuhteiden muuttuessa, joten myös tämä on syytä huomioida, kun suunnitellaan mittalaitteiden käyttöä kenttäolosuhteissa.

Rajaehdot voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan:

1. ympäristöolosuhteisiin liittyvät rajoitukset,
2. mittauslaitteiden tekniset ja mekaaniset edellytykset, sekä
3. materiaalin ja rakenteen ominaisuuksiin liittyvät muuttujat.

Näiden huomioiminen on erityisen tärkeää, kun tavoitteena on arvioida uudelleenkäytettävien tai uusiokäyttöön soveltuvien puurakenteiden mekaanisia ja fysikaalisia ominaisuuksia.

Ympäristöolosuhteisiin liittyvät tekijät, kuten lämpötila ja suhteellinen kosteus (RH), vaikuttavat merkittävästi puun mekaanisiin ja fysikaalisiin ominaisuuksiin.

Standardien, kuten ISO 554 ja ASTM D4933-16, mukaisesti näytteet tulisi tasaannuttaa ennen mittauksia vakioituihin olosuhteisiin, tyypillisesti 20 ± 2 °C ja 65 ± 5 % RH. Ilman tätä toimenpidettä saadut tulokset voivat vääristyä, sillä puun kosteuspuiteisuus vaikuttaa niin äänen nopeuteen, taiputusjäykkyyteen kuin porausvastukseenkin.

Mittalaitteiden tekniset rajoitteet liittyvät anturien herkkyyteen, mittaussnopeuteen, mekaaniseen kulumiseen ja mittausten menetelmän vaatimuksiin kosketuspinnosta. Esimerkiksi ultraäänimittaukset vaativat hyvän kontaktin mittapäiden ja puupinnan välillä, kun taas ilmakykentäiset menetelmät vaativat häiriöttömän signaalipolun. Mittauskulman, -syvyyden ja tukiehtojen vaihtelu voi aiheuttaa virheellisiä tuloksia etenkin resonanssimenetelmissä.

Materiaalin ominaisuuksiin liittyvät rajoitteet korostuvat erityisesti vanhoissa tai sekundäärikäyttöön tarkoitetuissa puuelementeissä. Rakenteelliset poikkeamat, kuten naulat, halkeamat, oksat tai liimasaumojen epähomogeenisuus, vaikuttavat merkittävästi mittaustuloksiin. Lisäksi puun anisotropinen luonne, eli ominaisuuksien suuntariippuvuus, edellyttää mittaussuunnan huomioimista.

Useissa kenttätutkimuksissa (ks. Fan et al., 2024; Cheng et al., 2020) on osoitettu, että erityisesti vanhojen puuelementtien arvioinnissa olosuhteiden hallinta on kriittistä. Puun jäännejuisuus voi vaihdella suuresti riippuen käyttöikästä, säilytysolosuhteista ja mekaanisesta rasituksesta. Siksi testausolosuhteiden vakiointi ja mittausten toistettavuus ovat keskeisiä vaatimuksia luotettavan tuloksen saavuttamiseksi.

Lisäksi otoskoko vaikuttaa olennaisesti tulosten yleistettävyyteen. EN 384 ja ISO 3129 suosittavat, että tilastollisen luotettavuuden takaamiseksi arvioitavien näytteiden lukumäärän tulee olla vähintään 30 kappaletta yhtä materiaalieryä kohden. Jos näytteiden lukumäärä (otoskoko) on tätä pienempi, tulee se huomioida. Käytännössä tämä tarkoittaa, että yksittäisten rakenneosien perusteella ei voida tehdä kattavia johtopäätöksiä ilman laajempaa näytepopulaatiota tai referenssituloksia.

Käyttö- ja testausrajaehtojen huolellinen huomioiminen on välttämätöntä, jotta NDT- ja SDT-menetelmien tulokset ovat luotettavia, vertailukelpoisia ja sovellettavissa päätöksentekoon uudelleenikäytön kontekstissa. Mittausolosuhteiden vakiointi, materiaalin ominaisuuksien tuntemus ja testausmenetelmien kalibrointi muodostavat yhdessä perustan rakenteellisen arvioinnin validiteetille.

Oheisessa taulukossa on esitelty ja luokiteltu kootusti laitteistojen ja menetelmien käytön rajoituksia olosuhteiden perusteella. Vertailussa on huomioitu, soveltuuko laite tai menetelmä kenttämittauksiin kaikissa olosuhteissa vai pelkästään lämpötilan ollessa veden jäätymispisteen yläpuolella.

Taulukko 3. Testauslaitteiden kuvaus sekä käyttöolosuhteet

Laite (valmistaja/ tuotenimi)	Käyttölämpötila	Suurin sallittu puun kosteuspitoisuus
Fakopp Enterprise Bt. / Portable Lumber Grader,	+5...+40°C (Mikrofonin käyt- tölämpötila)	Vertailukosteuspitoisuus 18%; mittaukseen tarvitaan erotus verrattuna tähän arvoon.
fibre-gen limited / Hitman HM200		
IML Instrumenta Mechanik Labor GmbH. / IML-RESI Power-Drill	Ei ilmoitettu.	Ei ilmoitettu.
Fakopp Enterprise Bt. / Screw Withdrawal Resistance Meter	-10...+40°C (Laite) +10...+40°C (Näyttö)	Ei ilmoitettu.
Screening Eagle Technologies AG / Pundit 200	-10...+50°C (Näyttö) 0...+40°C (Virtalähde)	Ei ilmoitettu. Ilman suhteellinen kosteus oltava alle 95% RH. (Näyttö). Vain sisäkäyttöön, ilman suh- teellinen kosteus oltava alle 95% RH. (Virtalähde)

Lähteet:

Fakopp Enterprise, Portable Lumber Grader, Software and hardware guide, Ver-
sion 2.0, ladattu 14.02.2025, 16s.

Fakopp Enterprise, Screw withdrawal resistance meter, User's guide, ladattu
14.02.2025, 16s

fibre-gen HQ. Hitman HM200. Operating manual, ladattu 20.05.2025, 19s.

IML - Instrumenta Mechanik Labor System GmbH, IML-RESI PowerDrill, Drill resis-
tance- and feed force measurement for trees and timber, ladattu 16.02.2025, 6s.

IML - Instrumenta Mechanik Labor System GmbH, Measured Variables of IML-RE-
SI PowerDrill, Drilling resistance and feed force measurement, ladattu 16.02.2025,
6s.

IML - Instrumenta Mechanik Labor System GmbH, IML WoodInspector, Intelligent measurement curve evaluation for automated wooden pole inspections, ladattu 16.02.2025, 6s.

Screening Eagle, Pundit Ultrasonic, Pundit 200, 13.03.2025, ladattu 08.05.2025, 4s.

Screening Eagle, Pundit, Ultrasonic Transducers Data Sheet, 2018, ladattu 08.05.2025, 8s.

Screening Eagle, Pundit, Quick Start Guide & Product Certificates, 2016, ladattu 08.05.2025, 28s.

Screening Eagle, Pundit, Operating Instructions, 2017, ladattu 08.05.2025, 51s.

Screening Eagle, Pundit, Using EXCEL to determine SONREB curve coefficients, ladattu 08.05.2025, 4s.

