

Energiateollisuus ry / Sähkötutkimuspooli

Tulevaisuuden sähköpylväs



Hannu Boren
Borénova Oy
Lipinsaarentie 25
75900 Nurmes
hannu.boren@borenova.inet.fi
Puh. 0400 152 252
FI19124791

TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tausta

Vuoteen 2006 saakka yleisemmin käytetty sähköpylväs on ollut CCA-kyllästeinen (kupari, kromi, arseeni) puupylväs. Vähäisessä määrin on käytetty myös kreosoottikyllästeisiä puupylväitä. EU-asetukseen perustuva Suomen lainsäädäntö kielsi CCA-kyllästeen käytön vuoden 2006 syksystä alkaen. Tämän kiellon jälkeen sähköyhtiöt ovat käyttäneet kreosootti- ja C-kyllästeisiä (kupariyhdiste) pylväitä.

Kreosoottikyllästeisiä pylväitä käytettäessä työntekijöiden asianmukainen suojautuminen on koettu vaikeaksi ja on myös pelätty kreosootille altistumista. Tästä syystä moni sähköyhtiö on siirtynyt käyttämään C-kyllästeisiä pylväitä. Asiakkaat ja maanomistajat eivät myöskään pidä kreosootin hajusta. Muualla käytössä olevaa CC- (kuparikromi) kyllästettä ei ole ainakaan toistaiseksi hyväksytty Suomessa käytettäväksi.

Vaikka nykyään sähköjohtojen rakennustapana käytetään enenevässä määrin maakaapelointia, niin tulevaisuudessa käytetään ilmajohtoja varsinkin haja-asutus alueilla. Suomen keski- ja pienjännite johtojen kokonaisjohtopituudesta suuri osa on näillä haja-asutus alueilla johtuen taajama ja kaupunki alueiden suhteellisen pienestä pinta-alasta.

Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena oli löytää keski- ja pienjännitejohdoille kustannustehokas, helposti huollettava, ympäristöystävällinen ja riittävän pitkäikäinen sähköpylvään rakenneratkaisu. Pylväsmateriaalille ei asetettu rajoituksia. Tulevaisuuden sähköpylvään käyttöikä-arvio tuli olla vähintään 50 vuotta (75% pylväistä saavuttaa vähintään käyttöiän 50 vuotta eli käyttöiässä ei saa olla suurta hajontaa).

Tutkimuksessa käytetyt lähtöarvot, menetelmät ja materiaalit

Referenssipylväinä olivat nykyiset käytössä olevat C-kyllästetyt ja kreosoottikyllästetyt puupylväät. Eri puupylväsvaihtoehtojen lisäksi tutkittiin teräs-, betoni- ja komposiittimateriaalien mahdollisuuksia sekä niiden yhdistelmiä. Johtimena laskelmissa on käytetty BLL62:sta. Johdinten kuormat on laskenut Finnmast Oy ja Otso Kuusisto Consulting tuulennopeudella 21 m/s Cenelec EN 50341/50423+NNA/FI mukaan. Pylväiden mitoitus tehtiin Puupylväiden lujuuslaskentaohjeen mukaan tai pylväsvalmistajan mitoitusohjelmalla. Vertailu VIM:in tehtiin Profila-ohjelmalla. Kustannuslaskennassa huomioitiin kaikki elinkaaren ajan kustannukset (materiaalihinnat, logistiikka, rakentaminen, tarkastukset ja kunnossapitotarve, purkaminen ja kierrätyskustannukset) Verkostotöiden kustannusluettelon KA 2:06 mukaan. Koska käyttöiässä on suurta vaihtelua, jaettiin kokonaiskustannukset annuiteetti-menetelmällä vuosikustannuksiksi, joka mahdollisti eri ratkaisujen vertailun vuosikustannusten suhteen. Korkokantana laskelmissa käytettiin 5%. Riskianalyysissä tutkittiin, miten 10...15 vuotta arvioitua lyhyempi käyttöikä vaikuttaa kokonaiskustannuksiin eri ratkaisulla. Yhteistyötä tehtiin mm. Iivari Mononen Oy:n, Valmont Ltd:n/Tehomet Oy:n, Lujabetonin, KyAMK:n, Kestopuun ja Miktech/Excel Oy:n kanssa.

Tulokset

VIM/CENELEC-vertailu

Tutkimuksen alussa vertailtiin VIM:ä ja uusia CENELEC-ohjeita. VIM:iin verrattuna kuormitus on lähes kaksinkertainen perustuulennopeudella 21 m/s:ssa uusien ohjeiden mukaan. Tuulennopeudella ei ole ratkaisevaa merkitystä, koska 1 m/s muuttaa kuormitusta vain noin 10%:a. Pylväskoko säilyy ennallaan vain siksi, että puupylvään lahoamisvara (heikentymisvara lahon vaikutuksesta) on pienempi kuin aikaisemmin, koska puupylvään suurinta sallittua jännitystä on nostettu huomattavasti. kts luku 3.3. Jatkossa lahoamisvaran laskenta on siis lisättävä mitoitusohjelmiin.

Merkittävät kustannustekijät

Tutkimuksessa vertailtiin myös, miten eri pylväisiin liittyvät tekijät vaikuttavat kustannuksiin. Näitä olivat mm. jännevälin maksimointi ja/tai käyttöiän maksimointi joko ylimitoittamalla puupylväs tai käyttämällä lujuuslajiteltuja pylväitä. Tulosten perusteella ilmajohdon investointi- ja vuosikustannuksiin per kilometri vaikuttaa eniten

1. Jänneväli – kuinka lähellä maksimaalista jänneväliä kullakin pylväsratkaisulla päästään?
2. Pylvästyksen kokonaishinta eli pylväs, pylvään pystytys, orsi, orren ja johtojen asennustyö yms – öljykyllästetyillä pylväillä asentajien suojautumiskulut voivat olla jopa 10% kokonaiskustannuksista
3. Käyttöikä – jos pylvään käyttöikä on vähintään 40 vuotta, ratkaisevat muut tekijät paremmuusjärjestyksen, koska maksimikäyttöikä on käytännössä 65...70 vuotta.
4. Pylvään hinta ja kierrätyskustannukset

Puupylvään lujuuslajittelu ja ylimitoitus

Lujuuslajitelluilla puupylväillä on suurempi ominaislujuus, jolloin samankokoisella pylväällä saadaan suurempi jänneväli ja/tai pidempi käyttöikä kuin normaaleilla pylväillä. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pienempiä pylväitä samalla jänneväliä. Lujuuslajiteltujen pylväiden käyttö on erittäin kannattavaa, jos siitä tuleva hyöty on mahdollista käyttää jännevälin pidentämiseen. Tämän vuoksi lujuuslajitellusta puupylvästä (ominaislujuus 10...20% suurempi kuin nykyisin) voidaan maksaa lisähintaa.

Jos käyttöikää maksimoidaan, se vaatii puupylväiden osalta nykyistä laadukkaamman lahotarkastuksen, sillä käyttöikä riippuu suoraan puupylvään lahoamisvarasta. Tämän vuoksi lahoamisvaran laskenta kannattaa liittää osaksi uusia mitoitusohjelmia. Lujuuslajitellulla, puolipuhalla 2-luokan pylväällä voidaan korvata normaali 3-luokan pylväs, etenkin jos mitoitus- ja lahoamisvara laskelmissa käytettäisiin todellisia läpimittoja. Standardi antaa aina läpimitalle vähimmäisvaatimuksen, jonka vuoksi käytännössä 2-luokan pylväs on 5...10 mm suurempi keskimäärin kuin standardin vaatimus.

Kyllästysaineet

Kyllästysaineita, eri kyllästeiden yhdistelmiä ja pitoisuuksien vaikutusta puupylvään käyttöikään, hintaan, ympäristöystävällisyyteen (huuhtoutuminen, biosidisyys) tutkittiin luvussa 3.4 ja 3.5. Tulosten perusteella C- kyllästeellä ei nykytiedon mukaan saavuteta 50 vuoden käyttöikää suuren huuhtouman ja hajonnan vuoksi. Potentiaalisia kyllästysaineita ovat kreosootin lisäksi ovat CC- kyllästeet, mäntyöljy ja vesilasi. Potentiaalisimmat kyllästysyhdistelmät ovat vesilasi+mäntyöljy tai mäntyöljy+kupari ja/tai boori.

Pylväsratkaisut

Tutkimus vahvistaa olemassa olevan käsityksen siitä, että kreosoottikyllästetty puupylväs on taloudellisesti paras ratkaisu sähköpylvääksi - vaikka sen pitoisuutta laskettaisiin 75 kg/m³ nykyisestä 110 kg/m³ . Toiseksi paras ratkaisu on teräsvahvistettu, lujuuslajiteltu ja/tai puolipuhdas (vähintään tyvestä 3,5 metriä) mäntyöljykyllästetty puupylväs . Teräsvahvike ulottuu vähintään 1,25 metriä maanpinnan yläpuolelle. Muita lähes yhtä hyviä ratkaisuja ovat lujuuslajitellut/puolipuhdas vesilasi-, mäntyöljy ja CC-kyllästetyt puupylväät. Ns. combipylväs (C-kyllästetty pylväs, jonka tyviosa on kyllästetty kreosootilla) sekä teräsvahvistettu, lujuuslajiteltu C-kyllästetty pylväs ovat edellä mainittuja ratkaisuja 4...6% kalliimpia vuosikustannusten suhteen. C-kyllästetty pylväs on vain 9% kalliimpi ratkaisu kuin kreosoottipylväs, vaikka käyttöikäarvioissa on eroa 20 vuotta. Jos C-kyllästettyjen pylväiden käyttöikä on yli 45 vuotta, niin se on varteenotettava vaihtoehto myös tulevaisuudessa. Kts kuva 59.

Vesilasilla ja mäntyöljyllä on kuitenkin vielä kehityspotentiaalia, jonka vuoksi niiden kilpailukyky voi tulevaisuudessa kasvaa. Mikäli pelkkä vesilasikäsitteily antaa puupylväälle 50 vuoden käyttöiän, niin sen kilpailukyky on jopa parempi kuin kreosootilla. Jos taas mäntyöljykyllästettyjen pylväiden tahraavuusongelma saadaan ratkaistua, niin tällöin rakentamiskustannukset (työntekijöiden suojautumiskulut yms) laskevat 5%:a, joka tekisi mäntyöljypylvästä yhtä hyvän ratkaisun kuin kreosoottipylväs.

Tulosten perusteella betonista ja komposiiteista valmistetut sähköpylväät eivät ole kilpailukykyisiä Suomen olosuhteissa. Komposiittirakenteet-, materiaalit ja valmistusmenetelmät kehittyvät kuitenkin nykyisin vauhdilla ja panostus nanoteknologiaan sekä volyymien kasvu voi tuoda tulevaisuudessa kilpailukykyisiä ratkaisuja myös sähköpylväisiin. kts kuva 58.

Tällä hetkellä muista materiaaleista ainoastaan teräspylväs voi haastaa puupylvään kustannuksien suhteen. kts. kuva 58. Esimerkkitapauksessa (BLL62-johdin) teräspylväs oli vuosikustannuksiltaan 7% kalliimpi kuin kreosoottipylväs, mutta samalla tasolla C-kyllästetyn pylvään kanssa. Ratkaisevaa teräspylvään kannalta on, miten uusien CENELEC-ohjeiden soveltaminen käytännössä tulee vaikuttamaan ilmajohtorakentamiseen ja miten teräspylvään maadoitus 20 kV:n ilmajohdoissa tulee määräysten mukaan tehdä. Tarkkaa ohjetta maadoituksesta ei tällä hetkellä ole käytettävissä. Uusien CENELEC-ohjeiden vuoksi teräspylvään kilpailukyky verrattuna puupylvääseen on joka tapauksessa parantunut. Mitä suurempi johdon poikkileikkauspinta-ala ja jänneväli (kuormitus), sitä parempi on teräspylvään kilpailukyky suhteessa puupylvääseen.

Uusista ratkaisuista paras on siis vahvistaa teräksellä puupylvään kriittistä kohtaa eli maanrajaa nykyisen kaltaisella teräksisellä juurituella, joka ylettyy vähintään 1,25 metrin korkeudelle maanrajasta. Öljyttömillä kyllästeillä käsitellyissä puupylväissä esiintyy paljon myös latvalahoa, jota edistää voimakkaasti tikan aiheuttamat reiät pylväiden latvaosiin. Käyttämällä yhdistelmärakenteessa puolipuhdasta, mäntyöljykyllästettyä pylvästä voidaan vähentää tätäkin ongelmaa merkittävästi. Tällöin koko pylväs on täysin kierrätettävissä ilman erillisiä ja pakollisia kierrätysmaksuja. Teräksinen juurituki on uudelleen käytettävissä tai voidaan toimittaa metallinkierrätykseen (tuloja verkonhallintayhtiölle). Mäntyöljykyllästetty pylväs voidaan jättää maanomistajalle, myydä tai hakettaa ja polttaa missä tahansa normaalia puuta käyttävässä lämpölaitoksessa. Myös C-kyllästettyä pylvästä voidaan käyttää yhdistelmärakenteessa, mutta se huonompi ratkaisu kuin mäntyöljykyllästetty pylväs, koska

- C-kyllästetyn pylvään kierrätyskustannukset ovat 60 €/kpl vrt. mäntyöljykyllästetty 0 €/kpl
- C-kyllästeen korroosion vuoksi juurituen kiinnitys voi pettää
- C-kyllästeen huuhtouman vuoksi pylväillä on latvalaho-ongelmia (harustetut/A-pylväät pylväät), jonka vuoksi käyttöikä ei juurituen ansiosta välttämättä kasva

Johtopäätökset

Tulevaisuuden sähköpylväät on valmistettu

- Lujuuslajitelluista ja/tai ainakin tyviosastaan puolipuhasta mäntyöljykyllästetyistä (100 kg/m³) puupylväistä, joiden tyviosa on teräsvahvistettu vähintään 1,25 metrin korkeudelle maanrajasta.

tai

- Lujuuslajitelluista puupylväistä, jotka on kyllästetty joko kreosootilla (75 kg/m³), CC-kyllästeellä (NTR A-luokka), mäntyöljyllä (150...200 kg/m³) tai vesilasilla (75...100kg/m³). Kreosootia käytettäessä pitoisuutta pienennetään siis nykyisestä 30%:a. Vesilasi- ja mäntyöljy käsittely yhdistetään tarvittaessa. Kreosootia ja mäntyöljyä käytettäessä pylväitä ei sorvata ainakaan tyviosasta.

Nämä muutokset nostavat investointikustannuksia 2...4 % per ilmajohtokilometri verrattuna C-kyllästettyyn pylvääseen, mutta vuosikustannukset ovat jopa 10%:a pienemmät. Lisäksi sähköpylvään tunnistetietoja tarkennetaan laadukkaamman lahotarkastuksen takaamiseksi ja eri tavoilla valmistettujen pylväiden tunnistamiseksi jatkossa. Tällä hetkellä Suomessa myydään ainakin kolmella eri C-kyllästeellä käsiteltyjä puupylväitä. Lisäksi samalla C-kyllästeellä kyllästettyjä pylväitä on jo valmistettu ainakin kahdella eri pitoisuudella, jotka täytyy tulevaisuudessa tunnistaa tarkasti.

Jatkotutkimustarpeet

Tutkimuksen perusteella Energiateollisuus Ry:n/sähkötutkimuspoolin kannattaa jatkossa toteuttaa seuraavat toimenpiteet

- Kansallisen puupylvään lujuuslajitteluohjeen laadinta puupylväsvalmistajille ja lahotarkastajille
- Juuritukien mallikuvien laadinta sekä koekappaleiden valmistus ja testaus yhteistyössä alan yritysten kanssa
- Yhdistelmäarakenteen (teräksinen juurituki+puupylväs) testaus, jossa vahvistetaan teoreettisten laskelmien tulokset koskien rakenteen taipumaa ja kuormankantokykyä. Samalla voidaan

tarkastella, miten erityyppiset teräksiset juurituet käyttäytyvät kuormitustilanteessa → juurituen rakennetta ja hintaa voidaan optimoida.

- Koska harmonisoitua EN-tuotestandardia yhdistelmärakenteelle (teräksinen juurituki+puupylväs) ei ole laadittu, tulee yritysten CE-merkin hakemiseksi laatia CUAP (hyväksyntäohje, joka käsitellään komissiossa). Työn nopeuttamiseksi Energiateollisuus ry:n/sähkötutkimuspoolin kannattaa laatia kansallinen ohje yhdistelmärakenteen (teräksinen juurituki+puupylväs) vähimmäisvaatimuksista.
- Kreosoottipitoisuuden pienentäminen puupylväissä kansallisella päätöksellä ellei pienennystä NTR:n kanssa yhteistyössä saada aikaiseksi
- CC-kyllästeen hyväksymistä tukeva materiaalin ja kannanoton toimittaminen SYKE:llä
- C-kyllästeen huuhtouman tutkimus pylväillä
- Koelinjan rakentaminen mäntyöljy- ja vesilasikyllästetyistä pylväistä, joissa referenssinä on C- ja kreosoottikyllästettyjä pylväitä.
- Ilmajohtojen mitoitus- ja lahotarkastusohjelmistojen yhteensovittaminen kaikkien verkonhallintayhtiöiden käyttöön
- Sähköpylvään merkintöjä koskevan ohjeistuksen uusiminen, jossa annetaan ohjeet nykyistä tarkemmista merkintävaatimuksista

Lisäksi CENELEC-standardeihin perustuvia käytännön ohjeita täytyy päivittää seuraavasti:

- SENER:in verkostosuositus RJ 33:96, Puupylväiden käytönrajat tulee uusia. Nykyisissä puupylvään käytönrajoissa ei ole huomioitu, että orren kiinnityskohta/juurituki/tyvivahvike vaikuttaa momenttivarren pituuteen (lyhempi momenttivarso sallii suuremman tuulikuormituksen). Jatkossa käytönrajat tulisi määrittää koko rakenteelle pylväs, juurituki, orsityyppi, ilmajohto ja ottaa ne käyttöön lahotarkastuksissa.
- SENER:in verkostosuositus RJ 33:96 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen tulee uusia. Ohjeistuksessa tulee määrittää ne kriteerit voimassa olevien standardien mukaan, joiden perusteella pylväs todetaan poistettavaksi linjasta tulevaisuudessa. Paras tapa tähän on määrittää ja laskea pylvään todellinen kuormankantokyky kriittisissä kohdissa ja verrata sitä ko. kohtiin pylvästä aiheutuviin kuormituksiin ko. käyttöolosuhteissa jäljellä olevan käyttöiän aikana. Ohjeessa tulee myös määrittää uusille kyllästevalmisteille vastaavat lahon etenemiskäyrät kuin CCA-kyllästetyille pylväille kuntotarkastajien käyttöön (kuva 42).

SUMMARY

Background of the project

The most used utility pole was CCA-treated wooden pole in Finland. EU banned CCA in 2006 and after that is used C-treated or creosoted wooden poles. But a smell and healthy risk connected to creosote are so high, that workers do not want to operate with creosoted poles in Finland. C-treated poles are now mostly used, but service life expectations are so low, that choices have to be studied.

Aim of the project

The aim of the study was find out the best solution for utility poles used in 20 kV overhead lines, when all costs of the lifetime are calculated. Pole material was not restricted – it can be concrete, steel, wood, composite etc. The service life expectations should be over 50 years with a minimum variety.

Materials and calculation methods

C- and creosote impregnated wooden poles were used as a reference poles with overhead cable BLL62. Wind loads with wind speed 21 m/s are calculated by Finnmast Oy ja Otso Kuusisto Consulting in accordance of CENELEC EN 50341/50423+NNA/FI. In pole design calculations were used utility pole design instructions or manufacturer own design program. Prices for the pole materials were asked directly from Finnish manufacturers. The building costs of overhead lines, circulation costs etc. were calculated according to cost list of year 2006 upkeep by Finnish Energy industries. Total costs were compared with annuity method. Interest rate used in calculations was 5%.

Results

VIM/CENELEC comparison

New CENELEC-standards resulted almost two time's higher loads than earlier with wind speed 21 m/s. If the wind speed changes 1 m/s, it changes the loads only 10%. This had negative effect on the wooden poles size, decay spare and price. In the future, the wooden pole size should be bigger or

material stronger, so that service life (decay spare) would be similar than earlier. For other materials, the negative effects of new CENELEC-standards (bigger loads) are smaller, since their load carrying capacity can be easily increased e.g. by increasing wall thickness. See Chapter 3.3 Figure 6 and Table 2 concerning on operation borders and loads.

Cost factors

In the study were also compared different methods to get savings in overhead line building. The studied methods were maximizing span length and/or service life by over sizing and/or strength grading wooden poles. According to results, the maximizing of span length is always profitable. Over sizing e.g. using class 3 poles instead of class 2 poles is profitable, if the over sizing prolong the service life more than 10 years.

The largest effect of the total lifetime costs of overhead line have

1. Span length – how close to the maximum span length is possible to get in the selected pole material?
2. Total cost of erection i.e. pole price, pole erection costs, beams and cables installation cost.
3. Service life – if the service life of poles are longer than 40 years, the other factors determinates, which solution is the best.
4. Pole price and circulation costs.

Strength grading and over sizing of wooden pole

The strength graded wooden poles have a higher characteristic strength value than normal poles. This means, that the same size of strength graded pole can be achieved longer span or service life (decay spare is larger). Alternatively, it is possible to use smaller poles with the same span. It is very profitable to use strength graded wooden poles, if they can be used in longer spans. Therefore extra price can be paid for strength grading, if strength graded wooden poles have 10...20% higher characteristic strength than normal poles.

If the service life of wooden poles is maximized, it is needed more effective and accurate decay inspection and load carrying calculation methods than nowadays, since service life is directly

depended on decay spare of poles. In the future, the calculation of decay spare has to be included already into design programs. It is possible to replace class 3 size normal poles by using class 2 size half clean and strength graded pole. Especially, if in the design phase and decay inspection would be used real dimensions and values of poles. The pole standards give only a minimum values for poles. In practice the largest part of the poles are much better than minimum requirements given by the standard.

Preservatives

Effects of preservatives, their combinations and retentions on service life, price, environment (leaking and biocidity) was studied is studied in Chapter 35 and 3.5. According to results, C-preservatives cannot give over 50 years service life to wooden poles, since a high leaking and variety. Potential preservatives would be creosote, CC-preservatives, CTO (crude tall oil) and water glass. The most potential combined preservatives solutions are water glass+CTO or CTO with copper and/or boron. See Figures 10...30 and tables 3...15.

Utility pole Solutions

The study confirms earlier results, that the best solution is a creosoted wooden pole, although the creosote retention is decreased from 110 kg/m³ to 75 kg/m³. The second best solution is a combined structure, where strength graded and/or half clean tall oil treated wooden pole (100 kg/m³) is root supported with steel. The steel support has to be above ground at least 1,25 meter to shorten moment shaft of the pole. Almost as good solutions are a strength graded and/or half clean water glass, tall oil and CC-treated wooden poles. The solutions, where root of the C-treated wooden poles are impregnated with creosote and C-treated wooden poles with steel root support are about 4...6% more expensive in total lifetime costs than previously mentioned solutions. The C-treated wooden poles are only about 9% more expensive in the total lifetime costs than the creosoted poles, although estimated service lifetime is 40 years compared to 60 years of creosoted poles. The building costs are about 5% higher with the creosoted poles, since workers have to have safety clothes, washing possibilities etc. to avoid skin contact to the creosoted poles. If the service life of C-treated wooden poles would be over 45 years, they would be potential solution also in the future. See Figure 59.

However, the water glass and tall oil treatment technology is developing all the time. If the water glass treatment at retention level 75...100 kg/m³ can give more than 50 years service life for wooden poles, then it is more competitive than creosoting. If the stickiness of tall oil treated wooden poles at retention level 150...200 kg/m³ can be removed totally, then the total building cost are reducing 5% and tall oil treated poles would be as competitive as creosoted poles.

Concrete and composite utility poles are not competitive in Finland, when the total lifetime costs are compared. Both materials have a high price compared to wood and circulation costs are at same level with C-treated wooden pole. However, composite structures, materials and production technologies are developing strongly at the moment and for example nanotechnology can offer in future competitive composite solutions also for utility poles. See Figure 58.

At the moment, only the steel poles can compete against wooden poles. Steel poles were only 7% more expensive in total lifetime costs than creosoted poles and at same level than C-treated wooden poles. The competitiveness of steel poles is depended how grounding and building of steel overhead structures in practice should be done according to CENELEC-standards. There are no exact instructions, how the grounding of steel poles should be done in 20kV overhead structures. It is clear, that new CENELEC-standards are improving of competitiveness of steel poles. The bigger the cable or span is, the better is the competitiveness of steel poles. When the cable size is a bigger than BLL 62, it is very probably that the steel poles are better solutions than normal C-treated wooden poles. See Figure 58.

The best future solution is to reinforce of wooden poles ground line area with a steel component. Reinforced area have to be at least 1,25 meter above and underground. This solution allows wooden pole ground line decay, since steel reinforcement keeps the pole standing. Also, there is no need for ground line decay inspections of wooden poles. However, when the wooden poles are impregnated water based preservatives, the top decay and woodpeckers holes are large problems. When in the combined structure is a used half clean wooden pole treated with tall oil, the number of top decays and woodpecker problems can be reduced. Also, then the pole can be circulated free of charge. Steel components can be reused or delivered to metal circulations. Tall oil treated wooden pole can be sold, left for landowner or chip and burn in any power plant which use normal wood. Of course,

in combined structure is possible to use also C-treated wooden poles, but it is not so good solution than tall oil treated wooden pole, since

- The circulation cost of C-treated poles are 60 €/pole compared to tall oil treated 0 €/pole
- The corrosion caused by C-preservatives can loosen the fastenings of steel component
- A large leakage of C-preservatives cause top decay problems and therefore service life is not maybe prolonged especially A-poles and wired poles (above ground rainwater wash away copper, boron and triazoles).

Conclusions

In conclusion, the utility poles are manufactured in the future from

- strength graded and/or half clean (at least bottom part) tall oil treated wooden poles, which are reinforced in ground line area by a steel support, which have to be under and above ground at least 1,25 meter to shorten moment shaft of the pole.

Or

- Strength graded wooden poles, which are treated either creosote (75 kg/m³), CC-preservatives (NTR A-class), tall oil (150...200 kg/m³) or water glass (75...100 kg/m³). When creosoted poles are used, the retention level 30% smaller than NTR-A class. If necessary, water glass and tall oil treatment are combined. When oil treated poles are used, at least the ground line area is not peeled.

In addition, markings of utility poles are revised, so that in the future is possible to carry out more exact and effective decay inspections. These changes increase building costs on overhead lines about 2...4 % per kilometer compared to situation, where normal C-treated poles are used. But the total lifetime costs are about 10% smaller.

Sisällysluettelo	Sivu
1. Johdanto	15
1.1 Projektin tausta (kopioitu energiateollisuus r.y:n tarjouspyyntöluonnoksesta)	15
1.2 Tutkimuksen tavoite (kopioitu energiateollisuus r.y:n tarjouspyyntöluonnoksesta)	16
2. Aineisto ja menetelmät	17
2.1 Noudatettavat standardit	17
3. Puupylväät	18
3.1 Uusien CENELEC-standardien ja ohjeiden vaikutusten arviointi puupylväiden mitoitukseen ja käyttöikään - Vertailuna VIM.	18
3.2 Puupylväältä vaadittavat ominaisuudet uusien CEN ilmajohto- ja sähköpylvässtandardien mukaan	20
3.3 Uusien CEN- puusähköpylväs ja ilmajohtostandardien yhteensopivuus ja soveltuvuus	24
3.4 Kyllästysaineet	27
3.4.1 Laho, kyllästeet ja puupylväät	27
3.4.2 Kirjallisuuskatsaus puupylväiden potentiaaliin kyllästysaineisiin ja - menetelmiin	29
3.4.2.1 Kreosootti	30
3.4.2.2 C- ja CC-kyllästeet vs. CCA	34
3.4.2.3 Mikronisoitu kupari	45
3.4.2.4 Asetylointi	45
3.4.2.5 Mäntyöljykyllästys	46
3.4.2.6 Furfulointi	55
3.4.2.7 Vesilasikyllästys	57
3.4.2.8 Booripohjaiset puunsuoja-aineet	60
3.4.2.9 Propikonatsoli ja tebukonatsolipohjaiset öljyt	61
3.4.2.10 Pellava- ja mineraaliöljypohjaiset kyllästeet	61
3.4.2.11 Tervansukuiset puutisleet	62
3.5 Yhteenveto kyllästysaineista ja niiden soveltuvuudesta puupylväiden kyllästyksen	63
4. Puupylvään kehittämismahdollisuudet	71
4.1 Puupylväiden lujuuslajittelu ja nykyistä tarkempi tunnistusmerkintä	71
4.2 Puupylvään ylimitoitus sekä muiden kustannuksiin vaikuttavien mitoitusmekanismien optimointi	76
4.3 Öljykyllästys (kreosootti ja/tai mäntyöljy) puolipuhaille, harjalatvaisille pylväille	77
4.4 Vanhojen pylväiden nykyistä tehokkaampi ja tarkempi lahotarkastus parempien pylvään lähtö- ja historiatietojen, käytönrajojen sekä lahotarkastusohjelmistojen avulla	79
5. Tyypillisen 20 kV:n ilmajohtojen määrittely ja lähtöarvot puupylväälle	82
6. Tulokset puupylväät	85
7. Riskianalyysi eri puupylväsratkaisuilla	96
8. Tulosten tarkastelu puupylväsratkaisut	100
9. Teräs-, betoni- ja komposiittipylväät sekä yhdistelmäarakenteet	104
9.1 Muut ratkaisut – mistä löytyy kilpailuetua puupylväaseen verrattuna?	104
9.2 Teräspylväät	105
9.3 Betonipylväät	112
9.4 Komposiittipylväät	115
9.5 Yhdistelmäarakenteet	120
9.6 Yhdistelmäarakenteiden mitoitus: käytönrajojen johdoin, pylvästyypin, orsin ja juurituki	127
9.7 Riskianalyysi teräs-, betoni- ja komposiittipylväille sekä yhdistelmäarakenteille	130
10. Johtopäätökset	132
11. Jatkotoimenpide-ehdotukset	136
Kirjallisuus	138
Liitteet	140

1. Johdanto

1.1 Projektin tausta (kopioitu energiateollisuus r.y:n tarjouspyyntöluonnoksesta)

Suurin osa Suomessa olevista keski- ja pienjännitteisistä sähköjohdoista on ilma-johtoja, joiden kannatinrakenteena on käytetty puupylvästä. Vuoteen 2006 saakka yleisemmin käytetty pylväs on ollut CCA-kyllästeinen (kupari, kromi, arseeni) puupylväs. Vähäisemmässä määrin on käytetty myös kreosoottikyllästeisiä puupylväitä. EU-asetukseen perustuva Suomen lainsäädäntö kielsi CCA-kyllästeen käytön vuoden 2006 syysystä alkaen. Tämän kiellon jälkeen sähköyhtiöt ovat ryhtyneet käyttämään kreosootti- ja C-kyllästeisiä (kupariyhdiste) pylväitä. Kreosoottikyllästeisiä pylväitä käytettäessä työntekijöiden asianmukainen suojautuminen on koettu vaikeaksi ja on myös pelätty kreosootille altistumista. Tästä syystä moni sähköyhtiö on siirtynyt käyttämään Cu-kyllästeisiä pylväitä. Asiakkaat ja maanomistajat eivät myöskään pidä kreosootin hajusta. Muualla käytössä olevaa CC- (kuparikromi) kyllästettä ei ole ainakaan toistaiseksi hyväksytty Suomessa käytettäväksi.

Kreosoottipylvään odotettavissa oleva kestoikä on samaa luokkaa kuin aiemmin käytetyn CCA-kyllästeisen pylvään (noin 50 vuotta). Cu-kyllästeisen pylvään odotettavissa oleva kestoikä on edellä mainituilla kyllästysmenetelmillä kyllästettyjä pylväitä lyhempi. On esitetty arvioita noin 20-30 vuoden kestoiästä. Koska Cu-kyllästysmenetelmän käyttökokemuksia on vain muutamalta vuodelta, luotettavaa kokemuseräistä kestoikää ei tiedetä. Myös Cu-kyllästetyillä pylväillä nähdään ympäristö, korroosio ja katkolaho-ongelmia.

Vaikka nykyään sähköjohtojen rakennustapana käytetään enenevässä määrin maakaapelointia, tullaan jatkossakin käyttämään ilmajohtoja varsinkin haja-asutus alueilla. Suomen keski- ja pienjännite johtojen kokonaisjohtopituudesta suuri osa on näillä haja-asutus alueilla johtuen taajama ja kaupunki alueiden suhteellisen pienestä pinta-alasta.

Sähkönjakeluyhtiöillä on nyt syntynyt ongelma, löytää keski- ja pienjännitejohdoille kustannustehokas, helposti huollettava, ympäristöystävällinen ja riittävän pitkäikäinen sähköpylvään rakenneratkaisu.

1.2 Tutkimuksen tavoite (kopioitu Energiateollisuus r.y:n tarjouspyyntöluonnoksesta)

Energiateollisuus ry:n Sähkötutkimus pooli (ST-pooli) on päättänyt tilata tutkimuksen, jossa etsitään ja määritellään keski- ja pienjännitteisille sähköjohdoille kustannustehokas, ympäristöystävällinen, helposti huollettava ja riittävän pitkäikäinen sähköpylväs.

Pylvään materiaalille ei aseteta reunaehtoja. On tietenkin positiivista, mikäli pylvään kotimaisuusaste on mahdollisimman korkea. Uusi pylväs voi olla puun lisäksi myös metallia, betonia, lasikuitua, jotain komposiittia, eri menetelmillä kyllästettyä puuta, tms. tai eri aineiden yhdistelmä.

Nykyisten Suomessa hyväksytyjen kyllästysaineiden lisäksi myös muitten muissa maissa hyväksytyjen tai kehitteillä olevien kyllästysaineiden käyttäminen on rakenteissa sallittua, mikäli kyllästeestä ei aiheudu ympäristö- ja työturvallisuusongelmia. Kyllästämisen lisäksi muut vaihtoehtoiset pylväspuun käsittelyvaihtoehdot on kartoitettava.

Eri materiaalien työskentelykustannukset ja pylvään käyttöiän aikaiset kustannukset on arvioitava tutkimuksessa. Tutkimuksen tuloksena tulee olla kaksi pylvästyypin vaihtoehtoa. Toisessa vaihtoehdossa selvitetään pylvästyypin, johon voi kiivetä pylväskengillä tai muita kevyitä apuvälineitä käyttäen ja toisessa vaihtoehdossa pylväs, jossa työskentely tapahtuu nostokorista.

2. Aineisto ja menetelmät

Tutkimuksessa käytetään hyväksi olemassa olevaa tietoa sekä aikaisempia selvityksiä ja tutkimuksia sekä Suomessa että muissa maissa. Uutta kokeellista tutkimusta tms. ei tehdä.

2.1 Noudatettavat standardit

Tutkimuksen lähtötietoina ja käytönrajoina erilaisille pylväsmateriaaleille ja ilmajohtorakenteille käytetään seuraavia standardien antamia ohjeita:

- EN 50341-1 Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 1: General Requirements – Common specifications.
- EN 50341-3-7- Overhead electrical lines exceeding AC 45 kV. Part 3-7: National Normative Aspects for FINLAND.
- EN 50423-1 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV up to and including AC 45 kV. Part 1: General requirements - Common specifications.
- EN 50423-3-7 Overhead electrical lines exceeding AC 1 kV up to and including AC 45 kV. Part 3-7: National Normative Aspects for FINLAND.

Uusien CENELEC-standardien kansallisia sovellutusohjeita ja käytönrajoja ei ole vielä kaikilta osin laadittu (esim. puupylväiden käytönrajat, laholuokitus ja lahoisuustarkastus. Mikäli uusia ohjeita ei ole saatavissa, käytetään puupylväillä soveltuvien osien esim. VIM:ä.

Lisäksi tutkimuksen lähtötietoina käytetään harmonisoituja tuotestandardia puu-, betoni-, teräs- ja komposiittipylväille, kuten EN 14229 Wood poles for overhead lines – requirements. Mikäli harmonisoitua tuotestandardia ei ole, noudatetaan kansallisia ohjeita ko. materiaalin suhteen esim. VIM.

3. Puupylväät

3.1 Uusien CENELEC-standardien ja ohjeiden vaikutusten arviointi puupylväiden mitoitukseen ja käyttöikään - Vertailuna VIM.

Vahvavirtailmajohtomääräyksissä puupylvään suurin sallittu jännitys on 18,0 N/mm² ja kriittinen jännitys (lujuus) on 25,2 N/mm², joka siis tulee vanhojenkin pylväiden täyttää (varmuuskerroin on 1,4). Nykyisin käytössä olevien puupylväiden, jotka on valmistettu SFS 2662 mukaan, oletetaan täyttävän vahvavirtailmajohtomääräysten (VIM) annettu ominaislujuus 41,8 N/mm² (keskimääräinen lujuus 50 N/mm² ja keskihajonta 5 N/mm²). Käytännössä keskimääräinen lujuus 50 N/mm² jopa ylitetään, mutta keskihajonta on oletettua suurempi. Ominaislujuutta pienennetään vielä materiaalivarmuuskertoimella. Puupylväälle tämä varmuuskerroin on noin 1,66 (41,8/18,0= 2,3). Puupylvään kokonaisvarmuuskerroin on siis 50/18 = 2,8, joka antaa tyypilliselle 2-luokan puupylväälle läpimitan lahoamisvaraksi tyvessä noin 6 cm. Vanhaa pylvästä pidetään yleensä vielä käyttökelpoisena, kunnes se on saavuttanut lahoisuusasteen 4, ts. lahoa puuta on ympäri pylvään yli 20 mm (Puupylvään kunnossapidon ja uusimisen perusteita s. 26 v. 1982) eli terve läpimitta on pienentynyt yli 4 cm. Taulukossa 1 on esitetty käytössä oleva puupylväiden lahoisuusluokittelu. Kuvassa 1 on esitetty terveen tyvihalkaisijan määrittäminen SENER:in verkostosuosituksen RJ 33:96 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen mukaan.

Taulukko 1. Puupylväiden lahoisuusluokittelu.

Lahoisuusaste	Tunnusmerkit	Ympäri pylvään ulottuvassa pintalahotapauksessa terveen puun osuus alkuperäisestä. (pylvään läpimitta maara- jassa 25 cm)	
		Poikkileik- kauspinta-ala A	Taivutus- vastus W ^{x)}
0 Terve	Pinta terve ja kirkas	100 %	100 %
1 Alkavaa lahoa	Pehmennyt puuta ympäri pylvään enintään 2 mm syvyyteen.	100... 98 %	100... 96 %
2 Näkyvää lahoa	Lahoa puuta ympäri pylvään 2-10 mm syvyyteen tai vastaava muunlainen laho-osuus poikkipinnassa.	98... 85 %	96... 80 %
3 Melkoista lahoa	Lahoa puuta ympäri pylvään 10-20 mm syvyyteen tai vastaava muunlainen laho-osuus poikkipinnassa.	85... 70 %	80... 60 %
4 Pahoin lahonnut	Lahoa puuta ympäri pylvään yli 20 mm syvyyteen tai vastaava muunlainen laho-osuus poikkipinnassa	alle 70 %	alle 60 %

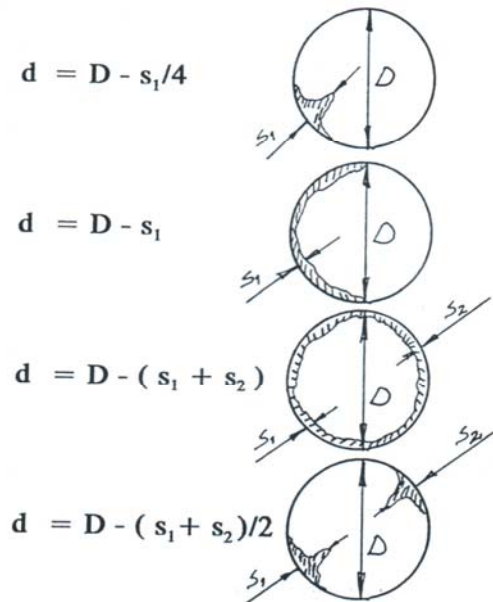
x) Teoreettinen arvo, jossa pintaosa oletettu täysin lahoksi ja muu osa uudenveroiseksi.

Terveen tyvihalkaisijan määrittäminen pintalahoisella pylväällä

D = Pylvään koko tyvihalkaisija

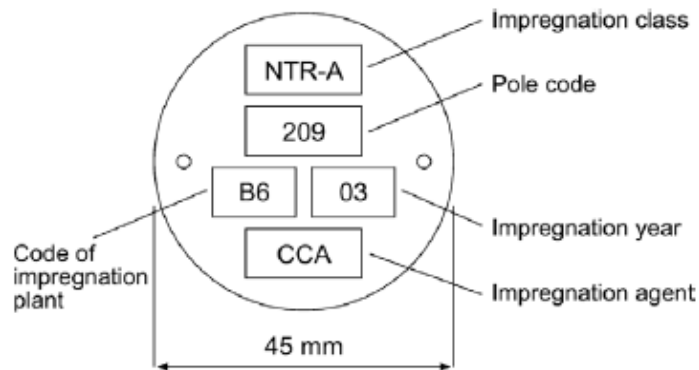
d = Pylvään terve tyvihalkaisija

s = Lahon osan syvyys



Kuva 1. Terveen tyvihalkaisijan määrittäminen SENER:in verkostosuositus RJ 33:96 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen.

