

Kai Möller, Heikki Naumanen, Juho Peura, Simo Torniainen

Modifioitujen puupylvästuotteiden käyttöiän optimointi – MOPUKO



**Euroopan unionin
osarahoittama**



**Elinkeino-, liikenne- ja
ympäristökeskus**

Energiateollisuus



**Kymenlaakson
Sähköverkko**



SCAN|POLE

LOPPURAPORTTI

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU

MIKKELI 2025

TERMEJÄ

Puun syiden kyllästymispiste (PSK)

Kosteuspitoisuus, jossa puun soluseinämät ovat täysin veden kyllästämiä, mutta soluonteloissa ei ole vapaata vettä. PSK on tyypillisesti noin 27–30 %.

Puun kosteus (MC, Moisture Content)

Puun sisältämän veden määrä suhteessa puun kuivapainoon, yleensä ilmoitettuna prosentteina (%).

Puun tasapainokosteus

Kosteus, johon puu asettuu pitkäaikaisesti tietyssä lämpötilassa ja ilman suhteellisessa kosteudessa. Puu ei tällöin enää kuivu eikä kostu.

Kevätpuu

Vuosiluston vaaleampi ja huokoisempi osa, joka muodostuu kasvukauden alussa. Kevätpuu on kevyempää ja mekaanisesti heikompaa kuin kesäpuu.

Kesäpuu

Vuosiluston tummempi ja tiheämpi osa, joka muodostuu kasvukauden loppupuolella. Kesäpuu on lujempaa ja tiiviimpää kuin kevätpuu.

Reagenssi

Kemiallinen aine, jota käytetään näytteiden käsittelyyn, analysointiin tai reaktion aikaansaamiseen laboratoriomittauksissa. Muuttaa sydänpuun väriä.

Kyllästysaineen huuhtouma

Kyllästetystä puusta ympäristöön liukeneva tai kulkeutuva kyllästysaineen määrä, esimerkiksi sateen tai maaperän vaikutuksesta.

Vajaatunkeuma

Tilanne, jossa kyllästysaine ei ole tunkeutunut puuhun vaaditulle syvyydelle tai tasaisesti koko poikkileikkaukseen.

ACQ-yhdisteet (Alkaline Copper Quaternary)

Kupariin ja kvaternäärisiin ammoniumyhdisteisiin perustuva puunsuoja-aine, jota käytetään puupylväiden ja muun rakenteellisen puutavaran kyllästyksessä.

NTR (Nordic Wood Preservation Council)

Pohjoismainen puunsuojausneuvosto. Ylläpitää pohjoismaista puunsuojauksen luokitus- ja standardointijärjestelmää, joka määrittelee mm. kyllästetyn puun käyttökohteet ja vaatimukset.

ICP-analyysit (Inductively Coupled Plasma)

Alkuaineanalyysimenetelmä, jolla mitataan esimerkiksi metallien (kuten kuparin) pitoisuuksia erittäin tarkasti.

Massafraktio

Tietyn aineen osuus kokonaismassasta. Ilmoitetaan usein yksiköttömänä lukuna tai prosentteina.

Regressiosuora $y = a + bx$

Tilastollinen työkalu, joka kuvaa kahden muuttujan välistä lineaarista riippuvuutta sovittamalla suoran mittausaineistoon.

Korrelaatio

Suure, joka kuvaa kahden muuttujan välisen yhteyden voimakkuutta ja suuntaa, mutta ei syy–seuraussuhdetta.

Redusointi

Menettely, jossa puun lujuusarvo korjataan vastaamaan ennalta määritettyä kosteustasoa (yleensä 12 %), jotta eri kosteuksissa saadut tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

MPa (megapascal)

Jännityksen tai lujuuden yksikkö. Yksi MPa vastaa yhtä newtonia neliömillimetriä kohti (N/mm²).

Voimaresultantti (tai pelkkä resultantti)

Useiden samanaikaisesti vaikuttavien voimien yhteisvaikutus, yksi ainoa voima, joka aiheuttaa saman muutoksen kappaleen liikkeeseen tai muotoon kuin kaikki alkuperäiset voimat yhdessä.

Mitoitusjännitys

Laskennallinen jännitysarvo, jota käytetään rakenteen turvallisuuden arvioinnissa ja mitoituksessa. Oltava pienempi kuin mitoituslujuus, jotta rakenne kestää.

Taivutusjännitys

Taivutuskuormituksesta syntyvä jännitys materiaalissa, suurimmillaan poikkileikkauksen uloimmissa osissa.

Pylvään ulkoiset jännitykset

Pylvääseen vaikuttavia pysyviä jännityksiä aiheuttavat johtimet ja pylvääseen kiinnitetyt ulokkeet kuten johdinorret. Muuttuvia jännityksiä ovat lumi, jää ja tuuli sekä tuulen aiheuttama värähtely johtimissa. Tilapäisiin jännityksen aiheuttaa pylvääseen kiipeävä huoltohenkilö. Poikkeavan jännityksen aiheuttaa johtimen katkeaminen.

Turvallinen pylväs

Pylvään taivutuslujuus $\geq$ pylvään mitoituslujuus eli $f_d \geq 27,5$ MPa. Arvo on käyttöraja, jonka ylittäminen johtaa rakenteelle sallitun kuormituksen ylittämiseen.

Käyttökelpoinen pylväs

Pylväs on riittävän luja kestämiään ulkoisia jännityksiä, jotka voivat suurimmillaan olla 23 MPa olosuhteista ja tilapäisistä- sekä poikkeavista jännityksistä riippuen.

Pylväs, johon kiipeäminen sallittu tuettuna

Pylväs, johon kiipeäminen on riski työturvallisuuden kannalta (yksi keltainen nauha), mutta kiipeäminen on mahdollista tuettuna.

Kiipeämiskielto pylväs

Pylväs, johon ei saa kiivetä edes tuettuna (kaksi keltaista nauhaa). Pylväs kestää vielä tässä vaiheessa sääolosuhteiden vaikutuksen, mutta pylvään vaihdon suunnittelu on aloitettava.

Vaihdettava pylväs

Jos pylvään ulkoisten voimien kestäkyky on lahoamisen tai muun syyn takia hyvin alhainen, pylväs tulisi vaihtaa mahdollisimman nopeasti. Vaarana on, että pylväs katkeaa sääolosuhteiden vaikutuksesta.

TIIVISTELMÄ

Lukuohje: sekä tiivistelmässä että varsinaisessa tekstissä tärkeimmät asiat ovat kursivoitu ja sisennetty. Näin lukija saa kokonaiskäsityksen raportista lukemalla kohdat.

Työn tarkoituksena oli selvittää erityisesti kuparikyllästettyjen pylväiden pitkäaikaiskestävyyttä (jatkossa C-kyllästettyjen) ja verrata saatuja tuloksia kupari-kromi-arseeni- (jatkossa CCA-kyllästettyjen) ja kreosoottikyllästettyjen pylväiden vastaaviin tuloksiin.

Hankkeessa etsittiin vastausta hypoteesiin, jossa oletettiin, että C-kyllästetyn pylvään käyttöikä on yhtä hyvä tai melkein yhtä hyvä kuin CCA-kyllästetyn (referenssi). Lisäksi selvitettiin raja-arvoa, jossa huonokuntoinen pylväs muuttuu huollon näkökulmasta vaaralliseksi.

Yllä esitettyyn hypoteesin vastauksen antaa parhaiten tutkimuksessa käytetty mittari, puun taivutuslujuus. Taivutuslujuuden avulla eri kokoluokkien pylväät voidaan asettaa vastaamaan yhtenevää arvoa, riippumatta pylväiden tyven tai maanpinnan tason halkaisijasta.

Taivutuslujuus alkaa heikkenemään lähes heti pylvään asennuksen jälkeen kiihtyen elinkaarensa loppua kohden.

Maanpinnantasolla tapahtuva pylvään halkaisijan pieneneminen lahon seurauksena johtaa taivutuslujuuden merkittävään alenemiseen. Kun taivutuslujuus alittaa noin 23–25 MPa alkuperäisestä halkaisijasta laskettuna, pylvääseen kiipeäminen huonolla kelillä muodostuu jo turvallisuusriskiksi.

Esimerkiksi jos 211-luokan pylväs menettää 40 mm halkaisijastaan pintalahon seurauksena, sen jäljelle jäänyt poikkipinta-ala on vain 64 % alkuperäisestä.

Voidaankin päätellä, että pylväiden mitoitusvoimiin nähden ylisuurten pylväiden käyttäminen lisää pylvään käyttöikää lahovaurioita vastaan. Ylimoittaminen kuitenkin lisää myös pylväskustannuksia. Toisaalta pylväiden vaihtovälin tihentäminenkin mitoitusvoimien mukaisilla pylväillä maksaa.

Hankkeessa päädyttiin standardeja tutkimalla sekä Suomen johtavia asiantuntijoita haastatteleamalla mitoitusjännitykseen 27,5 MPa, jolloin pylvääseen kiipeäminen on vielä turvallista.

Arvo vastaisi esimerkiksi luokan 211 pylvääseen kohtisuorasti vaikuttavaa 238 kg voimaa. VIM:n (VoimallmajohtoMääräykset) aikana vuoteen 2010 asti mitoitusjännitys oli 18 MPa. Nykyisessä käyttöympäristössä, jossa voimakkaat tuulenpuuskat, kasvanut pitempiaikainen kosteus ja esimerkiksi ilman lauhtumisesta johtuva tykkylumen muodostuminen pylväiden rakenteisiin aiheuttavat kuormitusta, jossa VIM-määräysten mukainen mitoitusjännitys on liian alhainen. Varoja pylvään lahoamiselle ei enää ole pylvään saavuttaessa VIM:n mukaisen 18 MPa taivutuslujuuden.

Nykyinen Suomalaisesta männystä valmistettujen puupylväiden ominaislujuuden vähimmäisarvo on $f_k = 41,8$ MPa, jota käytetään mitoituksessa, on riittävä.

Pylväiden osalta elinkaarikustannusten ennustettavuus on tällä hetkellä vaikeaa johtuen mm. C-kyllästettyjen pylväiden kestoajan estimaatista. Hankkeessa saadut tulokset vahvistavat oletusta C-kyllästettyjen pylväiden käyttöiästä, joka useassa lähteessä on mainittu 30 vuodeksi.

Saatujen tulosten perusteella C-kyllästettyjen pylväiden käyttöikä asettuu keskimäärin 30...35...40 vuoden välille.

On huomioitava, että saatu tulos perustuu hankkeen testeihin, kirjallisuuteen tutustumiseen ja asiantuntijahaastatteluihin. Asian varmistamiseksi tulisi tehdä syventäviä tutkimuksia. Tulos on kuitenkin vahvasti suuntaa antava.

Testeissä havaittiin, että pylvään visuaalisen tarkastelun perusteella pylvään kunnon ennustettavuus on likimääräistä. Hankkeen tulosten perusteella visuaalisesti huonon näköinen pylväs olikin koestuksessa paljon kestävämpi kuin ulkonäöltään jyrkempi ja ehjän näköinen pylväs. Vastaavia tapauksia oli useita. Hanke sai testauksiin 32

nauhapylvästä, joista vain yksi oli riskipylväs. Kaikkiin muihin olisi voinut lujuusarvojen perusteella kiivetä.

Pylvästarkastuksissa ongelmana on, että pylvään ulkonäkö johtaa erilaiseen lopputulokseen kuin mittaustulos. Tarkastuskierroksilla se vaikuttaa kuntotarkastajiin eri tavalla. Toisen tarkastajan mielestä pylväs tulee asettaa 2-nauhapylvääksi, kun taas toinen miettii, tarvitseeko pylvästä vielä nauhoittaa.

*Riittäväillä pylväiden lähtötiedoilla ja -seurantaraportoinnilla
elinkaarilaskennan ennustettavuutta voidaan parantaa.*

Tällä hetkellä sähköyhtiöiden tietokantoihin pylväistä tallentuva tieto on riittämätöntä ja satunnaista. Lisäksi kehittämällä tarkastus-, asennus- ja kunnossapitomenetelmiä, elinkaarilaskenta tarkentuu entisestään.

Nykyisissä sähköyhtiöiden tietokannoissa olevasta datasta ei voida arvioida pylvään kuntoa ja sen jäljellä olevaa käyttöikää.

*Pylvästä linjalle asennettaessa siitä tulisi tallentaa kyllästysaine,
asennusvuosi ja kuukausi, sen oikea maanpinnan tason halkaisija (ei
pylvääseen merkitty, vähintään kuitenkin se) ja maaperätyyppi sekä onko
kyseessä kulma- tai linjan päätepylväs.*

Nämä ovat minimitiedot, jotka vaikuttavat pylvässeurantaan lahoamisen kannalta. Oikealla pylväsluokalla tarkoitetaan todellista maanpinnan tason halkaisijaa, joka on suurempi, jos esimerkiksi mitoituslaskentojen mukaista pylvästä ei ole ollut saatavilla. Toiseksi pylväsluokan halkaisijan toleranssi on iso: $0 < d_g \leq 40 \text{ mm}$ (d_g on pylvään maanpinnantason halkaisija), joten pylvään todellinen halkaisija on aina enemmän tai vähemmän suurempi kuin mitä pylväässä oleva pylväsluokkalapun nimellishalkaisija on.

*Toleranssin mukainen maksimiylimitta eli halkaisijaan 40 mm lisää
tarkoittaa jopa 15–20 vuoden lahoamisvaraa!*

Maarajan halkaisijan mittaamiseen on saatavilla edullisesti yrityskäyttöön sopivia, kannettavia työntömittoja, joissa on bluetooth. Sen avulla mittaustulokset voidaan siirtää tablettiin, älypuhelimien tai muuhun mobiililaitteeseen.

On siis tärkeää kirjata pylvään todellinen halkaisija linjaa pystytettäessä eikä vasta noin 10 vuoden päästä ensimmäisen tarkastuksen yhteydessä. Se helpottaa suunnittelua ja ennustettavuutta.

Kulma- ja päätepylväät joutuvat suurimmalle rasitukselle, jolloin on tärkeä nähdä tietokannasta tehtävissä hauissa, mikä pylväs-ID sijaitsee linjan muuttaessa suuntaa ja mihin linja päättyy.

Jotta pylvään lähtötiedot olisivat riittävät, myös pylväskilpeä (tagi, lommi) tulisi kehittää. Kyllästyserän jäljittämiseksi, pylväskilvessä tulisi olla eränumero. Se tarkoittaisi pylväiden elinkaaren seurantaan sekä parantaisi kyllästysprosessien laatua. Jos linjatarkastuksissa todetaan yksi pylväs ennenaikaisesti lahonneeksi, tällöin voidaan tarkistaa, onko samasta kyllästyserästä asennettu muita pylväitä ja tehdä näille varmistustarkistus. Lisäksi kun ennenaikaisesta lahosta ilmoitetaan kyllästäjälle ja voidaan kertoa mistä kyllästyserässä pylväs oli, tieto voi auttaa kyllästysyritystä kyllästyslaadun parantamiseen. Pylväskohtainen seuranta on vaikea toteuttaa, mutta eräkohtainen on jo paljon edullisempi ja helpommin toteutettavissa oleva ratkaisu. Toisaalta kyllästysyrityksillä erädata ei välttämättä ole säilytetty useita kymmeniä vuosia.

Pylvään pystytyksen jälkeisissä tarkastuksissa lahon rekisteröinti on tärkein toimenpide ja ennen kaikkea pintalahon aiheuttaman maanpinnan tason halkaisijan selvittäminen. Myös koputus tulee tehdä ja havainto kirjata.

Tikankolot eivät juurikaan vaikuta pylvään kestävyYTEEN, koska suurin taivutusjännitys kohdistuu maanpinnan tason alueelle. Vain kolme koestetuista 290 pylväästä katkesi ylempää kuin pylvään puolivälistä ja nekin olivat hyvin vanhoja.

Hankkeessa saaduilla tuloksilla on vaikuttavuutta. Kerätyn datan perusteella sähköyhtiöt voivat varautua nykyisten C-kyllästettyjen pylväiden lyhempään käyttöikään verrattuna referenssinä pidettyihin CCA-pylväisiin, jolloin niiden vaihtoväli lyhenee. Kuluja lisäävät myös tihentyvät linjojen tarkistuskäynnit. Pylväiden elinkaarilaskentaa saadaan tarkemmaksi, mutta esimerkiksi tämän tutkimuksen C-kyllästetyt pylväät olivat liian uusia, jotta ikää voitaisiin ennustaa suurella varmuudella. Esimerkiksi vuosien 2007–2013 aikana kyllästettyjä C-pylväitä oli alle 50 kappaletta kun taas vuosina 2014–22 kyllästettyjä pylväitä oli yli 100 kappaletta.

Kunnossapito ja kenttämittaukset vaativat toimenpiteitä. Elektroniset mittalaitteet tekevät tuloaan, mutta niissä esiintyy poikkeavissa tilanteissa epätarkkuuksia. Laitteiden ohjelmistot vaativat kehitystyötä ja mittapäitä tulee kehittää. Luotettavilla elektronisilla mittalaitteilla suljettaisiin pois mutu-tietoa. Voidaankin todeta, että kokeneen kuntotarkastajan rooli on vielä toistaiseksi sähköyhtiölle merkittävä.

Joulukuussa 2025 Xamkilla esitelty mikroporausmenetelmä lahon kartoittamiseen vaikutti lupaavalta. Menetelmässä ei tarvitse kaivaa maata pois, koska sillä voidaan porata vinosti maanpinnantason alapuolelle.

Menetelmä antaa pylvään poikkileikkauksesta graafin, jossa laho-osuudet näkyvät selkeästi. Lisäksi koputustesti varmistaa tulosta.

Aisteihin perustuvat tarkistustavat vaativat kokeneisuutta. Kokematon tai tarkastuksiinsa epävarmasti suhtautuva lahotarkastaja voi herkästi merkitä pylvään yhdellä tai kahdella nauhalla. Pylväiden liian varovainen nauhoittaminen lisää turhaan kuluja. Toki se tuo epävarmassa tilanteessa turvallisuutta kunnossapidon työhön, jos pylvääseen pitää kiivetä.

C-kyllästettyjen pylväiden ongelmana on sisälaho, jota on esiintynyt myös muilla kyllästetyypeillä. Hankkeen suosituksena on, että ensimmäinen lahotarkastus tehdään C-kyllästetyille pylväille 9 vuoden iässä. Jos pylväs on tässä vaiheessa hyväkuntoinen, pylväs kestää isolla todennäköisyydellä myös seuraavat 9 vuotta.

Koska C-kyllästetyissä pylväissä esiintyy arvaamatonta sisälahoa, hanke suosittelee, että joka kerta kiivettäessä kuparikyllästettyyn pylvääseen, selvitetään sen mahdollinen lahon määrä.

Tässä vaiheessa todettakoon, että tulokset on saatu soveltavan tutkimuksen kautta. Jos halutaan tarkkoja, tieteellisesti selitettäviä tuloksia, on toteutettava laaja tieteellinen tutkimus. Vaaditaan toisenlaisen mittakaavan laboraatiotutkimukset, olosuhteiden vakioinnit ja tutkimusaineiston lajittelu. Tällöin myös budjetin tulee olla huomattavasti isompi kuin tässä hankkeessa.

Asiasanat: lahoaminen, sisälaho, pintalaho, kylläste, puusähköpylväs, kuparikylläste, käyttössäöloikä, käyttöikä, tunkeuma, huuhtouma, taivutuslujuus, jännitykset

TEKIJÄT

Kai Möller, ins. puutekniikka (AMK), projektipäällikkö

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Materiaalien ja ympäristöturvallisuuden tutkimusyksikkö

Heikki Naumanen, ins. puutekniikka (AMK) ja konetekniikka DI (TkM), tutkimusinsinööri

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Materiaalien ja ympäristöturvallisuuden tutkimusyksikkö

Juho Peura, ins. puutekniikka (AMK), tutkimusinsinööri

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Materiaalien ja ympäristöturvallisuuden tutkimusyksikkö

Simo Torniainen, materiaalitekniikan DI (TkM), TKI-asiantuntija

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu, Materiaalien ja ympäristöturvallisuuden tutkimusyksikkö

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	5
2	TUTKIMUKSEN TAVOITE.....	7
2.1	C-KYLLÄSTETYN PUUPYLVÄÄN KÄYTTÖIÄN MÄÄRITTÄMINEN	7
2.2	LAHOAMISEN ETENEMINEN JA MERKIT PYLVÄÄN SAAVUTTAESSA ELINKAAREN LOPUN.....	7
2.3	TYÖKALUJA OPERATIIVISEN JOHDON SEURANTAAN JA SUUNNITTELUUN	8
3	PYLVÄÄN LAHOAMISEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ	9
3.1	ILMAN OLOSUhteiden vaikutus	10
3.2	VALON MÄÄRÄ.....	11
3.3	MAAPERÄSTÄ JOHTUVAT TEKIJÄT	11
3.3.1	<i>Lahoamiseen vaikuttavat maaperät ja sijainnit.....</i>	<i>12</i>
3.3.2	<i>Kosteus.....</i>	<i>13</i>
3.3.3	<i>Ravinteet.....</i>	<i>13</i>
3.3.4	<i>Typpipitoisuus</i>	<i>13</i>
3.3.5	<i>Happipitoisuus</i>	<i>13</i>
3.3.6	<i>pH-taso.....</i>	<i>14</i>
3.3.7	<i>Maaperänäytteiden laboratoriotulokset</i>	<i>14</i>
3.4	PUUN LUONTAISET OMINAISUUDET	20
3.4.1	<i>Puun tiheys.....</i>	<i>20</i>
3.4.2	<i>Puun kosteus.....</i>	<i>22</i>
3.4.3	<i>Pinta- ja sydänpuu</i>	<i>24</i>
3.4.3.1	<i>Pintapuun osuus</i>	<i>25</i>
3.4.4	<i>Kevät- ja kesäpuu.....</i>	<i>26</i>
3.4.5	<i>Vuosilustojen paksuus.....</i>	<i>26</i>
3.4.6	<i>Oksaisuus</i>	<i>28</i>
3.5	KYLLÄSTETYYPIT PUUN TIHEY- JA KOSTEUSLUOKITTAIN.....	29
3.5.1	<i>Kuparikyllästetyt 2007-13</i>	<i>30</i>
3.5.2	<i>Kuparikyllästetyt 2014-22</i>	<i>31</i>
3.5.3	<i>CCA-kyllästetyt</i>	<i>32</i>
3.5.4	<i>Kreosoottikyllästetyt</i>	<i>33</i>
3.5.5	<i>Redusoidut kosteudet.....</i>	<i>33</i>
3.6	PYLVÄÄSTÄ JOHTUVAT TEKIJÄT SEN LAHONKESTOON	34
3.6.1	<i>Pylväiden kuivaus (ulkokuivaus / ulkokuivaus + kuivaamo).....</i>	<i>35</i>
3.6.2	<i>Kyllästysaineen tunkeuma pintapuussa</i>	<i>35</i>
3.6.3	<i>Kyllästysainetyyppi, määrä kg/m³, tehoaineet</i>	<i>37</i>
3.6.3.1	<i>Laho ja kemikaalit</i>	<i>37</i>
3.6.3.2	<i>Tunkeuma- ja kuparinmääritys poikkileikkausnäytteistä</i>	<i>38</i>

3.6.3.3	NTR:n ohjeista poimintaa.....	38
3.6.3.4	Tehoainepitoisuuksista	39
3.6.3.5	Kuparin määrä C-pylväsnäytteissä	39
3.6.3.6	Kuparin määrä 1980- ja 90-luvun CCA-pylväissä	40
3.6.3.7	Tulostaulukko kuparit	41
3.6.4	<i>Pylvään latvaosasta valuva vesi.....</i>	42
3.6.5	<i>Pylväsluokat</i>	42
4	YLEISIMMÄT KYLLÄSTETTYJEN PUUPYLVÄIDEN LAHOTTAJAT	47
4.1	RUSKOLAHO (ISTUKKAKÄÄPÄ YM. KÄÄPÄLAJIT)	49
4.2	KATKOLAHO.....	49
5	ELEKTRONISIA MENETELMIÄ LAHON SELVITTÄMISEEN SÄHKÖLINJALLA	50
5.1	TAAJUUSVÄRÄHTELYYN PERUSTUVA MENETELMÄ	50
5.1.1	<i>Kokemuksia taajuusvärähtelyyn perustuvasta mittalaitteesta</i>	<i>51</i>
5.2	MIKROPORATUTKIMUS	52
5.3	TYLPÄN TERÄSTAPIN AMPUMINEN TIETYN ENERGIAMÄÄRÄN AVULLA (PENETROMETRI)	54
5.4	YHTEENVETO MITTALAITTEISTA	55
6	TULOKSET.....	57
6.1	ANALYSOINTIMENETELMÄSTÄ	58
6.2	KOOSTE MITTAUSTULOKSISTA.....	58
6.3	ERI KYLLÄSTETTYPIEN AVAINARVOT KYLLÄSTYSAIKAKAUSITTAIN JA -VUOSITTAIN.....	61
6.3.1	<i>C-kyllästetyt pylväät.....</i>	<i>61</i>
6.3.1.1	Vuosina 2007–13 kyllästettyjen C-pylväiden tarkastelua.....	67
6.3.1.2	Vuosina 2014–22 kyllästettyjen C-pylväiden tarkastelua.....	70
6.3.2	<i>CCA-kyllästetyt pylväät</i>	<i>72</i>
6.3.3	<i>Kreosoottikyllästetyt pylväät</i>	<i>75</i>
7	TÄRKEIMPIÄ PYLVÄÄSEEN VAIKUTTAVIA VOIMIA.....	78
7.1	PYLVÄÄSEEN VAIKUTTAVIA VOIMIA	78
7.1.1	<i>Pylvääseen kiinnitetyt ulokkeet.....</i>	<i>78</i>
7.1.2	<i>Johtimien köysivoimat.....</i>	<i>78</i>
7.1.3	<i>Tuulivaikutus</i>	<i>78</i>
7.1.4	<i>Jää ja lumi</i>	<i>78</i>
7.1.5	<i>Asentajan ja asennuksen aiheuttamat voimat</i>	<i>78</i>
7.1.6	<i>Johtimen katkeaminen</i>	<i>79</i>
7.2	MITOITUSLUJUUS JA -JÄNNITYS.....	79
8	ERI PYLVÄSLUOKKIEN JÄNNITYSKUVAAJAT ERI LAHOAMISASTEILLA.....	80
8.1	LAHOISUUSASTELUOKITUS	80

8.2	LAHON MERKITYS PYLVÄÄN JÄNNITYSTEN KESTOON.....	81
8.2.1	<i>Sisäläho</i>	81
8.2.2	<i>Pintalahjo</i>	83
8.3	LAHOAMISKÄYRÄT	85
8.4	EDELLISTEN PERUSTEELLA JOHDETTU ESIMERKKIKUVA AJA	86
8.5	PYLVÄIDEN TARKASTUSVÄLIT	87
8.6	PYLVÄÄN KUNTOA KUVAAVAT TERMIT	89
8.6.1	<i>Turvallinen pylväs</i>	89
8.6.2	<i>Käyttökelpoinen pylväs</i>	89
8.6.3	<i>Kiipeäminen sallittu tuettuna (vaatii tarkempaa määrittelyä)</i>	90
8.6.4	<i>Kiipeämiskielto (vaatii tarkempaa määrittelyä)</i>	90
8.6.5	<i>Vaihdettava pylväs (vaatii tarkempaa määrittelyä)</i>	90
9	HAVAINTOJA VUOSIEN 2023-25 TESTAUKSISTA	91
10	UHKAKUVIA	92
10.1	ILMASTOMUUTOSTEN VAIKUTUS PUUPYLVÄISIIN.....	92
10.1.1	<i>Tuulivaikutukset</i>	92
10.1.2	<i>Lämpötilan nousu</i>	93
10.1.3	<i>Sademäärät & sään vaihtelu</i>	94
10.1.4	<i>Talviolosuhteet & lumi</i>	94
10.2	EU:N KEMIKAALIVIRASTON ASETTAMAT RAJOITUKSET KEMIKAALIEN KÄYTTÖÖN	94
10.3	HYVÄLAATUISTEN PYLVÄSAIHIOIDEN SAATAVUUS.....	95
10.4	KYLLÄSTYSPROSESSIN TASALAATUISUUS - LAHOAMISTA JO 10-VUOTIAISSA PYLVÄISSÄ.....	95
10.5	SÄHKÖVERKON YLLÄPIDON KUSTANNUSKASVU	95
11	KEHITYSEHDOTUKSIA	96
11.1	AUTOMAATION HYÖDYNTÄMINEN SÄHKÖVERKON KUNNON HAVAINNOINTIIN (IOT - INTERNET OF THINGS)	96
11.2	ERI DATAPALVELUIDEN KÄYTTÖ LAHOARVIOINTIIN	96
11.3	PYLVÄSLUOKKAKOHTAISET LAHOAMISKÄYRÄT	96
11.4	DIGITALISAATION HYÖDYNTÄMINEN YLEISESTI.....	97
12	JATKOSELVITYSTARPEET.....	99
13	LÄHTEET	101

LIITE 1. Käytetyt tutkimusmenetelmät, laitteet ja laitteistot.

LIITE 2. Sähköpylväiden ennenaikainen vaurioituminen Sveitsissä ja Saksassa liittyy puun lahoamista aiheuttaviin basidiomykkeetteihin (kieli englanti, käännetty suomeksi). **HUOM!** *Liitteen raportin puupylväiden puulaji on kuusi, joka kyllästyy paljon huonommin kuin mänty.*

LIITE 3. LUKE-raportti: Lahon selvitys Anttolan Cu-pylväistä

LIITE 4. Rajapintaohjelmoinnin hyödyntäminen sähköverkkojen ylläpidossa.

LIITE 5. Pilodyn Wood Tester.

1 JOHDANTO

Kiristyvistä ympäristömääräyksistä ja terveyssyistä EU:ssa luovuttiin CCA-kyllästeiden käytöstä vuoden 2006 loppuun mentäessä. Olemassa olevat varastot voitiin kuitenkin käyttää loppuun, joten CCA:lla kyllästettyjä puutuotteita oli runsaasti tarjolla vielä vuonna 2007. CCA-pylväiden lahonkestävyys on osoittautunut erittäin hyväksi ja sähkölinjoilla on edelleen käytössä 1960–2000-luvuilla kyllästettyjä CCA-pylväitä.

CCA:lla kyllästetyt puiset sähköpylväät voidaan käyttää sähkölinjoilla elinkaarensa loppuun. CCA-kylläste korvattiin C-kyllästeellä vuonna 2007 eli vanhimmat C-pylväät ovat tätä kirjoitettaessa 18–19 vuoden ikäisiä.

CCA- ja kreosoottipylväiden kestävydestä on kokemuksia jo pitkältä ajanjaksolta, joten tässä hankkeessa pyritään lisäämään tutkimustietoa erityisesti kuparikyllästettyjen puupylväiden pitkäaikaiskestävyydestä käytännössä.

Koska kyseessä on suhteellisen nuori tuote, tutkimustietoa oli tarjolla vähän tai ei olleenkaan. Tarvitaan uutta ajantasaista tietoa eri-ikäisten C-pylväiden kuten myös kreosootti- ja CCA-kyllästettyjen sähköpylväiden mekaanisten ominaisuuksien ja tarkastusmenetelmien yhteydestä.

Hankkeen käynnistävänä voimana oli Järvi-Suomen Energia Oy:n ja Xamkin yhteistyönä valmistunut täysimittaisen pylväiden testauslaitteisto. Samalla havaittiin tarve saada selville C-kyllästettyjen pylväiden kestävyys lahoa vastaan, koska aiempaa, tarkkaa tietoa niiden kestävyydestä ei ole. Monet tahot arvioivat C-kyllästetyn pylvään kestoiksi noin 30 vuotta (mm. Lassila, 2025), mutta tämä on arviotietoa. Hankkeeseen saatiin mukaan suurimpana rahoittajana Energiateollisuus ry ja lisäksi sähköyhtiöt Savon Voima Verkko Oy ja Kymenlaakson Sähköverkko Oy. Pylväsvalmistajista hankkeessa oli mukana livari Mononen Oy -konserniin kuuluva Scanpole Oy.

Yksi hankkeen tärkeimmistä tutkimusmenetelmistä on täysikokoisten pylväsmittakaavan puutuotteiden mekaanisten ominaisuuksien testaaminen. Tavoitteena on, että testien aikana taivutetaan 250 pylvästä murtoon asti. Tilastollisesti määrä on merkittävä ja todennäköisesti yksi suurimmista tutkimusaineistoista täysimittaisille pylväille. Testattavien pylväiden pituudet

vaihtelivat välillä 8–14 metriä ja tyvihalkaisijat 200–400 mm. Taivutustestit suoritetaan standardin EN 14229:2011 mukaisesti.

Pylväiden taivutuksissa saadaan tietoa voimista, jotka ne kestävät, kimmomoduuli ja tärkeimpänä taivutuslujuus. Vertaamalla murtovoimaa ja taivutuslujuutta, saadaan käsitystä lahon etenemisestä.

Voima- ja lujuustietojen lisäksi pylväät punnitaan ja mitataan huolellisesti. Mittausten avulla voidaan määrittää puun tiheysarvot. Jokaisesta pylväästä sahataan kiekko läheltä murtumakohtaa, josta voidaan määrittää pylvään kosteus, vuosilustojen keskimääräinen paksuus koko poikkileikkauksesta ja lisäksi pintapuusta erikseen sekä kyllästysaineen tunkeuman suhteellinen osuus.

Puunäytteitä lähetetään ulkopuoliseen laboratorioon, jossa niistä voidaan määrittää tehoainejäämiä ja saaduista tuloksista arvioidaan huuhtoumamääriä.

Lisäksi aineistosta poimitaan pylväitä, joiden taivutuslujuus oli huono tai huonohko. Vertailun vuoksi mukaan otetaan muutama paremman taivutuslujuuden omaava pylväs. Pylväiden sijainnit selvitetään ja niiden sijaintikohdista käydään ottamassa maaperänäytteet. Pylväiden sijainnit valitaan Etelä-Savosta, koska muuten kustannukset kasvavat liian korkeaksi. Kerätyt näytteet lähetetään ulkopuoliseen laboratorioon analysoitavaksi.

Hankkeen alussa esitettiin neljä pääkysymystä, joihin pyritään etsimään vastaukset:

1. Ovatko käytetyt raja-arvot pylväiden luokittelusta luotettavia ja miten heikoimpien kuntoluokkien pylväät kestävät kuormitusta käytännössä?
2. Miten tarkastustiedot ennustavat pylvään kuntoa ja jäljellä olevaa käyttöikää?
3. Onko hankkeessa saadulla uudella tiedolla hyödyntämispotentiaalia ja vaikuttavuutta käytössä olevaan dataan nähden?
4. Onko kunnossapitomenetelmissä ja kenttämittauksissa parannettavaa sekä onko muutoksilla vaikutusta käytännön työhön sähkölinjojen kunnossapitoyrityksissä?

Hankkeessa saadut tulokset voivat toimia pohjana uusille käytännöille sekä vaikuttaa myönteisesti paitsi infrastruktuurin luotettavuuteen, myös ympäristön suojelemiseen.

2 TUTKIMUKSEN TAVOITE

2.1 C-kyllästetyn puupylvään käyttöiän määrittäminen

Hankkeen tärkeimmistä osa-alueista on selvittää, millainen C-kyllästetyn puupylvään elinkaari on. Laho on suurin puun lujuutta heikentävä tekijä. Kestääkö kuparikyllästetty puu lahoamista yhtä hyvin kuin verrokkina oleva CCA-kyllästetty pylväs. Ongelmaksi saattaa osoittautua, että C-kyllästetyt pylväät ovat liian nuoria luotettavan tuloksen saamiseksi.

Edellä mainitun seikan takia C-kyllästetyn pylvään käyttöiän määrittämiseksi joudutaan käyttämään estimaatteja, jolloin lopputulos ei ole tarkka, mutta suuntaa antava.

2.2 Lahoamisen eteneminen ja merkit pylvään saavuttaessa elinkaaren lopun

Tässä tutkimuksessa pääpaino on entsymaattinen puun hajoaminen eli lahottajasienien aiheuttamat vauriot ja siitä seurannut lujuuden heikkeneminen. Tutkimuksessa tarkastellaan lisäksi, miten halkeamat, tikkojen aiheuttamat- ja muut mekaaniset vauriot mahdollistavat lahottajasienten pääsyn puun sisäosiin.

Tutkimuksen keskeinen alue, johon laho todennäköisimmin iskee, on maanpinnan tason alue. Se on samalla riskialttein kohta, koska jännitykset eri kuormitustilanteissa keskittyvät kyseiselle alueelle. Jos pylväs menettää lahoamisen takia poikkileikkaus pinta-alastaan sen kuormituksen kesto alenee vastaavasti. Pylvään kestokyky ulkoisia muuttuvia- ja pysyviä voimia vastaan heikkenee merkittävästi lahon takia.

Wilcox mukaan (1978) voidaan karkeasti arvioida, että puun massan vähentyessä lahon takia 10 %, taivutuslujuus alenee 60–70 %. Tämä tarkoittaa, että myös lahoamattoman näköinen puu on heikompaa. Pylväiden lahoamisessa on siis kyse isosta ongelmasta (Kärkkäinen 2003, 312).

Tavoitteena on selvittää mitä muutoksia tulee tehdä puupylväiden tarkastuksiin ja millä menetelmillä, sekä arvioida pylväiden kestävyyttä elinkaarensa aikana.

2.3 Työkaluja operatiivisen johdon seurantaan ja suunnitteluun

Sähkön jakelussa sähkölinjojen toimintavarmuus on laissa määrätty. Katkokset saavat olla vain tietyn ajan mittaisia. Sähkönjakeluyhtiöiden on siis pidettävä sähkölinjat huippukunnossa.

Tällä hetkellä puupylväiden seurantatiedot ovat sähköyhtiöiden tietokannoissa puutteelliset. Tarkkaa tietoa nykyisten kuparikyllästettyjen pylväiden pitkäaikaiskestävyydestä ei ole. Hankkeessa pyritään löytämään pylväs- ja jatkuvan seurannan tietoja, joiden avulla pylvään kuntoa ja elinkaarta voidaan arvioida tarkemmin.

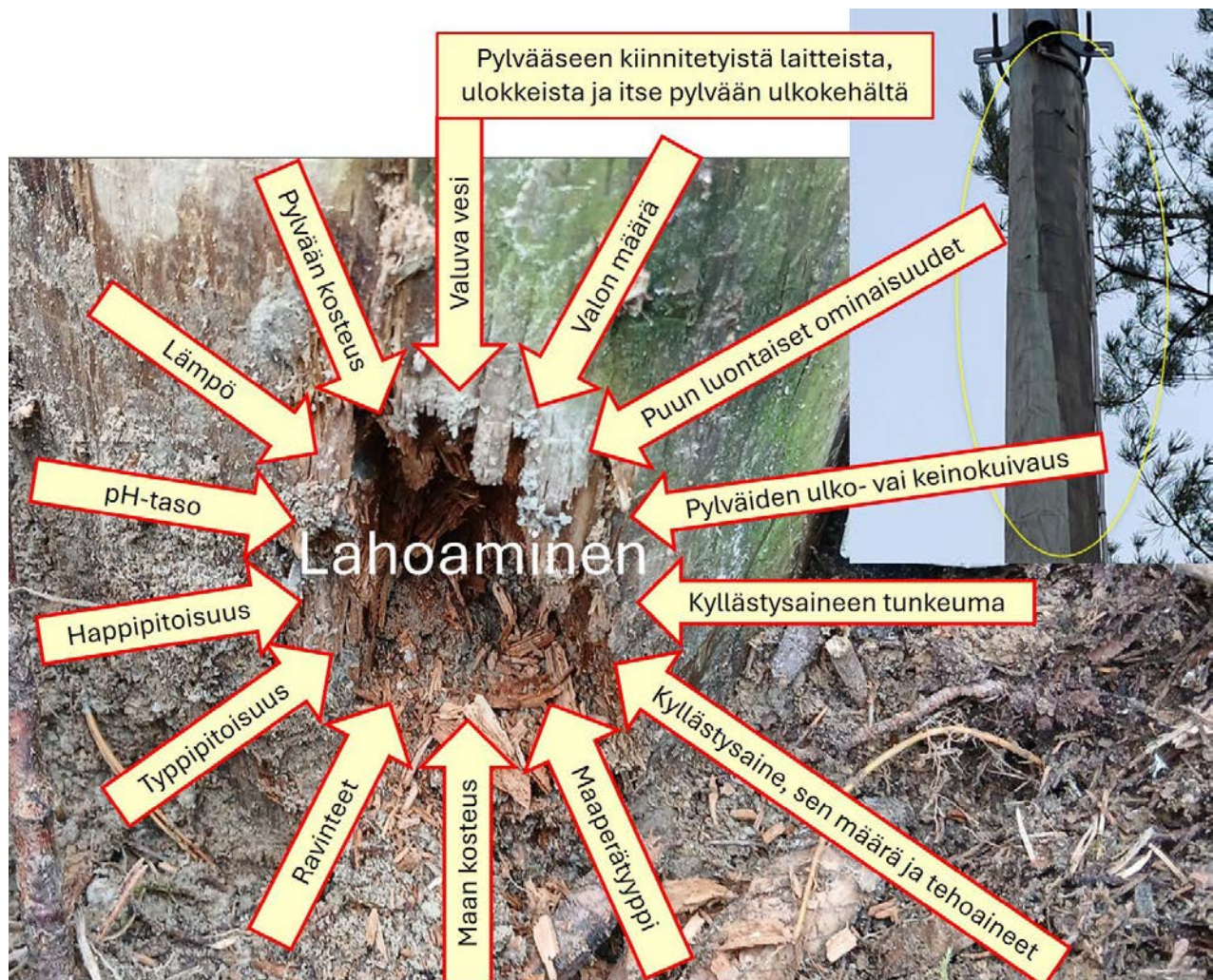
Kuten aiemmin todettiin, pylvään käyttöikä on olennainen tekijä ennakosuunnittelussa. Jos voidaan kohtuu luotettavasti ennustaa C-kyllästetyn puupylvään käyttöikää, silloin osataan arvioida tarkastus- ja vaihtorytmiä, jolloin elinkaarisuunnittelu helpottuu merkittävästi.

Pylväiden tarkastus on kallista ja aikaa vievä työresurssi. Jos sitä voidaan kehittää nopeammaksi ja luotettavammaksi, operatiivinen suunnittelu tarkentuu.

3 PYLVÄÄN LAHOAMISEEN VAIKUTTAVIA TEKIJÖITÄ

Pylvään- ja yleensäkin puun lahoamiseen vaikuttaa lukuisa määrä erilaisia muuttujia (kuva 1). Karkeasti lahoamiseen vaikuttavat tekijät voidaan jakaa neljään pääryhmään

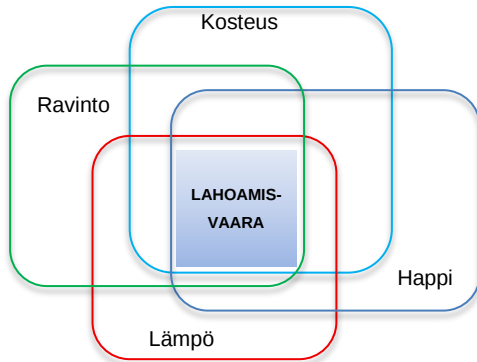
- ilman olosuhteiden vaikutus
- maaperästä johtuvat tekijät
- puun luontaiset ominaisuudet
- pylväästä johtuvat tekijät.



Kuva 1. Kuvassa on esitetty tarkemmin puupylvään lahoamiseen vaikuttavia tekijöitä. Kuva: kai Möller

3.1 Ilman olosuhteiden vaikutus

Puun lahottajat tarvitsevat kosteutta, lämpöä, happea ja ravinteita (kuva 2). Lahottajasienien toimintaan vaikuttavat mm. ympäröivän maaperän tyyppi, valon määrä, pH-taso, puun laatu sekä kyllästysaineet.



Kuva 2. Lahoamisen edellytykset. Ilmalla on suuri vaikutus lahoamisprosessiin. Jos jokin edellytyksistä poistetaan, lahoamista ei tapahdu. Kuva: kai Möller

Happi on ehdoton edellytys lahon syntymiselle; 450 mm maarajan alapuolella hapen määrä vähenee ja noin 1 000 mm syvyydessä lahoamista ei enää tapahdu, koska happea ei ole.

Lahottajasienet kasvavat kosteudesta. Optimaalinen puun kosteusalue on 35–50 % eli puun syiden kyllästymispisteestä ylöspäin (jatkossa PSK). Asiasta lisää kappaleessa ”Puun kosteus”, s. 22.

Puu on hygrooskooppinen aine, joka imee ilmasta kosteutta ja kääntäen luovuttaa sitä sääolosuhteiden mukaan. Puun kosteus on siis jatkuvassa muutostilassa. Kulloistakin puun kosteustilaa kutsutaan tasapainokosteudeksi. Jos ilman olosuhteet ovat pitkään samanlaiset, puun kosteus pysyy ilman olosuhteita vastaavassa tasapainokosteudessa.

Ilmasto on muuttumassa. Suomen leveysasteilla se tarkoittaa ilman suhteellisen kosteuden ja keskilämpötilan kasvamista. Kosteuden ja sateiden lisääntyessä, seurauksena on, että lahottajasienet toimivat tehokkaammin.

Lämpötilalla on iso merkitys sienten elinolosuhteille. Sienien kasvu on optimaalinen lämpötila-alue on 25...30°C. Sienet kasvavat, kun ilman lämpötila on suurempi kuin 0°C. Päivät, joiden keskilämpötila on yli 0°C, ovat selvästi lisääntyneet. Tätä kirjoitettaessa eletään joulukuun

alkua ja pakkaspäiviä on ollut vähän. Vastaava ilmastotyyppi on yleistymässä ja se parantaa lahottajasienten kasvuedellytyksiä lisääntyvien lämpimämpien päivien takia.

3.2 Valon määrä

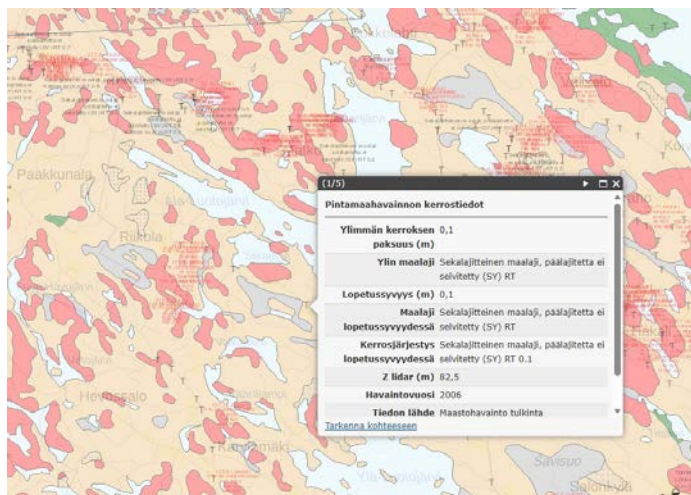
Pylväissä kuten rakennuksissakin etelän puoleinen sivu joutuu kovemmalle rasitukselle kuin pohjoisen puoleinen. Auringon UV-säteily hajottaa puupintaa ja esimerkiksi maali ohenee, häviää ja rapistuu nopeammin.

Vanhan pylvään pinta on yleensä auringon puolelta halkeillut voimakkaasti (Boren 2010, 28). Jos kyllästeen tunkeuma ja jäämä pintapuuhun on epätasainen, niin lahottajasienet pääsevät halkeamista tunkeutumaan kyllästämättömään puuhun.

3.3 Maaperästä johtuvat tekijät

Suomessa Geologian tutkimuskeskus GTK jakaa puolueetonta tutkimustietoa ja palveluja yhteiskunnan ja elinkeinoelämän tarpeisiin. GTK tarjoaa nettipalvelun ”Maankamara”, jossa saa tietoa Suomen maaperästä. Koko Suomea ei ole kartoitettu kattavasti, mutta jo nyt tietoa on paljon saatavilla. Linkki sivustolle: [Maankamara](#). Klikkaamalla sovelluksessa symbolia, sovellus avaa maaperädataa sisältävän ponnahdusikkunan näytölle.

Kuvassa 3 on esitetty taulukossa 2 olevan pylvään 3599505 sijainnin maaperätiedot.



Kuva 3. Kuvakaappaus GTK:n ylläpitämästä Maankamara-palvelusta. Kuva: Kai Möller

Edellistä tukevia sivustoja on kuten [Maanmittauslaitos](#), [Paikkatietoikkuna](#), joihin kannattaa myös tutustua.

3.3.1 Lahoamiseen vaikuttavat maaperät ja sijainnit

Maaperän koostumuksella on merkittävä vaikutus lahon etenemisnopeuteen puupylväissä. Pellot ja niityt nopeuttavat lahon etenemistä, sillä niissä on yleensä lahoamista kiihdyttävää tyypeä, jonka lisäksi peltomaa on kuohkeaa ja ravinteita sisältävää. Kuohkea maaperä auttaa lahottajasienten kasvua, koska elintärkeä happi pääsee paremmin maaperään ja helpottaa sienten kasvua. Myös viljelysmaiden lannoitus lisää lahottajasienten aktiivisuutta.

On myös huomattu, että pylväiden eteläpuolen osat lahoavat nopeammin pelloilla ja niityillä; avonainen maasto altistaa paremmin UV-säteilylle. Lisäksi peltopylväissä on usein maatalouskoneiden ja lehmien ym. eläinten aiheuttamia pintavaurioita, jotka edesauttavat lahon syntymistä.

Erityisesti karkeahiekkaisessa hiekkamaassa lahoaminen on nopeampaa kuin metsämailla, savimaalla ja suomaastossa. Karkea maapohja edesauttaa kuparin huuhtoutumista heikentäen pylvään lahonkestoa.

Myös kalliolla lahoaminen on hidasta riippuen kyllästetyypistä. Esimerkiksi CCA-kyllästeessä kromi kiinnittää kuparin puuainekseen. C-kyllästetyissä pylväissä ei ole riittävän hyvin kiinnittäviä aineita, joten kalliopylväissä on huuhtoutumisen vaara. Toisaalta hankkeessa testattiin kreosootilla kyllästettyjä kalliopylväitä, joissa kallion päällä oli 20–40 cm kerros maata. Niissä esiintyi selkeästi lahoa. Kyseisessä pylväserässä saattoi kuitenkin olla epäonnistunut kyllästysprosessi, joka aiheutti ko. pylväiden ennenaikaisen lahoamisen.

Metsissä lahoaminen ei ole niin nopeaa kuin edellä kuvatuissa sijainneissa, mutta on havaittu, että tienvarsien reunoille pystytettyjen puupylväiden tien puoleiset osat lahoavat nopeammin kuin metsän puoleiset. Myös tienvarsipylväissä esiintyy pintavaurioita tien kunnostustöiden takia.

Suomaastossa veden alla oleva pylväsosa lahoaa hyvin hitaasti, koska happea ei ole saatavilla. Siksi suomaastossa pylväs lahoaaakin pääasiassa maarajan yläpuolelta.

Savimaa on tiivistä ja sen happipitoisuus on alhainen. Hapen pieni määrä hidastaa lahon leviämistä ja tiivis maapohja vähentää huuhtoumaa.

Yleisimpiä maapohjatyypppejä suuruusjärjestyksessä. Numero 1 on lahottavin ja 6 vähiten lahottava. Lahoamiseen vaikuttaa niin moni tekijä, että luettelo on vain suuntaa antava:

1. Pellot ja niityt
2. Karkea hiekkamaa
3. Kalliopohja
4. Metsämaa
5. Suomaasto
6. Savimaa.

Alla on esitetty lyhyesti maaperästä johtuvia, lahoamista nopeuttavia tekijöitä.

3.3.2 Kosteus

Maaperän kosteus lisää lahoamisriskiä. Kuten aiemmin todettiin, lahottajasienet kasvavat kosteudesta oli se sitten ilmassa, puuaineksessa tai maaperässä. Kasvien hyvä kasvu vaatii, että maaperän kosteus on suurempi kuin 20 %. Voidaan olettaa, että sama tilanne on myös sienien maanpinnan alapuolisen rihmaston kasvun osalta.

3.3.3 Ravinteet

Ravinteet ruokkivat sienten ja sienirihmaston kasvua. Jos maaperän orgaanisen aineksen määrä on korkea, lahoamisriski lisääntyy. Orgaaninen maaperä sisältää valmiiksi sieni-itiöitä ja mikrobeja. Mitä enemmän orgaanista ainesta on, sitä suurempi riski on itiötartunnalle. On arvioitu, että jos maaperässä on enemmän kuin 10 % orgaanista ainesta, lahoamisriski kasvaa.

3.3.4 Typpipitoisuus

Lahoamisprosessissa yksi pääravinteista on typpi. Typen määrä ja sienien kasvu ovat suoraan verrannolliset (Viitaniemi 2006, 45). Lahoaminen edellyttää typpeä. Sitä käytetään viljelyssä ja se vaikuttaa lahosienten elinvoimaan. Maaperän typpipitoisuus parantaa sienten kasvua.

3.3.5 Happipitoisuus

Happi ruokkii lahoa. Ilman happea sienet eivät kasva, Maaperässä noin 450 mm maarajan alapuolella hapen määrä vähenee jo merkittävästi ja noin 1 000 mm syvyydessä lahoamista ei enää tapahdu, koska happea ei ole. Siksi esimerkiksi testatuissa pylväissä ei esiintynyt näkyvää lahoa tyvestä noin yhden metrin matkalla.

3.3.6 pH-taso

Hapan- tai lievästi hapan maaperä tukee lahottajasienten biologisia prosesseja (entsyymejä, ionisaatiota ja kilpailuetua), joita lahottajasienet käyttävät. Sopiva pH-taso lahottajasienille on 4–5,5. Hapan pH lue: vähemmän kilpailijoita → sienen rihmasto saa jalansijaa helpommin.

3.3.7 Maaperänäytteiden laboratoriotulokset

Maa-aineksen laboratorionäytteiden avulla selvitettiin maa-aineksen vaikutusta lahoamiseen. Sähkölinjat kulkevat Suomessa hyvinkin erilaisissa maastoissa. Tästä seuraa, että ne kulkevat myös erilasten maasto- ja maaperätyyppien yli. Hankkeessa haluttiin selvittää, onko maaperätyypillä vaikutusta lahoamiseen. Kustannussyistä maaperätyyppejä selvitettiin Etelä-Savossa, tarkemmin Mikkeli, Savonlinna ja niiden lähikunnista.

Saaduista taivutuslujuuden tuloksista valittiin eri alueilta pylväitä, joiden taivutuslujuus oli selkeästi heikentynyt. Vertailuna mukaan otettiin muutama hyvän taivutuslujuuden omaava pylväs. Kaikkiaan maanäytteitä otettiin 25 pylvään sijaintipakoista ja tarkalleen niiden kuopista, jotka oli tosin jo täytetty näytteitä otettaessa. Arvioitiin, että maaperätyyppi on kuitenkin sama, mutta esimerkiksi kuparin huuhtouma ei maaperäarvoissa näy tällöin oikein.

Tuloksissa oli havaittavissa maaperätyypin vaikutusta lahoamiseen. Taulukko 2 on järjestelty siten, että ylimpänä on lahoherkin maaperä ja alimpana pienimmän lahoamisriskin omaava maaperä. Rivien järjestelyperuste on pääsääntöisesti seuraava:

1. lajitteluperuste on pH pienimmästä suurimpaan
2. lajitteluperuste on maan kosteus suurimmasta pienimpään
3. lajitteluperuste on orgaanisen aineksen suhteellinen määrä suurimmasta pienimpään.

Alénin (2000) mukaan lahottajat tarvitsevat aineenvaihduntaansa pieniä määriä kuparia, rautaa, mangaania, molybdeeniä, sinkkiä ja nikkeliä, joita kaikkia puussa on. Jellison (1997) toteaa, että vain muutamaa kertaa suuremmissa pitoisuuksissa kupari ym. ovat myrkyllisiä estäessään tiettyjen entsyymien toiminnan (Kärkkäinen 2003, 315).