4 Tutkimustulosten priorisointi ja tietotarpeiden jäsentely

4.1 Tietotarpeet rakennetekniikan näkökulmasta

Varsin tyypillistä on, että talonrakennuskohteissa taivutettujen rakenneosien (palkkien) mitat määräytyvät käyttörajatilan rajoitusehtojen (taipuman ja värähtelyn) perusteella, kun taas murtorajatilan mitoitussehtojen (esimerkiksi taivutuskestävyys ja leikkauskestävyys) käyttöasteet jäävät pienemmiksi. Käyttörajatilan tarkasteluissa rakenneosan jäykkyys (EI) [Nmm^2] onkin usein tärkein tarkasteltava ominaisuus ja jäykkyys määräytyy geometrinen ominaisuuksien lisäksi materiaalin kimmokerroimen perusteella. Myös aksiaalisesti puristettujen sauvojen (pilarien) tarkasteluissa tarvitaan kimmokerroin, kun määritetään rakenneosan nurjahduskestävyyttä tai rakenneosan taipumaa tai rakenteen sivusiirtymää. Näin ollen uudelleen käytettävästä rakenneosasta olisi selvitettävä ensisijaisesti kimmokerroin (E) [N/mm^2] tai [MPa]. Puun rakenne ja ominaisuudet huomioiden kimmokerroin on erilainen syyn suunnasta ja myös kuormituksen suunnasta riippuen, joten mahdollisuuksien mukaan uudelleen käytettävästä rakenneosasta on syytä selvittää kimmokerroimen arvot erilaisia käyttötarkoituksia varten tai vaihtoehtoisesti selvitystyö voidaan rajata jo päätetyn uudelleenkäyttötarkoituksen mukaisesti.

Mitoitustarkasteluissa tarvitaan myös puun lujuusominaisuuksia (esimerkiksi taivutuslujuus, leikkauslujuus, syyn suuntainen puristuslujuus), mutta kuten edellä todettiin, usein jäykkyysominaisuudet ovat lopulta tärkeämmässä roolissa. Lujuusominaisuudetkin esitetään yleensä syyn suuntaisena tai syytä vastaan kohtisuorana arvona yksikössä [N/mm^2] tai [MPa].

4.2 Tietotarpeet materiaalitekniikan näkökulmasta

Materiaalitekniikan näkökulmasta puurakenteiden uusiokäyttö edellyttää tietoa puumateriaalien fysikaalisista, kemiallisista ja mekaanisista ominaisuuksista. Materiaalien uudelleenkäytettävyyden arvioinnissa korostuu tarve ymmärtää paitsi rakenteellisen suorituskyvyn nykytilanne kuin myös sen mahdollinen muuttuvuus tulevissa käyttöolosuhteissa tai käyttötarkoituksessa.

Mittausten toistettavuutta ja vertailukelpoisuutta ohjaavat EN-standardit kuten SFS-EN 384, SFS-EN 789 ja SFS-EN 14358. Kyseiset standardit määrittävät puumateriaalien karakterististen arvojen laskennan ja testausmenetelmien periaatteet. Lisäksi ASTM D4933-16 ja ISO 554 ohjeistavat mittausolosuhteiden tasaannuttamisen osalta. Esimerkiksi kosteuspitoisuuden vakiointi ennen mittauksia on edellytys luotettavien MOE- ja MOR-arvojen määrittämiselle.

Toinen tärkeä näkökulma on materiaalin sekä rakenneseosan tai tuotteen historia: miten pitkäaikaiskäyttö, viruminen, kosteuden vaihtelu ja mahdolliset vauriomekanismit ovat vaikuttaneet puun sisäiseen rakenteeseen. Tätä voidaan arvioida ei-rikkovilla menetelmillä (esim. ultraääni, porausvastus, resistanssimittaukset), mutta monissa tapauksissa tarvitaan myös referenssivertailua ainetta rikkovien testien avulla. Käsitteet kuten old wood, historical timber ja in-service timber viittaavat eri ikäluokkiin, joiden lujuusominaisuudet vaihtelevat empiirisesti ja tilastollisesti merkittävästi.

”Old wood” viittaa käytettyyn puumateriaaliin, joka on poistettu aiemmista rakenteista ja jota tarkastellaan mahdollisesti uudelleen käytettäväksi. Se eroaa uudesta puusta muun muassa rakenteellisen käyttäytymisen, kosteuden tasaantumisen ja geometrian vaihteluiden osalta. Vanhoilla puurakenteilla voi olla esimerkiksi vaihtelevia poikkileikkauksia ja ei-standardin mukaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat lujuusluokittelun toistettavuuteen.

”Historical timber” viittaa historiallisissa rakennuksissa käytettyihin puuelementteihin, jotka ovat usein yli 100 vuotta vanhoja. Näitä tarkastellaan osana kulttuuriperinnön säilyttämistä. Ne voivat sisältää näkyviä ja näkymättömiä vaurioita (esim. hyönteistuhot, lahovauriot) ja niiden mekaanisia ominaisuuksia arvioidaan tyyppillisesti ei-rikkovilla tutkimuksilla ja tarkastuksilla.

”In-service timber” tarkoittaa rakenteessa edelleen käytössä olevaa puuta. Tätä arvioitaessa ei voida käyttää laboratoriossa tehtäviä rikkovia testejä, koska ne edellyttäisivät rakenteen rikkomista. Sen sijaan käytetään ei-rikkovia ja vähän rikkovia menetelmiä, kuten ultraääntä, resistanssia, ja visuaalista tarkastusta. Käytössä olevan puun arvioinnissa huomioidaan esimerkiksi kosteus, vauriot ja jäykkyysmuutokset ajan myötä.

Lisäksi materiaaliteknisessä tarkastelussa on huomioitava puun rakennusfysikaaliset ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus, kosteuden tasaansopeus ja

hygrotermiset vasteet. Erityisesti uusiokäytössä esimerkiksi CLT-levyissä tai liimapuukomponenteissa näillä tekijöillä on merkitystä suunniteltaessa rakenteen käyttöikää ja toimintaympäristöä.

Lisäksi haitta-aineiden ja päästöjen osalta puumateriaalien sisältämät mahdolliset yhdisteet kuten formaldehydi, PAH-yhdisteet tai vanhojen pintakäsittelyjen jäämät voivat vaikuttaa uusiokäytön soveltuvuuteen. Näiden tunnistamiseen tarvitaan laboratoriopohjaisia analyysejä ja mahdollisesti myös raja arvovertailuja ympäristönormien mukaisesti.

Uusiokäyttöön tarkoitetuissa materiaaleissa puhtausaste ja vierasesineiden esiintyminen ovat teknisesti ja logistisesti kriittisiä arviointikohteita. Pintojen laatu, jäännöskäsittelyaineet sekä mekaaniset kiinnikkeet (naulat, ruuvit, levyt) tulee tunnistaa ja arvioida, voidaan ne poistaa, ohittaa tai neutraloida materiaaliprosessin aikana. Tarvittaessa voidaan soveltaa mekaanisia tai kemiallisia modifiointiprosesseja kuten "densified wood" -käsittelyitä, joilla parannetaan puun lujuusominaisuuksia tiivistämällä sen rakenne.