SFS 2662 määrittelee sähköpylvään mitta- ja laatuvaatimuksia. Sen mukaan pylväät tulisi valmistaa mieluiten mäntyrungon tyviosasta, joka on luontaisesti oksaton. Pylväsaihiot tulisi kuoria ja sorvata puhtaaksi sekä kuivata alle 28% kosteuteen ennen kyllästystä. Pylväsaihion oksankiehkuran oksien läpimittojen summa ei saa yli 25% ko. kohdan pylvään läpimitan mukaan lasketusta piiristä. Tämä tarkoittaa, että 2-luokan pylvään latvaosassa yhden oksankiehkuran oksien läpimittojen suurin sallittu summa on noin 125 mm. Vinosyisyyttä pylväässä sallitaan max 10 cm per metri. Pylväät tulee kyllästyttää EN 351 standardin osien 1 ja 2 mukaan käyttöluokkaan UC4 (maakosketus) ja tunkeumaluokkaan P8 (täysi tunkeuma pintapuuhun) kyllästysainepitoisuudella, joka täyttää NTR A-luokan vaatimuksen. Lisäksi pylväisiin tulee kiinnittää kolmen metrin korkeudelle esim. alumiinilappu, josta ilmenee kuvan 2 tiedot pylvästä.



Kuva 2. Puupylvään merkintä SFS-EN 2662 mukaan. Termien käännökset: Impregnation class=kyllästysluokka, Pole code=pylvään koodi, Code of impregnation plant=Kyllästämön tunnus, Impregnation year=kyllästysvuosi ja Impregnation agent=kyllästysaine.

3.2 Puupylväältä vaadittavat ominaisuudet uusien CEN ilmajohto- ja sähköpylvässtandardien mukaan

EN 50341-3-7:2006 standardissa on annettu uudet vaatimukset ilmajohdoissa käytettäville puupylväille. Puupylväissä käytettävän puumateriaalin on täytettävä standardin prEN 14229:2007 vaatimukset. Se on laadittu voimajohdoissa käytettäviä puupylväitä varten. Rakennuksissa käytettävien puurakenteiden mitoitukseen laadittu Eurocode 5 (EN 1995-1-1) ei kata voimajohtojen puupylväitä. Sitä käytetään kuitenkin soveltuvin osin puupylväiden liitosten sekä sahatusta tai liimapuusta valmistettujen pylväiden mitoituksessa.

Puupylväät on mitoittettava siten, että kaikissa poikkileikkauksissa pätee kaava:

$$\sigma_d \leq f_d \quad \text{ja} \quad f_d = f_k / \gamma_M \quad \text{jossa}$$

σ_d = Laskettu jännitys (puristus, veto, taivutus), mitoitusarvo

f_d = Mitoituslujuus

f_k = Ominaislujuus vastaten 5 % varmuustasoa prEN 14229 mukaan. Sen arvon tulee vastata lopullisia käyttöpaikan olosuhteita. Ellei toimitusasiakirjoissa ole toisin määriteltä, on suomalaisesta männystä tehtyjen puupylväiden ominaislujuuden vähimmäisarvo 41,8 MPa, jota käytetään tällöin myös mitoituksessa.

γ_M = Puumateriaalin osavarmuusluku

$\gamma_M = 1,4$ tavallisille lyhytaikaisille kuormitustiloille (esim. tuuli ja jää)

$\gamma_M = 1,0$ satunnaisille kuormitustiloille ja lahotarkastelussa

Pylvään lujuus on tarkistettava lahoamisvaiheen aikana siten, että tarkistus perustuu normaalin tarkastus- ja kunnossapitotoiminnan aikana tehtyihin mittauksiin. Todellisia mitattuja mittoja ja lahosyvyyyksiä käytetään yhdessä pienennetyn materiaalin osavarmuusluvun kanssa. Laskelmissa käytetään ehjän poikkipinnan mittoja.

Koska merkittävää lahoamista esiintyy vasta pylvään käyttöiän loppupuolella, voidaan kuormien vaikutuksia pienentää käyttämällä pienennyskerrointa, joka ottaa huomioon kuormitusyhdistelmien esiintymistodennäköisyydet lahoamisvaiheen aikana. Suomessa voidaan tuuli- ja jääkuormilla käyttää ylimääräistä pienennyskerrointa 0,92, joka vastaa 30 vuoden lahoajanjaksoa. Yhdistelmillä kerrointa käytetään erikseen kummallekin osakuormalle.

Tällöin EN 50341-3-7:2006 standardin mukaan puupylvään suurin sallittu jännitys on 29,9 N/mm². Puupylvään kokonaisvarmuuskerroin on siis $50/29,9 = 1,67$. Pienemmällä kokonaisvarmuuskertoimella on haluttu kompensoida kasvaneesta tuulennopeudesta ja jääkuormituksesta aiheutunutta puupylvään kokoluokan kasvua. Vanhoilla pylväillä kuormia tosin pienennetään, jonka vuoksi pienillä johtimilla (Sparrow ja Raven) muutoksia ei juuri tapahdu pylväskoossa ja lahoamisvarassa. Näitä suuremmilla johdoilla mitoittavaksi tekijäksi tulee lahoamisvara, jos puupylväillä tavoitellaan yli 50 vuoden käyttöikää.

Standardin prEN 14229, Wood poles for overhead lines, Requirements mukaan jokaisen puupylväsvalmistajan tulee jatkossa CE-merkitä sähköpylväiksi valmistavansa pylväät kuvassa 3 esitetyn mallin mukaan. Jokainen pylväsvalmistaja ilmoittaa siis jatkossa CE-merkinnän yhteydessä pylvään kuormankantokyvyn laskentaa varten oleelliset tiedot. Pylväsvalmistajan vastuulla on siis CE-merkin hakeminen ja siihen liittyvien testien ja taustadokumenttien tekeminen. Kuvassa 3 on esitetty standardin prEN 14229 mallikuva CE-merkistä ja kuvassa 4 on esitetty standardin antamat tyypilliset ominaislujuudet eri puulajeista valmistetuille pylväille. Kuvassa 5 on esitetty puupylvään testaustapa. Standardissa prEN 14229 männystä (*Pinus sylvestris*/redwood) valmistetulle pylväälle on annettu ominaislujuudeksi vain 31 N/mm² (Annex E), kun ilmajohtostandardi ilmoittaa pohjoismaisen männyn ominaislujuudeksi 41,8 N/mm². Puupylväsvalmistajat joutuvat siis tekemään laajan testiohjelman, jotta puupylvään valmistajat voivat CE-merkissä ilmoittaa ominaislujuudeksi vähintään

41,8 N/mm². Standardissa on annettu mahdollisuus valmistajan käyttää myös olemassa olevaa testiaineistoa CE-merkin vaadittavien ominaisarvojen määrittelyssä. Sitä ei ole kerrottu, voiko valmistaja käyttää CE-merkin ominaisarvojen määrittelyssä ulkopuolisen organisaation testiarvoja.

 01234		<i>CE conformity marking, consisting of the "CE"-symbol given in Directive 93/68/EEC.</i> <i>Identification number of the notified FPC certification body</i>
AnyCo Ltd 09 01234-CPD-00234		<i>Name or identifying mark of the manufacturer</i> <i>Last two digits of the year in which the marking was affixed</i> <i>Number of the EC certificate of conformity</i>
EN 14229: 2009 Wood pole for overhead lines		<i>Number of European Standard</i> <i>Description of the product and its intended use</i>
Bending strength	53,8 Nmm ²	<i>Information on regulated characteristics</i>
Modulus of elasticity / Compressive strength	10 400 Nmm ²	
Dangerous substances	NPD	
Durability - Retention - Penetration - Use Class - Preservative type	P8, 185 kgm ³ 4 Creosote	

Kuva 3. Standardin prEN 14229, Wood poles for overhead lines, Requirements mallikuva puupylvään CE-merkistä.

Annex A Table E.1 Typical minimum characteristic values for wood poles

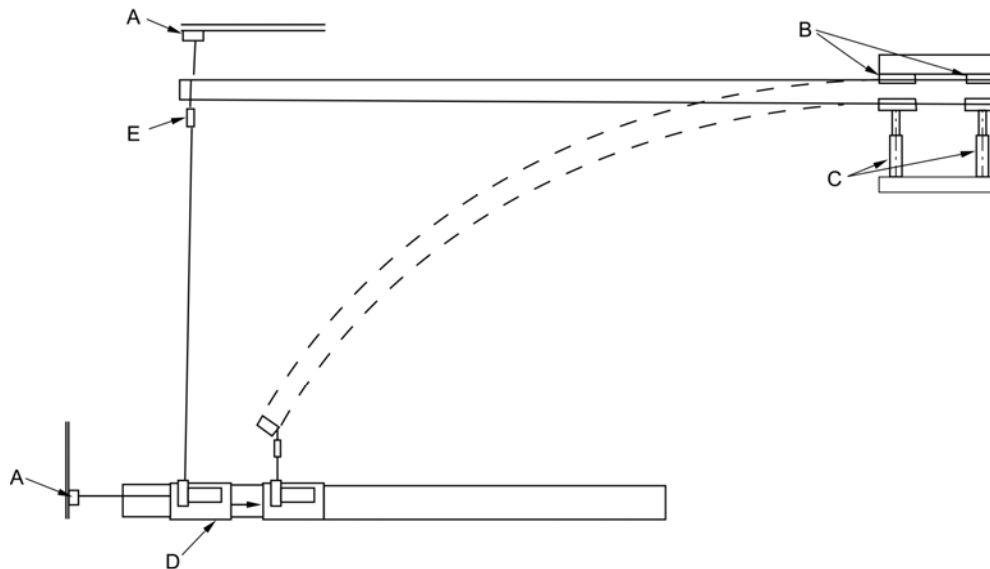
NOTE See Introduction and 5.4.

Botanical species	Common name	Marking code	Bending Strength (Nmm ²)	Modulus of elasticity (Nmm ²)
Abies alba	Fir	AA	31,0	8000
Abies pectinata	Fir	AP		
Larix species	Larch	LE		
Picea abies	Spruce	PA	31,00 (45,57)	8000
Picea sitchensis	Sitka spruce	SS	(31,9)	8 972
Pinus laricio	Corsican pine	PL		
Pinus pinaster	Maritime pine	PP	(30,0)	9 000
Pinus sylvestris	Scots pine / Redwood	PS	31,00 (48,97)	8000
Pinus uncinata	Mountain pine	PU		
Pseudotsuga menziesii	Douglas fir	PM	(34,1)	10 795
Pinus nigra	Corsican / Austrian pine / Black pine	PN	(50,1)	10 000

NOTE 1 Other characteristic values than those presented in this Annex may be declared by the manufacturer but should be supported by tests undertaken in accordance with the requirements of 5.4.

NOTE 2 For informative purposes the associated sample mean value of bending strength $m(f_m)$ given in this annex in parenthesis.

Kuva 4. Standardin prEN 14229, Wood poles for overhead lines, Requirements antamat tyypilliset ominaislujuudet eri puulajeista valmistetuille pylväille.

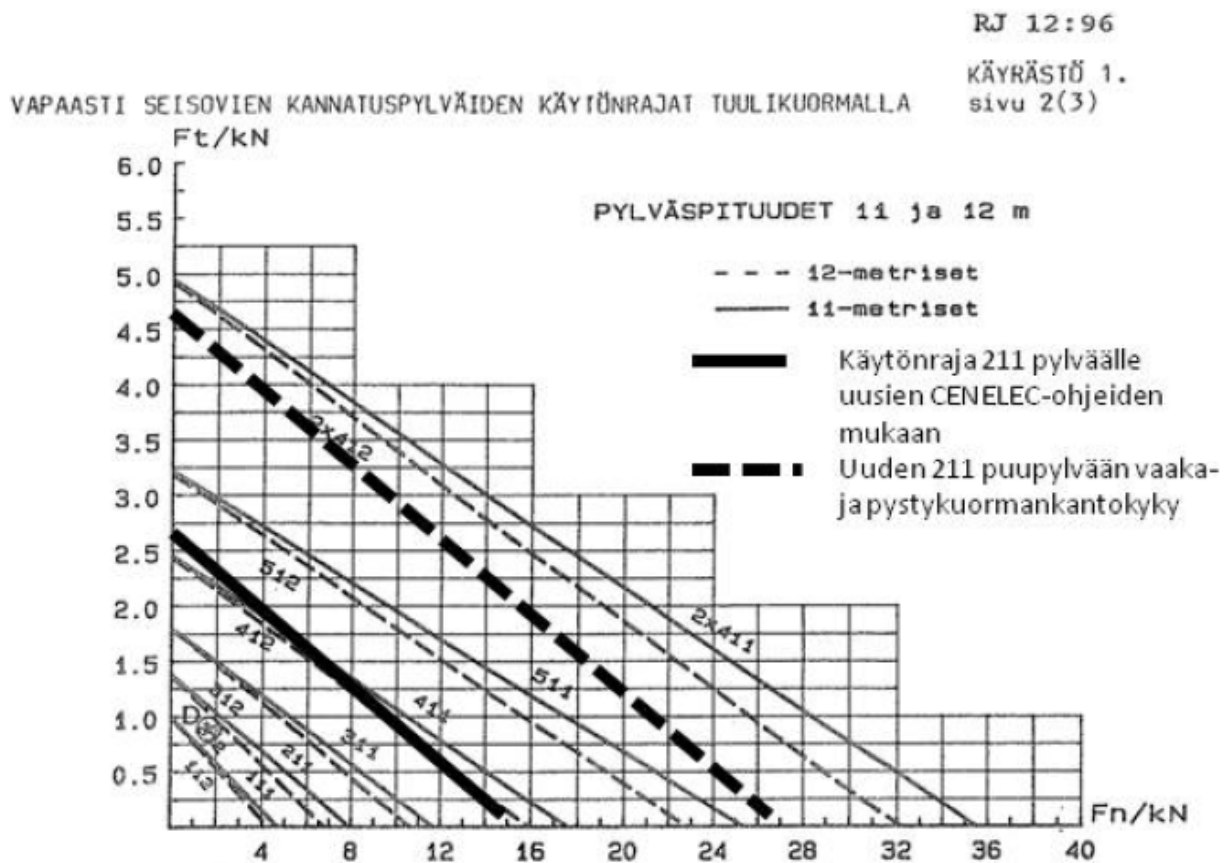


Kuva 5. Puupylvään taivutuslujuuden testaus prEN 14229 mukaan,

3.3 Uusien CEN- puusähköpylväs ja ilmajohtostandardien yhteensopivuus ja soveltuvuus

Suurimman sallitun jännityksen nosto uusien CEN-standardien mukaisesti vaikuttaa siis puupylvään lahoamisvaraan ja tätä kautta myös puupylvään käyttöikään. Kuvassa 6 on esitetty 211 pylvään käytönrajat VIM:in mukaan sekä arvio uusista käytönrajoista CENELEC-ohjeiden mukaan. Selvyyden vuoksi kuvaan 6 on myös lisätty uuden 211 pylvään vaaka- ja pystykuormankantokyky, jonka perusteella voidaan helposti todeta, että uusi 211 puupylväs saa jatkossa ikääntyessään heikentyä huomattavasti vähemmän kuin ennen. Käytössä olevat puupylväsilmajohdot on rakennettu yli 2,1 kertaa kriittistä jännitystä (18,0 N/mm²) lujemmiksi, joten niissä on runsaasti lahoamisvaraa (Puupylvään mekaaninen mitoitus s. 77 1982). Vanhaa pylvästä pidetään yleensä vielä käyttökelpoisena, kunnes se on saavuttanut lahoisuusasteen 4, ts. lahoa puuta on ympäri pylvään yli 20 mm (Puupylvään kunnossapidon ja uusimisen perusteita s. 26 v. 1982) eli terve läpimitta on pienentynyt yli 4 cm. Tästä huolimatta puupylväiden varaan rakennetuissa ilmajohdoissa ei ole esiintynyt merkittäviä ongelmia. Pienillä johtimilla (sparrow ja raven) lahoamisvaraa on ollut jopa enemmän, sillä monissa tapauksissa VIM:in mukainen mitoitus antaa pylväsluokaksi 1, mutta ohjeiden mukaan on käytetty aina vähintään pylväsluokkaa 2. Uudet CENELEC-ohjeet eivät tämän vuoksi muuta tilannetta pienillä johtimilla, mutta viimeistään PAS-johdolla BLL62 lahoamisvara tulee mitoittavaksi tekijäksi, jos tavoitteena on yli 50 vuoden käyttöikä. Tämä siis, vaikka vanhoille pylväille kuormituksia pienennetään uusien CENELEC-ohjeiden mukaan. Taulukossa 2 on esitetty

BLL62 johtimien aiheuttamat vaaka- ja pystykuormat VIM:in (laskettu profila-ohjelmalla) ja uusien CENELEC-ohjeiden (laskenut Finnmast Oy) mukaan ilmajohdon suoran osan kannatinpylväille.



Kuva 6. Puupylvään 211 käytönrajat (vaaka 1340 N ja pysty 7460 N) VIM:in mukaan sekä arvio uudesta käytönrajasta CENELEC-ohjeiden mukaan ominaislujuudella 41,8 N/mm². Selvyyden vuoksi kuvaan on lisätty myös uuden 211 pylvään vaaka- ja pystykuormankantokyky, jonka perusteella voidaan, että uusi 211 puupylväs saa jatkossa ikääntyessään heikentyä huomattavasti vähemmän kuin ennen. Esimerkiksi Pigeon johtimella 80 metrin jänneväliillä tuulen aiheuttama vaakakuormitus on suoran osan kannatinpylväällä 790 N VIM:in mukaan ja 1425 N uusien CENELEC ohjeiden mukaan.

Taulukko 2. BLL62 johtimien aiheuttamat vaaka- ja pystykuormat VIM:in (laskettu profila-ohjelmalla) ja uusien CENELEC-ohjeiden (laskenut Finnmast Oy) mukaan ilmajohdon suoran osan kannatinpylväille. Uusi 211 pylväs kestää keskimäärin pelkkää vaakakuormaa 4 600 N tai pelkkää pystykuormaa 26 500 N ominaislujuudella 41,8 N/mm².

Jänneväli	VIM Vaakakuorma (N) / Pystykuorma (N)	CENELEC Vaakakuorma (N) / Pystykuorma (N)
60 m	710 / 580	1475 / 1049
80 m	940 / 780	1904 / 1235
100 m	1180 / 970	2333 / 1421
120 m	1410 / 1160	2720 / 1607

Uudet standardit prEN 14229, Wood poles for overhead lines, Requirements ja EN 50341-3-7:2006 ilmajohtostandardit eivät ole myöskään olennaisilta osiltaan yhteensopivia. Merkittävin ero on puupylvään ominaislujuuden määrittelyssä. Standardin prEN 14229, Wood poles for overhead lines, Requirements mukaan puupylväsvalmistajan tulee antaa CE-merkissä puupylvään ominaislujuus, joka on määritelty joko aikaisempaan tutkimustietoon perustuen (prEN 14229 Annex E:ssä mäntypylvään ominaislujuudeksi on määritelty aikaisemman tutkimustiedon perusteella vain 31 N/mm²) tai laajan testausohjelman avulla. Lisäksi prEN 14229 standardin malli CE-merkissä (kuva 2) ilmoitetaan taivutuslujuuden keskiarvo, jota ei siis käytetä ilmajohtojen mitoituslaskelmissa. Standardissa prEN 14229 ei ole myöskään annettu valmistajalle mahdollisuutta käyttää CE-merkkiä, jossa ilmoitetaan pylvään täyttävän asiakkaan spesifikaation vaatimukset, kuten kuvan 7 esimerkissä on annettu valaisinpylväille. Standardissa on kuitenkin annettu mahdollisuus valmistajan käyttää olemassa olevaa testiaineistoa CE-merkin vaadittavien ominaisarvojen määrittelyssä. Sitä ei ole kerrottu, voiko valmistaja käyttää CE-merkin ominaisarvojen määrittelyssä ulkopuolisen organisaation testiarvoja. Ilmajohtostandardissa EN 50341-3-7:2006 ilmoitetaan sen sijaan mäntypylvään ominaislujuudeksi 41,8 N/mm². Ilmajohtostandardi ei voi määritellä puupylvään ominaislujuutta, vaan sen ilmoittaa pylväsvalmistaja CE-merkissä tai sen taustadokumenteissa. Ilmajohtostandardissa voidaan antaa minimiarvot ominaislujuudelle ja/tai suurimmalle sallitulle jännitykselle.

 0123-CPD-0001	CE conformity marking consisting of the CE symbol given in directive 93/68/EEC
AnyCo Ltd, PO Bx 21, B-1050 45PJ76/02 0123-CPD-0456	Identification of the notified body Name or identifying mark and registered address of the manufacturer Identification number and last two digits of the year in which the marking was affixed Number of the EC certificate
EN 40-8 Wooden lighting column for circulation areas	Number and title of European standard concerned Generic name, intended use and identification code
For resistance to horizontal loads and durability see the client's design specifications Design Specification: Order Code xxxxxx	Information on product mandated characteristics

Figure ZA.1 — Example of CE marking with Method 3 (Declaration of compliance with a given client's design specification) . Wooden lightning column.

Kuva 7. Esimerkki CE-merkistä, jossa valmistaja ilmoittaa tuotteen, tässä tapauksessa valaisinpylväs, täyttävän asiakkaan vaatimukset.

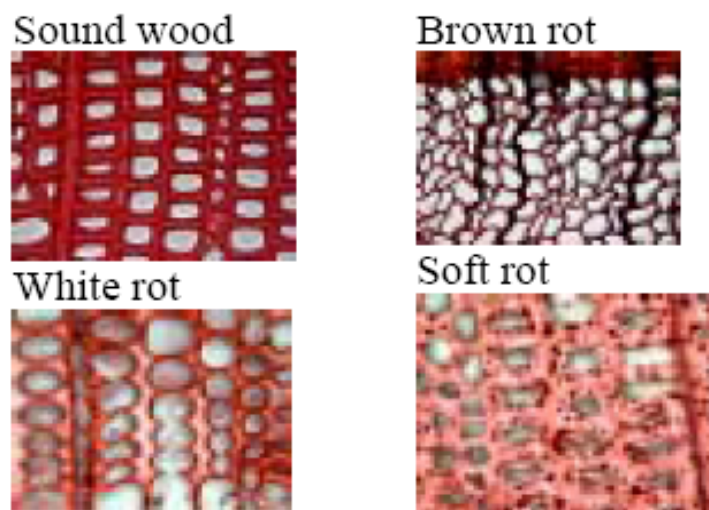
3.4 Kyllästysaineet

3.4.1 Laho, kyllästeet ja puupylväät

Suurin yksittäinen syy puupylväslinjan uusintaan on puupylväiden lahoaminen. Puun lahoaminen vaatii

- Lämpöä yli 5 astetta
- puun kosteuden tulee olla pitkiä aikoja yli 30 % (ulkokuivan käsittelemättömän puun kosteus Suomessa noin 20-25%)
- happea
- puussa olevat ravinteet ovat sienille otollisessa muodossa

Puupylväillä esiintyy lähinnä kahta lahotyyppeä: katkolaho (soft rot) ja ruskolaho (brown rot) (kuva 8). Katkolaho pystyy toimimaan myös erittäin märissä ja vähähappisissa olosuhteissa. Tämän vuoksi pylväillä maanrajan laho on yleensä katkolahon aikaansaamaa. Ruskolahoa esiintyy maanrajan yläpuolella, latvassa (latvahatun puute) ja tikan reikien ympärillä. Kyllästysaineiden ja –menetelmien tulisi siis antaa suojaa näitä kahta erilaista lahotyyppeä vastaan. Katkolaho heikentää puun taivutuslujuutta erityisen voimakkaasti. (Puupylväiden kunnossapidon ja uusimisen perusteita 1982.)



Kuva 8. Mikroskooppikuvat eri puun lahotypeistä. Sound wood = terve puu, Brown rot = ruskolaho, White rot = valkolaho ja Soft rot = katkolaho (Marie-Louise Edlund and Jöran Jermer 2004)

Yleisin kyllästeiden tehoaine kupari, toimii hyvin katkolahottajia vastaan. Ruskolahottajissa on kuitenkin kuparitolerantteja kantoja, jotka lahottavat pelkästään kuparilla kyllästettyä puuta. CCA kyllästeessä arseeni toimi erittäin hyvin myös ruskolahoa vastaan ja sen pysyvyys puussa oli hyvä. Tämän vuoksi kuparipohjaisiin kyllästeisiin täytyy lisätä komponentteja, jotka toimivat joko biologisesti, kemiallisesti tai fysikaalisesti erityisesti ruskolahottajia vastaan. Näitä ruskolahottajia vastaan toimivia yhdisteitä ovat mm. triasolit (mm. tebukonatsoli, propikonatsoli), boori, fenolit, kreosootti ja mäntyöljy. Nämä kaikki ovat vesiliukoisia kreosoottia ja mäntyöljyä lukuun ottamatta, joten niiden antamasta pitkäaikaissuojasta ruskolahoa vastaan ei ole vielä pitäviä todisteita. Myös kupari huuhtoutuu pois puusta voimakkaasti ellei sen kiinnittymistä edistetä esim. kromin avulla - CC-kyllästeet toimivatkin huomattavasti paremmin lahoa vastaan kuin C-kyllästeet (Edlund 1998, Mike H. Freeman ja Graig R. McIntyre. 2008).

Lahonnut puu menettää lujuutensa. Lujuuden menetys alkaa jo hyvinkin varhaisessa vaiheessa, jolloin vain lievä värinmuutos saattaa olla ainoa ulospäin näkyvä merkki alkaneesta lahosta pylvään pintaosassa. Lahoaminen tapahtuu nyt käytössä olevilla CCA-pylväillä seuraavasti: Ensimmäisen 20 vuoden aikana näkyvää lahoa ei juuri synny, mutta säärasituksen aiheuttamaa puun pinnan rapautumista ja halkeilua eteläpuoleisella kyljellä tapahtuu. Tämän jälkeen laho syö pylvään läpimittaa noin 2 mm vuodessa - edelleen yleensä auringon puolella voimakkaammin. Koska VIM:n mukaisissa pylväissä läpimitassa lahoamisvaraa jopa noin 6 cm, niin pylväät on vaihdettava noin 50 vuoden iässä. Koska laho etenee epätasaisesti muodostaen "taskuja", niin terve läpimitta ei pienene ihan näin nopeasti. Tämän vuoksi käyttöikä voi olla jopa tätä pidempi.

Kuvassa 9 on kaksi muuntajapylvästä, oikealla 1970-luvun CCA-pylväs, joka on kobrattu vuonna 2001 ja vasemmalla vuonna 1996 kyllästetty CCA-pylväs. Kuvassa 9 näkyy hyvin säärasituksen aiheuttama puun halkeilu ja rapautuminen vanhemmalla pylväällä. Vanhemman pylvään pinta on maanrajan yläpuolelta katkolahon vioittama ja voimakkaasti halkeillut, koska kobraus on tehty ainoastaan maanrajasta alaspäin. Vanhan pylvään pinta on yleensä auringon puolelta halkeillut voimakkaasti, kuten kuvassa 9. Jos kyllästeen tunkeuma ja jäämä pintapuuhun on epätasainen, niin lahottajasienet pääsevät halkeamista tunkeutumaan kyllästämättömään puuhun.



Kuva 9. Kaksi muuntajapylvästä, oikealla 1970-luvun CCA-pylväs, joka on kobrattu vuonna 2001 ja vasemmalla vuonna 1996 kyllästetty CCA-pylväs.

3.4.2 Kirjallisuuskatsaus puupylväiden potentiaalsiin kyllästysaineisiin ja - menetelmiin

Kirjallisuusselvityksen tavoitteena on esitellä perustietoja lupaavimmista kyllästysmenetelmistä ja aineista, jotta niiden soveltuvuus sähköpylväiden lahoamisen estoon, halkeiluun ja muihin ominaisuuksiin voidaan arvioida. Tavoitteena on löytää kyllästysmenetelmä ja aine, joka on kustannustehokas, ympäristöystävällinen, käyttäjäystävällinen ja antaa riittävän suojan biologista vaurioitumista vastaan puupylväille. Lisäksi menetelmä/aine ei saisi heikentää pylvään lujuusominaisuuksia, ja sen tulisi myös minimoida pylvään halkeilu.

Kirjallisuuskatsauksessa käsitellään seuraavat menetelmät ja aineet:

1. Kreosootti
2. C- ja CC-kyllästeet vs. CCA
3. Mikronisoitu kupari
4. Asetylointi
5. Mäntyöljyt
6. Furfulointi ja Belmadur-käsittely
7. Vesilasikyllästys
8. Booripohjaiset puunsuoja-aineet (esim. Vital-suoja-aine)
9. IPBC, Propikonatsoli, tebikonatsolipohjaiset kyllästeet esim. Primer oil (Osmose)
10. Pellava- ja mineraaliöljypohjaiset kyllästeet esim Royal-öljykyllästys (Osmose)
11. Tervansukuiset puutisleet

Refenssikyllästeet ovat nykyisin käytössä olevat kreosootti ja C-kyllästeet.

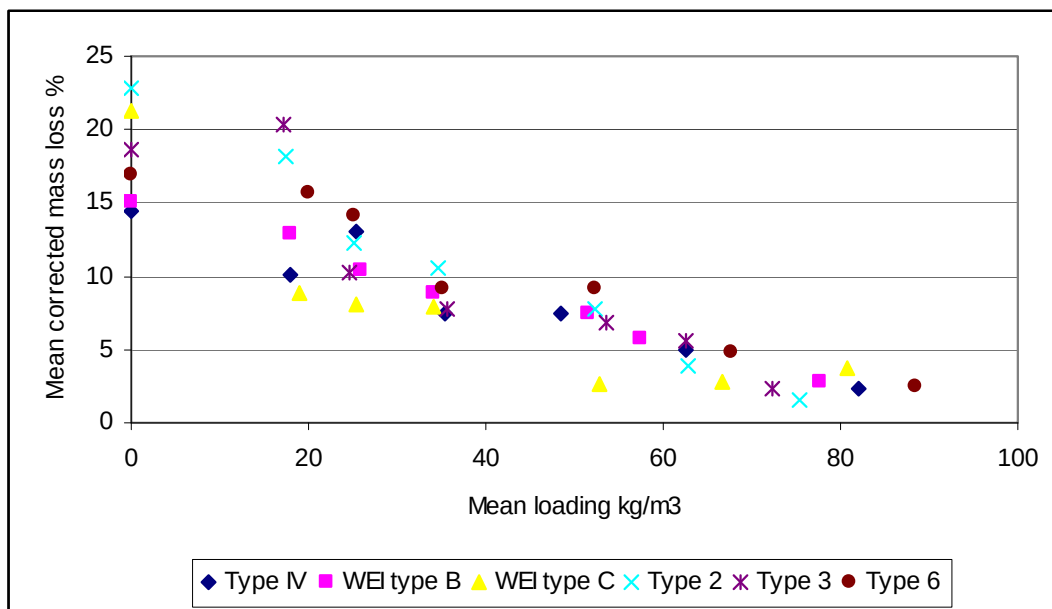
3.4.2.1 Kreosootti

Hyväksytyjä kreosoottityyppejä ovat WEI Type B ja WEI Type C, joista C-tyypin kreosootti on miedompi tuoksultaan, koska se on ”raskaampi” öljy. Kreosoottityyppejä on paljon, mutta niiden saatavuus on rajallinen. Erikoisempien kreosoottien hinta on korkeampi kuin yleisimmin saatavilla oleva tyyppi B:n johtuen niiden heikosta saatavuudesta. Taulukossa 3 ja kuvassa 10 on esitetty Wood pole projektin laboratoriokokeiden tuloksia kreosootin toksisista raja-arvoista ja massahäviöistä. Tulosten perusteella voidaan päätellä, että kreosootin teho lahoa vastaan ei juuri enää kasva, kun sen pitoisuus puussa ylittää 75 kg/m³. Taulukoissa 11, 13, 14 ja 15 on vertailtu kreosoottia, CC-kyllästettä ja mäntyöljyä käsittelemättömiin vertailukappaleisiin. Tuloksissa ei suurta eroa noin 70 kg:n ja 140 kg:n kreosoottipitoisuuden välillä. Lisäksi käytännössä on havaittu pylväillä, että kreosootilla kyllästetty pintapuu ei juuri lahoa, vaan pylvään kyllästämätön sydänpuu lahoaa. Voidaan siis päätellä, että nykyinen kreosoottipitoisuus puussa on ylimitoitettu. Tällä hetkellä NTR-A luokan vaatimus on tyyppi B:lle 110 kg/m³ ja tyyppi C:lle 100 kg/m³, joilla saavutetaan yli 60 vuoden käyttöikä pylväille. Kreosoottipitoisuutta voidaan siis laskea nykyisestä noin 20% % käyttöiän juuri lyhentymättä.

Taulukko 3. Kreosoottityyppien B ja C toksiset arvot ja biologiset referenssiarvot Wood pole-projektin perusteella (Wood pole final report v. 2003).

Creosote type	Test timber	Test fungus	Ageing method		Biological reference value
			EN 73	12 wks + EN 84	
WEI type B	Scots pine sapwood	<i>C. puteana</i>	30.4	14.0	43.4
		<i>L. lepideus</i>	>51.3 43.3	42.8 43.4	
		<i>C. versicolor</i>	13.5	14.5	
	Beech	<i>C. versicolor</i> <i>L. cyathiformis</i>	52.1 (21.8)	25.9 (14.4)	52.1
WEI type C	Scots pine sapwood	<i>C. puteana</i>	13.7	10.0	>71.2 (56.7)
		<i>L. lepideus</i>	>50.8	43.3 >71.2 (56.7)	
		<i>C. versicolor</i>	10.1	(10.0) ≤9.9	
	Beech	<i>C. versicolor</i> <i>L. cyathiformis</i>	29.2 (12.7)	21.1 (9.3)	29.2

Note: Data from second series of tests are shown in **bold**. Possible mid toxic values are shown in parenthesis.

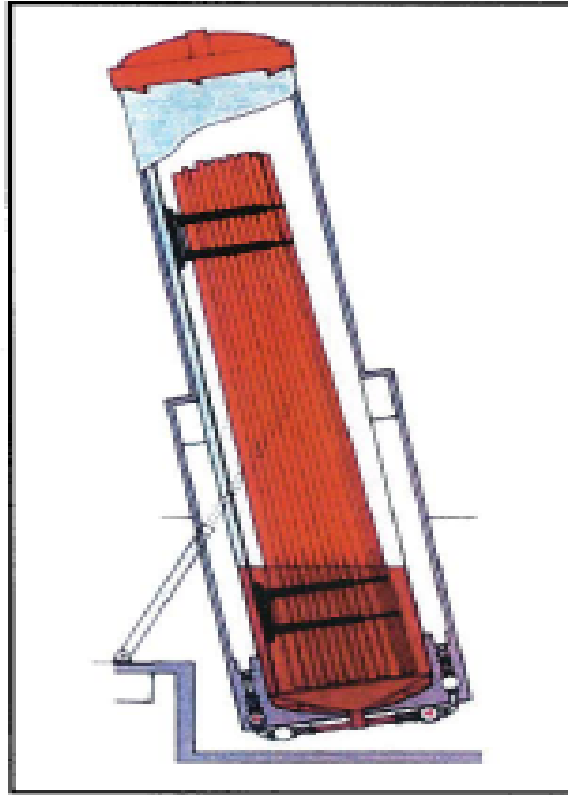


Kuva 10. Kreosoottityyppien massahäviö EN 113 testissä Wood pole-projektin perusteella (Wood pole final report v. 2003).

Kreosoottipitoisuuden pienentäminen ei poista kokonaan kreosootin pääongelmia: hajua, tahraavuutta ja tihkumista ulos puusta. Kreosootti tyyppi C:llä hajuongelmat ovat kuitenkin pienemmät kuin tyyppi B:llä. Kuvassa 11 on esitetty kuva vasta pystytetystä kreosoottipylvästä, josta nähdään kreosoottipylväiden pääongelma – kreosootin tihkuminen pylvään pintaan. Kreosootin tihkumista pylvään pintaan on mahdollista vähentää esim. lisäämällä öljyn joukkoon kuivikkeita (esim. rautaoksideja, karbonaatteja) tai seostamalla kreosoottiöljyä nykyistä pienempiä määriä huomattavasti ”jäykemmän” ja suojaa antavan kasviöljyn joukkoon (esim. pellavaöljy tai mäntyöljy). Toinen tapa kaksoiskyllästys, jossa koko pylväs kyllästetään ensin esim. kreosootilla 50 kg/m³ tai C-kyllästeellä A-luokkaan, jonka jälkeen tehdään toinen kyllästys esim. mäntyöljyllä 60 kg.

Kaksoiskyllästys voidaan tehdä myös pelkälle tyviosalle (kts kuva 11.) Pelkän tyviosan kyllästys kreosootilla 50 kg/m³ parantaa maanrajan lahonkestoa, jos vähintään metri maanrajan yläpuolisesta osasta on myös käsitelty. Jos kreosootti tyvikyllästys tehdään C-kyllästetylle pylväälle, niin tulee huomoida seuraavat asiat:

- C-kyllästetty pylväs tulee kuivata ennen tyvikyllästystä. Pelkkä korkokustannus on vuoden taapelikuivauksesta 6,5 €/kpl (korko 5% ja pylvään hinta 130 €/kpl) + varastointijärjestelyt.
- Lisäksi varastoinnin/kuivauksen aikana kyllästettä liukenee pois jopa 15% ja menetetään ainakin yksi pylvään käyttövuosi pylvään varastointiaikana
- Tarvitaan ympäristölupa uudella tavalla toimivalle kreosoottikyllästämölle, joka varastoi suuria määriä kyllästettyjä pylväitä. Pylväät tulee varastoida asfaltoidulla alueella, josta sadevedet kerätään talteen ja puhdistetaan.
- Kuparia huuhtoutuu kreosoottiin→syntyy sakkaa, joka on ongelmajätettä



Kuva 11. Tyvikyllästyksen periaate (Jöran Jermer 2008).



Kuva 12. Vasemmalla NTR A-luokan (110 kg/m^3) kreosoottipylväs, josta nähdään kreosoottipylväiden pääongelma – kreosootin tihkuminen pylvään pintaan. Oikealla 9 vuotta vanha kreosoottipylväs, jossa kreosoottipitoisuus on vain 80 kg/m^3 – lahoamisen merkkejä ei kuitenkaan ole havaittavissa.

3.4.2.2 C- ja CC-kyllästeet vs. CCA

Ensimmäiset C-kyllästeillä (kuparipohjaisilla kyllästeillä), käsiteltyt koekappaleet on asennettu Simlångsdalenin koekenttään 1968 ja Bogesundin koekenttään 1959 Ruotsissa (Taulukko 4). Simlångsdalenin koekentän maaperä on hiekkaperäinen ja dominoiva lahottaja on ruskolaho (brown rot). Bogesundin koekentän maaperä on hiekkaperäinen ja dominoiva lahottaja on katkolaho (soft rot). Tulosten perusteella kuparikyllästeet toimivat hyvin katkolahoa vastaan, mutta eivät kuparille tolerantteja ruskolahottajatyyppejä vastaan (Edlund 1998, Sheard 2009). Tämän vuoksi C-kyllästeisiin lisätään muita tehoaineita, jotka toimivat ruskolahottajia vastaan. Taulukossa 5 on esitetty eri C-kyllästeiden tehoaineet (Luettelo hyväksytyistä puunsuoja-aineista 2008). Nämä yhdisteet liukenevat kuitenkin pois C-kyllästetystä puusta voimakkaasti (Taulukot 6, 7 ja 8). Paras suoja lahoa vastaan saadaan yhdistämällä kuparikyllästeeseen tavalla tai toisella suoja-aineita, jotka toimivat myös ruskolahottajia vastaan ja vähentävät suoja-aineiden liukenemista puusta. Esimerkiksi CC-kyllästeiden (kupari-kromi) parempi teho perustuu juuri näihin seikkoihin. (kts. kuvat 14, 15, 16, 17, 18, 19 ja 20 sekä taulukko 9). Taulukoiden 13 ja 14 perusteella CC-kyllästeiden painohäviö on ollut jopa pienempi katkolahoa vastaan kuin kreosootilla. Öljyillä kuitenkin suhteellisesti suurempi osa painohäviöstä on suoja-aineen painohäviötä kokeessa. Tämän vuoksi parempi vertailutulos saadaan vertaamalla lujuuksia kokeen jälkeen.

Taulukko 4. Edlundin (1998) käyttämän kenttäkoeaineiston lähtötietoja.

T a b l e 5: Mean rating and median life for stakes treated with CCA (1:1.2) and ammoniacal copper preservatives exposed in different fields.