Taulukkoon 1 on koottu viljavuus- ja puutarhatutkimuksiin erikoistuneen laboratorion itäisestä Suomesta keräämien maaperänäytteiden kuparipitoisuuksia (Hortilab 2025). Näytteiden vaihteluväli on 1,5–7,6 mg/kg. Hankkeen teettämistä näytteissä usealla kuparipylväällä oli alla olevia viitearvoja selvästi korkeammat maaperän kuparipitoisuudet.

Taulukko 1. Maaperän kuparipitoisuuksia Itä-kaakkois-Suomesta.

Kunta	Maalaji	Cu (mg/kg)
KITEE	KHt	1,5
LAPINLAHTI	HtMr	2,1
MIKKELI	HHk	2,0
LAPINLAHTI	Mm	4,4
LAPINLAHTI	He	4,1
KITEE	KHt	4,0
LAPINLAHTI	Mm	6,7
LAPPEENRANTA	HtS	4,9
LAPINLAHTI	HtMr	4,9
KITEE	KHt	5,2
LAPINLAHTI	He	7,6
MIKKELI	HHk	7,3

Loppusyksystä 2025 testattiin poikkeuksellisen nopeasti lahonneita C-kyllästettyjä pylväitä (ANT1-ANT4) jotka sijaittivat Anttolassa.

Niiden maaperänäytteissä oli poikkeuksellisen suuri kuparin määrä, joka mahdollisesti johtuu suuresta huuhtoumasta laimentaen pylväiden lahonsietokykyä.

Kyseisten pylväiden lahoamiseen vaikuttavat maaperäarvot eivät olleet lahon kannalta optimialueella: maanäytteiden arvojen perusteella pylväiden ei olisi pitänyt lahota yhdeksässä vuodessa. Johtopäätös: Syyn lahoamiselle onko joko kyllästysprosessissa sattunut virhe ja maaperätyyppi (hiekkainen, huuhtoumaa suosiva maaperä).

Vaikka taulukon 2 alussa olevilla pylväillä on vielä kohtuullisen hyvät taivutuslujuudet, maanäytteiden perusteella niiden maaperä on lahoa ruokkiva.

Taulukko 2. Taulukossa yllmpänä on maaperäarvoiltaan lahoherkässä maaperässä olleet pylväät ja alimpana vähemmän lahoherkissä sijainneissa olleet.

Maaperätyyppien arvoista johtuva lahoamisriski pienenee nuolen suuntaan

Pylväsnumero	Pylväsiokkia pylvästä mtoista	Pylväsiokkia pylvästä	Kylläistyyppi	Kylläistysvuosi	Kyllästymä [%]	Tiheys, u = 0 % [kg/m³]	Kosteus- kosteus [%]	Pintapuun voorengas- väli [mm]	Q _{max} [N]	f _m [MPa]	Maaperän pH	Maaperän kosteus [%]	Maaperän orgaaninen aines [%]	Cu maaperästä [mg/kg]	Kokonais- tyyppi [g/kg]	Maastotyyppi	Maalaji	Multa- vuus	Veden- läpäisevyys	HUOM!	
3503301	311		Kreosotti	CR	2007	459	20,0		6089	40,5	4,7	41,6	13,3		Aukea		HTMr	erm	2-3	Kalliopylväs, maa-ainesta vain noin 30 cm.	
3699056	310		Kreosotti	CR	2007	496	25,2		4309	34,7	5,0	34,8	11,8		Aukea		HTMr	rm	2-3	Kalliopylväs, maa-ainesta vain noin 30 cm.	
3599505	209		Kupari	CX-8	2014	61	481	25,9	1,0	3779	36,4	5,1	11,4	7,0		Pelto		HTMr	rm	2-3	
6339777	311		Kupari	CX-8	2018	71	461	21,2	1,0	5710	44,4	5,2	18,2	13,0		Metsä		HTMr	m	2-3	Isot oksat (ei oksaryhmä) syv murtumiselle.
6339690	210		Kupari	CX-9	2018	454	20,8	1,3	4380	33,5	5,2	16,2	5,2	6,0		Metsä/kallio		HTMr	m	2-3	Mitattu pylvään pituus 9 820 mm, ilmeisesti katkaistu
3619761	412		Kreosotti	CR	2007	455	38,4		5726	28,0	5,1	7,4	4,7		Aukea		HTMr	m	2-3	Runsaasti sisälähoaa.	
ANT4	209		Kupari	CX-8N	2015	63	454	17,1	0,7	4195	38,0	5,3	17,3	3,5	160,0	0,87	Tien laita	KHT	m	2-3	Kuparin huultoutuminen?
ANT1	213		Kupari	CX-8N	2015	64	470	17,2	1,2	5616	35,4	5,3	14,2	1,6	190,0	0,38	Tien laita	KHT	vm	2-3	Kuparin huultoutuminen?
8563674	209		Kupari	Cel C4	2020	58	452	20,7	1,2	3719	35,1	5,3	16,2	3,4	44,0		Metsä	HTMr	m	2-3	
8563676	209		Kupari	Cel C4	2020	58	453	20,0	1,4	3932	36,4	5,3	17,2	6,5	10,0		Metsä	HTMr	rm	2-3	
3662795	109	-	Kupari		2014	82	493	27,9	1,4	2985	33,6	5,31	12,8	8,4	85,0		Pelto	HTMr	rm	2-3	
3704434	512		Kreosotti	CR	2007	521	20,5		6547	29,0	5,4	15,7	2,7		Tien laita		HTMr	vm	2-3	Järeä pylväs, suuri Q. Maanpinnan halk. 330 mm, kosteus PSKP.	
3809831	512		Kreosotti	CR	2007	519	30,2		10788	30,8	5,4	14,0	3,5		Aukea		HTMr	m	2-3		
3719983	512	-	Kreosotti	CR	2007	478	25,5		8350	33,1	5,4	9,2	2,6		Aukea		HTMr	vm	2-3	Järeä pylväs, suuri Q. Maanpinnan halk. 294 mm, Sisälähoaa	
ANT3	409	-	Kupari	CX-8	2014	64	509	16,2	1,1	5678	35,5	5,5	15,5	2,8	100,0	0,50	Aukea	KHT	m	2-3	Kuparin huultoutuminen?
ANT2	412		Kupari	CX-8N	2014					5,5	12,9	2,6		160,0	0,55	Tien laita	KHT	vm	2-3	Kuparin huultoutuminen? Muuntajapylväs, ei koestettu (jää linjalle toistaiseksi).	
3606088	209	-	Kupari	CX-8	2014	64	477	30,9	1,5	3634	34,7	5,6	16,2	4,8	36,0		Pelto	HTMr	m	2-3	Lahonnut. Erittäin huonokuntoisen näköinen. Sälötyvi koestuksessa erittäin paljon.
702	513	-	CCA	NTR A	1993	55	425	18,0	1,6	6403	20,8	5,7	16,9	4,5	12,0	1,08	Tien laita	KHT	m	2-3	
6339611	209		Kupari	Cel C4	2018		475	16,5	0,7	4642	42,0	5,8	12,8	1,4	12,0		Metsä	HHT	vm	1-2	
3642913	309	-	Kupari	CX-8	2014	53	447	24,8	0,7	3689	32,5	5,9	14,7	10,8	23,0		Pelto	HTMr	rm	2-3	
216	412		Kupari	Cel C4	2019	65	426	16,5	1,6	6509	33,7	6,2	19,6	7,9	14,0	2,84	Metsä	KHT	m	2-3	Pylväs on ollut käytössä vain 5 vuotta.
208	212		Kupari	Cel C4	2019	57	434	17,4	1,8	5609	35,4	6,2	17,4	5,4	9,0	1,52	Turvesuo	KHT	rm	2-3	Pylväs on ollut käytössä vain 5 vuotta.
6339616	212		Kupari	CX-8	2018	75	501	20,5	0,9	5166	39,6	6,6	14,4	2,1	14,0		Pelto (multa/savi)	KHT	vm	2-3	
211	312		Kupari	Cel C4	2019	51	457	20,0	1,3	5131	33,8	6,7	17,9	7,0	7,0	1,67	Talousetä	KHT	m	2-3	Pylväs on ollut käytössä vain 5 vuotta.
14A-6149266	309	-	Kupari	CX-8	2016	18	447	22,4		1695	11,2	7,2	12,7	4,0	37,0		HTMr	m	2-3	Pylväs lahonnut, erittäin pieni kyllästymä, vain ohut kerros pintaputaa. Maaperätyypillä ei vaikutusta lahoamiseen.	
Keskiajo					2014	60	469	22,2	1,2	5178	33,7	5,6	16,7	5,5	49,4						

Yllimitteettuja pylväitä 4 kp/18 pylvästä --> lahonkesto!

HTMr = hieta-moreeni (hikevä, kuohkea)
KHT = karkaa hieta (kuohkea, lievästi poutiva)
HHT = hieno hieta (hikevä, hyvä viljelymaa)
vm = vähämultainen
m = multa
rm = runsasmultainen
erm = erittäin runsasmultainen

Lahoamisriskin kasvaminen:
pH < 5,5 → lisää riski
Organinen aines > 10 % → lisää riski
Maan kosteus > 20 % → lisää riski
Lahottajat tarvitsevat aineenvaihduttuaan

Veden-
1 = pieni
2 = kohtalainen
3 = suuri
kyky

Syksyn 2024 näytteistä ei määritetty typpeä näytteen analysoinnin kalleuden vuoksi, mutta syksyn 2025 kahdeksasta näytteestä typpi määritettiin. Kokonaistypen määrä näytteissä vaihteli 0,38–2,84 g/kg välillä. Anttolan pylväissä kokonaistypen määrä oli alhaisin, joka osaltaan tukee sitä, että huuhtouma on syy Anttola-pylväiden lahoamiseen. Typen määrä vaihtelee KHT-maaperätyypissä (karkea hieta) 0,1–1 g/kg välillä. Kolmessa Anttolan pylväessä kokonaistypen määrä oli selkeästi isompi.

Pylväiden ANT1 ja ANT3 poikkileikkauksissa oli silmin nähden havaittavissa vajaatunkeumaa. Vajaatunkeumaa oli paikallisesti hyvin pienellä alueella pylvään koko pituuteen nähden. Tunkeuma näytti tyypilliselle "vesitaskun" aiheuttamalle vajaatunkeumalle, eli puu on ollut paikallisesti liian märkä tai jäässä ennen kyllästystä.

Kuvassa 4 pylvään ANT1 vajaatunkeuman aluetta on käsitelty reagenssilla, joka paljastaa kuparin poikkileikkauksesta. Oranssi alue tarkoittaa, että kuparia ei ole ja tummat alueet sisältävät kuparia (kuparireagenssi reagoi kuparin kanssa). Kuvasta näkyy selvästi, kuinka vajaatunkeuman takia kuparia ei ole kuin ohuesti pylvään pintapuussa.



Kuva 4. ANT1-tienvarsipylväs oli pahoin lahonnut. Syynä vajaatunkeuman ja todennäköisesti myös huuhtouman yhteisvaikutus.

Näytteessä ANT4 ei ollut havaittavaa lahoa, eikä LUKE:n analyyseissäkään löytynyt lahottajasieniä (Båras).

Näytteessä ANT1 ja ANT3 oli lahon lisäksi myös sienten rihmastoja. Molemmissa tapauksissa kyseessä on ruskolahottajat. Tulokset ovat siis peräisin sekä suoraan lahosta että rihmastosta. (Luonnonvarakeskus LUKE)

Näytteestä ANT1 löytyi laji Fibroporia vaillantii eli lavakääpä. Tämä laji on yksi tunnetuimmista kuparinkestäväistä ruskolahottajasienistä, joka kestää korkeitakin Cu-pitoisuuksia.

Kuparinkestävyys perustuu oksalaattien tuotantoon. Tätä lajia on löytynyt aikaisemmissakin tutkimuksissa kuparikyllästetyistä pylväistä (ks. liite 2 ”Sähköpylväiden ennenaikainen vaurioituminen Sveitsissä ja Saksassa” HUOM! liitteen dokumentissa puulajina on kuusi).

Näytteestä ANT3 löytyi toinen ruskolahoa aiheuttava laji, Postia (Oligoporus), jonka tarkempi tunnistus vaatii vielä lisätyötä, sillä Suomesta löytyy useampi laji, jotka ovat lähellä toisiaan ja hankalammin erotettavissa toisistaan DNA:n perusteella. Mahdollisuuksia Postia sericeomollis (Oligoporus sericeomollis) eli korokääpä, Postia rennyi (Oligoporus rennyi) eli kuromakääpä, tai Postia romellii (Oligoporus romellii) eli karhikääpä. Näiden lajien osalta ei löydy aikaisempia tutkimuksia niiden Cu-sietokyvystä. Postia-suvusta ja sen lähisuvuista löytyy kuitenkin muita esimerkkejä lajeista, jotka pystyvät lahottamaan kuparikäsiteltyä puuta, esim. Rhodonia placenta (Postia placenta) eli istukkakääpä. Lisätutkimuksien jälkeen LUKE:n lahottajasieniasiantuntijoiden arvio edellä mainituista kolmesta lajivaihtoehdosta oli, että kyseessä olisi Postia sericeomollis eli korokääpä jo ekologiansa perusteella (selviytyy esim. paloalueilla eli haastavassa ympäristössä).

Kuvasta 4.1 voidaan havaita, että noin 10 vuoden ikäisessä pylväässä voi olla pahoja lahovaurioita, joten jos pylväsluokkakohdaiset lahokäyrät voidaan toteuttaa tai vielä paremmin sovellus, jossa käyrät ovat, pylvään ikää voidaan ennustaa. Asiasta lisää myöhemmin. Kuva vasempaan pylvääseen ANT1 on iskenyt Fibroporia vaillantii eli lavakääpä ja oikeanpuoleiseen ANT3 pylvääseen Postia sericeomollis eli korokääpä.



Kuva 4.1. Pylväät ANT1 (vasen) ja ANT3 (oikea). Näissä pylväissä on ollut joko runsas huuhtouma, vajaatunkeuma tai muu kyllästysprosessissa tapahtunut virhe. Myös em. yhteisvaikutus on mahdollista. Kuva: Kai Möller

Taulukkoon 3 on koottu avainarvoja maaperätyypeittäin. Valitettavasti saatavilla ollut metadata sisälsi puutteelliset maaperätyyppien kirjaukset; vain 88 pylvääseen (32 %) 274 pylvästä oli maaperätyyppi kirjattu. Suuressa osassa kyllästekohtaisista maaperätyypeistä oli vain yksi tai muutama pylväs, joten johtopäätösten tekeminen niin pienillä osajoukoilla oli vaikeaa.

Taulukko 3. Arvot kyllästysainetyypin ja maaperätyypin funktiona. Kysymysmerkki riveillä kertoo, että maaperätyyppi on tuntematon. Taulukossa taivutuslujuus ja -hajonta on redusoitu 18 % kosteuteen.

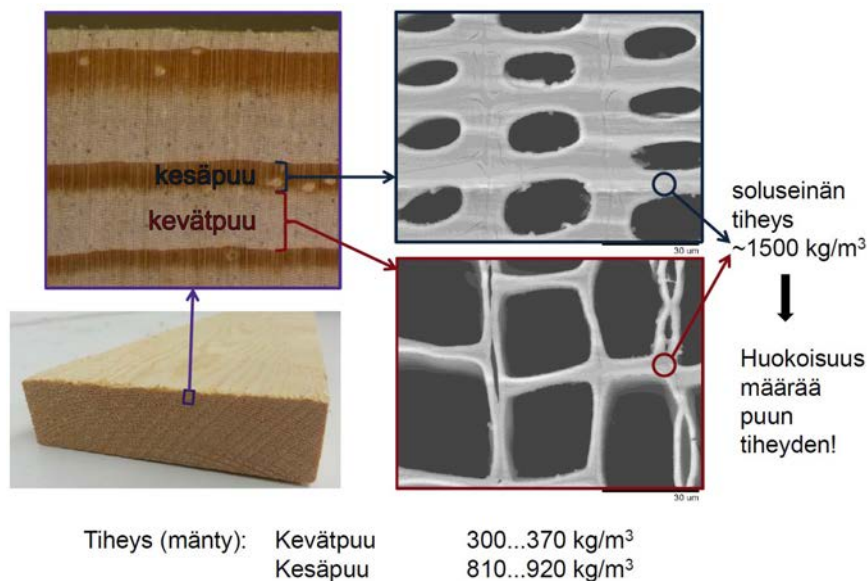
Kyllästysainetyyppi maaperätyypeittäin	Pylväitä maaperä- tyypeittäin [kpl]	Pylvään käyttö- vuodet	Koestus- kosteus MC [%]	Tiheys MC = 0 % [kg/m ³]	Kyllästynyt alue koko alasta [%]	Qmax [N]	fm [MPa]	fm hajonta [MPa]	fm redusointi MC = 18 % [MPa]	fm redusointi hajonta MC = 18 % [MPa]
CCA										
?	49	42	17,3	461	62,0	5 572	41,6	10,6	40,3	8,9
Hiekkamaa	3	41	19,8	457		6 822	32,5	8,3	33,6	6,1
Kallio	6	51	21,9	443		4 349	31,9	4,6	35,0	4,9
Kallio/hiekkamaa	1	46	23,9	416		3 449	31,0	0,0	35,7	0,0
Kivikko/Moreenimaa/karkea hiekka	1	46	22,6	458		4 606	29,0	0,0	32,4	0,0
Kivikko/Moreenimaa/kivitäyttö	1	46	17,6	404		7 821	31,0	0,0	30,7	0,0
Kivitäyttö/soramaa/multaperäinen	2	33	16,0	472		4 792	38,4	3,9	36,5	2,8
Moreenimaa/karkea hiekka	5	47	20,0	460		4 920	32,6	5,2	34,2	4,8
Moreenimaa/kivitäyttö	3	52	20,8	451		4 615	35,7	2,4	38,2	2,5
Savimaa/siltti	4	47	20,2	473		6 619	33,5	4,1	35,1	4,0
Soramaa	1	46	22,4	479		6 935	37,1	0,0	41,2	0,0
CCA Total	76	43	18,4	459	62,0	5 485	38,6	9,8	38,5	7,9
Kreosootti										
?	17	18	26,3	510	61,9	6 022	36,7	6,9	44,0	6,9
Hiekkamaa	1	12	18,6	483		5 163	37,8	0,0	38,3	0,0
Kalliopylväs	1	57	16,9	427		1 937	14,4	0,0	13,9	0,0
Maa	21	58	16,7	495		4 154	29,5	13,8	28,3	12,5
Kreosootti Total	40	40	20,8	500	61,9	4 918	32,4	11,8	34,8	13,1
Kupari										
?	120	8	20,7	476	61,5	5 821	43,3	7,1	46,2	8,5
Hiekkamaa	3	9	22,8	521	68,3	5 814	45,0	3,4	51,0	13,9
Kallio	6	10	19,0	469	62,2	5 439	36,9	6,3	38,0	7,6
Kivikko / Soramaa	1	7	25,1	514	48,1	5 407	50,8	0,0	59,9	0,0
Moreenimaa/karkea hiekka	12	11	19,0	469	49,9	5 593	36,9	3,6	37,8	3,3
Multaperäinen maa	2	10	27,9	529	63,4	5 595	47,2	3,8	58,7	5,7
Multaperäinen maa/savimaa	3	6	22,5	510	65,0	5 857	46,2	7,2	51,6	9,9
Savimaa/siltti	9	11	20,3	489	61,1	5 753	38,4	5,7	40,9	9,0
Soramaa	2	17	27,8	503	54,5	5 603	44,3	6,2	56,1	18,5
Kupari Total	158	8	20,8	479	60,7	5 778	42,5	7,0	45,5	9,0
Grand Total	274	23	20,1	476	61,0	5 571	39,9	9,3	42,0	10,3

3.4 Puun luontaiset ominaisuudet

3.4.1 Puun tiheys

Puun paras lujuuden mitta on sen tiheys. Männyn tiheys kohoaa selvästi ytimestä pintaan päin. Pintapuu on siis lujempaa kuin pylvään ytimessä. Ominaisuus on hyvä, koska pylvään taipuessa kovin rasitus kohdistuu sen ulkokehälle ja erityisesti vetopuolelle. Taivutuksen aiheuttama jännitys on alimmillaan lähellä ydintä ja suurimmillaan ulkopinnalla. Männyn tiheys on suurimmillaan sen ollessa noin 80 vuoden ikäinen.

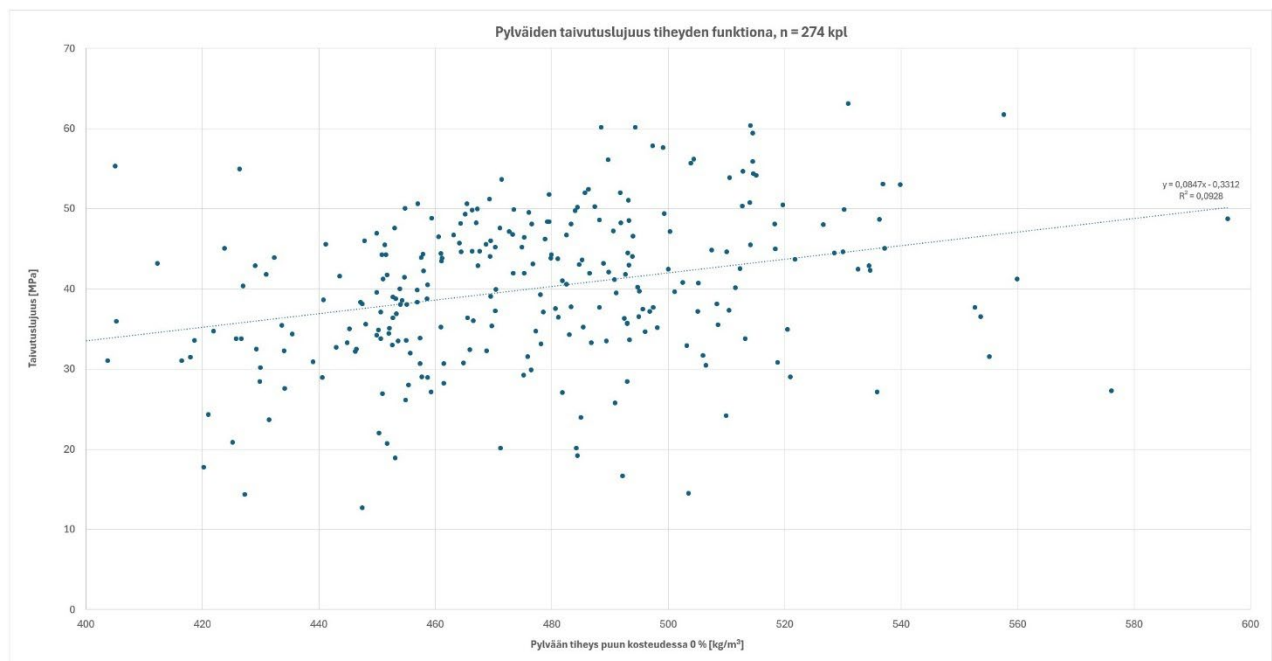
Kuvasta 5 voidaan helposti huomata, miksi kesäpuu ja kesäpuuprosentin suuruus on hyvin merkittävä tekijä puun lujuudelle. Sekä kevät- että kesäpuussa soluseinämien tiheys on sama eli noin $1\,500\text{ kg/m}^3$. Koska kesäpuussa soluseinä on huomattavasti paksumpi, tästä seuraa, että puuainesta on tilavuusyksikössä enemmän, jolloin soluontelon tilavuus on pienempi ja puuainesta on tällöin paljon tiheämpää kuin kevätpuussa.



Kuva 5. Soluseinämien tiheys kaikkialla puun rungossa on likipitään sama, mutta kevätpuu on huomattavasti huokoisempaa kuin kesäpuu. Siksi hyvä puun kesäpuuprosentti on lujuuden kannalta hyvä. Kuva: Kristina Lillqvist

Kuvan 6 kuvaajasta voidaan havaita, että testattujen pylväiden tiheyden hajonta oli suurta.

Testatussa aineistossa puun tiheyden vaihteluväli 0 % kosteudessa oli noin 400 kg/m^3 - 600 kg/m^3 . Saatu tiheyden keskiarvo 476 kg/m^3 (MC = 0 %) on hyvin lähellä tyypillistä kirjallisuusarvoa 470 kg/m^3 . Saatujen mittaustulosten korrelaatio on tyydyttävä.



Kuva 6. Taivutuslujuuden riippuvuus puun tiheydestä. Regressiosuoran suunta on oikea; tiheyden kasvaessa puun lujuus kasvaa. Kuva: Kai Möller

Taulukossa 4 tiheydet on luokiteltu kuuteen ryhmään. Taulukosta havaitaan, että määrällisesti eniten pylväitä on tiheysluokassa 451–500 kg/m³, johon sijoittuu myös suomalaisen männyn keskitiheys. Myös maksimivoima, jonka pylväät kestivät noudattaa tiheysryhmäjakoja; heikoimmassa tiheysryhmässä pylväät kestivät pienimmän voiman.

Kuparikyllästeryhmän Cu 2014–22 tiheysluokassa 441–600 on pylväs, joka kesti vain 3 465 N voiman. Kuvia tarkasteltaessa pylvään tyvessä oli rengashalkeama, jonka astekulma oli noin 170° eli lähes puolikaari. Se selittänee päällepäin siistin näköisen pylvään heikkoa jännityksen sietoa ja taivutuslujuutta.

Taulukko 4. Eri kyllästetyyppien avainarvot tiheysluokittain.

Impregnation type by density- and moisture content group	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot Groups	Diameter at ground line [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
CCA	76	43	459	18,4	1,2	3	233	5 485	38,6
⊕ 350-400	3	52	392	18,8	1,4	0	219	5 449	37,4
⊕ 401-450	23	43	431	19,8	1,1	1	246	5 490	33,9
⊕ 451-500	44	44	471	17,7	1,2	2	228	5 360	39,9
⊕ 501-550	6	38	512	18,2	1,1	0	226	6 407	47,9
Creosote	40	40	500	20,8		2	236	4 918	32,4
⊕ 401-450	3	58	435	17,4	0,0	0	249	2 953	16,9
⊕ 451-500	17	40	478	20,1	0,0	1	236	4 281	28,8
⊕ 501-550	16	37	519	22,1	0,0	1	235	5 795	36,7
⊕ 551-600	4	35	562	21,3	0,0	0	226	5 586	42,0
Cu 2007-13	42	13	478	22,1	1,2	2	237	5 507	37,9
⊕ 401-450	12	14	438	20,8	1,2	1	239	5 588	35,3
⊕ 451-500	20	13	475	21,7	1,2	1	236	5 292	37,1
⊕ 501-550	8	14	522	23,2	1,2	0	236	5 828	42,3
⊕ 551-600	2	16	575	29,0	1,3	0	236	5 878	42,6
Cu 2014-22	116	7	479	20,3	1,3	11	222	5 876	44,2
⊕ 350-400	1	4	397	20,7	2,5	0	220	4 330	30,6
⊕ 401-450	10	7	431	19,5	1,3	0	228	5 685	40,0
⊕ 451-500	84	7	474	20,1	1,3	11	222	5 908	43,9
⊕ 501-550	19	7	515	21,0	1,1	0	215	6 023	49,2
⊕ 551-600	1	10	555	30,0	0,0	0	197	3 465	31,5
⊕ 601-700	1	4	671	21,8	0,0	0	261	6 284	38,5
All totals (averages)	274	23	476	20,1	1,2	18	229	5 571	39,9

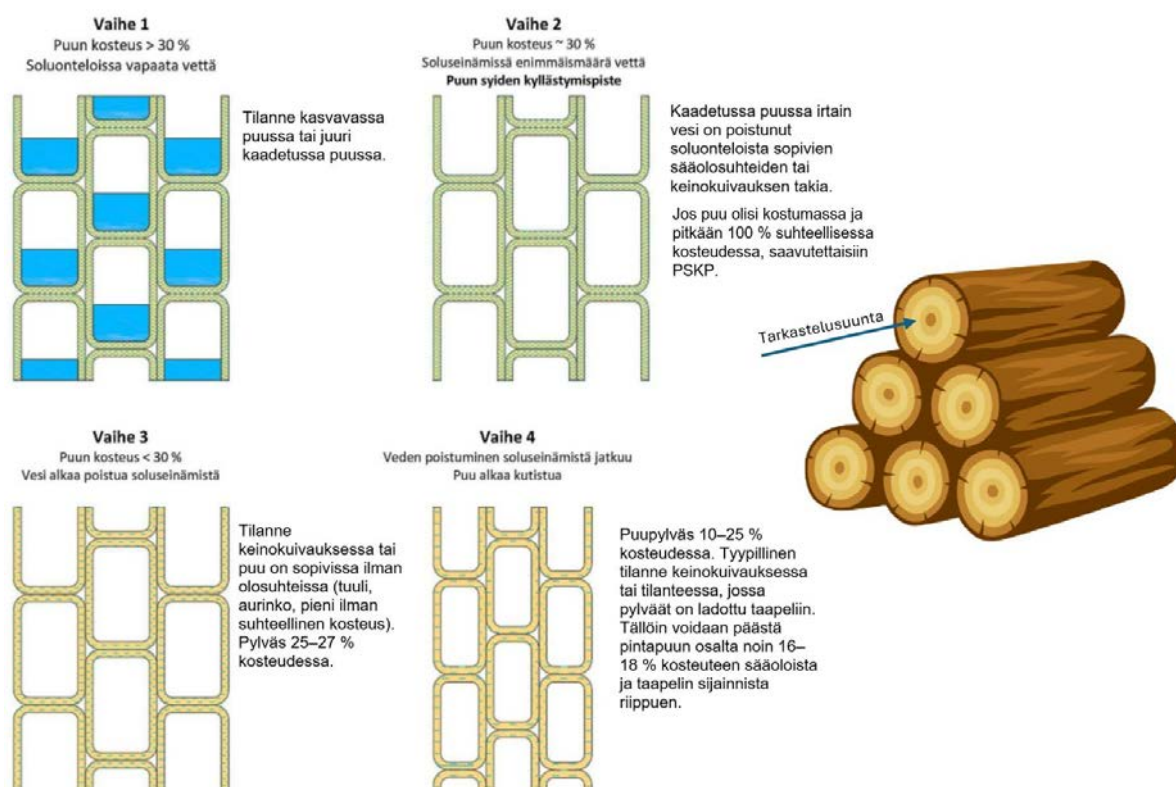
Tiheys on puumateriaalin lujuuden määräävä tekijä, jonka antamaa lujuusinformaatiota voidaan täydentää vuosiluston leveydellä ja kesäpuuprosentilla.

Mainittakoon vielä, että männyn keskimääräinen rungon tiheys alenee tyvestä latvaan päin ja on noin 80 % rungon tyvipään tiheydestä, vaikka pintapuun osuus kasvaakin (Jalava 1952). Tiheysero on siis merkittävä. Jos mäntyrunghosta valmistetaan kaksi pylvästä, tyvi- ja latvapylväs, niin latvapylvään tiheys on alhaisempi ja on lisäksi oksaisempi. Molempien yhteisvaikutuksesta latvapylväs on todennäköisesti lujuudeltaan heikompi kuin rungon tyvestä valmistettu.

3.4.2 Puun kosteus

Puun syiden kyllästymispiste (PSK) on se puun kosteus, jossa soluseinämiin on kyllästynyt maksimimäärä vettä. Tällöin puhutaan sidotusta vedestä. Männyn ollessa PSK:ssä, puun kosteus on 27–30 % riippuen lämpötilasta. Kun soluontelot alkavat täyttymään ns. vapaalla vedellä, puun vesipitoisuus on suurempi kuin 30 %. Puuaineksen kosteuden ollessa 27 % tai enemmän, puu ei kutistu eikä turpoa (kuva 7).

PSK:llä on myös merkittävä vaikutus puun lujuuteen; kun puun kosteus on suurempi tai yhtä suuri kuin PSK, puuaineksen lujuusominaisuudet eivät muutu. Yleisesti ottaen puun kosteuden laskiessa PSK:stä aina 10 % kosteuteen, lujuusominaisuudet paranevat.



Kuva 7. Kuvassa puun solut neljässä eri tilanteessa. Kuvan tarkastelusuunta on puun poikkileikkaus eli syitä vastaan kohtisuorasti. Kuva ovat periaatteellinen, jolla puun kosteusilmiötä on havainnollistettu. Kuva: Puuinfo ja Kai Möller

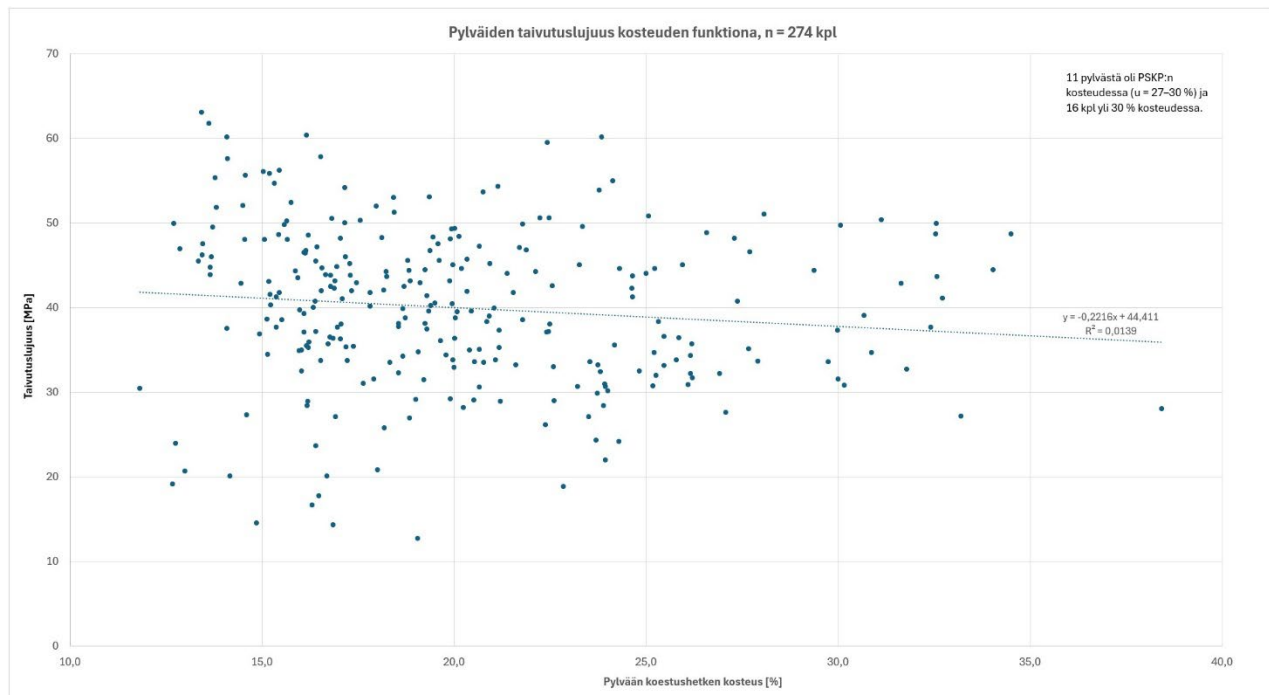
Testatuista 274 pylväästä 11 kpl oli PSK:n kosteudessa (27–30 %) ja 16 kpl yli 30 % kosteudessa. Kuvan 8 kuvaajasta voidaan havaita, että kosteus ei korreloi selkeästi taivutuslujuuden kanssa. Testipylväiden kosteus vaihteli välillä 12–38 %. Regression R^2 -luku on 0,0139, joka selittää huonosti taivutuslujuuden riippuvuutta kosteudesta. Käytännössä luku tarkoittaa, että selitysaste on 1,4 % eli heikko.

Testitulosten perusteella kosteusvälillä 12–27 % puussa oleva kosteus ei näytä vaikuttavan taivutuslujuuteen juurikaan.

Pylväistä 161 kpl oli kosteusvälillä 12–20 %. Aikaisempien tutkimusten perusteella voidaan olettaa, että ko. kosteusalueella puun lujuus riippuu varsin suoraviivaisesti kosteudesta. Alle 20 % kosteuksissa järeän pyöreämuotoisen kappaleen lujuus ei heikkene kuitenkaan samassa suhteessa kuin vaikkapa kantikkaan parrun.

Lisäksi pintapuussa oleva kosteus ei välttämättä ole koko pylvään kosteuspitoisuuden mukainen vaan pienempi. Tämä johtuu siitä, että todennäköisesti sydänpuun kosteus pylväillä on ollut 25–30 % eli suuressa osassa pylväitä korkeampi kuin koko kiekon keskikosteus, jolloin

pintapuun kosteuden on oltava alhaisempi kuin pylväskohtaiset kosteudet. Hankkeessa ei mitattu erikseen pintapuun ja sydänpuun kosteuksia.



Kuva 8. Pylväiden taivutuslujuus pylvään kosteuden funktiona. Kuva: Kai Möller

3.4.3 Pinta- ja sydänpuu

Sydänpuulla tarkoitetaan puun rungon sisintä osaa, joka mäntypuussa poikkeaa rungon ulkokehästä (pintapuun) tummemman värin perusteella.

Sydänpuu muodostuu kuolleesta solukosta ja vastaavasti pintapuun elävästä solukosta.

Kasvavassa puussa rungon pintapuun alueella kulkee puun käyttämä vesi juurista puun yläosiin ja siksi kosteuspiitoisuus pintapuun alueella on huomattavasti sydänpuuta korkeampi.

Pinta- ja sydänpuun ominaisuudet eroavat toisistaan esimerkiksi tiheyden ja lahonkestävyyden osalta.

Havupuille tyypillistä on pihka- ja uuteaineiden keräytyminen sekä lahonkestävyyteen vaikuttavan pinosylviinin esiintyminen sydänpuussa. Usein sydänpuuhun kertyvät aineet suojaavat lahottajasieniltä ja muilta organismeilta (Kärkkäinen 2003). Sydänpuu ei kuitenkaan

kestä lahottajasienten ”hyökkäystä” paljoakaan pitempään kuin pintapuu. On arvioitu, että käsittelemättömän männyn sydänpuun lahonkesto on noin kaksinkertainen pintapuuhun verrattuna.

Koska männyn sydänosa ei kyllästy, hyvin kyllästyneen pintapuun lahonkestävyys on moninkertainen sydänpuuhun nähden. Siksi pylväissä esiintyy usein sisälahoa lahottajaitiöiden päästessä puun sisäosiin.

3.4.3.1 Pintapuun osuus

Puuaineksen tiheyden kasvu sekä vuosilustojen paksuuden pieneneminen rungossa ytimestä pintaa kohti johtavat siihen, että puuaineksen lujuus on pintapuussa parhaimmillaan.

Mekaanisesti tarkasteltuna suurimmille rasituksille altistuvilla alueilla, kuten pylvään ulkokehällä edellä todetusta ominaisuudesta on suuri hyöty esimerkiksi pylvään ollessa taivutusjännityksessä.

Pihlajamaa ja Jantunen (1995, 20) toteavat: ”mekaanisten ominaisuuksien paraneminen ytimestä pintaan päin on paljon merkittävämpää hidas- kuin nopeakasvuisissa koekappaleissa.”

Mäntykappaleiden pinta- ja sydänpuun määrittelyssä käytettiin apuna reagenssikäsittelyä (kuva 9). Männyn sydänpuu värjäytyy reagenssin vaikutuksesta punaiseksi.



Kuva 9. Kuparireagenssikäsittelyn jälkeen kuparia sisältämätön alue värjäytyy oranssiksi ja erottuu tummasta, kuparia sisältävästä puuaineksesta selkeästi. Kuvan pylväs on kyllästynyt vain alle 20 % poikkileikkauksestaan. Kuva: Juho Peura

Vanhoissa männyissä sydänpuuosuus voi nousta 70–80 prosenttiin (Löyttyniemi 1986, 12).

3.4.4 Kevät- ja kesäpuu

Männyssä kesäpuun tiheys vaihtelee välillä 810–920 kg/m³ ja kevätpuun tiheys 300–370 kg/m³ (Kärkkäinen 1985). Kummassakin tapauksessa soluseinämän tiheys on sama eli noin 1 500 kg/m³. Erot johtuvat soluonteloiden tilavuudesta; kevätpuulla on isommat soluontelot kuin kesäpuulla ja näin ollen niissä on enemmän ilmaa (ks. kuva 5, s. 19).

Siksi puun poikkileikkauksen kevät-kesäpuusuhteella on merkitystä puun lujuuteen. Kesäpuu on huomattavasti lujempaa kuin kevätpuu.

Kesäpuuprosentti lasketaan kaavalla

$$p_k = \frac{\sum s_k}{\sum s_l} \cdot 100\%$$

p_k on kesäpuuprosentti

s_k on kesäpuulustojen paksuuksien summa mitatulla matkalla, esimerkiksi ytimeistä pintapuuhun (säde)

s_l on vuosilustojen yhteispaksuus mitatulla matkalla, esimerkiksi ytimeistä pintapuuhun (säde).

Yleisesti oletetaan, että havupuiden kasvunopeuden hidastuessa kesäpuun osuus (kesäpuuprosentti) kasvaa aivan äärimmäisiä olosuhteita lukuun ottamatta.

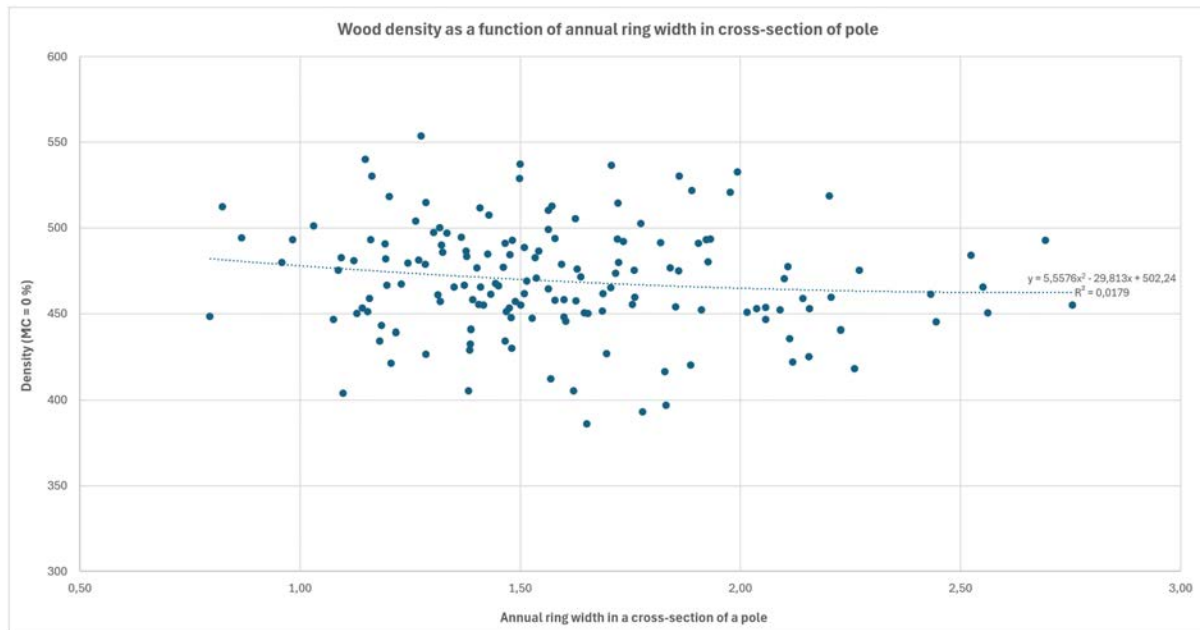
Kesäpuuprosentti on suurimmillaan vuosiluston paksuuden ollessa 1,0...1,5 mm ja se alenee vuosiluston ohetessa tai paksuntuessa ko. vaihteluvälistä.

3.4.5 Vuosilustojen paksuus

Vuosilustot vaikuttavat puun lujuuteen ja tiheyteen. Mitä enemmän vuosilustoja on, sen vahvempaa puuaines on. Tämä ei kuitenkaan pidä täysin paikkaansa. Hyvin nopean- ja hyvin hidaskasvuisen männyn kesäpuuprosentti on huomattavasti pienempi ja tämä vaikuttaa kevät-kesäpuusuhteeseen. Tutkimukset osoittavat, että kesäpuuta on keskimäärin eniten sellaisissa mäntyrungoissa, joissa vuosilustojen vahvuus on hiukan yli 1 millimetri (Jalava 1952, 41).

Tällöin kesäpuun osuus on noin 30 % keskiarvon vaihdellessa noin 18–22 % välillä. Toisin sanoen, mitä enemmän poikkileikkauksessa on kesäpuuta, sitä suurempi on puun tiheys ja sitä parempi on taivutuslujuus.

Kuvan 10 kuvaajassa on esitetty tiheys pylväskiekoista sahatuista näytteistä laskettujen vuosilustojen paksuuden funktiona. Saatu keskiarvo vastaa täysin monissa julkaisussa saatua suomalaisen männyn vuosiluston paksuutta, joka on 1,2 mm.



Kuva 10. Saatu vuosilustojen paksuuden keskiarvo on linjassa kirjallisuusarvojen kanssa, mutta tulos ei korreloi kovin hyvin tiheyden kanssa. Kuva: Kai Möller

Vuosirenkaiden paksuuden (leveys) kannalta huonoja leveysluokkia oli jokaisessa kyllästetyppiryhmässä (kreosoottikiekkaja ei mitattu). Yli 2 mm vuosiluston paksuudella sekä CCA:n että Cu 2014–22 voima- ja taivutuslujuusarvot olivat heikentyneet. Poikkeus Cu 2007–12, jossa 2,2 mm vuosiluston paksuudella tuli paras taivutuslujuuden arvo. Tosin se edusti vain yhden pylvään tulosta (kuva 10).

Taulukko 10. Pylväiden avainarvoja kyllästetyypeittäin ja vuosilustojen leveysluokittain.

Impregnation type by annual ring width group (only sapwood)	Number of Poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
CCA	76	43	459	18,4	1,2	5 485	38,6
0,5-0,99	23	41	459	18,2	0,8	5 690	39,9
1,0-1,49	35	43	461	17,3	1,2	5 688	40,6
1,5-1,99	11	44	455	20,9	1,6	5 228	34,1
2,0-2,49	4	55	455	20,5	2,2	4 369	27,8
No value	3	49	455	21,7	—	3 979	36,9
Creosote	40	40	500	20,8	--	4 918	32,4
No value	40	40	500	20,8	—	4 918	32,4
Cu 2007-13	42	13	478	22,1	1,2	5 507	37,9
0,5-0,99	8	14	462	21,1	0,8	5 857	39,2
1,0-1,49	21	14	486	23,0	1,2	5 234	37,1
1,5-1,99	5	13	455	19,3	1,7	4 869	35,4
2,0-2,49	1	10	484	30,1	2,2	6 035	49,7
No value	5	13	493	20,0	—	6 657	38,3
0,0-0,49	2	11	480	23,4	0,4	5 415	39,0
Cu 2014-22	116	7	479	20,3	1,3	5 876	44,2
0,5-0,99	26	7	480	19,0	0,8	5 579	44,9
1,0-1,49	54	7	478	20,4	1,2	5 909	44,5
1,5-1,99	22	6	470	21,2	1,7	6 360	43,5
2,0-2,49	6	6	451	17,9	2,3	5 262	39,1
No value	6	7	541	25,1	—	5 695	45,5
0,0-0,49	2	9	476	19,0	0,4	5 926	45,9
Grand Total	274	23	476	20,1	1,2	5 571	39,9

3.4.6 Oksaisuus

Pylvään pinnan alueella olevat oksaryhmät heikentävät pylvään lujuutta merkittävästi. Mitä isompia oksat ovat, sen suurempi niiden vaikutus on pylväiden taivutuslujuuteen.

Pylvään sisäoksien vaikutus lujuuteen on vähäinen, koska sydänpuun alueella taivutusjännitys on alhainen. Puun mekaaniset ominaisuudet paranevat mitä kauemmas ytimestä mennään.

Pihlajamaa ja Jantunen (1995, 78) toteavat: ”järeeässä lankussa sisällä olevien, kylestyneiden oksien kohdalla palkin särmät jäävät ehjiksi. Taivutuksessa oksien vaikutus ei tällöin ulotu ylä- ja alapinnan eniten rasitetuille vyöhykkeille, joten sisäoksien vaikutus lujuuteen on merkityksetön”. Sama pätee lujuusominaisuuksiltaan suurempia jännityksiä kestävään pyöreään profiiliin, mikä puupylväissäkin on.

Kaikkiaan oksaryhmästä vaurioituneita pylväitä oli 18 kappaletta eli 6,6 % otoksesta. Niistä 11 pylvästä oli vuosina 2014–20 kyllästetyissä C-pylväissä. Tosin kyseinen pylväsryhmä oli suurin sisältäen 116 pylvästä. Taulukossa 11 oksaryhmistä murtuneet pylväät on esitetty kyllästysvuosittain. Eniten niitä oli vuonna 2020 kyllästetyissä C-pylväissä. Kun tarkastellaan oksaryhmäpylväiden taivutuslujuuksien keskiarvoa (38,7 MPa), se on hieman pienempi kuin koko aineiston (39,9 MPa). Ero ei ole kuitenkaan merkittävä.

Taulukko 11. Oksaryhmiä sisältävät pylväät kyllästystyypeittäin ja kyllästysvuosittain.

Impregnation type by knot group	Number of poles	Year in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
Impregnation year	18	17	466	18,5	1,3	4 972	38,7
CCA	3	48	454	17,8	1,5	5 300	40,0
1962	1	62	451	16,1	—	2 942	37,1
1978	1	46	445	21,6	1,8	7 055	33,2
1989	1	36	466	15,6	1,1	5 903	49,8
Creosote	2	38	501	18,5	--	3 647	32,5
1966	1	58	507	11,8	—	2 986	30,4
2007	1	17	496	25,2	—	4 309	34,7
Cu 2007-13	2	14	448	19,6	1,5	5 018	37,1
2008	1	16	466	23,8	1,3	4 507	32,4
2013	1	12	431	15,5	1,7	5 528	41,8
Cu 2014-22	11	6	466	18,6	1,2	5 115	39,7
2014	1	11	454	15,5	1,4	6 757	38,5
2016	1	8	451	16,4	1,2	4 982	45,5
2018	1	7	487	23,8	1,3	6 208	33,2
2019	3	5	469	18,1	1,1	5 096	36,9
2020	5	4	465	18,8	1,2	4 605	41,7
Grand Total	274	23	476	20,1	1,2	5 571	39,9

Testattujen 274 pylvään otoksessa oksaryhmien vaikutus kokonaisuudessaan oli pieni. Oksat ovat merkittävin sahatavaran lujuutta heikentävä tekijä, mutta niiden merkitys pylväissä näyttäisi olevan vähäisempi. Osasyyn tähän voisi olla, että poikkileikkaus on ympyrä, joka yksi vahvimpia profiileja lujuustarkastelun kannalta. Jännitysten tarkastelun kannalta kyseessä eri asia kuin suorakaiteen muotoinen sahatavara tai neliömäinen parru. Lisäksi on tutkittu, että oksavaikutus on isossa kappaleessa pienempi kuin pienemmässä saheessa.

3.5 Kyllästetyypit puun tiheys- ja kosteusluokittain

Seuraavissa kappaleissa on esitetty puun tiheyden ja kosteuden yhteisvaikutus avainarvoihin kyllästysainetyypeittäin. Luokittelu on kaksivaiheinen; kyllästetyypikohtaisesti on luokiteltu tiheys, jonka alle on lisäksi luokiteltu kosteus. Kussakin taulukossa kellertävällä rivillä on kyseisen kyllästetyypin kaikkien pylväiden keskiarvot ja alimmalla sinipohjaisella rivillä on kaikkien 274 pylvään keskiarvot. Näin kyllästetyypin- ja sen alla olevien eri tiheys-kosteusluokkakombinaatioiden vertailu on helppoa.

3.5.1 Kuparikyllästetyt 2007-13

Taulukon 5 tiheys-kosteusluokissa on paljon yksittäisiä pylväitä, joten niistä ei voida vetää johtopäätöksiä. Todettakoon, että taivutuslujuuden keskiarvo on hieman alle koko aineiston keskiarvon ja kosteus hieman yli keskiarvon, jolla voi olla pieni vaikutus taivutuslujuuden heikkenemiseen. Vuosina 2007–13 kuparikyllästettyjen pylväiden maanrajan halkaisijan keskiarvo oli joukon suurin.

Taulukko 5. Vuosina 2007–13 kyllästettyjen C-ylväiden avainarvot tiheys-kosteusluokittain.

Impregnation type by density- and moisture content group	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot Groups	Diameter at ground line [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
Cu 2007-13	42	13	478	22,1	1,2	2	237	5 507	37,9
401-450	12	14	438	20,8	1,2	1	239	5 588	35,3
15,0-17,9	4	13	432	16,3	1,3	1	265	7 170	36,5
18,0-20,9	4	14	438	19,3	1,5	0	226	4 585	34,9
24,0-26,9	3	13	445	25,2	0,9	0	234	5 456	34,9
27,0-PSK	1	15	443	31,8	0,9	0	204	3 677	32,7
451-500	20	13	475	21,7	1,2	1	236	5 292	37,1
15,0-17,9	3	13	487	17,0	1,1	0	255	5 966	36,4
18,0-20,9	7	12	471	19,5	1,0	0	240	6 018	39,3
21,0-23,9	7	14	469	22,5	1,3	1	229	4 336	33,3
24,0-26,9	1	16	483	26,2	1,0	0	231	4 509	34,3
27,0-PSK	2	11	487	31,4	1,7	0	226	5 475	45,4
501-550	8	14	522	23,2	1,2	0	236	5 828	42,3
15,0-17,9	3	13	512	16,7	1,2	0	258	6 284	38,6
18,0-20,9	1	11	533	18,7	1,6	0	240	5 994	42,5
21,0-23,9	1	11	512	22,6	0,4	0	226	5 493	42,5
24,0-26,9	1	16	530	25,2	1,3	0	229	5 983	44,6
27,0-PSK	2	16	532	34,3	1,2	0	209	5 149	46,6
551-600	2	16	575	29,0	1,3	0	236	5 878	42,6
24,0-26,9	1	16	554	25,5	1,3	0	226	4 665	36,5
27,0-PSK	1	16	596	32,5	0,0	0	247	7 091	48,7
All totals (averages)	274	23	476	20,1	1,2	18	229	5 571	39,9

3.5.2 Kuparikyllästetyt 2014-22

Tässä ryhmässä kaikki keskiarvot ovat suuremmat kuin koko aineiston keskiarvot. Taivutuslujuuden ja taivuttavan maksimivoiman kesto ovat paremmat, mutta tämä johtuu siitä, että ko. pylväiden käyttöiän keskiarvo on vain seitsemän vuotta. Keskiarvoja laskee hieman 551–600 / 27,0-PSK-luokittelussa oleva rengashalkeaman sisältävä pylväs, jossa lisäksi oli korkea kosteuspitoisuus (taulukossa 6 punainen kehys).

Taulukko 6. Vuosina 2014–22 kyllästettyjen C-pylväiden avainarvot tiheys-kosteusluokittain.