Tietotarpeet vaihtelevat myös käyttötarkoituksen mukaan. Mikäli materiaali otetaan käyttöön vastaavissa olosuhteissa, riittää arviointi peruslujuusominaisuuksista ja ulkoisesta kunnosta. Sen sijaan uusiokäyttö muokattuna tai vahvistettuna edellyttää lisätietoa muun muassa liimasaumojen kestävydestä, kerroskohtaisten ominaisuuksien arvioinnista (esim. CLT:n in-plane ja out-of-plane ominaisuudet) ja rakenteen modifioinnin vaikutuksista jäykkyyteen ja murtoikäikäytymiseen.

Yhteenvetona materiaalitekniikan näkökulmasta tärkeimmät tietotarpeet voidaan esittää seuraavasti:

- mekaaniset ominaisuudet (MOE, MOR, puristus, veto, leikkaus),
- kosteuden vaikutus ja RH-tasaantuminen,
- puun historia, ikä ja vaurioprofiili,
- haitta-aineiden ja päästöjen arviointi,
- puhtaus- ja vierasesinearviointi,
- muokkaus- ja parannuspotentiaali (mech./chem.),
- sovellettavat standardit ja mittaolosuhteet.

Liittyvät lähteet:

SFS-EN 1990 + A1 + AC "EUROKODI. RAKENTEIDEN SUUNNITTELUPERUSTEET" Liite D

EN 384: Structural timber. Determination of characteristic values of mechanical properties and density.

ISO 3129: For sampling of wood for physical/mechanical tests.

ASTM D4933-16 (2021). 2021. Standard Guide for Moisture Conditioning of Wood and Wood-Based Materials. ASTM International. 8 p.

ISO 554. 1976. Standard atmospheres for conditioning and/or testing- Specifications. Switzerland: International Organization for Standardization. 1 p.

SFS-EN 14358. 2016. Timber structures. Calculation and verification of characteristic values. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 16 p

SFS-EN 789. 2004. Timber structures. Test methods. Determination of mechanical properties of wood based panels. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto. 33 p.

4.2.1 Sovellettavat standardit ja testausolosuhteiden vakiointi

Puurakenteiden mekaanisten ja fysikaalisten ominaisuuksien arviointi vaatii standardoitua lähestymistapaa, jotta mittau tulokset ovat toistettavia ja vertailukelpoisia eri tutkimusten ja käyttötarkoitusten välillä. Sovellettavat testistandardit ja vakioidut testausolosuhteet ovat keskeinen osa luotettavaa arviointiprosessia erityisesti silloin, kun kyseessä ovat uusiokäyttöön tarkoitetut rakenteet, vanhat puuosat tai historiallisista kohteista peräisin olevat elementit.

Rakenteellisen lujuuden ja kestävyuden varmistamiseksi puumateriaalien testauksessa sovelletaan useita kansainvälisiä standardeja. Eurokoodin SFS-EN 1990 + A1 + AC (2021) mukaan rakenteellisten materiaalien suunnitteluperusteiden tulee perustua tilastollisesti varmennettuihin ominaisuusarvoihin, joiden laskenta ja testaus tulee suorittaa hyväksytyillä standardimenetelmillä (SFS-EN 1990, Liite D).

Liitteessä D määritellään seitsemän testityyppiä (D3), kuten materiaalien ominaisuustestit, rakenteelliset kestävyyskokeet, tuotantotarkastukset ja rakennusaikaiset testit. Soveltaminen uusiokäyttöön tarkoitetun puun testauksessa keskittyy erityisesti kohtiin:

- b) materiaalin mekaanisten ominaisuuksien määrittäminen,
- d) rakenneosien kestävyysmallien epävarmuuksien pienentäminen,
- g) jälkikäsitteilyn tarkastustestit, kuten värähtely- ja kimmoisuusanalyysi.

Testausolosuhteiden vakiointi on erityisen tärkeää, koska puun mekaaniset ominaisuudet vaihtelevat kosteuden ja lämpötilan mukaan. Standardit ISO 554 (1976) ja ASTM D4933-16 (2021) määrittävät ilmankosteuden ja lämpötilan vakiointiolosuhteet ennen testien suorittamista, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia. Tämä on oleellista erityisesti, kun määritetään MOE- ja MOR-arvoja.

Kenttätestien osalta on tärkeää huomioida, että olosuhteiden hallinta on rajoitetumpaa kuin laboratoriotilanteissa. Kenttäolosuhteissa tehtävät testit altistuvat ympäristötekijöiden vaihtelulle (lämpö, kosteus, värinä), mikä voi vaikuttaa erityisesti ei-rikkovien menetelmien kuten ultraääni- tai stressiaaltoanalyysien

tulkittavuuteen. Tämän vuoksi tarvitaan tarkkoja kalibrointikäytäntöjä ja olosuhteiden dokumentointia.

Uusiokäyttöön soveltuvan puun arvioinnissa tarvitaan erityistä huomiota myös näytteen valintaan, ikään ja vaurioprofiiliin. ISO 3129 ja EN 384 ohjeistavat fyysikaalis-mekaanisten testien näytteenottoa ja ominaisarvojen laskentaa.

Testausolosuhteet ja käytännön erot:

- Laboratoriotestit suoritetaan vakioituissa olosuhteissa (esim. ISO 554, 20°C / 65 % RH).
- Kenttätestit altistuvat lämpötilan ja kosteuden vaihteluille, mikä vaikuttaa esimerkiksi ultraääni-aikojen ja stressiaaltojen etenemiseen.
- Näytteiden edustavuus on ratkaiseva erityisesti vanhoissa tai historiallisissa puurakenteissa.
- Suositukset vanhan puun arvioinnissa
- Puun ikä ja alkuperä tulee dokumentoida.
- Näytteen koko, sijainti ja vauriotiedot tulee huomioida.
- Vertailuarvot MOE- ja MOR-mittauksille tulee määrittää standardoiduissa olosuhteissa.
- Käytettävä yhdistelmä NDT- ja DT-menetelmiä vertailukelpoisuuden ja arviointitarkkuuden parantamiseksi.

Testauksen luotettavuus perustuu testityypin, standardin ja olosuhteiden yhteensovittamiseen. Vanhojen rakenteiden uudelleenkäyttö edellyttää erityistä huomiota näytteen edustavuuteen, kosteustasapainon saavuttamiseen ennen mittausta sekä testimenetelmän herkkyyden ymmärtämiseen. Tämä on edellytys sille, että testituloksia voidaan käyttää turvallisuuden arvioinnin ja jatkokäytöspäätösten pohjana.

Liittyvät lähteet:

SFS-EN 1990 + A1 + AC: Eurokoodi Rakenteiden suunnitteluperusteet

EN 384: Puun mekaanisten ominaisuuksien ja tiheyden karakterististen arvojen määrittäminen

EN 408: Rakenteellisen ja liimapuupuun fyysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

EN 14358: Karakterististen arvojen laskenta ja varmennus

EN 789: Puulevyjen mekaanisten ominaisuuksien testaus

ISO 554 (1976): Testausolosuhteiden vakiomäärittäykset (lämpötila ja RH)

ASTM D4933-16 (2021): Puu- ja puupohjaisten materiaalien kosteuspitoisuuden vakiointi

ISO 3129: Näytteenotto fysikaalisia ja mekaanisia testejä varten

4.2.2 Keskeiset arvioitavat ominaisuudet

Uudelleenkäyttöön tarkoitettujen puumateriaalin arviointi edellyttää laaja-alaista ymmärrystä sen fysikaalisista ja mekaanisista ominaisuuksista, jotka vaikuttavat sekä rakenteen turvallisuuteen sekä myös käyttökään. Vanhojen ja käytössä olleiden rakenteiden kohdalla näissä ominaisuuksissa voi ilmetä merkittäviä poikkeamia verrattuna uusiin materiaaleihin, mikä johtuu muun muassa ikäännyttämisestä, pitkäaikaisesta kuormituksesta ja vaihtelevista ympäristöolosuhteista.