Field	Preservative type	Cu kg/m ³	Start year	Mean rating after different exposure times (years)			Median life (years)
				5	10	20	
Bogesund	Am. copper	0.9	59	0	0.8	3.7	19
Bogesund	Am. copper	1.8	59	0	0.3	1.9	24
Bogesund	Am. copper	3.8	59	0	0.1	0.9	29
Bogesund	CCA	0.8	59	0	0.8	3.7	19
Bogesund	CCA	1.5	59	0	0.2	0.9	25
Bogesund	CCA	3.1	59	0	0.1	0.2	30
Siml.	Am. copper	1.0	68	0.2	1.3	4	13
Siml.	Am. copper	2.0	68	0	0	3.9	16
Siml.	Am. copper	2.9	68	0	0.1	3.4	18
Siml.	CCA	1.2	68	0	0.1	3.4	18
Siml.	CCA	2.4	68	0	0	1.5	29
Siml.	CCA	3.1	68	0	0	1.3	–
Sørkedalen	Am. copper	1.0	68	0.8	2.6	3.7	12
Sørkedalen	Am. copper	1.9	68	0	1.3	2.4	24
Sørkedalen	Am. copper	2.9	68	0.2	0.3	1.9	26
Sørkedalen	CCA	1.2	68	0.4	0.7	0.8	–
Sørkedalen	CCA	2.3	68	0	0	0	–
Sørkedalen	CCA	3.2	68	0	0	0.1	–
Tåstrup	Am. copper	1.0	68	0	1.8	3.9	16
Tåstrup	Am. copper	1.9	68	0	0.9	2.6	22
Tåstrup	Am. copper	2.9	68	0	0.9	2.0	–
Tåstrup	CCA	1.2	68	0	0.8	1.9	27
Tåstrup	CCA	2.4	68	0	0.2	0.9	–
Tåstrup	CCA	3.1	68	0	0.3	0.8	–
Ultuna	Am. copper	2.6	85	0	1.3	–	–
Ultuna	CCA	1.7	85	1.1	3.9	–	8
Ultuna	CCA	1.6	83	1.6	4	–	7
Ultuna	CCA	3.4	83	0	1.9	–	13

Am. copper = ammoniacal copper; Siml. = Simlångsdalen

Taulukko 5. C-kyllästeiden tehoaineet (Luettelo hyväksytyistä puunsuoja-aineista 2008. Syke)).

Tehoaine Valmisteet - tehoaine, pitoisuus (%)	Valmistaja tai maahantuoja	Käyttötarkoitus	Päätös/Vahvistus Luokitus
Celcure AC-800 - kupari(II)hydroksikarbonaatti (17.3) - bentsyyli-C12-16-alkyyliidimetyyli (4.8)	Ab Osmose Finland Oy	Teollinen kylläste; puutavaran suojaaminen lahoa ja hyönteisiä vastaan painekyllästysmenetelmällä	SYKEp SYKE-2002-P-162-042 19.6.2006 C N R20/22-34-50/53
Tanalith E (3492) - kupari(II)hydroksikarbonaatti (20.5) - boorihappo (4.5) - tebukonatsoli (0.23) - propikonatsoli (0.23)	Oy Sawcenter Ab	Puutavaran suojaus puuta tuhoavia sienä ja hyönteisiä vastaan teollisella painekyllästyksellä	SYKEp SYKE-2001-P-229-042 19.11.2007 Xn N R22-41-50/53
Wolmanit CX-8 - kupari(II)hydroksidikarbonaatti (13) - bis-(N-sykloheksyyli-diatsenium-dioksi)kupari (2.8) - boorihappo (4.0)	BASF Oy, Wolman Division	Ulkokäyttöön tarkoitettun puutavaran suojaamiseen lahoa ja hyönteisiä vastaan teollisilla painekyllästysmenetelmillä	SYKEp SYKE-2003-P-76-P4 18.12.2007 C N R22-34-50/53

Kuparipohjaisten kyllästeiden (C, CC ja CCA) kokonaismäärä analysoidaan yleensä kuparijäämän perusteella. Esimerkki: Kuparin osuus kyllästeen tehoaineista on 20 %. Tällöin 2 kg:n kuparijäämän perusteella puussa on kyllästettä yhteensä 10 kg. Kuvassa 13 on esitetty eri kyllästeissä oleva kuparimäärä.

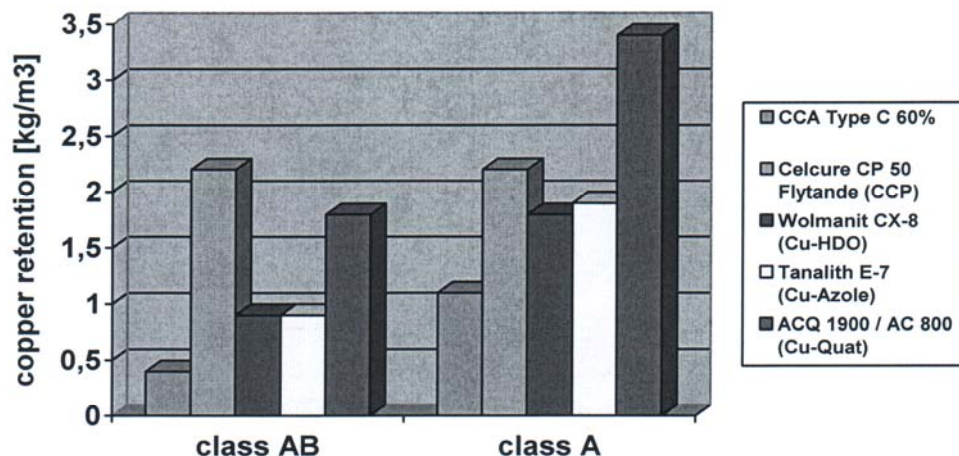


Figure 1: Comparison of NTR approved product retentions in class AB and A in terms of kg copper per m³ treated wood (modified after [2]).

Kuva 13. Eri kyllästeissä oleva kuparimäärä NTR-AB ja A luokassa. Vasemmalta alkaen CCA, CCP, Wolmanit, Tanalith ja AC800.

Taulukko 6. Jäljellä olevien tehoaineiden osuus 10 vuoden EN 252 kokeen jälkeen (Marie-Louise Edlund, Jöran Jermer ja Ingvar Johansson 2006.)

Tabell 11 Kvarvarande andel (%) av aktiva ämnen efter tio års exponering

Aktiva ämnen	Resterande mängd efter 10 års exponering, %
Koppar	65 - 85
Krom	100
Arsenik	75 - 90
Tebuconazol, BAC och HDO	20 - 60

Taulukko 7. Tehoaineiden liukenevuus eri kyllästeillä (Edlund 1998).

Table 4. Leaching of preservative from treated wood exposed in TMCs for 12 months.

Preservative	Initial retention (%)	Simlångsdalen soil	Forest soil	Ultuna soil	Compost soil
		pH ≈ 4.2	pH ≈ 3.3	pH ≈ 7.0	pH ≈ 6.7
		Loss of chemicals (%) a)	Loss of chemicals (%)	Loss of chemicals (%)	Loss of chemicals (%)
Copper free A	Propiconazole (0.02)	46	55	76	81
	Tebuconazole (0.01)	76	83	84	91
	IPBC	—	—	—	—
Copper free B	Boron (0.06)	?	?	?	?
	AAC (1.6)	47	85	44	66
Copper based A	Copper (0.19)	51	65	0	27
	Boron (0.02)	?	?	?	?
	Cu-HDO	—	—	—	—
Copper based B	Copper (0.76)	49	69	27	45
	Boron (0.04)	?	?	?	?
	Tebuconazole (0.001)	?	?	?	?
Reference(CCA)	Copper (0.28)	50	63	17	18
	Chromium (0.58)	0	0	1	0
	Arsenic (0.4)	0	10	6	6

a) As percent of original retention

— = not analysed

? = Concentration below the detection limit

Taulukko 8. Kuparin liukenevuus eri kyllästeillä (Wood Reseach, 51 (3): 2006. 69-76.).

Tab. 2: Amount of copper leached from spruce specimens impregnated with different copper based preservative solution. Standard deviations are given in the parenthesis

Wood preservative	Water type	Copper leached [%]
CCB	Tap water	0.2 [0.02]
	Distilled water	0.1 [0.00]
	River water	0.1 [0.01]
	Sea water	0.2 [0.00]
	AHS*	1.2 [0.01]
CuE	Tap water	7.2 [0.53]
	Distilled water	7.1 [1.02]
	River water	4.7 [0.03]
	Sea water	7.4 [0.05]
	AHS*	11.7 [0.94]
CuEO	Tap water	5.9 [0.41]
	Distilled water	3.8 [0.03]
	River water	4.8 [0.26]
	Sea water	5.1 [0.28]
	AHS*	7.6 [0.32]
CuEOQ	Tap water	9.7 [0.78]
	Distilled water	9.6 [0.72]
	River water	10.5 [0.33]
	Sea water	7.6 [0.41]
	AHS*	13.6 [0.17]

*AHS = artificial humic acid solution

REPORT

Date
2008-09-05

Reference
ECOMOD

Page
18 (19)

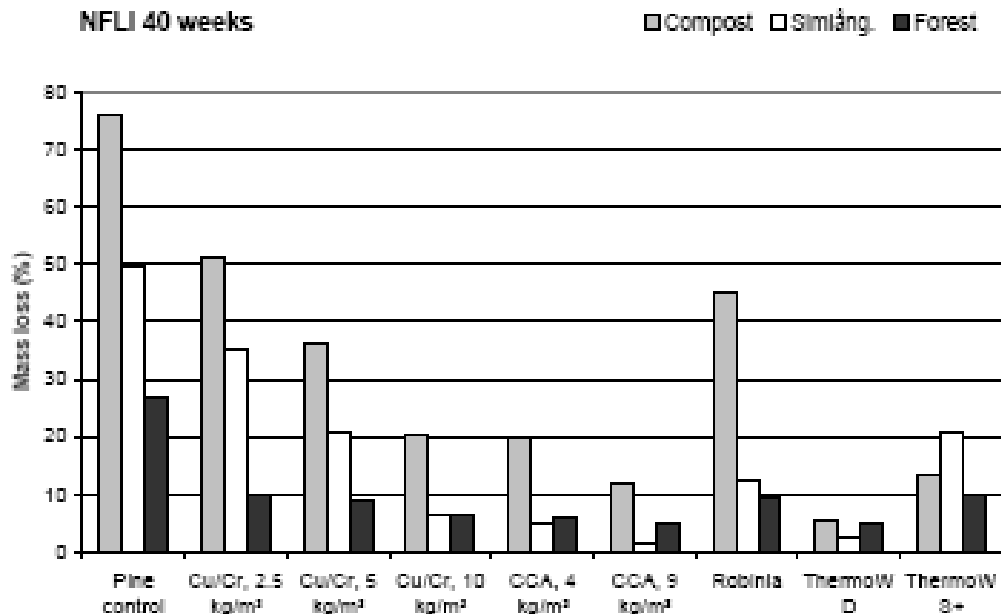


Figure 9a. Results by NFLI, Ås, after 40 weeks.

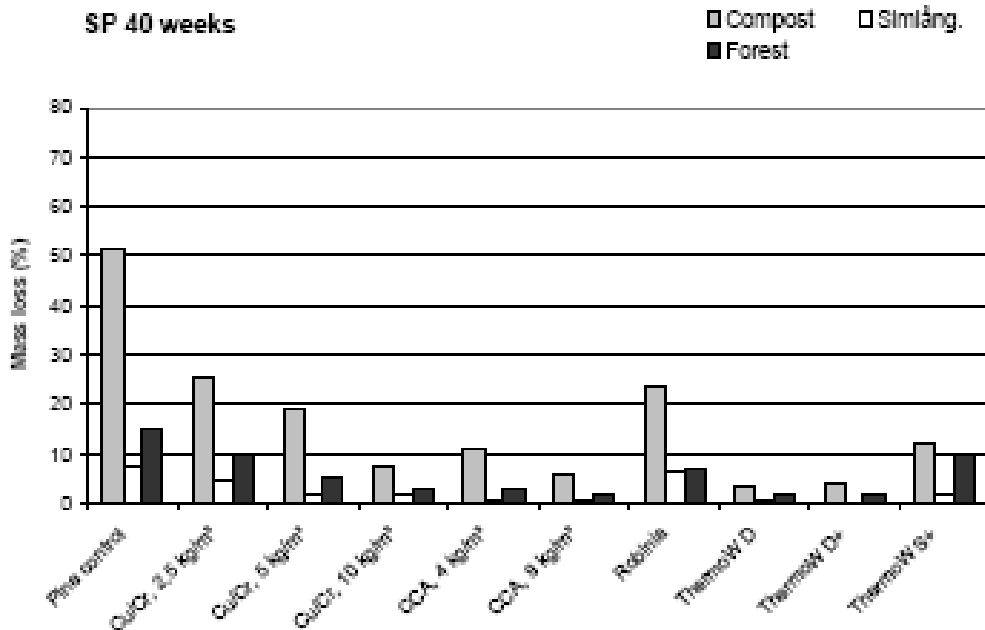
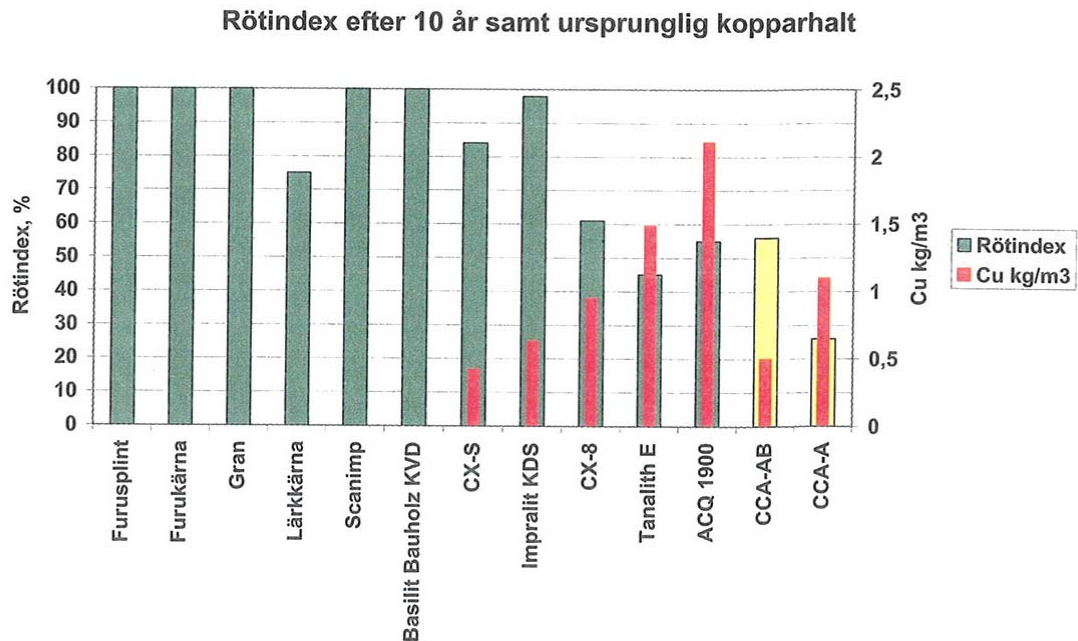


Figure 9b. Results by SP, Bords, after 40 weeks.

Kuva 14. CC- ja CCA kyllästeiden massahäviöt eri testeissä (Mats Westin 2008).



Figur 11 Rötindex och kopparhalt för olika prover. Rötindex för CCA-prover är gulmarkerad.

Kuva 15. C- ja CCA kyllästeiden lahoamisaste Boråsin koekentällä, jossa vallitseva lahotyyppi on ruskolaho (Marie-Louise Edlund, Jöran Jermer ja Ingvar Johansson 2006).

Taulukko 9. CCA- ja CC-kyllästeiden vertailututkimuksen tulokset radiata-männyllä (Hedley 1992).

Table 1. Relative performance of CCA and CCB in radiata pine sapwood stakes (25 x 50 x 500 mm) at 12 years' exposure in 5 tests sites in New Zealand.

Preservative	Retention kg/m ³	% soundness (mean of 10)				
		site 1	site 2	site 3	site 4	site 5
CCA	6.05	90	100	92	100	92
	4.44	75	97	80	99	75
	3.37	70	83	70	93	72
	2.40	57 (1)	73	70	85	70
CCB	6.52	96	96	67 (3)	80 (2)	99
	4.60	77	91	79 (2)	49 (5)	82
	3.09	75	72 (1)	60 (3)	59 (4)	74
	2.52	70	72	35 (5)	57 (4)	74

(Numbers in parenthesis are numbers of failed stakes)

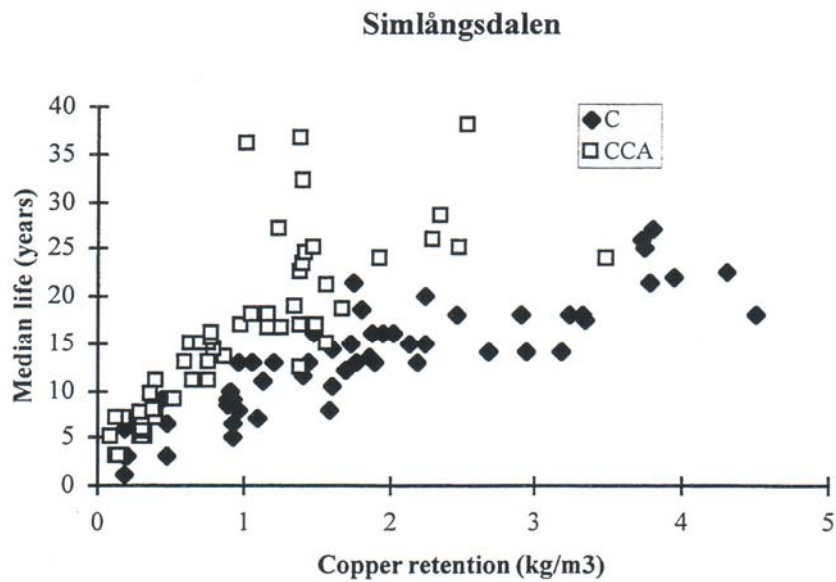


Fig. 3. Median life for CCA- and ammoniacal copper (C) treated stakes exposed in Simlångsdalen.

Kuva 16. C- ja CCA-kyllästeellä käsiteltyjen koekappaleiden mediaani ikä Simlångsdalenin koekentällä. Testi aloitettu 1968 ja koekappaleiden koko 20/25x50x500 mm.

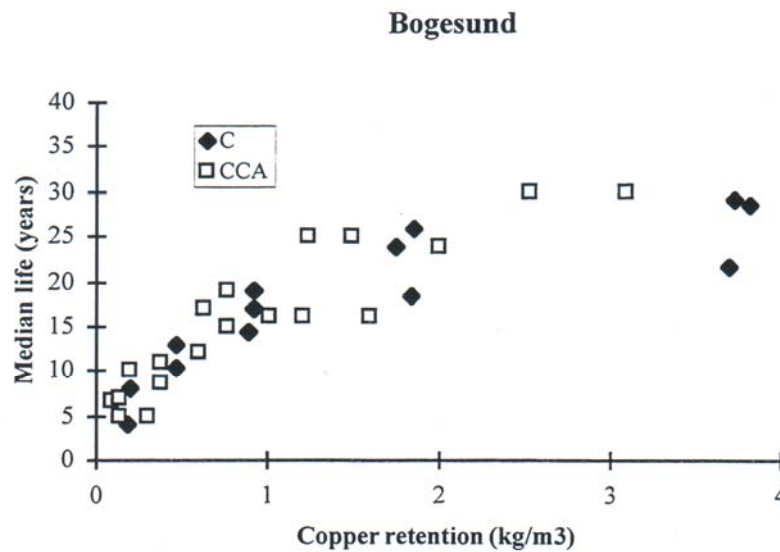
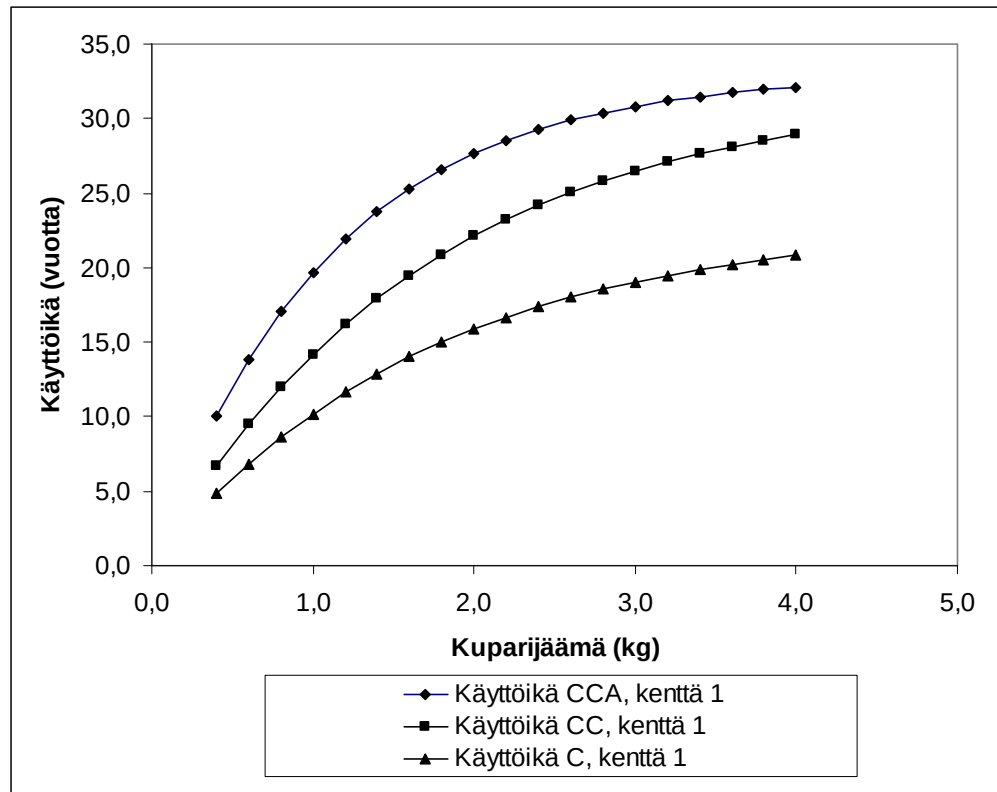
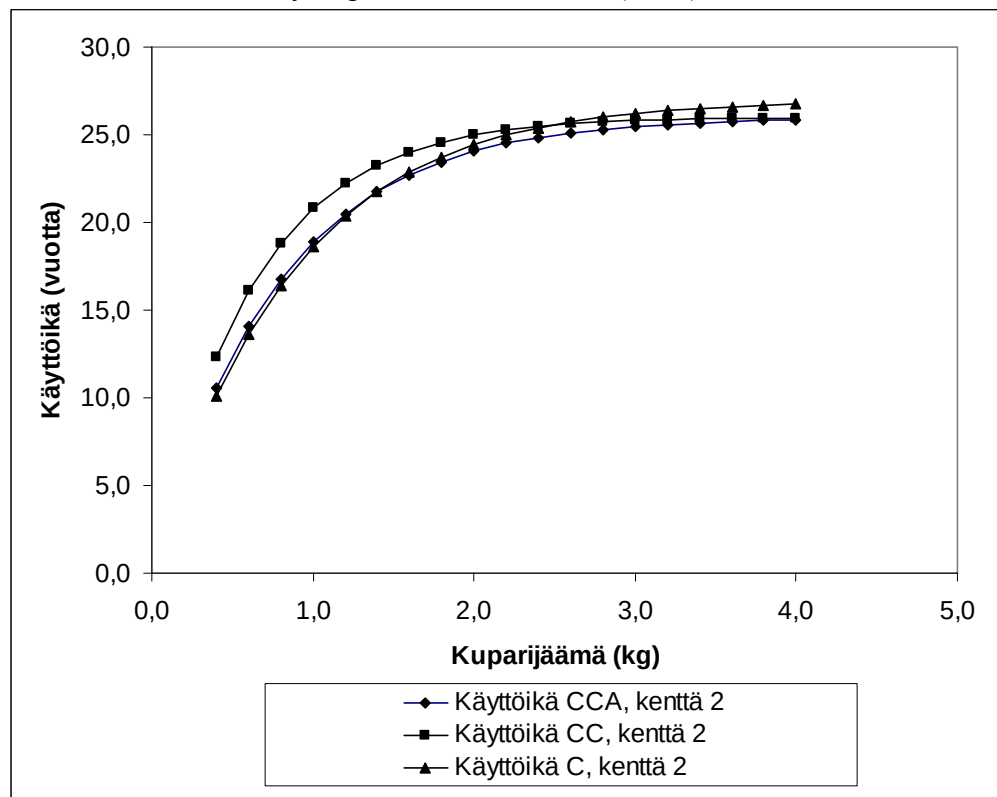


Fig. 4. Median life for CCA- and ammoniacal copper (C) treated stakes exposed in Bogesund.

Kuva 17. C- ja CCA-kyllästeellä käsiteltyjen koekappaleiden mediaani ikä Bogesundin koekentällä. Testi aloitettu 1959 ja koekappaleiden koko 20/25x50x500 mm.

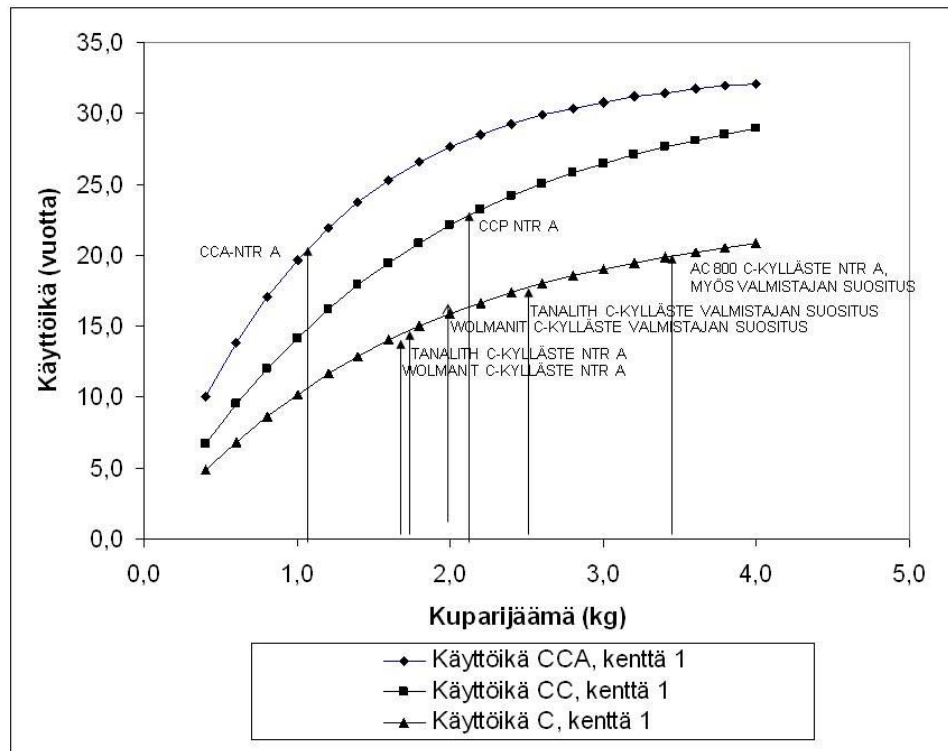


Kuva 18. Kuparijäämän vaikutus koekappaleiden mediaani-ikään C-, CC- ja CCA-kyllästeillä Simlångsdalenin koekentällä. Käyrät perustuvat Edlundin (1998) esittämiin tuloksiin.



Kuva 19. Kuparijäämän vaikutus koekappaleiden mediaani-ikään C-, CC- ja CCA-kyllästeillä Bogesundin koekentällä. Käyrät perustuvat Edlundin (1998) esittämiin tuloksiin.

Kuvassa 20 on esitetty kuparijäämän vaikutus koekappaleiden mediaani-ikään C-, CC- ja CCA-kyllästeillä Simlångsdalenin koekentällä. Käyrät perustuvat Edlundin (1998) esittämiin tuloksiin. Kuvaan on lisätty nuolet osoittamaan NTR-A luokan kuparijäämävaatimuksia eri kyllästeille sekä valmistajien mahdollisesti antamat suositukset kuparijäämällä. Tanalithin ja Wolmanitin valmistajat suosittelevat 40...50% suurempaa jäämää kuin NTR A-luokassa on vaatimuksena. Huom! NTR antaa A-luokan puulle 20 vuoden takuun maakosketuksissa.



Kuva 20. Kuparijäämän vaikutus koekappaleiden mediaani-ikään C-, CC- ja CCA-kyllästeillä Simlångsdalenin koekentällä (Edlund 1998). Kuvaan on lisätty nuolet osoittamaan NTR-A luokan kuparijäämävaatimuksia eri kyllästeille sekä valmistajien antamat suositukset kuparijäämällä puupylväiden kyllästykseen.

Tulosten perusteella pienillä koekappaleilla on mahdollista saavuttaa C- ja CC-kyllästeillä lähes sama käyttöikä kuin CCA:lla, kun kuparijäämä on 2-3 kertaa suurempi kuin CCA:lla. Käytännössä 2-3 kertaa suuremman jäämän ja tasaisen tunkeuman saanti erityisesti kuparikyllästeillä on ollut vaikeaa. Tämä siksi, että tällöin tulee käyttää huomattavasti väkevämpää liuosta, jonka viskositeetti on suurempi. Lisäksi kupari suotautuu puussa pintakerrokseen voimakkaasti, joka estää kyllästeen tunkeutumisen syvemmälle puuhun. Raportoitujen tulosten perusteella jäämän ja/tai tunkeuman alituksia on tapahtunut erityisesti C-kyllästeillä (Rakennusmaailma 3/2009 ja H. Forsén, V. Tarvainen, A. Nurmi. 2006). Taulukon 10 perusteella C-kyllästeen pigmentointi parantaa

lahonkestävyyttä selvästi. Kuvassa 21 on lehmon koelinjan Tanalith kyllästetty (13 kg/m³) puupylväs kymmenen vuoden jälkeen – pylväs on muuttunut pinnaltaan täysin ruskeaksi ja halkeillut voimakkaasti.

Taulukko 10. Rakennusmaailman 3/2009 testitulokset eri C-kyllästeille.

MITTAUSTULOKSET	Celcure	Tanalith	Wolmanit (v)	Wolmanit (r)	Lunawood	Thermowood	Lehtikuusi	Mänty
Kyllästeen määrä (paino-%)								
- vaadittu vähimmäispitoisuus	19,0	8,0	11,0	11,0	-	-	-	-
- mitattu pitoisuus	14,0	11,1	8,2	11,3	-	-	-	-
Painohäviö (paino-%)								
- suojassa ollut pinta	4,9	9,2	5,5	4,2	6,4	0,8	5,2	40,4
- sääaltistettu pinta	4,2	10,2	28,1	3,9	6,2	7,6	5,6	48,7
Kosteus (paino-%)								
- kesä 2007	52,7	52,4	53,1	55,5	47,5	40,2	39,8	54,6
- talvi 2007	57,7	48,2	54,1	60,0	54,6	42,0	33,8	63,1



Kuva 21. Lehmon koelinjan Tanalith AB-luokan kyllästetty (13 kg/m³) puupylväs kymmenen vuoden jälkeen – pylväs on pintakerroksesta lahonnut (noin 5mm) ja muuttunut pinnaltaan täysin ruskeaksi.

3.4.2.3 Mikronisoitu kupari

Perinteisissä C-kyllästysaineissa (Tanalith, Wolmanit, AC800) käytetään vesiliukoista kuparia, joka saadaan aikaiseksi esim. amiinien tai ammoniakkin avulla. Viimeisen kymmenen vuoden aikana on kehitetty kuparipohjainen kyllästysaine, jossa veteen sekoitetaan lähes nanokokoisia kuparihiukkasia (koko keskimäärin 190 nm). Tuotteesta käytetään yleisnimitystä mikronisoitu kupari (MCQ), joka valmistettu esim. kuparikarbonaatista. Tuotteen hyvä puoli on, että käytetty kupari ei ole vesiliukoinen ja sen korrosoiva vaikutus on vähäinen. Tutkimustulosten perusteella mikronisoidun kuparin teho lahoa vastaan vaihtelee hyvin paljon riippuen mm. valmisteesta, puulajista, pitoisuudesta ja partikkelikoosta (Mike H. Freeman ja Graig R. McIntyre. 2008, Field Stake Tests with Copper-based Preservatives 2008). Tämä siksi, että tehoaineena on pelkkä kupari. Mikronisoitu kupari yhdistettynä esim. mäntyöljykyllästykseen voisi olla toimiva vaihtoehto pylväiden kyllästykseen.

3.4.2.4 Asetylointi

Asetylointi tehdään käsittelemällä puu etikka anhydridillä, jolloin puun hydroksyylioryhmät reagoivat etikka anhydridin kanssa. Hydroksyylioryhmät ovat paikkoja, joihin vesi sitoutuu puussa. Kun hydroksyylioryhmä on ”ehtinyt” reagoida jonkun muun aineen kuin veden kanssa, niin vesi ei ”sovi” enää puuhun. Puun hydroksyylioryhmät ovat myös tarpeen lahottajasienien toiminnalle. Kun puun vapaiden hydroksyylioryhmien määrä on pienentynyt, puussa ei ole enää vapaita paikkoja vedelle eikä puu tarjoa edellytyksiä lahottajasienten toimintaan. Tämän vuoksi asetyloidun puun lahonkesto on paras mahdollinen, vaikka se ei ole biosidi. Se antaa myös suojaa tuhohyönteisiä vastaan, mutta erillistä mainintaa termiitinkestosta ei ole. Asetylointi pienentää myös kosteuselämistä, joten tuotteen halkeilu on myös pientä, mikäli tuote säilyy halkeamattomana tuotantoprosessissa. Lisäksi tuote sallii pidemmät huoltovälit pintakäsittelyn suhteen eli sen maalausominaisuudet ovat hyvät. Tutkimusten perusteella asetylointi ei heikennä puun lujuusominaisuuksia, vaikka yleensä puuta ”turvottavat” menetelmät niin tekevät.

Asetylointia tehdään tällä hetkellä vain radiatamännylle ja poppelille. Pohjoismaista mäntyä voidaan myös asetyloidua, mutta ongelmana on puun sisään jäävä etikkahappo. Radiatamännyllä ja poppelilla puuhun jäävän etikkahapon poistaminen onnistuu, mutta pienemmän permeabiliteetin

omaavalla pohjoismaisella männyllä tämä ei onnistu. Lisäksi käsittelyn jälkeen etikkahappo on muutettava etikka anhydridiksi, joka vaatii oman prosessinsa.

Asetyloidun puun tuotantokustannuksista ei ole saatavilla luotettavaa tietoa. Lisätietoja voi tiedustella www.titanwood.com, mutta kokemusten perusteella yhtiö antaa niitä hyvin niukasti.

Asetylointi sopii sähköpylväiden käsittelymenetelmäksi, jos raaka-aineena käytetään joko radiatamäntyä tai poppelia/haapaa. Menetelmä on kuitenkin monimutkainen ja investoinneiltaan kallis, jonka vuoksi käsittely kannattaisi ostaa suuremmalta toimijalta.

3.4.2.5 Mäntyöljykyllästys

Puun mäntyöljykyllästystä on tutkittu aktiivisesti 1990-luvun alusta alkaen, jolloin myös ensimmäiset kenttäkokeet perustettiin VTT:n toimesta raakamäntyöljyn lahonsuojauskyvyn tutkimiseksi. Laajamittaista teollista tuotantoa mäntyöljypohjaisista kyllästysaineista ei kuitenkaan ole vielä toistaiseksi syntynyt. Ongelmana on ollut erityisesti raakamäntyöljytuotteiden haju ja tahraavuus, joka aiheutuu öljyn tihkumisesta puun pintaan.

Mäntyöljy on vapautettu Biosididirektiivistä eli viranomaiset eivät pidä sitä biosidisenä aineena. Näin ollen sitä voi vapaasti käyttää puunsuojaukseen viranomaisten hyväksynnän saaneessa laitoksessa. Mäntyöljykyllästetyn puun voi hävittää turvallisesti polttamalla. Lisäksi raakamäntyöljyyn liittyvät pitkäaikaiset kenttäkokeet ovat myös osoittaneet sen toimivuuden lahoa vastaan.

Paajanen ja Ritschkoff (1997) sekä Paajanen (2000) ovat tutkineet raakamäntyöljyn toimivuutta sekä laboratoriokokeissa että kenttäkokeissa ruskolahoa ja katkolahoa vastaan (taulukot 11, 12, 13 ja 14) verranneet sitä kreosoottiin ja CC-kyllästeeseen. Näiden tutkimusten tuloksista voidaan tehdä seuraavia päätelmiä ja vertailua muihin tutkimustuloksiin:

- VTT:n kenttäkokeissa, aloitettu vuonna 1991, raakamäntyöljykyllästettyjen koekappaleiden kunto on vain hieman huonompi kuin kreosoottikyllästettyjen vertailukappaleiden kunto.

- Raakamäntyöljyn tulokset pitoisuudella 150...200 kg viittaavat sen toimivan lähes yhtä hyvin kuin kreosootti NTR A-luokassa sekä ruskolahoa että katkolahoa vastaan, kun tuloksia tulkitaan lujuuden suhteen.
- Painohäviön perusteella raakamäntyöljy ei toimi yhtä hyvin kuin kreosootti ja CC-kylläste. Tämä johtuu siitä, että osa raakamäntyöljyn komponenteista on lahottajasienille kelpaavaa ravintoa ja haihtuvia/vesiliukoisia yhdisteitä, joiden katoamisesta puusta testien aikana osa puun painohäviöstä aiheutuu.
- Öljymäärän kasvu parantaa jonkin verran tuloksia (massahäviö pienenee).

Taulukko 11. Viikin koekentän (VTT aloittanut vuonna 1991) seurantatulokset raakamäntyöljyn ja kreosootin osalta (Paajanen 2000).

Taulukko 1. EN 252 mukaan tehdyn kenttäkokeen arvostelutulosten keskiarvot.
MÖ=mäntyöljy, Kre= kreosoottiöljy.

Käsittely	MÖ kg/m ³	1 v	2 v	3 v	4 v	5 v	6 v	7 v	8 v
24,5 % MÖ	125	0	0	1,4	1,6	2,4	3,1	3,0	3,2
34 % MÖ	164	0,7	0,4	0,8	0,8	2,0	2,4	2,4	2,7
50 % MÖ	232	0,1	0,2	0,7	0,9	1,7	2,3	2,3	2,5
73 % MÖ *	341	0,6	0,3	1,3	0,9	2,0	2,5	2,5	2,8
Ksyleeni		0,1	0,2	2,6	2,8	3,6	3,8	3,9	3,9
Käsittelem.		0,2	1,8	3,4	3,6	3,9	4,0		
Kre 13,5 %	69	0,1	0	0,2	0,6	1,8	1,9	2,0	2,2
Kre 28 %	145	0,3	0,2	0,3	0,2	0,8	1,1	1,1	1,8
Kre 42 %	227	0	0	0	0	0,1	0,5	0,4	1,0

* osa kappaleista vaillinaisesti kyllästyneitä.

Taulukko 12. Raakamäntyöljyn pikalahotuskokeiden tulokset, joiden perusteella lujuusarvot mäntyöljykappaleilla eivät muuttuneet, vaikka painohäviötä esiintyikin (Paajanen ja Ritschkoff 1997).

Taulukko 1. EN 113 mukaisesti suoritettua lahonuskokeessa saadut painohäviöt (%) ja puristushajonnat (N/mm²) ja niiden hajonnat sulussa.

Käsittely	<i>Coniophora puteana</i>		<i>Poria placenta</i>		Ster. vertailu
	%	N/mm ²	%	N/mm ²	
100 % mäntyöljy 60 °C	11,7*	58,1 (7,2)	26,9*	63,1 (4,8)	68,2 (8,0)
Vertailu	33,9	-	18,7	-	-
34 % mäntyöljy	16,5*	58,1 (7,2)	11,9*	62,9 (4,7)	73,7 (2,0)
Vertailu	35,0	-	17,5	-	-
Ksyleeni	21,9	26,4 (5,8)	21,7	19,6 (7,7)	75,3 (2,2)
Vertailu	34,4	-	25,9	-	-
Virulenssi-	29,4	18,0 (4,5)	17,4	30,9 (5,9)	79,1 (4,1)
kontrolli	-	-	-	-	-

* Painohäviöt eivät vastaa lahonamista

Taulukko 13. Painohäviöt katkolahotuskokeessa mäntyöljyllä, kreosootilla ja CC-kyllästeellä. Tulosten perusteella öljypitoisuudella ei ole suurta merkitystä kummallakaan öljyllä. Kupari-kromi toimii erinomaisesti lahoa vastaan (Paajanen ja Ritschkoff 1997).

Taulukko 2. prENV 807 mukaisesti suoritettua 16 viikon soft rot lahonuskokeessa vermikulititalustalla saadut painohäviöt.

Käsittely	kg(tehokainetta)/m ³	Painohäviö %
Mäntyöljy 66,7 %	356	4,6
Mäntyöljy 50 %	275	13,4
Mäntyöljy 33,3 %	180	9,8
Kreosootiöljy 12,5 %	70	1,2
Kreosootiöljy 27 %	146	0,9
Kreosootiöljy 40 %	225	0,7
CC-ref. 0,40 %	1,8	0,7
CC-ref. 0,63 %	3,1	0,8
CC-ref. 1,0 %	4,8	1,0
CC-ref. 2,5 %	12,2	0,1
Ksyleeni	-	15,2
Käsittelemätön	-	16,4

Taulukko 14. Painohäviöt ja lujuudet multalaatikkokokeessa mäntyöljyllä, kreosootilla ja CC-kyllästeellä. Tulosten perusteella mäntyöljyllä ja kreosootilla ei ole juuri eroa ja öljypitoisuudella ei ole suurta merkitystä kummallakaan öljyllä, kun tuloksia tarkastellaan lujuuden suhteen. Kupari-kromi toimii erinomaisesti lahoa vastaan (Paajanen ja Ritschkoff 1997).