Impregnation type by density- and moisture content group	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot Groups	Diameter at ground line [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
Cu 2014-22	116	7	479	20,3	1,3	11	222	5 876	44,2
350-400	1	4	397	20,7	2,5	0	220	4 330	30,6
18,0-20,9	1	4	397	20,7	2,5	0	220	4 330	30,6
401-450	10	7	431	19,5	1,3	0	228	5 685	40,0
15,0-17,9	4	6	433	16,1	1,6	0	237	5 523	37,8
18,0-20,9	3	6	426	19,2	1,2	0	224	6 063	44,6
21,0-23,9	1	8	430	23,9	1,1	0	231	4 698	28,4
24,0-26,9	2	10	436	24,5	0,9	0	216	5 936	43,7
451-500	84	7	474	20,1	1,3	11	222	5 908	43,9
12,0-14,9	1	11	453	14,9	0,8	0	216	4 425	36,9
15,0-17,9	30	7	474	16,5	1,4	5	223	6 039	44,1
18,0-20,9	28	6	472	19,5	1,2	4	219	5 642	43,8
21,0-23,9	11	6	476	22,3	1,2	2	235	6 699	45,7
24,0-26,9	6	7	475	25,4	1,2	0	225	6 314	42,2
27,0-PSK	8	8	482	29,3	1,3	0	211	5 145	43,4
501-550	19	7	515	21,0	1,1	0	215	6 023	49,2
15,0-17,9	7	9	513	16,1	1,0	0	209	6 130	51,3
18,0-20,9	3	5	507	20,0	1,0	0	241	5 827	40,8
21,0-23,9	5	6	518	22,5	1,4	0	222	6 721	52,5
24,0-26,9	2	9	526	25,5	1,3	0	197	5 128	47,9
27,0-PSK	2	8	517	31,9	1,3	0	198	5 090	47,0
551-600	1	10	555	30,0	0,0	0	197	3 465	31,5
27,0-PSK	1	10	555	30,0	0,0	0	197	3 465	31,5
601-700	1	4	671	21,8	0,0	0	261	6 284	38,5
21,0-23,9	1	4	671	21,8	0,0	0	261	6 284	38,5
All totals (averages)	274	23	476	20,1	1,2	18	229	5 571	39,9

3.5.3 CCA-kyllästetyt

CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuuden ja maksimivoiman keskiarvot ovat hieman pienemmät kuin koko aineiston keskiarvot, vaikka maanpinnantason halkaisija on suurehko (taulukko 7). Tulokseen vaikuttaa CCA:n muita kyllästysainetyyppejä korkeampi keski-ikä ja sitä kautta vaikutus lahon määrään ja muuttuneeseen puuainekseen.

Taulukko 7. CCA-pylväiden avainarvot tiheys-kosteusluokittain.

Impregnation type by density- and moisture content group	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot Groups	Diameter at ground line [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
CCA	76	43	459	18,4	1,2	3	233	5 485	38,6
350-400	3	52	392	18,8	1,4	0	219	5 449	37,4
12,0-14,9	1	40	393	13,7	1,2	0	228	8 040	49,5
18,0-20,9	1	58	386	19,0	1,5	0	216	4 023	29,1
21,0-23,9	1	58	397	23,5	1,6	0	212	4 283	33,6
401-450	23	43	431	19,8	1,1	1	246	5 490	33,9
12,0-14,9	4	40	434	13,5	1,0	0	214	6 456	48,0
15,0-17,9	6	35	425	16,4	1,1	0	260	6 151	32,0
18,0-20,9	4	49	435	19,0	1,2	0	249	5 275	32,2
21,0-23,9	4	50	433	23,3	1,5	1	257	4 978	27,6
24,0-26,9	3	47	437	25,7	0,9	0	244	4 544	31,5
27,0-PSK	2	48	426	28,4	0,6	0	243	4 446	30,6
451-500	44	44	471	17,7	1,2	2	228	5 360	39,9
12,0-14,9	11	39	477	13,9	1,0	0	205	5 666	48,9
15,0-17,9	15	43	471	16,3	1,3	2	232	5 731	41,2
18,0-20,9	9	45	472	19,7	1,2	0	241	5 030	34,8
21,0-23,9	8	48	460	22,6	1,3	0	235	4 676	32,2
24,0-26,9	1	48	465	25,2	1,6	0	245	4 856	30,7
501-550	6	38	512	18,2	1,1	0	226	6 407	47,9
12,0-14,9	1	40	504	14,6	1,1	0	215	7 526	55,6
15,0-17,9	3	44	509	16,2	1,1	0	237	6 565	45,9
18,0-20,9	1	18	540	18,4	0,8	0	221	6 770	52,9
27,0-PSK	1	36	503	27,4	1,5	0	208	4 453	40,7
All totals (averages)	274	23	476	20,1	1,2	18	229	5 571	39,9

3.5.4 Kreosoottikyllästetyt

Kreosoottipylväiden maksimivoiman- ja taivutuslujuuden keskiarvot olivat kyllästysaine-tyyppien heikoimmat ja kuitenkin niissä oli suurimmat maanpinnan tason halkaisijat (kuva 8). Tämä johtune siitä, että suurin osa kreosoottipylväistä olivat vanhoja ja varsin ravistuneen näköisiä ja lisäksi lahon määrä on todennäköisesti vanhoilla pylväillä suurempi.

Taulukko 8. Kreosoottipylväiden avainarvot tiheys-kosteusluokittain.

Impregnation type by density- and moisture content group	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot Groups	Diameter at ground line [mm]	Q _{maximum} [N]	Bending strength [MPa]
■ Creosote	40	40	500	20,8		2	236	4 918	32,4
■ 401-450	3	58	435	17,4	0,0	0	249	2 953	16,9
15,0-17,9	2	58	429	16,6	0,0	0	247	3 280	19,0
18,0-20,9	1	58	447	19,1	0,0	0	253	2 299	12,7
■ 451-500	17	40	478	20,1	0,0	1	236	4 281	28,8
12,0-14,9	4	58	473	13,1	0,0	0	232	2 736	21,0
15,0-17,9	4	58	490	16,5	0,0	0	228	3 572	27,2
18,0-20,9	3	29	479	19,3	0,0	0	221	5 033	38,6
21,0-23,9	1	58	453	22,8	0,0	0	258	3 813	18,9
24,0-26,9	3	17	477	25,3	0,0	1	248	6 037	33,3
27,0-PSK	2	14	477	33,0	0,0	0	254	5 264	31,6
■ 501-550	16	37	519	22,1	0,0	1	235	5 795	36,7
12,0-14,9	4	59	514	13,4	0,0	1	219	5 938	38,4
15,0-17,9	1	58	527	15,1	0,0	0	199	4 148	48,0
18,0-20,9	3	30	520	20,0	0,0	0	238	6 050	38,3
24,0-26,9	4	38	516	25,2	0,0	0	232	4 646	33,0
27,0-PSK	4	15	525	31,2	0,0	0	260	7 021	34,5
■ 551-600	4	35	562	21,3	0,0	0	226	5 586	42,0
12,0-14,9	2	58	567	14,1	0,0	0	235	6 349	44,5
24,0-26,9	1	11	560	24,7	0,0	0	208	4 512	41,2
27,0-PSK	1	11	553	32,4	0,0	0	226	5 133	37,7
All totals (averages)	274	23	476	20,1	1,2	18	229	5 571	39,9

3.5.5 Redusoidut kosteudet

Hankkeen aikana tehtiin useita eri laskelmia ja redusointeja 18 %:n ja PSK:n kosteuksiin. Redusoinnilla tarkoitetaan toimenpidettä, jossa teoreettisella yhtälöllä taivutuslujuudet muutetaan vastaamaan samaa tiettyä kosteutta. Näissä muunnoksissa käytettiin kaavaa

$$f_{m,red.} = f_m \cdot [1 + k_{red.} \cdot (MC - MC_{red.})]$$

missä:

$f_{m,red}$ on haluttuun kosteuteen redusoitu taivutuslujuus

f_m on pylvään koestuksessa saatu taivutuslujuus

$k_{red.}$ on redusointikerroin, joka vastaa taivutuslujuuden muutosta yhtä kosteuden prosenttiyksikköä kohti. Muutos eli k-arvo on 0,01–0,05 (1–5 %).
Esimerkki: kosteus kasvaa 1 %-yksikön, jolloin lujuus heikkenee k-arvon vaikutuksen verran. Hankkeen laskelmissa käytetty $k = 0,0255$.

MC on pylvään koestushetken kosteus (MC = Moisture Content)

MC_{red.} on kosteus, johon redusoitu taivutuslujuus halutaan muuttaa.

Taulukossa 9 on esitetty redusoidun taivutuslujuus sekä hajonta ja 18 % kosteuteen redusoitu taivutuslujuus sekä hajonta. Redusointikertoimenä käytettiin arvoa 0,0255 eli yhden prosentin kosteuden muutos vaikuttaa taivutuslujuuteen 2,55 % nostavasti tai heikentävästi riippuen onko MC < 18 % (mitattu taivutuslujuus pienenee) vaiko MC > 18 % (mitattu taivutuslujuus suurenee). Suurin osa pylväiden kosteuksista (n = 154 kpl) on kosteusalueella MC < 20 %, jossa lahottajasienet eivät kasva tehokkaasti.

Todettiin, että redusoinnissa tulokset muuttuivat, mutta suhteessa muutokset olivat niin vähäisiä, että päätettiin tarkastella tuloksia alkuperäisillä testeissä saaduilla arvoilla.

Taulukko 9. Avainarvot karkeiden kosteusluokkien ja kyllästysainetyypin funktiona. Taulukossa on 18 % kosteuteen redusoitu pylväiden taivutuslujuus ja -hajonta. Kerroin $k_{red.} = 0,0255$.

Kyllästysainetyyppi kosteusluokittain	Pylväitä kosteus- luokittain [kpl]	Pylvään käyttö- vuodet	Koestus- kosteus MC [%]	Tiheys MC = 0 % [kg/m ³]	Kyllästynyt alue koko alasta [%]	Q _{max} [N]	f _m [MPa]	f _m hajonta [Mpa]	f _m redusointi MC = 18 % [Mpa]	f _m redusointi hajonta MC = 18 % [Mpa]
CCA										
10-19,9	50	41	15,9	463	62,0	5835	41,7	10,2	39,2	8,8
20-26,9	23	48	22,7	451		4860	32,6	5,5	36,4	5,5
MC>27	3	44	28,1	452		4448	34,0	6,6	42,7	8,3
CCA Total	76	43	18,4	459	62,0	5 485	38,6	9,8	38,5	7,9
Kreosootti										
10-19,9	21	54	15,5	495		4362	31,5	15,3	29,5	14,3
20-26,9	12	30	23,7	499	59,9	5113	32,8	6,8	37,7	8,1
MC>27	7	14	31,9	515	62,9	6249	34,1	5,7	46,1	7,0
Kreosootti Total	40	40	20,8	500	61,9	4 918	32,4	11,8	34,8	13,1
Kupari										
10-19,9	83	8	17,4	473	60,4	5952	42,8	6,3	42,1	6,2
20-26,9	58	8	22,7	480	59,5	5726	41,8	8,0	46,8	9,1
MC>27	17	10	30,8	501	65,8	5107	43	6,8	57,7	9,4
Kupari Total	158	8	20,8	479	60,7	5 778	42,5	7,0	45,5	9,0
Kaikki yhteensä	274	23	20,1	476	61,0	5 571	39,9	9,3	42,0	10,3

Kokonaisuutena voitaneen todeta, että redusoitu taivutuslujuus kasvoi vain 2,1 MPa, mutta hajonta lisääntyi 1,0 MPa.

3.6 Pylvästä johtuvat tekijät sen lahonkestoon

Tässä osassa käsitellään valmistusprosessiin ja kyllästämiseen liittyviä tekijöitä.

3.6.1 Pylväiden kuivaus (ulkokuivaus / ulkokuivaus + kuivaamo)

Tutkimuksissa on havaittu, että keinokuivauksella saadaan parempi ja tasaisempi kosteusjakauma kuin ulkokuivauksella. Myös vesitaskujen riski pienenee keinokuivauksessa. Lisäksi keinokuivaus nopeuttaa kyllästysprosessia verrattuna luonnolliseen kuivaukseen.

Sydänpuuta ei tarvitse juurikaan kuivata, koska sen alkukosteus on paljon alhaisempi kuin pintapuulla. Jalavan (1932), Siimeksen (1938) ja Nylinderin (1961) mukaan männyn sydänpuun kosteus vaihtelee kosteusvälillä 24–27 % (Kärkkäinen 2003, 127). ilmoittaa männyn sydänpuun kosteudeksi 23–30 %.

Keinokuivauksessa höyryn avulla huolehditaan siitä, että pylvään pinta ei kuivu liian nopeasti. Tällä varmistetaan, että ei synny pintakovuutta, jolloin kosteus pääsee pylvään sisäosista pois ja ennen kaikkea pylvään pinta ei halkeile.

Ulkokuivauksessa (luonnollisessa kuivauksessa) erityisesti keväällä kuivuminen on voimakasta. Aurinkoinen kevätkehi, tuuli ja sopiva sijainti aiheuttavat pylväille suuren kuivausvoiman, jopa suuremman kuin kuivaamossa. Sen seurauksena pylvään pinta pyrkii halkeilemaan nopean kuivumisen takia.

Kuivaus voidaan suorittaa edellisten yhdistelmänä; alkukuivaus ulkotiloissa ja loppukuivaus keinokuivauksena kamari- tms. kuivaamossa. Alkukuivauksen osalta on huomioitava, että hyvässä kevätkehiässä syntyy helposti pintakovuutta, joka sitten vaikeuttaa keinokuivausta.

Joka tapauksessa pylvään laadun kannalta paras menetelmä ennen kyllästystä on kuivata pylväät siisteissä nipuissa kuivaamossa.

3.6.2 Kyllästysaineen tunkeuma pintapuussa

Painekyllästetty puutavara luokitellaan NTR-järjestelmässä eri laatuluokkiin käyttö- ja tunkeumavaatimusten perusteella. Suomessa yleisimmät kyllästysluokat ovat A ja AB. Näissä luokissa kyllästysaineen tunkeumavaatimukset perustuvat puun pintapuuhun tunkeutumiseen siten, että suoja-aine on tunkeutunut pintapuun läpi koko poikkileikkauksen alueelle. Nämä luokat vastaavat eurooppalaisen standardin EN 351-1 mukaisia tunkeumaluokkia NP5, jossa vaatimuksena on täydellinen tunkeuma pintapuuhun. A- ja AB-luokissa eroa on lähinnä käyttökohteissa ja kyllästysaineen määrässä: A-luokan puu on suunniteltu vaativampiin käyttöolosuhteisiin (maassa tai veden kanssa kosketuksessa), kun taas AB-luokan puu

soveltuu maanpinnan yläpuolisiin ulkokohteisiin. Se vaatii pienemmän suoja-aineen määrän säilyttäen kuitenkin tunkeuman pintapuuhun läpi. Laatuluokkien vaatimukset perustuvat NTR-laaturjestelmään ja standardeihin, joissa tunkeutuman katsotaan täyttyvän, kun kyllästysaine on tunkeutunut koko pintapuun paksuuden läpi määriteltujen standardien mukaisesti ilman, että tarkkoja numeerisia millimetritarajoja esitetään erikseen A- ja AB-luokille.

Puun kyllästyksessä vajaatunkeumalla tarkoitetaan tilannetta, jossa kyllästysaine ei tunkeudu puuhun suunnitellulla tavalla koko poikkileikkauksen tai vaaditun tunkeutumissyvyyden alueelle. Tällöin osa puun solukosta jää täyttymättä, minkä seurauksena kyllästysaine jakautuu puussa epätasaisesti ja rajoittuu usein vain pintakerrokseen.

Ilmiön syitä voivat olla puutteellinen alipaine- tai painekäsittely, puun liian korkea kosteus tai virheellinen esikäsittely sekä puulajin ja puun rakenteen ominaisuudet. Vajaatunkeuma heikentää kyllästyksen suojaavaa vaikutusta, mikä voi johtaa puun lahon- ja säänkestävyyden alenemiseen sekä kyllästyksen laadun epätasaisuuteen.

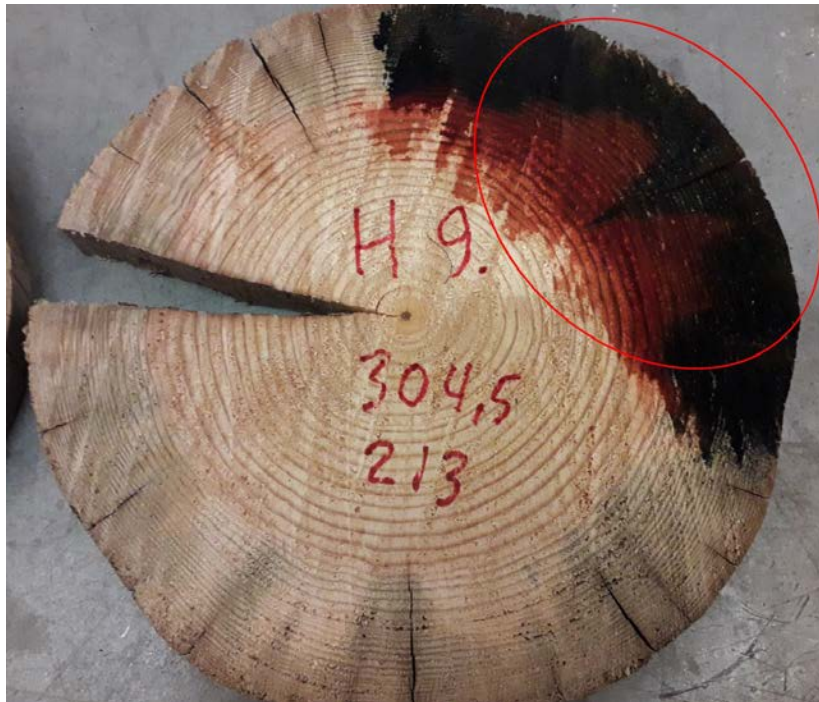
Testattujen 274 pylvään joukossa oli useita vajaatunkeuman pylväitä. Huonoimmissa pylväissä kyllästettä oli vain muutaman senttimetrin verran pylvään halkaisijasta.

Kuvan 11 poikkileikkausnäytteestä nähdään tyypillinen sekä samalla haastava tapaus vajaatunkeumalle. Vajaatunkeuma tarkoittaa, että tutkittava näyte ei ole kyllästynyt kyllästysprosessissa vaatimusten mukaisesti. Pinta voi näyttää täysin kyllästetylle puulle eikä eroa silmämääräisesti muiden joukosta. Vasta poikkileikkaustarkastelussa tai poralastusta havaitaan joko silmämääräisesti tai reagenssiaineita hyväksikäyttäen vajaatunkeumaa.

Kuvan mukainen vajaatunkeuma syntyy tyypillisesti niin sanotun ”märän taskun” johdoista, kun kyllästyshetkellä puun sisällä on ollut selvästi liian märkä kohta. Mitä lähemmäs pintaa vajaatunkeuma tulee, niin sitä suurempi riski on, että esimerkiksi lahottajasieni-itiöt pääsevät pintahalkeaman kautta kyllästymättömään pintapuuhun käsiksi.

Borenin mukaan C-kyllästettyjen pylväiden ennenaikaisen lahon syynä on ollut C-kyllästeen vajaa tunkeuma. Monessa tapauksessa pylväs on ollut ulkoapäin terveen näköinen, mutta sisältä laho. C-kyllästetyillä pylväillä on kuitenkin esiintynyt myös pintalahoja. Vajaatunkeuma

onkin suurimpia riskejä lahon etenemiselle. Vajaakyllästynyt pylväs aiheuttaa kohtuuttomia kuluja sähköyhtiölle tarkastus-, vaihto-, asennus- ja kuljetuskuluina.



Kuva 11. Esimerkkikuva poikkileikkausnäytteestä löydetylle vajaatunkeumalle. Kuvasta voi havaita silmämääräisesti sekä reagenssiaineiden avulla vahvistetun vajaatunkeuman. Pylvään pinnasta kyllästymättömään pintapuualueeseen on vain muutaman senttimetrin matka. Kuva: Juho Peura

3.6.3 Kyllästysainetyyppi, määrä kg/m^3 , tehoaineet

3.6.3.1 Laho ja kemikaalit

Kemiallinen lahosuojaus perustuu siihen, että puuhun kyllästetyt kemikaalit tekevät puuaineksesta lahottajasienille ja -bakteereille elinkelvottoman.

Kupariyhdisteet ovat suojauksen perusta, sillä ne häiritsevät mikrobien entsyymitoimintaa ja sitoutuvat puun soluseiniin, jolloin vaikutus on pitkäaikainen.

Kuparia täydennetään usein orgaanisilla biosideilla, kuten atsoleilla tai ACQ-yhdisteillä, jotka estävät kuparia sietäviä sieniä sekä home- ja sinistäjäsieneä. Paineekyllästyksessä kemikaalit kyllästetään syvälle puun pintapuuhun, jossa laho tavallisesti alkaa, ja tämän seurauksena puun biologinen hajoaminen hidastuu merkittävästi ja käyttöikä pitenee useista vuosista jopa useisiin vuosikymmeniin.

3.6.3.2 Tunkeuma- ja kuparinmääritys poikkileikkausnäytteistä

Kuparikyllästeen tunkeuma ja tehoainepitoisuudet voidaan tarkastaa puunäytteistä NTR-ohjeiden mukaisesti (NWPC Document No 3:2017). Sahatavaralla tunkeumatarkastus ja kuparin määrän analysointi toteutetaan poikkileikkausnäytteillä ja pylväsnaytteet tarkastetaan tavallisesti poranäytteillä. Poikkileikkausnäytteistä saadaan parempi kokonaiskuva tunkemista pintapuuosuuksilla. Kuparin määrän analysointiin otetaan mukaan vain kyllästynyt pintapuu. Pintapuu erotellaan sydänpuusta tarkasti, sillä kyllästämätön sydänpuu vääristää tulosta. Analyysiä varten pintapuu ensin murskataan ja sitten jauhetaan myllyllä hienommaksi jakeeksi. Tämän jälkeen käytetään soveltuvaa menetelmää tehoainepitoisuuden määrittämiseen. Hankkeessa käytetty ulkopuolinen laboratorio Hortilab happopoltti näytteet mikroaaltouunissa ennen ICP-analyysiä.

3.6.3.3 NTR:n ohjeista poimintaa

Puunsuoja-aineen tunkeutuman määrittäminen tehdään jokaiselle erästä otetulle näytekappaleelle. Tunkeuma on joko täysi tunkeuma, joka on varmuudella todettavissa, tai riittämätön tunkeuma. Tunkeumaa on arvioitava visuaalisesti. Erityisiä värireagensseja on käytettävä osoittamaan puunsuoja-aineiden tunkeumaa, jos arvioinnissa esiintyy epävarmuutta. Toisinaan pieniä pintapuun alueita lähinnä sydänpuuta, ns. ylimenoalueella, ei voida kyllästää. Niitä ei saa ottaa huomioon määriteltäessä tunkeumaa pintapuuhun. Tämä koskee korkeintaan kahta vuosirengasta lähimpänä sydänpuuta. Aiemmin olleessa kuvassa 11 näkyy hyvin, miten reagenssikäsittely muuttaa sydänpuun väriä ja miten kyllästysaineen vajaatunkeuma näkyy pylvään poikkileikkauksessa.

Tehoainepitoisuus on määritettävä kustakin erästä otetuille näytteille kvantitatiivisilla ja hyväksi todetuilla kemiallisilla analyyseillä tai puunsuoja-aineen tuottajan suosittelimien menetelmin. Puun pinnalle läikkynyt puunsuoja-aine on poistettava ennen analyysiä. Vain ne näytteet, joissa on täysi tunkeuma, analysoidaan. Yhdistettyyn näytteeseen on kuuluttava vähintään neljä näytettä. Tehoainepitoisuuden laskemisessa on käytettävä analyysitietoa vähintään yhdestä puunsuoja-aineen aktiiviaineista. Aktiiviaineen valinta tehdään sen perusteella, mikä tehoaineen sisältävistä aineista voidaan analysoida suurimmalla varmuudella ja tarkkuudella.

Ellei puun tiheyttä voida määrittää hyväksytyin menetelmin, on laskelmissa männyn pintapuulle (*Pinus sylvestris*) käytettävä kuivatiheyttä 480 kg/m³. Muille puulajeille on käytettävä tiheyden keskiarvoa, muunnettuna kuivatiheydeksi EN 350-2 mukaisesti.

Kreosoottikyllästetyn puun tehoainepitoisuus määritellään näytteistä viimeksi kuluneiden 30 päivän aikana kyllästetystä puusta EN 12490:n mukaisesti.

Hyväksytty tehoainepitoisuus merkitsee, että analyysissa määritelty tehoainepitoisuus (kg/m³ pintapuuta) yhdistetystä näytteestä on oltava vähintään sama kuin NTR:n puunsuoja-aineelle hyväksymä tehoainepitoisuus kyseisessä puunsuojaluokassa, vrt. NTR:n luettelo hyväksytyistä puunsuoja-aineista.

3.6.3.4 Tehoainepitoisuuksista

Hyväksyttyjen kyllästeiden tehoainepitoisuusvaatimukset löytyvät Nordic Wood Preservation Council (NWPC) listalta. He julkaisevat säännöllisesti niin sanotun "Approval Listin", jossa on ne puunsuoja-aineet ja -järjestelmät, jotka on testattu ja hyväksytty NTR-laatusertifikaattia varten. Hyväksytty puunsuoja-aine täyttää vaatimukset sekä biologiselle kestävyydelle (lahonkestävyys) että kemiallisten aineiden turvallisuudelle. NWPC:n nettisivuilta löytyy "NWPC approved wood preservatives" -lista: viimeisin versio on NWPC Approval list 106 (päivitetty 22.8.2025). Siellä näkyy tarkat kemialliset yhdisteet, suojausluokat (NTR A, AB, B jne.), ja muut tekniset tiedot.

3.6.3.5 Kuparin määrä C-pylväsnäytteissä

Kuparikyllästeet sisältävät kuparisuoloja ja ne ovat yleensä yhdisteenä eikä puhtaana kuparina. Yhdisteet ovat esimerkiksi: Kupari(II)karbonaatti-hydroksidi $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ tai kupari(II)hydroksidi $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Käyttöturvallisuustiedoissa annetaan yhdisteelle jonkinlaisia prosentuaalisia raja-arvoja, mutta tarkka pitoisuus on kyllästekohtainen. Puhtaan kuparin määrä voidaan kuitenkin analysoida puunäytteistä laboratorioanalyysillä (NTR-ohjeet).

NTR-ohjeiden mukaisesti sydänpuusta eroteltuja C-kyllästetyistä pylväistä otettuja pintapuunäytteitä lähetettiin laboratorioanalyysiin. Laboratoriosta saatujen kuparipitoisuuksien keskiarvot kuparikyllästeittäin olivat seuraavat:

Keskiarvot g/kg

CX-8	3,39
CX-8N	3,81
C4	4,54
Tanalith	4,53

Tulos g/kg kertoo, paljonko pelkkää kuparia on yhdessä kilossa tutkittua näytettä. Keskimääräisellä puun kuivatiheydellä saadaan laskettua kuinka monta grammaa tai kiloa yksi kuutio puunäytettä sisältää kuparia. Suhde pysyy kuitenkin näytteiden välillä samana, jos laskennassa käytetään männyn keskimääräisenä kuivatiheytenä arvoa 480 kg/m³. Tässä tutkimuksessa yksittäisen näytteen analyysitulosta voidaan vertailla suoraan keskimääräiseen tulokseen, niin saadaan jo kuvaa siitä, onko kuparin tehoainepitoisuus keksimääräisellä tasolla. Oletuksena, että keskimääräinen pitoisuus on riittävällä tasolla.

Laboratorioanalyysissä saatuja arvoja voidaan verrata taulukon 13 *Kupari (Cu) analyysi g/kg* -sarakkeen arvoihin. Jos halutaan vertailla NTR hyväksytyjen aineiden listoilta tehoainevaatimuksia, niin tulisi käyttää seuraavaa laskukaavaa.

Laskukaava (NWPC Document No 3:2017):

R_i on aktiivisen ainesosan määrä i analyysin perusteella, kg/m³

p on puun kuivatiheys (kg/m³)

$w_{s,i}$ on puunäytteen massafraktio aktiiviselle ainesosalle i

$w_{p,i}$ on tuotteen massafraktio aktiiviselle ainesosalle i

Laskentaa varten tulisi selvittää jokaisen kyllästeen tehoainepitoisuusjakauma $w_{p,i}$ laskennassa halutulle tehoaineelle, eli puhtaan kuparin määrä liuoksessa (analysoitu aktiivinen tehoaine). Tarkka pitoisuus vaihtelee eri kyllästeiden välillä ja tämä ei ole tiedossa.

3.6.3.6 Kuparin määrä 1980- ja 90-luvun CCA-pylväissä

Kuparinpylväiden lisäksi haluttiin selvittää millaisia kuparipitoisuuksia 1980- ja 1990-luvun pylväissä oli (taulukko 12). Kumpaan näyte-erään valittiin 10 pylvään kiekot, jotka murskattiin kahdeksi erilliseksi näytteeksi. Yhteisnäyte CCA80 sisälsi vuosina 1985 ja -87 kyllästettyjen CCA-pylväiden mursketta. Vastaavasti CCA90 oli vuosien 1990, -91, -93, -95, -97 ja -98 pylväitä.

Hankeen analyysin tulokset kertovat yhdisteen määrän, eli paljonko CCA:ta on yhdisteenä. Käyttöturvallisuustietojen mukaan kuparin määrä CCA-liuoksessa vaihtelee 18–25 % välillä. Seuraavana on laskettu 18–25 % välille pelkän kuparin määriä, jotta voidaan vertailla niitä pelkkiin kuparikyllästeisiin.

Taulukko 12. Kuparin määrä eri vahvuisilla liuksilla eri vuosikymmeninä.

Näyte	CCA	Kuparia g/kg		
	g/kg	18 %	21 %	25 %
CCA80	10,9	1,96	2,29	2,73
CCA90	10,6	1,91	2,23	2,65

3.6.3.7 Tulostaulukko kuparit

Laboratoriotesteihin toimitettiin 46 Cu-näytettä, joista koostetaulukko alla. Näytteistä 26 kpl (57 %) kuparijäämät olivat oikeissa rajoissa ja 20 näytteen osalta voidaan päätellä, että joko huuhtoumaa on ollut tai kyllästysprosessissa on ollut laimea liuos. Kuparilla on taipumusta huuhtoutua, joten taulukon tulos tukee tätä. Asia vaatisi kuitenkin tarkempia tutkimuksia.

Taulukko 13. Tutkittujen kuparipylväsnäytteiden kuparipitoisuudet.

Pylvään tunnus	Kyllästys-vuosi	Kylläste tagista	Kupari (Cu) analyysi g/kg	Kommentit/kuparin määrä	Maastotyyppi	Pylvään käyttöikä	Ultimate bending strength, f_m (EN 14229)
19-3618356	2014	CX-8	3,74	ok	Pelto	10	43,7
26-3712762	2014	CX-8	3,41	Rajoilla	Metsä	10	45,0
8-3526537	2014	C (CX-8 tai C4)	3,69	ok	Metsä	10	46,6
20A-3756065	2014	CX-8	5,34	ok	Pelto	10	50,6
17-3720468	2014	CX-8	1,81	Mahdollisesti huuhtoumaa	Pelto	10	54,9
3785873	2016	CX-8N	2,3	Mahdollisesti huuhtoumaa	Tien laita	8	43,8
5352851	2016	CX-8N	4,19	ok	Tien laita	8	44,3
16	2016	CX-8N	4,08	ok	?	7	44,4
3495426	2016	CX-8N	3,91	ok	Tien laita	8	45,5
3612202	2016	CX-8N	3,54	ok	Tien laita	8	48,0
4	2016	CX-8N	4,41	ok	?	7	48,2
3	2016	CX-8N	3,77	ok	?	7	51,0
34-3541389	2017	C4	6,22	Reilusti yli keskiarvon, ok	Tien laita	7	40,5
6339616	2018	CX-8	2,76	Mahdollisesti huuhtoumaa	Pelto	6	39,6
6339611	2018	C4	4,64	ok	Metsä	6	42,0
6339773	2018	CX-8	3,18	Mahdollisesti huuhtoumaa	Metsä	6	44,4
6339823	2018	CX-8	3,35	Rajoilla	Tien laita/Pelto	6	45,0
6339367	2018	C4	4,83	ok	Pelto	6	45,2
6339332	2018	C4	2,94	Mahdollisesti huuhtoumaa	Metsä	6	49,3
1	2018	CX-8	3,84	ok	?	5	50,3
6339683	2018	CX-8	4,06	ok	Pelto, ruohikko	6	53,9
45-8563667	2020	C4	4,51	ok	Tien laita	4	42,9
38-5863671	2020	C4	4,24	Mahdollisesti huuhtoumaa	Metsä	4	44,2
49-8563675	2020	C4	4,92	ok	Metsä	4	46,8
39-8563670	2020	C4	4,25	Mahdollisesti huuhtoumaa	Metsä	4	47,2
37-8563672	2020	C4	4,81	ok	Tien laita	4	47,5
27-8563635	2020	C4	4,36	Mahdollisesti huuhtoumaa	Tien laita	4	48,3
31-8067152	2021	Tan E	4,78		Tien laita	3	44,6
14A-146149266	2016	CX-8	1,73	Lahoa, mahdollisesti huuhtoumaa	Tuntematon	7	11,2
394962	2013	Tanalith E	4,27		Tien laita	11	28,9
OKS8	2008	CX-8	4,16	ok	Taloudsmetsä	16	30,6
OKS4	2008	CX-8	2,73	Mahdollisesti huuhtoumaa	Taloudsmetsä	16	31,5
OKS3	2008	CX-8	3,77	ok	Taloudsmetsä	16	32,4
16A-3642913	2014	CX-8	4,62	ok	Pelto	10	32,5
6339690	2018	CX-8	3,3	ok	Metsä/muu maasto	6	33,5
OKS2	2008	CX-8	3,38	Mahdollisesti huuhtoumaa	Taloudsmetsä	16	34,3
15A-3660868	2014	CX-8	2,76	Mahdollisesti huuhtoumaa	Pelto	10	34,7
6339777	2018	CX-8	4,06	ok	Metsä	6	35,2
50-8563674	2020	C4	5,31	Reilusti yli keskiarvon, ok	Metsä	4	35,1
14B-3632303	2014	CX-8	1,63	Mahdollisesti huuhtoumaa	Puutarha	10	35,7
48-8563676	2020	C4	3,41	Mahdollisesti huuhtoumaa	Metsä	4	36,4
25-3599505	2014	CX-8	4,23	ok	Pelto	10	36,4
OKS5	2008	CX-8	2,54	Mahdollisesti huuhtoumaa	Suolue	16	36,5
ANT1	2015	CX-8N	3,27	Mahdollisesti huuhtoumaa	Tien laita	9	35,4
ANT3	2014	CX-8	3,78	ok	Metsä	10	35,5
ANT4	2015	CX-8N	4,84	ok	Tien laita	9	38,0

OK = kuparin määrä keskiarvossa

Mahdollisesti huuhtoumaa = joko huuhtoumaa tai lähtötilanteessa laimea liuos tms.

3.6.4 Pylvään latvaosasta valuva vesi

Kaikki pylvääseen kiinnitetyt ulokkeet keräävät vettä, joka siirtyy ulokkeesta pylvään pinnalle ja siitä edelleen valuen kohti maanpintaa (kuva 12). Nykyiset sateiset kaudet ovat lisääntymässä, jolloin pylväs ja sen lähiympäristö ovat kosteampana pitempään. Ongelmaa ei voi poistaa, mutta rakenteellisella suunnittelulla sitä voidaan yrittää vähentää.



Kuva 12. Pylvään latvasta ja erilaisista ulokkeista pylvään ulkovaippaa pitkin valuva vesi pitää pylvään ulkopinnan kosteana. Kun ulkovaipassa on lisäksi halkeamia, kosteuden on helppo siirtyä pylvään sisäosiin. Kuva: Kai Möller

3.6.5 Pylväsluokat

Pylväsluokilla voidaan vaikuttaa siihen, miten kauan pylväs kestää lahoa.

Mitä suurempi pylvään halkaisija on, sitä enemmän siinä on lahoamisvaraa.

Lahoamatonta puupylvästä ei ole olemassa, koska lahottajaitiöitä on kaikkialla ja puuhun tulee aina halkeamia, kolhuja yms., joista itiöt löytävät tiensä pylvään sisäosiin.

Pylväissä voi olla kaksi kokoa, todellinen mitta ja pylvääseen merkitty pylväsluokka (taulukko 14). Todellisella mitalla tarkoitetaan mitattua maanpinnan tason halkaisijaa (d_g), joka on suurempi kuin lujuuslaskentoihin perustuva. Tämä voi johtua siitä, että mitoituslaskentojen mukaista pylvästä ei ole ollut saatavilla. Myös paksuuden toleranssi on iso eli pylvään halkaisija voi olla isompi kuin laskennallinen johtuen jo valmistusprosessista. Toisin sanoen pylvääseen merkitty pylväsluokka (kuva 13) on usein pienempi kuin pylvään mitatun halkaisijan antama luokka. Pylvään pituus voi silti olla eri pylväsluokissa sama.

Luokka	Pituus m	Latva mm	Tyvi mm	Koodi
1	7	130	160	107
1	8	130	170	108
1	9	130	180	109
1	10	130	190	110
1	11	130	190	111
1	12	130	200	112

Luokka	Pituus m	Latva mm	Tyvi mm	Koodi
3	8	170	200	308
3	9	170	210	309
3	10	170	220	310
3	11	170	230	311
3	12	170	240	312
3	13	170	255	313
3	14	170	265	314
3	15	170	280	315
3	16	170	290	316
3	17	170	300	317
3	18	170	310	318
3	19	170	320	319
3	20	170	330	320
3	21	170	340	321
3	22	170	350	322

Luokka	Pituus m	Latva mm	Tyvi mm	Koodi
5	10	210	255	510
5	11	210	270	511
5	12	210	280	512
5	13	210	290	513
5	14	210	300	514
5	15	210	310	515
5	16	210	320	516
5	17	210	330	517
5	18	210	345	518
5	19	210	360	519
5	20	210	375	520
5	21	210	390	521
5	22	210	405	522
5	23	210	420	523
5	24	210	435	524

Luokka	Pituus m	Latva mm	Tyvi mm	Koodi
2	7	150	170	207
2	8	150	180	208
2	9	150	195	209
2	10	150	205	210
2	11	150	215	211
2	12	150	225	212
2	13	150	235	213
2	14	150	250	214
2	15	150	260	215
2	16	150	270	216

Luokka	Pituus m	Latva mm	Tyvi mm	Koodi
4	9	190	230	409
4	10	190	240	410
4	11	190	250	411
4	12	190	260	412
4	13	190	270	413
4	14	190	280	414
4	15	190	290	415
4	16	190	300	416
4	17	190	315	417
4	18	190	325	418
4	19	190	335	419
4	20	190	345	420
4	21	190	355	421
4	22	190	360	422
4	23	190	375	423
4	24	190	390	424

43

≤ 40 mm. Jos pylvään maarajan halkaisijassa on 40 mm ”ylimäärästä” mitoitusarvoon nähden, lahoamisvara on erittäin merkittävä. Jo 20 mm ylimitalla (tällöin 211-luokan pylvään halkaisija on 235 mm maarajassa) saadaan helposti 10 vuoden lahoamisvara puhumattakaan 40 mm ylimitasta.



Kuva 13. Pylvään päästä löytyy pylväsluokka ja vanhemmissa pylväissä se on merkitty metallisiin lommeihin.
Kuva: Kai Möller

Sähköyhtiöt mittauttavat maanpinnan tason halkaisijan tyypillisesti ensimmäisen tarkastuksen yhteydessä. Jatkuvan seurannan kannalta olisi parempi, että halkaisijatieto olisi jo tiedossa linjaa pystytettäessä.

Pylvään halkaisijan mittaaminen pystytyshetkellä loisi todellisen lähtöarvon. Sen puuttuessa myöhemmissä tarkastuksissa havaittu halkaisija ei mahdollista luotettavaa arviota lahon määrästä, kehitysnopeudesta eikä jäljellä olevasta käyttöiästä. Alkumittaus parantaisi turvallisuutta, vähentäisi epävarmuutta ja tukisi kustannustehokasta kunnossapitoa koko pylvään elinkaaren ajan.

Lisäksi pylvään halkaisijan mittaaminen sen pystytyshetkellä tukee dataohjautuvaa kunnossapitoa.

Kun alkutiedot ovat olemassa, voidaan rakentaa parempia lahomalleja, alueellisia riskikarttoja ja tulevaisuudessa koneoppivia ennustemalleja.

Testatuista pylväästä pylväsluokka-arvo löytyi 111 pylväästä (41 %). Niistä 10 pylvään halkaisija oli enemmän kuin 5 mm pienempi kuin pylvääseen merkityssä pylväsluokassa

vaihdellen -6...-56 mm. Vastaavasti ylimitoitusta oli 12 pylväässä. Ylimitoituksen vaihteluväli oli 41 millimetristä 119 millimetriin. On muistettava, että pylväs ei ole koskaan täysin pyöreä, joten halkaisija on suhteellinen käsite. Taulukossa 15 on esitetty summatiedot kyllästetyypin ja pylväshalkaisijan vaikutuksen funktiona. Taulukko havainnollistaa hyvin, miten pylvään kestävä voima kasvaa halkaisijan kasvaessa.

Taulukko 15. Testattujen pylväiden joukossa oli sekä halkaisijaltaan ali- että ylimitoitettuja pylväitä. Maksimivoima on taivutustesteissä saatu maksimivoiman keskiarvo kullekin halkasijapoikkeamaryhmälle. Taulukossa "Normaali" tarkoittaa pylväitä, joissa mitattu halkaisija = pylväsluokan mukainen halkaisija.

Kyllästetyyppi	Määrä	Maanpinnan tason halkaisija [mm] erotus $dm - dg$	Maksimivoima [N]
☒ CCA	4	18	7288
Normaali	4	18	7288
☒ Kreosootti	11	13	5817
Alimitoitettu	1	-14	5163
Normaali	10	16	5882
☒ Kupari	96	15	5954
Alimitoitettu	9	-21	5139
Normaali	75	13	5696
Ylimitoitettu	12	58	8178
Keskiarvot	111	15	5988

dm on pylvästä mitattu maanpinnan tason halkaisija.

dg on pylväässä oleva pylväsluokan mukainen maanpinnan tason halkaisija.

Ennen pylvään asennusta maarajahalkaisija kannattaa mitata. Operaatio ei vie oikealla mittalaitteella kuin hetken. Halkaisijan mittaamiseen on saatavilla kannettavia ja kevyitä pitkäpiikkisiä työntömittoja, joissa on bluetooth. Sen avulla mittaus voidaan tehdä nopeasti ja siirtää tablettiin, älypuhelimeen tai muuhun mobiililaitteeseen.

Kulma- ja päätepylväät joutuvat suurimmalle rasitukselle, jolloin on tärkeää nähdä myös kunnossapitoseurannan taulukoista mikä pylväs-ID sijaitsee linjan muuttaessa suuntaa tai mihin linja päättyy. Näihin sijanteihin kannattaa asentaa luokkaa paksummat pylväät.

Aiemmin sivulla 11 käsiteltiin maaperätyypin vaikutusta ja Maankamara-sovellusta. Kun tiedetään, millaiseen maaperätyyppiin pylväs asennetaan, voidaan harkita pylväiden ylimitoitusta. Jos maaperätyyppi on lahoa ruokkivaa tai jos se on kovin karkeaa mahdollistaen kyllästysaineiden valumat, näihin kohteisiin tulisi asentaa suuremman pylväsluokan pylväitä.

Taulukossa 16 on esitetty testattujen pylväiden avainarvot kyllästeinetyypin ja pylväsluokan funktiona. Pylväsluokissa ei ole huomioitu niiden pituutta. Taulukko havainnollistaa hyvin,

kuinka pylväsluokan kasvaessa sen maksimivoiman kesto (Q_{maximum}) paranee. Suurempi pylväsluokka ei vaikuta taivutuslujuuteen vielä siinä vaiheessa, kun uusi pylväs on otettu käyttöön, vaan vasta kun lahoaminen on jo alkanut.

Taulukko 16. Testattujen pylväiden avainarvot kyllästysainetyypeittäin ja pylväsluokittain.

Impregnation type by pole category	Number of Poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Q _{maximum} [N]	Bending strength [MPa]
CCA	76	43	459	18,4	1,2	5 485	38,6
1	6	54	467	16,1	1,1	3 763	45,1
2	26	39	473	18,0	1,1	5 354	43,4
3	26	45	450	19,0	1,1	5 363	38,3
4	10	47	448	20,1	1,5	5 642	30,4
5	8	42	451	17,7	1,2	7 403	29,7
Creosote	40	40	500	20,8	–	4 918	32,4
1	3	58	513	17,7	–	3 269	36,7
2	14	46	507	18,7	–	3 912	33,6
3	9	33	490	19,8	–	4 733	32,7
4	8	32	491	25,3	–	5 038	27,7
5	6	38	502	22,8	–	8 203	33,2
Cu 2007-13	42	13	478	22,1	1,2	5 507	37,9
2	14	13	485	25,1	1,2	4 629	38,3
3	24	14	476	20,7	1,2	5 599	37,4
4	3	11	479	20,1	1,1	7 630	41,0
5	1	13	429	16,0	–	9 196	32,5
Cu 2014-22	116	7	479	20,3	1,3	5 876	44,2
1	9	10	485	20,4	1,3	4 239	45,9
2	62	6	482	20,3	1,2	5 233	44,9
3	26	6	468	20,9	1,3	6 361	44,2
4	15	6	485	19,5	1,3	7 084	40,0
5	4	6	464	19,8	1,5	11 848	44,2
Grand Total	274	23	476	20,1	1,2	5 571	39,9

4 YLEISIMMÄT KYLLÄSTETTYJEN PUUPYLVÄIDEN LAHOTTAJAT

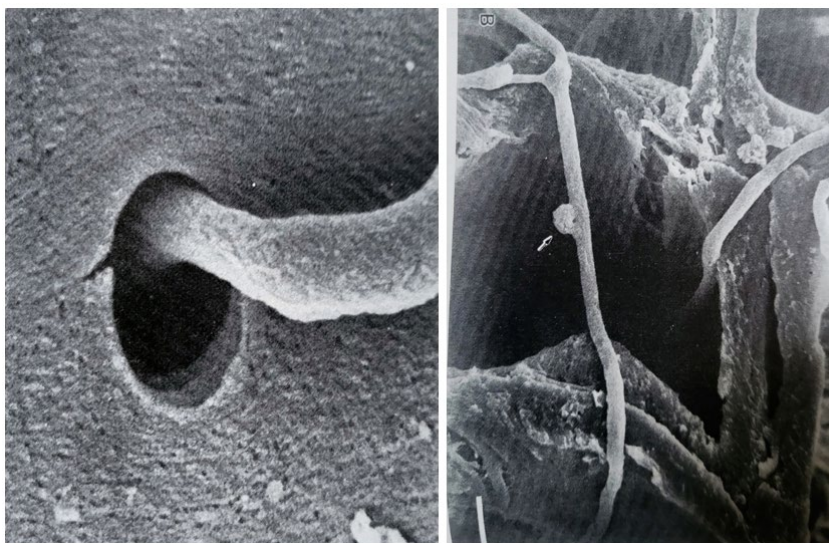
Lahoamisen aiheuttavat puussa kasvavat lahottajasienet, jotka käyttävät puuta ravintonaan (kuva 14).

Sienet lisääntyvät ja leviävät itiöistä, jotka muodostuvat itiöemissä (kuva 15). Kun itiöt joutuvat puun pinnalle, ne voivat itää ja kasvattaa puuhun rihmaston. Rihmasto muodostuu mikroskooppisen ohuista säikeistä, jotka kasvavat puusolujen sisällä ja tunkeutuvat solusta toiseen syövyttämiensä reikien kautta.

Rihmat erittävät entsyymejä, jotka hajottavat puun aineosia, selluloosaa ja ligniiniä. Tällöin puu lahoaa. Joidenkin sienten rihmasto pysyy kokonaan puun sisällä.

Useat sienet muodostavat etenkin kosteassa ilmassa myös puun pinnalle rihmastomattoja ja rihmastokimpuista koostuneita haaraisia jäniteitä.

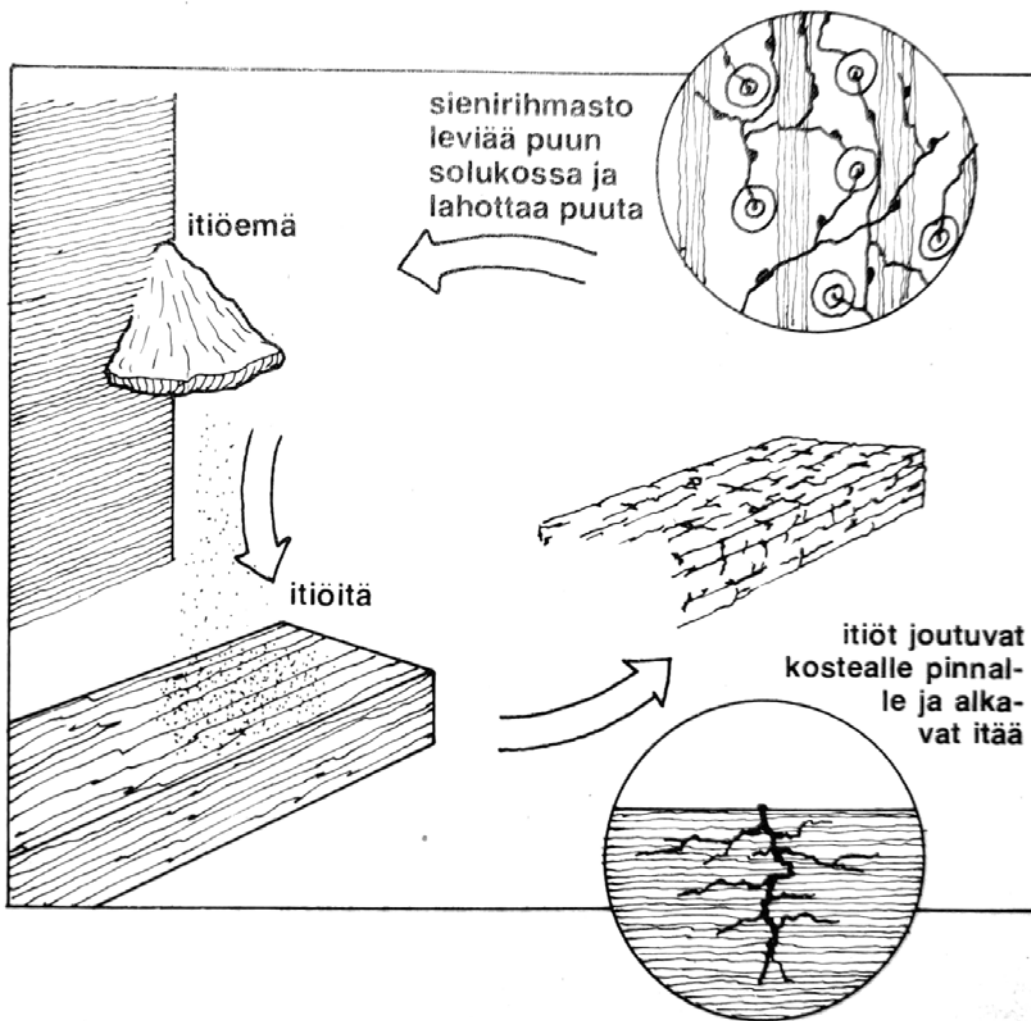
Kuvan 14 vasemmanpuoleisessa kuvassa näkyy, miten lahottajan rihmasto tunkeutuu Douglasskuusen soluseinämän kautta solusta toiseen leviten puun sisällä. Oikeanpuoleisessa kuvasta saa hyvin käsityksen, että lahottaja pystyy luomaan pitkiä rihmastoja soluonteloissa, jotka haarautuvat soluontelosta toiseen.



Kuva 14. Lahottajan hyyfejä (sienirihmoja) Douglasskuusen puuaineksessa. Kuvat: W.W Wilcox.

Lahottajasienten itiömät kasvavat esiin puusta; niitä voi tavata kasvavien tai kaatuneitten puiden rungoilla, kannoissa, aitatolpissa tai rakennuksissa. Itiöemien ulkonäkö vaihtelee sienilajeittain. Ne voivat olla lakkimaisia, kääpämäisiä, rupimaisia tai litteän kalvomaisia ja osittain tai kokonaan puualustaa vasten painautuneita. Yhdessä itiöemässä muodostuu miljardeja itiöitä, jotka ovat mikroskooppisen pieniä, halkaisijaltaan muutama tuhannesosa millimetriä.

Keveytensä vuoksi ne leviävät helposti kaikkialle ilmvirtausten mukana. Lahottajasienten itiöitä onkin aina runsaasti ilmassa.



Kuva 15. Lahottajasienten toimintamekanismi itiöemästä puun lahoamiseen. Kuva: Erkki Syysmeri

Puupylväissä esiintyy kolme vallitsevaa lahottajaa; rusko-, valko- ja katkolaho. Niiden alta Suomesta löytyy useampi laji, jotka ovat lähellä toisiaan ja hankalammin erotettavissa toisistaan jopa DNA:n perusteella. Esimerkiksi ruskolahottajia ovat *Postia sericeomollis*

(*Oligoporus sericeomollis*) eli korokääpä, *Postia rennyi* (*Oligoporus rennyi*) eli kuromakääpä ja *Postia romellii* (*Oligoporus romellii*) eli karhikääpä.

Suomen yleisimmät havupuiden lahottajat ovat ruskolaho ja katkolaho. Valkolaho on myös yleinen, mutta se esiintyy pääasiassa lehtipuilla.

4.1 Ruskolaho (istukkakääpä ym. kääpälajit)

Yleistynyt C-kyllästetyissä. Ruskolahoa (destruktio-, kutistumislaho) aiheuttavat sienet hajottavat selluloosaa. Puu muuttuu ruskeaksi. Kuivuessaan puu kutistuu voimakkaasti ja halkeilee lohkoutuen kuutiomaisesti. Puun lujuus heikkenee nopeasti jo lahon alkuvaiheessa, ja lopulta puu voidaan helposti murentaa hienoksi jauheeksi (kuva x).

4.2 Katkolaho

Katkolahoa aiheuttavat sienet kuuluvat ns. mikrosieniin, jotka eivät muodosta kookkaita itiöemiä. Katkolahottajat hajottavat enimmäkseen selluloosaa. Ne tulevat toimeen vähemmällä hapella ja kosteammassa puussa kuin muut lahottajasienet. Siksi katkolahoa tavataan usein maahan tai veteen kosketuksessa olevassa puutavarassa. Lahon puun ulkopinnalla on muutaman millimetrin syvyinen pehmennyt kerros, mutta puun sisäosa on kovaa. Puun paino alenee vain hyvin hitaasti, mutta sen lujuus heikkenee niin, että se saattaa katketa rasituksessa äkillisesti puun poikkisyyhyn. Katkeamispinta on sileähkö.

5 ELEKTRONISIA MENETELMIÄ LAHON SELVITTÄMISEEN SÄHKÖLINJALLA

5.1 Taajuusvärähtelyyn perustuva menetelmä

Keväällä 2025 tutustuttiin [CXI-PT5500](#) puupylväiden lujuusmittariin. Laite perustuu taajuusvärähtelyyn. Alla suora lainaus sivustolta.

CXI-PT5500 on kannettava mittalaite, joka analysoi taajuusvärähtelystä puupylvään lujuuden, mitattu lujuusarvo kertoo pylvään kunnon ja turvallisuuden. Mittalaitteita käyttävät puhelin- ja sähköverkon omistajat sekä kunnossapitoyritykset kaikissa eri maanosissa. Mittalaitteen luotettavuutta ja lujuustuloksia on verifioitu murtamalla satoja todellisia pylväitä laboratoriossa, sen on todistettu antavan luotettavampia tuloksia pylvään todellisesta kunnosta kuin mitä ihminen pystyy antamaan.

CXI-PT5500 mittaa puupylvään lujuusarvon ilman kaivauksia, kairauksia tai piikitystä. Mittalaite tutkii koko pylvään nopeasti ja objektiivisesti. Puun laho, kuitujen heikennyt kunto tai rakenteelliset vauriot kaikki yhdessä vaikuttavat mitattuun lujuusarvoon. Lujuusarvosta voidaan määritellä myös pylvään jäljellä oleva elinikä.

Heikentynyt lujuusarvo kertoo välittömästi mahdollisesta työturvallisuusriskistä. Mittaustulos kertoo myös pylvään vaihtotarpeesta ja näin palvelee verkkoyhtiötä hallitsemaan omaisuuttaan tehokkaasti.

Kuvassa 16 on esitetty varsinainen mittalaite ja tulos, joka sillä saadaan. CXI-PT5500-mittauksen tuloksena saadaan numeerinen arvo, pylvään lujuusarvio (Strength Assessment, SA), joka kuvaa pylvään jäljellä olevaa lujuutta [kN]. Tulos esitetään lisäksi prosenttiosuutena pylvään nimellislujuuden keskiarvosta.