Mekaaniset ominaisuudet muodostavat perustan rakenteellisen toimivuuden arvioinnille. Taivutuslujuus (Modulus of Rupture, MOR) kuvaa puun kykyä kestää maksimikuormitusta taivutuksessa ennen murtumista. Vaikka suurin osa tutkimuksista ei ole havainnut merkittävää muutosta vanhan puun MOR-arvoissa, on yksittäisissä tapauksissa raportoitu jopa 60 % heikkenemistä. Tämä osoittaa, että vanhojen rakenteiden lujuutta ei voida olettaa oletusarvoisesti vastaavan uuden puun arvoja.

Toinen keskeinen suure on kimmokerroin (Modulus of Elasticity, MOE), joka kertoo puun jäykkyydestä. Tutkimukset ovat osoittaneet, että vanhan puun MOE-arvot eivät ylitä uuden puun vastaavia, mikä vahvistaa käsitystä kuormitushistorian vaikutuksesta mekaanisiin ominaisuuksiin. MOE voidaan määrittää sekä dynaamisesti – esimerkiksi resonanssitaajuusanalyysin avulla – että staattisesti EN 789-standardin mukaisesti (SFS-EN 789, 2004).

Muita olennaisia mekaanisia ominaisuuksia ovat puristuslujuus (f_c), vetolujuus (f_t) ja leikkauslujuus (f_v). Puristuslujuus on erityisen merkittävä pystyrakenteissa kuten pilareissa, joissa kuormitus suuntautuu syiden suuntaisesti tai sitä vastaan. Vetolujuus ja leikkauslujuus ovat puolestaan kriittisiä liitoksissa ja kiinnityksissä, joissa esiintyy vetäviä tai leikkaavia jännityksiä. Ajan kuluessa tapahtuvat jäännösmuodonmuutokset ja viruminen voivat lisäksi alentaa kantavuutta, erityisesti jos kosteusolosuhteet vaihtelevat.

Rakennusfysikaaliset ominaisuudet täydentävät arviointia, sillä pelkkä lujuus ei riitä ennustamaan rakenteen suorituskykyä muuttuvissa olosuhteissa. Puun tiheys ja huokoisuus vaikuttavat suoraan sen jäykkyyteen ja kykyyn absorboida kosteutta. Hygroσκοoppiset ominaisuudet puolestaan määrittävät, kuinka herkästi puu reagoi ilmankosteuden vaihteluun, mikä vaikuttaa rakenteen mittapyyvyteen ja voi aiheuttaa sisäisiä jännityksiä sekä halkeamia.

Lämpöjohtavuus ja lämpölaajeneminen ovat fysikaalisia ominaisuuksia, joilla on merkitystä erityisesti silloin, kun puuta käytetään osana eristäviä tai ilmatii- viitä rakenteita. Tällöin materiaalin lämpötekninen vakaus vaikuttaa sekä ener- giataloudellisuuteen että rakenteelliseen toimivuuteen.

Materiaalin käyttöikä ja vauriohistoria eli niin sanottu in-service condition on ratkaiseva tekijä arvioitaessa vanhan puun kelpoisuutta. Käyttöhistoria, kuten altistuminen vaihteleville kosteusolosuhteille ja pitkäaikaisille kuormituksille, vai- kuttaa puun sisäiseen solukkorakenteeseen ja sitä kautta jäännöslujuuteen.

Halkeamat ovat erityinen huolenaihe: pinnalliset kuivumishalkeamat (checks) ja läpimenevät rakenteelliset halkeamat (splits) voivat merkittävästi alentaa kantavuutta. Näiden vaikutus riippuu halkeamien syvyydestä, suunnasta ja si- jainnista rakenteessa. Lisäksi on tärkeää varmistaa, että mittaukset tehdään edustavista kohdista, koska kosteuden epätasainen jakautuminen voi vääristää tuloksia.

Haitta-aineet ja päästöt muodostavat oman arviointikokonaisuutensa, joka liit- tyy puumateriaalin soveltuvuuteen erityisesti sisäkäytössä tai päästöherkissä ympäristöissä. Vanha puu voi sisältää formaldehydiä, VOC (haihtuvat orgaa- niset yhdisteet mm. mikrobiperäiset päästöt) ja PAH-yhdisteitä tai jäämiä van- hoista pintakäsittelyaineista, jotka voivat rajoittaa tai estää sen uusiokäyttöä. Tällöin tarvitaan kemiallisia analyysejä, kuten kaasukromatografiaa (GC-MS) tai massaspektrometriaa, joiden avulla voidaan luokitella materiaali ympäris- tövaatimusten mukaisesti.

4.3 Tärkeimmät tietotarpeet uudelleenkäytön ja uusio- käytön kannalta

Uudelleenkäyttö ja uusiokäyttö asettavat erilaisia vaatimuksia puumateriaalien ja rakenneosien arvioinnille. Uudelleenkäytöllä viitataan rakenteiden tai kompo- nenttien hyödyntämiseen mahdollisimman alkuperäisessä muodossaan esi- merkiksi liimapuupalkin siirto rakennuksesta toiseen. Uusiokäytöllä puolestaan tarkoitetaan materiaalin mekaanista tai kemiallista uudelleenprosessointia toi- seen käyttötarkoitukseen, esimerkiksi sahatavaran jalostamista uusiksi liima- tuiksi tuotteiksi tai paneeleiksi. Kumpikin käyttötapa edellyttää tarkkaa ja koh- dennettua tietoa materiaalin kunnosta, ominaisuuksista ja luotettavuudesta.

Uudelleenkäytössä keskeisiä tietotarpeita ovat:

- mittatarkkuus ja muotostabiilisuus, jotka vaikuttavat suoraan elementin soveltuvuuteen uuteen rakenteeseen,
- liitospintojen kunto ja mahdollisten kiinnikkeiden sijainti sekä niiden irro- tettavuus,
- mekaaniset perusominaisuudet kuten MOE ja MOR, erityisesti kompo- nenttien kantavuuden arvioinnissa,

- vaurioiden, lahon tai muiden vaurioitumismekanismien tunnistaminen ei-rikkovilla tai vähän rikkovilla menetelmillä,
- visuaalinen eheys ja luokitus standardien mukaisesti (esim. EN 14081-1),
- materiaalin historia ja mahdollinen käyttökuormitus, joka vaikuttaa jäännöslujuuteen ja virumaan.

Uusiokäytön yhteydessä korostuvat seuraavat tietotarpeet:

- materiaalin homogeenisuus ja tiheysprofiili, joka vaikuttaa jatkojalostusprosessien onnistumiseen (esim. liimaus tai CNC-työstö),
- kemiallinen koostumus ja haitta-aineet (formaldehydit, VOC ja PAH-yhdisteet), joilla on vaikutusta terveyteen, ympäristöön ja lopputuotteen hyväksyntään,
- sisäiset vauriot kuten halkeamat, liimasaumojen heikentyminen ja sisäiset jännitykset, jotka voivat vaikeuttaa uusioprosessointia,
- puhtausaste, mukaan lukien vierasesineet, maalipinnat ja kyllästysainejäämät,
- uusiokäyttöön liittyvien modifikaatioiden vaikutus ominaisuuksiin, kuten tiivistys, lämpökäsittely tai kemiallinen modifiointi.