Taulukko 3. prENV 807 mukaisesti suoritetussa multalaatikkokokeessa saadut koekappaleiden painohäviöt (%)

Käsittely	Imeytymä ¹⁾ kg/m ³	Painohäviö (%)			
		8 v	16 v	24 v	32 v
Mäntyöljy 66,7 %	356	10,9	14,0	17,8	18,9
Mäntyöljy 50 %	267	9,5	9,1	19,6	21,7
Mäntyöljy 33,3 %	174	6,2	12,8	16,8	21,9
Kreosootiöljy 40 %	224	5,7	5,0	6,6	8,6
Kreosootiöljy 27 %	149	4,2	8,3	9,9	12,4
Kreosootiöljy 12,5 %	70	2,0	5,3	7,2	10,5
Ksyleeni (liuotin)	552 ²⁾	3,9	9,3	14,3	17,0
CC-ref. 1,3 %	10	0,1	0,8	1,4	0,5
Käsittelemätön	-	3,1	8,1	12,3	15,9

1) tehoaineimeytymä

2) liuotinineytymä

Taulukko 4. prENV 807 mukaisesti suoritetussa multalaatikkokokeessa saadut koekappaleiden taivutuslujuudet N/mm² ja niiden hajonnat.

Käsittely	Imeytymä ¹⁾ kg/m ³	Taivutuslujuus (N/mm ²)			
		8 v	16 v	24 v	32 v
Mäntyöljy 66,7 %	356	50,0	51,1	49,2	44,4
		(10,0)	(5,9)	(11,1)	(8,4)
Mäntyöljy 50 %	267	56,3	44,5	46,1	46,6
		(6,5)	(3,3)	(5,5)	(6,0)
Mäntyöljy 33,3 %	174	49,1	44,7	47,4	38,5
		(9,0)	(11,9)	(7,7)	(8,3)
Kreosootiöljy 40 %	224	61,9	48,0	40,7	42,8
		(6,1)	(1,7)	(4,7)	(6,9)
Kreosootiöljy 27 %	149	53,8	47,6	46,4	36,1
		(8,1)	(3,8)	(7,3)	(8,9)
Kreosootiöljy 12,5 %	70	61,7	49,6	47,2	45,3
		(6,1)	(6,3)	(6,6)	(6,5)
Ksyleeni (liuotin)	552 ²⁾	42,3	36,3	35,6	23,3
		(6,7)	(6,8)	(7,9)	(6,4)
CC-ref. 1,3 %	10	61,4	59,4	65,4	64,5
		(7,6)	(3,1)	(8,1)	(8,8)
Käsittelemätön	-	49,5	36,5	34,9	29,6
		(10,3)	(9,8)	(7,2)	(3,4)

1) tehoaineimeytymä

2) liuotinineytymä

Taulukossa 15 on esitetty Ruotsissa 1980- luvulla tehtyjen lahotuskokeiden tuloksia eri mäntyöljyillä, CCA:lla ja kreosootilla. Tulosten perusteella mäntyöljy antoi paremman suojan kuin CCA, vaikka käytetty öljytyyppi on yksi huonoimmista kyllästykseen suuren neutraaliainepitoisuuden vuoksi. (Jermer 1993 etc.)

Taulukko 15. Ruotsissa 1980- luvulla tehtyjen lahotuskokeiden tuloksia eri mäntyöljyillä, CCA:lla ja kreosootilla. Vertailuna käsittelemätön puu.

Table 4. Results from the stake test in Uppsala's test field.

Product tested	Number of stakes	Average retention kg/m ³	Index of decay ¹⁾ after				Average life years
			1 year	5 years	9 years	10 years	
Bergvik Fraktion 6011	7	461	0	25	79	100	8.7
Kaukas Neutroil	5	316	0	40	100		7.2
Creosote WEI type A ²⁾	10	129	0	13	55	63	
CCA type B ²⁾	10	3.6	0	60	100		6.0
CCA type B ²⁾	10	13	0	8	88		
Untreated controls ²⁾	10	-	23	100			2.4

Mäntyöljy yhdistettynä booriin antaa hyvän suojan lahoa vastaan (kuva 22). Teho riippuu kuitenkin käytetystä mäntyöljytyypistä hyvin paljon (Temiz et. 2008).

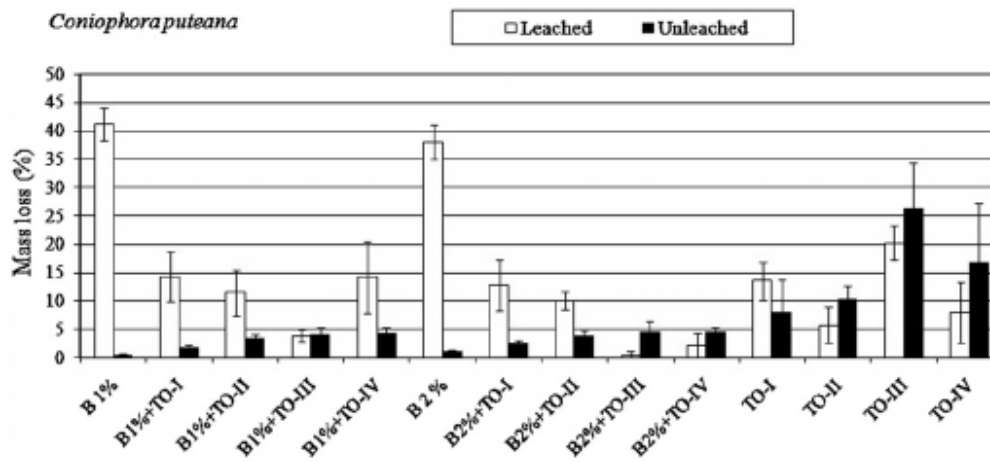


Fig. 1. Weight loss (%) of samples exposed to *C. puteana*.

Kuva 22. Boori-, boori-mäntyöljykyllästettyjen ja mäntyöljykyllästettyjen koekappaleiden painohäviöt ilman vesihuuhtelua ja vesihuuhtelulla EN 113 kokeessa (Temiz et. 2008).

Aikaisempien tutkimusten perusteella uusilla mäntyöljyillä päästään parempiin tuloksiin kuin puhtaalla raakamäntyöljyllä, jonka koostumus myös vaihtelee paljon (Temiz et. 2008). Erilainen valmistusmenetelmä vaikuttaa öljyn koostumukseen, sen käyttäytymiseen kyllästyksessä ja mm. kyllästetyn puun tihkuvuuteen, lahonkeston, väriin ja hajuun. Valmistustapa vaikuttaa tietysti myös öljyn valmistuskustannuksiin. Lisäksi uudet kyllästysmenetelmät vähentävät raakamäntyöljyn ja muiden mäntyöljyjen tihkumista.

Mäntyöljyt soveltuvat sähköpylväiden kyllästysaineeksi, erityisesti yhdistettynä kreosoottiin, kupariin tai booriin. Puhdasta mäntyöljykyllästystä voidaan tehdä myös puolipuhdaille pylväille, jolloin pylväiden käyttöikä on entistä pidempi johtuen suuremmasta lahoamisvarasta ja nilakerroksen antamasta lisäsuojasta. Käyttämällä tyvikyllästystekniikkaa saadaan maanrajan lahonkesto kreosoottikyllästyksen tasolle ja maanrajan yläpuoli kuivaksi ja tahraamattomaksi. Mäntyöljyllä kyllästetyt pylväät on mahdollista myös jälkikäsitellä täysin kuivaksi ja tahraamattomaksi monin eri tekniikoin. Se myös minimoi halkeilun määrän, sienitiöt eivät pääse puun sisään ja puu ei ime vettä (kts kuvat 23, 24 25 vrt samanikäinen C-kyllästetty pylväs kuva 21). Lisäksi kyllästysprosessin yhteydessä pylväät on mahdollista kuivata, jolloin tuotantoprosessi nopeutuu ja samalla varsinaiset kuivauskustannukset jäävät pois. Puun lujuusominaisuudet eivät juuri muutu, koska prosessi ei lämpötilojen puolesta poikkea olennaisesti kreosoottikyllästysprosessista. Mäntyöljykyllästys on noin kaksi kertaa kreosoottikyllästystä kalliimpaa eli noin 200 €/m³.



Kuva 23. Kahdeksan vuotta vanhan mäntyöljykylästetyn puupylvään tyviosa, jossa öljypitoisuus noin 100 kg/m³.



Kuva 24. Kahdeksan vuotta vanhan tyvituetun mäntyöljykyllästetyn puupylvään tyviosa, jossa öljypitoisuus noin 100 kg/m³.

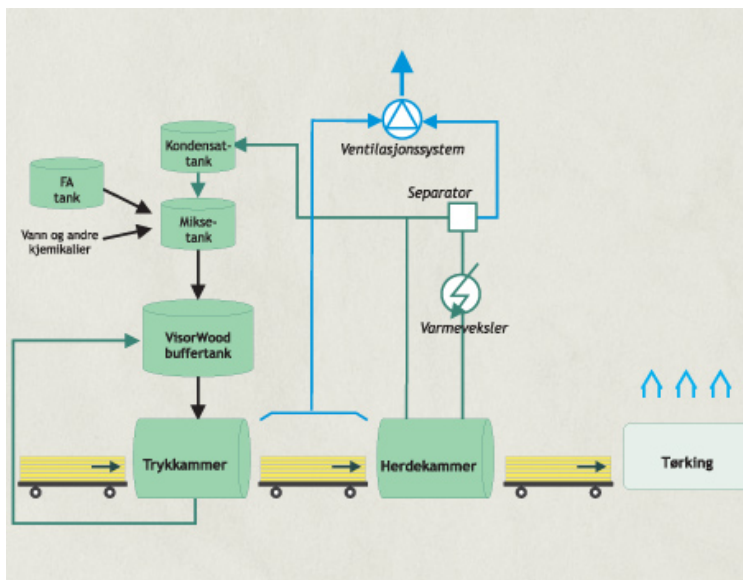


Kuva 25. Kahdeksan vuotta vanhan tyvitetun mäntyöljykyllästetyn puupylväs, jossa öljypitoisuus noin 100 kg/m³.

3.4.2.6 Furfulointi

Furfuloinnin periaate on sama kuin asetyloinnissa ja Belmadur-käsittelyssä (DMDHEU). Tässä tapauksessa puun käsittely tehdään furfuraalialkoholilla, jolloin puun hydroksyyliyhdyt reagoivat furfuraalialkoholin kanssa. Hydroksyyliyhdyt ovat paikkoja, joihin vesi sitoutuu puussa. Kun hydroksyyliyhdyt on ”ehtinyt” reagoida jonkun muun aineen kuin veden kanssa, niin vesi ei ”sovi” enää puuhun. Hydroksyyliyhdyt ovat myös tarpeen lahottajasienen toiminnalle. Kun puun vapaiden hydroksyyliyhdytien määrä on pienentynyt, puussa ei ole enää vapaita paikkoja vedelle eikä puu tarjoa edellytyksiä lahottajasienten toimintaan. Tämän vuoksi furfuraalialkoholikäsitellyn puun lahonkesto on paras mahdollinen. Se antaa myös suojaa termiittejä ja muita tuhohyönteisiä vastaan. Se pienentää myös kosteuselämistä, joten tuotteen halkeilu on myös pientä, mikäli tuote säilyy halkeamattomana tuotantoprosessissa. Lisäksi tuote sallii pidemmät huoltovälit pintakäsittelyn suhteen eli sen maalausominaisuudet ovat hyvät. Tutkimusten perusteella furfuraalialkoholikäsitteleminen pienentää puun lujuutta ja aiheuttaa pylväisiin isoja halkeamia (kuvat 27 ja 28). Lujuuden pienentyminen riippuu käsittelyasteesta eli käsittelyn voimakkuudesta.

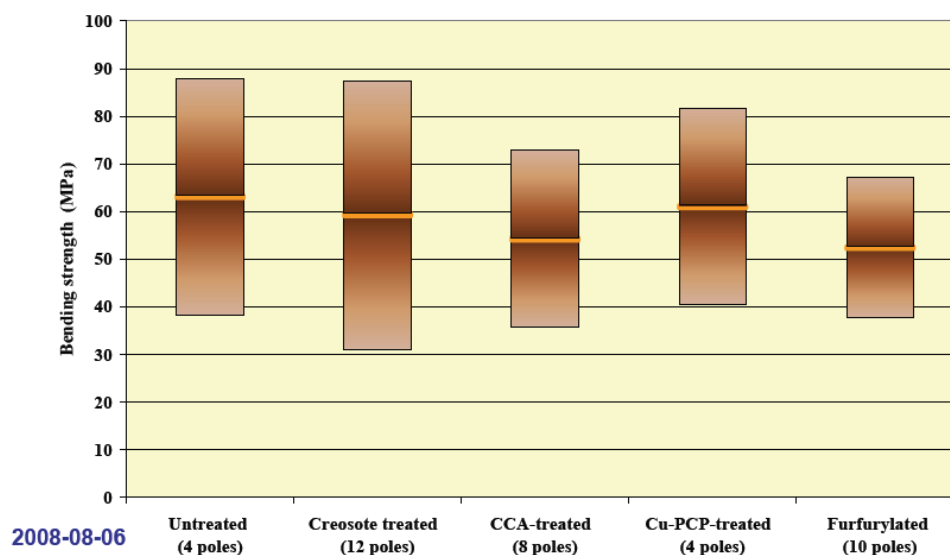
Furfuloinnin puun tuotantokustannukset ovat noin 800-1 000 euroa kuutiolle. Tuotantoprosessi on kallis, koska prosessi koostuu kolmesta eri osasta: kyllästyksestä, jälkikäsitteystä ja kuivauksesta, jotka tehdään kaikki omissa sylintereissä (kts. kuva 26). Lisäksi furfuraalialkoholin hinta on korkea ja kulutus suuri – tietojen mukaan kulutus on pienimmällään noin 100 kg/m³ ja aineen hinta noin 4 euroa kilo. Lisätietoja voi tiedustella furfuloinnista ww2.kebony.com.



Kuva 26. Furfuraali-alkoholikyllästyksen prosessikuvaus.

Furfuraali-alkoholi on kallis puun käsittelymenetelmä. Tuotantoprosessi on lisäksi monivaiheinen ja siinä käytetään korkeita, jopa yli 150 asteen lämpötiloja, jotka heikentävät jo merkittävästi puun lujuusominaisuuksia. Tämän vuoksi halkeiluriski on suuri jo tuotantovaiheessa, joka on epäedullista pylväiden tuotannon kannalta. Tämän vuoksi menetelmä ei ole paras mahdollinen pylväiden käsittelyyn (Kuvat 23 ja 24).

Bending strength Comparison with previous study in Sweden



Kuva 27. Eri tavalla käsiteltyjen pylväiden taivutuslujuus (Jermer 2008).



Kuva 28. Furfuraalialkoholilla käsitellyissä pylväissä esiintyy paljon vakavia sydänhalkeamia. Kuvassa ne näkyvät hyvin, koska halkeamien kautta myös sydänpuu on päässyt kyllästymään.

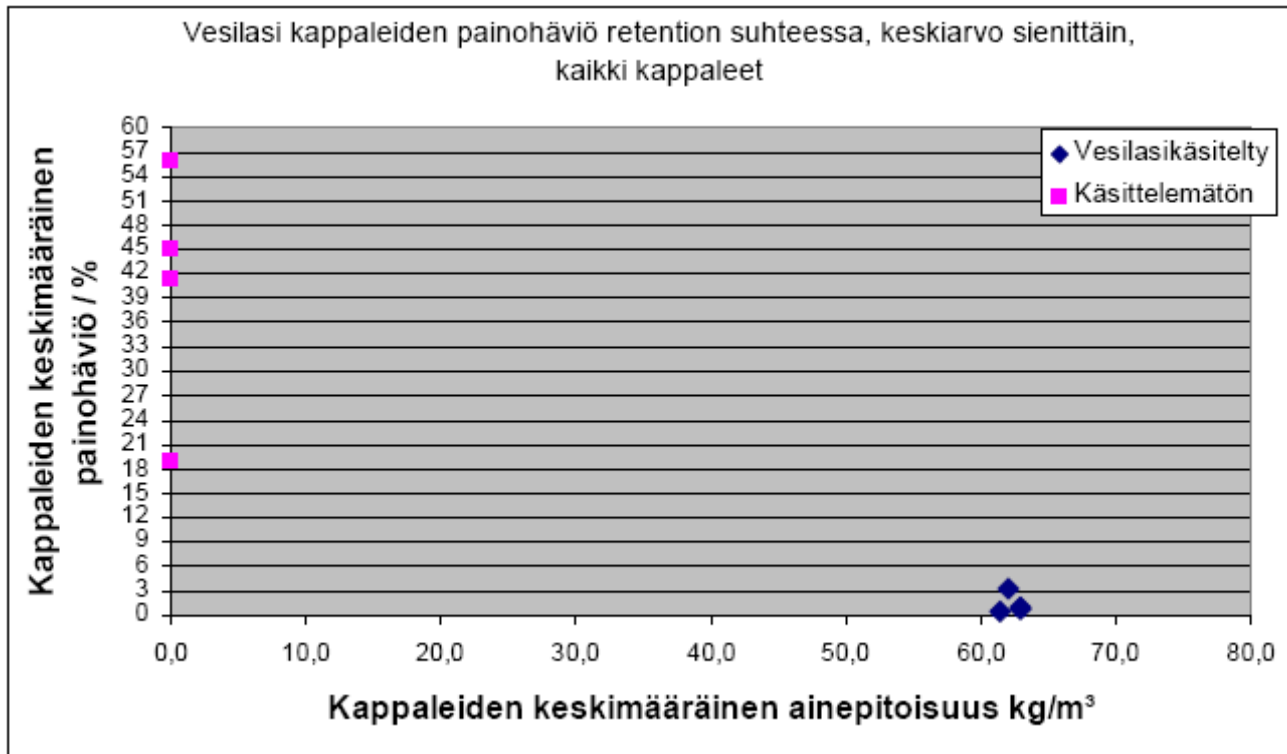
3.4.2.7 Vesilasikyllästys

Natriumsilikaatit (vesilasi) koostuvat piidioksidista ja natriumoksidista. Näiden paino- ja moolisuhdetta voidaan vaihdella tarpeen mukaan sovellutuksesta riippuen. Ne ovat palamattomia, hajuttomia, ympäristölle vaarattomia eikä niillä ole terveydelle haitallisia ominaisuuksia korkeaa pH:ta lukuun ottamatta. Natriumsilikaattien vesiliuosten pH riippuu piidioksidin ja natriumoksidin moolisuhteesta liuoksessa sekä liuoksen konsentraatiosta. pH nousee konsentraation kasvaessa ja toisaalta moolisuhteen laskiessa. 3,3 moolisuhteisen natriumsilikaattiliuoksen pH on noin 11,2 ja 2,5 moolisuhteisen vesilasin puolestaan 12,6. Vesilasiliuokset ovat stabiileja alkaalisissa oloissa. Vesilasin polymeroituminen alkaa pH:n laskiessa kymmeneen.

Vesilasin käyttöä puun kyllästysaineena on tutkittu paljon. Kyllästyksen jälkeen vesilasi kovettuu puun huokosissa veden haihtumisen seurauksena ja polymeroituu reagoidessaan puusolukossa olevien happamien karboksyyliyhymien kanssa. Polymeroitumista voidaan edistää termisellä käsittelyllä, metallisuoloilla, happamilla öljyillä sekä erilaisilla hapoilla. Vesilasin luontainen liukoisuus veteen pienenee moolisuhteen noustessa.

Vesilasi on tunnettu jo pitkään puun kyllästysaineena, mutta sen käyttöön on liittynyt yksi suuri ongelma: täyttä tai riittävän syvää vesilasin tunkeumaa puuhun erityisesti happamilla puulajeilla (havupuut) ei ole saatu väkevillä 3,3 moolisuhteisilla vesilasiliuoksilla. Tämän vuoksi mm. kovuus-, kulutuksenkestävyys, lahon-, palon- ja säänkesto-ominaisuudet vesilasikyllästetyllä puulla ovat jääneet liian heikoiksi. Käytettäessä pieni moolisuhteista vesilasia saadaan helpommin täysi tunkeuma puuhun. Pieni moolisuhteinen vesilasi on liukoisempi (huuhtoutuu pois puusta) ja heikentää puun ominaisuuksia korkeamman pH:n vuoksi.

Kymenlaakson ammattikorkeakoulun tutkimusjohtaja Hannu Boren kehitti menetelmän, jolla korkeamoolisuhteista vesilasia saadaan suuria määriä puuhun täydellä tunkeumalla. Kuvassa 29 on esitetty menetelmällä valmistettujen koekappaleiden painohäviöt EN 84 huuhtoumakokeen ja EN113 lahotuskokeen jälkeen. Tulosten perusteella vesilasikyllästetty mänty kuuluu lahonkestoluokkaan 1 eli paras mahdollinen (yhtä hyvä kuin kreosootilla). EN113 kokeessa kyllästettyjen kappaleiden kosteus nousi kuitenkin osalla kappaleista sallittua suuremmaksi, joka heikentää tulosten luotettavuutta. Kokeen perusteella vesilasikäsittelyllä on selvä lahoamista estävä vaikutus ja lahonkesto on vähintään männyn sydänpuun tasolla. Koekappaleet ovat vielä jatkotutkimuksissa.



Kuva 29. Vesilasikyllästetyn puun painohäviöt EN84 huuhtoumakokeen ja EN113 lahotuskokeen jälkeen (YTI 2009).

Vesilasikyllästys voidaan toteuttaa normaalilla Bethell-prosessilla, mutta silti nykyisillä kestopuuta tuottavilla kyllästämöillä kyllästystä ei voida tehdä ilman merkittäviä muutoksia. Jälkikäteen mahdollisesti tehtävä mäntyöljykäsittely voidaan tehdä nykyisillä kreosoottikyllästämöillä.

Vesilasikyllästetty puu on terveydelle vaaraton. Vesilasia käytetään yleisesti hammastahnoissa, pesuaineissa, liimoissa, paperissa jne. Vesilasikyllästetyn puun voi hävittää polttamalla, mutta se palaa huonosti ja sen puun tuhka sintraantuu/lasittuu arinoille. Pienet määrät voidaan polttaa normaalin puun joukossa esim. 10% seos, mutta suuremmat määrät tulisi polttaa leijupetikattiloissa.

Vesilasi soveltuu pylväiden käsittelyyn ensimmäisen suomalaiselle männylle tehdyn laboratoriokokeen perusteella. Pohjois-Amerikassa vesilasikyllästetyllä radiata männylle annetaan jopa 40 vuoden takuu kts. <http://www.timbersilwood.com>. Kirjallisuuden mukaan vesilasi antaa kosteus- ja lahonsuojaa sekä toimii termiittejä vastaan. Niiden vaikutustasosta ei kuitenkaan ole riittävästi tutkimustietoa Pohjoismaisella männyllä, joten ne tulisi testata kenttäolosuhteissa. Käsittely ei vaikuta pylvään

lujuusominaisuuksiin ainakaan negatiivisesti – kirjallisuuden mukaan ne osin jopa parantuneet . Vesilasikyllästetyn puun pintakäsittely ei ole ongelma. Suurin kysymysmerkki on kuitenkin vesilasikyllästetyn pylvään halkeilukäyttäytyminen kuivauksessa ja käytön aikana, joka saattaa olla menetelmän suurin ongelma pylväiden käsittelyssä. Hinnaltaan vesilasikyllästys on kuitenkin kilpailukykyinen muihin menetelmiin verrattuna.

3.4.2.8 Booripohjaiset puunsuoja-aineet

Booripohjaiset kyllästysaineet, kuten Vital-puunsuoja-aine, toimivat hyvin lahoa ja termiittejä vastaan heti kyllästyksen jälkeen (Temiz 2008). Tämän vuoksi ainakin useimmat booripohjaiset puunsuoja-aineet luetaan biosideiksi eli niiltä vaaditaan biosididirektiivin mukainen hyväksyntä puunsuoja-aineeksi. Lisäksi booripohjaisten kyllästeiden ongelmana on niiden voimakas liukoisuus veteen. Tutkimusten mukaan EN 84 mukaisten vanhentamiskokeiden jälkeen boorilla käsiteltyjen koekappaleiden lahonkesto ei poikkea juuri käsittelemättömistä. Edes kyllästys mäntyöljyllä boorikyllästetyksen jälkeen ei estä kokonaan boorin liukenemista pois puusta EN 84 vanhentamiskokeessa (kuva 30). Tulosten perusteella boori+mäntyöljykyllästys antaa yhdistettynä kuitenkin hyvän tehon lahoa vastaan. (Temiz et. 2008).

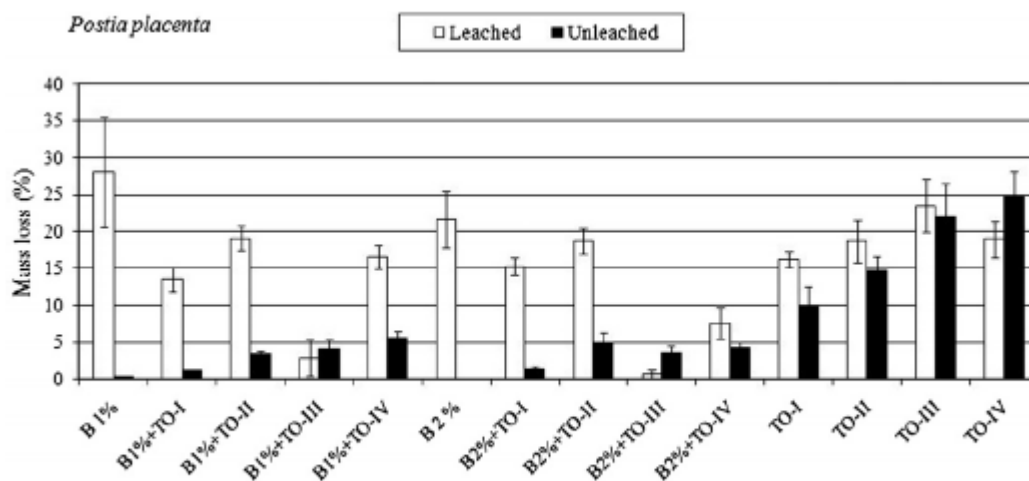


Fig. 2. Weight loss (%) of samples exposed to *P. placenta*.

Kuva 30. Boori-, boori-mäntyöljykyllästettyjen ja mäntyöljykyllästettyjen koekappaleiden painohäviöt ilman vesihuuhtelua ja vesihuuhtelulla EN 113 kokeessa.

3.4.2.9 Propikonatsoli ja tebukonatsolipohjaiset öljyt

C-kyllästeissä käytetään kuparin lisäksi tehoaineina mm. Propikonatsolia ja tebukonatsolia. Näitä voidaan käyttää pylväiden kyllästykseen myös ilman kuparia, mutta niiden pitoisuus tulisi valmistajien mukaan nostaa pylväillä ainakin 150 kg/m³ (öljyn kokonaispitoisuus).

Markkinoilla on ainakin yksi näitä yhdisteitä sisältävä öljy – Primer oil. Primer Oil on Osmosen patentoitu puun stabilisointi menetelmä sisältäen kemikaalin ja sille suunnitellun laitteiston erityisine prosessiaikoineen. Toimintaan tarvitaan periaatteessa ainoastaan lämmin halli, kuiva puu ja varastointitilat.

Primer Oil:

- Stabilisoi” puuta
- Suojaa puuta kosteusvaihteluilta
- Vähentää halkeamia
- Puu on suojattu kaikilta 4 sivulta
- Hyvin lyhyt prosessi, alle tunnin, mahdollistaa suuret volyymit
- Käsittely tapahtuu nipuissa
- Muodostaa hyvän ja kestävänsä pitkäaikaisen pohjan pintamaalaukselle
- Suojaa puuta sinistymiseltä ja pintahomeelta varastointi, kuljetus, rakennusaikana
- Soveltuu erinomaisesti ulkovuorilautojen, designtuotteiden ja lämpökäsitellyn puun pohjakäsittelyyn
- Öljy maksaa useita euroja kilo

Primer oil yhdistettynä esim. mikronisoituun kupariin voisi olla kilpailukykyinen vaihtoehto pylväiden käsittelyyn.

3.4.2.10 Pellava- ja mineraaliöljypohjaiset kyllästeet

Pellava- ja mineraaliöljypohjaista öljykäsittelyä on tehty jo pitkään Ruotsissa, Tanskassa ja Norjassa Royal- käsittelyn nimellä. Sitä on käytetty n. 25 vuotta erityisesti kyllästetyn puun kuivaukseen ja

suojaukseen (kyllästeiden huuhtoutumisen estoon). Käsittelyssä puu kyllästetään ensin C-kyllästeellä, jonka jälkeen se kuivataan Osmosen kuumassa Royale-öljyssä, jolloin vesi ”keitetään” pois. Ko. kuivausprosessi kestää 12-16 tuntia, eli huomattavasti vähemmän mitä normaali kuivaaminen (pari viikkoa). Prosessin aikana voidaan säätää öljymäärää ja sen tunkeutumista. Lopputuote on painekyllästetty puu varustettuna esim. n. 3 mm tunkeumalla olevalla suojaavalla öljykalvolla. Pitkäaikaiset kenttäkokeet ovat osoittaneet että ko. käsittely vähentää kyllästysaineen vuotoa puusta yli kymmenkertaisesti. Soveltuu erinomaisesti julkisiin ja pitkiä huoltovälejä tarvitseviin kohteisiin kuten esim. pylväät, meluaidat, sillat ym. Pelkkä öljykuivaaminen soveltuu myös puuraaka-aineen, kuten pylväiden kuivaamiseen estäen niiden halkeilua ja kyllästeiden liukenemistä.

Royale-käsittelyn edut ovat:

- Kuivaa ja stabilisoi puuta
- Öljy muodostaa suojaavan kalvon kaikilta puolilta
- Vähentää kyllästysaineen vuotoja maahan yli kymmenkertaisesti verrattuna perinteisellä tavalla painekyllästettyyn

3.4.2.11 Tervansukuiset puutisleet

Lutonski (1997) tutki puolalaisten lehti- ja havupuutervojen sekä niiden jalosteiden fungisidisia ominaisuuksia EN 113 testillä. Tuloksia verrattiin kreosoottiöljyyn. Lehtipuutervat toimivat paremmin kuin havupuutervat. Käsittellyt lehtipuutervat toimivat osin jopa paremmin kuin kreosootti. Tutkimuksessa havaittiin korkealla kiehuvien lehtipuutervojen antavan parhaan tehokkuuden lahoa vastaan. Hotti ja Lehtonen (2001) tutkivat havu- ja lehtipuutervojen koostumusta. Tulosten perusteella koivuterva sisältää monikertaisen määrän (15...22%) fenoleita verrattuna havupuutervaan (2...6%). Fenolit ovat tunnetusti tehokkaita yhdisteitä lahoa vastaan.

Tervansukuisten puutisleiden tuotanto on vähäistä, joten niiden saatavuus laajamittaiseen pylväiden kyllästykseen on kyseenalaista. Toisaalta ne voisivat erinomainen lisäaine muihin kyllästyksessä käytettäviin öljyihin. Paras tapa ja tehokkain tapa olisi kuitenkin niiden käyttö vanhojen pylväiden kobrauksessa.

3.5 Yhteenveto kyllästysaineista ja niiden soveltuvuudesta puupylväiden kyllästykseen

Tavoitteena on löytää puupylväille käsittely, joka antaa pylväille uskottavasti 50 vuoden käyttöiän (75% pylväistä saavuttaa vähintään käyttöiän 50 vuotta). Kylläste voi olla biosidi, mutta sen oltava turvallinen työntekijöiden kannalta (esim. ei saisi mielellään tahrata) ja ympäristöystävällinen (kyllästeellä pieni liukenevuus ja/tai biohajoava). Käsittelyn korrosoiva vaikutus tulee olla pieni eikä kylläste saa aiheuttaa suurta halkeiluriskiä tai lujuuden pientymistä. Lisäksi käytöstä poistuvista puupylväistä ei saa kertyä verkohallintayhtiölle kuluja (käytetyn pylvään saa myydä tai energiakierrättää).

Taulukossa 16 on esitetty yhteenveto niistä kyllästysaineista ja –menetelmistä sekä niiden yhdistelmämahdollisuuksista, jotka ovat potentiaalisimpia puupylväiden käsittelyyn. Taulukossa 17 on esitetty kyllästysaineet ja -menetelmät, jotka eivät sovellu tutkimuksen perusteella pylväiden kyllästykseen. Taulukossa 16 esitetty käyttöikä-arvio eri kyllästeille perustuu VIM:in mukaiseen puupylväiden mitoitukseen ja nykyiseen puupylväiden laholuokitusjärjestelmään (lahoamisvara vähintään 40 mm). Kyllästeen antama käyttöikäarvio määriteltä siten, että vähintään 75% ilmajohtolinjan pylväistä saavuttaa käyttöiän ko. kyllästeellä käsiteltynä. Taulukossa 16 ei siis ole huomioitu mahdollisen ylimitoituksen antamaa käyttöiän lisäystä, vaan se tarkastellaan erikseen. Tutkimuksen perusteella puupylväälle soveltuvat kyllästysaineet ja –menetelmät käyttöiän mukaisessa paremmuusjärjestyksessä ovat:

1. Kreosoottikyllästys 110 kg/m³ (NTR A-luokka), käyttöikä 60 vuotta
2. CC-kyllästys NTR A-luokka, käyttöikä 50 vuotta
3. Kreosootti 75 kg/m³, käyttöikä 50 vuotta
4. Vesilasi 75 kg/m³ + mäntyöljy 50...100 kg/m³, käyttöikä 50 vuotta
5. Mäntyöljy 150...200 kg/m³, käyttöikä 50 vuotta
6. Kupari ja/tai boori 2...3 kg + mäntyöljy 100 kg/m³, käyttöikä 50 vuotta
7. C-kyllästys NTR A-luokka+tyviosan kreosoottikyllästys 50 kg/m³, käyttöikä 50 vuotta.
8. C-kyllästeet valmistajien suosittelimilla pitoisuuksilla, käyttöikä 40 vuotta (30...55 vuotta, koska tulokset vaihtelevat valmisteiden, maaperän ja kyllästykseen onnistumisen mukaan)

Kuvissa 31...38 on esitetty SWOT-analyysit yllämainituista kyllästysaineista ja –menetelmistä.

Vahvuudet - Hinta-arvio 311- pylväälle 130 €/kpl - Pitkä käyttöikä yli 60 vuotta - Kierrätyskustannus noin 30 €/kpl - Latvalaho- ja tikkaongelmia vähemmän kuin suolakyllästetyillä pylväillä	Heikkoudet - Haju ja tahraavuus - rakentamislisä 5...10% kokonaiskustannuksista vrt. suolakyllästetyt pylväät
Mahdollisuudet - Puolipuhaiden, lujuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - Nostokorin käytön yleistyminen	Uhat - CCA jo kielletty – miten käy kreosootin?

Kuva 31. SWOT-analyysi kreosootikyllästetylle puupylväälle NTR A-luokka (110 kg/m³).

Vahvuudet - Hinta-arvio 311- pylväälle 138 €/kpl - Rakentaminen edullista vrt öljykylästeet - Käyttöikä 50 vuotta	Heikkoudet - Kierrätyskustannus noin 60 €/kpl - Latvalaho ja tikkaongelmia - Ei sovi yhdistelmä rakenteisiin betonin kanssa, koska kupari rapauttaa betonia
Mahdollisuudet - lujuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - puolipuhaiden pylväiden käyttö	Uhat - Kromin hyväksyntäasiat - Onnistuuko puolipuhaiden pylväiden kyllästys

Kuva 32. SWOT-analyysi CC-kyllästetty puupylväs NTR A-luokka.

Vahvuudet - Hinta-arvio 311- pylväälle 124 €/kpl - Käyttöikä pienemmälläkin pitoisuudella 50 vuotta - Kierrätyskustannus noin 30 €/kpl - Latvalaho- ja tikkaongelmia vähemmän kuin suolakyllästetyillä pylväillä	Heikkoudet - rakentamislisä 5...10% kokonaiskustannuksista vrt. suolakyllästetyt pylväät
Mahdollisuudet - Pienempi kreosoottipitoisuus vähentää huomattavasti tahraavuutta ja ympäristöriskejä - Puolipuhaiden, lujuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - sopii yhdistelmä rakenteisiin (betoni/terasjalka) - Nostokorin käytön yleistyminen	Uhat - Voidaanko kreosoottia hyväksyä kyllästysaineeksi edes pienemmällä pitoisuudella

Kuva 33. SWOT-analyysi kreosootikyllästetty puupylväs, pitoisuus 75 kg/m³.

Vahvuudet - Rakentaminen yhtä edullista kuin suolakyllästeillä - Käyttöikä –arvio 50 vuotta - Kierrätyskustannus 0 €/kpl - Latvalaho ja tikkaongelmia vähemmän kuin suolakyllästetyillä pylväillä - Sopii yhdistelmärakenteisiin betonin ja teräksen kanssa	Heikkoudet - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 210 €/kpl - Pitkä tuotantoprosessi, joka vaatii muutoksia nykyisiin tuotantolaitoksiin
Mahdollisuudet - lujuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli - puolipuhaiden pylväiden käyttö - Riittääkö pelkkä vesilasikyllästys eli onko vesilasin pysyvyys puussa ilman öljykäsittelyä riittävä?	Uhat - Onko kyllästystulos käytännössä riittävän tasalaatuinen pylväillä? - Onnistuuko puolipuhaiden pylväiden kyllästys - kokemusten puute – yllätyksiä voi tulla esim. korroosio

Kuva 34. SWOT-analyysi puupylväs, joka käsitelty vesilasi 75 kg/m³+mäntyöljy 50 kg/m³ .

Vahvuudet - Käyttöikä –arvio 50 vuotta, käyttökokemuksia on jo jonkin verran - Kierrätyskustannus 0 €/kpl - Latvalaho- ja tikkaongelmia vähemmän kuin suolakyllästetyillä pylväillä - sopii yhdistelmärakenteisiin betonin ja teräksen kanssa	Heikkoudet - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 175 €/kpl - Uusi tuotantoprosessi, joka vaatii muutoksia nykyisiin tuotantolaitoksiin - rakentamislisä 5...10% kokonaiskustannuksista vrt. suolakyllästetyt pylväät
Mahdollisuudet - Puolipuhaiden, lujuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - Nostokorin käytön yleistyminen	Uhat - Biosidi vai ei

Kuva 35. SWOT-analyysi mäntyöljykyllästetty puupylväs, pitoisuus 150 kg/m³.

Vahvuudet - Käyttöikä –arvio 50 vuotta, - Latvalaho- ja tikkaongelmia vähemmän kuin suolakyllästetyillä pylväillä - sopii yhdistelmärakenteisiin betonin ja teräksen kanssa	Heikkoudet - Biosidi - Kierrätyskustannus 60 €/kpl - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 210 €/kpl - Uusi tuotantoprosessi, joka vaatii muutoksia nykyisiin tuotantolaitoksiin - rakentamislisä 5...10% kokonaiskustannuksista vrt. suolakyllästetyt pylväät
Mahdollisuudet - Puolipuhaiden, lujuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - Nostokorin käytön yleistyminen	Uhat - Biosididirektiivin mukainen hyväksyntä puuttuu

Kuva 36. SWOT-analyysi kupari ja/tai boori 2...3 kg/m³ + mäntyöljy 100 kg/m³puupylväs.

Vahvuudet - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 200 €/kpl - Rakentaminen edullista vrt öljykyllästeet - Käyttöikä 50 vuotta	Heikkoudet - Kierrätyskustannus noin 60 €/kpl - Latvalaho- ja tikkaongelmia , jotka aiheuttavat hajontaa käyttöikään (A-pylväät/harustetut pylväät) - C-kyllästeellä suuri liukenevuus maanrajan yläpuolella - Ei sovi yhdistelmä rakenteisiin (betoni/teräsjälka), koska kupari rapauttaa betonia ja kyllästevoi korrosoida terästä
Mahdollisuudet - lujuuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - puolipuhaiden pylväiden käyttö	Uhat - Kreosootin käytön kieltö - Käytön rajoitukset kyllästeen suuren liukenevuuden vuoksi eli tyviosan kreosoottikäsittely ei estä kuparin huuhtoutumista maanpinnan yläpuoliselta osalta - Onnistuuko puolipuhaiden pylväiden kyllästys

Kuva 37. SWOT-analyysi C-kyllästetty puupylväs NTR A-luokka+ tyviosan kreosoottikyllästys 50 kg/m³.

Vahvuudet - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 142 €/kpl - Rakentaminen edullista vrt öljykyllästeet	Heikkoudet - Käyttöikä 40 vuotta (30...55 vuotta), joka riippuu kyllästeestä, maaperästä ja kyllästyksen epätasaisuudesta - Kierrätyskustannus noin 60 €/kpl - Latvalaho- ja tikkaongelmia - kyllästeellä suuri liukenevuus maanrajan yläpuolella - Ei sovi yhdistelmä rakenteisiin (betoni/teräsjälka), koska kupari rapauttaa betonia ja kyllästevoi korrosoida terästä
Mahdollisuudet - lujuuslajiteltujen pylväiden käyttö→pidempi jänneväli ja käyttöikä - puolipuhaiden pylväiden käyttö - liukenevuuden pienentäminen esim. kasviöljykäsittelyllä	Uhat - Käytön rajoitukset kyllästeen suuren liukenevuuden vuoksi - Onnistuuko puolipuhaiden pylväiden kyllästys

Kuva 38. SWOT-analyysi C-kyllästetty puupylväs NTR A+-luokka.