Kuva 16. CXI-PT5500-mittalaite ja kuvakaappaus älylaitteen sovelluksen mittaustuloksesta. Kuva: Kai Möller

5.1.1 Kokemuksia taajuusvärähtelyyn perustuvasta mittalaitteesta

Laitteen sovellus on käynnissä joko älypuhelimessa tai tabletissa ja mittalaitteen antama data voidaan siirtää kunnossapitojärjestelmään.

Aluksi pylväälle tehdään alkukoputukset ja piikillä selvitetään lahoastetta. Laite kiinnitetään remmillä pylvääseen noin 2 metrin korkeudelle maanpinnasta.

Älypuhelimien syötetään pylvään lähtötiedot. Seuraavaksi mitataan pylvään ulkokehä maanpinnasta noin 1,7 metrin korkeudelta. Tämän jälkeen mitataan pylvään ulkokehä maanpinnasta noin 20 cm korkeudelta. Seuraavaksi syötetään maaperätyyppi ja johtimien määrä. Nyt kaikki lähtötiedot on syötetty.

Lopuksi lyödään vasaralla tukeva isku pylvääseen lähelle anturia noin 45° kulmassa ja odotetaan, kunnes laite on analysoinut iskun ja sen aiheuttaman värähtelyn kulkeutumisen läpi pylvään.

Pylvään mittaamiselle on rajoituksia. Raskaat AMKA-johtimet antavat väärän tuloksen. Samoin A-pylväät, muuntajapylväät ja kulmapylväät eli kaikki erikoisrakenteet.

Maaliskuussa 2025 toteutettiin mittaussessio, jossa värähdysmitattiin 11 kpl CCA-kyllästettyjä pylväitä.

Pylväät oli tarkoitus koestaa Xamkin tarkalla taivutuslaitteistolla ja verrata saatuja tuloksia värähdysmittauslaitteen tuloksiin. Valitettavasti vain kolme pylvästä päätyi testaukseen.

Kahdessa pylväässä oli isoja heittoja ja toisessa niistä heitto oli vaaralliseen suuntaan (taulukko 17). Otokoko oli pieni, mutta näinkin pienellä otosmäärällä tulos oli ristiriitainen

Taulukko 17. Vain yhdessä pylväässä Xamkin ja mittalaitteen tulos vastasivat toisiaan.

Xamk-ID	JSE-ID	Koetus Q _{max}	Karri Q _{max}	Q _{max} -arvojen poikkeama
4	808	7423	8350	12 %
4.1	807	7263	4580	-37 %
13	819	5943	9140	54 %

Laitteen luotettavuuden varmistaminen vaatii huomattavasti suuremman pylväsotoksen. Mittausajankohta huomioiden, tulosta saattoi vääristää myös se, että pylväissä oleva vesi saattoi olla vielä jäässä.

5.2 Mikroporatutkimus

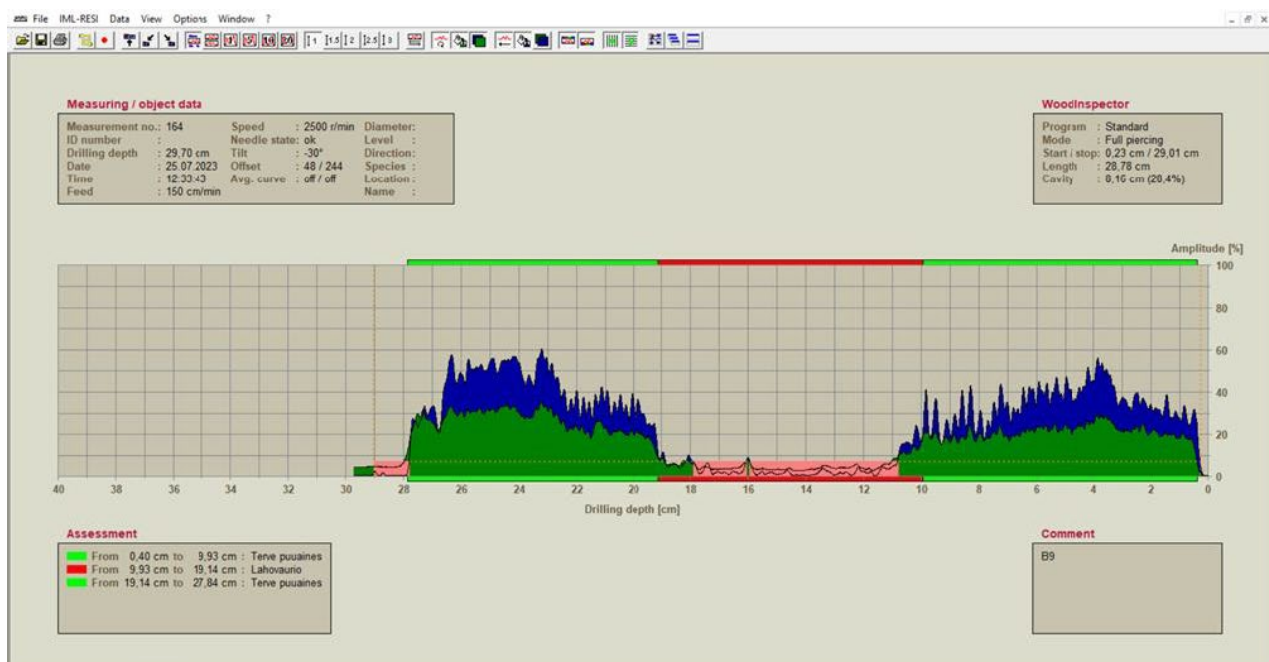
Joulukuussa 2025 jyvaskyläläinen [Wodeca](#) kävi esittelemässä lahotutkimusta mikroporausmenetelmällä (eng. drilling resistance measurement).

Mikroporalla pystytään tutkimaan puurakenteiden sisäosat heikentämättä pylvään rakennetta. Lahotutkimuksessa käytetty mikropora on malliltaan IML:n valmistama Resi PD-400. Poraneulan halkaisija on 3 mm ja neulan pituus 400 mm. Neulan pituus määrittää myös porauksen enimmäissyvyyden, joka on 400 mm. Poraus voidaan suorittaa esim. 30° kulmaan, jolloin pystytään poraamaan maanpinnan alapuolelle.

Pylvääseen tehdään kolme porausta, yksi vaaka- ja kaksi noin 30° vinoporausta maanpinnan alapuolelle. Vaakaporaus tehdään läpi pylvään läheltä maapinnan tasoa. Poraukset tehdään pylvään eri puolilta. Neulan upotessa puuhun poran ohjelmisto mittaa neulan pyörimisnopeutta sekä työntövastusta ja piirtää vastusten mukaisen diagrammin poran näytölle. Se voidaan tarvittaessa siirtää tietokoneelle tarkempaa tulkintaa varten. Porassa on Woodinspector-ohjelmisto, joka antaa diagrammista alustavan tulkinnan, mutta lopullisen arvion poraustuloksesta tekee porauksen suorittaja.

Poraustuloksesta pystytään erottamaan lahonnut ja muuttunut puuaines sekä esim. puuhun syntyneet halkeamat.

Kuvan 17 esimerkissä poraus on tehty 30° kulmassa pylvään tyveltä maan alle. Poraustuloksen vasemmassa ylä laidassa näkyvät porauksen yleistiedot, joista on nähtävissä porausnumero, -kohta ja porauksen arvot. Oikeassa ylä laidassa on Woodinspector-ohjelman antama tulkinta lahon määrästä. Diagrammia luetaan oikealta vasemmalle. Vihreä alue osoittaa poran pyörimisvastuksen ja sininen alue työntövastuksen. Poraus alkaa pylvään pinnasta, kuvan oikeassa reunassa kohdasta 0. Vasemmassa alakulmassa on diagrammin alapuolisen palkin värien selitys. Koska poraus on tehty 30° kulmassa, on laskettava vaakasuuntaa vastaava lahonneen alueen pituus ja pylvään halkaisija. Pylvään halkaisija on vaakasuuntaiseksi muutettuna noin 25 cm ja lahon määrä halkaisijamitassa noin 6 cm. Laho on tässä esimerkissä sydänlahoa.



Kuva 17. Vastaava, mutta pelkistetty kuva on myös laitteen näytöllä. Yllä oleva kuva havainnollistaa hyvin, missä laho sijaitsee ja kuinka paljon sitä on. Pylvään ikää voidaan ennustaa kuvan diagrammin avulla. Kuvassa olevat siniset piikit kuvaavat kesäpuuta heikompaa kevätpuuta. Kuva: Wodeca/Petri Laitinen

Laitteesta jäi esittelyn jälkeen hyvä kuva. Toimijalla on 10 vuoden kokemus laitteen käytöstä, joten työvaiheet ja tulosten tulkitseminen ovat hioutuneet. Pylväiden tarkastusmäärä on noin 4 300 pylvästä/vuosi. Yhden pylvään tarkastaminen sisältäen poraukset (3 kpl), kirjaukset ja kävelyn tolpalta toiselle vie yhdeltä henkilöltä noin 3–4 minuuttia.

Tässä menetelmässä rajoituksena on, että puun sisäosissa olevan veden olomuoto tulee olla sula. Se rajoittaa laitteen käytön noin 6–7 kk/vuosi.

Menetelmän ensimmäiset sovellukset otettiin käyttöön 1980-luvun lopulla USA:ssa (RESISTOGRAPH-menetelmä), joten siitä on jo olemassa monta kehitysversiota.

Kuvassa 18 on mikropora varustettuna 18 V akulla. Laitteen esittelijä Petri Laitinen kertoi, että laitetoimittajan palvelu on ollut huoltojen ja varaosien suhteen nopeaa. Myös neulat ovat halpoja, noin 15 €/kpl.



Kuva 18. Mikropora ja sen terä etualalla. Kuva: Wodeca/Petri Laitinen

5.3 Tylpän terästapin ampuminen tietyn energiamäärän avulla (penetrometri)

Penetrometrejä (kuva 19, ks. myös [Liite 5](#)) käytetään yleisesti elävien puiden tiheyden mittaamiseen, mutta niitä voidaan soveltaa myös puupylväiden tiheyden mittauksiin. Se soveltuu vain pintapuun mittaukseen, koska tunkeumasyyvyys on maksimissaan 40 mm. Jos halutaan kartoittaa, onko pylväissä pinnasta syvemmälle ulottuvaa pintalahoja, laite saattaa puoltaa paikkaansa.



Kuva 19. Pilodyn-penetrometri.

Pilodyn-penetrometri on välitön, kustannustehokas ja rikkomaton testausmenetelmä. Sen toimintaperiaate perustuu siihen, että tylppä tappi (halkaisija Ø 2,5 mm tai Ø 2,0 mm) ammutaan puuhun ennalta asetetulla energialla, ja tapin tunkeutumissyvyyden perusteella voidaan arvioida puun tiheyttä tai puun lahon astetta laitteen asteikolta.

5.4 Yhteenveto mittalaitteista

Taajuusvärähtelymittarilla saatava SA-arvo kuvaa pylvään kokonaisjäykkyyttä ja dynaamista käyttäytymistä, mutta ei anna tietoa vaurioiden sijainnista tai laajuudesta. Porausvastusmittaus täydentää SA-arvoa paikantamalla sisälahon ja määrittämällä kantavan poikkileikkauksen. Tiheyden määrittäminen 40 mm paljastaa vain pintalahon.

Taulukossa 18 on vertailtu edellä esiteltyjen kolmen lahomittauslaitteen käyttöä ja ominaisuuksia.

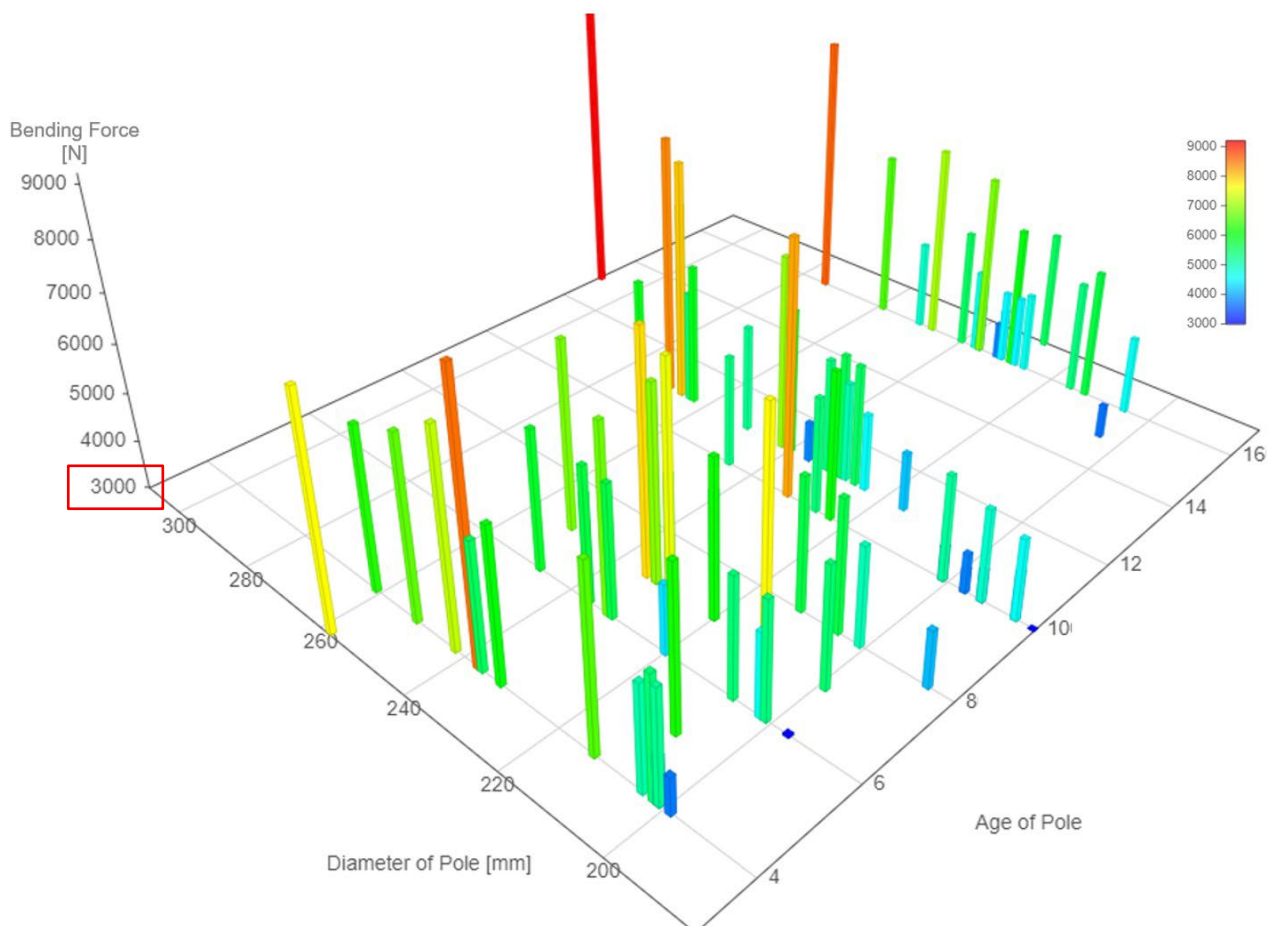
Luotettavimman tuloksen ja arvioitaessa pylvään jäljellä olevaa käyttöikää, mikroporaus on varteenotettavin vaihtoehto.

Taulukko 18. Kolme eri menetelmää pylvään lahon selvittämiseksi. Laitteet tarkentavat yhdessä ihmisen aistien kanssa tarkemman lopputuloksen.

Ominaisuus	Värähtelymenetelmä	Mikroporaus	Pilodyn
Mittausperiaate	Pylvään dynaaminen vaste (värähtelytaajuus)	Porausvastus (syöttö- tai pyörimisvastus)	Iskutapin tunkeutumissyvyys
Mitattava suure	Kokonaisjäykkyys / dynaaminen indeksi	Paikallinen materiaalivastus	Pintapuun tunkeutumissyvyys
Mittaustulos	SA-arvo (indeksi, % nimellislujuudesta)	Jatkuva vastusprofiili	Tunkeutumissyvyys (max. 40 mm)
Mittauksen luonne	Globaali	Paikallinen	Paikallinen (pinta)
Sisälähön havaitseminen	Epäsuora	Luotettava	Ei (vain epäsuora)
Lahovaurion paikannus	Ei	Kyllä	Ei
Onteloiden tunnistus	Ei	Kyllä	Ei
Pintapuun kunnon arvio	Epäsuora	Rajoitettu	Hyvä
Kyllästetyn puun mittaus	Riippuu kalibroinnista	Kyllä	Vaatii tulkintaa
Mittausvyvyys	Koko pylväs (epäsuorasti)	Koko poikkileikkaus	0–40 mm
Vaurio pylvääseen	Ei vauriota	Vähäinen (≈ 3 mm reikä)	Vähäinen (≈ 2 – $2,5$ mm reikä)
Mittausnopeus	Erittäin nopea	Kohtalainen	Erittäin nopea
Käyttö kentällä	Erittäin helppo	Helppo	Erittäin helppo
Toistettavuus	Hyvä, mutta ympäristöherkkä	Hyvä	Hyvä
Saatujen arvojen soveltuvuus mitoitukseen	Epäsuora	Rakenteellinen	Ei
Tyypillinen käyttötarkoitus	Seulonta, priorisointi	Sisälähön ja kantavan poikkileikkauksen määrittäminen	Pintapuun tiheys ja laho
Rooli kokonaisarviossa	1. vaihe: riskien tunnistus	2. vaihe: rakenteellinen arvio	Täydentävä pintatieto

6 TULOKSET

Kuvassa 20 on kolmiulotteinen taulukko, jossa muuttujina ovat C-pylvään halkaisija ja -ikä. Y-akselilla on maksimivoima (Q_{maximum} , Bending Force), jonka pylväs on kestänyt. Asteikko lähtee 3 000 Newtonista. Kuvaajasta näkyy hyvin se, miten erilaisia voimia linjalla olevat pylväät kestävät. Osa johtuu tiheyksistä, osa vioista, mutta suurimmassa osassa kuvan pylväistä jännitysten kestoon liittyy laho ja sen määrä.



Kuva 20. Pylväiden ulkoisten voimien kesto saman pylväsluokan sisällä vaihtelee suuresti. Kuva: Kai Möller

Kokeissa on todettu määrän suomalaisen mäntypylvään taivutuslujuuden keskiarvoksi n. 50 MPa ja vastaavaksi hajonnaksi 5 MPa. Pylväiden taivutuslujuuden hajonta on n. 10 % keskiarvosta, kun sahatavaran vastaava hajonta on 25...30 % (Mäkipuro, R. Puupylväiden lujuuslaskentaohje. Lahontorjuntayhdistys ry., 1981).

6.1 Analysointimenetelmästä

Yksimuuttujaregressioiden rinnalla etsittiin monimuuttujaregression kautta tarkempaa tulosta siihen, miten eri muuttujat vaikuttavat lopputulokseen. Oheisessa taulukon 19 esimerkissä aineiston koko oli 183 pylvästä, joista 107 kpl oli vuosina 2014–22 kyllästettyjä kuparipylväitä ja 76 kpl CCA-pylväitä.

Taulukko 19. Excelissä ajettu CCA vs. Copper 2014-monimuuttujaregressioanalyysi.

Kyllästeiden vertailu CCA vs. Cu, kyllästysvuodet 2014-22

Regressiotunnusluvut	
Kerroin R	0,5684418
Korrelaatiokerroin	0,3231261
Tarkistettu korrelaatiokerroin	0,3000509
Keskivirhe	7,1117613
Havainnot	183

CCA vs. Cu 2014-22 →
muuttuja ei ole tilastollisesti
merkittävä

ANOVA					
	va	NS	KN	F	F:n tarkkuus
Regressio	6	4249,4362	708,2393672	14,0031492	5,3267E-13
Jaannös	176	8901,57826	50,57714923		
Yhteensä	182	13151,0145			

	Kertoimet	Keskivirhe	t	Tunnusluvut	P-arvo	Alin 95%	Ylin 95%	Alin 95,0%	Ylin 95,0%
Leikkauspiste	60,204472	3,1474531	19,12799646	0,00	53,9928648	66,4160786	53,9928648	66,4160786	
Moisture content	-0,440507	0,13704001	-3,214439874	0,00	-0,7109601	-0,1700537	-0,7109601	-0,1700537	
CCA vs Copper 2014	2,2999113	3,50346201	0,656468173	0,51	-4,6142914	9,21411406	-4,6142914	9,21411406	
Mechanical Defects	-5,312416	1,52566921	-3,482023394	0,00	-8,3233765	-2,3014552	-8,3233765	-2,3014552	
Years of use	-0,205003	0,09099645	-2,252865069	0,03	-0,3845874	-0,0254181	-0,3845874	-0,0254181	
Annual ring width sapwood	-4,058921	1,31070293	-3,096751546	0,00	-6,6456386	-1,472204	-6,6456386	-1,472204	
Knot group	-4,589746	2,07508465	-2,211835665	0,03	-8,6849971	-0,4944953	-8,6849971	-0,4944953	

CCA vs. Cu 2014-22 →
muuttuja ei ole tilastollisesti
merkittävä

Muuttujina olivat puun kosteus, pylvään mekaaniset vauriot, käyttövuodet, pintapuun vuosilustojen paksuus ja oksaryhmät. analyysin mukaan CCA-pylväs olisi keskimäärin 2,3 MPa lujempaa. Tässä analyysissä ongelmana on, että vertailulla CCA vs. kupari ei ole tilastollista merkittävyyttä.

Keskustelut Xamkin matematiikan lehtorin kanssa johtivat siihen päätelmään, että yksimuuttujamalli on riittävä analysointimenetelmä. Kun kutakin muuttujaa (käyttöikä, tiheys, kosteus, oksaryhmät jne.) verrataan erikseen taivutuslujuuteen ja koostetaan erillisistä tuloksista yhteenveto, päästään tarkempaan lopputulokseen.

6.2 Kooste mittaustuloksista

Kuvaan 21 on koostettu kaikkien pylväiden avaintietojen keskiarvot kyllästetyypeittäin. Saadut arvot noudattavat kirjallisuudessa olevia arvoja muiden arvojen paitsi taivutuslujuuden osalta. Muissa paitsi vuosina 2014–22 kyllästetyissä C-pylväissä alkaa näkymään lahoamisesta

johtuvaa lujuuden heikkenemistä. Uudemmissa pylväissä lahon vaikutus ei vielä näy niin selvästi tai kyllästysaineet ja -prosessi on parantunut.

Impregnation type	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot Groups	Diameter at ground line [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
CCA	76	43	459	18,4	1,2	3	233	5 485	38,6
Creosote	40	40	500	20,8		2	236	4 918	32,4
Cu 2007-13	42	13	478	22,1	1,2	2	237	5 507	37,9
Cu 2014-22	116	7	479	20,3	1,3	11	222	5 876	44,2
All totals (averages)	274	23	476	20,1	1,2	18	229	5 571	39,9

"oven-dry density" eli puun kuivatiheys (metsämaan eri kasvupaikoilta) on Suomessa = 470 kg/m³ (± 10–20 kg/m³)

Testattujen pylväiden määrään nähden oksaryhmästä murtumia oli vähän, vain 6,6 %.

Tästä ryhmästä on vaikea tehdä johtopäätöksiä, koska uusimmat pylväät ovat olleet maassa vajaat kolme vuotta ja vanhimmatkin vain vajaat 10 vuotta.
Taivutuslujuuden ero 6,3 MPa uudempien C-ylväiden eduksi voi johtua tehoaineiden lisäyksestä ja kyllästysprosessin paranemisesta yhtä hyvin kuin, että pitempään maassa olleissa C-ylväissä lahoamisprosessi on alkanut. Todennäköisesti tulos on molempien summa.

Luonnonvarakeskuksen (Luke) tutkimuksessa Etelä-Suomen mäntykuitupuulta mitattiin luston leveyksiä eri-ikäisissä metsissä. Siinä katsottiin erikseen **10 viimeistä vuosilustoa** (eli rungon ulointa osaa):

- ensiharvennusemetsissä: 2,2 mm
- toisen harvennusemetsissä: 1,3 mm
- päätehakkumetsissä (täysikasvuiset rungot): **1,0 mm**
- kaikkien yhteiskeskisarvo: **1,2 mm**.

Hyvän kyllästykseen jälkeen toiseksi paras lahonestomenetelmä on kasvattaa pylvään maanrajan halkaisijaa.

Kuva 21. Testeissä olleiden pylväiden avainarvot koosteena. Kuva: Kai Möller

Kesän testien jälkeen todettiin, että kreosoottikyllästettyjä pylväitä on testattu riittävästi ja koska niiden asentaminen sähkölinjoille on nykyisin vähäistä, testattu määrä ja muutama kesällä 2025 tuleva kreosoottipylväs on riittävä aineisto (40 kpl) niiden käyttöään määrittämiseksi.

Taulukossa 20 on kaikkien pylväiden avainarvot koosteena. Siihen haluttiin erotella 2023–24 ja 2025 testaukset erikseen, koska pylväsprofiilit poikkesivat toisistaan ja tutkimusmenetelmät kehittyivät viimeisen testausjakson koestuksiin. Muutoksilla ei kuitenkaan ollut ratkaisevaa vaikutusta saatuihin tuloksiin.

Taulukko 20. Testeissä olleiden pylväiden avainarvot ja pylvästiedot koosteena.

Syksyn 2023 ja kesän 2024 koestukset

Kyllästetyyppi	Kyllästysvuosi	Käyttöikä	Määrä [kpl]	Osuus pylväiden kokonaismäärästä	Taivutuslujuuden vaihteluväli [MPa]	Taivutuslujuus ¹⁾ [MPa]	MC _u (koestuskosteus) ¹⁾ [%]	Tiheys, MC = 0 % ¹⁾ [kg/m ³]	Tiheys, MC _u ¹⁾ [kg/m ³]	Oksaryhmä murtokohdassa [pylväitä]	Kyllästyneen alueen suhteellinen osuus [%] ²⁾
Kreosootti	1963-2013	10-61	36	22 %	12,7-63,1	31,8	19,8	496	595	1	
CCA-kylläste	1959-2006	18-65	41	25 %	22,0-52,9	34,0	21,2	457	553	2	
C-kylläste	2007-2021	2-16	89	54 %	27,1-60,1	41,4	22,4	483	592	6	60,1
2023-24 yhteensä	1959-2021	2-65	166	100 %	12,7-63,1	37,5	21,6	479	583	9	

Kesän 2025 koestukset

Kyllästetyyppi	Kyllästysvuosi	Käyttöikä	Määrä [kpl]	Osuus pylväiden kokonaismäärästä	Taivutuslujuuden vaihteluväli [MPa]	Taivutuslujuus ¹⁾ [MPa]	MC _u (koestuskosteus) ¹⁾ [%]	Tiheys, MC = 0 % ¹⁾ [kg/m ³]	Tiheys, MC _u ¹⁾ [kg/m ³]	Oksaryhmä murtokohdassa [pylväitä]	Kyllästyneen alueen suhteellinen osuus [%] ²⁾
Kreosootti	2008-2010	13-65	4	4 %	27,2-42,9	37,4	29,9	529	687	1	56,1 ³⁾
CCA-kylläste	1967-2003	18-58	35	32 %	17,7-60,2	44,1	15,2	462	532	1	62,0
C-kylläste	2013-2022	2-12	69	64 %	28,4-60,4	43,8	18,5	469	556	7	61,3
2025 yhteensä	1967-2022	2-65	108	100 %	17,7-60,4	43,6	17,9	469	553	9	

Kaikki yhteensä

Kyllästetyyppi	Kyllästysvuosi	Käyttöikä	Määrä [kpl]	Osuus pylväiden kokonaismäärästä	Taivutuslujuuden vaihteluväli [MPa]	Taivutuslujuus ¹⁾ [MPa]	MC _u (koestuskosteus) ¹⁾ [%]	Tiheys, MC = 0 % ¹⁾ [kg/m ³]	Tiheys, MC _u ¹⁾ [kg/m ³]	Oksaryhmä murtokohdassa [pylväitä]	Kyllästyneen alueen suhteellinen osuus [%] ²⁾	Vuosirenkaiden keskiläveys ⁴⁾ [mm]	Pintapuun vuosirenkaiden keskiläveys [mm]
Kreosootti	1963-2013	10-65	40	15 %	12,7-63,1	32,4	20,6	501	604	2			
CCA-kylläste	1959-2006	18-65	76	28 %	17,7-60,2	38,6	18,4	459	543	3		1,6	1,2
C-kylläste	2007-2022	2-16	158	58 %	27,1-60,4	42,5	21,0	480	581	13	60,7	1,6	1,2
Kaikki yhteensä	1959-2022	2-65	274	100 %	12,7-63,1	39,9	20,1	476	572	18			
	Keski-ikä kaikki	22,7											
	Keskihajonta	19,4											
	Keski-ikä kreos.	39,7											
	Keski-ikä CCA	43,4											
	Keski-ikä C	8,5											
	Minimi-ikä	3,0											
	Maksimi-ikä	65,0											

¹⁾ Keskiarvo

²⁾ Kyllästyneen alueen suhteellinen osuus koko poikkileikkauksesta. Mitattu vain yhdestä kohtaa pylvästä läheltä murtokohtaa.

³⁾ Vain kolmen pylvään keskiarvo.

⁴⁾ Pylvään kokonaisesta poikkileikkauksesta (sisältää kaikki vuosirenkaat).

Pylväiden ikä vaihteli kolmen ja 65 vuoden välillä eli ikähaitari oli iso. Kursioiteettina todettakoon, että vanhimman, vuonna 1959 kyllästetyn CCA-pylvään taivutuslujuus oli vielä 34,7 MPa ja se kesti 3 968 N eli siihen voisi huoletta kiivetä.

Vuoden 2025 testauksien parempi taivutuslujuus selittyy osittain sillä, että testatut pylväät olivat uudempia jokaisen kyllästystyyppin pylväissä ja niiden määrä oli 35 % vähemmän kuin vuosina 2023–24 testatuissa. Loppusyksystä 2023 testattiin 30 pylvästä, joista hylättiin 10 kpl.

Pylväiden tiheydet olivat suhteellisen lähellä toisiaan. Poikkeus kesällä 2025 testatut kreosoottipylväät, joita oli vain neljä kappaletta. Kreosootti on orgaaninen öljy/hiilivetyseos, jolla on suuri massa ja joka sitoutuu puun soluihin eikä automaattisesti poistu normaalissa uunikuivauksessa. Siksi kreosootilla voi tulla 12–15 % suuremmat tiheysarvot verrattuna käsittelemättömään puuhun.

6.3 Eri kyllästetyyppien avainarvot kyllästysaikakausittain ja -vuosittain

Taulukossa 21 lahoamisen vaikutus näkyy hyvin; sekä tiheys että taivutuslujuus pienenevät mitä vanhempiin vuosikymmeniin siirrytään. Tähän vaikuttavat puuaineksen rakenteen muuttuminen lahomisprosessissa sekä pylvään lahoaminen.

Taulukko 21. Eri vuosikymmeninä kyllästettyjen puupylväiden avainarvoja kyllästysainetyypeittäin.

Impregnation type by era	Number of Poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
CCA	76	43	459	18,4	1,2	5 485	38,6
1960s	8	60	434	19,3	1,6	3 754	33,4
1970s	34	48	457	20,9	1,2	5 348	34,6
1980s	21	39	465	15,3	1,1	5 849	46,6
1990s	11	31	467	16,4	1,2	6 452	38,6
2000s	2	20	495	17,2	1,0	5 606	43,9
Creosote	40	40	500	20,8	--	4 918	32,4
1960s	23	58	493	16,5	--	4 098	29,5
2000s	10	17	497	26,7	--	6 276	34,7
2010s	7	12	525	26,6	--	5 670	38,5
Cu 2007-13	42	13	478	22,1	1,2	5 507	37,9
2007-13	42	13	478	22,1	1,2	5 507	37,9
Cu 2014-22	116	7	479	20,3	1,3	5 876	44,2
2014-22	116	7	479	20,3	1,3	5 876	44,2
Grand Total	274	23	476	20,1	1,2	5 571	39,9

6.3.1 C-kyllästetyt pylväät

Taulukossa 22 vuosi 2013 on erotettu omaksi kohdaksi, koska sen pylväsmäärä on korostetun voimakkaasti edustettuna. Lisäksi se oli viimeinen ns. ensimmäisen C-kyllästeajanjakson 2007–13 kyllästysvuosi, jonka jälkeen kyllästysaineen määrää lisättiin ja myös muita muutoksia tehtiin. Toisin sanoen se on C-kyllästeiden osalta eräänlainen siirtymävuosi.

Jatkossa osassa taulukoista vihreä fontti kuvaa hyvää arvoa ja punainen huonoa tai tulokseen negatiivisesti vaikuttavaa.

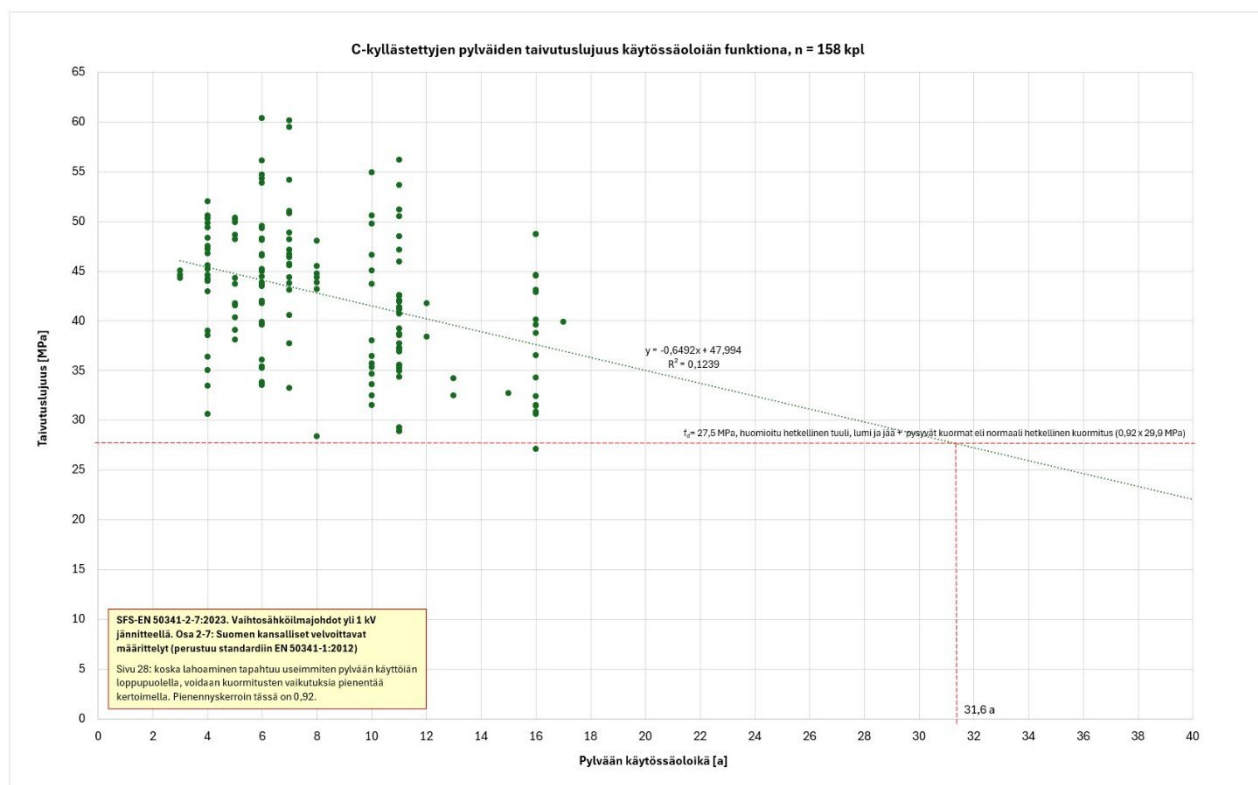
Taulukko 22. Vuosina 2007–2022 kyllästettyjen C-pylväiden avainarvoja.

Cu impregnation year	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture Content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot groups [pcs]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
2007-12	22	16	478	23,6	1,2	1	5453	37,4
2007	4	16	533	30,5	1,1	0	5726	45,4
2008	14	16	472	21,8	1,2	1	5263	36,0
2009	1	15	443	31,8	0,9	0	3677	32,7
2011	2	13	440	17,4	0,0	0	6575	33,3
2012	1	12	447	25,3	1,4	0	6544	38,4
2013-13	20	11	479	20,4	1,2	1	5566	38,3
2013	20	11	479	20,4	1,2	1	5566	38,3
2014-22	116	7	479	20,3	1,3	11	5876	44,2
2014	23	11	486	21,6	1,2	1	4705	42,9
2015	3	9	451	19,4	1,0	0	4836	33,9
2016	14	7	481	22,2	1,3	1	6014	48,8
2017	3	8	480	17,7	1,1	0	7837	42,8
2018	20	6	480	21,1	1,3	1	6368	43,3
2019	31	5	482	18,9	1,3	3	6378	44,3
2020	17	4	471	19,5	1,3	5	5476	44,7
2021	3	4	485	19,7	1,6	0	6213	45,2
2022	2	3	437	19,1	1,3	0	7203	44,7
Grand Total (average)	158	8	479	20,8	1,2	13	5778	42,5
MIN		3	437	17,4	0,9		3677	33
MAX		16	533	31,8	1,6		7837	49

Kun tarkastellaan koko C-kyllästettyjen pylväiden aineistoa ja arvioidaan yksimuuttuja regressioanalyysillä niiden käyttöikä, saadaan arvo 31,6 vuotta, jossa pylvään ikä leikkaa mitoitusjännityksen arvon 27,5 MPa. Tämä arvo ei tarkoita, että pylväs pitäisi vaihtaa, vaan on eräänlainen hälytysraja, josta ei ole enää pitkä matka ensimmäiseen keltaiseen nauhaan. Pylvään jäljellä olevan käyttöiän arvioinnissa auttavat riittävät pylvään pohjatiedot ja riittävän tarkka seurantahistoria, jos sitä on jo tallennettu. Asiasta lisää myöhemmin.

Kuvan 22 kuvaajaan on yhdistetty kahden eri kyllästysajanjakson C-kyllästetyt pylväät. Yhdistäminen antaa paremman kuvan kuin, jos katsottaisiin vain huonomman lahonkeston saaneita 2007–2013 kyllästettyjä pylväitä. Sama tilanne on 2014–22 kyllästettyjen pylväiden osalta. Sen pylväsjoukko on liian uutta johtopäätösten tekemiseen.

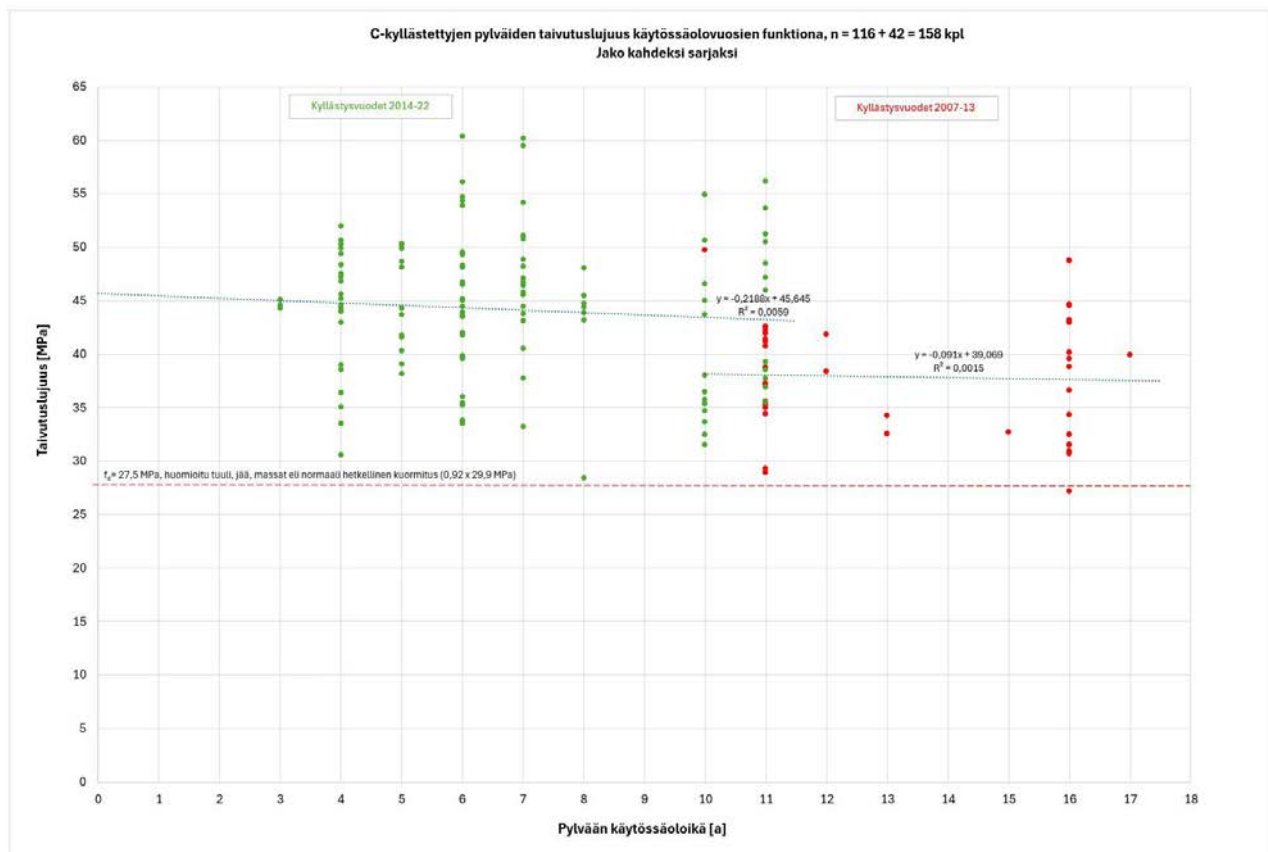
Tuloksen tulkintaa hankaloittaa se, että C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuuden hajonta eri käytössäolovuosina on suurta. Esimerkiksi 6 vuotta käytössä olleiden pylväiden hajonta on noin 34 MPa:sta 61 MPa:iin.



Kuva 22. Testattujen C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet käyttöiän funktiona. Kuva: Kai Möller

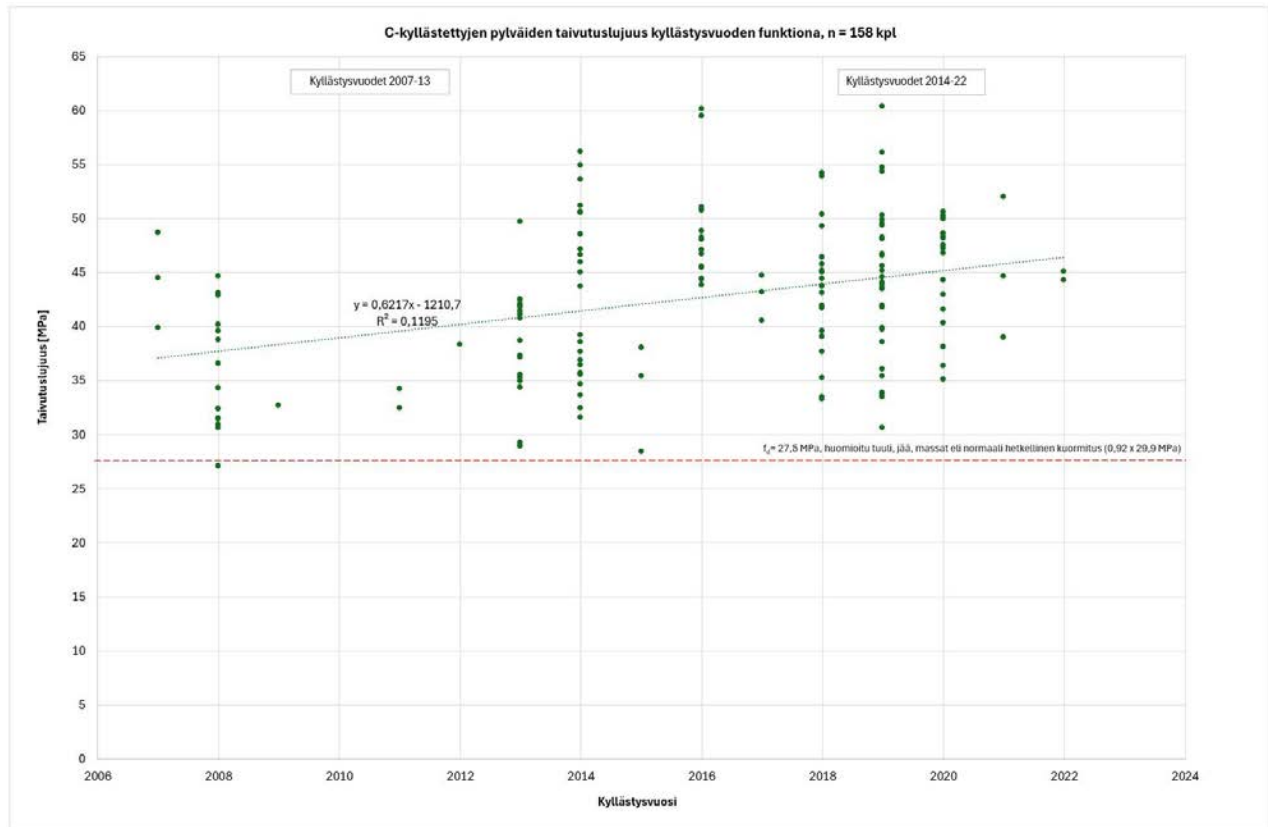
Kuvan 23 kuvaajassa on aiemmin kyllästetyt- ja uudempi ryhmä ovat eroteltu omiksi kuvaajikseen. Punaisella on merkitty kyllästysvuosia 2007–13 ja vihreällä kyllästysvuodet 2014–22. Molemmat korreloivat huonosti johtuen ennen kaikkea suurista taivutuslujuuksien käyttövuosikohtaisista hajonnoista. Ensimmäinen vanhemman sarjan pylväistä lähestyy jo nauhoittamista yhdellä nauhalla, 16 vuotta käytössä olleen pylvään taivutuslujuus on alentunut noin 27 MPa:iin.

Merkille pantavaa on, että vuosien 2014–22 aikana kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet ovat selkeästi parempia kuin aiemman 2007–13 jakson pylväiden. Ero näkyy selvästi 11 käyttövuoden pylväissä; niitä on molemmissa ryhmissä käyttöönottovuoden mukaan ja näyttää siltä, että ryhmän 2014–22 pylväät ovat olleet lujempia.



Kuva 23. Testattujen C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet käyttöiän funktiona. Ryhmät on jaettu kyllästysajanjakson mukaan (2007–2013 ja 2014–22). Kuva: Kai Möller

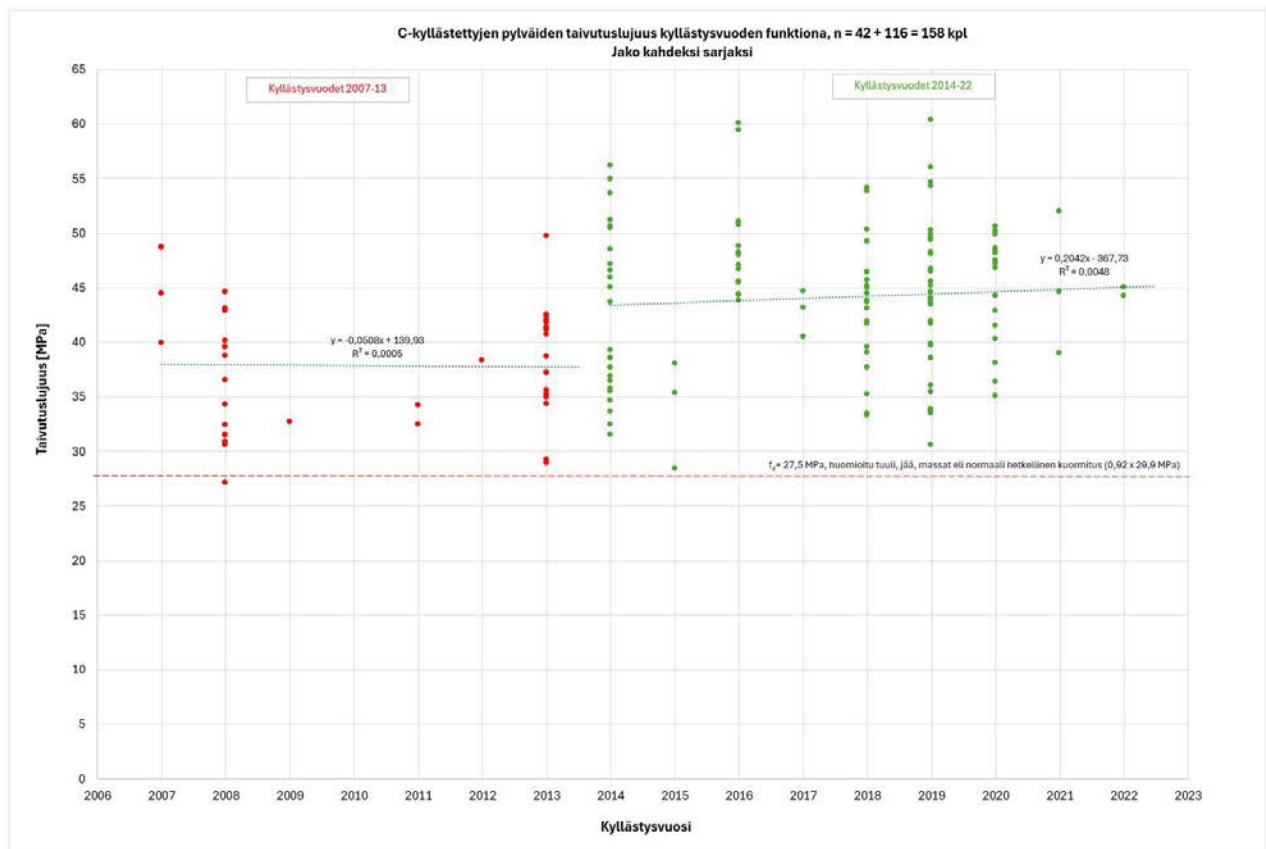
Kuvan 24 kuvaajassa on tarkasteltu, miten taivutuslujuus muuttuu kyllästysvuoden funktiona. On luonnollista, että vanhemmissa pylväissä on huonommat taivutuslujuudet kuin uudemmissa. Graafissa on jonkun asteista korrelaatiota ja kuvaajan suunta on oikea. Aineisto on yhdistetty eli kaikki 158 testattua C-tylvästä ovat kuvaajassa.



Kuva 24. Testattujen C-tylvästettyjen pylväiden taivutuslujuudet kyllästysvuoden funktiona. Kuva: Kai Möller

Jaetussa aineistossa taivutuslujuus kyllästysvuoden funktiona kuvaajat kulkevat eri tasossa (kuva 25); vuosina 2014–22 kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet ovat parempia kuin vuosina 2007–13 kyllästettyjen pylväiden. Toisaalta esimerkiksi kyllästysvuoden 2014 huonoimmat taivutuslujuudet ovat samantasoisia kuin vuonna 2013 kyllästettyjen.

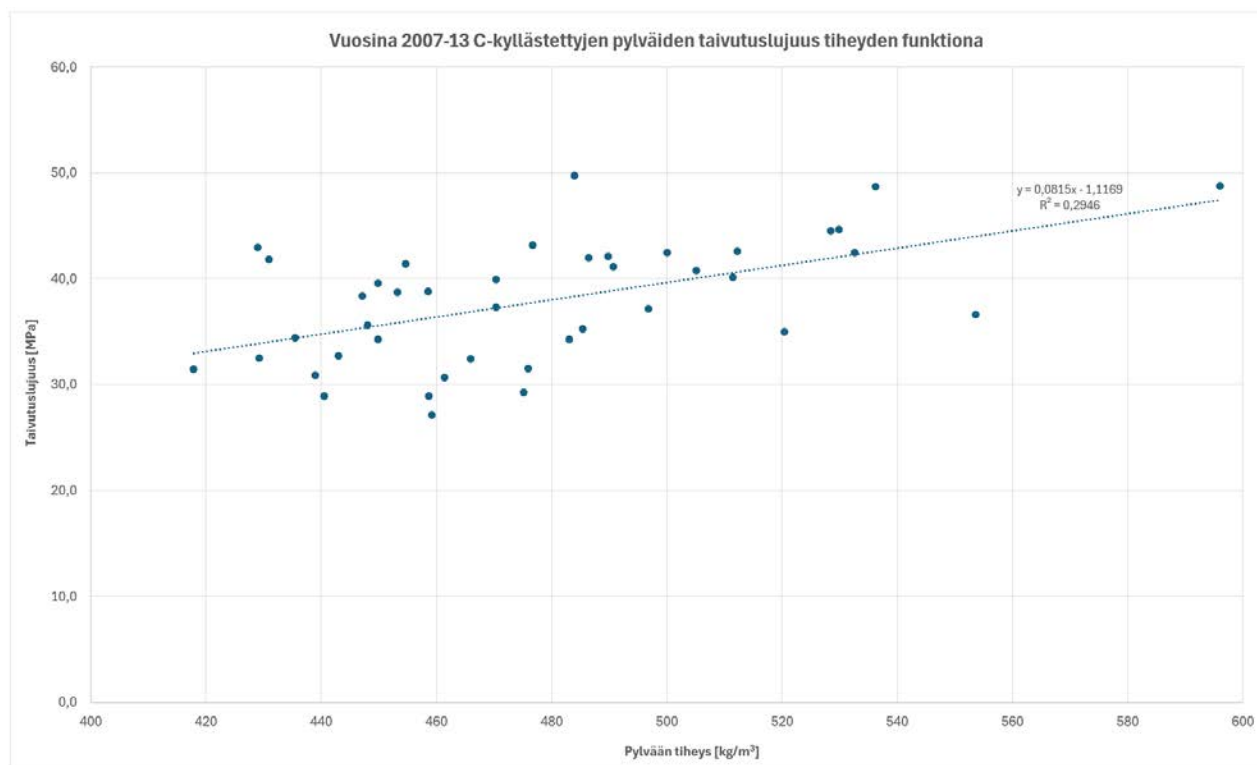
Kummankaan ryhmän tuloksissa ei ole havaittavissa mainittavaa korrelaatiota.