Molemmassa käyttötarkoituksissa on olennaista muodostaa yhtenäinen arvio materiaalin kelpoisuudesta soveltamalla yhdistelmiä ei-rikkovista, vähän rikkovista ja mahdollisista verifioivista ainetta rikkovista mittauksista. Näiden lisäksi tulee huomioida sekä rakennetekniikan että materiaalitekniikan näkökulmat.

Yhteenvetona tärkeimmät tietotarpeet uudelleenkäytön ja uusiokäytön kannalta voidaan jäsentää seuraavasti:

1. Lujuus- ja jäykkyysominaisuudet (MOE, MOR, vetolujuus, puristuslujuus).
2. Kosteus- ja lämpövakaus sekä RH:n tasaantuminen mittausten ja käytön aikana.
3. Visuaalinen ja mekaaninen eheys vauriot, halkeamat, kiinnikkeet, puhtaus.
4. Historia ja käyttöolosuhteet kuormitus, ikä, viruminen, käyttöympäristö.
5. Modifioitavuus (onko materiaali jatkojalostettavissa turvallisesti ja tehokkaasti).

Tietojen pohjalta voidaan muodostaa arviointimalli, jonka avulla voidaan valita sopiva käyttökohde puumateriaalille. Tällöin voidaan ohjata materiaalivirtoja kohti optimaalista uusiokäyttöä tai uudelleenkäyttöä siten, että rakennusturvallisuus, materiaalitehokkuus ja kestävyystavoitteet toteutuvat. Sekä arvioidaan eri tutkimusmenetelmien tarjoamaa tietoa (määrällinen/laadullinen arviointi) ja tarkastellaan saavutettavia tutkimustuloksia myös kustannusten näkökulmasta (panoshyöty vertailu)

Tutkimusmenetelmien ja niiden tuottamien tulosten käytännön hyödyllisyys riippuu ennen kaikkea siitä, kuinka hyvin menetelmät soveltuvat eri vaiheisiin rakenteiden purusta uusiokäyttöön ja edelleen suunnittelun ja toteutuksen tueksi. Menetelmien käyttökelpoisuus määrittyy paitsi niiden teknisestä tarkkuudesta

myös käytettävyydestä, kustannustehokkuudesta ja tulosten tulkinnan yksiselitteisyydestä. Käytännön sovelluksissa korostuvat mittausmenetelmien joustavuus, toistettavuus ja skaalautuvuus erilaisiin rakenteisiin ja olosuhteisiin.

Ei-rikkovat menetelmät, kuten ultraääni, stressiaallot, resonanssifrekvenssimitaus ja porausvastusprofiilit, tarjoavat nopean keinon arvioida puun mekaanista kuntoa ja sisäisiä vaurioita ilman, että materiaalia tarvitsee tuhota tai merkittävästi vaurioittaa. Ne mahdollistavat suuren otoskoon analysoinnin työmaalla tai varastoinnin yhteydessä, mikä on erityisen tärkeää mm. massiivipuu-elementtien kohdalla. Tällöin rakenteet voidaan esivalita tarkempaan edustavaan otokseen ennen tarkempaa mekaanista analyysyä tai jatkojalostusta.

Vähän rikkovat testit, kuten ruuvin ulosvetotesti tai pienikokoinen taivutuskoe, tarjoavat lisävarmuutta silloin, kun ei-rikkovat menetelmät antavat epävarman tuloksen tai kun tulosten perusteella tehdään kriittisiä päätöksiä kantavuuden suhteen. Esimerkiksi kantavien liimapalkkien tai CLT-elementtien uusiokäyttöä edellyttää vähintään yhdistelmä tutkimusta, jossa lujuus- ja jäykkyysarvot varmistetaan usealla eri menetelmällä.

Käytännössä tutkimustulosten hyödyntäminen edellyttää, että:

- mittaukset dokumentoidaan selkeästi (paikka, aika, olosuhteet),
- mittausmenetelmät on kalibroitu ja vertailukelpoisia standardimenetelmiin,
- tulokset voidaan yhdistää suunnitteluarvoihin (esim. EN 384, EN 1995),
- päätöksentekijöillä (esim. rakennesuunnittelijat, purkuyritykset) on riittävä koulutus ja tulkintakyky.

Lisäksi tutkimusmenetelmien hyödyllisyyttä lisää se, että niillä voidaan tunnistaa myös muita uudelleenkäyttöön vaikuttavia tekijöitä, kuten:

- liitosten kunto ja käytettävyys (esim. jälkikäytettävät tai uudelleenkäytettävät liitokset),
- materiaalin puhtaus ja vieraiden tai vaurioituneiden osien poistotarve,
- geometrinen muuntelu ja mittatarkkuus uusissa asennuksissa,
- sopivuus CE-merkintään tai muuhun hyväksyntäprosessiin.

Näin ollen tutkimustulokset eivät palvele vain materiaalin arviointia, vaan myös laajempaa rakennustuotteen elinkaariarviointia, suunnittelupäätöksiä ja standardien mukaista turvallisuustasoa. Hyödynnettävyys kasvaa entisestään, kun tuloksia käytetään tietomallipohjaisessa suunnittelussa (BIM), jossa rakenneosien ominaisuudet voidaan liittää digitaalisiin identiteetteihin ja hallita uudelleenkäytön kokonaisuutta järjestelmällisesti.

Voidaankin todeta, että tutkimusmenetelmien ja tulosten käytännön hyödyllisyys kytkeytyy kykyyn tuottaa luotettavaa, toistettavaa ja sovellettavissa olevaa tietoa päätöksenteon tueksi. Mitä paremmin mittaustiedot on yhdistetty rakenteellisiin vaatimuksiin, ja mitä helpommin ne ovat siirrettävissä käyttöön suunnittelu- ja toteutusvaiheessa, sitä suurempi niiden vaikutus on kestävänsä rakentamisen ja materiaalitehokkuuden edistämässä.

5 Tulosten tulkinta

Tutkimusmenetelmien tuottamien tulosten tulkinta muodostaa kriittisen vaiheen uudelleenkäytön ja uusiokäytön päätöksenteossa. Tulkinnassa yhdistyvät tekninen osaaminen, standardien tuntemus sekä materiaali-kohtainen asiantuntemus. Tulosten oikea-aikainen ja tarkoituksenmukainen tulkinta varmistaa, että rakenneosat tai puumateriaalit ohjataan sellaisiin käyttökohteisiin, joissa niiden ominaisuudet ja tekninen suorituskyky vastaavat vaatimuksia turvallisuuden ja kestävyystavoitteiden näkökulmasta.

Tulosten tulkinnassa on keskeistä erottaa, ovatko havaitut ominaisuudet tai poikkeamat merkityksellisiä kyseessä olevan käyttökohteen kannalta. Esimerkiksi matala porausvastus voi viitata lahovaurioon, mutta se voi myös johtua paikallisesta tiheyden vaihtelusta, jolla ei aina ole rakenteellista merkitystä. Tämän vuoksi tulkinnan tulee perustua useamman mittausmenetelmän ja havaintotiedon yhdistelmään.