Kreosoottikyllästetyn pylvään käyttöikä on yli 60 vuotta käytännön kokemusten perusteella (NTR A-luokka 110 kg/m³). Taulukoiden 11, 13 ja 14 ja kuvan 10 perusteella kreosoottipitoisuutta voidaan laskea 110 kg:n:stä 75 kg:n, jolloin käyttöikä on vielä arviolta 50 vuotta. Tätä tukee myös se käytännön kokemus, jonka mukaan kreosoottikyllästetyn pylvään pinta ei juuri lahoa vaan kyllästämätön sydänpuu. Pintapuu on siis nykyisin ylikyllästetty, mikä lisää kreosootin tihkumista ulos puusta. Pitoisuuden laskeminen pienentää myös kreosootin haju- ja tahraavuushaittoja.

CCA, CC- ja C-kyllästeissä kupari toimii katkolahoa vastaan ja mahdolliset muut yhdisteet kuparitoleranttia ruskolahoa vastaan. CCA kyllästeessä arseeni toimii ruskolahoa vastaan ja sen pysyvyys puussa on hyvä – käyttöikä 55 vuotta (NTR A-luokka 12 kg/m³). CC-kyllästeissä kuparin pysyvyys on kromin ansiosta hyvä – käyttöikäarvio NTR A-luokka 50 vuotta. C-kyllästeissä sekä kuparin että muiden yhdisteiden (esim. tebukonatsoli ja propikonatsoli) pysyvyys puussa huonompi kuin CCA:lla ja CC:llä – käyttöikä 40 (30...55) vuotta valmistajien suosittelemilla pitoisuuksilla. Huom! Käyttöiässä esiintyy suurta vaihtelua, koska tulokset vaihtelevat paljon valmisteiden, maaperän ja kyllästykseen onnistumisen mukaan. Tyviosan kyllästys kreosootilla lisää käyttöikää 50 vuoteen ja pienentää hajontaa käyttöiän suhteen, mutta ei ratkaise C-kyllästetynpylvään latvalaho-ongelmia (harustetut pylväät). Mäntyöljy pitoisuudella 150...200 kg/m³ toimii sekä ruskolahoa että katkolahoa vastaan lähes yhtä hyvin kuin kreosootti. kts. taulukot 11, 13 ja 14. Käyttöikä kreosoottivertailun perusteella noin 50 vuotta.

Yhdistelmistä potentiaalisimmat ratkaisut ovat yhdistää kupari tai vesilasi mäntyöljyyn tavalla tai toisella. Kupari toimii hyvin katkolahoa vastaan ja mäntyöljy ruskolahoa vastaan. Lisäksi mäntyöljy sitoo kuparin puuhun. Yksi tapa on kyllästää pylväs ensin kupari- ja/tai booriyhdisteellä ja sitten mäntyöljyllä 75 kg/m³, jolloin voidaan saada 50 vuoden käyttöikä. Toinen mahdollisuus on seostaa mikronisoitu kupari ja/tai boori mäntyöljyyn, jolloin kyllästys voidaan tehdä yhdellä prosessilla. Kolmas mahdollisuus on kyllästää pylväs ensin kreosootilla 50 kg/m³, jonka jälkeen pylväs kyllästetään mäntyöljyllä 75 kg/m³ tai seostaa kreosootti vastaavassa suhteessa mäntyöljyyn.

Seuraavat kyllästeet eivät todennäköisesti yksinään toimi riittävän tehokkaasti lahoamista vastaan puupylväillä eli käyttöikä jää alle 50 vuoden, vaikka pitoisuutta nostettaisiin huomattavasti:

- C-kyllästeet
- Mikronisoitu kupari
- Booripohjaiset kyllästeet
- Triazolit (propikonatsoli yms).

Yllämainitut kyllästeet tulisi yhdistää/seostaa toiseen kyllästysaineeseen esim. kreosootti, mäntyöljy tai muu kasviöljy, joka vähentää niiden liukenemista ja/tai toimii lisätehoaineena. C-kyllästeet voivat tutkimusten mukaan antaa pylväille korotetulla jäämällä (NTR A+luokka) 50 vuoden käyttöiän. C-

kyllästeillä ei kuitenkaan saada tutkimusten mukaan luotettavasti aina täyttä tunkeumaa ja ne liukenevat pois puusta voimakkaasti, jonka vuoksi hajonta käyttöiässä on suuri. Tämän vuoksi ne tulisi yhdistää esim. öljykäsittelyyn, joka vähentää niiden liukoisuutta ja antaa lisäsuojaa lahoa vastaan.

Kyllästeet ovat tällä hetkellä arvioitavana biosididirektiivin mukaisesti ja niistä tehdään viranomaisten vaatimia selvityksiä. Tämänhetkisen tiedon mukaan taulukoiden 16 ja 17 kyllästeiden tehoaineet ovat arvioitavana biosididirektiivin mukaisesti käyttöluokassa 3 (UC 3) eli maanpinnan yläpuoli. Käyttöluokan laajentaminen maakosketukseen (UC 4) tehdään kansallisella päätöksellä jokaisen kyllästeen osalta valmistehyväksymisvaiheessa. Valmistehakemus jätetään kahden vuoden kuluessa siitä, kun valmisteen kaikki tehoaineet ovat Annex I:llä. Ensihakemus tehdään johonkin EU -maahan ja muihin maihin vastavuoroisella hyväksymisellä. Esimerkiksi kasviöljykäsittelyn vaikutus huuhtoutuvuuteen on hyvä osoittaa tällöin. Huuhtoutuvuus pitää silloin selvittää ilman käsittelyä ja käsittelyn kanssa. Mäntyöljy ja vesilasi eivät ole mukana biosididirektiivin mukaisessa arvioinneissa, koska raakamäntyöljy on vapautettu siitä ja vesilasi on todettu täysin vaarattomaksi aineeksi. Jos arvioitavana olevista aineista muodostetaan uusia seos, niin koko seos arvioitava biosididirektiivin mukaan uudestaan. Mutta jos arvioitavana olevilla aineilla tehdään yhdistelmäkyllästyksiä, esim C-kyllästys ensin ja sitten öljykyllästys, niin uutta arviointia ei tarvitse tehdä. Biosididirektiivin mukaisten arviointien perusteella saadaan siis lähivuosina käsitys siitä, millaisin toimenpitein ko. kylläste tai kyllästeyhdistelmä/seos on mahdollista saada hyväksytyksi pylväiden kyllästykseen. Tuloksena voi olla myös johtopäätös, että joitain kyllästeitä/seoksia ei ole mahdollista saada järkevin kustannuksin hyväksytyksi puupylväiden kyllästykseen.

12.2.2010

Laatija: Hannu Boren

69

Borenova Oy

Taulukko 16. Yhteenveto puunkäsittelymenetelmien soveltuvuudesta sähköpylväiden käsittelyyn ja tehdashinta-arviot (alv 0%) 211 ja 311 pylväille.

Käsittelymenetelmä ja retentio (kg/m3)	Biosidisyys ja mahdolliset raja-arvot käytöluokassa 4 (UC 4) maakosketus	SYKE:n hyväksyntä sähköpylväiden käsittelyyn	NTR-A luokan hyväksyntä ,NTR-Aluokan takuu 20 vuotta	Käyttöikäarvio VIM:in mitoitussuhjeiden mukaan (lahoamisvara 40 mm)	Voideaanko kyllästää puolipuhaita pylväitä?	Tehdashinta 211 ja 311 luokan pylväille	Kierrätys/häviö kustannukset 211 ja 311 pylväillä	Korroosio vrt. CCA kyllästetty pylväs	Halkeiluriski käsittelyssä ja käytön aikana?	Heikentyvätkö puun lujuusominaisuudet merkittävästi ?	Liukenevuus, tahraavuus, haju, tunkeuman epätasaisuus jne
CCA 12 kg/m3	Arseenidirektiivin perusteella kielletty	ei	kyllä	55	ei	100 120	0		kohtalainen	ei	
Kreosootti B-tyyppi 110 kg/m3	? arvioitavana	Kyllä	kyllä	60	kyllä	112 130	60	pieni	pieni	ei	Tahraavuus ja hajuongelmat
Kreosootti C-tyyppi 100 kg/m3	? arvioitavana	Kyllä	kyllä	60	kyllä	122 142	60	pieni	pieni	ei	Tahraavuus ja hajuongelmat
Kreosootti tyvi 110 kg/m3+latva 60 kg/m3	? arvioitavana	Kyllä	kyllä	60	kyllä	132 152	60	pieni	pieni	ei	Tahraavuus ja hajuongelmat
Kreosootti 75 kg/m3	? arvioitavana	Kyllä	kyllä	50	kyllä	104 124	60	pieni	pieni	ei	Tahraavuus ja hajuongelmat
CC-kylläste 19...30 kg/m3	? arvioitavana	Arvioitavana	kyllä	50	ei	118 138	60	pieni	kohtalainen	ei	
C-kylläste A+ -luokka 22...40 kg/m3	? arvioitavana	Kyllä, ei korotetulle jäämälle	Kyllä	40 (30...55)	ei	122 142	60	kohtalainen	kohtalainen	ei	tunkeuman epätasaisuus ja liukenevuus
Mäntööljy tyvi 200 kg ja latva 100 kg	Vapautettu biosididirektiivistä	Kyllä ?	ei	50	kyllä	160 185	0	?	Pieni	Ei	voi tahrata
Mäntööljy 150 kg koko puu	Vapautettu biosididirektiivistä	Kyllä ?	ei	50	kyllä	150 175	0	?	Pieni	Ei	voi tahrata
Mikronisoitu kupari 5 kg/m3	? arvioitavana	Ei	ei	30...40	ei	122 142	0	pieni	pieni	ei	
Vesilasikyllästys 75...125 kg	Ei ole biosidi	Kyllä	ei	30...40	ei	120 140	0	pieni	Kohtalainen	Ei	
Booripohjaiset kyllästysaineet 100 kg	? arvioitavana	Kyllä?	ei	30...400	kyllä	200 230	0	pieni?	kohtalainen	Ei	liukenee pois puusta helposti
Kreosootti 50 kg + mäntööljy 75 kg	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	50	kyllä	150 175	60	kohtalainen	pieni	ei	Tahraavuus ja hajuongelmat?
C-kylläste A-luokka + kreosootti tyvikylyllästys	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	50	ei	173 200	60	kohtalainen	kohtalainen	ei	Osa C-kyllästeestä voi hajota lämmössä kreosoottikäsittelyn yhteydessä
C-kyllästys 26...40 kg+ /mäntööljy 50 kg/m3	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	50	ei	180 210	0	kohtalainen	pieni	ei	Osa C-kyllästeestä voi hajota lämmössä öljykäsittelyn yhteydessä
Mikronisoitu kupari 5 kg + mäntööljy 100 kg	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	50	ei	180 210	0	Pieni	pieni	ei	voi tahrata
Vesilasi 75 kg + mäntööljy 100 kg	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	50?	ei	180 210	0	pieni	pieni	ei	voi tahrata
Vesilasi 75 kg + mäntööljy 50 kg	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	40...50?	ei	170 200	0	pieni	pieni	ei	voi tahrata
Booriyhdisteet 50 kg + mäntööljy 100 kg	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	ei yhdistelmälle	ei yhdistelmälle	50	Kyllä	180 210	0	pieni	pieni	ei	voi tahrata

12.2.2010

Laatija: Hannu Boren

70

Borenova Oy

Taulukko 17. Yhteenvedo kyllästysaineista ja –menetelmistä, jotka eivät sovellu sähköpylväiden käsittelyyn.

Käsittelymenetelmä ja retentio (kg/m ³)	Biosidisyyys ja mahdolliset raja-arvot	SYKE:n hyväksyntä sähköpylväiden käsittelyyn	NTR-A luokan hyväksyntä ,NTR-Aluokan takuu 20 vuotta	Käyttöikäarvio VIM:in mitoitustohjeiden mukaan.	Voidaanko kyllästää puolipuhaita pylväitä?	Tehdashinta 211 ja 311 luokan pylväille	Kierrätys/häviöy skustannukset 211 ja 311 pylväillä	Korroosio vrt. CCA kyllästetty pylväs	Halkeiluriski käsittelyssä ja käytön aikana?	Heikentyvätkö puun lujuusominaisuudet merkittävästi ?	Liukenevuus, tahraavuus, haju, tunkeuman epätasaisuus jne
CCA 12 kg/m ³	Arseenidirektiivin perusteella kielletty	ei	kyllä	55	ei	100 120	60		kohtalainen	ei	
Kreosotti 75 kg + pellavaöljy yms 100kg	Yhdistelmälle ei ole haettu lupia	Kyllä	ei	50	kyllä	190 220	60	kohtalainen	kohtalainen	ei	Tahraavuus ja hajuongelmat?
Asetylointi	Ei	Kyllä	ei	50	ei	300 360	0	suuri	Pieni	Ei	Ei sovellu männylle
Furfulointi, Belmadur-käsittely yms.	Ei	Kyllä?	ei	40	ei	400 480	0	pieni	suuri	kyllä	
Propikonatsoli/tebukonatsoli /IPBC100 kg/m ³	Biosidi	Kyllä ?	ei	30	ei	300 360	0	pieni	pieni	ei	Biohajoavia, eivät kestä korkeaa lämpöä
Tervansukuiset puutisleet 150 kg/m ³	Ei ole arvioitavana	ei	ei	50	Kyllä	300 360	0	pieni	pieni	ei	liukenee pois puusta helposti

4. Puupylvään kehittämismahdollisuudet

Tässä luvussa esitetään puupylvään kehittämismahdollisuuksia, joiden avulla puupylvään varaan rakennetun ilmajohdon käyttöikä voidaan pidentää ja/tai kokonaiskustannuksia pienentää. Tarkasteltavia keinoja ovat

1. Puupylväiden lujuuslajittelu ja nykyistä tarkempi tunnistusmerkintä.
2. Puupylvään ylimateitus ja/tai jännevälin maksimointi
3. Öljykyllästys (kreosootti ja/tai mäntyöljy) puolipuhaille, harjalatvaisille pylväille
4. Vanhojen pylväiden nykyistä tehokkaampi ja tarkempi lahotarkastus parempien pylvään ja ilmajohdon lähtö- ja historiatietojen, käytönrajojen sekä lahotarkastusohjelmistojen avulla

Huom! Ylimateituksella, lujuuslajittelulla ja nykyistä tarkemmalla tunnistusmerkinnällä ei ole juuri vaikutusta käyttöikään, jos puupylväiden lahoisuustarkastuksessa ei sovelleta kohdan 4 ohjeita eli lasketa jokaiselle pylväälle erikseen kriittisen kohdan minimiarvoa terveelle puupylvään läpimitalle.

4.1 Puupylväiden lujuuslajittelu ja nykyistä tarkempi tunnistusmerkintä

Mikäli lujuuslajittelun avulla puupylvään ominaislujuutta nostetaan nykyisestä 41,8 N/mm² esimerkiksi 47 N/mm², niin tätä voidaan hyödyntää ilmajohdorakentamisessa seuraavin tavoin:

1. Samankokoisten, mutta suuremman lujuusarvon omaavien pylväiden lahoamisvara on suurempi, koska niiden kuormankantokyky on suurempi. Tämä voidaan hyödyntää käyttöiän lisänä, mikäli tällaiset pylväät on merkitty tai voidaan muuten tunnistaa lahotarkastuksessa.
2. Käyttää saman koko luokan pylvästä, mutta pidemmällä jänneväliä.
3. Käyttää kokoluokkaa pienempiä pylväitä entisellä jänneväliä, koska sama kuormankantokyky saadaan lujuusarvoltaan suuremmilla pylväillä pienemmällä läpimitalla

Kannatinpylväillä puupylvään tyviosassa on suurin rasitus eli kriittinen kohta on maanrajan alueella. A-tai harustetuilla pylväillä kriittinen kohta voi olla mikä tahansa tyven ja latvan välillä. Puupylvään lujuus pienenee tyvestä latvaan päin mentäessä, koska tyviosa on yleensä oksaton ja tihein.

Puuaineksen tiheys on suurin yksittäinen pylvään lujuuteen vaikuttava tekijä. Pylvään tyviosan lujuus (N/mm^2) on arvioitavissa keskimääräisen vuosirengasvälin ja oksasumman perusteella. Kuvassa 39 on esitetty taivutuslujuuden ja kimmokertoimen riippuvuus vuosirengasvälistä ja tiheydestä pyöreällä männyllä ja kuusella. Kuvissa 40 ja 41 on esitetty malleilla laskettu taivutuslujuuden ja kimmokertoimen riippuvuus vuosirengasvälistä ja oksasummasta pyöreällä männyllä ja kuusella. Tulosten perusteella keskimääräisen vuosirengasvälin rajaaminen tyvileikkauksessa max 3,5 mm ja oksasumman rajoittaminen ensimmäisen 3 metrin matkalla max 100 mm per oksankiehkura tulisi nostamaan selvästi pylvään ominaislujuutta nykyisestä. Aidoilla tyvipylväillä nämä ehdot täyttyvät luonnostaan.

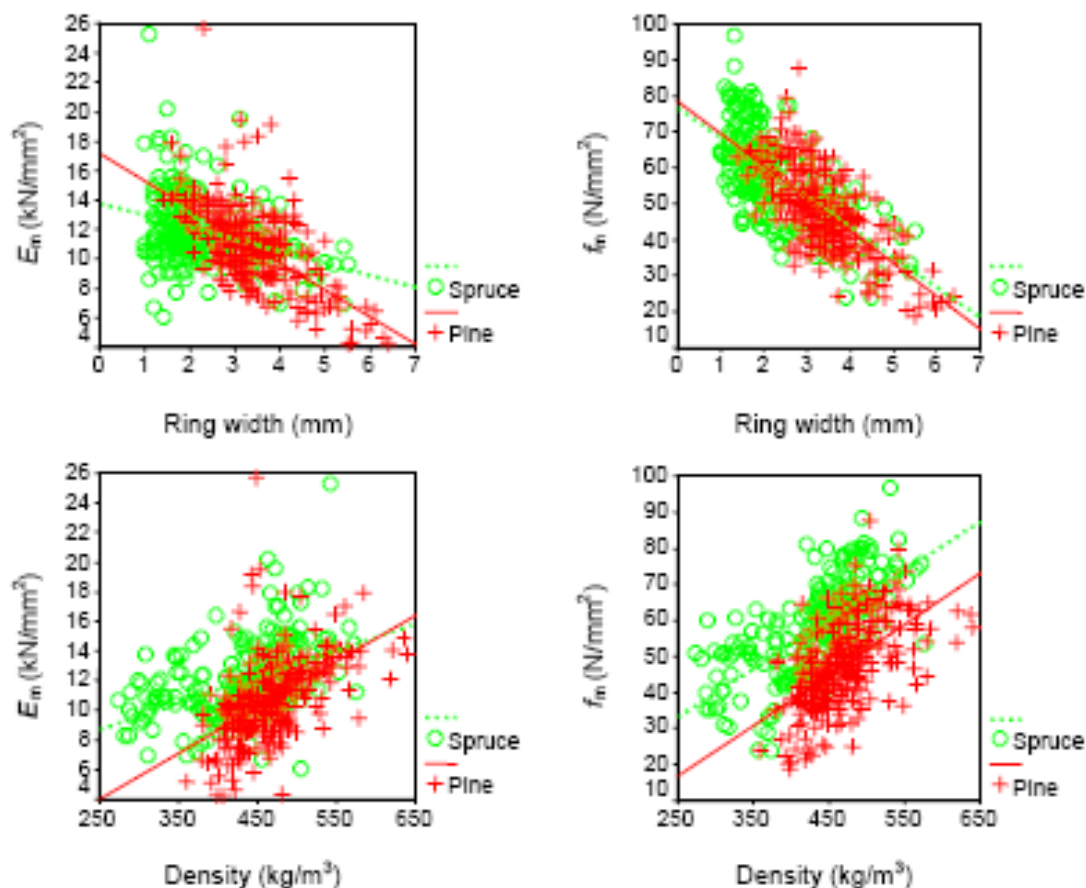


Fig. 38. Modulus of elasticity (E_m) and strength (f_m) in bending versus ring width and density. The linear trend lines are presented, as well. Modulus of elasticity and strength are at the test moisture content.

Kuva 39. Taivutuslujuuden ja kimmokertoimen riippuvuus vuosirengasvälistä ja tiheydestä männyllä ja kuusella (Boren 2001).

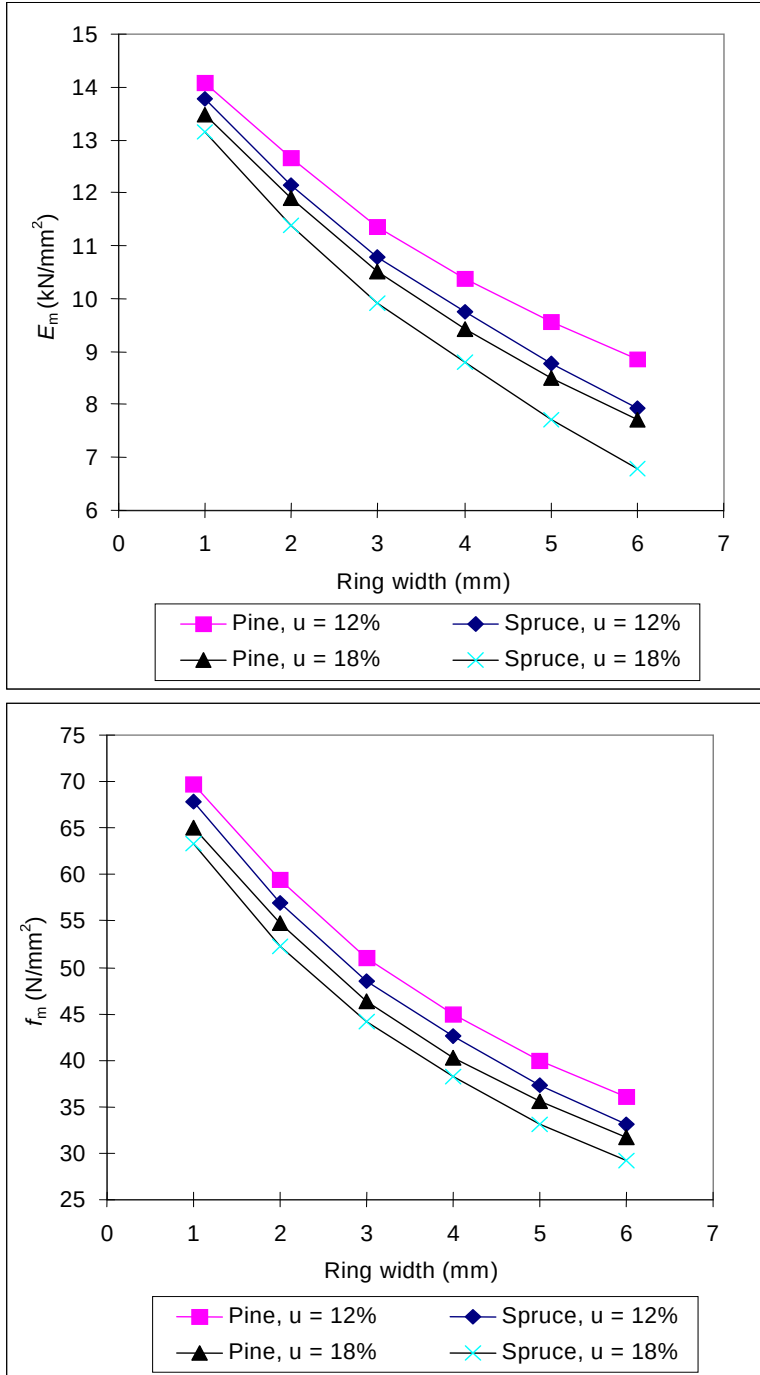


Fig. 50. Effect of ring width on the modulus of elasticity (above) and strength (below) in bending for machine round pine and spruce at the diameter of 125 mm, knot area ratio of 23.9% and moisture contents of 12% and 18%. Density ranged from 580 to 420 kg/m³ for pine and from 500 to 310 kg/m³ for spruce, whilst age ranged from 48 to 8 years.

Kuva 40. Malleilla laskettu taivutuslujuuden ja kimmokertoimen riippuvuus vuosirengasvälistä männyllä ja kuusella (Boren 2001).

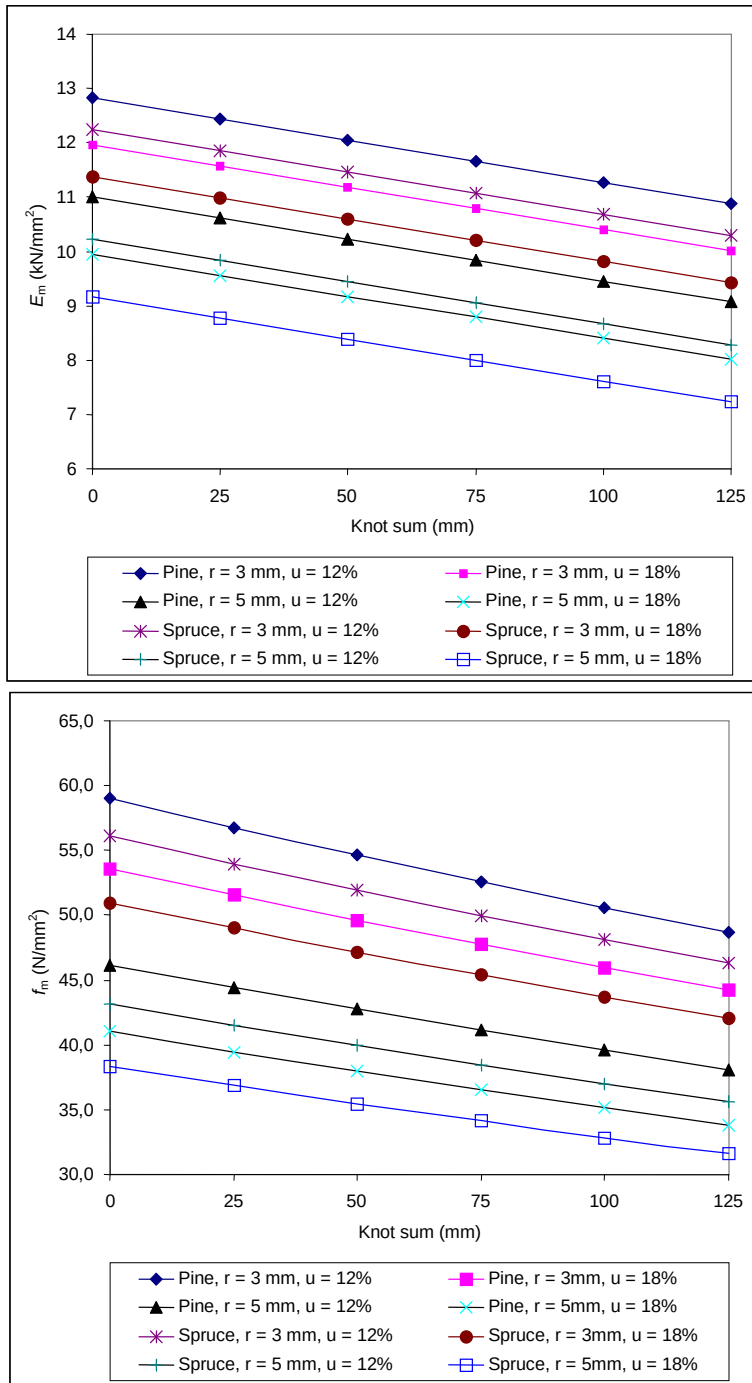


Fig. 54. Effect of knot sum on the modulus of elasticity (above) and strength (below) in bending for machine round pine and spruce at the ring width of 3 mm and 5 mm and at the moisture contents of 12% and 18 %. Densities used in the calculations were 480 and 430 kg/m³ for pine and 390 and 330 kg/m³ for

Kuva 41. Malleilla laskettu taivutuslujuuden ja kimmokertoimen riippuvuus oksasummasta männällä ja kuusella (Boren 2001).

Koputusäänen nopeuteen perustuvat laitteet ennustavat koko pylvään keskimääräisen lujuuden, joka on usein heikompi kuin kriittisen kohdan lujuus (pylvään tyviosa on yleensä oksaton ja puuaineksen tiheys on suurin). Visuaalisella lujuuslajittelulla sekä tehtaalla että maastossa voidaan estimoida pylvään kriittisen kohdan lujuus.

Puupylväsvalmistajat ilmoittavat jatkossa CE-merkin yhteydessä pylvään kuormankantokykyä ilmaisevat tiedot. Käyttämällä pylväiden merkinnässä RFID-tekniikkaa, voidaan tehtaalla tallentaa jokaisen pylvään yksilöidyt tiedot mm. tyvi- ja latvaläpimitoista, lujuudesta ja käsittelystä kylkilappuun, joka on luettavissa maastossa RFID-lukulaitteella. RFID-kylkilappuun voidaan tallentaa jatkuvasti uutta tietoa pylvästä esim. kuntotarkastusten yhteydessä. Tämä nopeuttaa tarkastustyötä ja kylkilapun tiedot antavat tarkastajalle paremmat eväät arvioida kriittisen kohdan jäljellä olevaa kuormankantokykyä.

Uusia kyllästysaineita esim. C-kyllästeitä on useita ja samankin valmisteen koostumus saattaa muuttua (kuten on jo käynyt). Tämän vuoksi tehtaalla tulisi merkitä tarkemmin käytetty kyllästysaine ja – pitoisuus kylkilappuun. Kyllästeiden ja niiden pitoisuuksien välillä on eroja lahon etenemisnopeuden suhteen, jotka tulevat esille seuraavan 5-20 vuoden aikana. On tärkeää tunnistaa tarkasti, miten eri C-kyllästeet ovat lopulta toimineet käyttöolosuhteissa. Jos tarkkaa merkintää ei ole tehty, ei myöskään tarkkoja arvioita eri kyllästeiden toimivuudesta ei voida tulevaisuudessa tehdä.

Jokainen pylväsvalmistaja ilmoittaa jatkossa CE-merkinnän yhteydessä pylvään kuormankantokyvyn laskentaa varten oleelliset tiedot eli ominaislujuuden ja kimmokertoimen arvon. Tulevaisuudessa jokaisesta pylvästä voidaan lisäksi tallentaa tulevia tarkastuksia varten seuraavat pylvästiedot: valmistaja, vuosiluku, kyllästysaine – ja pitoisuus, maanrajan ja latvan todelliset läpimitat, keskimääräinen vr-väli, kriittisen kohdan oksasumma, korkeus maanrajasta orren kiinnityskohtaan sekä mitoitusohjelman antamat tiedot kuten johtimet, orsirakenne, jänneväli, kulmat, korkeusvaihtelu ja maastoluokka. RFID-tagin ja pylvästiedot voi asentaa ja tallentaa jo pylväsvalmistaja tai RFID-tagin sijasta tiedot voidaan tallentaa verkonhallintayhtiön paikkatietojärjestelmään. Näin tulevaisuuden tarkastuksissa tietoja ei tarvitse uudestaan mitata ja arvioida, vaan tarkastaja arvioi pelkästään pylvässä tapahtuneet muutokset erityisesti kriittisissä kohdin. Tarkastus on siis laadukkaampaa ja

nopeampaa näin toimittaessa. Tämä siksi, että todellisiin arvoihin perustuva laskenta voi antaa jopa 20% paremman tuloksen kuin standardin antamien minimiarvojen mukainen laskenta (esim. läpimitta).

4.2 Puupylvään ylimitoitus sekä muiden kustannuksiin vaikuttavien mitoitustekijöiden optimointi

Puupylvään ylimitoituksella tarkoitetaan läpimitaltaan ylisuurien pylväiden käyttöä verrattuna mitoitushjeiden antamaan pylväskokoon kuormitusten perusteella. Ylimitoituksessa mitoitushjelma ei ehdota pylväskokoa pelkästään kuormien perusteella vaan ottaa huomioon pylvään kyllästystavan ja vaadittavan käyttöiän esim. 50 vuotta. Jos 50 vuoden käyttöikä edellyttää 60 mm lahoamisvaraa läpimitassa, niin mitoitushjelma laskee pylväskoon kuormien ja vaadittavan lahoamisvaran perusteella.

Ylimitoitusta ei kannata tehdä kuitenkaan liikaa kahden eri syyn vuoksi. Pylväskoon kasvaessa puupylväiden saatavuus heikkenee ja hinta kasvaa voimakkaasti. Toinen tekijä liittyy pylvään lahoamiseen. Kun pylvään pinnasta alkanut laho on edennyt sydänpuuhun asti, niin sydänpuun lahoaminen voi olla nopeaa ja pylväs heikentyä nopeasti. Pylväällä pintapuun paksuus vaihtelee 20...70 mm (keskiarvo 35 mm) eli yhteensä pylvään läpimitasta kyllästänyttä pintapuuta on 40...140 mm:ä. Vanhaa pylvästä on pidetty yleensä vielä käyttökelpoisena, kun lahoa puuta on ympäri pylvään yli 20 mm eli terve läpimitta on pienentynyt yli 40 mm (Puupylvään kunnossapidon ja uusimisen perusteita s. 26 v. 1982). Ohjeistus on toiminut hyvin, sillä vanhoissa puupylväsilmajohdoissa ei ole esiintynyt merkittäviä ongelmia. Tulevaisuudessa laholuokitusta tulee muuttaa pylväsikohtaiseksi, sillä todellinen lahoamisvara vaihtelee suuresti. Lahoamisvaran maksimiarvoa voitaneen nostaa ainakin 70 mm:n läpimitasta, jolloin pylväs tulisi poistaa, vaikka laskennallisesti sillä olisi vielä lahoamisvaraa.

Mitoitushjelmiin (esim. Profila) tulisi siis lisätä lahotarkastelu eli minkä verran valitun pylvästyypin terveläpimitta saa pienentyä ja/tai minimikäyttöikävaatimus. Ohjelmaan voidaan lisätä myös kustannuslaskenta, joka laskee investointikustannuksen muutoksen pylvästyypin vaihtuessa sekä annuiteettimenetelmällä koko ilmajohtorakenteen vuosikustannukset eri ratkaisulla. Rakennusvaiheen mitoitustiedot tulee siirtää lahotarkastajien käyttöön joko tallentamalla ne RFID-tekniikalla pylvääseen

tai paikkatietojärjestelmään. Mitoitusohjelmistojen ja lahotarkastusohjelmistojen tulee olla siis yhteensopivia.

Esimerkki:

Suunnittelija on maastomittauksissa määritellyt pylväiden sijoituspaikat ja merkinnyt niiden koordinaatit maastoon ja paikkatietojärjestelmään. Pylväiden sijoituspaikkoja tämän jälkeen hankala muuttaa ”toimistolta käsin”, koska yksi muutos saattaa aiheuttaa koko linjaan muutoksia (teiden ylitys, kalliot, ojat yms). Jänneväliksi määräytyy eräässä kohdin 75 metriä ja mitoitusohjelma antaa pylväskooksi 311 ja lahoamisvaraksi maanrajassa vain 35 mm (käyttöikäarvio 40 vuotta). Koska jännevälin muutosta on ”toimistolla käsin” hankala tehdä, suunnittelija vaihtaa pylväskooksi 411, jolloin laskennallinen lahoamisvara on 50 mm (käyttöikäarvio 50 vuotta). Kustannustarkastelun perusteella hän toteaa investointikustannuksen hieman kasvavan, mutta kokonaiskustannusten pienentyvän, koska käyttöikä kasvaa.

Toisaalta suunnittelijalla voisi olla tukena jo maastossa paikkatietojärjestelmän lisäksi mitoitusohjelmisto, joka optimoi pylväskokoa ja jänneväliä käyttöiän ja kokonaiskustannusten kannalta. Suunnittelija ottaisi ohjelman ehdotukset huomioon merkitessään pylväiden sijoituspaikkoja maastoon ja viimeistेलisi suunnitelman toimistolla.

4.3 Öljykyllästys (kreosootti ja/tai mäntyöljy) puolipuhaille, harjalatvaisille pylväille

Öljykyllästyksellä (kreosootti ja mäntyöljy) on kolme merkittävää etua verrattuna vesipohjaisiin suolakyllästeisiin:

1. Tikan aiheuttamat tuhot puupylväille ovat pienemmät kuin suolakyllästetyillä pylväillä
2. Öljykyllästys voidaan tehdä myös puolipuhaille pylväille, jolloin puupylväiden käyttöikä on pidempi verrattuna vastaavaan sorvattuun pylvääseen eivätkä kustannukset juuri muutu.
3. Öljykyllästetyistä pylväistä voidaan jättää latvahattu pois, jos niihin tehdään harjalatva

Vanhat, CCA-kyllästetyt puupylväät lahoavat erityisesti maanrajasta pinnasta alkaen. Mutta myös latvaosassa tapahtuu puun lahoamista, pehmenemistä ja halkeilua. Lahotarkastusten perusteella

suurimmassa osassa vanhoja CCA-kyllästettyjä pylväitä esiintyy paljon tikankoloja ja –reikiä, jotka edistävät latvaosan lahoamista edelleen (kts liite 2). Reikä syntyy yleensä halkeamiin, kun linnut asettavat latvassa olevan halkeamaan käpyjä, joista ne nokkivat siemeniä. Monissa tällaisissa pylväissä tyviosa ei ole vielä saavuttanut lahoisuusluokkaa 4, vaan pylväät on vaihdettava latvaosan huonon kunnon vuoksi. C-kyllästeillä latvaosan ”pehmeneminen” ja halkeilu on oletettavasti nopeampaa kuin CCA-pylväillä, joka tulee nopeuttamaan tikan aiheuttamia tuhoja.

Kreosoottipylväissä tikan koloja ja –reikiä on esiintynyt hyvin vähän. Mäntyöljykyllästetyt pylväät ovat myös säästyneet tikan koloilta, mutta kokemuksia on vasta kymmeneltä vuodelta. Syitä, miksi tikka välttää öljykyllästettyjä pylväitä on kolme: 1. Tikat eivät pidä öljyn hajusta ja mahdollisesta tahraavuudesta. 2. öljykyllästettyjen pylväiden olematon halkeilu verrattuna suolakyllästettyihin pylväisiin. 3. Öljykyllästettujen pylväiden pinta säilyy kovana ja kuivana toisin kuin suolakyllästetyillä pylväillä.

Nykyisin puupylväistä sorvataan pois nilakerros ja noin 5-10 mm puuta ennen kyllästystä, koska nilakerros heikentää suolakyllästeiden tunkeutumista puuhun ja sorvauksen jälkeen pylväät ovat ulkonäöllisesti parempia. Öljykyllästeillä nilakerroksesta ei ole juuri haittaa. Puolipuhattaiden pylväiden edut verrattuna sorvattuun pylvääseen ovat seuraavat:

1. Pylväät ovat 5...10 mm paksumpia kuin vastaavasta pylväsaihiosta valmistetut sorvatut pylväät, jonka vuoksi lahoamisvaraa läpimitassa on jopa 20% enemmän.
2. Puolipuhattaiden pylväiden ominaislujuus on noin 5 % suurempi kuin vastaavien sorvattujen pylväiden, koska sorvaus rikkoo puu syyrakenteen erityisesti oksien ympärillä heikentäen lujuutta.
3. Nilakerros estää tehokkaasti pylvään kostumista ja vettymistä eli sään aiheuttamaa puun eroosiota/rapautumista, joka pidentää myös pylvään käyttöikää.

Nykyisillä sorveilla on mahdollista jättää sorvaamatta pelkästään maanrajan alue, jolla saadaan jo suuri etu verrattuna nykyiseen tapaan. Lisäksi öljykyllästetyillä pylväillä voidaan jättää latvahattu pois, mikäli niihin tehdään harjalatva. Tarvittaessa harjalatva voidaan käsitellä esim. piellä. Tämä tuo säästöjä kunnossapidossa, koska irronneista latvahatuista ei tarvitse huolehtia.