Kuva 25. Kaikkien C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet kyllästysvuoden funktiona. Ryhmät on jaettu kyllästysajanjakson mukaan. Kuva: Kai Möller

6.3.1.1 Vuosina 2007–13 kyllästettyjen C-pylväiden tarkastelua

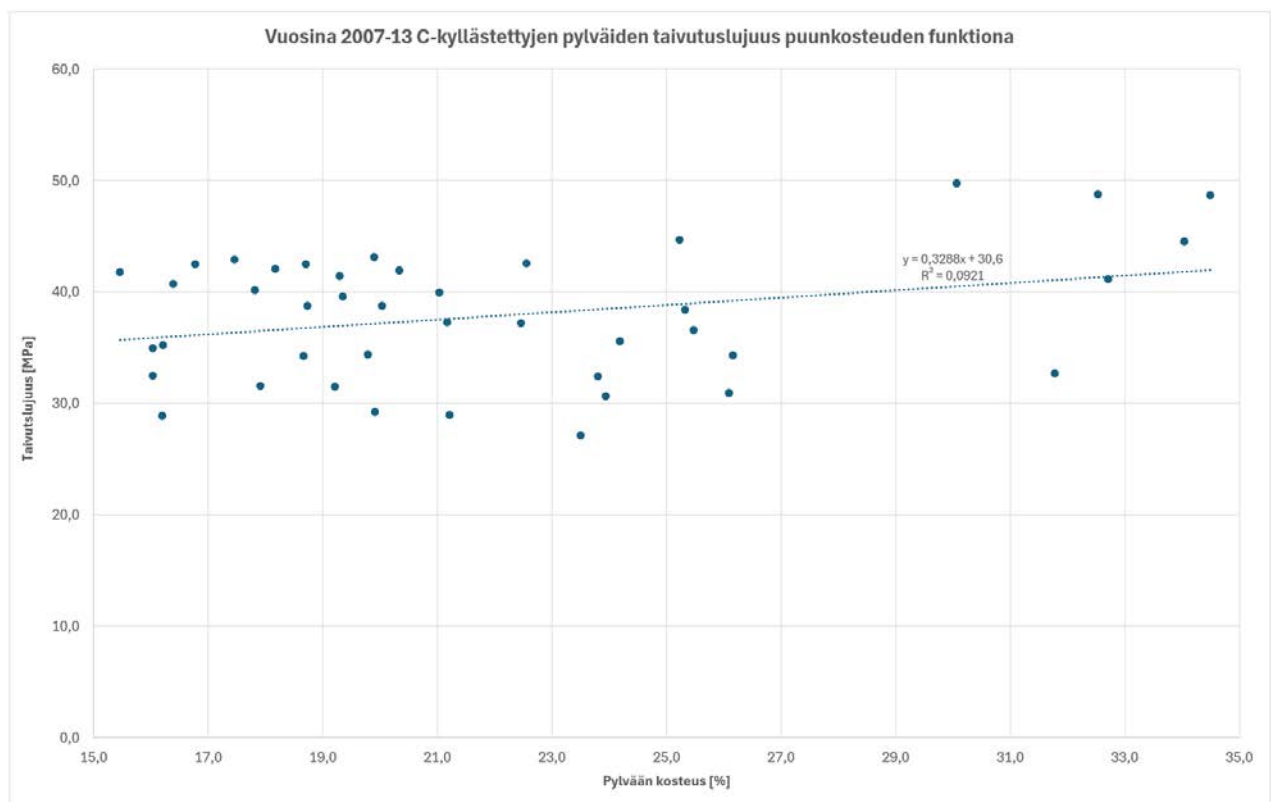
Vuosien 2007–2013 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet korreloivat hyvin pylväiden tiheyden kanssa (kuva 26). Yhdenkään pylvään taivutuslujuus ei ole alittanut puupylvään mitoituslujuutta 27,5 MPa, tosin yksi pylväs on rajoilla.



Kuva 26. Vuosien 2007–2013 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään tiheyden funktiona.
Kuva: Kai Möller

Pylväiden kosteuksien osalta regressiosuora kulkee väärään suuntaan (kuva 27). Kulmakertoimen muuttua positiiviseksi kuusi kosteuden arvoa, jotka ovat PSK:n tai suuremmassa kosteudessa. Silti korrelaatio on heikko, vaikka kuutta hyvin kosteaa arvoa ei huomioitasi.

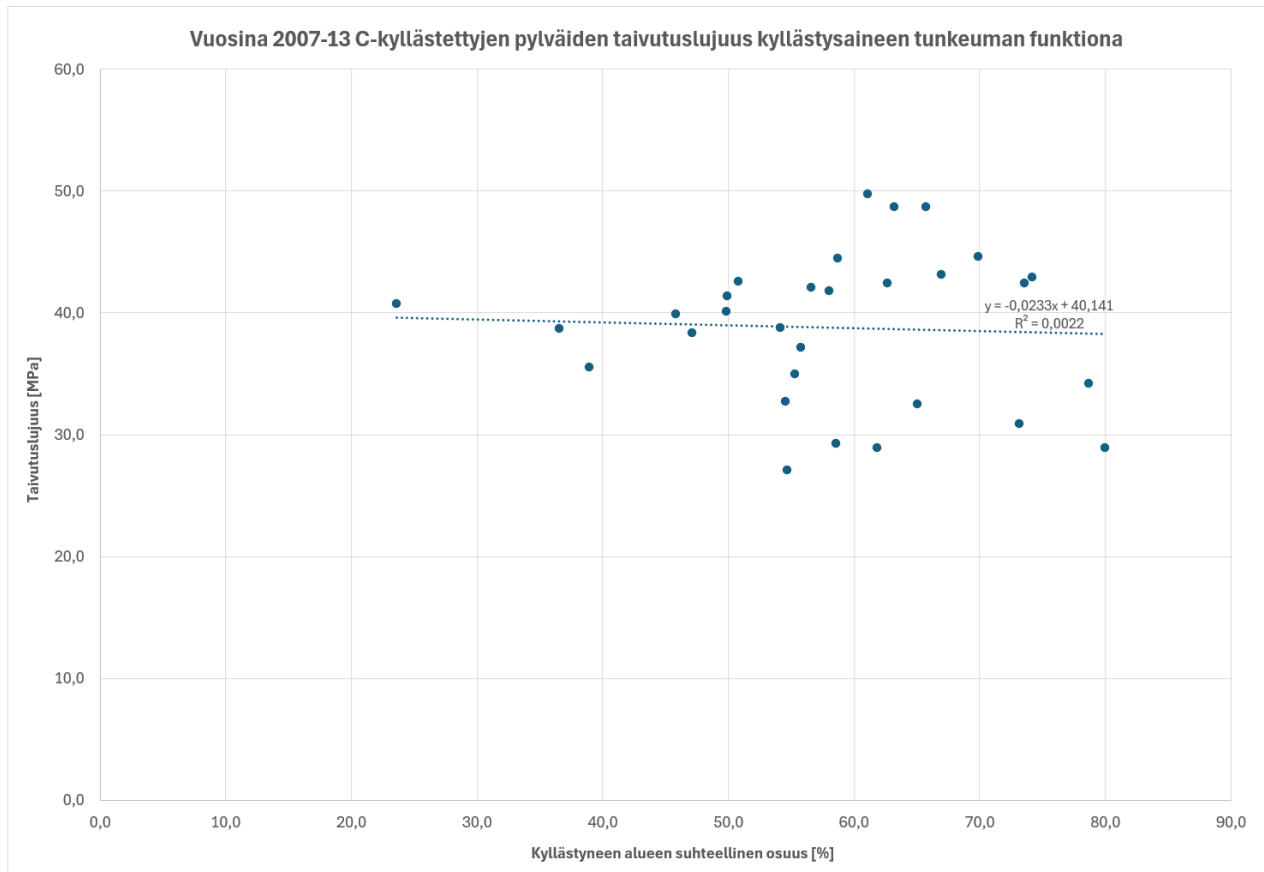
Näyttäisi siltä, että puun kosteus ei heikennä taivutuslujuutta juurikaan. Pitää muistaa, että saadun kosteudet ovat koko pylvään keskikosteus. Todennäköisesti, vaikka pintapuu ottaa kosteuden vaihtelun vastaan ilman suhteellisesta kosteudesta, sydänpuun kosteus on suurempaa. Siten pintapuu on kuivempaa kuin mitä mittaukset ovat antaneet.



Kuva 27. Vuosien 2007–2013 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään kosteuden funktiona. Kuva: Kai Möller

Kuvan 28 kuvaajassa on esitetty kyllästyneen alueen suhteellisen osuuden ja taivutuslujuuden riippuvuutta. Suhteellisella osuudella tarkoitetaan pylvään pintapuun pinta-alan suhdetta koko pylvään poikkileikkauksen pinta-alaan.

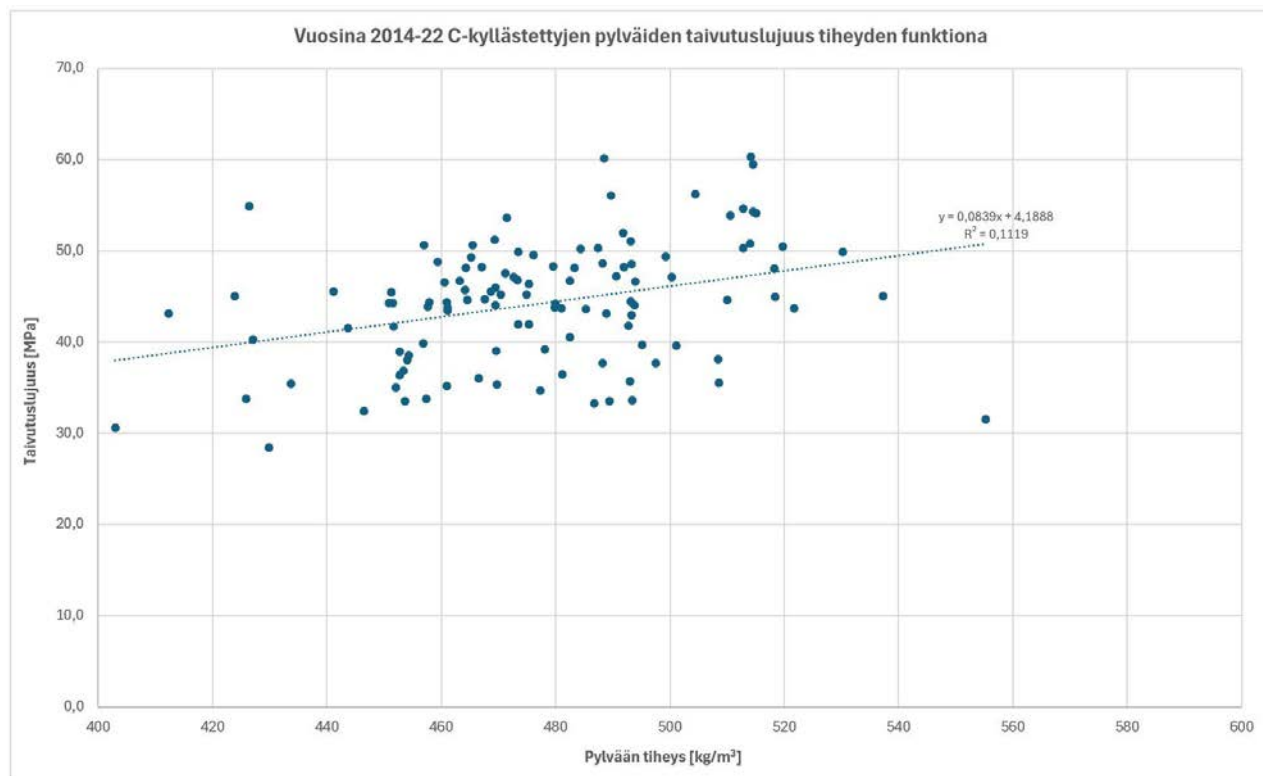
Korrelaatiota ei ole ja regressiosuoran kulmakerroin on negatiivinen. Voidaan olettaa, että hyvällä tunkeumalla lahon suojaus olisi parempi, jolloin myös taivutuslujuudet olisivat parempia ja regressiosuoran suunta olisi tällöin positiivinen.



Kuva 28. Vuosien 2007–2013 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet kyllästysaineen tunkeuman funktiona. Kuva: Kai Möller

6.3.1.2 Vuosina 2014–22 kyllästettyjen C-pylväiden tarkastelua

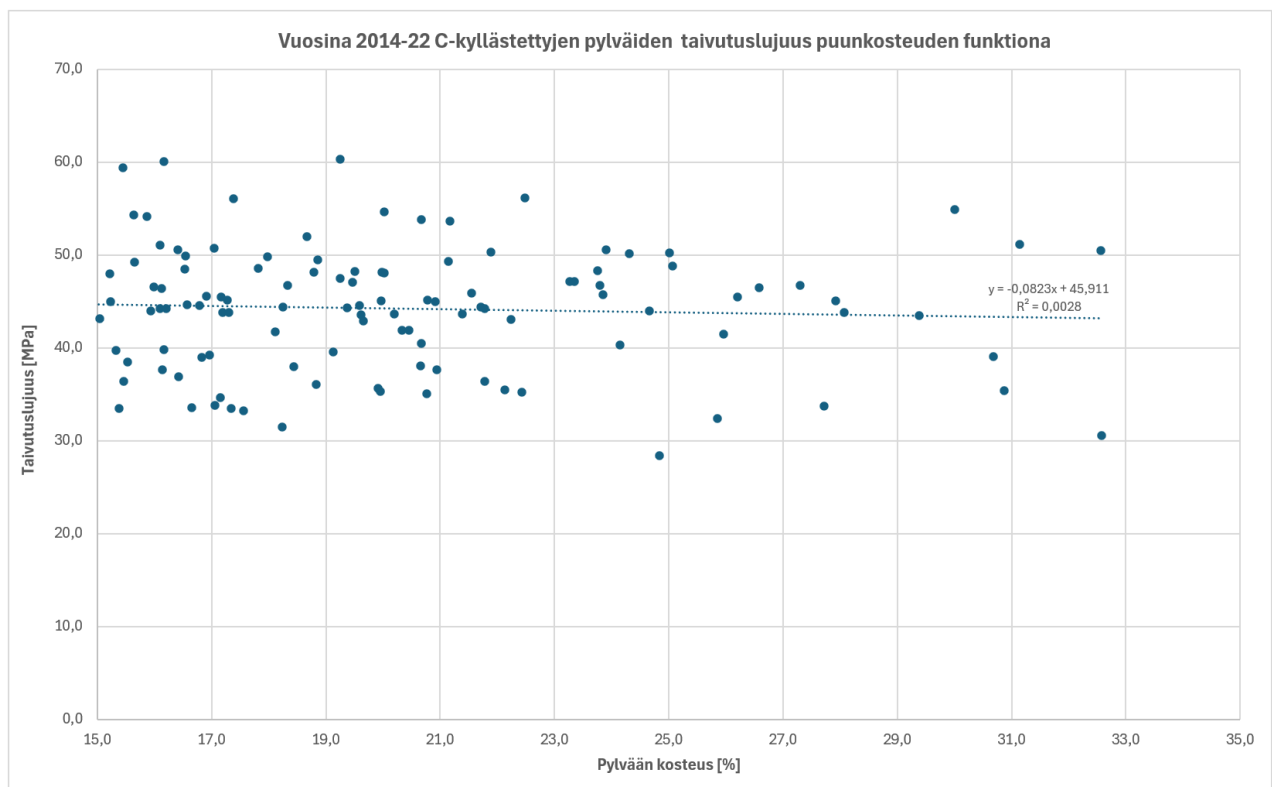
Vuosien 2014–2022 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet korreloivat kohtuullisesti pylväiden tiheyksien kanssa (kuva 29). Yhdenkään pylvään taivutuslujuus ei ole alittanut pylvään mitoitusjännitystä 27,5 MPa.



Kuva 29. Vuosien 2014–2022 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään tiheyden funktiona.
Kuva: Kai Möller

Kuvan 30 kuvaajassa pylväiden kosteuksien osalta regressiosuora kulkee oikeaan suuntaan, mutta korrelaatio on hyvin heikko. Seitsemän pylvästä on PSK:n- ja neljä sitä suuremssa kosteudessa, mutta nämä arvot eivät vaikuta regressiosuoran suuntaan juurikaan.

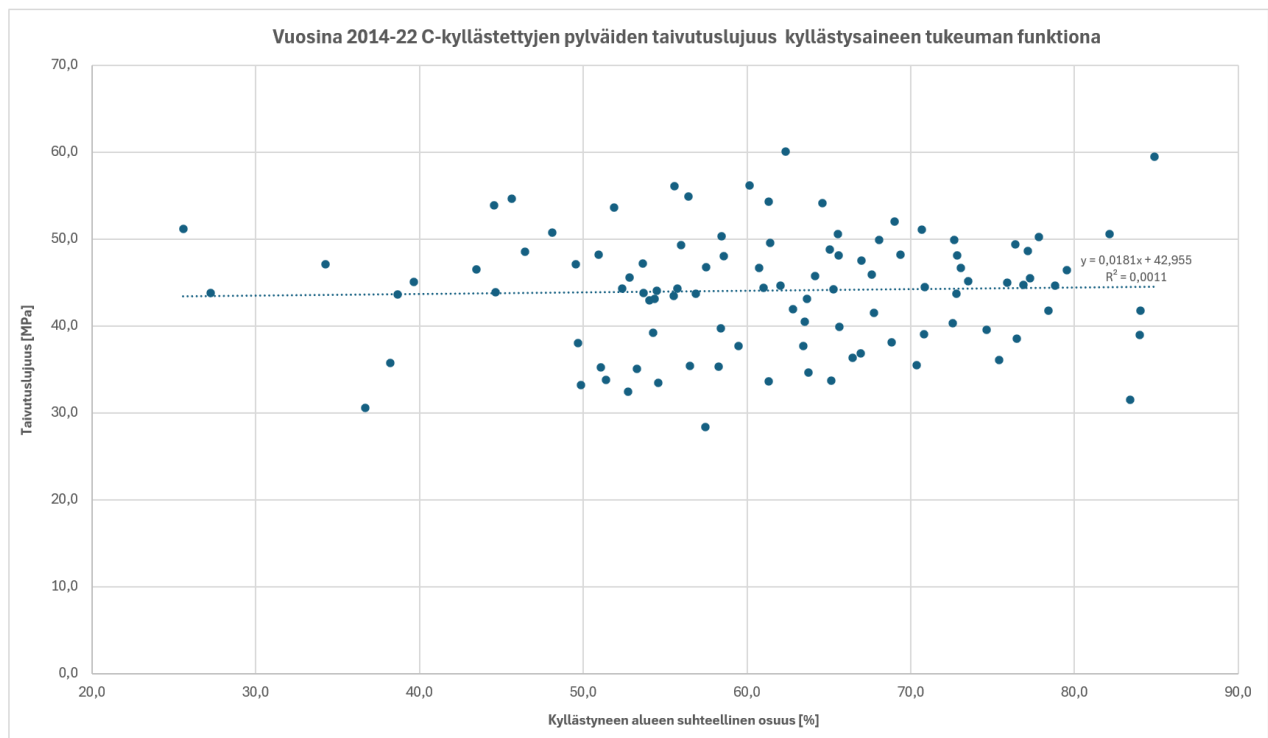
Tuloksen ja kuvaajan perusteella voi vetää johtopäätöksen, että kosteusasteissa 15–27 % puun kosteus ei juurikaan vaikuta taivutuslujuuteen massiivisella pyöreällä puulla. Samansuuntaiset tulokset ovat molemmissa C-kyllästettyjen pylväiden kyllästysvuosiryhmissä.



Kuva 30. Vuosien 2014–2022 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään kosteuden funktiona. Kuva: Kai Möller

Kuvan 31 kuvaajassa on esitetty kyllästyneen alueen suhteellisen osuuden ja taivutuslujuuden riippuvuutta. Korrelaatio on olematonta ja regressiosuoran kulmakerroin on lähes nolla. Voidaan tehdä sama olettaus kuin 20027–13 kyllästetyille C-pylväille, että hyvällä tunkeumalla lahon suojaus olisi parempi, jolloin myös taivutuslujuudet olisivat parempia ja regressiosuoran suunta olisi tällöin selkeämmin positiivinen.

Onko niin, että jos pintapuu on täysin kyllästynyt riippumatta sen suhteellisesta määrästä, lahonsieto on yhtä hyvä, riippumatta onko tunkeuma säteen suuntaisesti esimerkiksi 40 mm tai 80 mm. Tärkeintä on, että tunkeuma on koko pintapuun sisäkehällä sydänpuuhun asti. Suhteellisella määrällä tarkoitetaan pylvään pintapuun pinta-alan suhdetta koko pylvään poikkileikkauksen pinta-alaan.



Kuva 31. Vuosien 2014–2022 aikana C-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet kyllästysaineen tunkeuman funktiona. Kuva: Kai Möller

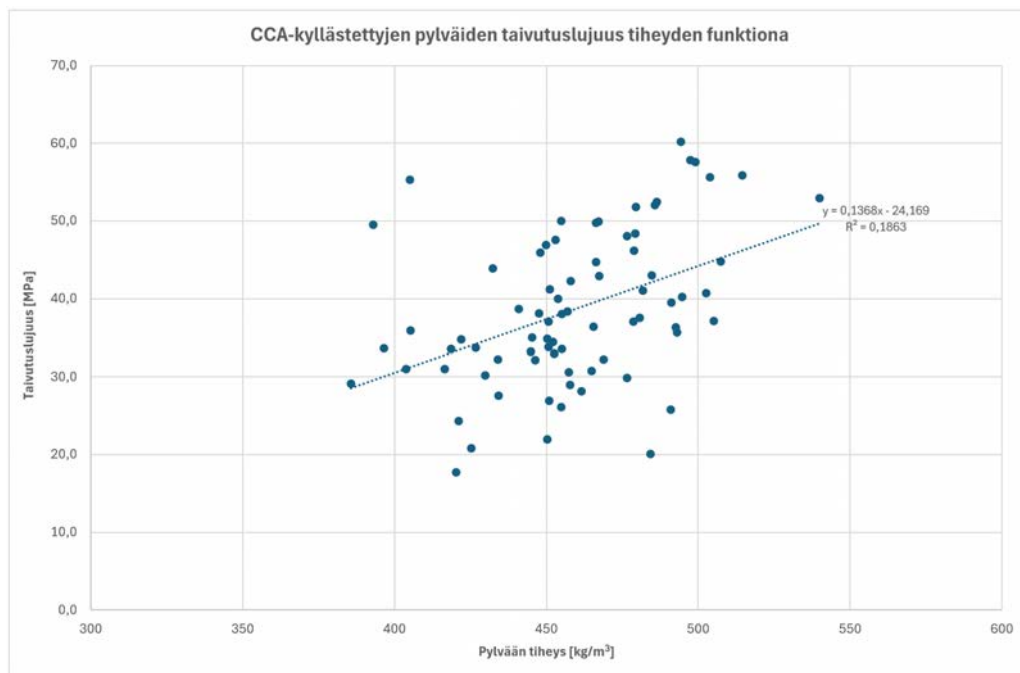
6.3.2 CCA-kyllästetyt pylväät

Testattujen CCA-pylväiden ikähaitari oli suuri vaihdellen vuosien 1959–2006 välillä (taulukko 23). Taivutuslujuudet ovat pylväiden ikään nähden kohtuullisen hyviä. Eniten pylväitä oli vuodelta 1978, 18 kpl. Taivutuslujuuden keskiarvo 33,6 MPa on tasolla, jossa pylvääseen kiipeäminen ei ole riski. CCA-pylväät kestivät keskimäärin 5 680 N kuormituksen, mikä on todella hyvä tulos vanhoille pylväille.

Taulukko 23. Eri vuosina kyllästettyjen CCA-puupylväiden avainarvoja.

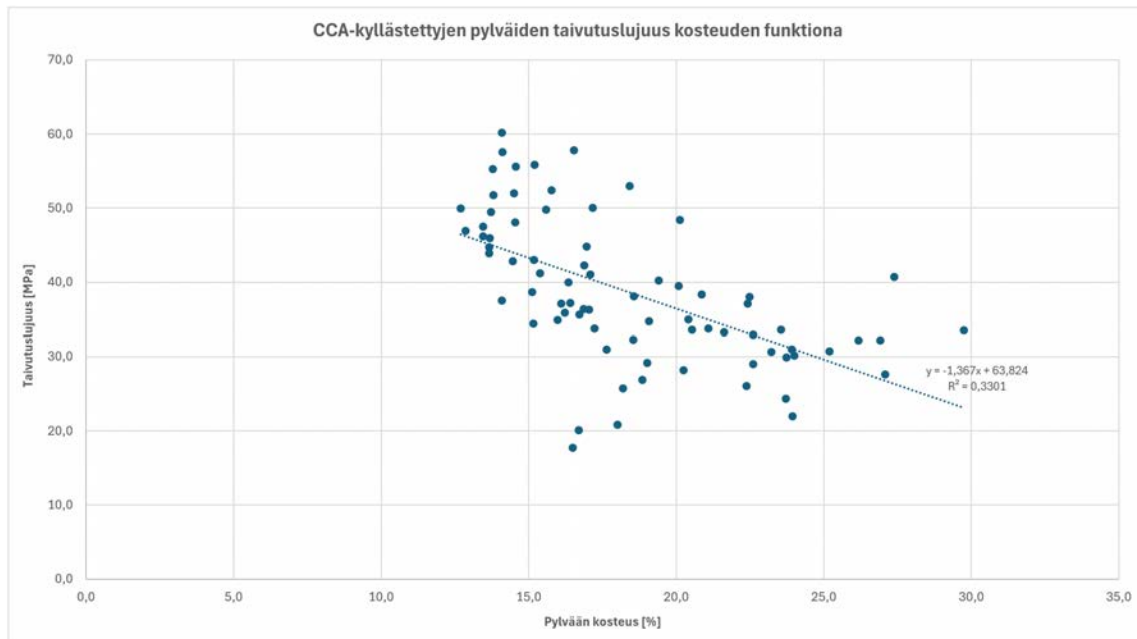
CCA impregnation year	Number of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture Content 0 %	Moisture content [%]	Annual ring width in sapwood [mm]	Knot groups [pcs]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
1959	1	65	422	19,1	1,4	0	3968	34,7
1962	2	62	451	20,0	2,6	1	3405	29,5
1964	1	60	451	18,9	2,0	0	4260	26,9
1965	1	59	451	21,1	1,5	0	3026	33,8
1966	2	58	391	21,3	1,5	0	4153	31,4
1967	1	58	467	12,7	0,9	0	3666	49,9
1973	1	52	497	16,5	1,1	0	5075	57,8
1974	2	50	473	16,7	1,4	0	5599	38,1
1975	6	49	459	19,3	1,2	0	5238	34,7
1976	6	48	442	25,8	1,1	0	4424	32,0
1977	1	47	457	20,9	1,2	0	5362	38,3
1978	18	46	457	20,5	1,2	1	5680	33,6
1980	1	45	507	17,0	1,3	0	4644	44,8
1984	2	41	483	14,2	0,9	0	4673	51,9
1985	10	40	459	14,0	1,0	0	6428	46,8
1987	3	38	446	14,0	1,0	0	5983	47,6
1988	2	36	499	23,4	1,5	0	4327	40,5
1989	3	36	453	15,9	1,1	1	5986	46,0
1990	1	35	477	14,6	0,9	0	5862	48,0
1991	3	34	454	16,4	1,3	0	7236	31,7
1992	1	32	493	16,7	1,5	0	4303	35,7
1993	1	32	425	18,0	1,6	0	6403	20,8
1995	2	30	450	18,3	0,9	0	4882	33,1
1997	1	27	482	17,1	0,8	0	8243	41,0
1998	2	27	497	14,1	1,2	0	7343	58,9
2003	1	22	450	16,0	1,3	0	4442	34,9
2006	1	18	540	18,4	0,8	0	6770	52,9
Grand Total (average)	76	43	459	18,4	1,2	3	5485	38,6
MIN		18	391	12,7	0,8		3026	21
MAX		65	540	25,8	2,6		8243	59

Kuvan 32 kuvaajassa CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet korreloivat kohtuullisen hyvin tiheyden kanssa. Regressiosuora on selvästi nouseva; tiheyden kasvaessa taivutuslujuus kasvaa, mikä tukee hyvin aiempia puutukimuksia.



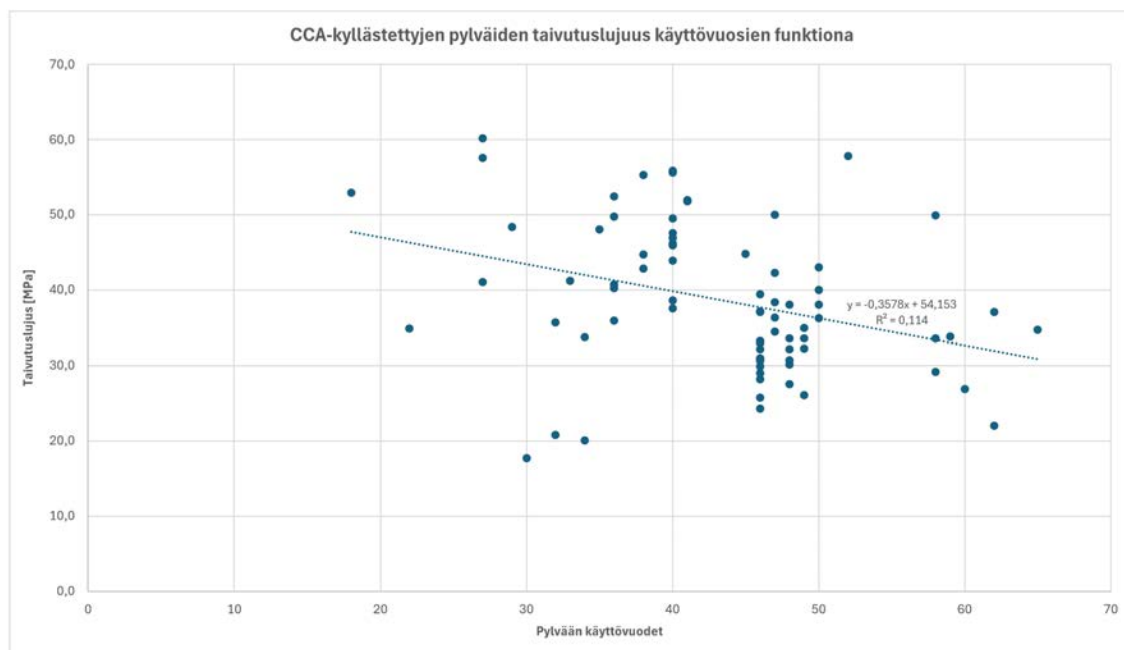
Kuva 32. Testattujen CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään tiheyden funktiona. Kuva: Kai Möller

Toisin kuin C-kyllästetyillä pylväillä, CCA-ylväät korreloivat hyvin taivutuslujuutta kosteuden funktiona (kuva 33). Korrelaatio on kohtuullisen vahva. Todella kosteita pylväitä oli vähän, vain yksi pylväs oli PSK:n kosteudessa ja sitä suuremmissa kosteuksissa ei ollut yhtään pylvästä.



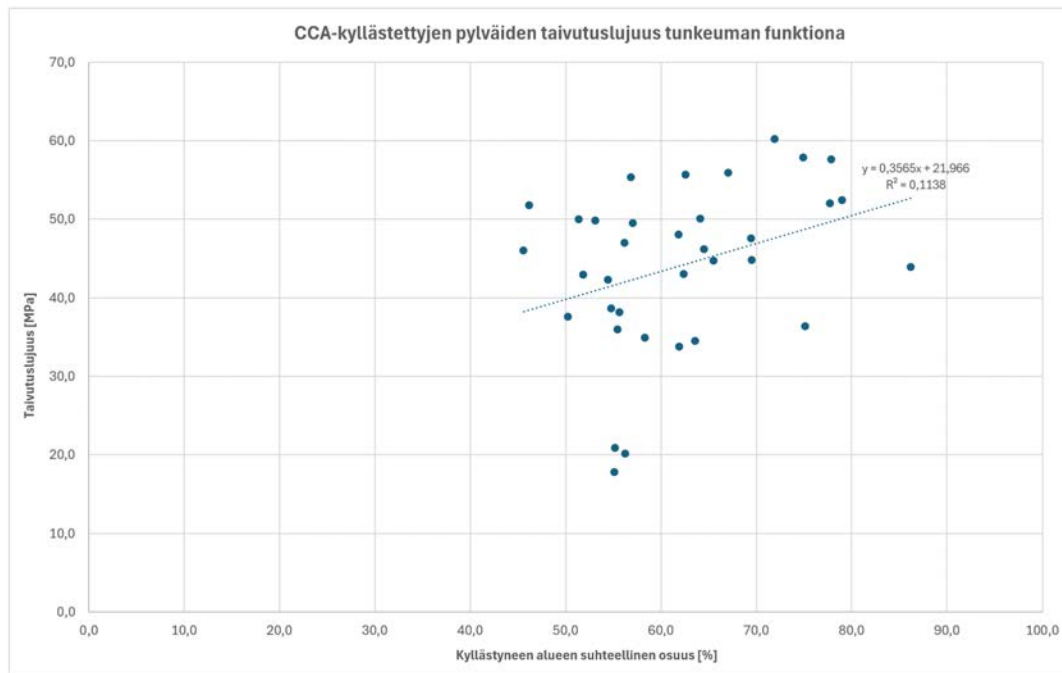
Kuva 33. CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään kosteuden funktiona. Kuva: Kai Möller
Myös CCA-ylväillä on käyttöiän suhteen havaittavissa korrelaatiota (kuva 34); 30–40 vuotta

Vanhoilla CCA-ylväillä on selkeästi paremmat taivutuslujuudet kuin 60 vuoden iässä olevilla pylväillä.



Kuva 34. Testattujen CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet käyttöiän funktiona. Kuva: Kai Möller

Korrelaatiota esiintyy myös kyllästyneen alueen suhteellisen osuuden vaikutuksesta taivutuslujuuteen, vaikkakin korrelaatio ei ole vahva (kuva 35).



Kuva 35. Testattujen CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet kyllästyneen alueen suhteellisen osuuden funktiona. Kuva: Kai Möller

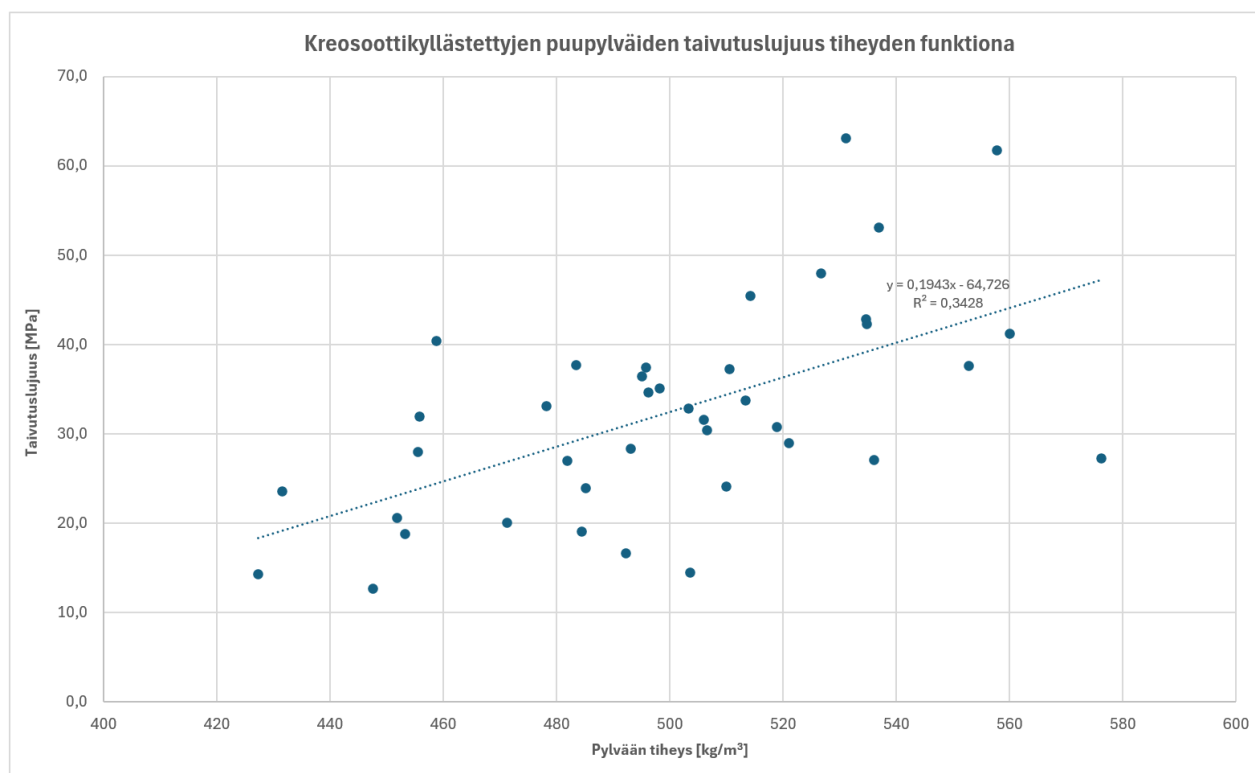
6.3.3 Kreosoottikyllästetyt pylväät

Testattujen kreosoottipylväiden ikähaitari oli suuri vaihdellen vuosien 1963–2013 välillä (taulukko 24). Taivutuslujuudet olivat kaikista kyllästysainetyypeistä huonoimmat. Eniten pylväitä oli vuodelta 1966, 21 kpl. Taivutuslujuuden keskiarvo on 32,4 MPa, joka on selkeästi vähemmän kuin muilla kyllästeryhmillä. Kreosoottipylväät kestivät keskimäärin 4 918 N kuormituksen, mikä on kohtuullinen tulos näinkin vanhoille pylväille. Vuoden 1967 pylväs laskee keskiarvoja, koska sen taivutuslujuus ja voimakesto olivat todella huonoja. Vuosien 1963–67 kreosoottipylväät olivat visuaalisesti pintahalkeilleet ja ravistuneet.

Taulukko 24. Eri vuosina kyllästettyjen kreosoottipylväiden avainarvoja.

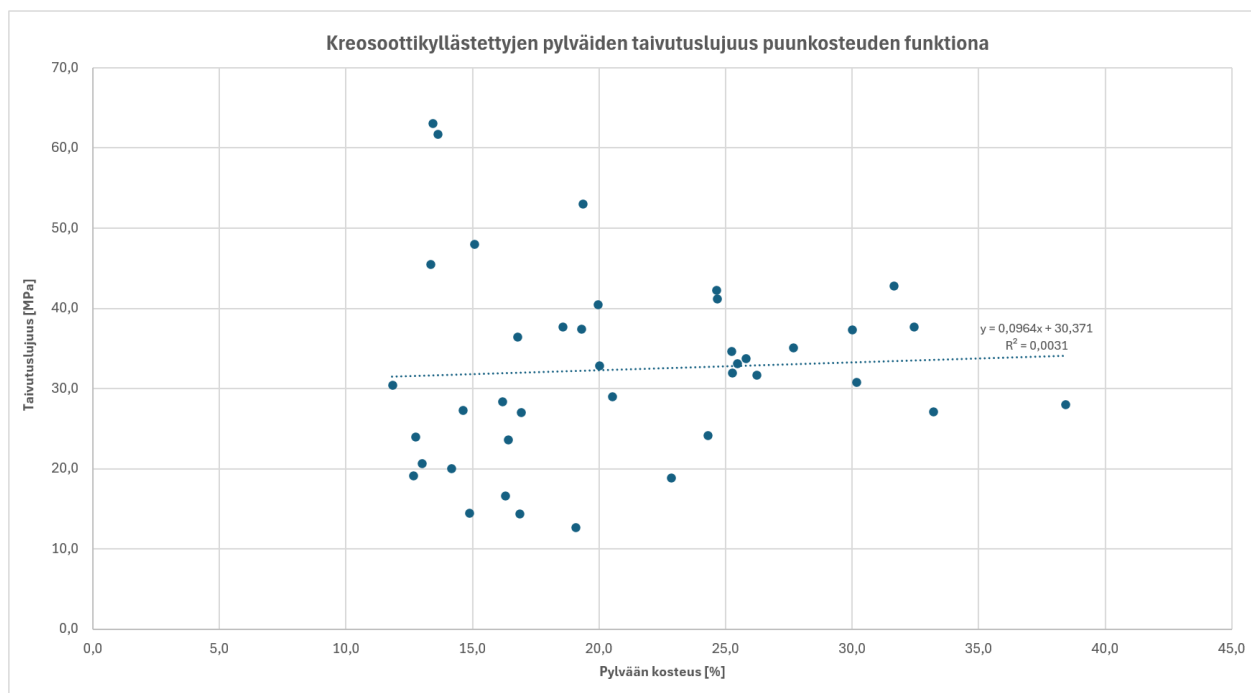
Creosote impregnation year	Numbers of poles	Years in use	Density [kg/m ³] Moisture Content 0 %	Moisture content [%]	Knot groups [pcs]	Qmaximum [N]	Bending strength [MPa]
1963	1	61	514	13,3	0	5088	45,5
1966	21	58	495	16,7	1	4154	29,5
1967	1	57	427	16,9	0	1937	14,4
2004	1	20	513	25,8	0	5402	33,8
2007	6	17	488	26,6	1	6968	32,7
2008	3	15	508	27,2	0	5184	39,0
2010	3	13	528	27,5	0	6692	39,2
2012	1	12	483	18,6	0	5163	37,8
2013	3	11	537	28,3	0	4816	38,0
Grand Total (average)	40	40	500	20,8	2	4918	32,4
MIN		11	427	13,3		1937	14
MAX		61	537	28,3		6968	45

Kreosoottipylväiden taivutuslujuudet korreloivat hyvin tiheyksien kanssa (kuva 36).



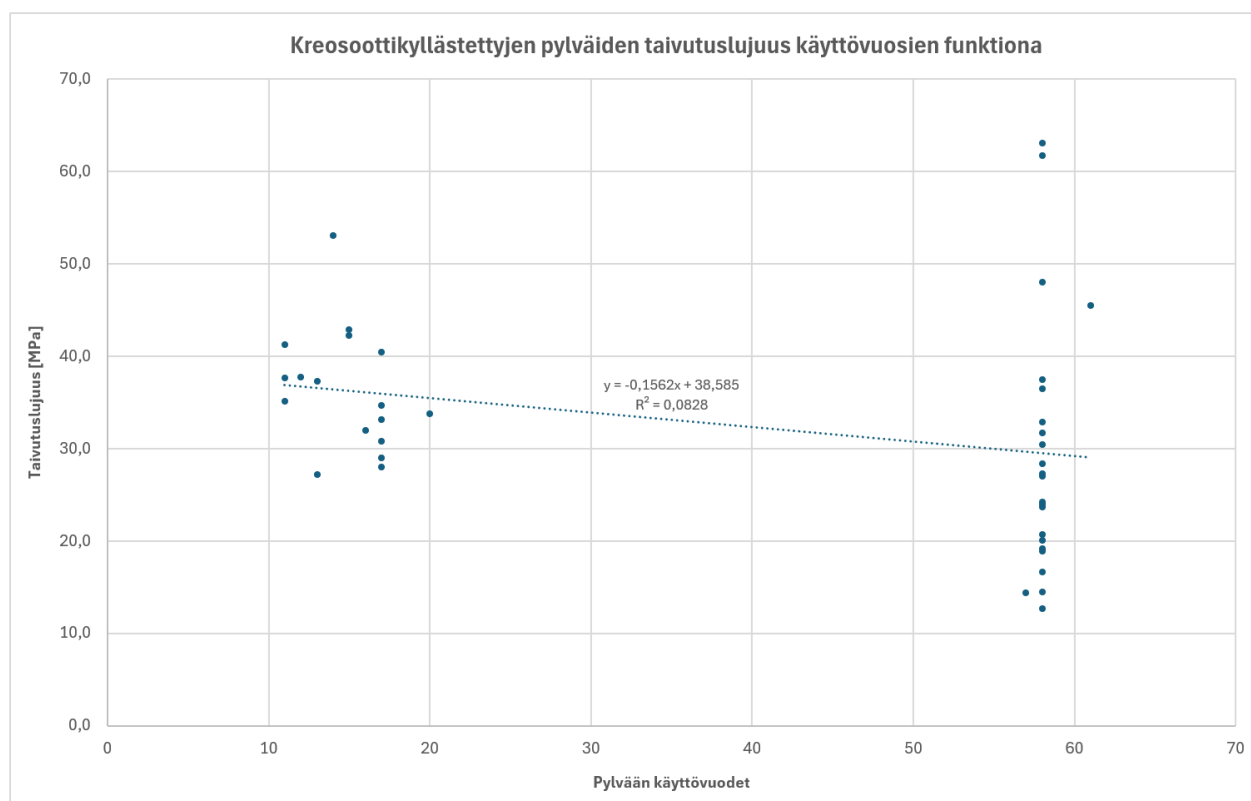
Kuva 36. Kreosoottikyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet tiheyden funktiona. Kuva: Kai Möller

Kreosoottipylväillä ei ole havaittavissa kosteuden ja taivutuslujuuden välistä korrelaatiota (kuva 37). Kosteusasteilla 12–15 % taivutuslujuuden hajonta oli suurta.



Kuva 37. CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet pylvään kosteuden funktiona. Kuva: Kai Möller

Kreosoottipylväiden käyttöikä jakautuu kuvan 38 kuvaajassa kahteen ryhmään, 1960-luvun ja 2000-luvun pylväitä. Lisäksi vuoden 1966 pylväitä on suhteellisesti paljon, joissa on lisäksi suuri taivutuslujuuden hajonta. Seurauksena on heikko korrelaatio.



Kuva 38. Testattujen CCA-kyllästettyjen pylväiden taivutuslujuudet käyttöiän funktiona. Kuva: Kai Möller

7 TÄRKEIMPIÄ PYLVÄÄSEEN VAIKUTTAVIA VOIMIA

Pylväiden kuormana, jotka aiheuttavat pylvääseen jännityksiä, pidetään kaikkea muuta kuin itse pylvästä. Voimaresultantti sisältää pylvääseen kiinnitettyjen orsirakenteiden- ja johtimien painon, tuulen aiheuttaman johtimen värähtelyn, sekä jääkuorman. Näiden lisäksi huomioidaan ilmastolliset muutokset, joiden vuoksi lämpötilaero voi olla merkittävä tekijä johtimien mitoituksessa. Pylvään pituudessa huomioidaan maa-aines ja sen mukaisesti upotussyvyys.

7.1 Pylvääseen vaikuttavia voimia

7.1.1 Pylvääseen kiinnitettyt ulokkeet

Lisäävät jään- ja tuulen aiheuttamaa taivutus- sekä puristuskuormitusta painon ja pinta-alan kasvaessa. Mahdolliset harukset kasvattavat myös pylvään puristuskuormaa kulmapylväillä ja päätepylväillä.

7.1.2 Johtimien köysivoimat

Etenkin painavilla Amka-johtimilla köysivoimat ovat merkittäviä. Lisäksi johtimien pituus muuttuu lämpötilan mukaan kasvattaen tai vähentäen vetokuormitusta ja riippuen johdinvälin sekä johtimen pituuden symmetrisyydestä.

7.1.3 Tuulivaikutus

Puuskatuulet ovat lisääntyneet ilmastovaikutuksen myötä, mikä lisää erityisesti vaakasuuntaista taivutusta. Tuulen vaikutus korostuu pidemmillä pylväillä ja paksummilla johtimilla sekä useamman johtimen linjoilla.

7.1.4 Jää ja lumi

Jään ja lumen kerääntyessä johtimiin ja pylvääseen, paino ja tuulipinta-ala kasvavat voimakkaasti lisäten puristus- ja taivutuskuormitusta.

7.1.5 Asentajan ja asennuksen aiheuttamat voimat

Varusteet ja huoltohenkilö voivat yhdessä painaa 150 kg eli voimavaikutus on noin 1 500 N. Lisäksi vaikuttaa johtimen kiinnityksen aikainen taivutuskuormitus.

7.1.6 Johtimen katkeaminen

Hetkellisesti suuri kuormitus. Katkeamisen jälkeen jännityksissä, koska toisella puolella on vetoa ja toinen puoli ei ota sitä vastaan.

7.2 Mitoituslujuus ja -jännitys

Standardi määrittää suomalaiselle männystä valmistetulle pylväälle ominaislujuuden f_k arvoksi 41,8 MPa. Arvo perustuu siihen, että vain 5 % pylväistä on heikompia kuin käytetty mitoitusarvo. Männyn taivutuslujuus vaihtelee 45–70 MPa välillä ollen keskimäärin 50 MPa.

Puupylvään osavarmuusluku $\gamma_M = 1,40$ tavalliselle lyhytaikaiselle kuormitustilanteelle (kuten tuuli ja jää). Osavarmuusluvun avulla varmistetaan, että materiaalin lujuusarvot otetaan huomioon riittävällä varmuudella. Se huomioi epävarmuudet kuten materiaalin valmistuksen ja asennuksen vaihtelut, laskennalliset epätarkkuudet ja materiaalin todellisen käyttäytymisen erot suhteessa testattuihin arvoihin.

Puupylvään **mitoituslujuus** f_d määritetään jakamalla ominaislujuus osavarmuusluvulla:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} = \frac{41,8 \text{ MPa}}{1,40} \approx 29,9 \text{ MPa}$$

Kun tämä vielä kerrotaan pienennyskertoimella 0,92 (SFS-EN 50341-2-7, 28), koska pylvään voimakas lahoaminen alkaa vasta elinkaaren loppupäässä, saadaan

$$0,92 \times 29,9 \text{ MPa} = 27,5 \text{ MPa}, \text{ jota voidaan käyttää pylvään mitoituslujuutena.}$$

Tämä on taivutuslujuuden raja-arvo, jolloin C-kyllästettyjä pylväitä tulee tarkastaa säännöllisesti. Käytännön tasolla ko. arvolle tulee määrittää pylväsluokan mukainen likimääräinen lahoamishalkaisija, joka vastaa ko. arvoa.

Mitoitusjännitys σ_d on puupylvääseen todellisuudessa syntyvä jännitys, kun siihen vaikuttavat mitoituskuormat (ks. kuva 42). Mitoitusjännitys ei saa ylittää mitoituslujuutta:

$$\sigma_d \leq f_d$$

Asia voidaan tiivistää näin: *mitoituslujuus kertoo, mitä materiaali saa kestää – mitoitusjännitys kertoo, mitä se joutuu kestäämään.*

8 ERI PYLVÄSLUOKKIEN JÄNNITYSKUVAAJAT ERI LAHOAMISASTEILLA

Tarkoitus antaa työkaluja, jolla voi arvioida pylvään kuntoa. Joka tapauksessa käytti mitä menetelmää tahansa, tarve koputtelulle ja maanpinnan tason halkaisijan arviointi säilyvät.

Jos C-tylväiden käyttöikää maksimoidaan, se vaatii puupylväiden osalta nykyistä laadukkaamman ja kontrolloidumman lahotarkastuksen ja -seurannan, sillä käyttöikä riippuu suoraan puupylvään lahoamisvarasta.

8.1 Lahoisuusasteluokitus

Lahonnutta pylvästä pidetään käyttökelpoisena, kunnes se on saavuttanut lahoisuusasteen 4, jolloin lahoa puuta on ympäri pylvään yli 20 mm (Puupylvään kunnossapidon ja uusimisen perusteita s. 26 v. 1982) eli terve läpimitta on pienentynyt yli 40 mm.

Taulukossa 25 on esitetty pylvään kuntokuvaus ja lahoamisaste, jolla lahoamisluokka saavutetaan. Huomioitavaa on, että luokitus voi olla sopiva tietyille pylväsluokille, mutta ei kaikille. Jos lahoisuusaste on 3 eli lahoa on maksimissaan 40 mm halkaisijasta, on eri asia, onko kyseessä luokan 211 vaiko luokan 411 pylväs. Luokassa 211 maanpinnan tason alkuhalkaisija on 215 mm ja luokassa 411 se on jo 250 mm. Jos 411-luokan pylväs lahoaa 40 mm halkaisijastaan, jäljellä on 210 mm eli lähes sama kuin 211-luokan pylvään halkaisija ennen asennusta. Toisaalta 411-luokan pylväs on todennäköisesti asennettu vaativampaan kohteeseen kuin 211-luokan pylväs.

Taulukko 25. Puupylväiden yleinen lahoisuusluokittelu.

Luokka	Kuntokuvaus	Visuaalinen tunnusmerkki
0	Terve	Pinta terve ja kirkas
1	Alkava laho	Pehmennyt puu pylvään ympäri, ≤ 2 mm
2	Näkyvä laho	Lahoa puuta pylvään ympäri 2–10 mm tai vastaava muotoinen lahovaurio
3	Melkoista lahoa	Lahoa puuta pylvään ympäri 10–20 mm tai vastaava lahovaurio
4	Pahoin lahonnut	Lahoa puuta pylvään ympäri > 20 mm tai vastaava lahovaurio

Lisäksi taulukko ei huomioi mitenkään sitä tosiseikkaa, että jos pylväässä on esimerkiksi 20 mm lahoa ympäri pylvään, siitä syvemmälle siirryttäessä puuaines on muuttunut, jolloin sen lujuus on heikentynyt. Eräillä lahottajilla lahon vaikutuksesta puun rakennemolekyyleissä, selluloosassa tapahtuu hajoamisreaktioita, vaikka soluissa ei tapahdu selvästi silmin havaittavia muutoksia.

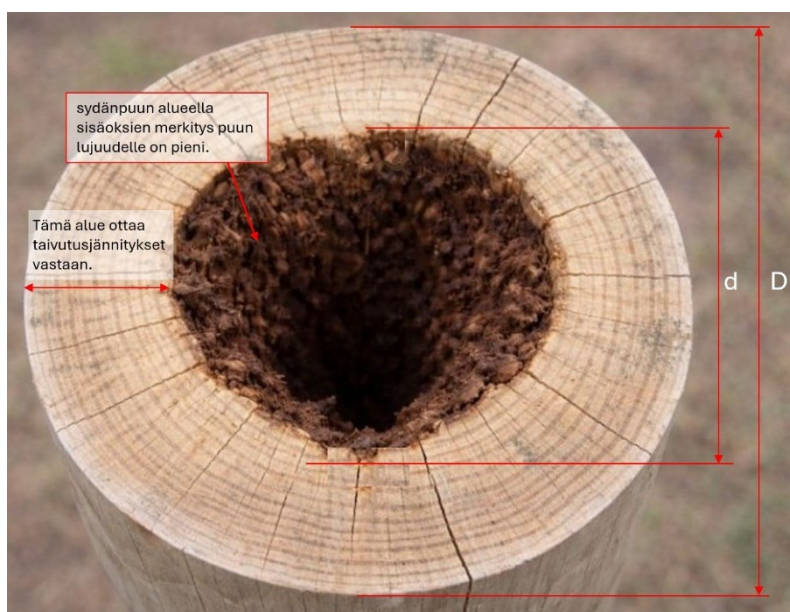
8.2 Lahon merkitys pylvään jännitysten kestoon

8.2.1 Sisälaho

Sisälaho on ongelmallinen, koska pylväs, joka näyttää hyvältä voi olla sisältä täysin laho. Nyt tullaan olennaiseen asiaan sisälahon suhteen; onko sisälaho pintapuussa vaiko sydänpuussa. Laho leviää puun sisällä, mutta hyvin kyllästynyt pintapuun alue pystyy vastustamaan lahon leviämistä aikansa.

Seuraavissa kuvissa 39–41 on esitetty, miten vähän sydänlahon pylvään lujuus heikkenee, vaikka laho on syönyt pylvään halkaisijasta 100 mm. Ero lahoamattoman ja lahonneen pylvään lujuudessa on pieni.

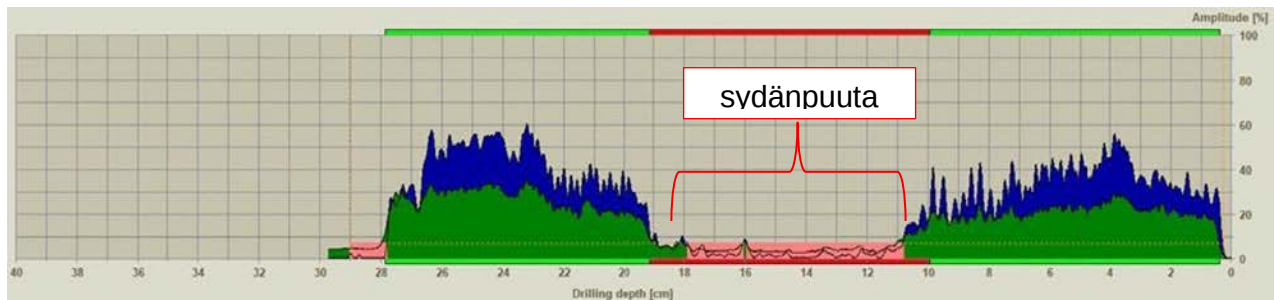
Lujuusopin mukaisesti pyöreän, kiinteän kappaleen suurimmat jännitykset kohdistuvat taivutuskuormituksessa kappaleen ulkopinnalle ja jännitykset pienenevät siirryttäessä ydintä kohti. Kuvassa 39 on pylväs, joka voidaan sydänlahon määrästä tulkita ontoksi. Kuvan kirjainsymbolit viittaavat laskentoihin jäljempänä.



Kuva 39. Sydänpuustaan lahonnut pylväs on muuttunut käytännössä ontoksi lieriöksi. Kuva: Kai Möller

Kuvan 41 esimerkissä lasketaan sisälahon vaikutus yleisimpään 211-luokan pylvääseen. Pylvään sydänpuusta on lahonnut 100 mm. Puun runko on kartiokas ja sydänpuu noudattelee pintapuuta eli suhteellinen pintapuun määrä pysyy vakiona koko pylvään pituudelta.