Tulosten arvioinnissa voidaan käyttää viitearvoja, jotka on määritelty esimerkiksi standardeissa (EN 384, EN 14358, EN 338) tai julkaistussa tutkimuskirjallisuudessa. Nämä viitearvot mahdollistavat mittaustulosten suhteuttamisen tunnettuun lujuusluokitukseen tai hyväksymiskriteeristöön. Käytännössä tämä tarkoittaa esimerkiksi sitä, että dynaaminen MOE-arvo (> 9 GPa) voidaan tulkita viittaavan C24-lujuusluokkaan edellyttäen, että mittausolosuhteet, näytteen kosteus ja testausgeometria ovat vakioituja.

Tulosten validiteetti edellyttää mittausketjun hallintaa: mittalaitteen kalibrointi, mittaustekniikan toistettavuus, olosuhteiden dokumentointi ja mahdollinen tulosten korjaus suhteessa kosteuspitoisuuteen tai mittaussuuntaan (mm. syysuunta). Tämä korostuu erityisesti kenttäolosuhteissa tehtävissä mittauksissa, joissa vaihtelua syntyy helposti ulkoisten tekijöiden vaikutuksesta.

Tulkinnan yhteydessä on myös arvioitava mittaustulosten tilastollinen merkittävyys. Yksittäinen mittaus ei useinkaan riitä luotettavan johtopäätöksen tekemiseen, vaan tarvitaan riittävän suuri otos ja tilastollinen tarkastelu (esimerkiksi keskiarvo, hajonta, karakteristinen arvo 5 % kvantiilina). Näin voidaan varmistaa, että arvioidut ominaisuudet edustavat materiaalin tai rakenneosan todellista laatua, eivätkä yksittäistä poikkeamaa.

Tulosten tulkinnan tavoitteena on tuottaa selkeä päätös siitä, voidaanko materiaalia käyttää:

- sellaisenaan uudessa kohteessa,
- muokattuna tai osittain parannettuna,
- ei lainkaan kantavissa rakenteissa, mutta ei-rakenteellisissa sovelluksissa,
- onko se ohjattava uusiomateriaalivirtaan tai kierrätykseen.

Tämä päätös edellyttää systemaattista arviointia, jossa tekninen mittaustieto yhdistetään käyttövaatimuksiin, määräyksiin ja riskinarviointiin. Vain tällä tavoin voidaan varmistaa, että uusiokäytettävien puurakenteiden potentiaali hyödynnetään turvallisesti ja resurssitehokkaasti.

5.1 Suositeltavat tutkimusmenetelmät uudelleenikäyttöön

Uudelleenikäytettävien puurakenteiden arviointiin soveltuvat parhaiten ei-rikkovat ja vähän rikkovat tutkimusmenetelmät, jotka mahdollistavat rakenteiden lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien arvioinnin ilman merkittäviä vaurioita. Näiden menetelmien avulla voidaan nopeasti ja kustannustehokkaasti muodostaa luotettava käsitys rakenteen kunnosta sekä tunnistaa potentiaaliset riskikohdat.

Keskeisimmät menetelmät ovat seuraavat:

1. **Resonanssifrekvenssimittaus:** Soveltuu erityisesti pitkien puuelementtien, kuten liimapalkkien ja massiivipuorakenteiden, dynaamisen kimmo kertoimen määrittämiseen. Menetelmä on ei-invasiivinen ja helposti toistettavissa kenttäolosuhteissa.
2. **Ultraäänimittaus:** Tarjoaa tarkkaa tietoa puun sisäisestä eheydestä ja jäykkyydestä. Ilmakytkentäiset versiot mahdollistavat käytön myös historiallisesti arvokkaissa tai esteettisesti suojelluissa rakenteissa.
3. **Porausvastuksen mittaus:** Antaa tietoa puun tiheysprofiilista ja mahdollisista lahkohodista. Menetelmä on erityisen hyödyllinen, kun epäillään vaurioita, joita ei voida havaita visuaalisesti.
4. **Ruuvien ulosvetotesti:** Soveltuu pinnallisen vetolujuuden arviointiin ja liitosten kunnan tarkasteluun. Helppokäyttöinen ja nopea kenttämenetelmä.
5. **Visuaalinen luokitus:** Vaikka menetelmä on subjektiivinen, se on edelleen tärkeä osa rakenteen alustavaa arviointia. Visuaalinen tarkastelu voi ohjata tarkemmat mittaukset kriittisiin kohtiin.

- 6. Kosteuspitoisuuden mittaus:** Kaikkien muiden menetelmien tukena toimiva perusmenetelmä, jolla varmistetaan, että mittaukset tehdään vaikoituissa olosuhteissa ja että kosteuden vaikutus tuloksiin voidaan huomioida.

Näitä menetelmiä tulee käyttää yhdistelmänä, jolloin saadaan kattava ja monipuolinen kuva rakenteen kunnosta. Lisäksi suositeltavaa on kalibroida ei-rikkovia menetelmiä ainetta rikkovien testien avulla edustavilla näytteillä, mikäli mahdollista. Näin voidaan varmistaa, että saadut tulokset vastaavat todellisia mekaanisia ominaisuuksia.

Menetelmien valinta tulee tehdä tapauskohtaisesti ottaen huomioon:

- rakenteen koko ja geometria,
- käytettävissä olevat resurssit ja mittausaika,
- vaadittu tarkkuustaso ja hyväksymiskriteerit,
- turvallisuus- ja viranomaisvaatimukset.

Oikein valitut ja toteutetut tutkimusmenetelmät tukevat päätöksentekoa ja mahdollistavat kestäväen ja turvallisen uudelleenkäytön sekä uusien rakenteiden suunnittelun jo olemassa olevasta materiaalista.

5.2 Suositeltavat tutkimusmenetelmät uusiokäytölle

Uusiokäytettävien puumateriaalien arviointiin suositeltavat tutkimusmenetelmät eroavat osin uudelleenkäytettävien rakenneosien menetelmistä, sillä ne painottuvat enemmän materiaalin homogeenisuuden, kemiallisen koostumuksen ja jatkojalostuskelpoisuuden arviointiin. Uusiokäyttö edellyttää usein materiaalin mekaanista tai kemiallista modifiointia, jolloin tutkimusmenetelmien on tarjottava tarkkaa tietoa sekä rakenteen sisäisestä tilasta että soveltuvuudesta uusiin prosesseihin.

Suosittelvat menetelmät ovat seuraavat:

- 1. Porausvastuksen mittaus:** Soveltuu erittäin hyvin tiheyden vaihteluiden tunnistamiseen, erityisesti kun tavoitteena on homogeenisten uusiotuotteiden valmistus. Porausprofiili antaa ennustettavan kuvan materiaalin lujuudesta ja modifikaatiopotentiaalista.
- 2. Ultraäänimittaus:** Antaa lisätietoa puun sisäisestä eheydestä ja voidaan yhdistää porausmittaukseen homogeenisuustarkastelun tueksi. Lisäksi se soveltuu mittaamaan käsittelyiden, kuten lämpö- tai tiivistyskäsittelyjen, vaikutusta rakenteeseen.
- 3. Näytteen kemiallinen analyysi (esim. formaldehydi-, PAH- tai metallijäämien määräys):** Tarpeellinen erityisesti silloin, kun materiaali on peräisin vanhoista teollisista kohteista, joissa on käytetty kyllästeitä tai pintakäsittelyaineita. Analyysit suoritetaan laboratorio-olosuhteissa ja tukevat päätöksentekoa erityisesti käyttöturvallisuuden näkökulmasta.