4.4 Vanhojen pylväiden nykyistä tehokkaampi ja tarkempi lahotarkastus parempien pylvään lähtö- ja historiatietojen, käytönrajojen sekä lahotarkastusohjelmistojen avulla

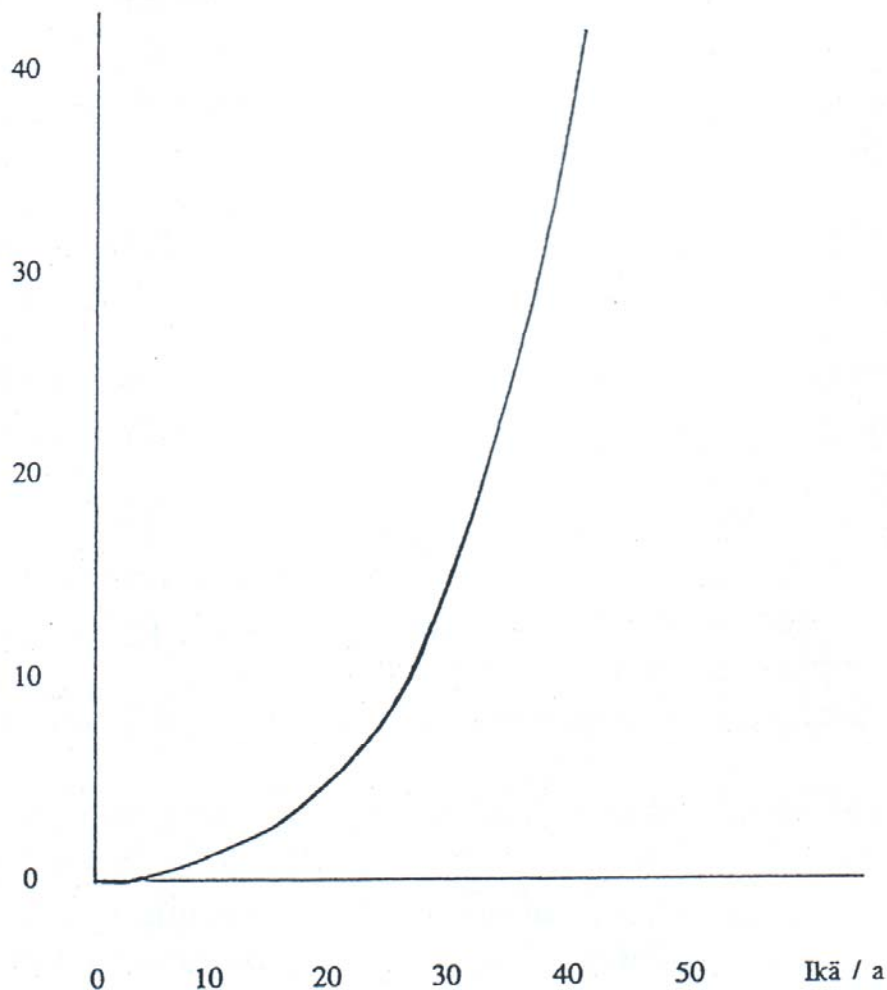
Nykyisin lahotarkastajat mittaavat ja arvioivat paljon tietoja puupylvästä ja ilmajohtorakenteesta tarkastuksissa, vaikka kaikki tiedot on jo mitattu ja laskettu rakennusvaiheessa. Lahotarkastusten toteutustavassa on tosin suuria eroja eri yhtiöiden välillä. Tulevaisuudessa puupylväiden lahotarkastajalla tulisi olla käytössään seuraavat tiedot jokaisesta pylvästä ja rakenteesta:

1. Valmistajan ilmoittamat puupylvään ominaisuustiedot, kuten kyllästysainevalmiste- ja pitoisuus, kyllästysvuosi, todelliset tyvi- ja latvaläpimitat ja ominaislujuus.
2. Rakentajan ilmoittamat ilmajohdon mitoitus tiedot
3. Mahdollisten aikaisempien tarkastusten tiedot.
4. Mitoitusohjelman antama tarkka kriittisen kohdan minimiarvo pylvään terveelle läpimitalle

Lisäksi CENELEC-standardeihin perustuvia käytännön ohjeita täytyy päivittää seuraavasti:

1. SENER:in verkostosuositus RJ 33:96, Puupylväiden käytönrajat tulee uusia. Nykyisissä puupylväiden käytönrajoissa ei ole huomioitu, että orren kiinnityskohta/juurituki/tyvivahvike vaikuttaa momenttivarren pituuteen (lyhempi momenttivarso sallii suuremman tuulikuormituksen). Jatkossa käytönrajat tulisi määrittää koko rakenteelle pylväs, juurituki, orsityyppi, ilmajohto ja ottaa ne käyttöön lahotarkastuksissa.
2. SENER:in verkostosuositus RJ 33:96 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen tulee uusia. Ohjeistuksessa tulee määrittää ne kriteerit voimassa olevien standardien mukaan, joiden perusteella pylväs todetaan poistettavaksi linjasta tulevaisuudessa. Paras tapa tähän on määrittää ja laskea pylvään todellinen kuormankantokyky kriittisissä kohdissa ja verrata sitä ko. kohtiin pylvästä aiheutuviin kuormituksiin ko. käyttöolosuhteissa jäljellä olevan käyttöiän aikana. Ohjeessa tulee myös määrittää uusille kyllästevalmisteille vastaavat lahon etenemiskäyrät kuin CCA-kyllästetyille pylväille kuntotarkastajien käyttöön (kuva 42).

Laho-osuus / mm



Kuva 3.3. Terveen tyvihalkaisijan väheneminen lahoamisen vaikutuksesta CCA-pylväillä.

Kuva 42. SENER:in verkostosuositus RJ 33:96 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen.

Jotta pylvään ja koko ilmajohtorakenteen arviointi olisi laadukasta ja tehokasta, täytyy tarkastajilla olla käytössään ainakin seuraavat tiedot:

- Käytetyt ilmajohtorakenteet, niiden paino, koko ja muoto
- Jänneväli ja kulmat
- Käyttöolosuhteet eli maasto-luokka
- Koko ilmajohtorakenteen jäljellä oleva arvioitu käyttöikä. Jos rakenteella arvioidaan olevan pitkä käyttöikä, niin todennäköisyys suurten säärasitusten esiintymiseen on suuri. Vanhoilla pylväillä

jäljellä oleva käyttöikä on lyhyt, jolloin suuren säärasituksen esiintymistodennäköisyys on pienempi ja pylvään mitoitusrasitusta voidaan pienentää vastaavasti. Jos pylväällä otaksutaan olevan esim. 15 vuoden käyttöikä jäljellä, voidaan rasitusten katsoa pienenevän n. 10 % (Puupylväiden kunnossapidon...1982).

- Puupylvään yli-/alilaatu verrattuna vaatimukset eli mitoitusperusteet (ominaislujuus ja läpimitat).
- Puupylvään kriittisten kohtien kuormankantokykyyn vaikuttavat tekijät
 - Alkuperäiset raaka-aineominaisuudet
 - valmistusprosessi
 - käytetty suojausmenetelmä ja aine
 - suoja-aineen määrä ja jakauma puussa
 - käyttöolosuhteet
 - mekaaniset vauriot, oksanreiät, tikanreiät jne.
 - Käytön aikaiset lisäsuojaukset, kuten juurituet, kobraus, latvansuojaus jne

Tulevaisuudessa nämä tiedot tulisi tallentaa joko pylvääseen (RFID) tai paikkatietojärjestelmään, jolloin tarkastajan ei tarvitse itse mitata ja määrittää yllä olevia tietoja. Parhaimmillaan järjestelmä on viety niin pitkälle, että tarkastajalla on etukäteen tiedossa jokaisen pylvään kriittinen kohta ja vähimmäisvaatimus pylvään terveelle läpimitalle. Tällöin tarkastajan tehtäväksi maastossa jää vain mitata kriittisen kohdan kokonaisläpimitta ja arvioida, täyttääkö terve läpimitta vielä vähimmäisvaatimuksen. Näin tarkastaja voi jatkossa keskittyä pelkästään

1. Pylväässä ja rakenteessa tapahtuneisiin muutoksiin ja niiden vaikutusten arviointiin.
2. Puupylvään kriittisen kohdan eli potentiaalisen murtumiskohdan arviointiin. Tässä tulee siirtyä pelkkien läpimittojen (todellinen läpimitta ja lahosyvytydet) lisäksi arvioimaan puun lujuusominaisuuksia.

5. Tyypillisen 20 kV:n ilmajohdon määrittely ja lähtöarvot puupylväälle

Taulukossa 18 on esitetty 20 kV:n päällystetyn BLL62 ilmajohdon tiedot ja rakentamiskustannukset 211-puupylväällä vuonna 2004-2006, jolloin käytettiin vielä CCA-kyllästettyä pylvästä.

Taulukko 18. BLL 62 ilmajohdon keskimääräiset rakentamiskustannukset vuonna 2006 CCA-kyllästetyllä 211-puupylväällä.

CCA-kyllästetyn puupylvään varaan rakennetun BLL 62 ilmajohdon lähtötiedot ja vuosikustannukset vuonna 2006		
Hinnat alv 0%		
	Hinta (alv 0%) vuonna 2006	
Johdotyyppi BLL 62 20 kV	4680	€/km
Ilmajohdon veto	2500	€/km
Orsi, eristimet yms	92,5	€/kpl
Puupylväs 211 CCA	100	€/kpl
Pylvästys (uuden pylvään, orren ja ilmajohdon asennus)	500	€/kpl uusi ilmajohdot, sisältää vain työn osuuden
Pylvästys (pelkkä puupylväs)	45	€/kpl uusi ilmajohdot, sisältää vain työn osuuden
BLL 62 ilmajohdon rakentamiskustannusten jakaantuminen CCA 211 puupylväällä (jännäväli 60 m, 20 pylvästä) vuonna 2006 €/ilmajohtokilometri		
BLL 62 ilmajohdot 3 johdinta	4680	€/km
Ilmajohdon veto	2500	€/km
Orret, eristimet yms	1819	€/km
Puupylväät rahteineen ja kierrätysmaksuineen	1967	€/km
Pylvästys	9833	€/km
Yhteensä	20799	€/km
Myöhemmin tehtävien muutostöiden yms. hinnat ilmajohdolla BLL 62		
	Hinta (alv 0%) vuonna 2006	
Uuden johtimen vaihto per kilometri	14000	€/km vanha ilmajohdot, sisältää työn ja kaikki materiaalit
Pylvästys (uuden pylvään vaihto)	910	€/kpl vanha ilmajohdot, sisältää työn ja kaikki materiaalit
Orren vaihto	380	€/kpl
Vanhan ilmajohdon purkaminen per kilometri	5000	€/km
Pylväiden hävittäminen	30	€/kpl
Juurituenta	250	€/kpl vanha ilmajohdot, sisältää työn ja kaikki materiaalit
Juurituen hinta	110	€/kpl
Vanhan linjan kuntotarkastus per pylväs	10	€/kpl (oma arvio)
Vanhan linjan kuntotarkastusväli keskimäärin	10	vuotta
Keskimääräinen kuntotarkastuksen vuosikustannus per ilmajohdotkilometri	20	€/ilmajohtokilometri
Latvattujen uudelleen asennukset, juurituennat yms	20	€/vuosi/ilmajohtokilometri

Taulukossa 19 on esitetty BLL 62 johtimien (3 kpl) ja orsien aiheuttamat tuuli- ja jääkuormat eri jännäveillä johdon suoran osan kannatinpylväille. Kuormitukset on laskettu uusien CENELEC-ohjeiden mukaan ja ne on saatu Finnmast Oy:ltä ja Otso Kuusistolta. Taulukon 19 tuuli- ja jääkuormiin tulee vielä lisätä pylväaseen kohdistuva tuulikuorma ja pylvään oma paino, jotka siis riippuvat pylväsmateriaalista (koko, muoto ja paino). Taulukossa 20 on laskettu ilmajohdorakenteen kokonaistuulikuormitus eri jännäveillä, kun BLL 62 ilmajohdolla pylväänä on käytetty 211 puupylvästä.

Taulukko 19. BLL 62 johtimien (3 kpl) ja orsien aiheuttamat tuuli- ja jääkuormat eri jänneväleillä johdon suoran osan kannatinpylväille uusien CENELEC-ohjeiden mukaan (Finnmast Oy ja Otso Kuusisto 2009).

Kooste																
Koosteissa ovat mukana kaikki johtimet, orsi ja eristimet																
Kooste	Vaakakuorma T										Pystykuorma V					
Jänne (m)	EDS	Pakk	Tuuli	Jää	J+T	T+J	T+P	EDS	Pakk	Tuuli	Jää	J+T	T+J	T+P		
60,0	0,0	0,0	1475,4	0,0	1228,6	1271,5	1075,3	1048,5	1048,5	1048,5	2848,5	2848,5	1498,5	1048,5		
80,0	0,0	0,0	1904,3	0,0	1623,6	1669,1	1387,9	1234,5	1234,5	1234,5	3634,5	3634,5	1834,5	1234,5		
100,0	0,0	0,0	2333,2	0,0	2018,5	2066,7	1700,5	1420,5	1420,5	1420,5	4420,5	4420,5	2170,5	1420,5		
120,0	0,0	0,0	2720,4	0,0	2413,5	2464,3	2013,1	1606,5	1606,5	1606,5	5206,5	5206,5	2506,5	1606,5		

Taulukko 20. Ilmajohdorakenteen kokonaistuulikuormitus eri jänneväleillä, kun BLL 62 ilmajohdolla pylväänä on käytetty 211 puupylvästä.

Pylvästuuli	80 N/m (33 m/s)	Puupylväiden lujuuslaskentaohje 1981	Pylvään tilavuus	411	0,55 m3	Pylvään maanpäällisen osan paino	411	2695
Pylvästuuli	30 N/m (21 m/s)			311	0,41 m3	7000 N/m3	311	2009
				211	0,34 m3		211	1666
Mitoittava kuorma uusi puupylväs 211								
	Vaaka		Pysty					
Jänne (m)	tuuli johdin	pylvästuuli	yht.	tuuli johdin	oma paino	yht.		
60	1475	270	1745	1048,5	1666	2714,5 N		
80	1904	270	2174	1234,5	1666	2900,5 N		
100	2333	270	2603	1420,5	1666	3086,5 N		
120	2720	270	2990	1606,5	1666	3272,5 N		

Taulukossa 21 on esitetty ilmajohdon suoran osan kannatinpylväiden maanrajaan tuulen aiheuttama jännitys eri jänneväleillä uudella ja vanhalla 211 pylväällä uusien CENELEC-ohjeiden mukaan. Tulosten perusteella 211 pylvästä voidaan käyttää vielä 100 metrin jännevälillä uusien CENELEC-ohjeiden mukaan (vastaa VIM:iä). Kun tuloksia tarkastellaan käytössä olevan lahoisuusluokituksen mukaisesti (lahoamisvaraa läpimitassa täytyy olla vähintään 40 mm:ä), niin uusien CENELEC-ohjeiden mukaan 211 pylväs riittää vain 60 metrin jännevälille. Tämän vuoksi lahoamisvaratarkastelu on liitettävä osaksi mitoitusohjelmia, kun suunnitellaan ja rakennetaan ilmajohtoja uusien CENELEC-ohjeiden mukaisesti. Taulukoissa 16 ja 17 esitetyt pylvään käyttöiät perustuvat olettamukseen, että lahoamisvaraa puupylväissä on vähintään 40 mm läpimitassa. Tutkimuksen lähtöarvoksi määräytyy siis 211 puupylväällä ja BLL 62 ilmajohdorakenteella 60 metrin jänneväli. Tällöin puupylvään käyttöikää eri kyllästysaineilla, -pitoisuuksilla ja menetelmillä voidaan verrata CCA-kyllästettyyn pylvääseen, josta on paljon kokemuseräistä tietoa saatavilla.

Taulukko 21. Ilmajohdon suoran osan kannatinpylväiden maanrajaan tuulen aiheuttama jännitys eri jänneväleillä uudella ja vanhalla (lahonneella) 211 pylväällä uusien CENELEC-ohjeiden mukaan.

Mitoittava kuorma uusi puupylväs 211							
	Vaaka				Pysty		
Jänne (m)	tuuli johdin	pylvästuuli	yht.	tuuli johdin	oma paino	yht.	
60	1475	270	1745	1048,5	1666	2714,5	N
80	1904	270	2174	1234,5	1666	2900,5	N
100	2333	270	2603	1420,5	1666	3086,5	N
120	2720	270	2990	1606,5	1666	3272,5	N
Käytetyt kaavat jännitysten laskennassa							
Taivutusjännitys		EN 14229					
Pystyjännitys		Puupylväiden lujuuslaskentaohje 1981					
Nurjahdusjännitys		Puupylväiden lujuuslaskentaohje 1981					
Jännitykset, uusi 211 pylväs max jännitys 29,9 N/mm2							
Uusi pylväs 211 kestää vaakakuormitusta 4470 N							
upotussyvyys (mm)	orsi latvasta (mm)	maanraja lpm (mm)	latva lpm (mm)	Dm (mm)			
2000	250	212	153	190,41			
Jänne (m)	taivutus	pysty	nurjahdus	yhteensä			
60,00	16,34	0,08	4,50	20,91			
80,00	20,35	0,08	4,81	25,24			
100,00	24,36	0,09	5,11	29,56			
120,00	27,99	0,09	5,42	33,50			
Mitoittava kuorma vanha puupylväs 211							
Kuormitusta voidaan pienentää 8%:lla							
	Vaaka				Pysty		
Jänne (m)	tuuli johdin	pylvästuuli	yht.	tuuli johdin	oma paino	yht.	
60,00	1357	248	1606	965	1666	2631	
80,00	1752	248	2000	1136	1666	2802	
100,00	2147	248	2395	1307	1666	2973	
120,00	2503	248	2751	1478	1666	3144	
Jännitykset, vanha 211 pylväs max jännitys 41,8 N/mm2							
Lahoamisvara min		40 mm					
upotussyvyys (mm)	orsi latvasta (mm)	maanraja lpm (mm)	latva lpm (mm)	Dm (mm)			
2000	250	172	113	150,81			
Jänne (m)	taivutus	pysty	nurjahdus	yhteensä			
60,00	28,14	0,11	10,56	38,81			
80,00	35,06	0,12	11,24	46,42			
100,00	41,97	0,13	11,93	54,03			
120,00	48,21	0,14	12,62	60,96			

6. Tulokset puupylväät

Taulukoissa 22 ja 23 on esitetty refenssituotteiden kreosoottikyllästetty ja C-kyllästetty 211 pylväiden varaan rakennetun tyypillisen BLL62 ilmajohtolinjan lähtöarvot ja kustannukset. Taulukossa 24, 25 ja 26 on esitetty yhteenveto laskennan tuloksista eri puupylväs vaihtoehtoilla. Kuvissa 43... 48 on esitetty investointikustannukset (€/km) ja vuosikustannukset (€/km/vuosi) eri puupylväsvaihtoehtoilla sekä jännevälin, lujuuslajittelun ja ylimitoituksen vaikutukset kustannuksiin. Vuosikustannukset sisältävät investointikustannusten lisäksi pylväsmateriaalista aiheutuvat tarkastus- ja kunnossapitokustannukset, ilmajohdon purkamiskulut sekä pylväiden kierrätys/hävittämiskustannukset. Korkokantana on käytetty 5%:a.

Tulosten perusteella C-kyllästetty A+-luokka on refenssipylväillä 211 ja 311 kalliimpi vaihtoehto kuin kreosootti A-luokka (ero vuosikustannuksissa noin 9 %), vaikka C-kyllästetyn pylvään käyttöikä on 20 vuotta lyhyempi kuin kreosoottikyllästetyn pylvään. Tämä on seurausta rakentamis-, kunnossapito ja purkamisvaiheiden suojautumis- yms. kustannuksista kreosoottipylväillä, jotka ovat 5% rakentamiskustannuksista. Kreosootti kyllästetty puupylväs on selvästi C-kyllästettä edullisempi vuosikustannuksiltaan etenkin silloin, kun käytetään lujuuslajiteltua, harjalatvaista ja tyviosastaan puolipuhdasta pylvästä (puolipuhdalla pylväällä päästään noin 10 metriä pidempään jänneväliin). Ns. combipylväs eli C-kyllästetty pylväs, jonka tyviosassa on kyllästetty kreosootilla on vain 2,7% vuosikustannuksiltaan edullisempi kuin pelkkä C-kyllästetty pylväs.

Edullisimmat vaihtoehdot ovat kreosootti-pylväs alennetulla pitoisuudella 75 kg/m³ sekä CC-kyllästetty pylväs, jota käytetään Euroopassa CCA-pylvään korvaajana. Suomessa CC-kyllästettä ei ole vielä hyväksytty. Tulevaisuuden vaihtoehtoista paras potentiaali on mäntyöljyllä ja vesilasilla sekä näiden yhdistelmällä. Vesilasi ja mäntyöljy eivät ole biosidejä. Vesilasi voidaan polymeroida puuhun vähäisellä öljymäärällä, jonka vuoksi pylvästyksessä työntekijöiden ei tarvitse suojautua kuten kreosootti ja puhtailla mäntyöljypylväillä. Myös kierrätyskustannukset ovat pienet verrattuna muihin ratkaisuihin. Mäntyöljy 150 kg/m³ on myös potentiaalinen vaihtoehto, etenkin jos pylvästyksessä välttäisi työntekijöiden suojautumiskustannuksilta. Jos mäntyöljyllä kyllästetään tyviosassa suurella öljymäärällä ja latvaosa pienemmällä öljymäärällä, niin tähän on mahdollista päästä. Itseasiassa kaikki öljyyn perustuvat vaihtoehdot olisivat kilpailukykyisiä, jos pylvästyksen yhteydessä

suojautumiskustannukset olisivat lähes samat kuin öljyttömillä kyllästeillä. Mäntyöljy- ja vesilasikyllästetyillä pylväillä kierrätyskustannukset ovat myös pienemmät kuin biosidiin perustuvilla ratkaisuilla.

Kaikilla vaihtoehtoilta edullisin ratkaisu on maksimoida jänneväli joko suurentamalla pylväskokoa ja/tai käyttämällä lujuuslajiteltua pylvästä. Öljykyllästeillä voidaan lisäksi jättää tyviosa puolipuhdaksi, joka lisää lahoamisvaraa (käyttöikää) ja lujuutta verrattuna vastaavaan kokonaisuudessaan sorvattuun pylvääseen, jolloin päästään jopa 30 metriä nykyistä pidempään jänneväliin. Tämän vuoksi öljykyllästeiden suhteellinen kilpailukyky on parempi tässä tapauksessa. Vuosikustannuksiltaan edullisin ratkaisu on käyttää esimerkkijohdolla BLL62 lujuuslajiteltua, tyviosastaan puolipuhdasta 311-luokan kreosoottikyllästettyä pylvästä. Käyttöiän maksimointi yhdistelemällä eri kyllästeitä on lähes aina kannattamatonta, koska investointikustannusten nousu (=pylvään hinnan nousu) kumoaa käyttöiän pidentymisestä saatavan kustannushyödyn. Tämä näkyy selkeästi, kun vertaa C-kyllästettyä pylvästä ns. combi-pylvääseen (c-kyllästetty pylväs, jonka tyviosaa on kreosoottikyllästetty). Käyttöiällä on suuri merkitys, jos investointikustannukset ovat lähes samat (kts C-kylläste vrt. CC-kylläste). Lisäksi biosidisiä kyllästeitä ei voi seostaa tai biosidiä ei voi lisäaineistaa ilman biosidirektiivin mukaista hyväksyntää. Biosidisiä kyllästeitä on sallittua yhdistää kyllästämällä pylväs kullakin aineella erikseen, joka nostaa kyllästyskustannuksia.

Taulukko 22. BLL 62 ilmajohtorakenteen lähtötiedot, kun pylväänä käytetty A-luokan kreosoottikyllästettyä 211-puupylvästä.

Kreosoottikyllästetyn puupylvään varaan rakennetun ilmajohtolinjan lähtötiedot ja vuosikustannukset		
Pylväs	kreosootti A-luokka 211	Mitoituslujuus 29,9 N/mm ²
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitystenkohtien keskianon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	60	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	20	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	20799	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashiinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Tehdashiinta kreosoottikyllästetty A-luokka 211	116	€/kpl
Käyttöikä	60	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	5,6	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 125 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	4	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	1040	€/km (suojaavaatteen, peseytyminen yms. 5% kokonaiskustannuksista vrt. suolakyllästetty pylväs)
Hinta per kilometri uusi ilmajohto kreosoottipylväällä	22343	€/km
Puupylvään 211 lähtötiedot		
Latva min. läpimitta	150	mm
Latva min. läpimitta orren kiinnityskohdassa latvasta	153	mm
Tyvi min. läpimitta 1,5 m	215	mm
Tyvi min. läpimitta maanrajassa 2,0 m	212	mm
Ominaislujuus	41,8	N/mm ²
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	29,9	N/mm ² (uusi pylväs)
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	41,8	N/mm ² (vanha pylväs, lisäksi kuormia voidaan vähentää 8%:a)
Uuden pylvään kuormankantokykyominaisuudet näillä lähtöarvoilla EN 14229 mukaan ominaislujuuden mukaan laskettuna	4470	N (vaakakuorma EN 14229 ja Puupylväiden lujuuslaskentaohje prof Erkki Niskanen)
Uuden pylvään maanrajan kohdistuva max kuormitus (jännitys) suurimman sallitun jännityksen (29,9 N/mm ²) mukaan laskettuna	3200	N (vaakakuorma EN 14229 ja Puupylväiden lujuuslaskentaohje prof Erkki Niskanen)
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
Pylvästyyppi	kreosootti A-luokka 211	
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	125,6	€
Jänneväli	60	m
Investointikustannus	22343	€/km
Käyttöikä	60	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1180	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	130	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	55	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km (latvahatut)
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	31	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	20	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1515	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	256	€/vuosi/km

Taulukko 23. BLL 62 ilmajohtorakenteen lähtötiedot, kun pylväänä käytetty A+-luokan C-kyllästettyä 211-puupylvästä.

C-kyllästetyn puupylvään varaan rakennetun ilmajohtolinjan lähtötiedot ja vuosikustannukset		
Pylväs	C-kylläste A+-luokka 211	Mitoituslujuus 29,9 N/mm ²
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitystenkohtien keskianon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	60	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	20	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	20799	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashiinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Tehdashiinta C-kyllästetty A-luokka 211	121	€/kpl
Käyttöikä	40	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	5,6	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 125 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	4	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	0	€/km
Hinta per kilometri uusi ilmajohto c-pylväällä	21401	€/km
Puupylvään 211 lähtötiedot		
Latva min. läpimitta	150	mm
Latva min. läpimitta orren kiinnityskohdassa latvasta	153	mm
Tyvi min. läpimitta 1,5 m	215	mm
Tyvi min. läpimitta maanrajassa 2,0 m	212	mm
Ominaislujuus	41,8	N/mm ²
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	29,9	N/mm ² (uusi pylväs)
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	41,8	N/mm ² (vanha pylväs, lisäksi kuormia voidaan vähentää 8%:a)
Uuden pylvään kuormankantokykyominaisuudet näillä lähtöarvoilla EN 14229 mukaan ominaislujuuden mukaan laskettuna	4470	N (vaakakuorma EN 14229 ja Puupylväiden lujuuslaskentaohje prof Erkki Niskanen)
Uuden pylvään maanrajan kohdistuva max kuormitus (jännitys) suurimman sallitun jännityksen (29,9 N/mm ²) mukaan laskettuna	3200	N (vaakakuorma EN 14229 ja Puupylväiden lujuuslaskentaohje prof Erkki Niskanen)
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
Pylvästyyppi	C-kylläste A+-luokka 211	
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	130,6	€
Jänneväli	60	m
Investointikustannus	21401	€/km
käyttöikä	40	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1247	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	150	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	0	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km (latvahatut)
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	69	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	39	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	291	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1667	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	278	€/vuosi/km

Taulukko 24. Yhteenvedo tuloksista kreosootti A-luokka (110 kg/m³), kreosootti 75 kg/m³, C-kylläste A+-luokka ja CC-kylläste.

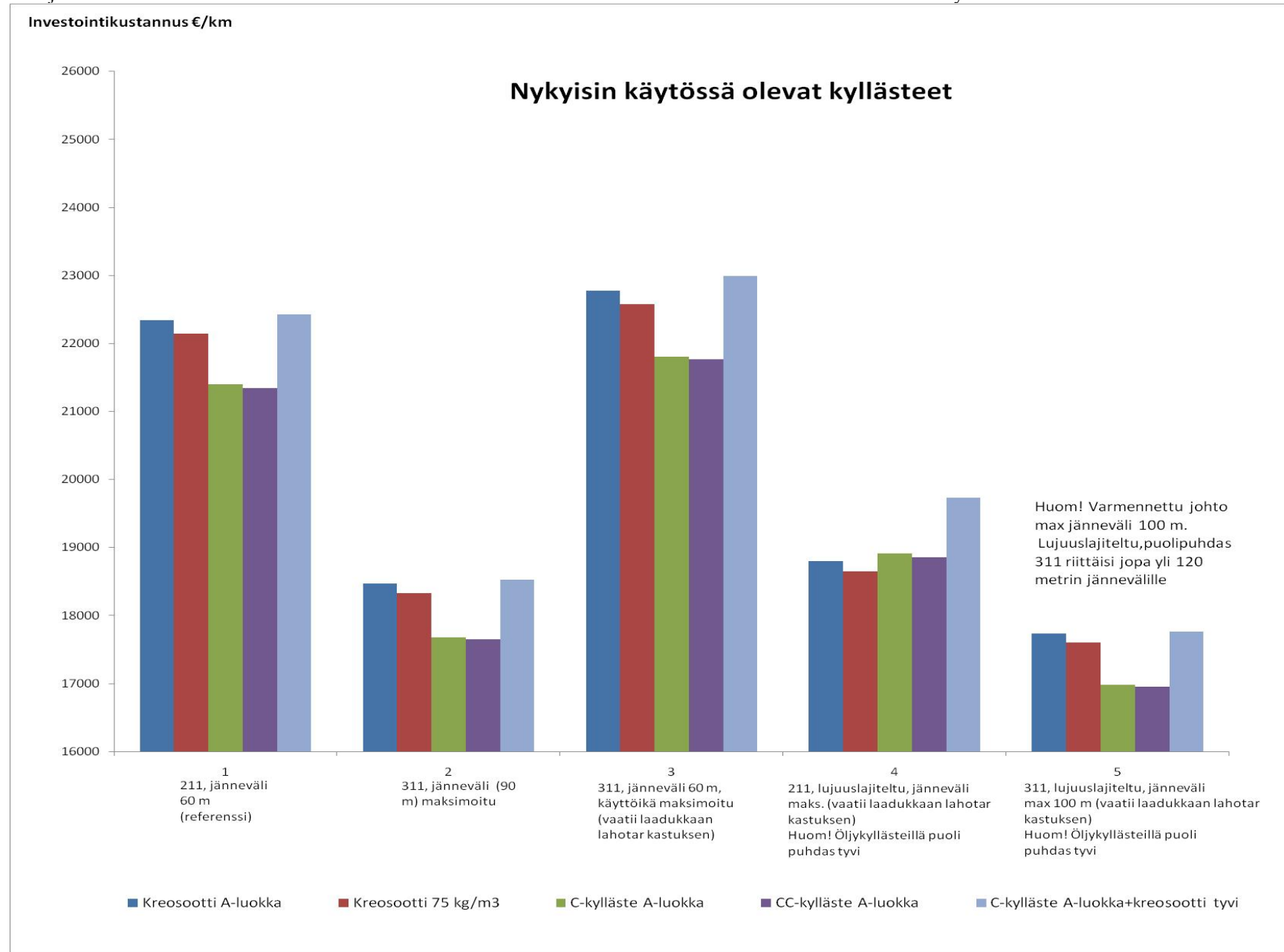
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
				Kreosootti A-luokka, 211, tyv puolipuhdas, harjalatva, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm2	Kreosootti A-luokka 311, tyv puolipuhdas, harjalatva, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm2	
Pylvästyyppi	kreosootti A-luokka 211	kreosootti A-luokka 311	Kreosootti A-luokka 311			
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	126	147	147	136	157	€
Jänneväli	60	90	60	85	100	m
Investointikustannus	22343	18468	22771	18800	17738	€/km
käyttöikä	60	60	70	60	70	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1180	976	1177	993	917	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	130	110	150	106	106	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	55	45	54	46	42	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	31	22	31	23	20	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	15	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	264	264	258	264	258	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1515	1296	1506	1315	1229	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	256	211	274	210	201	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
				Kreosootti 75 kg 211, tyv puolipuhdas, harjalatva, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm2	Kreosootti 75 kg 311, tyv puolipuhdas, harjalatva, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm2	
Pylvästyyppi	kreosootti 75 kg 211	kreosootti 75 kg 311	kreosootti 75 kg 311			
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	116	137	137	126	147	€
Jänneväli	60	90	60	85	100	m
Investointikustannus	22146	18327	22575	18653	17608	€/km
käyttöikä	50	50	60	50	60	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1213	1004	1193	1022	930	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	125	106	143	102	101	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	57	46	55	48	43	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	32	23	31	24	21	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	15	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	264	274	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1559	1335	1528	1355	1248	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	253	210	269	208	198	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
				C-kyllästys A+-luokka 211, lujuuslajiteltu, ominaislujuus 47 N/mm2	C-kyllästys A+-luokka 311, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm2	
Pylvästyyppi	C-kylläste A+-luokka 211	C-kyllästys A+-luokka 311	C-kyllästys A+-luokka 311			
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	131	151	151	142	161	€
Jänneväli	60	90	60	77	100	m
Investointikustannus	21401	17677	21810	18916	16981	€/km
käyttöikä	40	40	45	40	40	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1247	1030	1227	1102	990	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	150	125	168	132	122	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	0	0	0	0	0	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	69	49	66	56	45	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	39	28	39	32	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	291	291	281	291	291	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1667	1419	1634	1502	1359	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	278	222	293	240	201	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
				CC-kyllästys A-luokka 211, lujuuslajiteltu, ominaislujuus 47 N/mm2	CC-kyllästys A-luokka 311, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm2	
Pylvästyyppi	CC-kylläste A-luokka 211	CC-kyllästys A-luokka 311	CC-kyllästys A-luokka 311			
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	128	149	149	138	159	€
Jänneväli	60	90	60	77	100	m
Investointikustannus	21342	17649	21771	18852	16955	€/km
käyttöikä	50	50	55	50	50	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1169	967	1168	1033	929	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	137	115	158	120	114	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	0	0	0	0	0	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	65	46	63	53	43	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	25	18	25	20	16	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1552	1325	1545	1399	1282	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	247	199	266	213	192	€/vuosi/km

Taulukko 25. Yhteen veto tuloksista mäntyöljy 150 kg/m³, kreosootti 50kg/m³+mäntyöljy 75 kg/m³, C-kylläste A-luokka+kreosootti tyvi ja C-kylläste A-luokka+mäntyöljy 50 kg/m³.

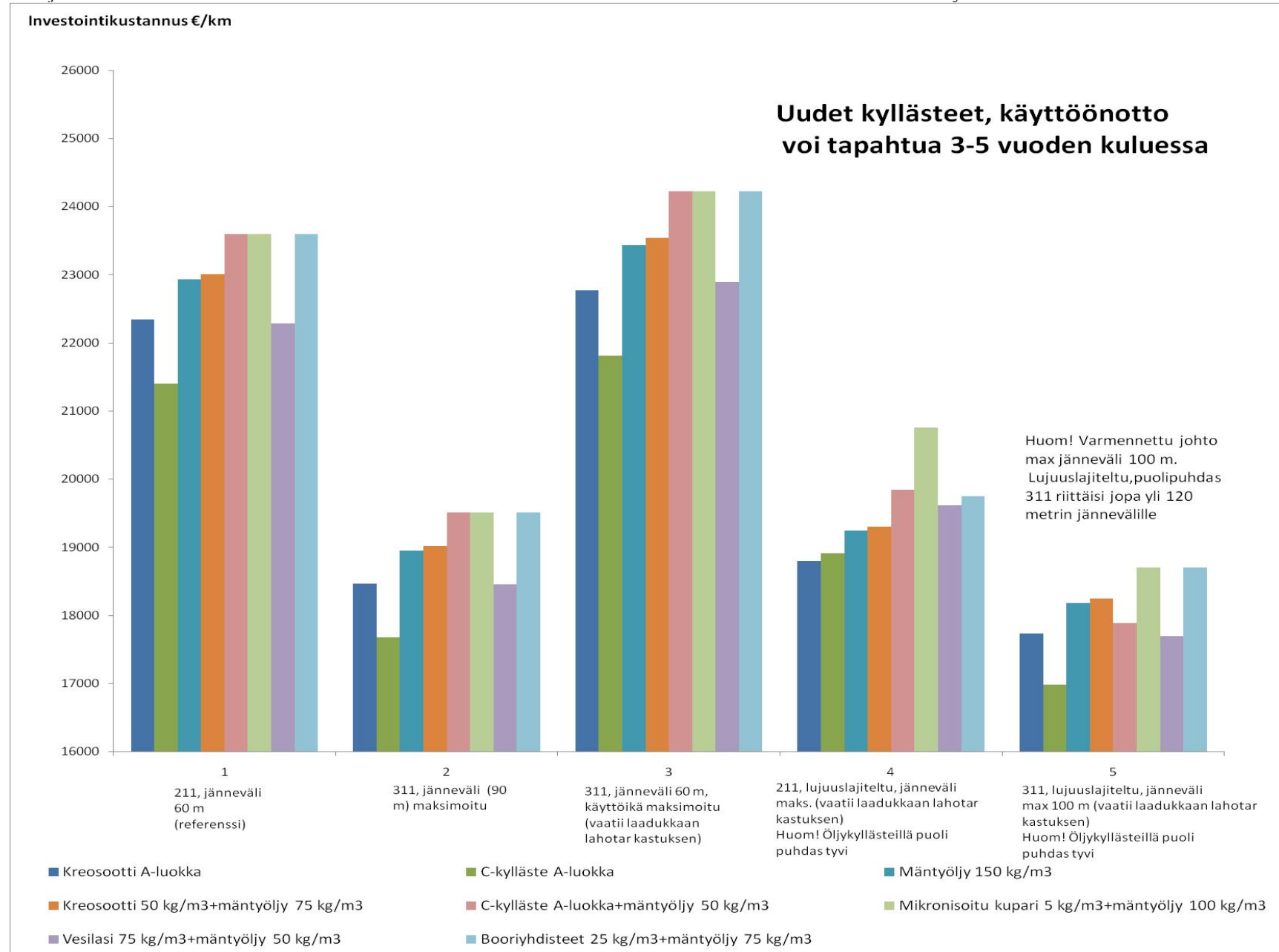
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	Mäntyöljy 150 kg/m ³ , 211	Mäntyöljy 150 kg/m ³ , 311	Mäntyöljy 150 kg/m ³ , 311	Mäntyöljy 150 kg/m ³ , 211, tyvi puolipuhdas, harjalatva, lujuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	Mäntyöljy 150 kg/m ³ , 311, tyvi puolipuhdas, harjalatva, lujuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	156	181	181	166	191	€
Jänneväli	60	90	60	85	100	m
Investointikustannus	22933	18948	23440	19243	18180	€/km
käyttöikä	50	50	55	50	55	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1256	1038	1258	1054	976	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	168	140	191	134	134	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	57	46	56	48	43	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	0	0	0	0	€/vuosi/km
Varhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	15	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	268	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1570	1346	1566	1363	1277	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	264	221	287	216	210	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	kreosootti 50 kg+ mäntyöljy 75 kg, 211	kreosootti 50 kg + mäntyöljy 75 kg, 311	kreosootti 50 kg+mäntyöljy 75 kg, 311	Kreosootti 50 kg+mäntyöljy 75 kg, 211, tyvi puolipuhdas, harjalatva, lujuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	Kreosootti 50 kg+mäntyöljy 75 kg, 311, tyvi puolipuhdas, harjalatva, lujuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	160	186	186	170	196	€
Jänneväli	60	90	60	85	100	m
Investointikustannus	23011	19019	23538	19302	18245	€/km
käyttöikä	50	50	55	50	55	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1260	1042	1263	1057	979	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	172	144	197	137	137	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	57	46	56	48	43	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	32	23	32	24	21	€/vuosi/km
Varhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	15	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	268	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1606	1373	1603	1390	1301	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	301	248	324	244	234	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	C-kylläste A-luokka+kreosootti tyvi 211	C-kyllästys A-luokka+kreosootti tyvi 311	C-kyllästys A-luokka +kreosootti tyvi 311	C-kyllästys A-luokka+tyvi kreosootti 211, lujuslajiteltu, ominaislujuus 47 N/mm ²	C-kyllästys A-luokka+kreosootti tyvi 311, lujuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	183	211	211	193	221	€
Jänneväli	60	90	60	77	100	m
Investointikustannus	22424	18524	22990	19731	17761	€/km
käyttöikä	50	50	55	50	50	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1228	1015	1234	1081	973	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	197	163	223	169	158	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	0	0	0	0	0	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	65	46	63	53	43	€/vuosi/km
Varhanlinjan kuntotarkastus	39	28	39	32	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1626	1383	1625	1459	1322	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	321	258	346	273	233	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	C-kylläste A-luokka+mäntyöljy 50 kg, 211	C-kyllästys A-luokka+mäntyöljy 50 kg, 311	C-kyllästys A-luokka +mäntyöljy 50 kg, 311	C-kyllästys A-luokka+mäntyöljy 50 kg, lujuslajiteltu, ominaislujuus 47 N/mm ²	C-kyllästys A-luokka+mäntyöljy 50 kg, 311, lujuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	190	221	221	200	231	€
Jänneväli	60	90	60	77	100	m
Investointikustannus	23601	19513	24227	19843	17891	€/km
käyttöikä	50	50	55	50	50	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1293	1069	1300	1087	980	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	204	171	234	175	165	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	57	46	56	0	20	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	65	46	63	53	43	€/vuosi/km
Varhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	16	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1671	1423	1671	1449	1330	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	366	298	392	263	261	€/vuosi/km

Taulukko 26. Yhteen veto tuloksista mikronisoitu kupari 5 kg/m³+mäntyöljy 100 kg/m³, vesilasi 75 kg/m³+mäntyöljy 100 kg/m³ ja booriyhdisteet 25 kg/m³+mäntyöljy 100 kg/m³.