Jos esimerkiksi mikroporaus antaa pylväälle kuvan 40 mukaisen tuloksen, eli laho sijaitsee pylvään sydänpuussa, pylväs on vielä teoreettisesti käyttökelpoinen edellyttäen, että sen pintapuuta on hyvässä kunnossa.



Kuva 40. Kuvitellaan, että kuvaajassa keskellä punaisella olevan sisälahon pituus on 100 mm. Kuva: Kai Möller ja Wodeca

Kuvan 41 laskelmasta voidaan havaita, että sydänlahon vaikutus pylvään jännitysten kestoon on todella pieni. Laskennassa ei ole huomioitu sisäoksia, koska niiden vaikutus sydänpuussa on vähäinen. Lisäksi oletetaan, että pylvään vaippa on kohtuullisen ehjä ja siinä ei ole vaurioita.

LUOKAN 211 PYLVÄS, JOSSA EI OLE LAHOA

Pylvään mitta maanpinnan yläpuolella L	9 500 mm
Umpinainen (ei sisälahoa)	
$W = \frac{\pi D^3}{32}$	
D	215 mm
d	0 mm
W_z	975 698 mm ³
Tuulen resultanttikuorman etäisyys L/2	4 750 mm
Vaakasuuntainen resulttivoima tuulesta F	1 500 N
Muut kuormat, resultanttikuorman etäisyys L	6 000 mm
Muut kuormat, resultanttikuorma F	800 N
Tavutusmomentti M_t	11 925 000 Nmm
Taivutusjännitys σ_b	12,2 N/mm²

211-PYLVÄÄSSÄ SISÄLAHO SYDÄNPUUSSA

Pylvään mitta maanpinnan yläpuolella L	9 500 mm
Ontto (sydänlahoa)	
$W = \frac{\pi \times (D^4 - d^4)}{32 \times D}$	
D	215 mm
d on lahonneen ympyrämäisen alueen halkaisija	100 mm
W_z	930 035 mm ³
Tuulen resultanttikuorman etäisyys L/2	4 750 mm
Vaakasuuntainen resulttivoima tuulesta F	1 500 N
Muut kuormat, resultanttikuorman etäisyys L	6 000 mm
Muut kuormat, resultanttikuorma F	800 N
Tavutusmomentti M_t	11 925 000 Nmm
Taivutusjännitys σ_b	12,8 N/mm²

Vaikka sydänpuusta ja halkaisijasta on lahonnut 100 mm, pintapuuta ottaa taivutusjännityksen vastaan. Ero lahoamattoman- ja sydänlahon pylvään välillä on vain 0,6 N/mm²

Kuva 41. Kuvassa lahoamattoman ja sisälahoa sisältävän pylvään laskelmat taivutusvastuksesta (W) maksimi taivutusjännityksiin (σ_b), jotka ne kestävät. Kuva: Kai Möller ja Aapo Nylén

Suurissa pylväsluokissa pylväät, joissa maanpinnan tason halkaisija on iso, voivat kestää vaaditun taivutusjännityksen, vaikka pylvään sisäosa olisi lähes lahonnut.

Edellisen esimerkin valossa mikroporan antama informaatio, vaikka se ei anna suoranaista lujuusarvoja, on merkittävä.

8.2.2 Pintalahjo

Pintalahjo on ongelmallisempi kuin sisälahjo, sillä se heikentää merkittävästi pylvään taivutusjännityksiä jo vähäisellä lahoamisella.

Lähestytään ongelmaa esimerkin kautta kuten sydänlahonkin osalta. Seuraavassa esimerkissä olevat arvot ovat todellisia ja liittyvät Anttolan loppusyksyn lahopylväisiin. pylväisiin vaikuttavat voimat (punaiset voimavektorit) ovat kuvitteellisia ja vain arvioita.

Molemmissa tapauksissa pylvääseen voi samanaikaisesti vaikuttaa pysyvän kuorman lisäksi kaikki muuttuvat kuormat kuten jää, lumi ja tuuli sekä lisäksi tilapäinen kuorma, esim. huoltohenkilö varusteineen. Myös johtimen katkeaminen on mahdollista, joka voi aiheuttaa noin 1 000 N kuormituksen.

Pylväiden pysyvänä kuormana pidetään kaikkea muuta kuin itse pylvästä. Se sisältää pylvääseen kiinnitettyjen orsirakenteiden- ja johtimien painon, tuulen aiheuttaman johtimen värähtelyn, sekä jää- ja lumikuorman. Näiden lisäksi huomioidaan ilmastolliset muutokset, joiden vuoksi lämpötilaero voi olla merkittävä tekijä johtimien mitoituksessa. Pylvään pituudessa huomioidaan maa-aines ja sen mukaisesti upotussyvyys.

Kun kaikki edellä luetellut kuormitukset huomioidaan, taivutusvoimavaikutus on noin 2 300 N, joka kohdistuu johtimen kiinnityskohtaan ja momenttivarren (pylväs) kautta maanpinnan tason alueelle. Puupylvään halkaisijan pienenemisellä lahon seurauksena on siis merkittävä vaikutus siihen, mitä voimia se kestää tietyllä lahoamisvaikutuksen hetkellä.

Pylvään mitoituslujuus f_d on 27,5 MPa (41,8 MPa/1,40 x 0,92), joka sisältää muuttuvat kuormat kuten jää + lumi + tuuli ja pysyvät kuormat kuten pylväs itse, orret, kiinnikkeet, muuntajakaapit yms. (laskenta, ks. SFS-käsikirja 601:2018 sivu 236 ja SFS-EN 50341-2-7 sivu 28). Mitoitusjännitys on se arvo, joka indikoi, että pylväs lähenee hetkeä, jolloin siihen tulee kiinnittää ensimmäinen keltainen nauha.

TÄRKEÄÄ: Taivutuslujuuden arvoa ei pidä sekoittaa voimaan. Taivutuslujuus kuvaa pylvään jännityksen kestoa, ei siitä minkä kuorman se todellisuudessa kestä! Jännitysten kesto voidaan vastaavasti laskea taivutuslujuudesta.

Kuva 42: pylvään "209" halkaisija on 201 mm ja sen taivutuslujuudeksi mitattiin 38,0 MPa. Arvo vastasi taivutuslaitteiston vinssin voima-anturissa 4 195 N vetovoimaa, joka kilogrammoiksi muutettuna vastaisi 428 kg kohtisuoraa vetoa pylvääseen nähden. Vastaavasti pylvään "213" halkaisija oli huomattavasti isompi, 251 mm ja sen taivutuslujuudeksi mitattiin 35,4 MPa. Arvo vastasi 5 616 N vetovoimaa, joka kilogrammoina vastaisi 572 kg kohtisuoraa vetoa eli se on kestänyt kuormitusta lähes 150 kg enemmän kuin pylväs "209".

Kuitenkin pylvään "213" taivutuslujuus on 2,6 MPa pienempi kuin pylvään "209", miksi? Taivutuslujuus tarkoittaa millaisen voiman puuaines kestää pinta-alayksikköä kohti. Jos laho tuhoaa pylvään halkaisijaa, pylvään poikkipinta-ala pienenee. Näin on käynyt pylväälle "213", se on yksinkertaisesti lahonnut enemmän kuin pylväs "209" ja sen taivutuslujuus on siksi heikentynyt.

Pylväsluokka 209

$f_m = 38,0 \text{ MPa}$

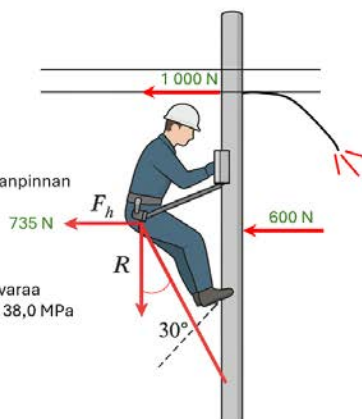
$Q_{\max} = 4\,195 \text{ N}$

Tiheys = 531 kg/m³

$u_{\text{koetus}} = 17,1 \%$

Mitattu pylvään halkaisija maanpinnan tasossa 201 mm.

Tässä pylväessä on lahoamisvaraa pylvään mitoitusjännitykseen 38,0 MPa – 27,5 MPa = 10,5 MPa.



Pylväsluokka 213

$f_m = 35,4 \text{ MPa}$

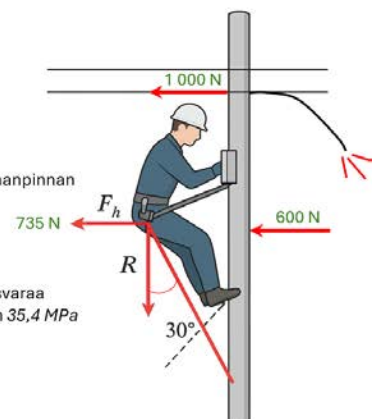
$Q_{\max} = 5\,616 \text{ N}$

Tiheys = 551 kg/m³

$u_{\text{koetus}} = 17,2 \%$

Mitattu pylvään halkaisija maanpinnan tasossa 251 mm.

Tässä pylväessä on lahoamisvaraa pylvään mitoitusjännitykseen 35,4 MPa – 27,5 MPa = 7,9 MPa.



Kuva 42. Kahden erikokoisen pylvään vertailua. Kuvaan lisätty vihreällä fontilla myös muita pylvääseen hetkellisesti vaikuttavia esimerkkivoimia (tuuli, asentaja varusteineen, johtimen katkeaminen). Kuva: Kai Möller ja ChatGPT

Molemmissa pylväissä oli likipitään sama puun tiheys ja -kosteus. Oksilla ja oksaryhmillä ei ollut vaikutusta tuloksiin, koska niitä ei ollut kummankaan pylvään murtokohdan lähellä. Tämän vertailun pylväät olivat lähes oksattomia. Puuaineeksen ominaisuuksien vaikutus saatuihin tuloksiin oli siis vähäinen.

Ainoa visuaalisesti havaittu tekijä on, että 213-luokan pylväessä oli enemmän lahoa maanpinnan tasossa kuin 209-luokan pylväessä, jonka seurauksena 213-luokan pylvään maanpinnan tason halkaisija on pienentynyt enemmän kuin 209-luokan pylväessä. Myös puuaineeksen muutokset, vaikka puuaines näytti kiinteältä, ovat lahon seurauksena 213-

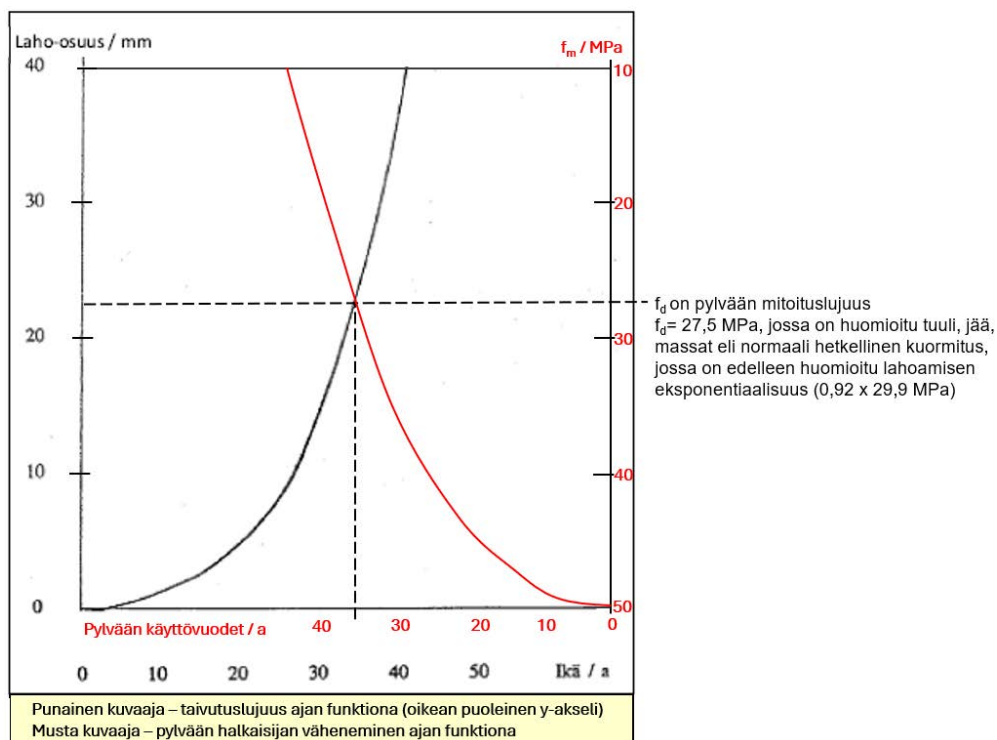
pylväessä todennäköisesti suuremmat. Voidaankin vetää johtopäätös, että 213-luokan pylvään huonompaan taivutuslujuuteen on vaikuttanut suurempi lahon määrä heikentäen puun vastustuskykyä taivutusjännityksiä vastaan.

8.3 Lahoamiskäyrät

Kuvassa 43 on esitetty teoreettinen kuvaaja, jossa pylvään taivutuslujuus heikkenee eksponentiaalisesti (punainen fontti) sen käyttövuosien funktiona. Samanaikaisesti pylvään iän kasvaessa myös sen lahon määrä kasvaa käyttöiän loppua kohden eksponentiaalisesti.

Kohta, jossa lahon leviäminen on nopeutunut ja taivutuslujuuden heikkeneminen on kasvamassa nopeutetusti, löytyy piste $f(f_d) = a_{fd}$ eli mitoituslujuus f_d saavutetaan käyttövuosien a_{fd} funktiona. Kuvan esimerkissä 35 käyttövuoden jälkeen pylvään taivutuslujuus ($f > f_k$) on pienentynyt arvoon 27,5 MPa, joka vastaa pylvään mitoituslujuutta. Pylvään taivutuslujuus asennushetkellä on suurella todennäköisyydellä ollut suurempi (männyllä f on 45–70 MPa) kuin puupylvään ominaislujuuden f_k arvo 41,8 MPa.

Taivutuslujuuden arvon pieneneminen johtuu siitä, että laho on syönyt pylvään pintapuun halkaisijaa vaikuttaen myös kiinteältä näyttävän puuaineksen rakenteeseen heikentävästi.



Kuva 43. Teoreettinen kuvaaja lahon määrän, käyttöiän ja taivutuslujuuden arvojen keskinäisistä riippuvuuksista. Kuva: Kai Möller

8.4 Edellisten perusteella johdettu esimerkkikuvaaja

Kuvassa 44 on esitetty kuvaaja, joka on likimääräinen, mutta suuntaa antava. Kuvaajassa on esitetty tyypillisen pylväsluokan 211 lujuuden heikkeneminen lahoamisen seurauksena.

Kuvaajaan on pylvään kestävyyyden havainnollistamiseksi esitetty pylvään lujuutta kuvaava voima sekä newtoneina että kilogrammoina, koska se on ehkä maanläheisempi kuin taivutuslujuus, joka kuvaa enemmänkin pylvään laatua.

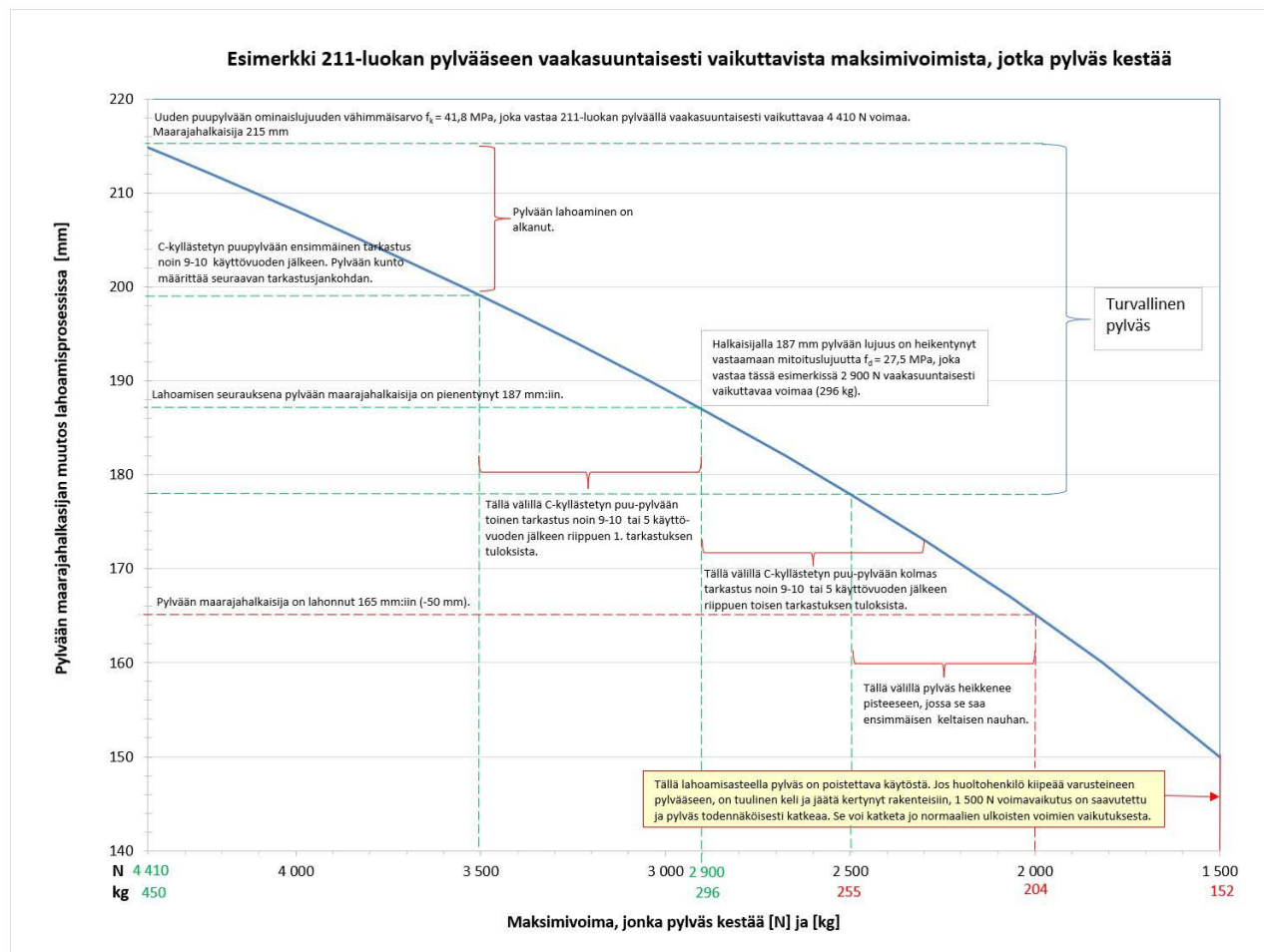
Taivutuslujuuden avulla eri kokoluokkien pylväät voidaan asettaa vastaamaan yhtenevää arvoa, riippumatta pylväiden tyven tai maanpinnan tason halkaisijasta. Esimerkiksi luokan 211 pylväs (maanpinnan tason halkaisija 215 mm) kestää tietyn vaakasuuntaisen voiman, jolle lasketaan voimaa vastaavan taivutuslujuuden arvo ja kääntäen. Sama voidaan tehdä esimerkiksi luokan 312 pylväälle, joka on huomattavasti järeämpi kuin luokan 211 pylväs. Jos mitataan vaakasuuntaista voimaa, luonnollisesti 312-luokan pylväs (maanpinnan tason halkaisija 230 mm) kestää sitä enemmän, mutta silti niiden taivutuslujuudet voivat olla samat.

Kuvaajaan on sijoitettu sen elinkaaren tärkeitä pisteitä: ensimmäinen tarkastus, mitoitusjännityksen saavuttaminen (vaikea mitata) ja elinkaaren lopun tarkkailu. Voima-akselilla on ko. pisteitä vastaavat voimat (N), jotka pylväs maksimissan kestää ja ne on muutettu kilogrammoiksi helpottamaan voimien hahmottamista.

Tässä esimerkissä 187 mm halkaisijaan lahonnut puupylväs kestää noin 2 900 N maksimivaakavoiman mikä vastaa puupylvään mitoitusjännitystä. Pylvääseen voi samanaikaisesti vaikuttaa pysyvän kuorman (johtimet, vaakaorret yms.) lisäksi kaikki muuttuvat kuormat kuten jää, lumi ja tuuli. Niiden yhteisvaikutus voi olla 600–800 N. Lisätään vielä tilapäinen poikkeava kuorma, esim. 150 kg huoltohenkilö varusteineen, josta seuraa 735 N vaakasuuntainen voimavaikutus. Pylvääseen vaikuttavat vaakasuuntaiset voimat ovat nyt noin 1 500 N.

Jos yksi johdin katkeaa, se voi aiheuttaa noin 800–1 000 N hetkellisen vaaka-suuntaisen vääntävän voiman, jolloin kokonaisvoimavaikutus voi olla 2 300–2 500 N. Toisin sanoen 187 mm halkaisijaan lahonnut puupylväs kestää hyvin em. voimavaikutukset. On huomioitava, että osa 187 mm halkaisijasta ei enää tässä vaiheessa ole täysin lujaa puuainesta, vaikka näyttäisi kiinteältä ja lujalta.

Kuvan 44 esimerkissä pylvään maksimi lahoisuusaste on 65 mm ja se sijoittuu selkeästi lahoisuusluokkaan 4. Tällöin pylväs kestää enintään 1 500 N maksimivoiman (vastaa 152 kg vaakasuuntaista voimavaikutusta), minkä vuoksi se on vaihdettava.



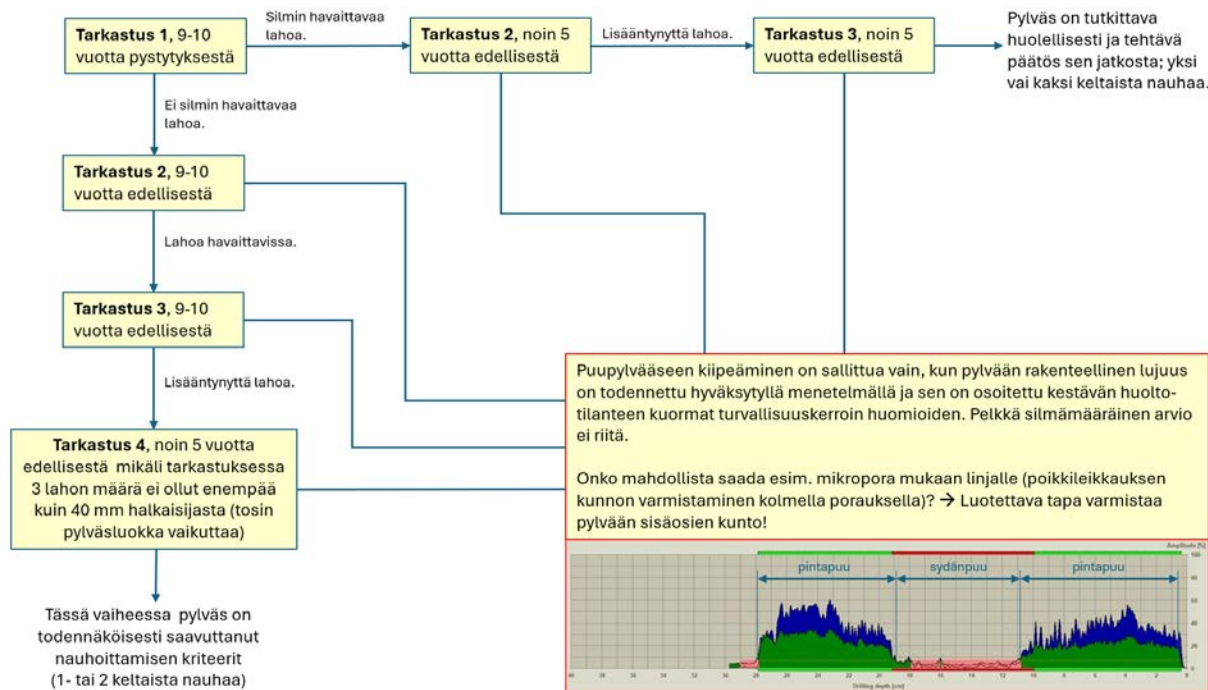
Kuva 44. Luokan 211 pylvään vaakasuuntaisten resultanttivoimien kestävyys sen maarajahalkaisijan funktiona. Kuva: Kai Möller

Vastaavat kuvaajat voidaan tehdä kaikille pylväsluokille ja parempana vaihtoehtona muuttaa kuvaajat ohjelmaksi, jolla voidaan ennustaa pylväiden käyttöikää (ks. s. 95).

8.5 Pylväiden tarkastusvälit

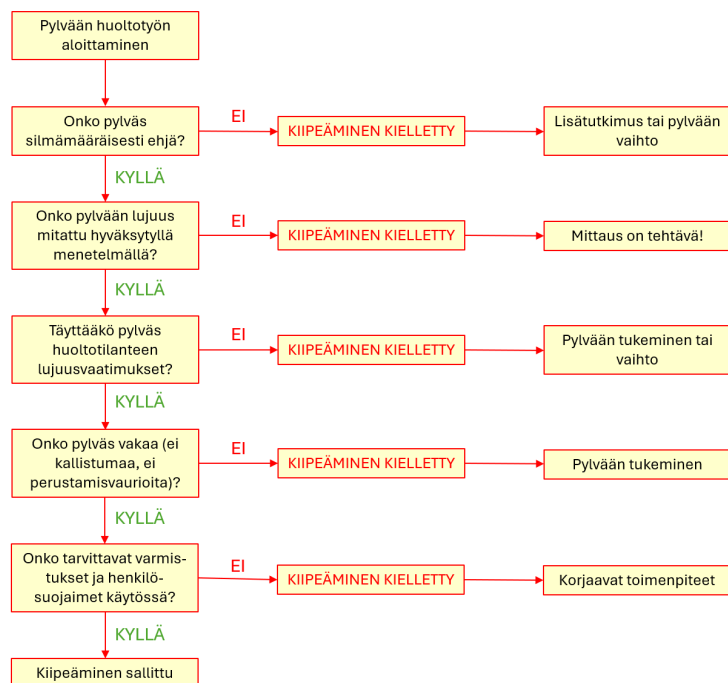
Koska C-kyllästettyjen pylväiden kestoikä ei ole vielä tiedossa ja koska pylväissä on esiintynyt huuhtoumaa ja sisälahoa, niiden tarkastusvälejä on ehdottomasti lyhennettävä. Aiempien CCA- ja kreosoottikyllästettyjen pylväiden ensimmäinen tarkastus saatettiin tehdä jopa 30 vuoden päästä pylvään asennuksesta. C-kyllästetylle pylväälle 30 vuoden käyttöikä voi tarkoittaa elinkaaren loppuvaihetta.

Hanke suosittelee kuvan 45 kaavion mukaisia tarkastusvälejä, joita voidaan tarkentaa pylvään sijainti ja maaperätyyppi huomioiden; pylväälle edullinen sijainti ja maaperätyyppi, jolloin tarkastusväli voi olla 10 vuotta ja epäedullisessa tilanteessa tarkastusväli 9 vuotta.



Kuva 45. Ehdotus C-kyllästettyjen pylväiden tarkastusaikaväleiksi. Kuva: Kai Möller

Kuvassa 46 on esitetty tarkastukset ennen pylvääseen kiipeämistä. Ne on syytä tehdä, jotta työturvallisuus sähkölinjan huoltotoissa toteutuisi.



Kuva 46. Tarkistustoimenpiteet ennen pylvääseen kiipeämistä. Kuva: Kai Möller

8.6 Pylvään kuntoa kuvaavat termit

Hankkeessa on selvitetty raja-arvoja siihen mitoitusjännityspisteeseen, jossa pylvääseen vaikuttavat kaikki mahdolliset voimat. Tämän pisteen mitoitusjännitys on 27,5 MPa. Vaikuttavien voimien suuruus on kuitenkin erilainen rannikolla verrattuna vaikkapa Etelä-Savon tiheisiin metsiin. Myös lumi- ja jääkuormat vaihtelevat sijainnin mukaan. Tässä dokumentissa on yritetty selvittää eri voimien vaikutusta ja arvoja, jotka pylvääseen vaikuttavat.

Hankkeen puolesta ei kuitenkaan voida esittää absoluuttista arvoa, millä pylväs pitäisi poistaa linjalta. Asia vaatisi laajempaa selvitystä ja päätöksiä. Hankkeessa C-kyllästetyn pylvään käyttöiäksi arvioitiin 30–40 vuotta. Onko se todellisuudessa keskimäärin 30 vuotta, 30–35 vuotta vaiko esimerkiksi 35–45 vuotta? Lisäksi ongelmana on, että esimerkiksi kun pylvään taivutuslujuus saavuttaa mitoitusjännityksen, sitä ei voida linjalla luotettavasti mitata. Ei myöskään lahoamisastetta, jolla pylväs tulisi linjalle vaihtaa.

Kuitenkin hankkeessa esitettiin haarukka jännitysalueesta, jolla pylväessä olevat laitteet yms. ovat vielä huollettavissa (yksi keltainen nauha), milloin se on kiipeämiskiellossa (kaksi keltaista nauhaa) ja milloin se on vaihdettava (huonoissa olosuhteissa se voi katketa).

Jatkokehitystarpeina voidaan toteuttaa pylväsluokkakohtainen lujuuslaskenta eri voimavaikutukset ja pylvään lahoamisaste huomioiden. Arvojen perusteella voidaan toteuttaa pylväsluokkakohtaiset lujuuskäyrät huomioiden paksuuden ylimitat sopivin välein.

8.6.1 Turvallinen pylväs

Pylvään taivutuslujuus tulee olla suurempi kuin pylvään mitoituslujuus eli $f_d \geq 27,5$ MPa. Arvo on käyttöraja, jonka ylittäminen johtaa rakenteelle sallitun kuormituksen ylittämiseen.

8.6.2 Käyttökelpoinen pylväs

Pylväs on riittävän luja kestämään ulkoisia jännityksiä, jotka voivat suurimmillaan olla luokkaa 15–23 MPa olosuhteista ja tilapäisistä- sekä poikkeavista jännityksistä riippuen. Toisin sanoen, jos pylväs kestää > 23 MPa (noin 2 500 N $\leftrightarrow$ 255 kg) laskettuna sen alkuperäisestä maanrajan halkaisijastaan, pylväs on käyttökelpoinen. Arvot on laskettu, kun pylväs on lahonnut 178 mm halkaisijaan. Tällä halkaisijalla 2 500 N voimavaikutus aiheuttaa 41,5 MPa taivutusjännityksen.

8.6.3 Kiipeäminen sallittu tuettuna (vaatii tarkempaa määrittelyä)

Pylväs, johon kiipeäminen on riski työturvallisuuden kannalta (yksi keltainen nauha), mutta kiipeäminen on mahdollista tuettuna. Pylvään tulee kestää $\geq 2\,000$ N voimavaikutuksen, jotta siihen voidaan kiivetä. Esimerkiksi 211-luokan pylväällä, jonka maarajahalkaisija on lahonnut 165 millimetriin, 2 000 N taivuttava voimaresultantti (≈ 204 kg vaakasuuntaisesti) tarkoittaisi noin 41,8 MPa taivutusjännitystä, jonka pylväs kestää. Jos tarkastellaan laskentaa alkuperäisellä maarajahalkasijalla 215 mm, pylvään taivutusjännitys olisi tällöin 18,9 MPa.

8.6.4 Kiipeämiskiello (vaatii tarkempaa määrittelyä)

Pylväs, johon ei saa kiivetä edes tuettuna (kaksi keltaista nauhaa). Pylväs kestää vielä tässä vaiheessa sääolosuhteiden vaikutuksen, mutta pylvään vaihdon suunnittelu on aloitettava.

Pylväs on lahon takia heikentynyt niin, että sen kestävyys on enää vain 1 500–2 000 N. Esimerkiksi 211-luokan pylväällä, jonka maarajahalkaisija on lahonnut 165 millimetriin, 1 500 N taivuttava voimaresultantti (≈ 152 kg vaakasuuntaisesti) tarkoittaisi noin 28 MPa taivutusjännitystä, jonka pylväs kestää. Jos tarkastellaan laskentaa alkuperäisellä maarajahalkasijalla 215 mm, pylvään taivutusjännitys olisi 14,1 MPa.

8.6.5 Vaihdeettava pylväs (vaatii tarkempaa määrittelyä)

Jos pylvään ulkoisten voimien kestävyys on yhtä paljon tai vähemmän kuin 1 500 N, pylväs tulisi vaihtaa mahdollisimman nopeasti. Vaarana on, että pylväs katkeaa jo pelkästään sääolosuhteiden vaikutuksesta.

9 HAVAINTOJA VUOSIEN 2023-25 TESTAUKSISTA

Kaikkiaan 290 taivutetusta pylväästä vain kolme katkesi latvasta. Vedon kiinnityskohta oli 15 pylvästä lukuun ottamatta (pitempiä kuin 12,1 m) 150 mm latvasta. Johtopäätös: visuaalisesti latva voi olla hyvinkin huonokuntoisen näköinen, mutta se kestää silti

Tikankoloilla ei ollut juurikaan vaikutusta lujuuteen. Myöskään asennuskolot ja -reiät eivät näyttäisi vaikuttavan merkittävästi. Johtopäätös: niiden tarkempi seuranta ja kirjaus ei ole tarpeen.

Hyväksytyssä 274 pylvään otoksessa oksaryhmien vaikutus oli pieni; vain 18 pylvästä murtui oksaryhmän kohdalta. Voidaankin kysyä, oliko syynä onnistunut pylväsraaka-aineen ostotoiminta? Oksat ovat merkittävin sahatavaran lujuutta heikentävä tekijä, mutta niiden merkitys pylväissä on vähäisempi etenkin, koska poikkileikkaus on ympyrä, joka on vahvimpia profiileja. Lujuustarkastelun kannalta massiivinen pyöreä profiili on eri asia kuin suorakaiteen muotoinen sahatavara.

Oksavaikutus on isossa kappaleessa vähäisempi kuin pienemmässä. Jos puu joutuu taivuttavalle kuormitukselle, oksaiset kohdat kannattaa sijoittaa puristuspuolelle, koska lujuus on tällöin 5–10 % suurempi kuin jos oksat ovat vetopuolella (Kärkkäinen 2003, 268). Tätä ei kuitenkaan tehty, vaan pylväät sijoitettiin taivutuslaitteeseen satunnaisesti seuraamatta niiden sijaintia.

Taivutuksessa maksimijännitykset esiintyvät puun pinnassa, jolloin sisälle jääneiden oksien merkitys lujuuteen on erittäin pieni.

Puun kosteuden vaikutus sen lujuuteen oli yllättävän pieni kosteusvälillä 12 – 24 %, jossa kosteudessa suurin osa testatuista pylväistä oli (n = 218 kpl eli 81 %).

Kreosoottipylväät olivat tahmeita ja niistä tihkui hieman kreosoottia lämpimällä kelillä. Myös hajuhaitta oli melkoinen. Tästä syystä kaikki kreosoottikiekot hävitettiin heti punnitus-kuivauskokeen ja kiekkojen kuvauksen jälkeen.

10 UHKAKUVIA

10.1 Ilmastomuutosten vaikutus puupylväisiin

On aivan selvää, että puupylväät ovat tulevaisuudessa olosuhteissa, joissa on voimakkaita tuulenpuuskia, maa ei roudi ja kosteat jaksot ovat arkipäivää. lämpötilat ovat pitempään plussan puolella.

Voimakkaiden tuulenpuuskien vaikutus pylvääseen ja sen rakenteisiin on merkittävä. huomattavasti isompi kun laskelmissa, joita on esitetty tässä raportissa. Puuskaisuus tehostaa tuulivoiman vaikutusta.

Sään ääri-ilmiöt ja geopoliittiset uhat muodostavat Elenian mukaan merkittävän riskin sähkönjakelun toimitusvarmuudelle ja kansalliselle huoltovarmuudelle. Sähköverkkoyhtiön mukaan Hannes-myrsky osoitti vakavan riskin ja sen, että Suomen sähköverkko on liian haavoittuva ([Verkkouutiset](#)).

Suomen jakeluverkkojen pituus on 426 000 kilometriä ja siitä on maakaapeloitu vain 55 prosenttia ([Verkkouutiset](#)).

10.1.1 Tuulivaikutukset

Vuoteen 2024 mennessä suurin Suomessa mitattu 10 minuutin keskituulen nopeus merellä oli 33,5 m/s. Se mitattiin Rauman Kylmäpihlajan havaintoasemalla 1.11.2024. Tämä oli ensimmäinen kerta, kun Suomen meriasemilla on mitattu 10 minuutin keskituulena hirmumyrskyn nopeutta (vähintään 33,0 m/s).

Vuoden 2025 viimeisenä viikonloppuna 28.12 Hannes-myrsky iski länsirannikolle voimalla, jota ei aiemmin ole koettu. Satoja sähköpylväitä kaatui (katkesi?). Keski-Pohjanmaalle se aiheutti jopa tämän vuosituhaten pahimmat tuhot, arvioi alueella toimiva Verkko Korpela-energiayhtiö.

YLE:n mukaan ”kovin tuulilukema puuskissa mitattiin Raumalla, peräti 37,2 m/s. Raumalla mittauspiste on kuitenkin useamman metrin korkeudessa, jossa mittari ottaa korkeampia

lukemia kuin maanpinnasta”. Toisaalta mainittua korkeutta ylempänä pylväs ottaa tulikuorman vastaan johdinpuomeihin, muuntajarakenteisiin yms.

Erittäin voimakkaat, puuskaiset tulleet ovat lisääntymässä ja se rasittaa sähköverkkoa eniten luonnollisesti rannikkoseudulla, mutta sisämaa saa siitä osansa.

Kauhavalla Suomen kovin tuulilukema

Kauhavalla mitattiin viikonloppuna koko Suomen kovin maa-aseman tuulilukema, pois lukien tunturialueet: 29,2 m/s.

– Tosi kova lukema, yleensä tällaisia mitataan vain tunturien huipuilla tai merialueilla, sanoo meteorologi **Eveliina Tuovinen** Ilmatieteenlaitokselta.

Kaikkiaan kovin tuulilukema puuskissa mitattiin Raumalla, peräti 37,2 m/s.



Sunnuntaina löytyi Kokkolan Ruotsalosta vielä useita sähköjohtojen päälle kaatuneita puita. Kuva: Iina Kluuikeri / Yle

Hannes-myrsky teki vuosituhaten pahimmat tuhot Keski-Pohjanmaalla: kaatoi satoja sähköpylväitä ja rikkoi rakenteita

Keskipohjalaisen energiayhtiön sähköpylväitä kaatui satoja ja muuntoasemiakin vaurioitui useampia. Tuhot olivat yhtiön mukaan jopa pahemmat kuin Eino-myrskyssä 2013.



Keski-Pohjanmaalla yksinomaan sähköpylväitä on kaatunut myrskyssä satoja, arvioi energiayhtiö. Kuva: Iina Kluuikeri / Yle

Kuva 47. Hannes-myrsky kaatoi länsirannikolla satoja pylväitä. Olisi mielenkiintoista tietää kuinka monta niistä katkesi ja mikä oli katkenneiden pylväiden lahoisuusaste. Kuvat: YLE

10.1.2 Lämpötilan nousu

Suomi lämpenee selvästi nopeammin kuin maailman keskiarvo. Tutkimukset osoittavat, että Suomen keskilämpötila on noussut jo nykyhetkeen verrattuna merkittävästi ja jatkaa nousuaan tulevana vuosikymmeninä.

Ilmastomallien mukaan vuoteen 2040–2069 mennessä keskilämpötila voi olla jopa noin 2–3 °C korkeampi kuin 1981–2010-vertailukaudella monissa skenaarioissa. (geophysica.fi)

Jos keskitytään seuraavaan 20 vuoteen (2025–2045), lämpötilan nousu olisi tässä skaalassa suurin piirtein 1,5–3 °C verrattuna 1900-luvulle, riippuen päästöistä. Tämä tarkoittaa esimerkiksi:

- Vähemmän hyvin kylmiä päiviä talvella.
- Enemmän hellepäiviä kesällä.
- Talvien lauhtumista ja pidempiä lämpimiä kausia.

10.1.3 Sademäärät & sään vaihtelu

Sademäärät lisääntyvät keskimäärin, erityisesti talvella, koska lämpimämpi ilma voi pitää enemmän kosteutta. (climateguide.fi)

Lumisen talven ajanjakso lyhenee: entistä useampi sade tulee vesisateena eikä lumena, mikä voi muuttaa talviolosuhteita ja lumipeitteen kestoa erityisesti Etelä- ja Keski-Suomessa. (mtvuutiset.fi)

Rankkasateet ja ääri-ilmiöt voivat yleistyä, mikä lisää tulvariskiä nopean sulan ja voimakkaiden sateiden aikana. (Yle.fi)

10.1.4 Talviolosuhteet & lumi

Lumisten päivien määrä saattaa pienentyä huomattavasti, etenkin vuoden 2050 tienoilla Etelä- ja Lounais-Suomessa, mutta vaikutus alkaa näkyä jo 2025–2045. (mtvuutiset.fi)

Maan routa ja talven jääpeite voivat vähentyä vaikuttaen maatalouteen sekä liikkumiseen talvisin. (climateguide.fi). Se heikentää myös pylväiden pystyssä pysyvyyttä tuulta vastaan.

10.2 EU:n kemikaaliviraston asettamat rajoitukset kemikaalien käyttöön

Esimerkiksi Tanalith E-kyllästeessä tehoaineena on propikonatsoli. Biosiditehoaineena tunnetun propikonatsolin hyväksymistä on jatkettu 30.11.2030 asti. Propikonatsolia sisältävät puunsuojavalmisteet voidaan jatkossa hyväksyä vain sellaisiin tarkoituksiin, joissa käyttö todetaan välttämättömäksi.

Oheinen esimerkki kuvaa sitä, että EU:n toimesta voidaan kieltää nyt käytössä olevia tehoaineita, jotka suojaavat laholta. Riski lahonkeston heikentämiselle EU-kemikaaliviraston kautta on ilmeinen.

10.3 Hyvälaatuisten pylväsaihioiden saatavuus

Tehometsänkasvatus on vähentänyt hyvälaatuisen, hitaasti kasvaneen mäntyraaka-aineen saatavuutta. Hyvän raaka-aineen ”haaliminen” on kasvattanut hankinta-alueen kokoa eli noutomatkat ovat kasvaneet. Tämä ei voi olla vaikuttamatta pylväshintoihin.

Tällä voi olla vaikutusta myös siihen, mikä osa männyn rungosta kelpuutetaan pylväspuuksi. Onko tulevaisuudessa niin, että parempilaatuisesta rungon alaosaista tehdään sähköpylväs ja sen ylempi latvaosa jatkaa matkaa sahan raaka-aineeksi.

10.4 Kyllästysprosessin tasalaatuisuus - lahoamista jo 10-vuotiaissa pylväissä

Hankkeen loppumetreillä tutkittavaksi tuli Anttolan tapaus, jossa 10 vuoden ikäiset eli suhteellisen uudet pylväät (3 kpl) olivat voimakkaasti lahonneet. Yhdessä oli täystunkeuma (vain pinta oli rapistunut), kahdessa vajaatunkeumaa ja yksi pylväs oli lahonnut, mutta koska se oli muuntajapylväs, sitä ei koestettu. Silti voidaan kysyä, miksi lahoaminen oli näin nopeaa?

C-kyllästettyjen pylväiden ongelmana on huuhtouma. C-kyllästeessä ei ole kunnollisia kiinnittäviä aineita kuten CCA-kyllästeen kromi. Kun maaperä on karkeahiekkainen vähän savea sisältävä, odotettavissa on huuhtoumaa. Maan vetovoiman ja kapillaarisuuden auttamana kylläste pääsee valumaan läpi karkeahiekkaisen maaperän.

10.5 Sähköverkon ylläpidon kustannuskasvu

Otsikon mukaiselta skenaariolta ei voida välttää. Tähän mennessä C-kyllästettyjen pylväiden vaihto on ollut yksittäistä ja satunnaista, koska ne eivät ole olleet sähkölinjoilla kuin 18–19 vuotta. Ongelma ei ole vielä konkretisoitunut. Vuosina 2007–13 kyllästettyjen pylväiden arvioitu elinkaari on todennäköisesti lyhempi kuin vuosina 2014–25 kyllästettyjen. Vuosina 2007–13 kyllästettyjä C-pylväitä on sähkölinjoilla ympäri Suomea ja määrää voi vain kuvitella. Jos niiden maksimikäyttöikä on esimerkiksi 30 vuotta, reilun 10 vuoden päästä ne ovat vaihtoiässä. Laskun maksavat sähkön käyttäjät kasvavina siirtohintoina.

11 KEHITYSEHDOTUKSIA

11.1 Automaation hyödyntäminen sähköverkon kunnon havainnointiin (IoT - Internet of Things)

Voidaanko sähkölinjojen tarkkailuun liittää sensoreita, jotka lähettävät dataa verkon kautta tietokantaan ja hyödyntää siten linjan tarkkailumonitoroinnissa. Voidaanko näin tarkentaa sähkölinjojen kunnontarkkailua.

11.2 Eri datapalveluiden käyttö lahoarviointiin

Maaperädataa voisi käyttää oikean pylväsluokan valintaan, jossa huomioitaisiin maaperästä ja -tyypistä johtuva lahoamisriski. Pylvään normaalikuormien, pysyvien kuormien ja poikkeavien kuormien aiheuttamien jännitysten perusteella mitoitusjärjestelmä ehdottaa pylväsluokkaa. Tähän tarkasteluun lisätään maaperätyypin vaikutus, jos rakennettava linja kulkee pylväitä lahoittavan maaperän kautta.

Nykyinen API-ohjelmointi ei ole kohtuuttoman kallista ja koodin rakentumistakin on automatisoitu. Tietokantoihin on mahdollista integroida selainpohjaisia sovelluksia, joissa näitä automatisointeja voidaan toteuttaa.

Esimerkiksi Geologian tutkimuskeskuksen (GTK) sivusto näyttää maaperätyypin, jos se on määritetty. Sivuston voi linkittää sähkölinjan suunnitteluohjelmaan ja käyttää Maankamara-sivuston tietoa hyväksi. Myös muita vastaavia sivustoja on kuten Maanmittauslaitos, Paikkatietoikkuna, joihin kannattaa tutustua.

11.3 Pylväsluokkakohtaiset lahoamiskäyrät

Kohdan "8.4 Edellisten perusteella johdettu esimerkkikuvaaja" käyttöönotto, joko manuaalisesti tai mahdollisesti toteutetun sovelluksen kautta; kun tunnetaan pylvään ominaisuudet ja pylväsluokka, tiedetään maaperätyyppi ja maastotyyppi yms., kullekin pylväsluokalle voidaan luoda teoreettiset lahoamiskäyrät ja merkitä kunkin tarkastuspisteen sijainti ajanhetkellä t. Itse asiassa koko tämä toiminto voidaan siirtää digitaaliseen muotoon.

Ongelma on kaikille sähköjakeluyhtiöille yhteinen. Löytyisikö konsensus, jossa yhteissijoituksena sähköyhtiöt teettäisivät työkalun sisältäen

- rakennettavan/korjattavan sähkölinjan maaperätyypin selvittämisen pylvässijainneissa
- 3. osapuolen sovelluksen avulla ja sen mukaan ehdotus pylväsluokasta, jossa olisi järkevä lahoamisvara
- integroiminen Ilmajohtojen mitoitusohjelmaan
- pylvään sitominen lahoprofiiliin ja automaattihälytykset kun ensimmäisen tarkastuksen aika koittaa. Myös jatkotarkistukset ja pylvään käyttöiän lopun valmistelutoimenpiteet
- jokin muu toimintaa helpottava pääominaisuus/-ominaisuudet?

11.4 Digitalisaation hyödyntäminen yleisesti

Esimerkkinä maaperädatan hakeminen (esim. Exceliin, QGISiin tai API:lla):

- WMS- tai WFS-rajapinnat GTK:n ja Paikkatietoikkunan kautta
- nämä voidaan liittää avoimeen GIS-ohjelmaan (esim. QGIS) ja klikata kartalta haettavat paikkatietueet
- liittäminen sähköyhtiön järjestelmään API-rajapinnan kautta.

WMS on karttakuvat ja WFS on kohteet + attribuutit (esim. maalaji, luokka, symboli)

QGIS on ilmainen, vapaa, avoimen lähdekoodin paikkatieto-ohjelmisto, joka sisältää mahdollisuuden tiedon selaamiseen, muokkaamiseen ja analysointiin.

API (Application Programming Interface) on ohjelmointirajapinta, joukko sääntöjä ja protokollia, joka mahdollistaa eri ohjelmistojen ja sovellusten keskustelun ja tiedonvaihdon keskenään, toimien siltana niiden välillä ilman, että käyttäjän tarvitsee tietää sisäisistä yksityiskohdista (ks. liite 4. Rajapintaohjelmoinnin hyödyntäminen sähköverkkojen ylläpidossa.).

Yleisesti ottaen miten sähköyhtiöt hyödyntävät API-rajapintaohjelmointia tänä päivänä?

API-rajapintaohjelmoinnin avulla voidaan linkata eri ohjelmia ja tietokantoja toisiinsa eli sovelluksella voidaan hakea vaikkapa GTK:n palvelimelta paikkatiedon perusteella maaperädataa sähköyhtiön sovellukseen ja käyttää tietoa hyväksi pylväslaskennassa.

Allekirjoittanut (Möller) työskenteli ohjelmistotalossa, joka teki ohjelmistoja mekaaniselle metsäteollisuudelle. Asiakkaina oli pääasiassa sahat, mutta asiakaskuntaan kuuluivat myös kyllästämöt, höyläämöt, liimapalkkitehtaat ym. vastaavat yritykset (usein samassa konsernissa sahan kanssa). Kun laajaa ERP-järjestelmää (Enterprise Resource Planning eli toiminnanohjausjärjestelmä) ryhdyttiin toteuttamaan, siihen osallistui useita sahoja, jotka jakoivat ohjelmiston tuotantokustannukset näin halventaen tuotteen hintaa.

Voisiko sama mallia toimia myös sähköjakelupuolella?

12 JATKOSELVITYSTARPEET

QR-tagien hyväksikäyttö tiedon siirtämiseen sähkölinjalta sähköyhtiön tietojärjestelmään. Sähköyhtiöiden yhteisprojekti?

Standardin SFS 2662 "ILMAJOHDOT. PUUPYLVÄS" päivittäminen, jossa on paljon epäselvyyksiä ja puutteita.

Ilmajohtojen mitoitus- ja lahotarkastusohjelmistojen yhteensovittaminen kaikkien verkonhallintayhtiöiden käyttöön. (Norjan sovellus, Hannu?)

C-kyllästeen huuhtouman tutkimus pylväillä. Konkretisoitui Anttolan lahopylväissä.

Sähköpylvään merkintöjä koskevan ohjeistuksen uusiminen, jossa annetaan ohjeet nykyistä tarkemmista merkintävaatimuksista. Hankkeessa tuli vastaan tapauksia, joissa lahotarkastajat eivät tieneet oliko pylväs CCA- vaiko C-kyllästetty.

"Verkkosuositus RJ 11:14 Puupylväiden käytönrajat" vaatisi tarkentamista muuttuneessa käyttöilmastossa. Puuskatuulet ovat lisääntyneet ja sulan maan aika on pidentynyt. Myös pylväiden lahoamisnopeus on kasvamassa.

Lahotarkastusohjeen "RJ 33:09 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen" uusiminen. Se on tehty VIM-aikana 2009 ja nyt eletään CENELEC-aikaa. Ohjeistuksessa tulee määrittää ne kriteerit voimassa olevien standardien mukaan, joiden perusteella pylväs todetaan poistettavaksi sähkölinjalta (elinkaaren loppu tai muu syy). Ohjeistuksessa tulee myös määrittää kuntotarkastajien työtä helpottamaan lahon etenemiskäyrät, joista pylvään tilanne on helppo hahmottaa.

Edellisiin liittyen pylväsluokakohtaiset lujuuskäyrät (kuva 44), jossa esitetään useampi kuvaaja huomioiden pylvään ylimitta sopivin välein. Laskennassa huomioitaisiin pylväsluokan lisäksi upotussyvyys, josta seuraa pylvään maanpinnan yläpuolisen osan pituus, pylväsluokan mukainen maarajahalkaisija, keskimääräinen maarajahalkaisija ja maksimi maarajahalkaisija (+40 mm). Edellisten perusteella lasketaan taivutusmomentti ja taivutusjännitys huomioiden

pylvääseen vaikuttavat eri voimat. Lopuksi saadaan pylväsluokkakohtainen halkaisija vaihdettavalle-, kiipeämiskiellossa olevalle- ja käyttökelpoiselle pylväälle.

Hankkeessa on selvitetty raja-arvoja siihen mitoitusjännityspisteeseen, jossa pylvääseen vaikuttavat kaikki mahdolliset voimat. Tämän pisteen mitoitusjännitys on 27,5 MPa. Vaikuttavien voimien suuruus on kuitenkin erilainen rannikolla verrattuna vaikkapa Etelä-Savon tiheisiin metsiin. Myös lumi- ja jääkuormat vaihtelevat sijainnin mukaan. Tässä dokumentissa on yritetty selventää eri voimien vaikutusta ja arvoja, jotka pylvääseen vaikuttavat. Hankkeen puolesta ei kuitenkaan voida esittää tarkkaa arvoa, millä pylväs pitäisi poistaa linjalta. Asia vaatisi laajempaa selvitystä ja toimenpiteitä. Edellä mainituilla seikoilla on vaikutusta pylvään käyttöikään; hankkeessa C-kyllästetyn pylvään käyttöikäksi arvioitiin 30–40 vuotta. Onko se todellisuudessa keskimäärin 30 vuotta, 30–35 vuotta vaiko esimerkiksi 35–45 vuotta? Lisäksi ongelmana on, että kun pylväs saavuttaa mitoitusjännityksen, sitä ei voida linjalla luotettavasti mitata. Ei myöskään lahoamisastetta, jolla pylväs tulisi linjalle vaihtaa.

Mikroporausmenetelmän luotettavuuden selvittäminen. Menetelmä on havainnollinen ja nopea eikä vaadi esimerkiksi maanpinnan tason kaivamista. Sillä saadaan näkyviin lahokohdat koko pylvään poikkileikkauksesta. Mahdollista tehdä vertailututkimus, jos C-kyllästettyjen pylväiden jatkohanke toteutuu (testataan lisää puuttuvien kyllästysvuosien pylväitä 40–50 kpl).

13 LÄHTEET

- Avikainen, J. 2015. Sähkönjakeluverkon puupylväiden lahoaminen eri ympäristöissä. Diplomityö. Helsinki: Sähkötekniikan korkeakoulu. Aalto-yliopisto.
- Boij, H. 2025. Laatukemisti. Sähköpostiviesti 04.12.2025. Oy Hortilab Ab.
- Boren, H. 2010. Tulevaisuuden sähköpylväs. Helsinki: Energiategollisuus ry / Sähkötutkimuspooli.
- Jalava, M. 1952. Puun rakenne ja ominaisuudet. Helsinki: WSOY.
- Johannesson, C., Johansson, K., Tegstedt, F. 2020. Livscykelanalys av ledningsstolpar. Rapport 2020:693. Stockholm: Energiforsk AB
- Karjalainen, E., Korhonen, I., Lappalainen, J., Manninen, M. & Mutttilainen, J. 2009. Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen. Verkostosuositus RJ 33:09. Helsinki: Adato Energia Oy.
- Kuusisto, O., Leskinen, K., Ristimäki, R., Pulkkinen, P., Sihvonen, J., Mutttilainen, J. (toim.). 2014. Rakenteet. Puupylväiden käytönrajat. RJ 11:14. Helsinki: Adato Energia Oy.
- Kärkkäinen, M. 2003. Puutieteen perusteet. 1. painos. Hämeenlinna: Kustannusosakeyhtiö Metsälehti.
- Lassila, J. 2025. Professori, Sähkötekniikka ja elektroniikka. Puhelinkeskustelu 06.03.2025. LUT-yliopisto.
- Lepistö, M. 2026. Hannes-myrsky paljasti vakavan riskin sähköverkossa. Verkkouutiset 05.01.2026. Saatavissa: <https://www.verkkouutiset.fi/a/hannes-myrsky-paljasti-vakavan-riskin-sahkoverkossa/#b69173ef> [Viitattu 07.01.2026]
- Löyttyniemi, K. 1986. Männyn sydänpuu – luonnon kestopuuta. Männyn sydänpuun luontaisen lahon- ja hyönteistuhonkestävyyden hyväksikäytöstä. METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 231. Helsinki: valtion painatuskeskus.
- Manninen, M., Lappalainen, J., Karjalainen, E., Korhonen, I. Mutttilainen, J. (toim.). 2009. Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen. RJ33:09. Helsinki: Adato Energia Oy.