4. **Mikroskooppinen analyysi ja visuaalinen tarkastus:** Näillä tunnistetaan mahdolliset mikrosäröt, halkeamat tai sieni- ja homevauriot, jotka voivat vaikuttaa jatkokäyttöön ja liimattavuuteen.
5. **Tiheyden ja kosteuspitoisuuden määrittäminen:** Vakio menetelmiä, jotka tukevat sekä mekaanisten ominaisuuksien arviointia että modifiointimenetelmien suunnittelua.
6. **Lujuusominaisuuksien laboratoriotestit piennäytteille:** Esimerkiksi standardin EN 408 mukaisia taivutus- ja puristuskokeita voidaan soveltaa pienikokoisiin osanäytteisiin, mikäli tarvitaan tarkkaa tietoa tulevaa tuotetta tai sen ominaisuuksia varten. Näitä testejä voidaan käyttää myös ei-rikkovien arviointimenetelmien verifiointiin. Piennäytteisiin perustuvassa testauksessa on kuitenkin tärkeää varmistaa, että otoskoko on riittävä, jotta tulokset ovat tilastollisesti yleistettävissä koskemaan koko populaatiota esimerkiksi tutkittavaa rakennusta tai sen rakenneosia.

Menetelmien valinta määräytyy usein lopputuotteen vaatimusten mukaan. Esimerkiksi tiivistetyssä tai liimatussa uusiotuotteessa pienikin epäjatkuvuus voi aiheuttaa kriittisen heikennyksen. Siksi materiaalin eheys ja puhtaus ovat keskeisiä arviointikohteita. Lisäksi jatkojalostuksen kannalta tärkeää on materiaalin ennustettava käyttäytyminen muokkauksen aikana.

Suosittelavat tutkimusmenetelmät uusiokäytettävien materiaalien osalta tulee valita seuraaviin tietotarpeisiin perustuen:

- materiaalin homogeenisuus,
- sisäiset vauriot ja rakenteellinen eheys,
- kemialliset jäämät ja mahdolliset haitta-aineet,
- kosteuden ja tiheyden kontrolli,
- modifiointipotentiali ja liimattavuus,
- käyttöä rajoittavat tai estävät vauriot.

Näiden menetelmien yhdistelmä mahdollistaa materiaaliin liittyvien riskien hallinnan ja tukee teollisesti sovellettavaa uusiokäyttöä esimerkiksi CLT-levyjen, sandwich-elementtien tai muotoon puristettujen puutuotteiden valmistuksessa.

6 Tutkimuksen luotettavuuden arviointi

6.1 Sidonnaisuudet ja riippuvuudet

Tämä tutkimus on toteutettu osana KIRA Circularis -tutkimus- ja kehittämisprojektia, jonka päärahoittaja on Hämeen elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus (ELY-keskus) Euroopan aluekehitysrahaston (EAKR) ohjelmasta. Rahoitus on kohdennettu puurakentamisen kiertotalouden ja uudelleenkäytön edistämiseen.

Tutkimuksen tekijöillä ei ole taloudellisia tai muita sidonnaisuuksia tuote- tai materiaalivalmistajiin. Kirjallisuuskatsaus sekä käytettyjen lähteiden arviointi on suoritettu riippumattomasti, ilman vaikutteita hankkeen ulkopuolisilta sidosryhmiltä. Kaikki analyysit, lähdevalinnat ja johtopäätökset perustuvat tutkijoiden omaan asiantuntija-arviointiin ja tutkimusetiikan periaatteisiin.

6.2 Aineistonhankinnan tarkempi menetelmäkuvaus

Aineistonhankinnan alussa määriteltiin hakutermit, joilla tietoa lähdettiin hakemaan eri tietokannoista. Nämä hakutermit määriteltiin selvitystyön tekijöiden näkemyksen mukaisesti toisistaan riippumatta, jonka jälkeen hakutermit luetteloidaan verrattiin ja ne yhdistettiin. Hakutermin yhdistetty luettelo on esitetty taulukossa 4.

Systemaattisena kirjallisuuskatsauksena aloitettuun aineistonhankintaan valitut tietokannat ja julkaisukanavat on esitetty taulukossa 5. Tietokantojen jaottelu tehtiin sen perusteella, mitä tietokantoja selvitystyön tekijöiden organisaatioilla oli käytössään.

Taulukko 4. Hakutermien yhdistetty luettelo

Hakutermi- ja lausekkeet
Non-Destructive test
Semi-destructive Test
Elastic Modulus Test
Shear Modulus Test
Tensile Strength Test
Compressive Strength Test
Bending strength Test
Shear strength Test

Taulukko 5. Systemoidussa kirjallisuuskatsauksessa käytetyt tietokannat ja aineistokannat (aakkosjärjestyksessä)

Tietokantojen ja aineistojen nimet
ASCE Library
Archives of Civil and Mechanical Engineering
BASE (Bielefeld Academic Search Engine)
Building and Environment
CAB Direct
Cambridge Core
Compendex (Engineering Village)
Construction and Building Materials
Directory of Open Access Journals (DOAJ)
Elsevier Engineering Village
Engineering Optimization
Engineering Structures
European Journal of Wood and Wood Products
Frontiers of Structural and Civil Engineering
Google Scholar
IEEE Xplore
Journal of Building Performance
Journal of Civil Structural Health Monitoring
Journal of Engineering and Applied Science
Journal of Nondestructive Testing and Evaluation
Journal of Structural Engineering
JSTOR

Lähteiksi valitut artikkelit ja julkaisut ladattiin tietokannoista ja ne syötettiin tekoälysovelluksen syötteenä. Tekoälytyökaluksi valittua OpenAI GPT-4o sovellusta koulutettiin keskustelemalla ja keskustelun perusteella muodostettiin tiiviitä aihekokonaisuuksia raportin rungoksi.

Tässä tutkimuksessa hyödynnettiin OpenAI:n kehittämää tekoälypohjaista kieli-mallia (ChatGPT, GPT-4) tukemaan aineiston keruuta, jäsentelyä ja analysointia liittyen puumateriaalien testausmenetelmiin. Tekoälyn rooli ei ollut tehdä itse-näisiä päätelmiä tai korvata tutkijan omaa arviointia, vaan toimi apuvälineenä tietojen kokoamisessa ja rakenteen hahmottamisessa.

Tekoälyä käytettiin seuraaviin tehtäviin:

1. Tietohaun ja käsitteiden jäsentämisen tukena

Mallin avulla kehitettiin tehokkaita hakusanoja ja -lauseita, joita käytettiin tieteellisissä tietokannoissa (kuten Google Scholar) ja standardiai-neistossa. Tekoäly myös auttoi hahmottamaan keskeisiä käsitteitä kuten NDT-, SDT- ja rikkovat testit sekä näihin liittyviä alatyyppejä.