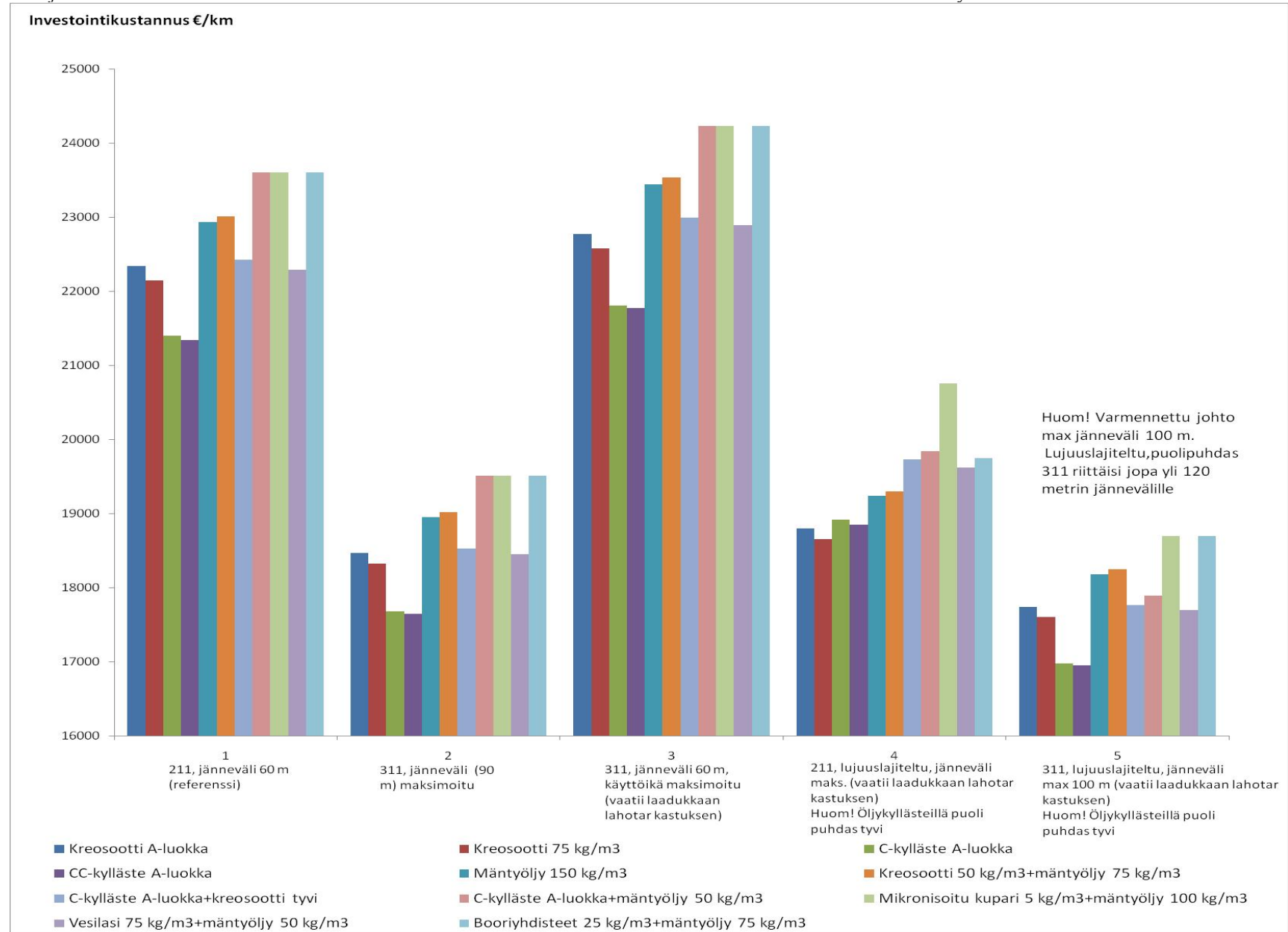
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	Mikronisoitu kupari 10 kg+mäntyöljy 100 kg, 211	Mikronisoitu kupari 10 kg+mäntyöljy 100 kg, 311	Mikronisoitu kupari 10 kg+mäntyöljy 100 kg, 311	Mikronisoitu kupari 10 kg+mäntyöljy 100 kg, lujuuslajiteltu, ominaislujuus 47 N/mm ²	Mikronisoitu kupari 10 kg+mäntyöljy 100 kg, 311, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	190	221	221	200	231	€
Jänneväli	60	90	60	77	100	m
Investointikustannus	23601	19513	24227	20756	18700	€/km
Käyttöikä	50	50	55	50	50	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1293	1069	1300	1137	1024	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	204	171	234	175	165	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	57	46	56	50	44	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	65	46	63	53	43	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	16	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1671	1423	1671	1499	1374	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	366	298	392	313	285	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	Vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg, 211	Vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg, 311	Vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg, 311	Vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg, 211, lujuuslajiteltu, ominaislujuus 47 N/mm ²	Vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg, 311, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	176	206	206	186	216	€
Jänneväli	60	90	60	77	100	m
Investointikustannus	22286	18453	22892	19619	17696	€/km
Käyttöikä	50	50	55	50	50	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1221	1011	1229	1075	969	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	189	160	218	163	154	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	0	0	0	0	0	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	0	0	0	0	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	16	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	268	274	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1534	1319	1537	1385	1276	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	229	194	258	199	187	€/vuosi/km
Ilmajohto	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	BLL 62	
	Booriyhdisteet 25 kg+mäntyöljy 100kg, 211	Booriyhdisteet 25 kg+mäntyöljy 100 kg, 311	Booriyhdisteet 25 kg+mäntyöljy 100kg, 311	Booriyhdisteet 25 kg+mäntyöljy 100 kg, 211, tyvi puolipuhdas, harjalatva, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	Booriyhdisteet 25 kg+mäntyöljy 100kg, 311, tyvi puolipuhdas, harjalatva, lujuuslajiteltu ominaislujuus 47 N/mm ²	
Pylvästyyppi						
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	190	221	221	200	231	€
Jänneväli	60	90	60	85	100	m
Investointikustannus	23601	19513	24227	19745	18700	€/km
Käyttöikä	50	50	50	50	50	vuotta
Korkokanta	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1293	1069	1327	1082	1024	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	204	171	239	161	165	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vt. CCA-pylväs	57	46	57	48	44	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	20	20	20	20	
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	65	46	65	49	43	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	20	14	20	15	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	274	274	274	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1671	1423	1705	1439	1374	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	366	298	400	292	285	€/vuosi/km



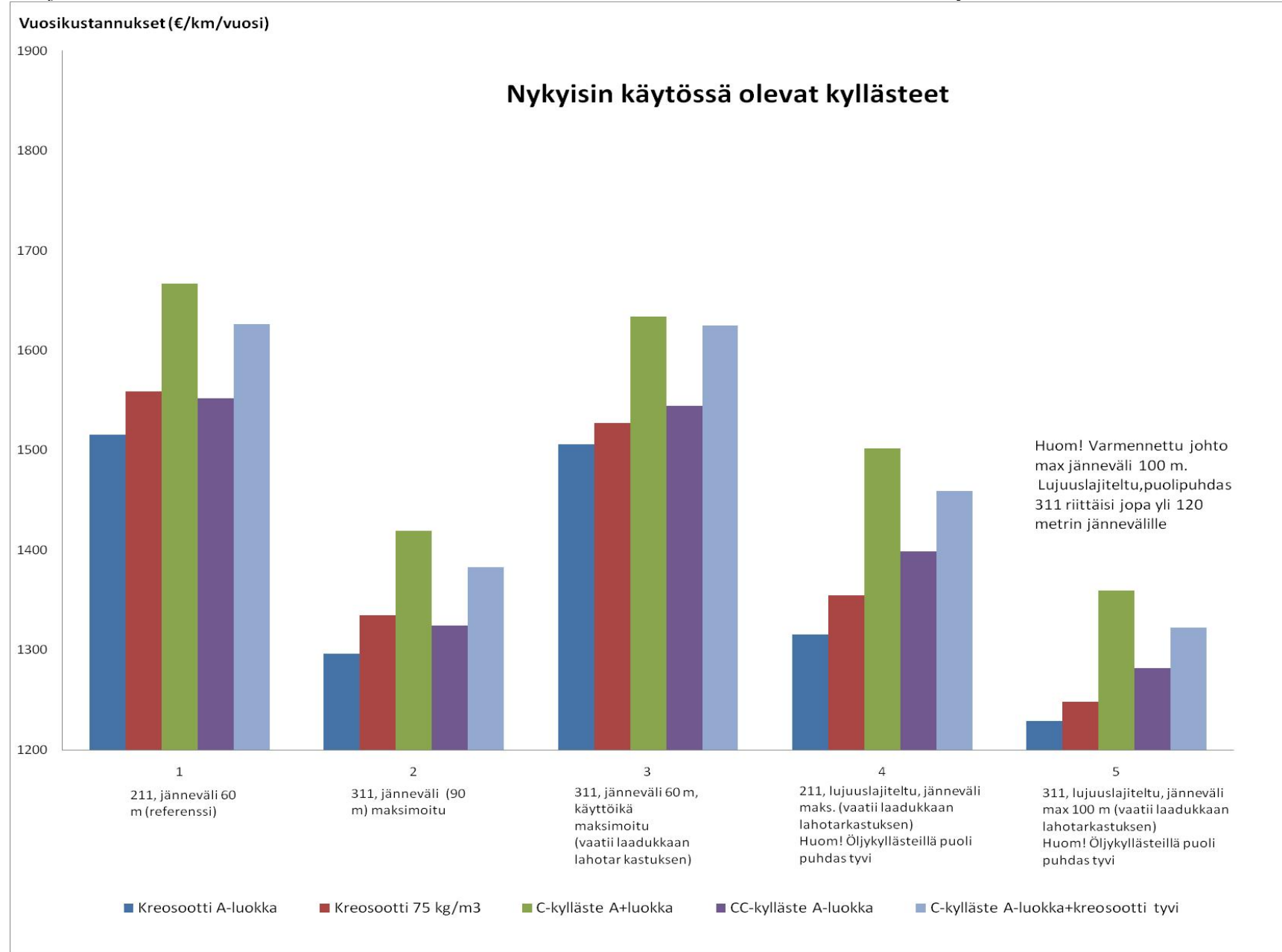
Kuva 43. Investointikustannukset (€/km) nykyisin käytössä olevilta kyllästeiltä eri vaihtoehdoilla BLL62 ilmajohdolla.



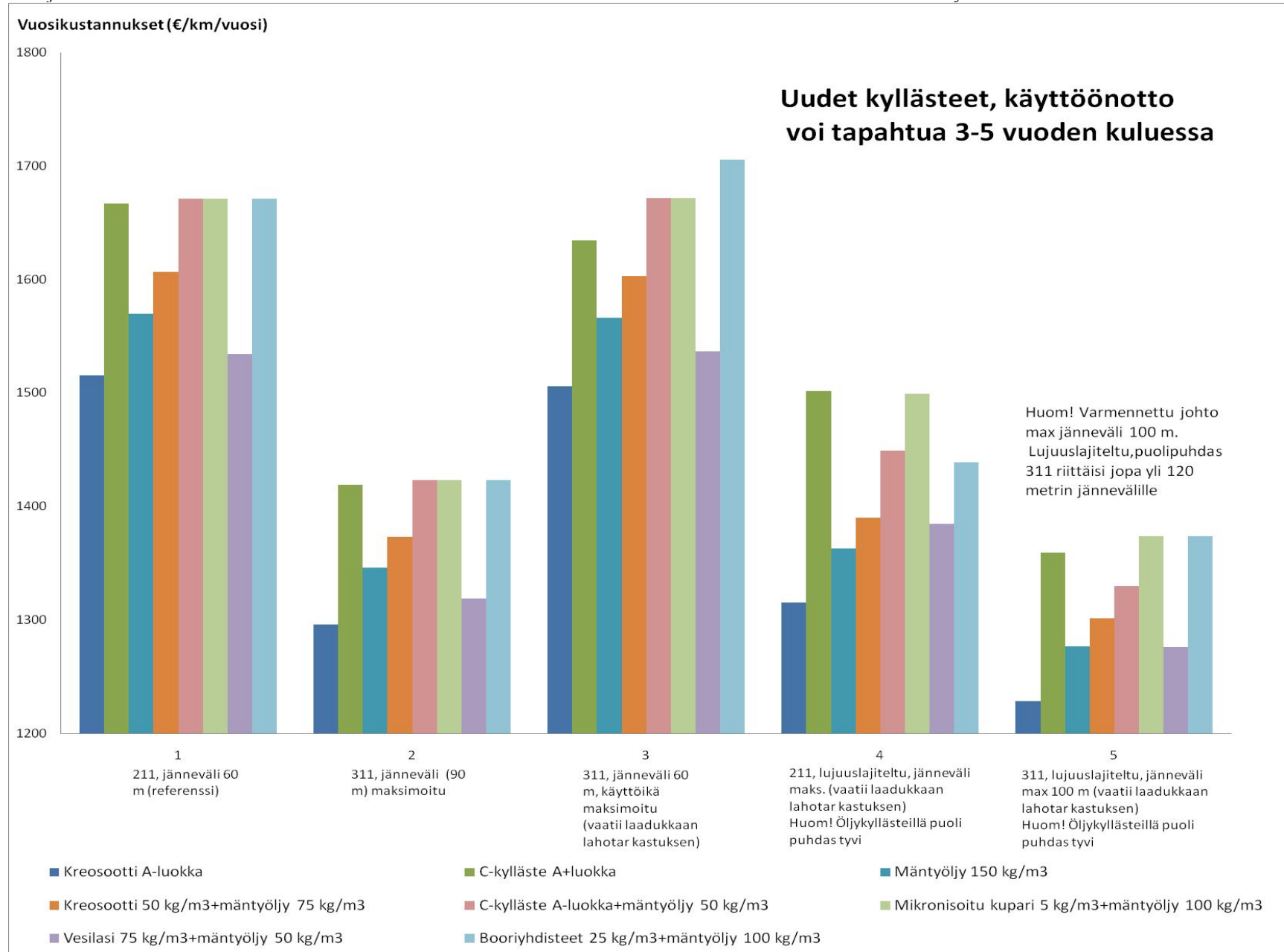
Kuva 44. Investointikustannukset (€/km) tulevaisuuden kyllästeillä eri vaihtoehdoilla BLL62 ilmajohtolla.



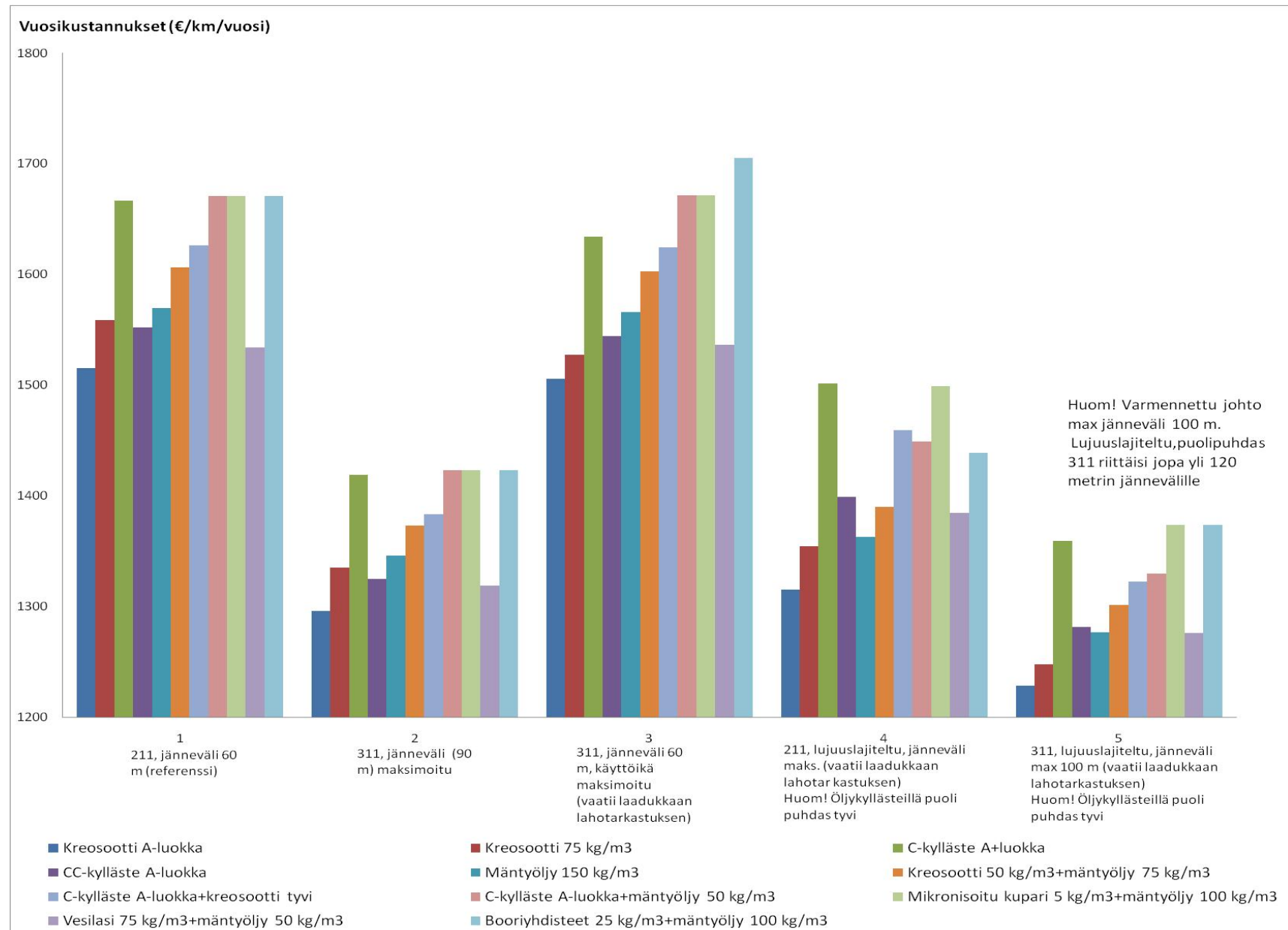
Kuva 45. Investointikustannukset (€/km) kyllästeillä eri vaihtoehdoilla BLL62 ilmajohdolla.



Kuva 46. Vuosikustannukset (€/km/vuosi) nykyisin käytössä olevilta kyllästeiltä eri vaihtoehdoilla BLL62 ilmajohtolla.



Kuva 47. Vuosikustannukset (€/km/vuosi) tulevaisuuden kyllästeillä eri vaihtoehdoilla BLL62 ilmajohdolla.



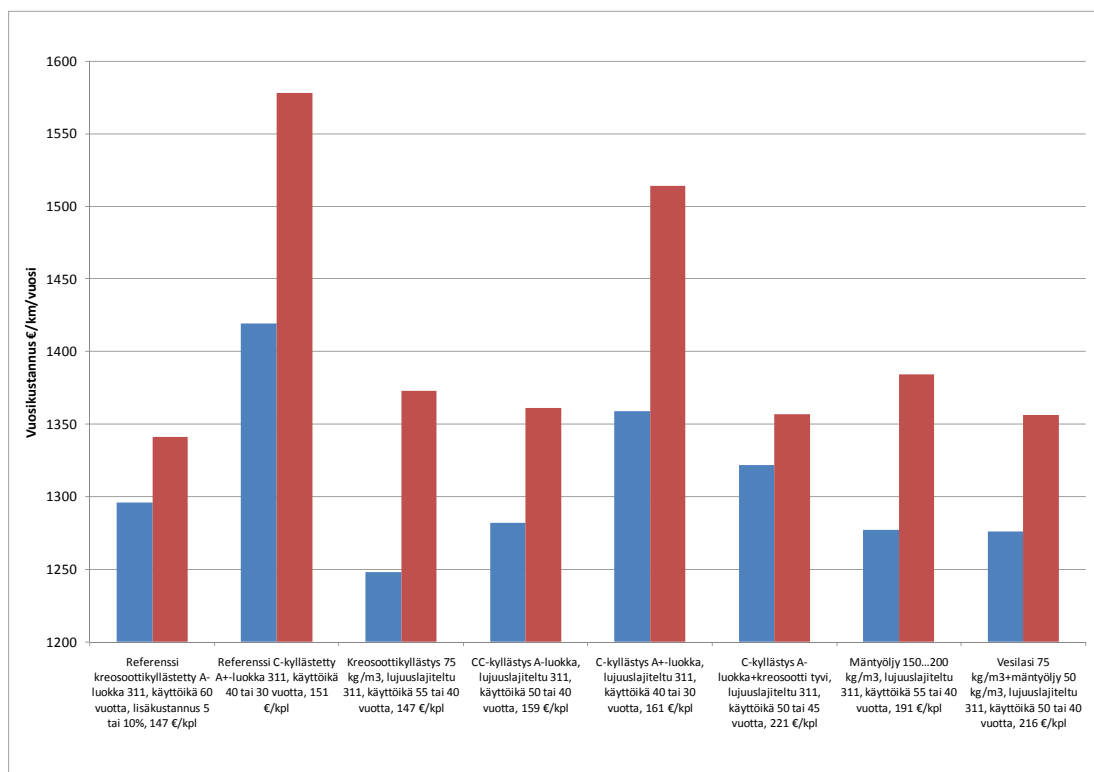
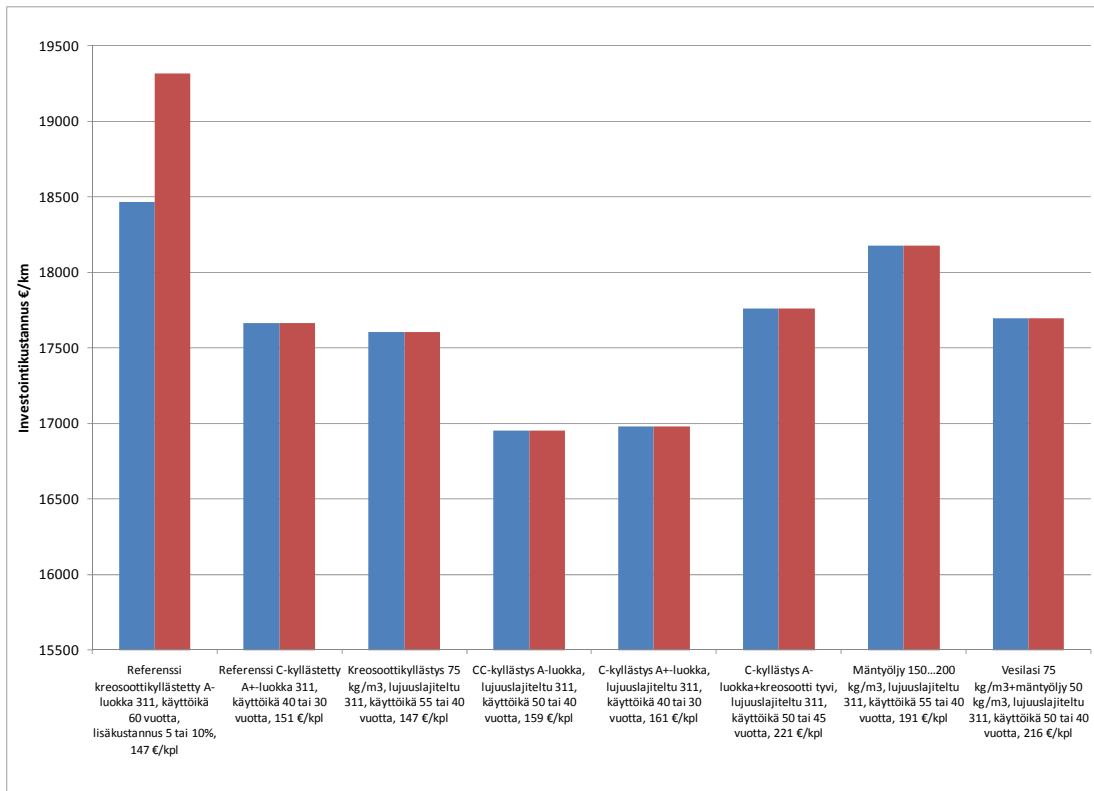
Kuva 48. Vuosikustannukset (€/km/vuosi) kyllästeillä eri vaihtoehtoilla BLL62 ilmajohtolla.

7. Riskianalyysi eri puupylväsratkaisuille

Riskianalyysissä analysointiin, miten investointi- ja vuosikustannus muuttuu, jos A-luokan kreosoottipylväillä rakentamislisä kasvaa 5%:sta 10%:iin. Lisäksi analysointiin, miten kustannukset muuttuvat kreosootti-, C-, CC-, mäntyöljy- ja vesilasi+mäntyöljypylväillä, jos käyttöikä pienenee oletetusta 10-15 vuotta. Lisäksi tarkasteltiin ns. kombipylvään (C-kyllästetty pylväs, jonka tyviosa on kyllästetty kreosootilla) käyttöiän vaikutusta vuosikustannuksiin. Tulokset on esitetty taulukossa 27 ja kuvassa 49. Tulosten perusteella C-kyllästetyn pylvään käyttö ei ole millään tavalla perusteltua käyttöiällä 30 vuotta. Lujuuslajitellut kreosoottipylväät pitoisuudella 75 kg/m³, A-luokan CC-pylväät, mäntyöljypylväät pitoisuudella 150 kg/m³ ja vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg pylväät ovat vielä käyttöiällä 40 vuotta varteenotettavia vaihtoehtoja C-kyllästetylle referenssipylväälle. C-kyllästetyn pylvään, jonka tyviosa on kyllästetty kreosootilla, käyttöiän tulisi olla yli 50 vuotta, jotta sen käyttö olisi kannattavaa verrattuna puhtaaseen C-kyllästettyyn pylvääseen.

Taulukko 27. Riskianalyysi eri kyllästevaihtoehtoille.

Tuote	Investointikustannus (€/km)	Vuosikustannus (€/km/vuosi)
Referenssi kreosoottikyllästetty A-luokka 311, käyttöikä 60 vuotta, lisäkustannus 5%	18468	1296
Kreosoottikyllästetty A-luokka 311, käyttöikä 60 vuotta, lisäkustannus 10%	19316	1341
Referenssi C-kyllästetty A+-luokka 311, käyttöikä 40 vuotta	17667	1419
Referenssi C-kyllästetty A+-luokka 311, käyttöikä 30 vuotta	17667	1578
Kreosoottikyllästetty 75 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 55 vuotta	17608	1248
Kreosoottikyllästetty 75 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 40 vuotta	17608	1373
CC-kyllästetty A-luokka, lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 50 vuotta	16955	1282
CC-kyllästetty A-luokka, lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 40 vuotta	16955	1361
C-kyllästys A+-luokka, lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 40 vuotta, 161 €/kpl	16981	1359
C-kyllästys A+-luokka, lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 30 vuotta, 161 €/kpl	16981	1514
C-kyllästys A-luokka+kreosootti tyvi, lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 50 vuotta, 221 €/kpl	17761	1322
C-kyllästys A-luokka+kreosootti tyvi, lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 45 vuotta, 221 €/kpl	17761	1357
Mäntyöljy 150...200 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 55 vuotta	18180	1277
Mäntyöljy 150...200 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 40 vuotta	18180	1384
Vesilasi 75 kg/m ³ +mäntyöljy 50 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 50 vuotta	17696	1276
Vesilasi 75 kg/m ³ +mäntyöljy 50 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, käyttöikä 40 vuotta	17696	1356



Kuva 41. Riskianalyysin tulokset.

8. Tulosten tarkastelu puupylväsratkaisut

Tulosten perusteella puupylvään varaan rakennetun ilmajohdon investointi- ja vuosikustannuksiin per kilometri vaikuttaa eniten

1. Jänneväli – kuinka lähellä maksimaalista jänneväliä kullakin puupylväsratkaisulla päästään?
2. Pylvästyksen kokonaishinta eli pylväs, pylvään pystytys, orsi, orren ja johtojen asennustyö yms – öljykyllästetyillä pylväillä asentajien suojautumiskulut ovat jopa 10% kokonaiskustannuksista
3. Käyttöikä – jos puupylvään käyttöikä on vähintään 40 vuotta, ratkaisevat muut tekijät paremmuusjärjestyksen, koska puupylväällä maksimikäyttöikä 65...70 vuotta (kreosoottikyllästetty). Ja uusilla kyllästeillä tuskin päästään yli 50 vuoden käyttöiän ilman pylväskoon merkittävää ylimitoitusta.
4. Kierrätyskustannukset
5. Puupylvään hinta

Tulosten perusteella C-kyllästetty A+-luokka on refenssipylväillä 211 ja 311 hieman kalliimpi vaihtoehto kuin kreosootti A-luokka (ero vuosikustannuksissa noin 9 %), vaikka C-kyllästetyn pylvään käyttöikä on 20 vuotta lyhyempi kuin kreosoottikyllästetyn pylvään. Tämä on seurausta rakentamis-, kunnossapito ja purkamisvaiheiden suojautumis- yms. kustannuksista kreosoottipylväillä, jotka ovat 5% rakentamiskustannuksista. Kreosootti kyllästetty puupylväs on selvästi C-kyllästettä edullisempi vuosikustannuksiltaan etenkin silloin, kun käytetään lujuuslajiteltua, harjalatvaista ja tyviosastaan puolipuhdasta pylvästä (puolipuhdalla pylväällä päästään noin 10 metriä pidempään jänneväliin). Kreosootin haittavaikutuksia voidaan vähentää huomattavasti pienentämällä kreosoottipitoisuutta nykyisestä A-luokan pitoisuudesta 110 kg/m³ pitoisuuteen 75 kg/m³. Käyttöikä lyhenee vain 10 vuodella ja kokonaiskustannukset pysyvät lähes ennallaan. C-kyllästetyn pylvään, jonka tyviosaa on kyllästetty kreosootilla, käyttöiän tulisi olla yli 50 vuotta, jotta sen käyttö olisi kannattavaa verrattuna puhtaaseen C-kyllästettyyn pylvääseen. Koska tyven kyllästäminen kreosootilla ei vähennä C-kyllästeen huuhtoutumista maanpinnan yläpuoliselta osalta, niin yli 50 vuoden käyttöikä odotukset eivät ole realistisia enenkään harustetuilla ja A-pylväillä.

Edullisimmat vaihtoehdot ovat kreosootti-pylväs alennetulla pitoisuudella 75 kg/m³ sekä CC-kyllästetty pylväs, jota käytetään Euroopassa CCA-pylvään korvaajana. Tulevaisuuden vaihtoehdoista paras potentiaali on mäntyöljyllä ja vesilasilla sekä näiden yhdistelmällä. Vesilasi ja mäntyöljy eivät

ole biosidejä. Vesilasi voidaan polymeroida puuhun vähäisellä öljymäärällä, jonka vuoksi pylvästyksessä työntekijöiden ei tarvitse suojautua kuten kreosootti ja puhtailla mäntyöljypylväillä. Myös kierrätyskustannukset ovat pienet verrattuna muihin ratkaisuihin. Mäntyöljy 150 kg/m³ on myös potentiaalinen vaihtoehto, etenkin jos pylvästyksessä välttyttäisiin työntekijöiden suojautumiskustannuksilta. Jos mäntyöljyllä kyllästetään tyviosa suurella öljymäärällä ja latvaosa pienemmällä öljymäärällä, niin tähän on mahdollista päästä. Itseasiassa kaikki öljyyn perustuvat vaihtoehdot olisivat kilpailukykyisiä, jos pylvästyksen yhteydessä suojautumiskustannukset olisivat lähes samat kuin öljyttömällä kyllästeillä. Mäntyöljy- ja vesilasikyllästetyillä pylväillä kierrätyskustannukset ovat myös pienemmät kuin biosidiin perustuvilla ratkaisulla.

Kaikilla vaihtoehdoilla edullisin ratkaisu on maksimoida jänneväli joko suurentamalla pylväskokoa ja/tai käyttämällä lujuuslajiteltua pylvästä. Öljykyllästeillä voidaan lisäksi jättää tyviosa puolipuhkaaksi, joka lisää lahoamisvaraa (käyttöikä) ja lujuutta verrattuna vastaavaan kokonaisuudessaan sorvattuun pylvääseen. Tämän vuoksi öljykyllästeiden suhteellinen kilpailukyky on parempi tässä tapauksessa.

Käyttöiän maksimointi yhdistelemällä eri kyllästeitä on lähes aina kannattamatonta, koska kyllästyskustannusten nousu kumoaa käyttöiän pidentymisestä saatavan kustannushyödyn, kuten käy esimerkiksi ns. combipylväällä (C-kyllästetty pylväs, jonka tyvi on kreosoottikyllästetty). Käyttöiällä on suuri merkitys, etenkin jos investointikustannukset ovat lähes samat (kts C-kylläste vrt. CC-kylläste).

Lisäksi biosidisiä kyllästeitä ei voi seostaa tai biosidiä ei voi lisäaineistaa ilman biosidirektiivin mukaista hyväksyntää. Myös kierrätyskustannukset kasvavat yleensä pylväillä, joissa kyllästeitä on yhdistetty. Biosidisiä kyllästeitä on sallittua yhdistää kyllästämällä pylväs kullakin aineella erikseen, joka nostaa kyllästyskustannuksia.

Riskianalyysin tulosten perusteella C-kyllästetyn pylvään käyttö ei ole millään tavalla perusteltua käyttöiällä 30 vuotta. Lujuuslajitellut kreosoottipylväät pitoisuudella 75 kg/m³, A-luokan CC-pylväät, mäntyöljypylväät pitoisuudella 150 kg/m³ ja vesilasi 75 kg+mäntyöljy 50 kg pylväät ovat vielä käyttöiällä 40 vuotta varteenotettavia vaihtoehtoja C-kyllästetyille referenssipylväälle. Lujuuslajittelu parantaa huomattavasti myös C-kyllästetyn pylvään kilpailukykyä.

Tulevaisuuden puupylväs on siis

- lujuuslajiteltu (ominaislujuus 10...20% suurempi kuin nykyisin). Lujuuslajitellusta pylvästä voidaan maksaa lisähintaa, koska sillä voidaan korvata luokkaa suurempi pylväs
- pylvään tunnistetiedot ovat tarkemmat kuin nykyisin laadukkaamman lahotarkastuksen takaamiseksi ja eri kyllästevalmisteiden erojen tunnistamiseksi jatkossa
- Pylvään on käsittelyssä on käytetty mäntyöljyä tai vesilasia. Mäntyöljykäsittely voi olla yhdistetty vesilasiin, joka on kannattavaa huomattavasti nykyistä pienempien kierrätys- ja hävityskustannusten vuoksi. Myös kuparin ja/tai boorikyllästeiden yhdistäminen mäntyöljyyn on kannattava ratkaisu.
- Puhtaita öljyä käytettäessä puupylvään tyviosa, noin 3 metriä, on jätetty sorvaamatta, jolloin lahoamisvara on 10...20% suurempi kuin vastaavalla kokonaan sorvatulla pylväällä

Nämä muutokset nostavat investointikustannuksia 2...4 % per ilmajohtokilometri verrattuna C-kyllästettyyn pylvääseen, mutta vuosikustannukset voivat olla jopa 10%:a pienemmät.

Taulukossa 28 on esitetty suositeltavat puupylväsratkaisut paremmuusjärjestyksessä BLL62 ilmajohtorakenteelle. Järjestyksessä huomioitu se tosiasia, että käytännössä maksimijänneväliin ei aina päästä. Tällöin mahdollinen ylimitoitus on käytettävissä käyttöiän lisäyksenä, joka uusilla kyllästeillä on todennäköisesti marginaalinen.

Taulukko 28. Suositeltavat puupylväsratkaisut paremmuusjärjestyksessä BLL62 ilmajohtorakenteelle. Järjestyksessä huomioitu se tosiasia, että käytännössä maksimijänneväliin ei aina päästä. Tällöin mahdollinen ylimitoitus on käytettävissä käyttöiän lisäyksenä, joka vaatii laadukkaan lahotarkastuksen.

Materiaali	Ominais- lujuus (N/mm ²)	Pylväitä per km / jänneväli (m)	Hinta tienvarres- sa (€/kpl)	Perusta- mistapa	Soveltuvatko nykyiset orret, eristimet, harukset jne.	Käsiteltävyys vrt CCA-kyllästetty puupylväs (Suojautumiskusta nnukset, paino/työstetty ys ja kestävyys mekaanisia vauriota vastaan)	Nousuta- pa pylväase en	Tarkastus, huolto ja ylläpitokust annukset €/vuosi/km	Arvioitu käyttöikä	Pylvään hävittämi nen €/kpl	Ympäristö ja terveysvaik utukset	Investoi ntikus- tannus (€/km)	Vuosikustan nus (€/km/vuosi)
Referenssit kyllästeet ja pylväs													
1. Kreosoottikyllästys A-luokka,311	41,8	14/90	147	Upotus 2,0 m	Kyllä	5% rakentamislisä suojautumiskulusta	Pylväske ngät	34	60	30	Arvioitavana	18468	1296
2. C-kyllästys A+-luokka 311, lujuuslajiteltu	47,0	13/100	161	Upotus 2,0 m	Kyllä, korroosio huomioitava	Sama kuin CCA pylväällä	Pylväske ngät	33	40	60	Arvioitavana	16981	1359
3. C-kyllästys A+-luokka 311	41,8	14/90	151	Upotus 2,0 m	Kyllä, korroosio huomioitava	Sama kuin CCA pylväällä	Pylväske ngät	48	40	60	Arvioitavana	17677	1419
Nykyisin käytössä oleva kyllästeet ja ratkaisut													
1. Lujuuslajiteltu CC-kylläste A-luokka 311	47,0	13/100	149	Upotus 2,0 m	Kyllä	Sama kuin CCA pylväällä	Pylväske ngät	36	50	60	Arvioitavana	16955	1282
2. Kreosootti 75 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, tyvi puolipuhdas, harjalatva	47,0	13/100	147	Upotus 2,0 m	Kyllä	5% rakentamislisä suojautumiskulusta?	Pylväske ngät	33	55 Huom! Ylimääräinen varmuus huomioitu käyttöiässä	30	Vrt. A-luokan kreosootti pitoisuuteen riskit ovat selvästi pienemmät	17608	1248
Tulevaisuuden kyllästeet ja ratkaisut													
1. Vesilasi 75 kg/m ³ +mäntyöljy 50...100 kg/m ³ , 311, lujuuslajiteltu	47,0	13/100	216	Upotus 2,0 m	Kyllä	Sama kuin CCA pylväällä	Pylväske ngät	33	50	0	ei tunnettuja	17696	1276
2. Mäntyöljy 150 kg/m ³ , lujuuslajiteltu 311, tyvi puolipuhdas, harjalatva	47,0	13/100	191	Upotus 2,0 m	Kyllä	5% rakentamislisä suojautumiskulusta?	Pylväske ngät	33	55 Huom! Ylimääräinen varmuus huomioitu käyttöiässä	0	ei tunnettuja	18180	1277

9. Teräs-, betoni- ja komposiittipylväät sekä yhdistelmä rakenteet

9.1 Muiden materiaalien mahdolliset kilpailuedut puupylvääseen verrattuna

Puupylväiden varaan rakennetun ilmajohtoon suurin kustannuserä olivat pylvästys (pylväs, pylvään pystytys, orsi, orren asennus ja ilmajohtojen asennus pystytettyyn pylvääseen). Pylväsmateriaalin osuus kokonaiskustannuksista on puupylväillä vain 10...15%. Pylvästyksen osuus rakentamiskustannuksista on lähes puolet, joten jännevälillä on suuri merkitys kokonaiskustannuksiin per ilmajohtokilometri. Puupylväällä jänneväliä ei voida kuitenkaan pidentää kuin 20-30 metriä, koska suurempien puupylväiden saatavuus on heikompi ja hinta selvästi korkeampi kuin pienempien pylväiden. Puupylvään koon kasvaessa nousevat myös kyllästys- ja logistiikkakustannukset. Tämä antaa etua erityisesti teräs-, betoni- ja komposiittipylväille, koska niillä voidaan jänneväliä kasvattaa pelkästään pylvään seinämän vahvuutta ja pituutta kasvattamalla. Pylvään koko ei siis muutu, ainoastaan paino ja mahdollisesti pituus kasvaa (johdot riippuvat pidemmällä jännevälillä enemmän).

Toinen merkittävä vuosittaisiin kokonaiskustannuksiin vaikuttava tekijä on käyttöikä. Kymmenen vuoden muutos käyttöiässä muuttaa kokonaiskustannuksia 5...10% puupylvään varaan rakennetulla ilmajohtolla. Tämän vuoksi teräs-, betoni ja komposiittipylväiden sekä yhdistelmäpylväiden osalta kannattaa hakea ratkaisuja, joiden tarjoama käyttöikä on selvästi puupylvään varaan rakennettua ilmajohtoa pidempi.

Koska pylvästys on suurin kustannustekijä, kannattaa kaikilla pylväsmateriaaleilla keskittyä siihen, kuinka pylvästyksen hintaa voidaan laskea muutenkin kuin jänneväliä pidentämällä. Tarvitaanko teräspylväillä erikseen asennettavaa orsirakennetta, betonijalustaa, tarvitaanko nostolaitetta asennustöissä vai voidaanko pylvääseen kiivetä muuten jne. Myös kierrätysasiat ovat tärkeitä – kuinka vanhoista käytetyistä pylväistä saadaan kertymään tuloja eikä kustannuksia? Lisäksi tulee huomioida lisäeristimet/maadoitus erityisesti teräspylväillä sekä huolto/kunnossapitoasiat verkon käyttöiän aikana.

Tässä tutkimuksessa ei keskitytä erilaisten johdinten kustannusvaikutusten arviointiin, vaikka suurentamalla ilmajohtoon poikkileikkauspinta-alaa voisi olla mahdollista saada kustannussäästöjä pidempien jänneväliden ja pienempien energiahäviöiden vuoksi.