Mäkipuro, R. 1981. Puupylväiden lujuuslaskentaohje. Lahontorjuntayhdistys ry.

Non-destructive structural analysis system – CXI-PT5500. 2017. Cinetix Group. Saatavissa: https://www.cinetix-tlc.it/telecommunications_products_services/non-destructive-structural-analysis-system-cxi-pt5500/ [Viitattu: 01.12.2025]

Pihlajamaa, T. & Jantunen, J. 1995. Järeän sahatavaran mekaaniset ominaisuudet. Vakolan tutkimusselostus 70. Vihti: Maatalouden tutkimuskeskus.

Puuinfo. 2020. Puun kosteuskäyttäytyminen, tekniset tiedotteet 1.7.2020. Helsinki. Puuinfo. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/suunnittelu/ohjeet/tekniset-tiedotteet/puun-kosteuskayttaytyminen/> [Viitattu 02.12.2025]

Puuinfo. 2020. Lujuusteknisiä ominaisuuksia, puun ominaisuudet 25.06.2020. Helsinki. Puuinfo. Saatavissa: <https://puuinfo.fi/puutieto/puun-ominaisuuksia/lujuusteknisia-ominaisuuksia/> [Viitattu 02.12.2025]

Riisiö, P. 2025. Johtaja. Puhelinkeskustelu 20.02.2025. Finnmast Oy.

Rissanen, A. & Sirviö, J. 2000. Männyn (*Pinus sylvestris*) ja kuusen (*Picea abies*) puuaineen ja -kuitujen ominaisuuksien vaihtelu. Kirjallisuustutkimus. Metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 23. Helsinki: Helsingin yliopisto.

SFS-EN 14229:2011. 2011. Rakenteellinen sahatavara. Puiset sähköpylväät. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 50341-1. 2014. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 1: Yleiset vaatimukset. Yhteiset määrittelyt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 50341-2-7:2023. 2023. Vaihtosähköilmajohdot yli 1 kV jännitteellä. Osa 2–7: Suomen kansalliset velvoittavat määrittelyt (perustuu standardiin EN 50341-1:2012) . Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-käsikirja 601. Joulukuu 2009. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 1. painos. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-käsikirja 601:2018. Suurjännitesähköasennukset ja ilmajohdot. 3. painos. Elokuu 2018. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS ry.

Tahvanainen, J. & Tuokko, M. 2023. Keskijänniteilmajohtoverkon puupylväiden käytönrajalaskenta. Opinnäytetyö. Ammattikorkeakoulututkinto. Savonia ammattikorkeakoulu.

Vahvavirtailmajohtomääräykset. 1993. Julkaisu A4-93. Helsinki: Sähkötarkastuskeskus.

Vesa, J. 2025. Tuotantojohtaja, ryhmäpäällikkö. Puhelinkeskustelu 20.02.2025.SESKO ry.

Vihavainen, T. 1980. Puurakenteiden laihontorjunta. 2. painos. Helsinki: Rakentajain Kustannus Oy.

Viitaniemi, P. 2006. Kurssin Puu-19.210 Puun rakenne ja kemia luentodiat. Puunjalostustekniikan osasto. Teknillinen korkeakoulu.

Wodeca. 2024. Sähköpylväiden tutkimus. Saatavissa: <https://wodeca.fi/#pylvaat> [Viitattu: 15.12.2025]

LIITE 1. Käytetyt tutkimusmenetelmät, laitteet ja laitteistot

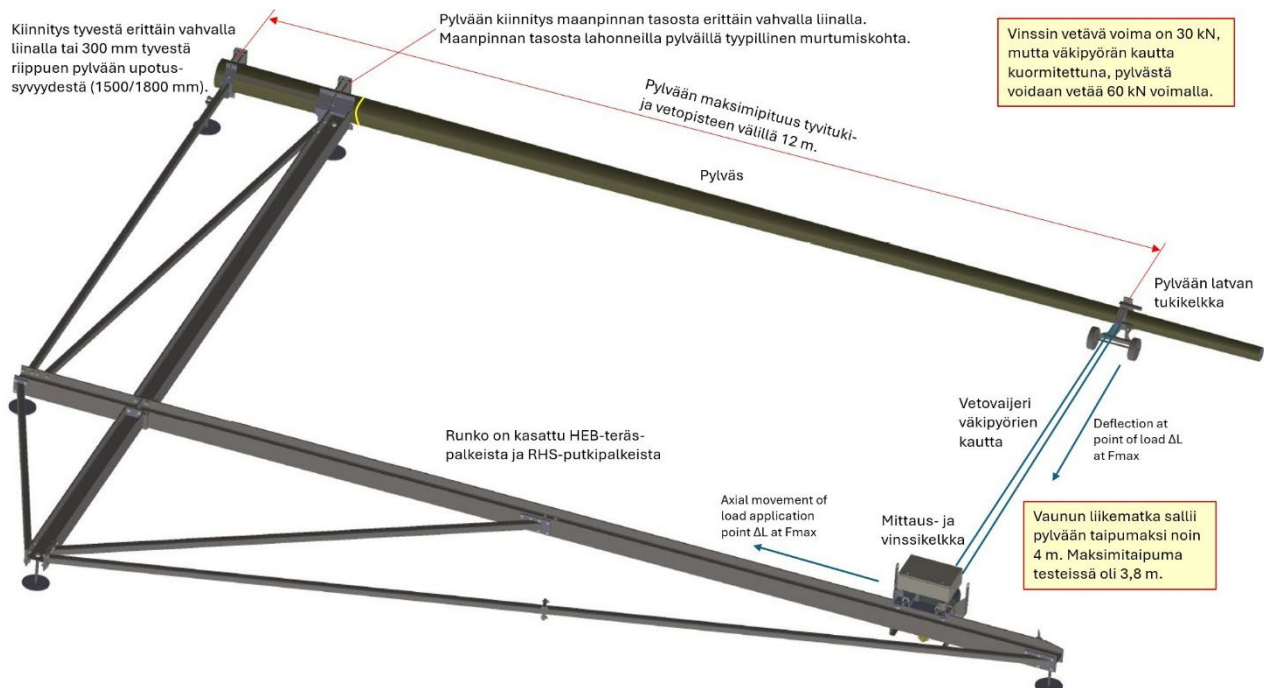
KÄYTETYT TUTKIMUSMENETELMÄT, LAITTEET JA LAITTEISTOT

Taivutuslaitteisto ja mitattavat lujuusarvot

Vuonna 2021 Mikpolis-tutkimus- ja testauslaboratoriossa suunniteltiin EN 14229:2011 mukainen täysimittaisen puupylväiden taivutuslaitteisto mikä takaa standardien mukaiset testaukset (kuva). Se valmistettiin vuonna 2022 haukivuorelaisessa metallialan yrityksessä. Laitteen rahoittamiseen osallistui Järvi-Suomen Energia Oy.

Taivutuslaitteistoon kuuluva taivutuslujuuden mittauslaitteisto on ainutlaatuinen koko Euroopan mittakaavassa. Vastaavan taseisia, tarkat mittaustiedot antavia laitteistoja ei juurikaan ole.

Sillä voidaan mitata pylvään suuntainen (mittaus- ja vinssikelkan liike) - ja vaakasuuntainen siirtymä (pylvään taipuma) sekä kuormituksen suuruus (voima). Mittauskelkassa on vaijerivetoanturit, joilla mitataan siirtymiä. Taivutukseen tarvittavan voiman mittaamiseen kelkassa on venymäliuskoihin perustuva voima-anturi. Laitteen maksimivoima on noin 60 kN. Vaijeri on kiinnitetty sähkökäyttöiseen vinssiin, joiden välissä voima-anturi on. Kelkan siirtymä- ja voima-anturien avulla määritetään taivutuslujuus ja –moduuli.



Kuva. Mikpolisin kehittämän taivutuslaitteiston periaatekuva. (kuva: Kospirt Oy & Kai Möller)

Laitteistoa otettiin käyttöön vuonna 2022 ja nyt sillä on taivutettu noin 300 täysimittaista hanke- ja noin 700 asiakastilausten mukaista pylvästä. Taivutuslaitteistoa on kehitetty ja paranneltu vuosien aikana ja se on toiminut luotettavasti. Tieto laitteistosta ja Mikpoliksen tietotaidosta on levinnyt jo laajalti; asiakkaita on ollut Suomen lisäksi Omanista, Virosta, Latviasta, Ruotsista sekä Irlannista.

Puupylväiden kosteuden ja tiheyden määrittäminen punnitus–kuivausmenetelmällä

Testimenetelmä

Puun kosteuspitoisuus määritettiin standardin EN 13183-1:2002 mukaisella punnitus–kuivausmenetelmällä (uunikuivausmenetelmä). Menetelmä perustuu näytteen tuore- ja kuivamassan väliseen erotukseen, ja sitä pidetään luotettavimpana puun kosteuden määrittämenetelmänä. Menetelmä toimii hyvin C- ja CCA-kyllästetyille pylväille, mutta kreosoottikyllästettyjen pylväiden osalta niin kosteuden kuin tiheydenkin määrittäksessä voi tulla epätarkkuutta jäämien takia.

Näytteenotto

Jokaisesta tutkittavasta pylvästä otettiin puunäyte sahaamalla pylvästä noin 5 cm paksu kiekko ketjusahalla. Näytteet otettiin välittömästi taivutustestin jälkeen mahdollisimman läheltä vauriokohtaa siten, että näytekiekko pysyi ehjänä. Pylvään murtokohdasta näytteenotto on haastavaa, koska puu pirstoontuu palasiksi. Tyypillinen näytteenottokohta puupylväässä oli 3–6 metrin etäisyydeltä puun tyvestä mitattuna. Näytteenottokohtaa ei dokumentoitu. Teoriassa näytteenottokohta on mahdollista laskea, koska puu on kartion muotoinen. Vuosilustomittauksista saadaan tarkka halkaisija kosteuskiekolle (vuosilustonäytteet otettiin kosteuskiekkonäytteistä) ja jokaisesta pylvästä mitattiin halkaisijat neljästä kohdasta, tyvi, maanpinnan taso, kuormitusvaijerin kiinnityspiste ja pylvään kärki.

Näytekiekossa ei sallittu oksia tai pihkataskuja. Jos niitä oli näytteessä, otettiin vierestä uusi näyte niin monta kertaa, että saatiin virheetön näytekiekko.

Alkupainon määrittäminen

Ennen kuivausta näytteet punnittiin laboratorio-vaa’alla, jonka tarkkuus on 0,01 g. Märkäpaino kirjattiin välittömästi näytteenoton jälkeen näytteeseen kosteudenkestävällä tussilla. Näytteet valokuvattiin ennen kuivausta, jotta näytteissä ei ole kuivauksen aiheuttamia halkeamia (Kuva 1). Tämä siksi, että kyllästysaineen tunkeuman suhteellisen alueen mittaaminen on tarkempaa ilman ylimääräisiä kuivaushalkeamia. Valokuvista määritettiin kyllästyneen puun osuus puun

poikkileikkauksesta. Kyllästeen tunkeuman suhteellisen osuuden määrittäminen on esitetty kohdassa 9.4.



Kuva 1. Kosteusnäytekiekko ennen kuivausta. Alkupaino merkattu tussilla näytteen ID tunnuksen alle. Kuva Heikki Naumanen

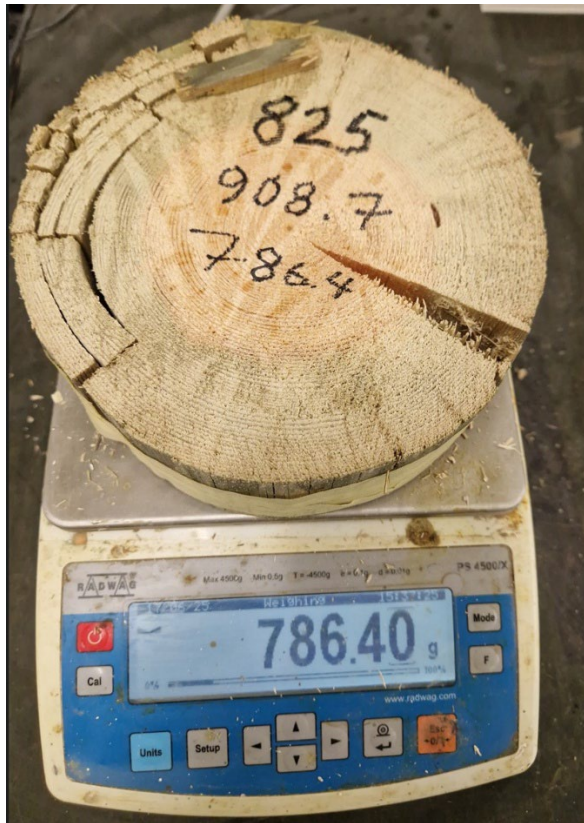
Kosteusnäytteiden massa vaihteli 230 grammasta aina noin 2000 grammaan, riippuen pylvään halkaisijasta, näytteen paksuudesta ja kosteudesta. Näytteistä otettiin alkupaino heti näytteenoton jälkeen kosteuden haihtumisen estämiseksi.

Näytteiden kuivaus

Näytteet kuivattiin uunissa lämpötilassa 103 ± 2 °C. Kuivausta jatkettiin, kunnes näytteen massa vakioitui. Vakioituminen varmistettiin suorittamalla kaksi peräkkäistä punnitusta, joiden välinen ero oli enintään 0,1 %. Punnitusten välissä kului 2–3 tuntia. Kuvassa 2 on yksi vakioitumisen aikana mitattu näyte. Vakioitumismittausta ei tehdä kaikille näytteille. Kokonaiskuivausaika oli noin vuorokausi.

Loppupainon mitta

Välittömästi kuivauksen jälkeen näytteet punnittiin laboratorio-vaa'alla, jonka tarkkuus on 0,01 g. Näytteet valokuvattiin siten, että kuvassa näkyy näyte ja sen yksilötiedot, näytteeseen kirjattu alkupaino sekä loppupainon lukema vaa'assa (Kuva 2). Mittausdata siirrettiin taulukkoon valokuvien tietojen mukaan. Punnitustulos kirjattiin kuivapainoksi (m_0).



Kuva 2. Kosteuskappaleen loppupainon mittaus. Kuva Heikki Naumanen

Kosteuspitoisuuden laskenta

Puun kosteuspitoisuus laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$u = \frac{m_1 - m_0}{m_0} \times 100 \%$$

missä

m_1 = näytteen märkäpaino [g]

m_0 = näytteen kuivapaino [g]

u = näytteen kosteus [%]

Tiheyden määrittäminen

Tiheys määritettiin koestuskosteuteen ja muutettiin 0 % kosteutta vastaavaan tiheyteen.

Pylväs punnittiin kahdella mittauspalkilla, joista tieto siirrettiin mittausyksikköön. Sen mittaustarkkuus oli $\pm 0,5$ kg.

Katkaistun kartion tilavuus laskettiin laskemalla yhteen pylvään tyviosa, keskiosa ja lyhyt pätkä latvaa. Jako perustuu siihen, että pylväästä mitattiin vaipan piiri tyvestä, piiri mitattuna tyvestä

1 500 mm tai 1 800 mm kohdalta (maanpinnan raja) riippuen pylvään pituudesta ja piiri latvasta 150 mm päästä (tai enemmän pitkällä pylvällä) sekä latvan piiri.

Käytetty kaava yhden katkaistun kartion laskemiseen:

$$V = \frac{1}{3} \pi h (R^2 + Rr + r^2)$$

Symbolien selitykset:

V = katkaistun kartion tilavuus [m^3]

π = piin arvo (likiarvo $\approx 3,1416$)

h = kartion korkeus (pohjien välinen etäisyys)

R = suuremman pohjaympyrän säde

r = pienemmän pohjaympyrän säde.

Pylvään kokonaistilavuus V_{MC} sen koestuskosteudessa on tällöin

$$V_{MC} = V_{tyvi} + V_{keskiosa} + V_{latva}$$

Kun pylvään paino- ja sen tilavuus koestuskosteudessa oli tiedossa, voitiin koestuksen aikainen tiheys laskea kaavalla

$$\rho_{MC} = \frac{m}{V_{MC}}$$

Symbolien selitykset:

ρ_{MC} = pylvään tiheys koestuskosteudessa [kg/m^3]

m = pylvään massa [kg]

V_{MC} = pylvään kokonaistilavuus koestuskosteudessa [m^3]

Koestushetken tiheys muutettiin vastaamaan tiheyttä 0 % kosteuteen kaavalla

$$\rho_0 = \rho_{MC} \cdot \frac{100}{100 + MC}$$

Symbolien selitykset:

ρ_0 = pylvään tiheys puun kosteudessa 0 % [kg/m^3]

ρ_{MC} = pylvään tiheys koestuskosteudessa [kg/m^3]

MC = pylvään koestushetken kosteus [%]

Laitteistokuvaus

Vaaka

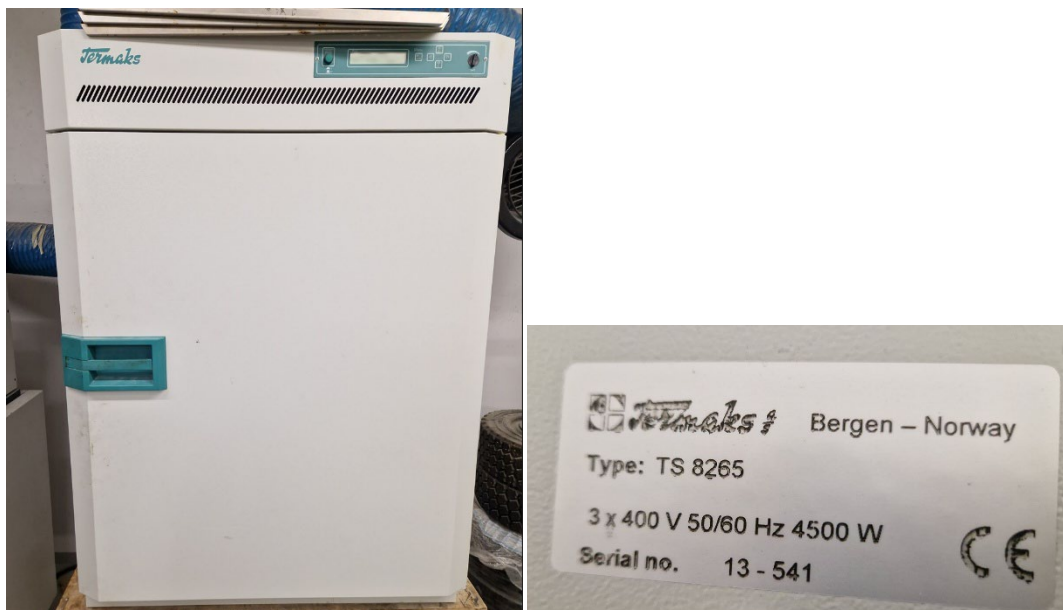
Kosteusmäärittäyksissä käytettiin kalibroitua tarkkuusvaakaa, jonka resoluutio ja toistettavuus olivat riittävät puunäytteiden punnitsemiseen. Käytetty vaaka Radwag PS 4500/X (Kuva 3).



Kuva 3. Tarkkuusvaaka Radwag PS 4500/X, tekniset tiedot. Vaa'an etupuoli on kuvassa 2. Kuva Heikki Naumanen

Kuivausuuni

Kuivaus suoritettiin laboratoriuunissa, jonka lämpötila pysyy alueella 103 ± 2 °C. Uunissa oli ilmankierto tasaisen lämpötilan takaamiseksi. Käytetty uuni Termaks TS 8265 (Kuva 4).



Kuva 4. Termaks TS 8265 kiertoilmauuni ja sen tekniset tiedot. Kuva Heikki Naumanen

Apuvälineet

Näytteiden otossa käytettiin seuraavia apuvälineitä:

- Matkapuhelin, näytteet valokuvattiin kännykällä mahdollisimman vakioidussa tilassa valaistuksen suhteen ja samalta etäisyydeltä.
- Ketjusaha, näytteet sahattiin irti pylväästä akkukäyttöisellä ketjusahalla.
- Henkilökohtaiset turvavarusteet.

Puun vuosilustojen ja pintapuun osuuden määrittäminen

Näytteen valmistelu

Puun rakenteen ja kasvun vuosittaisen vaihtelun analysoimiseksi kustakin pylväästä otettiin näytekiekko. Näytekiekko sahattiin noin 50 mm paksuiseksi, ja se otettiin rungon 3–6 metrin korkeudelta tyvestä mitattuna. Näytteen valinnan yhteydessä varmistettiin, ettei näytekiekon kohtaan sisältynyt oksankohtia, pihkataskuja tai muita kasvuhäiriöitä, jotka voisivat vaikuttaa vuosilustojen mittaustarkkuuteen.

Kiekko kuivattiin uunikuivausmenetelmän mukaisesti (kohta 9.2.4). Kuivatusta kiekosta sahattiin vannesahalla kapea siivu, joka sisälsi puun ytimen sekä kaikki vuosirenkaat pintaan saakka (Kuva 5). Siivun valinnassa otettiin huomioon puun mahdollinen soikeus ja epäsymmetrinen kasvu, jotta analyysiin päätyvä näyte edusti mahdollisimman hyvin puun keskimääräistä poikkileikkausrakennetta.

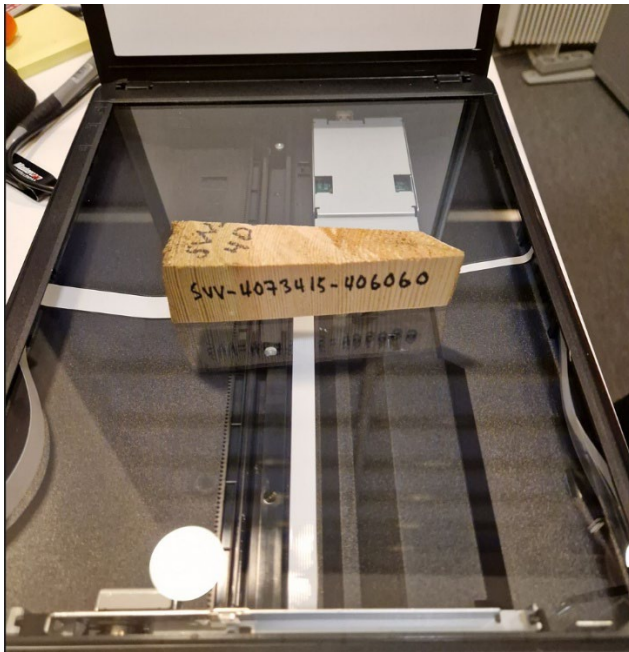


Kuva 5. Vuosilustonäytteen sahaus vannesahalla. Kuva Heikki Naumanen

Näytteen hionta ja skannaus

Näytesivujen päätypinta hiottiin reunanauhahiomakoneella. Hionta suoritettiin vaiheittain karkeuksilla P80, P120, P180 ja P240, jotta vuosilustojen rajat erottuivat selkeästi. Hionnan jälkeen näytteet puhdistettiin huolellisesti pölystä.

Näytteen tunniste (ID-numero) kiinnitettiin päätypintaan pienelle paperilapulle. Jokainen näyte skannattiin tasoskannerilla resoluutiolla 1600 dpi, ja skannatut kuvat tallennettiin jatkoanalyysiä varten (Kuva 6).

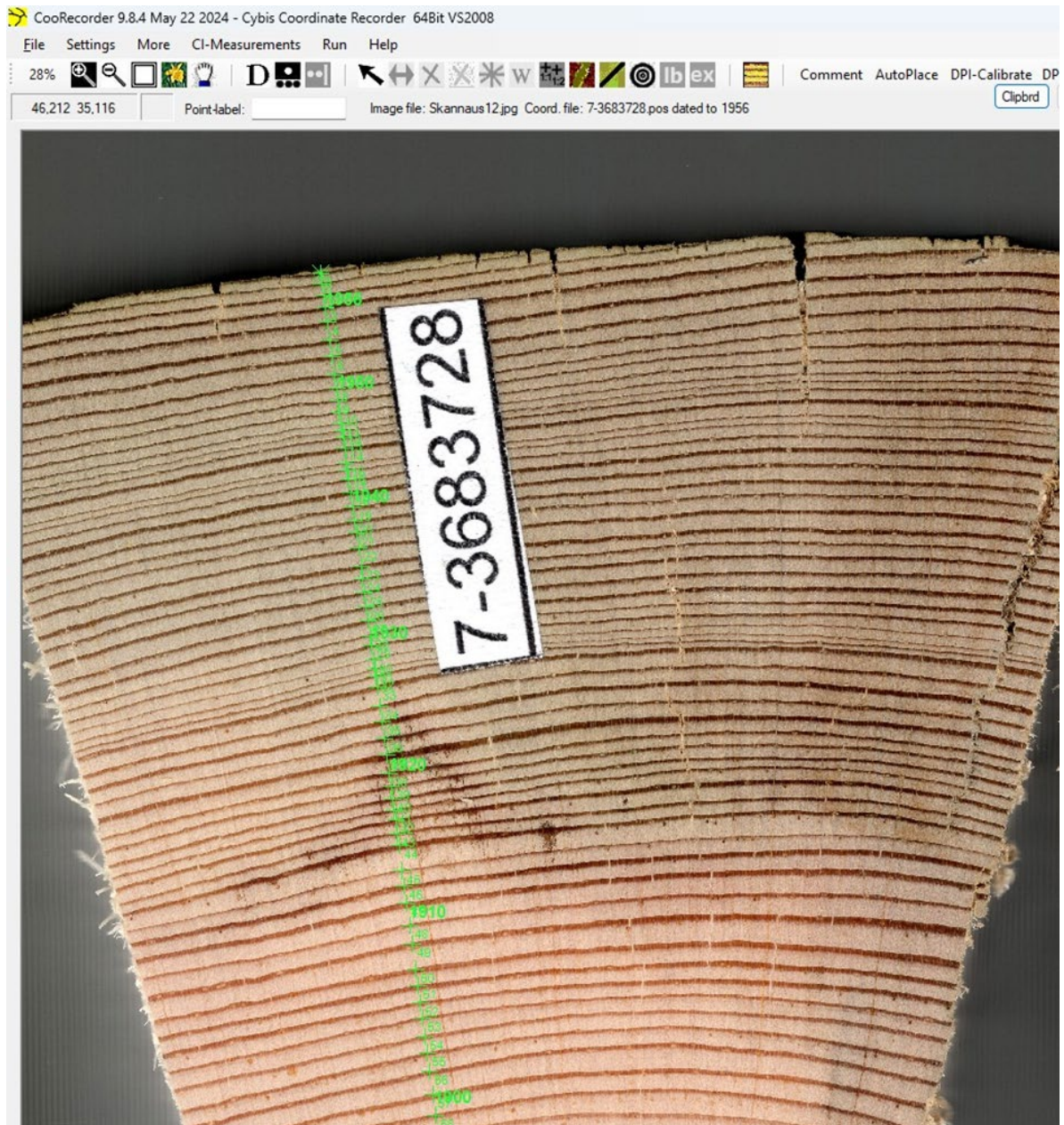


Kuva 6. Vuosilustonäytteen skannaus tasoskannerilla. Kuva Heikki Naumanen

Vuosilustojen mittaus

Skannatut kuvat analysoitiin CooRecorder-ohjelmistolla. Ohjelmassa merkittiin jokaisen näytteen vuosirenkaiden rajat ja annettiin uloimmalle vuosikasvulle pylvään kyllästysvuoteen perustuva vuosiluku (Kuva 7). CooRecorder mittaa vuosirenkaiden rajasta niiden etäisyyden toisistaan, kun tiedetään skannaustarkkuus, kuvan resoluutio dpi. CooRecorderin tuottamat mittausdatat (koordinaattitiedostot ja vuosilustolistat) vietiin CDendro-ohjelmaan. CDendrossa kaikkien pylväsnäytteiden tiedot koottiin yhteen, mikä mahdollisti:

- näytteiden keskinäisen vertailun
- pintapuun osuuden arvioinnin
- kasvun tasaisuuden tarkastelun
- mahdollisten poikkeamien tunnistamisen.



Kuva 7. Skannattuun kuvaan merkatut vuosilustot (vihreällä) ja näytteen ID liimattuna puuhun. Kuva Heikki Naumanen

Vuosilukujen määrittäminen

CooRecorder-ohjelmassa kullekin näytteelle määritettiin viimeiselle vuosikasvulle vuosiluku. Vuosiluvun laskenta perustui pylvään tunnettuun kyllästysvuoteen, josta vähennettiin 20 vuoden arvioitu aikaero. Tämä 20 vuoden arvio muodostettiin seuraavista tekijöistä:

- 2–3 vuotta: pylväät kuivuvat kaadon jälkeen ennen kyllästystä
- 1–3 vuosirengasta poistuu puun kuorinnan ja sorvauksen yhteydessä
- 3–6 metrin näytekorkeus vastaa puun iässä arviolta noin 15 vuotta, eli sitä ikää, jolloin puu on saavuttanut näytteenottokohdan korkeuden.

Kokonaisuutena nämä tekijät muodostavat noin 20 vuoden arvioidun vähennysluvun. Tämän avulla kullekin näytteelle määritettiin arvio siitä, milloin puu on aloittanut vuosittaisen kasvunsa. Vuosilukuinformaatio mahdollisti puiden ikärakenteen tarkastelun. Datan perusteella vanhimmat pylväät olivat peräisin 1800-luvulla alkaneesta kasvusta, kun taas nuorimmat olivat aloittaneet kasvunsa 1960-luvulla. Näiden aikakausien metsänhoitokäytännöt poikkesivat merkittävästi toisistaan, mikä tekee vuosiluvun määrittämisestä tärkeää taustatietoa. Menetelmä mahdollistaa sen arvioinnin, onko puun kasvun aikakaudella – ja siihen liittyvillä metsänhoitomenetelmillä – yhteyttä pylväiden lujuteen tai muihin puun ominaisuuksiin.

Laitteistokuvaus

Vannesaha

Näytesiivujen valmistuksessa käytettiin vannesahaa (Kuva 8), jolla saatiin näytekiekosta pieni siivu leikattua turvallisesti ja laadukkaasti.



Kuva 8. Vannesaha AGAZZANI GINO Mod. 700. Kuva Heikki Naumanen

Reunahiomakone

Näytesiivujen päätypinnat hiottiin reunanauhahiomakoneella (kuva 9), jossa käytettiin peräkkäisiä karkeuksia P80, P120, P180 ja P240. Laite mahdollisti pienten näytekappaleiden tasaisen ja hallitun materiaalinpoiston. Näytteen skannattava pinta tulee olla mahdollisimman

tasainen ja naarmuton, mikä oli tärkeää vuosilustojen selkeän erottumisen kannalta. Käytetty kone oli SCM Unilev 150.



Kuva 9. Reunahiomakone SCM Unilev 150. Kuva Puulaboratorion arkisto

Tasoskanneri

Hiotut näytepinnat digitoitiin tasoskannerilla, jonka optinen tarkkuus oli 1600 dpi (Kuva 10). Tämä tarkkuus oli riittävä vuosilustojen erottumiseen ja mittaamiseen CooRecorder-ohjelmassa. Näytteet asetettiin skannaukseen aina samalla orientaatiolla, jotta mittausgeometrian toistettavuus varmistui.



Kuva 10. Tasoskanneri Epson Perfection V39II. Kuva Heikki Naumanen

Vuosilustojen merkintä ja analyysi tehtiin erillisillä dendrologisilla ohjelmistoilla:

- CooRecorder: vuosirenkaiden digitaaliset mittaukset kuvista
- CDendro: näyteaineiston yhdistäminen, kronologiasarjat ja laajempi analyysi.

Ohjelmistot ajettiin tavallisella tutkimuskäytön tietokoneella, jonka näytön resoluutio mahdollisti tarkat piste- ja viivamerkinnot.

Kyllästeen tunkeuman mittaaminen

Punnitus-kuivaus-kokeeseen sahattuja kiekkoja hyödynnettiin kyllästeen tunkeuman määrittämiseen. Kiekot kuvattiin kohtisuorasti, jotta parallaksivirhe olisi mahdollisimman pieni. Parallaksi on mittaamiseen liittyvä virhe, joka johtuu havainnon kulmasta.

Kuvatut kiekot siirrettiin ImageJ-sovellukseen (versio 1.54g) yksi kerrallaan. Menetelmä oli hidas; ensin määritettiin kiekon koko pinta-ala (kuva 11) ja sen jälkeen kyllästeen tunkeuman peittämä alue. Jotta kyllästynyt alue saatiin mitattua, kiekon kuvasta määritettiin sydänpuun alue, joka vähennettiin koko kiekon pinta-alasta.

Saaduista pinta-aloista laskettiin kyllästyneen alueen pinta-ala kaavalla

$$p_i = \frac{A_k - A_s}{A_k} \cdot 100 \%$$

jossa

p_i on kyllästyneen alueen suhteellinen osuus [%]

A_s on sydänpuun pinta-ala, yksikötön

A_k on koko poikkileikkauskiekon pinta-ala, yksikötön

Kiekon mittaamisessa jouduttiin käyttämään arviomenetelmää, koska kuten tunnettua, pylväät eivät ole täysin pyöreitä. Mittausten yhtenevyyttä tarkistettiin kolmella kiekolla; kiekot mitattiin ja seuraavana päivänä ne mitattiin uudestaan. Saatuja prosenttiarvoja verrattiin samojen kiekkojen kesken toisiinsa. Tällä varmistettiin, että alueen määrittämisessä on sama tarkka logiikka. Todettiin, että mittausheitot samojen kiekkojen kesken olivat alle viisi prosenttia.



Kuva 11. Kuvassa on määritelty kiekon koko pinta-ala. Kuva Kai Möller

Määrittäjän oli tarkkailtava pinta-alaa, joka on keltaisen ympyrän ulkopuolella ja vajaata pinta-alaa, joka on ympyrän sisäpuolella. Jotta alue on oikein määritelty, keltaisen ympyrän ulkopuolella oleva alue tulee olla saman suuruinen kuin keltaisen ympyrän sisäpuolelle jäävä vajaa alue. Sama koski kyllästeen tunkeuman ja sydänpuun rajapintaa.

Premature failure of utility poles in Switzerland and Germany related to wood decay basidiomycetes

DOI 10.1515/hf-2016-0134

Received August 26, 2016; accepted September 30, 2016; previously published online xx

Abstract: In contact with soil, copper (Cu) formulations as preservatives are expected to inhibit wood decay by fungi and other soil-borne microorganisms. However, Cu-resistant brown-rot (BR) fungi lead to premature failures of utility poles at some sites. In this study, the service lives of 111 utility poles of Norway spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst) (73 from Switzerland and 38 from Germany) impregnated with Cu-based wood preservatives were investigated. Three segments of each utility pole were analyzed. The severity of decay was dependent on the preservative formulation. BR fungi and in particular *Antrodia* species were predominantly isolated from utility poles that were not treated with a co-biocide, e.g. boron (B). Cu-sensitivity of several isolated BR fungi was confirmed in studies on Cu-amended medium and in Cu-treated wood. Isolates of *Fibroporia vaillantii* and *Serpula himantoides* showed a higher Cu-tolerance than the highly Cu-tolerant *Empa* isolate *Rhodonia placenta* (*Empa* 45) or *Antrodia serialis*.

Keywords: *Antrodia serialis*, Cu-based wood preservatives, *Fibroporia vaillantii*, field tests, *Rhodonia placenta*, *Serpula himantoides*, wood poles (WPs)

***Corresponding author: Javier Ribera**, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Applied Wood Materials, Bio-engineered Wood, Lerchenfeldstrasse 5, CH-9014 St. Gallen, Switzerland; and Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Forstbotanik, Bertoldstrasse 17, D-79085 Freiburg i. Br., Germany, Phone: +41 58 765 7607, e-mail: javier.ribera@empa.ch

Mark Schubert and Marco Cartabia: Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Applied Wood Materials, Bio-engineered Wood, Lerchenfeldstrasse 5, CH-9014 St. Gallen, Switzerland

Siegfried Fink: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Forstbotanik, Bertoldstrasse 17, D-79085 Freiburg i. Br., Germany

Francis W.M.R. Schwarze: Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Applied Wood Materials, Bio-engineered Wood, Lerchenfeldstrasse 5, CH-9014 St. Gallen, Switzerland; and Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Forstbotanik, Bertoldstrasse 17, D-79085 Freiburg i. Br., Germany

Introduction

Wood has numerous ecological, biological, and economic advantages and is an important natural resource. Increasing demand for wood necessitates material saving, prolonged service life, and improved technologies of recycling. Wood products in soil contact (utility class 4) such as terraces, pergolas, stakes in vineyards, or utility poles, must be protected against microorganisms and insects (BS EN 460:1994). Cu-based preservatives are effective in this regard and have a low mammalian toxicity. Their fungicity is based on the sulfhydryl groups, which produce the coagulation of cytoplasmic proteins (Hughes and Poole 1989).

Approximately 800 M utility wood poles (WPs) are currently in service in Europe. In Switzerland and Germany, 0.56 and 4.8 M WPs are in use, respectively, and 6.000–8.000 and 200.000–300.000 new WPs are installed in these countries annually. However, 1% (service life <10 years) of these replacements are due to premature failures. Thus, the total economic damage because of premature failure amounts to approx. 36 M € per annum (Swisscom AG, BASF Wolman GmbH, pers. communication). In soil contact, brown-rot (BR) fungi are responsible for wood decay, and the mode of BR action in decay and the decay resistance in modified woods without biocides was reviewed by Ringman et al. (2014). BR biodegradation is frequently tested in soil block tests also in the context of commercial Cu-type preservatives (Schultz and Nicholas 2012); see also soil block results of Little et al. (2010) and Janzen and Nicholas (2016). Accelerated field stake tests for rapid assessment of wood preservative systems were proposed by Schultz and Nicholas (2010). Freitag et al. (2011) tested up to 15 years long protection of borate-treated Douglas fir WPs in field tests and Häger et al. (2001) reported the results of 31-year-long exposure of *Pinus sylvestris* L. stakes treated with ammoniacal Cu-based preservatives. Nevertheless, results of long-time decay behavior of WPs are seldom reported in the literature.

Since 1968, the majority of WPs in Germany have traditionally been impregnated with Cu-Cr (CC) by means of vacuum pressure processes. The recommended retention

of CC for utility class 4 is 9 kg m^{-3} in Germany and 12 kg m^{-3} in Switzerland (Quitt 2014; Hach and Schwarze 2016). Nevertheless, these retentions do not completely protect wood against wood decay fungi. Several BR fungi have the ability to grow and survive at Cu^{2+} concentrations up to 1.6 mM (Hughes 2004) or 100 mg kg^{-1} (Gadd 2007). Diverse mechanisms involved in the Cu-tolerance process have been described such as ability to absorb Cu into cell wall, extracellular chelation by metabolites, and intracellular complexation with metallothioneins (Young 1961; Cervantes and Gutierrez-Corona 1994; Civardi et al. 2015b; Kartal et al. 2015). For example, *Wolfiporia cocos*, *Gloeophyllum trabeum*, and *Rhodonia placenta* (Empa 45) can degrade wood treated with Cu-based preservatives even at retention rates of 34.4 kg m^{-3} (De Groot and Woodward 1999, Sierra-Alvarez 2007).

The number of premature failures of utility poles shows increasing tendencies (Bollmus et al. 2012) but there are only very few field studies examining the role of destroying fungi in these cases in Europe. In contrast, in North America, chromated-copper-arsenate (CCA) is still common for protection of utility poles (Bolin and Smith 2011) and thus problems in this regard are negligible (Freeman and McIntyre 2008).

The present study is dedicated to this problem, and 111 utility poles from Switzerland and Germany will be investigated in terms of the preservative formulation used and the service lives of the poles. Moreover, the type of fungal decay and the decay basidiomycetes should be identified. The copper sensitivity of the isolated strains will also be examined. As indicated above, long-term field decay results are seldom reported, and thus the expectation is that the result of the present paper will contribute

to the practical evaluation of wood-protecting systems with service lives between 1 and 68 year.

Materials and methods

Distribution of the poles: A total number of 111 utility WPs of Norway spruce (*Picea abies*) were collected from various sites in Germany and Switzerland. The collection sites were selected from regions with pole stability problems. The segments were excised from each pole at ground level, at 30 cm above ground, and 30 cm below ground level (Figure 1a). The segments were immediately wrapped in kraft paper after marking for shipping to limit contamination during transport to the laboratory. The exact place where the WPs were collected can be requested from the research laboratory of the corresponding author.

Wood preservatives and decay types: Wood preservatives in treated WPs were identified according to Theden and Kottlors (1965) and AWP (1999). Most WPs in Switzerland and all WPs in Germany were incised, i.e. penetration of preservatives was homogeneously distributed in the sapwood (Figure 1b). Cu-based wood preservatives were qualitatively analyzed with a reagent containing 2% potassium ferrocyanide (Sigma-Aldrich, Buchs, Switzerland). The reagent induces a brownish color in Cu-treated wood due to the reaction of Cu to copper hexacyanoferrate. The presence of boron (B) in the WP segments was observed after applying two different reagents: 1. A solution of 20 ml of HCl (Sigma-Aldrich) and 80 ml of ethanol (Sigma-Aldrich) with 5 g of salicylic acid (Sigma-Aldrich) was applied to the wood surface. 2. After 5 min, a 2nd solution of 10 g of curcumin (Sigma-Aldrich) dissolved in 100 ml of ethanol (Sigma-Aldrich) was sprayed onto the wood surface. After 40 min, a reddish color was observed as a sign of positive reaction. Cr was determined by applying a solution of 1 g of diphenylcarbazide (Sigma-Aldrich) with 5 ml of acetic acid (Sigma-Aldrich) and 15 ml of ethanol 95% (Sigma-Aldrich). This reagent induces a purple color in the presence of Cr (III). The wood decay type was determined by its typical appearance (Figure 2), e.g. cubical rot typical of BR and/or wood erosion from the surface, which

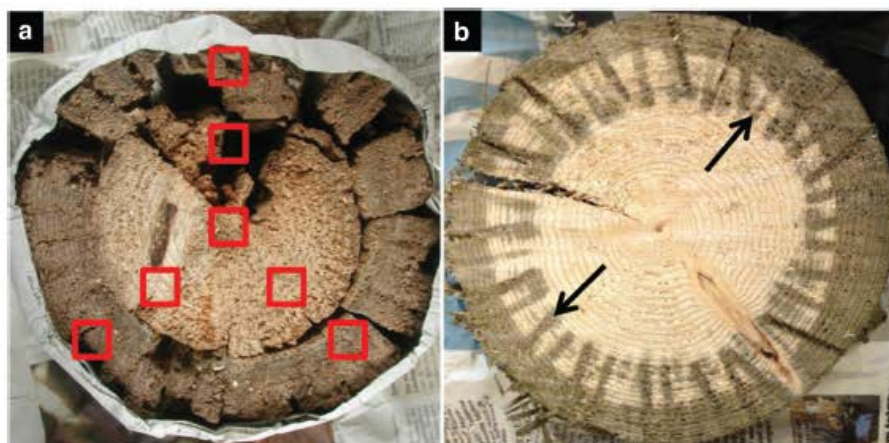


Figure 1: (a) Wood regions from which wood-destroying basidiomycetes were randomly isolated. (b) Cross section with numerous incisions (arrows).

Tiivistelmä:

Kosketuksessa maan kanssa kuparia (Cu) sisältävien puunsuoja-aineiden odotetaan estävän puun lahoamista sienien ja muiden maaperän mikro-organismien vaikutuksesta. Kuitenkin Cu-kestävät ruskolahon (BR) sienet aiheuttavat joillakin paikoilla sähköpylväiden ennen aikaista vaurioitumista. Tässä tutkimuksessa selvitettiin 111 kuparisuolapitoisilla kyllästeillä käsitellyn kuusen (*Picea abies* (L.) H. Karst) pylvään käyttöikä (73 Sveitsistä ja 38 Saksasta). Jokaisesta pylvästä analysoitiin kolme näytettä. Lahoamisen voimakkuus riippui käytetystä kyllästeestä. BR-sieniä ja erityisesti *Antrodia*-sukuja eristettiin pääasiassa pylväistä, joita ei ollut käsitelty biocideilla kuten boorilla (B). Kosketusherkkien BR-kantojen Cu-herkkyttä tutkittiin Cu:ta sisältävässä kasvualustassa ja Cu-käsitellyssä puussa. *Fibroporia vaillantii*- ja *Serpula himantoides* -kannoilla oli korkeampi Cu-sietokyky kuin *Empa:n* Cu-kestävällä vertailukannalla *Rhodonía placenta* (*Empa* 45) tai *Antrodia serialis* -sienellä.

Avainsanat: *Antrodia serialis*, kuparisuolakyllästeet, kenttäkokeet, *Fibroporia vaillantii*, *Serpula himantoides*, *Rhodonía placenta*, sähköpylväät

Johdanto

Puu omaa ekologiaa, biologisia ja taloudellisia etuja ja on merkittävä uusiutuva luonnonvara. Kasvava puun kysyntä edellyttää materiaalien säästöä, pidennettyä käyttöikää ja parannettuja kierrätysmenetelmiä. Maaperäkosketuksessa olevat puutuotteet (käyttöluokka 4), kuten terassirakenteet, pergolat, viinitarhojen tukipaaluja tai sähköpylväät, on suojattava mikro-organismeilta ja hyönteisiltä (BS EN 460:1994). Cu-pohjaiset kyllästeet ovat tehokkaita tässä tarkoituksessa ja niiden myrkyllisyys nisäkkäille on alhainen. Niiden sienituhovaikutus perustuu sulfyyliyhdistyksiin, jotka aiheuttavat proteiinien sytoplasman koaguloitumisen (Hughes ja Poole 1989).

Euroopassa on käytössä noin 800 miljoonaa puusta sähköpylvästä (WP). Sveitsissä ja Saksassa asennetaan vuosittain noin 0,56 ja 4,8 miljoonaa pylvästä vastaavasti, mikä tarkoittaa 6 000–8 000 ja 200 000–300 000 uutta pylvästä vuodessa. Näistä noin 1 % (käyttöikä <10 vuotta) edustaa ennen aikaista vaurioituneita pylväitä. Tämän seurauksena ennen aikaisten vaurioiden aiheuttamat taloudelliset kokonaisvahingot ovat noin 36 miljoonaa euroa vuodessa (Swisscom AG, BASF Wolman GmbH, pers. kommunikointi).

Maaperäolosuhteissa ruskolahon (BR) sienet ovat vastuussa puun lahoamisesta, ja ruskolahon vaikutus sekä kyllästeiden tehokkuus ilman biosidejä tunnetaan Ringmanin ym. (2014) mukaan. BR:n aiheuttamaa biodegeneraatiota tutkitaan usein maaperäblokkitesteissä kaupallisten Cu-kyllästeiden yhteydessä (Schultz ja Nicholas 2012). Kiihdytettyjä kenttäkokeita puunsuoja-aineiden arvioimiseksi ehdottivat Schultz ja Nicholas (2010). Freitag ym. (2011) testasivat jopa 15 vuoden suojausta boorikäsitellyille Douglas-kuusipylväille maastokokeissa, ja Häger ym. (2001) raportoivat 31 vuoden altistuksessa ammoniakkikuparikyllästeellä käsiteltyjen mäntypaaluelementtien tuloksia. Silti kirjallisuudessa esiintyy edelleen raportteja puupylväiden pitkäaikaisesta hajoamisesta.

Vuodesta 1968 lähtien valtaosa Saksan sähköpylväistä on kyllästetty Cu-Cr (CC) -yhdisteillä painekyllästysprosessilla.

Kupari-kromi-kyllästeen (CC) suositeltu pitoisuus käyttöluokassa 4 on Saksassa 9 kg/m³ ja Sveitsissä 12 kg/m³ (Quitt 2014; Hach ja Schwarze 2016). Näistä huolimatta nämä pitoisuudet eivät täysin suojaa puuta lahoa aiheuttavilta sieniltä. Useat ruskolahosienet (BR) kykenevät kasvamaan ja selviytymään Cu²⁺-pitoisuuksissa jopa 1,6 mM (Hughes 2004) tai 1000 mg/kg (Gadd 2007). Cu-sietokyvyn mekanismeja on kuvattu moninaisiksi: Cu:n sitoutuminen soluseinään, sen kelatoituminen solun ulkopuolisilla metaboliiteilla

sekä metallotioniiniinien muodostamat solunsisäiset kompleksit (Young 1961; Cervantes ja Gutierrez-Corona 1994; Civar di et al. 2015b; Kartal et al. 2015). Esimerkiksi *Wolfiporia cocos*, *Gloeophyllum trabeum* ja *Rhodonía placenta* (Empa 45) voivat hajottaa Cu-käsiteltyä puuta, vaikka kyllästeiden retentiotaso olisi 34,4 kg/m³ (De Groot ja Woodward 1999; Sierra-Alvarez 2007).

Sähköpylväiden ennen aikaisten vaurioiden määrä on kasvussa (Bollmus et al. 2012), mutta Euroopassa on vain hyvin vähän kenttätutkimuksia, joissa tarkastellaan näissä tapauksissa esiintyviä lahosieniä. Pohjois-Amerikassa kromikupariarsenaatti-kyllästeen (CCA) käyttö on edelleen yleistä pylväiden suojauksessa (Bolin ja Smith 2011), ja tämän vuoksi ongelmat ovat siellä vähäisempiä (Freeman ja McIntyre 2008).

Tämä tutkimus keskittyy kyseiseen ongelmaan: 111 sveitsiläistä ja saksalaista sähköpylvästä tutkittiin kyllästysaineiden koostumuksen ja pylväiden käyttöiän osalta. Lisäksi tunnistettiin lahotyyppit ja basidiomykeetti-sienet, jotka aiheuttivat lahoamisen. Myös eristettyjen sienikantojen kuparinsietokyky tutkittiin. Kuten edellä mainittiin, pitkäaikaiset kenttälahotulokset ovat harvinaisia, joten tämän tutkimuksen odotetaan tuottavan käytännön hyötyä puunsuojausjärjestelmien arviointiin 1–68 vuoden käyttöikäskaalassa.

Aineisto ja menetelmät

Pylväiden jakautuminen

Yhteensä 111 kuusesta (*Picea abies*) valmistettua sähköpylvästä kerättiin useilta alueilta Saksasta ja Sveitsistä. Keräyspaikat valittiin pylväiden vakauserongelmien perusteella. Jokaisesta pylvästä leikattiin segmentti: 20 cm maanpinnan yläpuolelta, 30 cm maanpinnan tasolta ja 30 cm maanpinnan alapuolelta (kuva 1a). Segmentit käärittiin välittömästi kraftpaperiin ja merkittiin kuljetuskontaminaation minimoimiseksi. Näytteiden tarkka keräyspaikka toimitettiin vastaavalta tutkimuslaboratoriolta.

Kyllästeet ja lahotyyppit

Kyllästeet tunnistettiin Thedenin ja Kottlorsin (1965) sekä AWPA:n (1999) menetelmien mukaan. Useimmat sveitsiläiset pylväät ja kaikki saksalaiset pylväät olivat viillettyjä, mikä johti kyllästeaineiden tasaisempaan tunkeutumiseen pintapuuhun (kuva 1b).

Kuparipohjaisia kyllästeitä analysoitiin laadullisesti reagenssilla, joka sisälsi 2 % kaliumferrisyanaattia (Sigma-Aldrich, Buchs, Sveitsi). Reagenssi värjäsi Cu-käsitellyn puun ruskeaksi, koska Cu reagoi kuusiarvoisen rauta-syanaatti-ionin kanssa. Boorin (B) läsnäolo tunnistettiin kahdella eri reagenssilla:

1. **Liuos 20 ml suolahappoa (HCl) + 80 ml etanolia + 5 g salisyylihappoa (Sigma-Aldrich)** – levitettiin puun pinnalle.
2. **Liuos 10 g kurkumiinia (Sigma-Aldrich) / 100 ml etanolia (95 %)** – suihkutettiin pinnalle; 40 minuutin jälkeen näkyi punertava väri positiivisena reaktiona.

Kromi (Cr) tunnistettiin seuraavasti: puuhun levitettiin 1 g difenylkarbatsidiinia (Sigma-Aldrich), joka oli liuotettu 5 ml:aan etikkahappoa ja 15 ml:aan 95 % etanolia. Tämä reagenssi muodostaa purppuran värin Cr (III):n läsnä ollessa.

Lahotyyppi määritettiin näytteen makroskooppisten piirteiden perusteella (kuva 2), esim. BR:lle tyypillinen kuutiolaho tai pinnalta alkava puun eroosio.

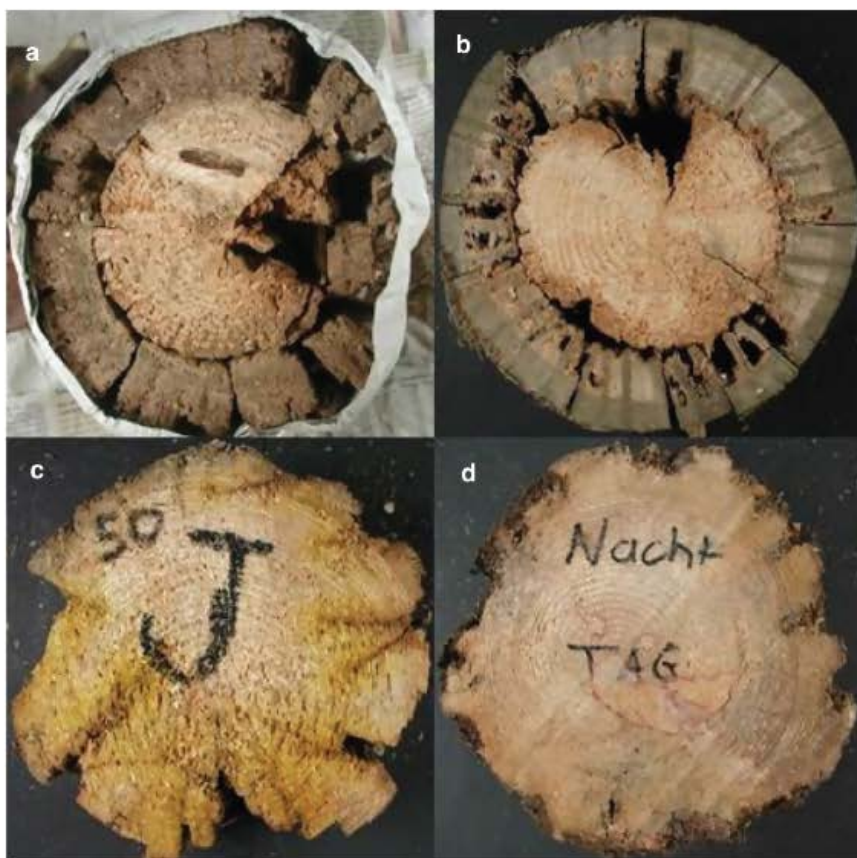


Figure 2: Damage of the selected poles by brown-rot (BR) (a,b) and soft-rot (SR) (c,d) fungi.

is typical of soft-rot (SR) (Schwarze 2007; Arantes et al. 2012; Arantes and Goodell 2014; Daniel 2014).