2. Tekstin koostamisessa ja yhteenvetojen luonnissa

Tekoäly auttoi hahmottamaan kirjallisuudesta laajoja kokonaisuuksia ja muotoilemaan niistä ytimekkäitä tekstikatkelmia. Esiintyvyyssanalyysit ja menetelmien luokittelut tehtiin tekoälyn avulla, mutta ne tarkistettiin ja muokattiin lopullisesti käsin.

3. Analyysien tukena

Malli tuotti alustavia taulukkoja ja rakenteita esimerkiksi testausmene-telmien esiintymisestä ja vahvuusluokittelusta (esim. Grey Wolf -mene-telmällä), joita tutkija hyödynsi jatkoanalyysissa.

Tekoälyn tausta ja eettiset periaatteiden osalta käytetty kielimalli on koulutettu erittäin laajaan joukkoon julkisesti saatavilla olevaa kirjallista aineistoa, kuten kirjoja, tieteellisiä julkaisuja, verkkosivustoja ja standardeja. Koulutus on tehty valvotun ja valvomattoman oppimisen menetelmin, ja mallin tiedot ovat ajan-tasaisia kesäkuuhun 2024 asti.

Tekoäly ei ole itsenäisesti yhteydessä internetiin, eikä sillä ole pääsyä suljettuihin tai henkilökohtaisiin tietokantoihin. Malli ei myöskään tallenna käyttäjän tietoja tai keskusteluja, vaan toimii reaaliaikaisesti annettujen ohjeiden pohjalta.

Työssä noudatettiin seuraavia periaatteita:

- **Lähteiden avoimuus:** Kaikki käytetyt lähteet ja viitteet ilmoitettiin ja tarkistettiin manuaalisesti.
- **Tutkijan vastuu:** Tekoäly ei korvaa tieteellistä arviointia - kaikki sisältö tarkistettiin ja hyväksyttiin tutkijan toimesta.

- **Tietoturva ja luottamuksellisuus:** Malli ei tallenna käyttäjän tietoja eikä käytä keskusteluja uudelleen.
- **Eettisyys:** Kaikki sisältö on tuotettu vastuullisesti ja avoimesti ilman sidonnaisuuksia tai kaupallista vaikutusta.

7 Pohdinta ja jatkotutkimus- tarpeet

Tämä kirjallisuuskatsaus osoittaa, että puurakenteiden ja puumateriaalien uudelleenkäyttö ja uusiokäyttö on teknisesti mahdollista, mutta vaatii tapauskohtaista ja menetelmäpohjaista lähestymistapaa, jossa materiaalin alkuperä, käyttöolosuhteet ja jäljellä olevat ominaisuudet tunnistetaan systemaattisesti. Vaikka käytössä on useita lupaavia ei-rikkovia ja vähän rikkovia tutkimusmenetelmiä, niiden käytännön implementointi vaatii edelleen kalibrointia, prosessien vakiointia ja menetelmäkohtaista koulutusta.

Puurakenteiden uudelleenkäytön osalta suurimmat haasteet liittyvät lujuusominaisuuksien arviointiin kenttäolosuhteissa. Vaikka resonanssi- ja ultraäänimenetelmät tarjoavat nopeasti saatavilla olevan arvion MOE-arvoista, menetelmien tarkkuus on riippuvainen kosteuspitoisuudesta, geometrisesta säännöllisyydestä ja käyttäjän osaamisesta. Lisäksi vanhojen rakenteiden muutoshistoriaa ja vaurioiden kumuloitumista on vaikea arvioida luotettavasti ilman monimenetelmällistä lähestymistapaa.

Uusiokäytön kannalta haasteena on materiaalin monimuotoisuus, erityisesti silloin kun rakenteet sisältävät vanhoja liima-aineita, pintakäsittelyjä tai vierasesineitä. Näiden tunnistaminen ja vaikutusten arviointi jatkojalostuksessa on keskeistä turvallisuuden ja tuotelaadun varmistamiseksi. Tähän liittyy myös tarve kehittää soveltuvia puhtaus- ja eheysluokituksia jättepuulle, joita voidaan hyödyntää kierrätysprosessien ohjauksessa.

Jatkotutkimustarpeet voidaan jakaa kolmeen pääluokkaan:

1. **Menetelmien validointi ja standardointi:** Tarvitaan laajoja vertailututkimuksia, joissa NDT/SDT-menetelmiä verrataan systemaattisesti ainetta rikkoviin testeihin eri puulajeilla, kosteustasoilla ja ikäluokilla. Tavoitteena olisi kehittää kansainvälisesti hyväksytyjä mittausprotokollia.

2. **Digitaalisten työkalujen integrointi:** Mittaustulosten hyödyntäminen osana digitaalista suunnittelua ja elinkaarimallintamista (esim. BIM) edellyttää yhtenäistä tiedonrakennetta ja standardoitua dataliittymää mittalaitteista suunnitteluohjelmistoihin.
3. **Soveltuvuustutkimukset uusiomateriaaleille:** Tarvitaan lisää kokeellista tietoa siitä, miten erilaiset mekaaniset ja kemialliset muokkausmenetelmät (esim. tiivistäminen, lämpökäsittely, liimaus) vaikuttavat vanhan puun ominaisuuksiin ja kuinka nämä tuotteet voidaan sertifioida rakennuskäyttöön.

Lisäksi tulisi tarkastella laajempia yhteiskunnallisia ja taloudellisia ulottuvuuksia, kuten materiaalivirtojen ohjausta, taloudellisia kannusteita uusiokäytölle ja purkurakentamisen prosesseja, jotka mahdollistavat korkealaatuisen materiaalin talteenoton. Näiden rinnalla tarvitaan myös koulutusta ja ohjeistusta rakennusalan toimijoille, jotta uudenlaiset arviointimenetelmät ja kierrätyskäytännöt saadaan vakiinnutettua osaksi rakentamisen ja purkamisen arkea.

Tekninen valmius puurakenteiden uusiokäyttöön on jo olemassa, mutta sen hyödyntäminen vaatii tutkimustulosten jalostamista käytännön menetelmiksi, standardien laajentamista sekä sidosryhmien yhteistyötä materiaalivirtojen ohjaamiseksi kohti kestäväää ja resurssitehokasta rakentamista.



Suomen rakennuskanta koostuu jopa 45 % puumateriaalista. Tämä tekee puusta merkittävän, purkujättejakeen. Tällä hetkellä suurin osa puupohjaisesta rakennus- ja purkujätteestä käytetään energiantuotantoon, vaikka uudelleenkäytön mahdollisuudet ovat paljon monipuolisemmat.

Tämä kirjallisuuskatsaus käsittelee ainetta rikkomattomia (NDT) ja vähän rikkovia (SDT) tutkimusmenetelmiä uusiokäytettävien puurakenteiden käyttökelpoisuuden arvioinnissa. Katsauksen tavoitteena on tarjota kattava yleiskuva näiden menetelmien soveltuvuudesta ja hyödyllisyydestä erityisesti liimapuun ja CLT-tuotteiden yhteydessä.

Kirjallisuuskatsaus on laadittu osana Kira Circularis - Kiinteistö- ja rakennusalan kiertotalouden tuotteet, palvelut ja innovaatiot - tutkimus- ja kehittämishanketta. Hankkeen päärahoittajana toimii Hämeen Elinkeino-, Liikenne- ja Ympäristökeskus EAKR-ohjelmasta.

Karelia-ammattikorkeakoulun julkaisu B:99

ISBN 978-952-275-465-3 | ISSN 1797-383X