Wood decay basidiomycetes: For the isolation of wood decay basidiomycetes, seven increment cores were extracted aseptically from each WP segment and three smaller wood samples (3×3 mm) from each core were placed into Petri dishes (Figure 1a) containing 20 ml of 2% Malt Extract Agar (MEA, OXOID, Pratteln, Switzerland) with 2 ml of thiabendazole (Sigma-Aldrich) dissolved in lactic acid (Merck, Darmstadt, Germany), and then incubated at $22 \pm 1^\circ\text{C}$ and 70% relative humidity (RH) for 10 days. Thiabendazole-malt extract agar allows the growth of wood decay fungi but suppresses the growth of other fungi (Sieber 1995; Baum et al. 2003; Hopkins et al. 2005; Schwarze et al. 2012). Isolates were subcultured on Petri dishes containing 2% MEA and incubated at $22 \pm 1^\circ\text{C}$ and 70% RH in the dark. Isolates were identified microscopically (Stalpers 1978; Lombard and Chamuris 1990; Schmidt and Moreth 2003; Huckfeldt and Schmidt 2006). Additionally, the rDNA was extracted according to the protocol described in the kit "Extract N-Amp Plant PCR Kit" (Sigma Aldrich). In cases where the above kit did not extract the target rDNA, a second procedure described in "Fungi/Yeast Genomic DNA isolation Kit" (NorGen Biotech corp., Thorold, Canada) was used. The internal transcribed spacer (ITS1-5.8S-ITS4) of the extracted rDNA was amplified and sequenced for each strain. The primers for identification of the isolated fungi were designed according to the standard primers from White et al. (1990) (ITS1: 5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3' and

ITS4: 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') and synthesized at Microsynth (Balgach, Switzerland). Amplification of the ITS region was achieved according to the polymerase chain reaction (PCR) protocol (White et al. 1990) with the following cycling parameters: Initial denaturation for 3 min at 94°C , 25 cycles of annealing for 1 min at 94°C , extension for 1 min at 48°C , denaturation for 2 min at 72°C , and final extension for 10 min at 72°C . PCR products were sequenced and the obtained sequences were matched based on the basic local alignment search tool of National Centre for Biotechnology Information (NCBI).

Growth of BR fungi on CuSO_4 -amended MEA and decay evaluation: The Cu-sensitivity of each isolated basidiomycete species was evaluated with CuSO_4 (Sigma-Aldrich). *R. placenta* (Empa 45) served as a positive control due to its known high Cu-tolerance (Sierra-Alvarez 2007; Civardi et al. 2015a). Petri dishes containing 20 ml of 2% MEA and a range of CuSO_4 concentrations (0.000, 0.025, 0.050, 0.075, 0.1, 0.5, and 1%) were prepared according to Schmidt and Moreth (1996). All Petri dishes were inoculated centrally and incubated at $22(\pm 1)^\circ\text{C}$ and 70% RH for 10 days. Each fungal isolate was tested on five replicates per Cu concentration. The growth rate (mm day^{-1}) was determined by colony diameter measurements carried out along two perpendicular axes after 24 h (Schubert et al. 2008; Schwarze et al. 2012). Additionally, sapwood specimens of Scots pine $0.5 \times 0.5 \times 0.2 \text{ cm}^3$ were vacuum-pressure impregnated with CuSO_4 solutions (0.00, 0.025, 0.050, 0.075, 0.1, 0.5, or 1%) according to

Valittujen pylväiden vauriot: ruskolaho (BR) (a, b) ja pehmeälaho (SR) (c, d).

Pehmeälaholle (SR) tyypilliset piirteet on kuvattu Schwarze (2007), Arantes et al. (2012), Arantes ja Goodell (2014) sekä Daniel (2014).

Puun lahosienien (basidiomykeettien) eristäminen

Puun lahottajasienien eristämiseksi jokaisesta pylväsegmentistä otettiin seitsemän puusydämen näytettä aseptisesti. Lisäksi kustakin segmentistä otettiin kolme pienempää näytettä (3×3 mm), jotka asetettiin Petrimaljoihin (kuva 1a). Maljoissa oli 20 ml 2-prosenttista mallasmaljaa (MEA, OXOID, Pratteln, Sveitsi) sekä 2 ml tiabendatsolia (Sigma-Aldrich), joka oli liuotettu maitohappoon (Merck, Darmstadt, Saksa). Näytteitä inkuboitiin 22 ± 1 °C lämpötilassa ja 70 % suhteellisessa kosteudessa (RH) 10 päivän ajan.

Tiabendatsoli-mallas pohja sallii lahottajasienten kasvun, mutta estää muiden sienten kasvua (Sieber 1995; Baum et al. 2003; Hopkins et al. 2005; Schwarze et al. 2012).

Eristetyt sienet siirrettiin uusiin Petrimaljoihin, jotka sisälsivät 2 % MEA:ta, ja niitä kasvatettiin 22 ± 1 °C ja 70 % RH olosuhteissa pimeässä. Sienten rakenteet tarkasteltiin mikroskooppisesti (Stalpers 1978; Lombard ja Chamuris 1990; Schmidt ja Moreth 2003; Huckfeldt ja Schmidt 2006).

DNA eristettiin sienimaljoista ohjeiden mukaan käyttäen **Extract-N Amp Plant PCR Kit** -sarjaa (Sigma-Aldrich). Koska menetelmä ei eristänyt tarpeeksi DNA:ta, käytettiin vaihtoehtoisia menetelmiä ("Fungi/Yeast Genomic DNA Purification Kit", NorGen Biotek Corp., Thorold, Kanada).

Eristetystä ribosomaalisesta DNA:sta (rDNA) amplifioitiin sisäinen transkriptiotila (ITS1.5–85 – ITS4) ja saadut sekvenssit määritettiin. Lajien tunnistus tehtiin vertaamalla sekvenssejä White et al. (1990) mukaiseen tietokantaan (ITS1: 5'-TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3' ja ITS4: 5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3'). Sekvensointi tehtiin Microsynthissä (Balgach, Sveitsi).

Amplifiointi suoritettiin PCR:llä White et al. (1990) menetelmän mukaan seuraavilla sykleillä:

- Alkusulatus 3 min 94 °C
- 25 sykliä:
 - o 1 min 94 °C
 - o 1 min 48 °C
 - o 2 min 72 °C
- Lopullinen pidennys 10 min 72 °C

Saatuja sekvenssejä verrattiin NCBI:n (National Centre for Biotechnology Information) tietokannan kohdistustyökalulla.

BR-sienten kasvu CuSO₄-lisätyllä MEA:lla ja lahon arviointi

Kunkin eristetyt lahottajabasidiomykeetin kuparinsietokykyä arvioitiin CuSO₄:llä (Sigma-Aldrich). *Rhodonía placenta* (Empa 45) toimi positiivisena kontrollina sen tunnetun kuparinsietokyvyn vuoksi (Sierra-Alvarez 2007; Civar di et al. 2015a).

Petrimaljoihin lisättiin 2 % MEA:ta ja eri pitoisuuksia CuSO₄:ää (0.000, 0.025, 0.050, 0.075, 0.100 % w/w) ja ne sekoitettiin Mortonin ja Moretzin (1959) menetelmällä.

Näytteet (n = 4 per pitoisuus) inokuloitiin keskustaan ja inkuboitiin 22 ± 1 °C ja 70 % RH olosuhteissa 10 päivää. Kasvunopeus (mm/vrk) laskettiin mittaamalla sienet 24 tunnin välein (Schubert et al. 2008; Civardi et al. 2015a).

Lahon arvioinnissa käytettiin 5 × 0.5 × 0.2 cm³ lehtikuusipuusta valmistettuja kuutioita, jotka oli kyllästetty CuSO₄-liuoksilla (0.000, 0.025, 0.050, 0.075, 0.1, 0.5, 1 % w/v) EN113 (1996) mukaisesti.

EN 113 (1996). Before incubation, wood samples were sterilized with ethylene oxide (Sigma-Aldrich) and then placed onto 20 ml of 2% MEA. Each fungal isolate was inoculated as described above. After 8 weeks, the wood specimens were removed, carefully cleaned with a brush, dried at room temperature for 2 weeks, oven dried (103°C), and the mass loss (ML) was recorded.

Statistical analysis: Growth data were log-transformed and %-data, such as the wood weight loss (WL), were arcsine-transformed prior to analysis of variance (ANOVA) and back-transformed to numerical values for presentation (expressed as mean $\pm$ standard error). Means were separated using Dunnett's test at significance levels of $P < 0.05$. The statistical package SPSS® (Version 22, SPSS Inc., Chicago, IL, USA) was adopted for this purpose.

Results and discussion

Determination of wood preservatives and decay types in utility poles

Important differences in the utility WPs from both countries are evident (Table 1). In Germany, the mean service life of WPs (9.6 year) was far lower than in Switzerland (32 year) (Table 1). A great diversity of wood preservative formulations was identified in WP segments from Switzerland (Table 1). Only 33% of the analyzed segments from the WPs in Switzerland contained CC or Cu-Cr-B (CCB). The rest of the analyzed segments (77%) contained a range of other preservative formulations. Around 90% of the WPs impregnated with wood preservative formulations other than CC or CCB were installed before 1990. CC or CCB were identified in all WPs from Germany and all of them were installed after 1990. Expectedly, the different formulations were applied in the last 50 y. During this period, about 1500 wood preservative formulations were available on the German market (Mai and Militz 2007).

Table 1: Analysis of removed utility wood poles (WPs).

Parameter	Germany	Switzerland
Number of poles (<i>n</i>)	38	73
Range of service life (y)	1–22	7–68
Mean service life (y)	9.6	32
Identified preserv.: CC (%)	87	16
Identified preserv.: CCB (%)	13	17
Other preservatives* (%)	0	67
Main decay type (%)	BR	SR
	98.5	63
BR fungi isolations (%)	45	10

*Others: Pole segments without CC or CCB, e.g. CCF (fluorine) or CCA (arsenic). BR, Brown-rot; SR, soft-rot.

In the 1990s, the EU started to regulate active ingredients against wood decay organisms in order to guarantee a low impact on human beings and the environment. Hence, the use of some compositions was restricted (BS 335-1 1992; European directive 98/8/EG 1998).

In Germany, the susceptibility of WPs for BR colonization was higher than in Switzerland (Table 1). Around 98% of the WPs showed symptoms of BR decay, which were all treated with CC or CCB. In contrast, in Switzerland, mainly SR decay was detected in 63% of the segments and only three of them were impregnated with CC or CCB. Moreover, 92% of the WPs decayed by SR were installed before the 1990s and strong decay was not detectable. Accordingly, the WP susceptibility to BR fungi is strongly related to the application of recent wood preservative formulations without an effective co-biocide and only with a weak fixation of Cu in the wood (Humar et al. 2007). The finding in the present paper confirms the early observations of Leithoff et al. (1995), who demonstrated in a choice test the preference of *Antrodia* spp. for Cu-treated wood in combination with different amended media. As shown earlier, Cu-based salts are effective for protecting wood in soil contact against SR fungi, but are less effective against BR fungi (Woodward and De Groot 1999; Green and Clausen 2003; Freeman and McIntyre 2008).

Although the heaviest damage by BR fungi was observed at ground level, in some cases the damage had also spread above and below ground level. Twenty and 58% of the WPs from Switzerland and Germany, respectively, had decay below ground level. The decay observed above ground level was similar in both countries (9 and 13% in Switzerland and Germany, respectively). Various factors may explain the activity of BR fungi at ground level. For instance, the moisture content in the first layers of the soil maintains the wood above 30%, which is optimal for BR decay (Palfreyman and Bruce 1994; Kües et al. 2007). Additionally, elevated preservative leaching has been related to the soil composition due to the affinity of the organic soil constituents to bound preservative compounds and the solubilization of metals (Cu and Cr) at low pH in soils due to the high content of organic acids (Freeman and McIntyre 2008).

Isolation and identification of wood decay basidiomycetes

In the present study, the total isolation ratio of BR fungi from WPs (45 and 10% in Germany and Switzerland, respectively) was comparable to that in previous studies (seven up to 60%) (Eslyn 1970; Zabel et al. 1985; Bollmus et al. 2012). Although almost 7000 isolations were made, it

Ennen inkubointia puunäytteet sterilointiin etyleenioksidilla (Sigma-Aldrich) ja sijoitettiin sen jälkeen 20 ml:n 2 % MEA-maljoihin. Jokainen sienikanta inokuloitiin samalla tavalla kuin aiemmin kuvattiin. Kahdeksan viikon jälkeen puunäytteet poistettiin, puhdistettiin varovasti harjalla, kuivattiin huoneenlämmössä kaksi viikkoa ja lopuksi uunikuivattiin (103 °C). Näytteiden massahäviö (ML) mitattiin.

Tilastoanalyysi

Kasvudata log-muokattiin ja prosenttidataa, kuten puun painohäviö (WL), muokattiin arkinsiirrolla normaalijakautuman saavuttamiseksi (esitettyinä keskiarvo $\pm$ keskihajonta). Keskiarvot eroteltiin Dunettin testillä merkitsevyystasolla $P < 0,05$. Tätä tarkoitusta varten käytettiin SPSS-ohjelmistoa (versio 22, SPSS Inc., Chicago, IL, USA).

Tulokset ja keskustelu

Puun kyllästeiden ja lahotyyppien määräytyminen sähköpylväissä

Saksasta ja Sveitsistä peräisin olevien pylväiden välillä on tärkeitä eroja (taulukko 1). Saksassa pylväiden keskimääräinen käyttöikä (9,6 vuotta) oli huomattavasti lyhyempi kuin Sveitsissä (32 vuotta).

Sveitsiläisten pylväiden näytteistä havaittiin suuri vaihtelu käytetyissä puunsuoja-aineissa (taulukko 1). Vain 33 % näytteistä oli käsitelty CC- tai Cu-Cr-B (CCB) -kyllästeillä. Loput 77 % sisälsivät muita kyllästeitä. Noin 90 % kaikista ei-CC/CCB-käsitellyistä pylväistä oli kyllästetty ennen vuotta 1990. Saksassa taas kaikki pylväät oli kyllästetty CC:llä tai CCB:llä, ja ne kaikki oli asennettu vuoden 1990 jälkeen.

On odotettavaa, että viimeisen 50 vuoden aikana on käytetty laaja kirjo erilaisia kyllästeformulointeja: tämän ajanjakson aikana Saksan markkinoilla oli noin 1500 erilaista puunsuoja-ainetta (Mai ja Militz 2007).

Taulukko 1. Poistettujen sähköpylväiden analyysi

Parametri	Saksa	Sveitsi
Pylväiden määrä (n)	38	73
Käyttöiän vaihteluväli (v)	1–22	7–68
Keskimääräinen käyttöikä (v)	9,6	32
Tunnistetut kyllästeet: CC (%)	87	16
Tunnistetut kyllästeet: CCB (%)	13	67
Muut kyllästeet (%)	0	17
Lahotyyppi (%)	BR 98,5 SR 63	
BR-sienieristykset (%)	98,5	63

(Muut: pylväät ilman CC/CCB-käsittelyä, esim. CCF (fluori) tai CCA (arseeni). BR = ruskolaho; SR = pehmeälaho.)

BR-lahottajien esiintyminen

1990-luvulla EU alkoi säädellä puunsuoja-aineiden tehoaineita ihmis- ja ympäristöterveyden turvaamiseksi, minkä seurauksena monien ainekoostumusten käyttö rajoitettiin (BS 335-1 1992; EU-direktiivi 98/8/EG 1998).

Saksassa BR-sienten kolonisaatio oli selvästi yleisempää kuin Sveitsissä (taulukko 1). Noin 98 % saksalaisista pylväistä osoitti BR-lahoa, ja kaikki näistä oli käsitelty CC- tai CCB-kyllästeillä. Sveitsissä sen sijaan 63 % näytteistä osoitti SR-lahoa, ja vain pieni osa oli käsitelty CC- tai CCB-aineilla. Lisäksi 92 % SR-lahon vaivaamista sveitsiläisistä pylväistä oli asennettu ennen 1990-lukua, eikä voimakasta BR-lahoa havaittu.

Tästä seuraa, että BR-sienien aiheuttama vaurioitumisherkkyys liittyy vahvasti uusiin puunsuoja-aineisiin, jotka eivät sisällä biosideja ja joissa kupari sitoutuu heikosti puuhun (Humar et al. 2007).

Tämä tutkimus tukee aiempia havaintoja (Leithoff et al. 1995), joiden mukaan *Antrodia*-suvun sienet suosivat Cu-käsiteltyä puuta, jos puussa on lisättyjä mineraaleja. Vaikka kuparisuolat suojaavat puuta SR-laholta maaperäkosketuksessa, ne ovat huomattavasti vähemmän tehokkaita BR-lahoa vastaan (Woodward ja De Groot 1999; Green ja Clausen 2003; Freeman ja McIntyre 2008).

Lahon sijainti pylväässä

Vaikka BR-laho oli vahvinta maanpinnan tasolla, sitä havaittiin usein myös maan ylä- ja alapuolella:

- Sveitsi: 20 % pylväistä lahonnut maanpinnan alapuolella
- Saksa: 58 % pylväistä lahonnut maanpinnan alapuolella

Yläpuolinen laho oli molemmissa maissa verraten samankaltaista (9 % Sveitsi, 13 % Saksa).

BR-lahoa edistäviä tekijöitä voivat olla mm.:

- **Korkea kosteus** puun ulkokerroksissa (yli 30 %), joka on optimaalinen BR-sienille (Palfreyman & Bruce 1994)
- **Kyllästeiden huuhtoutuminen**, joka liittyy puun orgaanisten komponenttien affiniteettiin ja metallien (Cu, Cr) liukenemiseen happamissa olosuhteissa (Freeman ja McIntyre 2008)

Lahottajabasisidiomykeettien eristäminen ja tunnistaminen

Tässä tutkimuksessa BR-sienten kokonaiseristysprosentti (45 % Saksassa ja 10 % Sveitsissä) oli samankaltainen kuin aiemmissa tutkimuksissa (jopa 60 %; Eslyn 1970; Zabel et al. 1985; Bollmus et al. 2012).

Vaikka eristysä tehtiin yhteensä lähes 7000...(s. 11)

was impossible to isolate all BR fungi present in the wood due to contamination by other fungi from the environment that were able to rapidly colonize the substrate, e.g. *Trichoderma* spp., *Penicillium* spp., and *Mucor* spp. For this reason, the presence of other BR fungi in the WPs cannot be completely excluded, as described by Pfeffer et al. (2012).

Fungi were differentiated based on macro- and micro-morphological features, such as clamp morphology, hyphal diameter, presence of hyphal strands, or color and odor of the mycelium (Nobles 1965; Stalpers 1978; Lombard and Chamuris 1990; Schmidt and Moreth 2003; Huckfeldt and Schmidt 2006). Such keys are useful for fungi identification, but nevertheless, confusions, doubts, or misidentification may occur at species level (Schmidt and Kebernik 1989; Palfreyman and Bruce 1994). Therefore, in the present study, all isolates were additionally identified by molecular biological methods.

The main wood decay basidiomycete was identified as *Antrodia serialis*, which was present on 32 and 75% of WPs from Germany and Switzerland, respectively (Table 2). *Fibroporia vaillantii* was isolated from 23% of the WPs, *Serpula himantoides* was the third most-abundant isolated fungus (18%), and *Sistotrema brinkmannii* was isolated twice from poles in Germany. The other species were isolated only once from the WP segments in both countries (Table 2). All identified wood decay basidiomycetes have been reported previously in association with decay of wood products (Duncan and Lombard 1965; Wilcox and Dietz 1997).

Growth of BR fungi on CuSO₄-amended MEA. Decay evaluation of CuSO₄-impregnated specimens

The suppressive effect of Cu-amended medium was higher for *A. serialis* than formerly reported by Civardi et al. (2015a) (Figure 3a). Statistical analysis revealed that the

Table 2: Brown-rot (BR) fungi isolated from utility poles.

BR fungi	Abundance (%) in	
	Germany	Switzerland
<i>Antrodia serialis</i>	31.8	75
<i>Serpula himantoides</i>	18.2	–
<i>Sistotrema brinkmannii</i>	9.2	–
<i>Fibroporia vaillantii</i>	22.8	–
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	4.5	–
<i>Tapinella panuoides</i>	4.5	–
<i>Postia dissecta</i>	4.5	–
<i>Neolentinus lepideus</i>	4.5	12.5
Unknown fungi	–	12.5

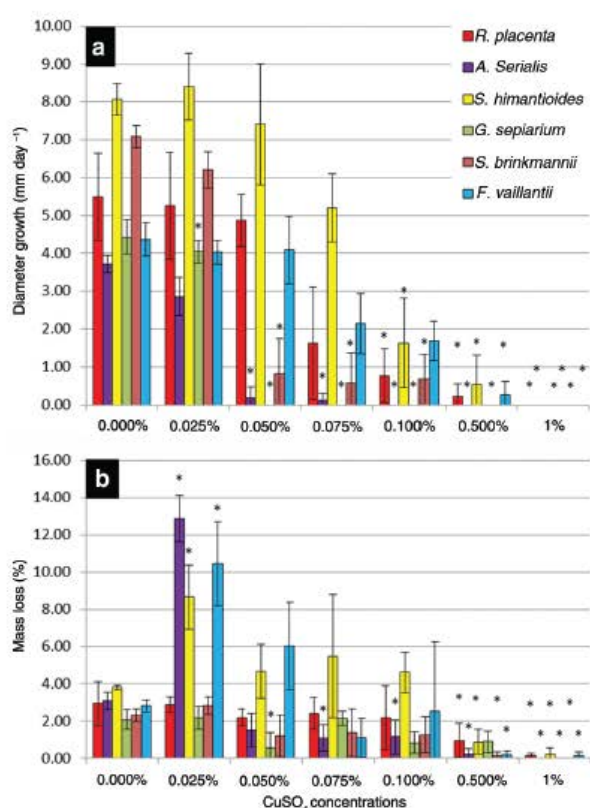


Figure 3: (a) Diameter growth of brown-rot (BR) isolates in MEA amended with different concentrations of CuSO₄. (b) Mass loss (ML) by BR isolates in Scots pine wood blocks treated with different concentrations of CuSO₄. *Indicates statistical differences in comparison with controls; * $P < 0.05$ (Dunnett's t-test two-way).

effect of CuSO₄ varied among fungal species, a finding which is in good agreement with that of Schmidt and Moreth (1996). *S. himantoides* and *F. vaillantii* showed the highest tolerance to Cu-amended medium (Figure 3a). A significant negative effect for Cu-amended medium ($P < 0.05$) was recorded in comparison with the controls for all wood decay basidiomycetes at concentrations higher than 0.075% CuSO₄ (Figure 3a). Interestingly, the highly Cu-tolerant strain *R. placenta* (Empa 45) was less tolerant than one isolate of *S. himantoides*.

MLs caused by basidiomycetes on Cu-impregnated wood are presented in Figure 3b. Low concentrations of Cu in impregnated wood (0.025% CuSO₄) resulted in a significant increase of ML by *A. serialis*, *F. vaillantii*, and *S. himantoides* ($P < 0.05$). Collet (1992) and Leithoff et al. 1995 demonstrated a similar stimulus for different isolates of *F. vaillantii*, when adding low Cu concentrations to the substrate. In comparison with controls, CuSO₄ concentrations higher than 0.1% had an adverse effect on ML

.....kaikkia puussa esiintyviä BR-sieniä ei ollut mahdollista eristää, koska ympäristöstä peräisin olevat muut sienet saattoivat kolonisoida kasvualustan, kuten *Trichoderma*-, *Penicillium*- ja *Mucor*-suvut. Tämän vuoksi kaikkien BR-sienten esiintymistä pylväissä ei voida täysin sulkea pois (Pfeffer et al. 2012).

Sienet eroteltiin toisistaan makro- ja mikroskooppisten tunnuspiirteiden perusteella: solmunmuodostus, rihmaston muoto, rihman leveys, rihmastokimppujen rakenne, sekä rihmaston väri ja haju (Nobles 1965; Stalpers 1978; Lombard ja Chamuris 1990; Schmidt ja Moreth 2003; Huckfeldt ja Schmidt 2006). Tällaiset määrityskaavat ovat hyödyllisiä lajin tunnistuksessa, mutta virheitä tai sekaannuksia voi silti esiintyä (Schmidt & Kebrnik 1989; Palfreyman & Bruce 1994). Siksi tässä tutkimuksessa kaikki isolaatit tunnistettiin myös molekyylibiologisin menetelmin.

Tärkein eristetty puunlahottaja-basidiomykeetti oli **Antrodia serialis**, jota löydettiin 32 %:ssa saksalaisista ja 75 %:ssa sveitsiläisistä pylväistä (taulukko 2). **Fibroporia vaillantii** eristettiin 23 %:sta pylväistä, **Serpula himantioides** oli kolmanneksi yleisin (18 %) ja **Sistotrema brinkmannii** löydettiin kahdesti Saksasta. Muut sienet eristettiin vain kerran kummastakin maasta. Kaikki tunnistetut sienet on aiemmin liitetty puutuotteiden lahoamiseen (Duncan & Lombard 1965; Wilcox & Dietz 1997).

BR-sienten kasvu CuSO₄-lisätyllä MEA:lla — CuSO₄:llä kyllästettyjen puunäytteiden lahoaminen

Cu-lisätyin kasvualustan sienikasvua estävä vaikutus oli suurempi *Antrodia serialis* -lajille kuin Civardi et al. (2015a) aiemmin raportoivat (kuva 3a). Tilastanalyysi osoitti, että CuSO₄:n vaikutukset vaihtelivat merkittävästi eri sienilajien välillä, mikä on yhdenmukaista Schmidt & Moreth (1996) tulosten kanssa.

S. himantioides ja **F. vaillantii** osoittivat suurinta kuparinsietokykyä Cu-lisätyllä kasvualustalla (kuva 3a). Sen sijaan Cu-eristetty vertailukanta **R. placenta (Empa 45)** ei ollut yhtä kestävä kuin eräs **S. himantioides** -isolaatti.

Massahäviö CuSO₄-impregnoituissa puunäytteissä

Kuva 3b esittää basidiomykeettien aiheuttaman massahäviön puunäytteissä. Pieni Cu-pitoisuus (0,025 % CuSO₄) johti merkittävään massahäviön kasvuun **A. serialis**, **F. vaillantii** ja **S. himantioides** -lajeilla (P < 0.05).

Collett (1992) ja Leithoff et al. (1995) osoittivat aiemmin, että **F. vaillantii** voi saada kasvustimuluksen matalista Cu-pitoisuuksista.s. 11)

Tässä tutkimuksessa:

- CuSO₄-pitoisuudet **alle 0,1 %** lisäsivät joidenkin lajien aiheuttamaa massahäviötä.
- CuSO₄-pitoisuudet **yli 0,1 %** vähensivät merkittävästi kaikkien tutkittujen basidiomykeettien kasvua.

Taulukko 2. Ruskolaho (BR) -sienet sähköpylväistä

BR-sieni	Saksassa (%)	Sveitsissä (%)
<i>Antrodia serialis</i>	31,8	75
<i>Serpula himantioides</i>	18,2	7
<i>Sistotrema brinkmannii</i>	9,2	–
<i>Fibroporia vaillantii</i>	22,8	9
<i>Gloeophyllum sepiarium</i>	4,5	–

BR-sieni	Saksassa (%)	Sveitsissä (%)
<i>Tapinella panuoides</i>	4,5	–
<i>Postia disecta</i>	4,5	–
<i>Neolentinus lepideus</i>	–	12,5
Tuntemattomat	–	12,5

Kuva 3.

- (a) BR-sienten kasvunopeus (mm/vrk) eri CuSO_4 -pitoisuuksilla MEA:lla.
 (b) Massahäviö (ML) männylle tehdystä puublokista BR-sienten vaikutuksesta eri CuSO_4 -pitoisuuksilla.
 (* = tilastollisesti merkitsevä ero kontrolliin, † = $P < 0,05$, Dunettin kaksisuuntainen testi.)

(Figure 3b), which was already reported by Schmidt and Moreth (1996), who found a high Cu-sensitivity for the basidiomycetes (*A. serialis*, *R. placenta*, *F. vaillantii*, *S. himantioides*). The highly Cu-tolerant fungus *R. placenta* Empa 45 and *S. himantioides* were tolerant to all CuSO_4 concentrations, whereas *S. brinkmannii* and *Gloeophyllum sepiarium* were highly susceptible to all CuSO_4 concentrations higher than 0.05% (Figure 3b).

Conclusions

Wood decay basidiomycetes associated with premature failure of utility WPs in Switzerland and Germany belong mainly to *Antrodia* spp. A direct correlation between fungal species and geographic regions was not evident but there is strong evidence that the type of wood preservative formulation has the highest selective pressure on BR fungal colonization and wood decomposition. In the absence of a co-biocide, WPs treated with CC formulations are highly susceptible to premature failures. The isolated BR fungi show significant differences concerning the Cu-resistance. *A. serialis* was the main wood decay basidiomycete isolated from WPs in both countries but the bioassays revealed that *A. serialis* is not highly tolerant to Cu concentrations. The isolates of *S. himantioides* and *F. vaillantii* demonstrated a greater Cu-tolerance threshold and thus they might play an important role in removal of Cu from treated wood. Further studies are currently in progress, in which the Cu-sensitivity of the isolated wood decay fungi on wood treated with a range of commercial Cu-based formulations and retentions are evaluated. Data about the locations where the WPs were sampled can be given by the corresponding author upon request.

Acknowledgments: The authors are pleased to acknowledge the financial support by the CTI (Kommission für Technologie und Innovation Project No. 17001.1 PFLS-LS). We thank Deutsche Telekom AG, Swisscom AG, and BASF Wolman for assisting in the preparation of wood poles and for the technical support.

Kuva 3b:n tulosten mukaisesti *S. brinkmannii* ja *Gloeophyllum sepiarium* olivat erittäin herkkiä CuSO₄-pitoisuuksille, jotka ylittivät 0,05 %, kun taas erittäin Cu-kestävä *R. placenta* (Empa 45) ja *S. himantioides* sietivät kaikkia testattuja CuSO₄-pitoisuuksia.

Johtopäätökset

Puun lahottajabasidiomykeetit, jotka liittyvät sähköpylväiden ennen aikaiseen vaurioitumiseen Sveitsissä ja Saksassa, kuuluvat pääosin *Antrodia*-sukuun. Suoraa yhteyttä sienilajin ja maantieteellisen sijainnin välillä ei havaittu, mutta on vahvaa näyttöä siitä, että käytetyn puunsuoja-aineen koostumus vaikuttaa merkittävimmin BR-sienten kolonisaatioon ja puun hajoamiseen.

Puunsuoja-aineiden puutteellinen teho erityisesti ilman biosidejä johtaa siihen, että CC-kyllästeillä käsiteltyt pylväät ovat erittäin alttiita ennen aikaisille vaurioille. Tutkimuksessa eristetyt BR-sienikannat osoittivat selviä eroja kuparinsietokyvyssä:

- **A. serialis** oli yleisin eristetty basidiomykeetti molemmissa maissa, mutta kasvukokeet osoittivat, ettei laji ole erityisen Cu-kestävä.
- **S. himantioides** ja **F. vaillantii** osoittivat suurempaa Cu-sietokyvyn kynnystä ja voivat tämän vuoksi näytellä merkittävää roolia kuparin poistumisessa käsitellystä puusta.

Lisätutkimuksia tehdään parhaillaan: niissä arvioidaan eristettyjen sienikantojen kuparinsietoa erilaisilla Cu-pohjaisilla kyllästeillä ja eri kyllästämääriä. Pylväiden tarkat keräyspaikat voi pyynnöstä toimittaa vastaava kirjoittaja.

Kiitokset

Kirjoittajat kiittävät taloudellisesta tuesta CTI:tä (Kommission für Technologie und Innovation, projekti nro. 170011 PFLS-LS). Kiitämme Deutsche Telekom AG:ta, Swisscom AG:ta ja BASF Wolmania avusta puupylväiden valmistuksessa ja teknisestä tuesta.

ChatGPT tekemä tiivistelmä

✓ 1. Tiivistelmä (lyhyt ja selkeä)

Tutkimus käsittelee **sähköpylväiden ennen aikaisista vaurioitumista** Sveitsissä ja Saksassa ja osoittaa, että ongelman taustalla ovat erityisesti **ruskolaho-sienet (BR)** kuten *Antrodia serialis*, *Fibroporia vaillantii* ja *Serpula himantioides*.

Päähuomiot:

- Saksassa pylväiden **keskimääräinen käyttöikä oli 9,6 vuotta**, kun Sveitsissä se oli **32 vuotta**.
- CC-kyllästeillä ilman biosidejä käsiteltyt pylväät olivat **erittäin alttiita ennen aikaisille vaurioille**.
- BR-sienet ovat **kehittyneet kuparinkestäviksi**, erityisesti *S. himantioides* ja *F. vaillantii*.
- Laho esiintyi tyypillisesti **maanpinnan tasolla**, mutta myös sen ylä- ja alapuolella.

- Pylväiden suojaus epäonnistui usein, koska **kupari ei sitoutunut kunnolla puuhun**, mikä mahdollisti liiallisen huuhtoutumisen.
-

✓ 2. Tekninen analyysi – miksi pylväät pettävät ennenaikaisesti

A) Puunsuoja-aineiden ongelmat

Nykyiset CC-kyllästeet eivät sisällä biosidejä → kupari yksin ei riitä, ja lisäksi kupari voi:

- huuhtoutua,
- reagoida orgaanisiin yhdisteisiin,
- olla liian matalalla pitoisuudella.

Tuloksena on **heikko suoja BR-sieniä vastaan**.

B) Sienten biologiset ominaisuudet

BR-sienet:

- ottavat kuparia soluseinään ja solun sisälle,
- muodostavat metallotioneiniineja,
- kestävät jopa 0.1–1.0 % CuSO_4 -pitoisuuksia.

Tämä selittää, miksi monet pylväät lahosivat, **vaikka kuparia oli läsnä**.

C) Pylvään käyttöympäristö

Maaperän ja rakenteen kosteus > 30 % → optimaalinen BR-sienille.

Maanpinnan taso on kriittinen:

- kosteusvaihtelut,
- happamuus,
- kuparin liukeneminen.

D) Seuraukset

Pylväiden ennenaikainen pettäminen aiheuttaa:

- turvallisuusriskejä,
- suuria taloudellisia menetyksiä (~36 M€/vuosi),
- vaikeuksia kunnossapidossa.

LIITE 3.

Raportti: Lahon selvitys Anttolan Cu-pylväistä

Toteuttaja: Luonnonvarakeskus (Luke), mikro- ja molekyylibiologian laboratorio Helsinki Asiakas:

Kaakkois-Suomen Ammattikorkeakoulu Oy, XAMK

Päivämäärä 12.12.2025

Tutkittavat näytteet

Asiakkaan lähettämät kolme pylväsnäytettä (ANT1, ANT3 ja ANT4). Näytteissä ANT1 ja ANT3 oli havaittavissa ruskolahoa ja sienten rihmastoja. ANT4 ei havaittu lahoa tai sienten rihmastoja.

Näytteistä tehtiin lahottajan tunnistuksia kahdella eri menetelmällä: a) eristämällä lahottajat useammasta eri kohdasta lahoa ja sen reunoilta kiinteillä kasvatusalustoilla kasvaviksi puhtasviljelmiksi, b) sekä tekemällä DNA:n eristys suoraan sienirihmastoista tai lahosta.

Puhtasviljelmien DNA:n eristys tehtiin käyttämällä PrepMan™ Ultra Sample Preparation DNA:n eristysreagenssia (ThermoFisher Scientific). Pylväsnäytteiden eri kohdista suoraan puun palasista ja sienirihmastosta tehtiin DNA:n eristys PlantPro kitillä (Qiagen) käyttäen Qiagenin QIAGEN QIAcube laitteistoa.

Menetelmät

PrepMan™ Ultra Sample Preparation DNA:n eristys

DNA:n eristys puhtasviljelmistä tehtiin noudattaen valmistajan laatimaa ohjetta (https://documents.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/manuals/4367554_PrepManRgnt_UG.pdf). PrepMan-reagenssi on kehitetty nopeaan DNA eristämiseen PCR amplifikaatiota varten. Prepman reagenssi hajottaa näytteen soluja korkeassa lämpötilassa, mikä vapauttaa näytteen DNA:n reagenssiin, josta sen voi kerätä talteen sentrifugoinnin jälkeen. Tässä työssä näyte eluoitiin 50 µl tilavuuteen.

PlantPro DNA eristys

Näytteistä eristettiin DNA valmistajan (Qiagen, Germany) ohjeen mukaan DNeasy Plant Pro kittien avulla QIAGEN QIAcube laitteistolla. QIAGEN DNeasy Plant Pro Kit -protokollan periaate perustuu tehokkaaseen mekaaniseen hajotukseen (bead-beating), kemialliseen lyysiin sekä piikalvomembraaniteknologiaan epäpuhtauksien poistamiseksi. Tässä työssä näyte eluoitiin 50 µl tilavuuteen.

Geenialueiden PCR-monistus

ITS (Internal Transcribed Spacer) -alue on sienillä yleisin DNA-viivakoodialue, jota käytetään sienten DNA:n monistamiseen ja sekvensointiin erityisesti niiden lajinmäärityksessä ja ekologisissa tutkimuksissa. Sen tarkkuus on hyvä useimmilla Basidiomycota- ja Ascomycota-lajeilla lajien erottamiseen; lajitasolla 70–90 % sienistä voidaan tunnistaa ITS:llä luotettavasti. Haasteita ovat kuitenkin lajikompleksit (kuten tämän tutkimuksen *Postia*-suku) joiden lajit ovat geneettisesti hyvin lähellä toisiaan. Lajikompleksit vaativat tyypillisesti useamman geenialueen sekvensointia ja fylogeneettista analyysiä.

Tässä tutkimuksessa DNA-näytteistä tehtiin kahdella erilaisella alukeparilla tutkittavien geenialueiden PCR-monistus käyttäen ThermoFisherin DreamTag Green Master Mixiä.

Aluketiedot:

ITS1F	Forward	CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA
ITS4R	Reverse	TCCTCCGCTTATTGATATGC

Pipetointikaavio yhdelle näytteelle:

- | | | |
|---|------------------------------|--------------------|
| • | DreamTag Green Master mix x2 | 12,5 µl |
| • | ITS1F aluke 25 µM | 0,125 µl |
| • | ITS4R aluke 25 µM | 0,125 µl |
| • | ster. H ₂ O | 11,25 µl |
| • | DNA-templaatti | 1 µl (laimennettu) |

1/50) PCR-ohjelma:

- | | | | |
|---|-------|--------|-----------|
| • | 95 °C | 3 min | |
| • | 95 °C | 30 s | |
| • | 55 °C | 30 s | 35 sykliä |
| • | 72 °C | 1 min | |
| • | 72 °C | 10 min | |
| • | 8 °C | ∞ | |

PCR-monistuksessa käytettiin myös toista alukeparia elongation factor1 α - geenialueen tutkimiseen *Postia*-suvun tarkempaan lajimäärittelykseen:

EF983F (**G**CYCCYGGH**C**AYCGT**G**AYTTYAT)

EF2218R (**A**TGACACCRAC**R**GC**R**ACRGTYTG).

PCR ThermoFisherin DreamTag Green Master Mixiä käyttäen:

Pipetointikaavio 1 näytteelle:

- | | | |
|---|------------------------------|----------|
| • | DreamTag Green Master mix x2 | 12,5 µl |
| • | EF983F aluke 25 µM | 0,125 µl |
| • | EF2218R aluke 25 µM | 0,125 µl |
| • | ster. H ₂ O | 11,25 µl |
| • | templaatti | 1 µl |

PCR-ohjelma:

- | | | | |
|---|-------|-------|-----------|
| • | 95 °C | 3 min | |
| • | 95 °C | 30 s | |
| • | 60 °C | 30 s | 8 sykliä |
| • | 72 °C | 1 min | |
| • | 95 °C | 30 s | |
| • | 55 °C | 30 s | 30 sykliä |
| • | 72 °C | 1 min | |
| • | 72 °C | 7 min | |
| • | 8 °C | ∞ | |

Kummassakin tapauksessa PCR tuotteet ajettiin ja leikattiin Synergel-agarosigeelistä. Eristetyistä näytteistä saatiin selkeä yksi PCR-tuote, jotka puhdistettiin NucleSpin menetelmällä.

Sekvensointi ja sekvenssidatan käsittely

Puhdistetut PCR tuotteet lähetettiin Macrogenille (Macrogen Europe) sekvensoitavaksi Forward alukseen (ITS1F sekä EF983F) kanssa. Macrogenilta saaduista sekvensseistä poistettiin huonolaatuiset sekvenssialueet sekvenssin alusta ja lopusta Geneious Prime ohjelmiston avulla. (<https://www.geneious.com/prime/>) (Lukella lisenssit ohjelmistoihin).

Sekvensseistä tehtiin haku NCBI:n Blastilla (<https://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>). Lajien tunnistustiedot perustuvat BLAST-hakuun sekä osumien kriittiseen arviointiin lahottajasieni-asiantuntijoiden arvioimina.

Tulokset

Pylväsnäytteistä löytyneet lajit on taulukoitu alla niiden sekvensointijärjestyksen perusteella. Editoitu sekvenssidata on saatavilla Liitteessä 1 samassa järjestyksessä. Lajien ekologiaa on selvitetty kirjallisuushakujen perusteella ja lahottajasieniasiantuntijoiden tietämyksen avulla. Lajit, joiden tunnetaan aiheuttavan ruskolahoa, on lihavoitu taulukossa.

Pylväs	Luke näytekoodi	Sekvenssinro	Geeni-alue	BLAST lajitunnistus	Per. Identity %*
ANT1	1_ANT_1b_MOS	2324ZAA344	ITS	Fibroporia vaillantii	100
ANT1	2_ANT_1b_MMN	2324ZAA343	ITS	Fibroporia vaillantii	100
ANT1	3_ANT_1f_PDA	2324ZAA342	ITS	Trichoderma sp.	100
ANT3	4_ANT_3aI_MOS	2324ZAA341	ITS	Mucor hiemalis f. silvaticus	100
ANT3	6_ANT_3bII_mallas	2324ZAA340	ITS	Mucor hiemalis f. silvaticus	100
ANT3	7_ANT_3bII_MMN	2324ZAA339	ITS	Mortierella sp.	100
ANT3	8_ANT_3aII_PDA	2324ZAA338	ITS	Penicillium expansum	100
ANT1	11_ANT_1c_valk	2324ZAA337	ITS	Fibroporia vaillantii	100
ANT1	13_ANT_1e_MOS	2324ZAA336	ITS	Penicillium corylophilum	100
ANT1	14_ANT_1c_MMN	2324ZAA335	ITS	Fibroporia vaillantii	100
ANT4	15_ANT_4a_PDA	2324ZAA334	ITS	Fusarium sp.	100
ANT4	16_ANT_4a_MMN	2324ZAA333	ITS	Pseudogymnoascus sp.	100
ANT4	17_ANT_4b_mallas	2324ZAA332	ITS	Sydowia polyspora	100
ANT3	18_ANT_3_vaaleapuu	2324ZAA331	ITS	Postia sericeomollis coll.	100
ANT3	19_ANT_3_tummapuulaho_I	22324ZAA330	ITS	Ascomycota sp.	99.43
ANT3	19_ANT_3_tummapuulaho_II	2324ZAA329	ITS	Calocera viscosa	100
ANT1	20_ANT_1cII	2324ZAA328	ITS	Fibroporia vaillantii	100
ANT3	21_ANT_3_tummarihmasto	2324ZAA327	ITS	Coniophora fusispora	100
ANT3	ANT_3.1	2324ZAA314	ITS	Postia sericeomollis coll.	99.5
ANT3	ANT_3.2	2324ZAA313	ITS	Postia sericeomollis coll.	100
ANT3	ANT3 EF consensus sequence		EF	Sporothrix sp.	

*Blast-haun identiteetti; mitä suurempi prosentti, sitä läheisempi sukulaisuus. Sienten ITS-alueella 97–100 % tarkoittaa todennäköisesti samaa lajia.

Tulosten tarkastelu

Useilla ruskolahottajilla on luontainen kuparinsietokyky, joka perustuu oksaalihapon tuottoon. Tämä on osoitettu aikaisemmissa tutkimuksissa sekä koepuupalikoissa, että kenttä-tutkimuksissa useilla ruskolahottajasuvuilla (*Antrodia/Fibroporia*, *Postia/Rhodon*ia, *Coniophora*, *Serpula*, *Wolfiporia*, *Gleophyllym*).

Todennäköiset Cu-kyllästettyjen pylväiden ruskolahottajat tässä tutkimuksessa löytyneistä lajeista ovat *Fibroporia vaillantii* (syn. *Antrodia vaillantii*) eli lavakääpä, *Postia sericeomollis* coll. eli korokääpä-lajikompleksi ja mahdollisesti myös *Coniophora fusispora* eli pikkukesikkä.

Pylvästä ANT1 löytynyt *Fibroporia vaillantii* on yksi tunnetuimmista kuparinkestävistä ruskolahottajasienistä, joka kesää korkeitakin Cu-pitoisuuksia. Tätä lajia on löytynyt aikaisemmissakin tutkimuksissa kuparikyllästetyistä pylväistä ja käytetty referenssilajina Cu-toleranssitutkimuksissa. Laji tuottaa oksaalihappoa kuparin läsnä ollessa. Oksaalihappo reagoi kupari-ionien kanssa muodostaen kuparioksalaatteja vähentäen kuparin toksisuutta eliölle. Tämä mahdollistaa sienien kasvun ja ruskolahon etenemisen Cu-käsitellyssä puussa. Kuparin liukoisuuden vähetessä ajan myötä, sieni voi hyödyntää oksalaattimekanismia entistä tehokkaammin.

Pylvästä ANT3 löytyi kaksi ruskolahoa aiheuttavaa ja todennäköisen Cu-sietokyvyn omaavaa lajia. Ensimmäinen löytyneistä lajeista oli *Postia sericeomollis* coll. (syn. *Oligoporus sericeomollis*) eli korokääpä-lajikompleksi, jonka tarkempi tunnistus jäi tässä tutkimuksessa vaillinaiseksi, sillä Suomesta löytyy useampi laji, jotka ovat lähellä toisiaan ja hankalammin erotettavissa toisistaan morfologisten tuntomerkkien tai DNA:n perusteella. Lajikompleksiin kuuluvat *Postia sericeomollis* (syn. *Oligoporus sericeomollis*) eli korokääpä, *Postia rennyi* (syn. *Oligoporus rennyi*) eli kuromakääpä, tai *Postia romellii* (= *Oligoporus romellii*) eli karhikääpä. Näiden lajien osalta ei löydy aikaisempia tutkimuksia niiden Cu-sietokyvystä. *Postia*-suvusta ja sen lähisuvuista löytyy kuitenkin muita esimerkkejä lajeista, jotka pystyvät lahottamaan kuparikäsiteltyä puuta, esim. *Rhodon*ia placenta (syn. *Postia placenta*) eli istukkakääpä.

Toinen pylvästä ANT3 löytyneistä lajeista oli *Coniophora fusispora* eli pikkukesikkä. Myös pikkukesikkä on ruskolahon aiheuttaja. Vaikka suoraa näyttöä lajitasolla ei ole, *C. fusispora* kuuluu kuitenkin sienisukuun, joka on tunnettu kuparinsiedosta oksaalihappimekanismin kautta. Tämän perusteella on todennäköistä, että myös pikkukesikkä kykenee selviytymään ja lahottamaan kuparikyllästettyä puuta.

Muut löytyneet lajit (*Trichoderma*, *Mucor hiemalis* f. *silvaticus*, *Mortierella*, *Penicillium expansum*, *P. corylophilum*, *Fusarium*, *Pseudogymnoascus*, *Sydowia polyspora*, *Calocera viscosa*, *Sporothrix*) voivat esiintyä Cu-ympäristöissä, mutta ne eivät ole ruskolahon aiheuttajia vaan lähinnä pintakolonisoijia tai maaperäsieniä, eivätkä yksinään selitä Cu-kyllästettyjen pylväiden ruskolahoa.

DNA-sekvenssidata kirjallisuutta

Akgul, A., & Akgul, M. (2018). Mycoremediation of copper: Exploring the metal tolerance of brown rot fungi. *BioResources*, 13(2), 3260–3274.

Choi, J. W., et al. (2012). Fungal biodegradation of CCA-treated wood and removal of its metal components. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 75, 87–92.

Clausen, C. A., & Green, F. (2003). Oxalic acid overproduction by copper-tolerant brown-rot basidiomycetes on southern yellow pine treated with copper-based preservatives. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 51(2), 139–144.

Green, F., & Clausen, C. A. (2003). Copper tolerance of brown-rot fungi: Time course of oxalic acid production. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 51(2), 145–149.

Humar, M., et al. (2002). Changes in EPR spectra of wood impregnated with copper-based preservatives during fungal decay. *Holzforschung*, 56(3), 229–238.

Jenkins, K. M., Clausen, C. A., & Green, F. (2014). The effects of copper proximity on oxalate production in *Fibroporia radiculosa*. IRG/WP 14-10823.

Köse, C., & Kartal, S. N. (2010). Tolerance of brown-rot and dry-rot fungi to CCA and ACQ wood preservatives. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64(4), 318–322.

Leithoff, H., & Peek, R. D. (1995). Growth of the copper tolerant brown rot fungus *Antrodia vaillantii* on different substrates. IRG/WP 95-10121.

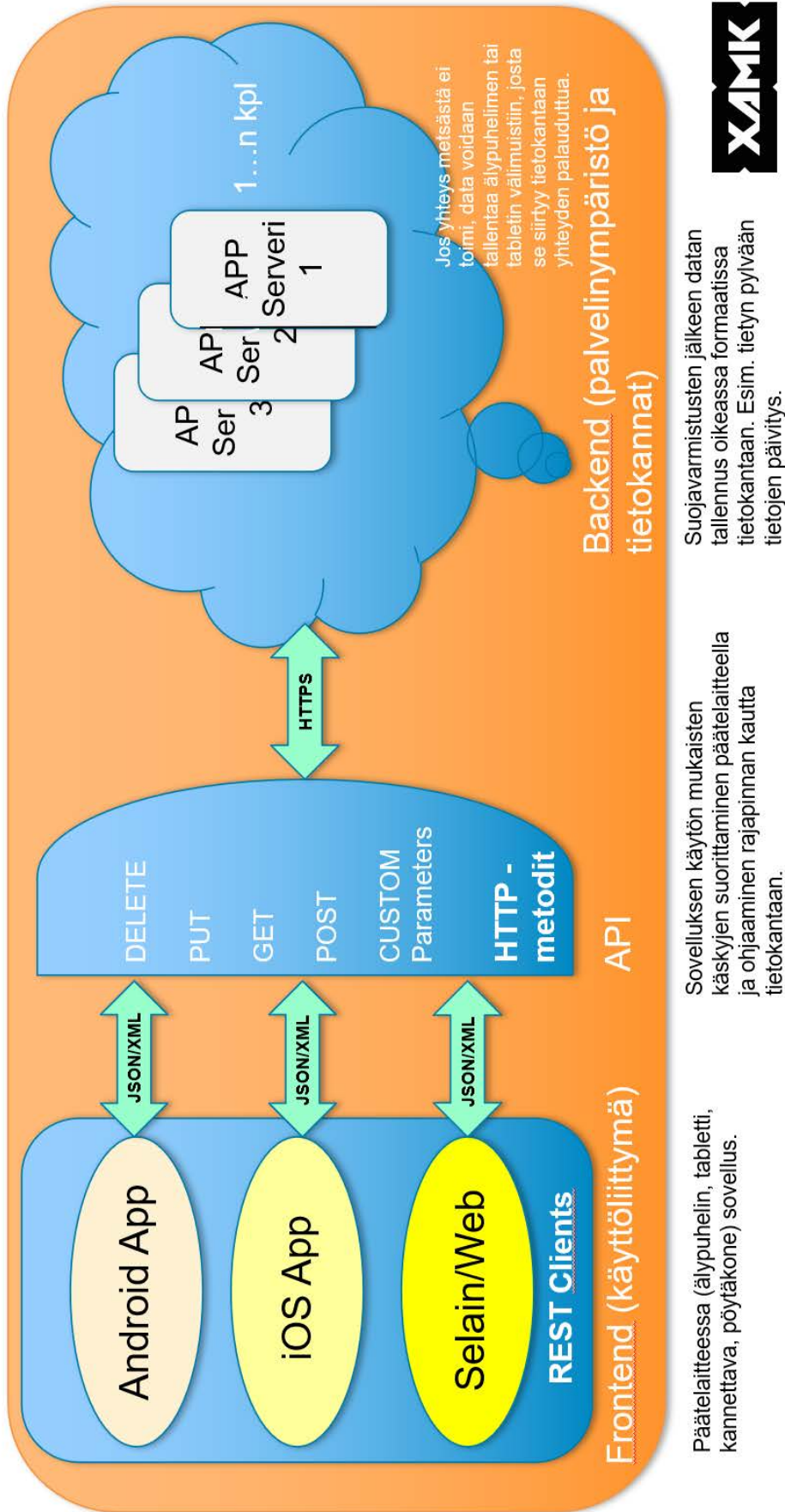
Ribera, J., Schubert, M., Fink, S., Cartabia, M., & Schwarze, F. W. M. R. (2016). Premature failure of utility poles in Switzerland and Germany related to wood decay basidiomycetes. *Holzforschung*, DOI: 10.1515/hf-2016–0134.

Sierra-Alvarez, R., et al. (2009). Removal of copper, chromium and arsenic from preservative-treated wood by chemical extraction–fungal bioleaching. *Chemosphere*, 74(6), 951–958.

Tang, J., et al. (2012). Gene expression analysis of copper tolerance and wood decay in *Fibroporia radiculosa*. *Applied and Environmental Microbiology*, 78(11), 3985–3996.

LIITE 4. Rajapintaohjelmoinnin hyödyntäminen sähköverkkojen ylläpidossa.

Datan tallentaminen sähkölinjalla päätelaitteen kautta sähköjakeluuyhtiön tietokantaan



LIITE 5.



Pilodyn Wood Tester



Pilodyn is an easy-to use wood testing instrument. It makes it possible to assess the extent of decay objectively, and to determine the amount of strength loss it has caused! But it can also be used as a general testing instrument for all kind of timber!

The Pilodyn operates by shooting a blunt steel pin ($\varnothing$ 2,5 mm. or $\varnothing$ 2,0 mm.) into wood by an exact amount of energy. The penetration depth is read on a scale!

Decaying dead wood density measurements are a useful indicator for multiple purposes, such as for estimating the amount of carbon in dead wood and making predictions of potential diversity of dead wood-inhabiting fungi and insects.

Currently, qualitative decay phases are used as wood density estimates in many applications. Penetrometers, which are commonly used for measuring the density of standing trees, might also be applicable to dead wood density measurements.

Instant, cost-effective non-destructive testing method, the Pilodyn Penetrometer operates on the basis that a blunt pin is shoot into the wood with a pre-set energy, and from the penetration of the needle the density of the wood, or the degree of decay in the wood can be assessed.

Other uses:

The Pilodyn wood tester is an instrument originally developed in Switzerland for determining the degree of soft rot in wooden telephone poles. The Pilodyn drives a steel pin into the tree with a precise force.

The depth to which the pin penetrates is indicated on the instrument and is inversely proportional to the density of the wood. The Pilodyn does not provide an estimate of actual wood density, but an estimate of the relative wood density, which can be used to rank various genetic 'units' (e.g. clones, families, seed lots and provenances) in regard to wood density.

As individual Pilodyn instruments may vary and provide estimates at slightly different levels of density, it is very important that one and the same instrument is used for all measurements within the same trial.

Determination of actual wood density requires extraction of increment cores or sample discs.

The Pilodyn is attractive in that it is rapid, does not require the use of an increment borer (destructive sampling), and is, in principle, free of operator bias.

The Pilodyn is a valuable tool for quick and cost-effective assessment of relative wood density. The main advantages are associated with the speed and ease of its use and its non-destructive sampling. Large numbers of assessments can be made without recourse to laboratory analyses.

Measurements should be taken carefully. This implies at least two measurements per tree. Measurements should always be taken under bark. Measurements of wood densities determined by increment cores or segments compared with Pilodyn measurements indicate that the Pilodyn can safely be used to rank provenances and families.

Technical Specifications

Technical data	PILODYN 6J Standard
Strike force	6J (Nm)
Penetration depth	0...40 mm
Striker pin diameter	2.0 mm
Dimensions:	
Diameter	50 mm
Length	420 mm
Weight	1.250 kg

TerraGes, Novas Tecnologias para a Gestão Agro-Florestal e Ambiente, Lda. Rua Lourenço Caiola, 2 – 7370-109 CAMPO MAIOR - PORTUGAL