9.2 Teräspylvää

Kuvassa 42 on esitetty SWOT-analyysi teräspylvästä, joka on laadittu yhteistyössä Valmont LTD:n kanssa. Lisäksi lähteenä on käytetty Power pole research-tutkimusta (2002) ja USA:n teräspylvästeollisuuden materiaaleja, jotka löytyvät osoitteesta

<http://www.steel.org/Content/NavigationMenu/Construction/ElectricUtilityDistributionPoles>

Teräspylvää valmistetaan yleensä teräslaaduista S355, S420, S450, S460 tai S500. Teräslaadun valintaan vaikuttavat yleensä sallittu taipumataso (%) sekä kuormitukset. Korroosiosuojaa antavan sinkkikerroksen paksuus on vähintään 60 mikronia. Jos sinkkipinnoitteen paksuus on määräävä tekijä ja halutaan SFS-EN ISO 1461 luokan B mukaisia pinnoitteita, suositellaan valittavaksi keskipiiteräs ($Si = 0,15 - 0,25 \%$). Keskipiiterästen sinkkipinnoite on paksumpi, mutta pinnoitteen kiinnipysyvyys on heikompi kuin alapiiteräksillä ja pinnoitteessa saattaa esiintyä värjeroja ja tummempia alueita. Käyttämällä ns. rajoitetun piipitoisuuden teräksiä ($Si = 0,15 - 0,20 \%$), voidaan varmemmin saavuttaa parempi ulkonäkö ja pinnoitteen kiinnipysyvyys. Pylvään muoto on joko pyöreä tai monikulmainen. Teräspylvästä voidaan helposti vahvistaa esim. lisäämällä seinämän paksuutta. Teräspylvää voidaan valmistaa myös useammasta osasta, mutta yleensä ne ovat ”yhtä putkea”. Isommat yli 12 metriset pylvää on usein logistisista syistä järkevintä toteuttaa kahdesta erillisestä osasta. Teräspylvään suurin ongelma on korroosio, joka tosin on suoraan riippuvainen sinkityksen tasosta ja laadusta. Teräspylvääseen kiipeäminen tapahtuu erityisellä tikasjärjestelmällä ellei pylvästä ole rei’itetty erityisiä kiipeämiskenkiä varten. Teräspylväs on myös liukas jäätyessään. Kuvassa 43 on Valmont Ltd:n teräspylvää.

Vahvuudet - Maksimaalinen jänneväli - Pitkä käyttöikä, yli 60 vuotta - Hinta-arvio 300...400 €/kpl referenssipylväälle - Toimiva ja edullinen kierrätysjärjestelmä eli kierrätyskustannuksia ei synny - kevyt, paino 70...300 kg/kpl →edullinen logistiikka, voidaan käyttää nykyisiä koneita, mutta ei kouraimia - Voidaan upottaa maahan ja pystyttää kuten puupylväs - Voidaan uusiokäyttää pylväänä tai maatukena, jos pylväslinja puretaan syystä tai toisesta alle 40 vuoden kuluttua asennuksesta - Ei sisällä terveydelle vaarallisia aineita - Hyvä vaurioidensietokyky	Heikkoudet - Maadoitus/lisäeristysvaatimus - Iskun- ja konekäsittelyn kestävyys (korroosiosuoja) - Miten toimitaan, jos pylvääseen täytyy tehdä muutoksia työmaalla? - liukas jäätyessään - suuri hiilijalanjälki
Mahdollisuudet - Suurilla johdoilla on mahdollisuus päästä pitkiin jänneväleihin - Nostokorin käytön yleistyminen - Pylväs voidaan rei'ittää erityisiä kiipeämiskenkä varten. - Teräspylväs on itsemaadoittava. Voidaanko erillinen maadoitus jättää tekemättä?	Uhat - Teräksen hintakehitys

Kuva 42. SWOT-analyysi teräspylvästä.



Kuva 43. Valmont Ltd:n teräspylväitä.

Taulukoissa 29, 30, 31 ja 32 on esitetty teräspylvään varaan rakennetun BLL 62- ilmajohtorakenteen kustannuslaskennan tulokset 100 metrin jännevälillä. Valmont Ltd on laskenut vaaditun pylväskoon yms tekniset tiedot uusia CENELEC-ohjeita mahdollisuuksien mukaan noudattaen. Koska teräspylväillä rakentamisesta on hyvin vähän kokemuksia ja teräksen hinta on tällä hetkellä normaalitasoa alempana, niin laskennassa käytettiin eri lähtöarvoja seuraavasti:

- Taulukko 1, pylvään hinta 300 €/kpl ja rakentamislisä vrt. C-kyllästetty puupylväs 5%
- Taulukko 2, pylvään hinta 300 €/kpl ja rakentamislisä vrt. C-kyllästetty puupylväs 10%
- Taulukko 3, pylvään hinta 400 €/kpl ja rakentamislisä vrt. C-kyllästetty puupylväs 5%
- Taulukko 4, pylvään hinta 400 €/kpl ja rakentamislisä vrt. C-kyllästetty puupylväs 10%

Suomessa ei ole laadittu ohjeita siitä, miten 20 kV:n teräspylväät tulisi maadoittaa, joten maadoituksen aiheuttamia kustannuksia ei voida tarkasti arvioida. Maadoituskustannuksen oletetaan sisältyvän laskennassa käytettyyn 5...10 % rakentamislisään vrt. CCA-kyllästetty puupylväs. Tulosten perusteella edullisimmilla vaihtoehdolla teräspylväs on investointikustannuksiltaan 10...15% kalliimpi ja vuosikustannuksiltaan noin 0...7% kalliimpi kuin puupylväs.

Taulukko 29. BLL 62 ilmajohtoon kustannuslaskelma 100 metrin jännevälillä, kun teräspylvään hinta on 300 €/kpl ja rakentamislisä vrt puupylväs 5%.

Teräspylväs		
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylväs		
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitysten kohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Teräspylvään hinta	300	€/kpl
Käyttöikä	60	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	6,4	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 110 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierätysmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	809	€/km Maadoitus, hitaampi pystytys -->hintalisa 5%
Hinta per kilometri uusi ilmajohto	19675	€/km
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylvästyyppi		
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	306,4	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	19675	€/km
Käyttöikä	60	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1039	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	210	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	43	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohtoon purkamisen per ilmajohtokilometri	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1337	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	286	€/vuosi/km

Taulukko 30. BLL 62 ilmajohtoon kustannuslaskelma 100 metrin jännevälillä, kun teräspylvään hinta on 300 €/kpl ja rakentamislisä vrt puupylväs 10%.

Teräspylväs		
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylväs		
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitysten kohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Teräspylvään hinta	300	€/kpl
Käyttöikä	60	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	6,4	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 110 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	1618	€/km Maadoitus, hitaampi pystytys -->hintalisa 10%
Hinta per kilometri uusi ilmajohto	20484	€/km
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylvästyyppi		
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	306,4	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	20484	€/km
Käyttöikä	60	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1082	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	210	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	85	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohtoon purkamisen per ilmajohtokilometri	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1379	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	329	€/vuosi/km

Taulukko 31. BLL 62 ilmajohtoon kustannuslaskelma 100 metrin jännevälillä, kun teräspylvään hinta on 400 €/kpl ja rakentamislisä vrt puupylväs 5%.

Teräspylväs		
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylväs		
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitysten kohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Teräspylvään hinta	400	€/kpl
Käyttöikä	60	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	6,4	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 110 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	809	€/km Maadoitus, hitaampi pystytys --> hintalisä 5%
Hinta per kilometri uusi ilmajohto	20975	€/km
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylvästyyppi		
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	406,4	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	20975	€/km
Käyttöikä	60	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1108	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	279	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	43	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohtoon purkaminen per ilmajohtokilometri	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1405	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	355	€/vuosi/km

Taulukko 32. BLL 62 ilmajohdon kustannuslaskelma 100 metrin jännevälillä, kun teräspylvään hinta on 400 €/kpl ja rakentamislisä vrt puupylväs 10%.

Teräspylväs		
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylväs		
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitystenkohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Teräspylvään hinta	400	€/kpl
Käyttöikä	60	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	6,4	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 110 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	1618	€/km Maadoitus, hitaampi pystytys -->hintalisa 10%
Hinta per kilometri uusi ilmajohto	21784	€/km
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
	Monikulmainen teräspylväs, materiaali S-500, sinkkikerroksen paksuus 60 mk, pituus 11-m ja paino 200 kg	
Pylvästyyppi		
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	406,4	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	21784	€/km
Käyttöikä	60	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1151	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	279	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	85	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1448	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	398	€/vuosi/km

9.3 Betonipylväät

Kuvassa 44 on esitetty SWOT-analyysi betonipylvästä, joka on laadittu yhteistyössä Lujabetoni Oy:n kanssa. Lisäksi lähteenä on käytetty KyAMK:n betonilaboratorion asiantuntijoita sekä betonipylväitä valmistavien Europolen ja Roclan julkaisuja, jotka löytyvät osoitteista

http://utility-poles.com/download/C6ee25466X10e9af95df2XY1346/Broschuere_Energie_engl_RZ.pdf
http://www.rocla.com.au/Drawings/PowerPoles_Brochure_-_technical_info.pdf

Vahvuudet - Hinta-arvio 11-metriselle referenssipylväälle 450...600 €/kpl - Maksimaalinen jänneväli - Pitkä käyttöikä, yli 50 vuotta - Pylväsmateriaalin tarkastus vasta käyttöiän lopulla - Kulmapylväiden harustaminen vähentää pylvästarvetta ja laskee kustannuksia betonipylväällä (A-pylväitä ei voida käytännössä tehdä betonista)	Heikkoudet - Raskas (paino 700...1200 kg/kpl) ja iso (keskilpm yli 250 mm vrt puupylväs alle 200 mm) →kallis logistiikka, järeämmät koneet, kallio- ja kulmapylväissä sekä pehmeillä/routivilla mailla järeämmät tyvituet/harustukset - Raskaat pylväät kallistuvat pehmeillä mailla suuren oman paino vuoksi enemmän, koska johtimien harustava vaikutus ei välttämättä enää riitä - Vaatii suuremman upotussyvyyden (min 2,5 metriä) ja/tai erillisen perustuksen, jotta kallistuneiden pylväiden määrä voidaan minimoida - Betonin rapautuminen etenkin tiesuolan vaikutuksesta - Teräsbetonin kierrätys kallista. Betoni pulveroidaan ja teräs metallikeräykseen - Ei mahdollista nousta perinteisillä pylväskengillä vikatilanteessa - iskun- ja konekäsittelyn kestävyys? - Miten toimitaan, jos pylväaseen täytyy tehdä muutoksia työmaalla?
Mahdollisuudet - Suurilla johdoilla on mahdollisuus päästä pitkiin jänneväleihin, jolloin betonipylvään käyttö voi olla kannattavaa - Nostokorin käytön yleistyminen - Pylväs voidaan rei'ittää erityisiä kiipeämiskenkiä varten. - Betonin pintakäsittely estää rapautumista ja pidentää käyttöikää	Uhat - Betonin valmistus kolmanneksi/neljänneksi suurin hiilidioksidilähde maailmassa

Kuva 44. SWOT-analyysi betonipylväistä.

Betonipylvään kappalehinta laskettiin Lujabetonin kanssa seuraavien lähtötietojen perusteella:

- pylväs olisi muodoltaan pyöreä ja halkaisijaltaan keskimäärin noin 300 mm
- terästä olisi pylväässä n. 15 kg/m
- betoni K50 (betonilaadun on täytettävä suolapakkasrasitetun rakenteen vaatimukset 50 vuoden käyttöiällä)
- tuotantomäärä 10 000 pylvästä/vuosi
- pylvään pituus 11,5 m ja paino noin 1000 kg

Pelkät materiaalikustannukset ovat näillä lähtötiedoilla n. 30 EUR/m. Koska pyöreän betonipylvään, jonka pinta on tiivis ja tasalaatuinen, sentrifugointi - valmistusmenetelmä on huomattavasti vaativampi kuin juntauspaalujen, niin myyntihinnaksi 11-metrille pylväälle muodostuu 450...600 €/kpl. Kuvassa 45 on esitetty Europolen valmistamia betonipylväitä, josta on nähtävissä pylväiden suhteellisen suuri koko ja erittäin tiivis pinta.



Kuva 45. Europolen valmistamia betonipylväitä (kuva Martti Mäkiranta).

Taulukossa 33 on esitetty betonipylvään varaan rakennetun BLL 62- ilmajohtorakenteen kustannuslaskennan tulokset 100 metrin jännevälillä. Tulosten perusteella betonipylväs on investointi- ja vuosikustannuksiltaan yli 20% kalliimpi kuin puupylväs.

Taulukko 33. Betonipylvään varaan rakennetun BLL 62- ilmajohtorakenteen kustannuslaskennan tulokset 100 metrin jännevälillä.

Betonipylväs		
Pylväs	Pyöreä betonipylväs k50, paino 1000 kg	
Uputussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitystenkohtien keskeytyksen etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-tyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Betonipylvään hinta	450	€/kpl
Käyttöikä	50	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteeseen	23,3	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 30 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vt CCA-pylväs	1018	€/km A-pylvään sijaan harustus kolmessa pylväessä --> 250€/kpl ja hitaampi pystytys --> hintalisä 10%
Hinta per kilometri uusi ilmajohto	22054	€/km
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
Pylvästyypin	Pyöreä betonipylväs k50, paino 1000 kg	
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	473,3	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	22054	€/km
käyttöikä	50	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1208	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	337	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätoimen osuus	56	€/vuosi/km
Investointikustannuksista vt. CCA-pylväs		
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	43	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	274	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1558	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	469	€/vuosi/km

9.4 Komposiittipylväät

Kuvassa 46 on esitetty SWOT-analyysi komposiittipylvästä, joka on laadittu yhteistyössä Miktech Oy:n ja Excel Oyj:n kanssa. Lisäksi lähteenä on käytetty brittiläisen Polymer Composites as Construction Materials-projektin tuloksia komposiittipylvästä, jotka löytyvät osoitteesta

<http://www.polymercomposites.co.uk/results.html>

Vahvuudet - Maksimaalinen jänneväli - Pitkä käyttöikä, jopa 80 vuotta - Pylväsmateriaalin tarkastus vasta käyttöiän loppuvaiheessa - kevyt, paino 70...200 kg/kpl →edullinen logistiikka - Ei lahoa, ruostu tai muuten heikkene lukuun ottamatta UV-säteilyn aiheuttamaa komposiitin ”vanhenemista” - Voidaan uusiokäyttää pylväänä tai maatukena, jos pylväslinja puretaan syystä tai toisesta alle 50 vuoden kuluttua asennuksesta - Kulmapylväiden harustaminen vähentää pylvästarvetta ja laskee kustannuksia komposiittipylväällä (A-pylväitä ei voida käytännössä tehdä komposiitista)	Heikkoudet - Hinta-arvio 700...900 €/kpl 11-metriselle pylväälle - Täytyy UV-suojata joko maalaamalla tai lisäämällä hartsiin UV-suojaa-ainetta. Ilman UV-suojasta haitallisia muutoksia voi syntyä rakenteeseen jo kolmessa vuodessa - Maalauksen/pylvään iskun- ja konekäsittelyn kestävyys, todennäköisesti ei voida käyttää nykyisiä metallikouria→KÄSIN PYSTYTYS - Kierrätys. Tällä hetkellä ainoa mahdollisuus käyttää täytemateriaalina maarakentamisessa – tulevaisuudessa energiakierrätys, josta tulee kuitenkin maksaa komposiitin huonon palavuuden vuoksi - Miten toimitaan, jos pylvääseen täytyy tehdä muutoksia työmaalla? - Liukas jäätyessään
Mahdollisuudet - Suurilla johdoilla on mahdollisuus päästä pitkiin jänneväleihin, jolloin komposiittipylvään käyttö voi olla kannattavaa. - Nostokorin käytön yleistymisen - Pylväs voidaan rei'ittää erityisiä kiipeämiskenkiä varten.	Uhat - Lasikuidun ja hartsinmuovien hintakehitys - UV-suojauksen toimivuus ja pysyvyys maalatuissa rakenteissa. Maalikerroksen elastisuus poikkeaa itse komposiitin elastisuudesta→voi aiheuttaa maalipinnan eroosiota pylvään taipuvissa osissa

Kuva 46. SWOT-analyysi komposiittipylvästä.

Komposiittipylväät valmistetaan yleensä automatisoidulla kelausmenetelmällä (kts kuva 47) tai pultruusiolla, jossa jokaiselle pylvämallille täytyy tehdä oma ”muotti”. Aihion valmistuksen jälkeen komposiittipylväs voidaan UV-suojata ruiskumaalaamalla. Komposiittipylvään kuormankantokyky

riippuu lasikuitukerrosten lukumäärästä (paksuudesta), käytetystä hartsi- ja kuitulaadusta ja rakenteesta. Tyypillisten kelaamalla valmistettujen komposiittiputkien taivutuslujuus on 200 N/mm² ylöspäin jopa 700 N/mm² asti. Komposiittituotteiden valmistukseen ja laadunvalvontaan on jo standardeja, mutta niitä ei ole tehty silmälläpitäen niin vaativia käyttöolosuhteita, joihin sähköpylväs käyttöänsä aikana joutuu. Pylvään muoto voi olla joko pyöreä tai monikulmainen. Komposiittipylvästä voidaan vahvistaa esim. lisäämällä seinämän paksuutta tai käyttää laadukkaampaa hartsia/kuitua kriittisistä kohdin, joita ovat erityisesti orsien kiinnityskohdat. Komposiittipylväät voidaan valmistaa myös useammasta osasta, mutta yleensä ne ovat ”yhtä putkea”. Komposiittipylvään suurimmat ongelmat ovat mekaanisen käsittelyn (metallikouraimet) kestävyys, UV-suojauksen tarve, orsien yms kiinnityskohtien vahvistamistarve sekä elastisuus, jonka vuoksi seinämän paksuutta joudutaan kasvattamaan huomattavasti. Toisaalta pylväät ovat suhteellisen kevyitä, jolloin 2-4 miestä pystyy niitä käsittelemään ja pystyttämään myös ilman suurempaa koneapua. Myös pylvääseen kiipeäminen on ongelmallista ellei pylvästä ole rei’itetty erityisiä kiipeämiskenkiä varten. Komposiittipylväs on myös liukas. Kuvassa 48 asennetaan komposiittipylväitä. Komposiittipylväitä on ollut Pohjois-Amerikan markkinoilla noin 10 vuotta, mutta sen käyttö ei ole toistaiseksi yleistynyt.



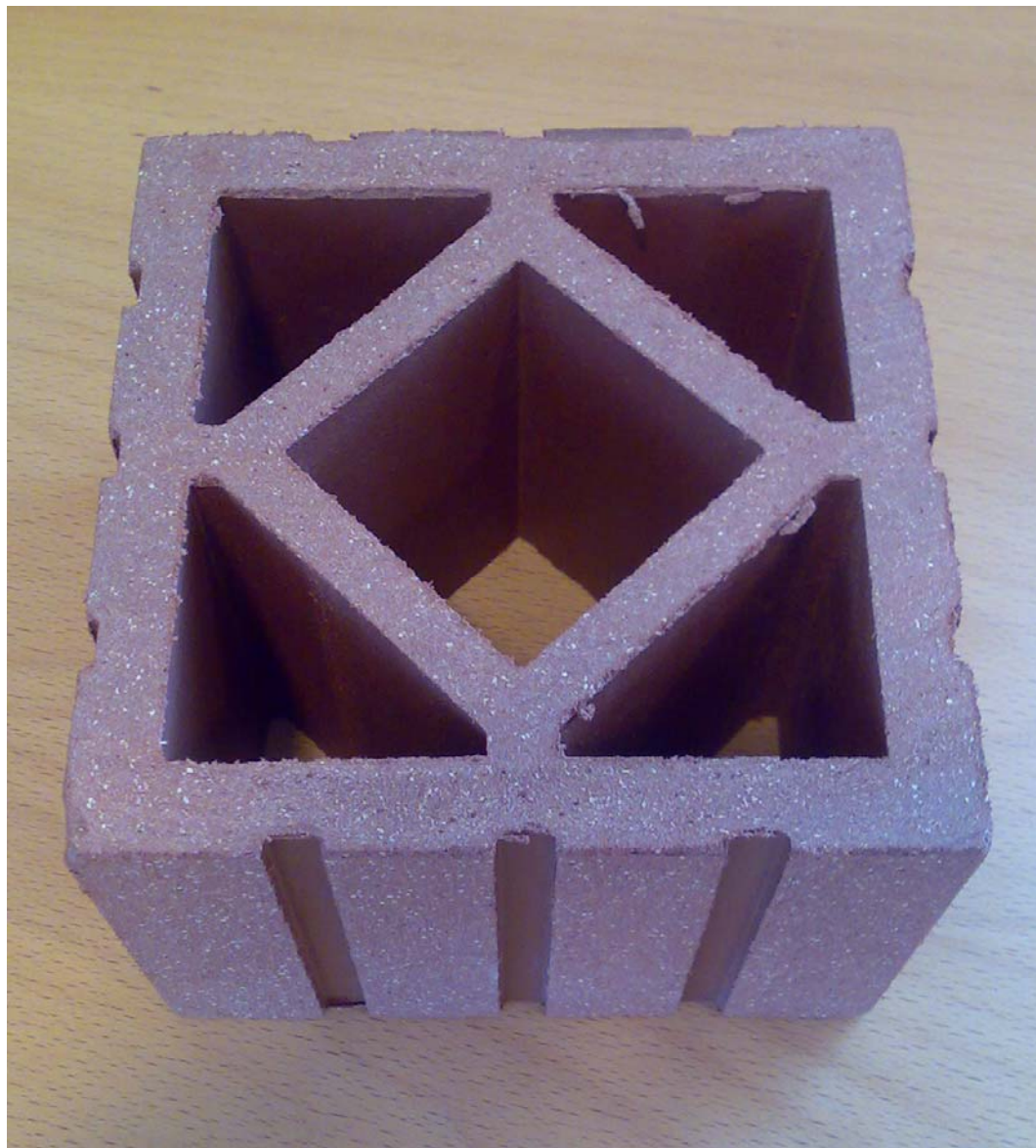
Kuva 47. Komposiittipylvään valmistus kelaustekniikalla (vasen) ja komposiittipylvään käsittelyä maastossa (oikea).



Kuva 48. Komposiittipylväiden asennusta Pohjois-Amerikassa.

Korkeat raaka-ainekustannukset tekevät komposiittipylväistä erittäin kalliita, vaikka niiden paino (80...200 kg) on vain noin puolet puupylvään painosta. Taulukossa 34 esitetyn kustannuslaskelman perusteella komposiittipylväs on investointikustannuksiltaan yli 30% kalliimpi ja vuosikustannuksiltaan yli 20% kalliimpi kuin puupylväs. Komposiittipylväiden raaka-aineet ovat kalliita: UV-suojattujen muovien ja hartsien kilohinta on kahdesta eurosta ylöspäin, kuten myös vahvikkeena käytetyn lasikuidun.

Puumuovikomposiiteissa vahvikkeena/täyteaineena on käytetty puujauhoa tai sellukuitua, joka on edullisempaa kuin lasikuitu (kts. kuva 49). Puumuovikomposiittin lujuus on kuitenkin vain 40...60 N/mm² eli normaalin puupylvään tasolla, jonka vuoksi puumuovikomposiittipylvään hinta on samalla tasolla kuin polyuretaani tai polyesteri-lasikuitupylvään hinta. Lisäksi puumuovikomposiiteissa on esiintynyt laho-ongelmia esim. terasseissa.



Kuva 49. Puumuovikomposiitista valmistettu valaisinpylvään profiili.

Taulukko 34. Polyuretaani-lasikuitupylvään varaan rakennetun BLL 62- ilmajohtorakenteen
kustannuslaskennan tulokset 100 metrin jänneväliä.

Komposiittipylväs		
Pylväs	Polyuretaani-lasikuitukomposiitti, paino 125 kg	
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitystenkohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Betonipylvään hinta	700	€/kpl
Käyttöikä	80	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	7	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 30 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	268	€/km A-pylvään sijaan harustus kolmessa pylväässä --> 250€/kpl ja hitaampi pystytys
Hinta per kilometri uusi ilmajohto	24342	€/km
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
Pylvästyyppi	Polyuretaani-lasikuitukomposiitti, paino 125 kg	
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	707	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	24342	€/km
käyttöikä	80	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	1242	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	469	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	14	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	40	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkamisen per ilmajohtokilometri	255	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1570	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	556	€/vuosi/km

9.5 Yhdistelmärakenteet

Yhdistelmärakenteiden perusmateriaaliksi valittiin puupylväs, koska se on materiaali- ja rakentamiskustannuksiltaan edullisin. Myös puupylvään käyttöikä maanpinnan yläpuolella on riittävän pitkä, 40...80 vuotta riippuen kyllästeestä. Puupylvään SWOT-analyysi yhdistelmärakenteiden kannalta on esitetty kuvassa 50.

Vahvuudet - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 120..210 €/kpl riippuen kyllästeestä - Edullinen logistiikka - Edullinen paino/lujuussuhde - Vikatilanteessa voidaan kiivetä pylväskengillä - Rakentamisen edullisuus, kestää kovaa käsittelyä rakentamisvaiheessa - Pylvästä voidaan helposti työstää, porata, katkaista vielä työmaalla - Maanpinnan yläpuolella öljykyllästeet tarjoavat jopa yli 60 vuoden käyttöiän, koska tikkareiat ja latvalaho-ongelmat ovat pienet	Heikkoudet - Suuri vaihtelu käyttöiässä (30-80 v), joka riippuu kyllästeestä, maaperästä ja kyllästyksen onnistumisesta → vaatii laadukkaan lahotarkastuksen - Kierrätyskustannukset biosidisillä aineilla - latvalaho- ja tikkaongelmia öljyttömillä kyllästeillä - Suuria pylväitä saatavilla vain rajallinen määrä → miten päästään maksimijänneväleihin isoilla johdoilla
Mahdollisuudet - Teräksinen juurituki toiminut hyvin käytännössä → mahdollisuus kehittää edelleen - Tyven vahvistamisen avulla puupylvästä voidaan jatkossa käyttää myös suurilla johdoilla nykyisellä tavalla - Tyvivahvistettua pylvästä ei tarvitse lahotarkastaa ennen kuin käyttöiän lopulla - Pylväiden lujuuslajittelu → pidempi jänneväli - Puolipuhdaintien pylväiden käyttö tarjoaa pidemmän käyttöiän - Edullinen perusmateriaali yhdistelmärakenteisiin (esim betonijalusta, teräksinen juurituki tai komposiittivahvike tyvessä)	Uhat - CCA jo kielletty – miten käy kreosootin? - Uudet kyllästysaineet ja –menetelmät kalliimpia kuin nykyiset - Isojen (4- ja 5-luokan) pylväiden saatavuus

Kuva 50. Puupylvään SWOT-analyysi yhdistelmärakenteiden kannalta.

Puupylvään heikkoutena ovat laho-ongelmat maanrajassa ja latvassa sekä tikan reiät latvaosassa pylvästä. Myös jännevälin maksimointi suurilla johdoilla uusien CENELEC-ohjeiden vaikutuksesta vaikeutuu. Lisäksi suurten pylväiden saatavuus on heikkenemässä. Puupylvään latvaosan heikkoudet voidaan välttää käyttämällä puolipuhdasta pylvästä, joka on kyllästetty kreosootilla tai mäntyöljyllä,

sillä tikkaongelmia ja latvalaho-ongelmia esiintyy vähemmän puolipuhalla öljykyllästetyillä pylväillä. Käyttämällä puupylvään tyvessä joko betonijalkaa, teräksistä juuritukea tai komposiittivahviketta voidaan ratkaista jännevälän maksimointiin ja maanrajan lahoamiseen liittyvät ongelmat. Mutta betonijalan ongelmana on sen suuri paino: Onnisen yli 20 cm tyviläpimitaltaan oleville valaisinpylväille tarjoama betonijalka painaa 450 kg/kpl, joka nostaa rakentamiskustannuksia huomattavasti (kts. kuva 51 vasemmalla). Komposiittinen tai lujitemuovisen juurivahvikkeen/-suojan ongelmana on heikko iskunkestävyys ja kolhunkestävyys varsinkin rakennusvaiheessa (kts kuva 51 vasemmalla). Niiden asentaminen puupylvääseen on myös haastavampaa kuin nykyisenkaltaisen teräksisen juurituen, koska ne ovat myös selvästi hauraampia kuin teräs. Betonijalan ja komposiitti/lujitemuovivahvikkeen ongelmana on niiden integrointi puupylvääseen siten, että ne eivät edistä pylvään lahoamista, mutta samalla tukevat pylvästä käyttöään loppuvaiheissa.



Figur 7. Försöksstolpar försedda med Blotrans mekanisk skydd av stolproten.
Ur Love et al 2007.

Kuva 51. Vasemmalla valaisinpylvään betonijalka, joka ei lyhennä kuitenkaan vielä momenttivartta. Oikealla muovinen tyvisuoja, joka ei kuitenkaan juuri lisää puupylvään kuormankantokykyä (Jöran Jermer 2008).

Sen sijaan teräksinen juurituki on käyttökelpoinen ratkaisu puupylvään tyviosan heikkouksien ratkaisuun. Kuvassa 52 juurituki on asennettu vahvistamaan vanhaa lahonnutta puupylvästä. Nykyistä teräksistä juuritukea tulee kuitenkin kehittää seuraavasti: Sen tulee olla nykyistä pidempi eli juurituen tulee yltää yli metrin korkeuden maanrajasta, jotta se kompensoisi täysin myös hieman maanrajan

yläpuolisen tyvilahon. Lisäksi juurituki tulee pystyä asentamaan tarvittaessa uusiin puupylväisiin helposti jo kyllästämöllä ilman, että se aiheuttaa ongelmia kuljetuksissa.



Kuva 52. Teräksinen juurituki, joka lyhentää momenttivartta ja lisää maanrajan kuormankantokykyä. Puupylvään kriittinen kohta on siirtynyt maanrajan yläpuolelle juurituen päättymiskohtaan.

Taulukossa 35 on esitetty kustannuslaskennan tulokset, kun puupylväänä on käytetty mäntyöljyllä (100 kg/m³) kyllästettyä puolipuhdasta, lujuuslajiteltua 211-pylvästä (ominaislujuus 47 N/mm²) ja teräksinen juurituen pituus on 2,25 metriä. Taulukossa 36 on esitetty kustannuslaskennan tulokset, kun puupylväänä on käytetty C-kyllästettyä NTR A+-luokan lujuuslajiteltua 311-pylvästä (ominaislujuus 41,8 N/mm²) ja teräksinen juurituen pituus on 2,25 metriä. Molemmissa tapauksissa juurituen päättymiskohta on maanrajan yläpuolella 1,25 metriä, josta muodostuu siis uusi puupylvään kriittinen kohta. Tämä lyhentää 11-metrinen pylvään momenttivartta 8,75 metristä 7,50 metriin eli 16,7 %.

Taulukko 35. Kustannuslaskennan tulokset, kun puupylväänä on käytetty mäntyöljyllä (100 kg/m³) kyllästettyä puolipuhdasta, lujuuslajiteltua 211-pylvästä (ominaislujuus 47 N/mm²) ja teräksinen juurituen pituus on 2,25 metriä.

Yhdistelmä rakenne: Mäntyöljykyllästetty 100 kg/m ³ , puolipuhdas puupylväs 311 + 2,25 metrin teräksinen juurituki		
	Yhdistelmä rakenne:	
Pylväs	Mäntyöljykyllästetty 100 kg/m ³ , puolipuhdas lujuuslajiteltu puupylväs 211 + 2,25 metrin teräksinen juurituki	Puupylvään mitoituslujuus 29,9 N/mm ²
Upotussyvyys	2000	mm
Oren kiinnitystenkohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Tehdashinta yhdistelmä rakenteelle	215	€/kpl (pylväs 140 €/kpl ja teräksinen juurituki 75 €/kpl)
Käyttöikä	60	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	8	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 110 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierätyksmaksu	0	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	809	€/km (juurituen asennus, suojavaatteet, peseytyminen yms. 5% kokonaiskustannuksista vt. suolakyllästetty pylväs)
Hinta per kilometri uusi ilmajohto mäntyöljypylväällä	18591	€/km
Puupylvään 311 (puolipuhdas) lähtötiedot		
Latva min. läpimitta	155	mm
Latva min. läpimitta oren kiinnityskohdassa latvasta	158	mm
Tyvi min. läpimitta 1,5 m	220	mm
Tyvi min. läpimitta juurituen päättymiskohdassa 3,25 m	208	mm
Ominaislujuus	47	N/mm ²
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	33,6	N/mm ² (uusi pylväs)
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	47	N/mm ² (vanha pylväs, lisäksi kuormia voidaan vähentää 8%:a)
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
	Yhdistelmä rakenne:	
Pylvästyyppi	Mäntyöljykyllästetty 100 kg/m ³ , puolipuhdas lujuuslajiteltu puupylväs 211 + 2,25 metrin teräksinen	
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	223	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	18591	€/km
Käyttöikä	60	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	982	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	153	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvan lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	43	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	0	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	7	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	264	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1273	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	222	€/vuosi/km

Taulukko 36. Kustannuslaskennan tulokset, kun puupylväänä on käytetty C-kyllästettyä NTR A+-luokan 311-pylvästä (ominaislujuus 41,8 N/mm²) ja teräksinen juurituen pituus on 2,25 metriä.

Yhdistelmä rakenne: C-kyllästetty A+luokka, lujuuslajiteltu puupylväs 311 + 2,25 metrin teräksinen juurituki		
Pylväs	Yhdistelmä rakenne: C-kyllästetty A+luokka, puupylväs 311 + 2,25 metrin teräksinen juurituki	Puupylvään mitoituslujuus 33,6 N/mm ²
Upotussyvyys	2000	mm
Orren kiinnitystenkohtien keskiarvon etäisyys latvasta	250	mm
Ilmajohto	BLL 62	
Maastoluokka	Metsä/tienvarsi	
Jänneväli	100	m
Pylväitä per kilometri (Huomioitu kolme kulmaa, jossa A-pylväät/harustus)	13	kpl/km
Keskihinta per kilometri uusi ilmajohto v. 2006	16183	€/km (käytetty CCA-pylvästä)
Tehdashinta CCA-kyllästetty 211 v. 2006	100	€/kpl
Tehdashinta yhdistelmä rakenteelle	215	€/kpl (pylväs 140 €/kpl ja teräksinen juurituki 75 €/kpl)
Käyttöikä	55	vuotta
Kuljetuksen hinta täysin kuormin 100 km jaettuna tien varteen	10	€/kpl (400 € kuljetus + 300 € jako, 110 kpl per kuorma, max kuorma 37 tonnia/ 43 kuutiota puupylväillä (poikkeuslupa EU:sta) ja muista materiaaleista tehdyillä pylväillä 30 tonnia)
Kierrätysmaksu	5	€/kpl
Pylväsmateriaalista aiheutuvat lisäkustannukset vrt CCA-pylväs	405	€/km (juurituen asennus 2,5% kokonaiskustannuksista vrt. suolakyllästetty pylväs)
Hinta per kilometri uusi ilmajohto mäntyöljypylväällä	18277	€/km
Puupylvään 311 (puolipuhdas) lähtötiedot		
Latva min. läpimitta	170	mm
Latva min. läpimitta orren kiinnityskohdassa latvasta	173	mm
Tyvi min. läpimitta 1,5 m	230	mm
Tyvi min. läpimitta juurituen päättymiskohdassa 3,25 m	218	mm
Ominaislujuus	47	N/mm ²
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	33,6	N/mm ² (uusi pylväs)
Mitoituslujuus/suurin sallittu jännitys	47	N/mm ² (vanha pylväs, lisäksi kuormia voidaan vähentää 8%:a)
Kustannukset elinkaaren ajalta		
Ilmajohto	BLL 62	
Pylvästyyppi	Yhdistelmä rakenne: C-kyllästetty A+luokka, puupylväs 311 + 2,25 metrin teräksinen juurituki	
Pylvään hinta toimitettuna työmaalle	230	€
Jänneväli	100	m
Investointikustannus	18277	€/km
käyttöikä	55	vuotta
Korkokanta	0,05	
Investointikustannus per ilmajohtokilometri per vuosi	981	€/vuosi/km
Pylväiden osuus investointikustannuksista	160	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista aiheutuvien lisätöiden osuus investointikustannuksista vrt. CCA-pylväs	22	€/vuosi/km
Pylväsmateriaalista johtuvien muutostöiden ja korjausten vuosikustannus	20	€/vuosi/km
Käytöstä poistuneiden pylväiden aiheuttamat kustannukset	42	€/vuosi/km
Vanhanlinjan kuntotarkastus	13	€/vuosi/km
Ilmajohdon purkaminen per ilmajohtokilometri	268	€/vuosi/km
Vuosikustannukset yhteensä	1324	€/vuosi/km
Pylväiden ja pylväsmateriaalista aiheutuvien kustannusten osuus kokonaiskustannuksista	257	€/vuosi/km

Kuvissa 53 ja 54 on esitetty SWOT-analyysi mäntyöljykyllästetystä puupylvästä ja teräksisestä juurituesta sekä C-kyllästetystä puupylvästä ja teräksisestä juurituesta.

Vahvuudet - Teräksinen juurituki tekee puupylvästä tasalaatuisemman tuotteen niin käyttöiän kuin lahotarkastustenkin kannalta→ huolto ja ylläpitokustannukset sekä riskit nykyistä pienemmät - Teräksinen juurituki vahvistaa maanrajaa, jonka vuoksi voidaan käyttää pienempiä puupylväitä (vertaa esim. C-kyllästetty puupylväs, jonka tyviosa on kyllästetty kreosootilla) - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 200...250 €/kpl vrt perinteinen puupylväs 150 €/kpl ja teräspylväs 300 €/kpl - Edullinen logistiikka - Edullinen paino/lujuussuhde - Vikatilanteessa voidaan kiivetä pylväskengillä - Rakentaminen nykyiseen tapaan, kestää kovaa käsittelyä rakentamisvaiheessa - Pylvästä voidaan helposti työstää, porata, katkaista vielä työmaalla - Maanpinnan yläpuolella öljykyllästeet tarjoavat jopa yli 60 vuoden käyttöiän, koska tikkareiät ja latvalaho-ongelmat ovat pienemmät kuin suolakyllästeillä - Ei kierrätysmaksuja→ tarvittaessa pylväs voidaan jättää jopa maanomistajalle - Pylvästarkastukset voidaan aloittaa nykyistä myöhemmin. koska maanrajan laho ei ongelma - Turvallinen ratkaisu sekä työntekijöiden että ympäristön kannalta	Heikkoudet - Juurituen asennus pylvääseen hidastaa hieman rakentamista - Mäntyöljy voi tahrata, mutta ei juuri haise eikä ole biosidi
Mahdollisuudet - Teräksinen juurituki toiminut hyvin käytännössä→mahdollisuus kehittää edelleen esim. törmäysturvallinen liukulaippa tienvarsiin asennettaville pylväille - Tyven vahvistamisen avulla puupylvästä voidaan jatkossa käyttää myös suurilla johdoilla nykyisellä tavalla ja maksimijännevälillä - Tyvivahvistettua pylvästä ei tarvitse lahotarkastaa ennen kuin käyttöiän lopulla - Pylväiden lujuuslajittelu→pidempi jänneväli - Puolipuhneiden pylväiden käyttö tarjoaa pidemmän käyttöiän (suolakyllästeillä ei voida kyllästää puolipuhneita pylväitä)	Uhat - Mäntyöljyn korroosiovaikutuksista ei tietoa – tutkittava ovatko vaikutukset positiivisia vai negatiivisia→vaikuttaa käyttöikäen

Kuva 53. SWOT-analyysi mäntyöljykyllästetystä puupylvästä ja teräksisestä juurituesta.

Vahvuudet - Teräksinen juurituki tekee puupylvästä tasalaatuisemman tuotteen niin käyttöiän kuin lahotarkastustenkin kannalta→ huolto ja ylläpitokustannukset sekä riskit nykyistä pienemmät - Teräksinen juurituki vahvistaa maanrajaa, jonka vuoksi voidaan käyttää pienempiä puupylväitä (vertaa esim. C-kyllästetty puupylväs, jonka tyviosa on kyllästetty kreosootilla) - Hinta-arvio 11- metriselle pylväälle 200...250 €/kpl vrt perinteinen puupylväs 150 €/kpl ja teräspylväs 300 €/kpl - Edullinen logistiikka - Edullinen paino/lujuussuhde - Vikatilanteessa voidaan kiivetä pylväskengillä - Rakentaminen nykyiseen tapaan, kestää kovaa käsittelyä rakentamisvaiheessa - Pylvästä voidaan helposti työstää, porata, katkaista vielä työmaalla	Heikkoudet - Juurituen asennus pylväaseen hidastaa hieman rakentamista - C-kyllästetty pylväs on biosidinen tuote, joka täytyy kierrättää (hintaa 60 €/kpl) - C-kyllästeen voimakas huuhtoutuminen - Laho-ongelmat maanpinnan yläpuolella saattavat lyhentää käyttöikää etenkin harustetuilla ja A-pylväillä→pylvästarkastuksista ei voida luopua
Mahdollisuudet - Teräksinen juurituki toiminut hyvin käytännössä→mahdollisuus kehittää edelleen esim. törmäysturvallinen liukulaippa tienvarsiin asennettaville pylväille - Tyven vahvistamisen avulla puupylvästä voidaan jatkossa käyttää myös suurilla johdoilla nykyisellä tavalla ja maksimijänneväliä - Pylväiden lujuuslajittelu→pidempi jänneväli - Puolipuhaiden pylväiden käyttö tarjoaa pidemmän käyttöiän	Uhat - C-kyllästeen aiheuttama korroosio juurituelle

Kuva 54. SWOT-analyysi C-kyllästetystä puupylvästä ja teräksisestä juurituesta.

9.6 Yhdistelmärakenteiden mitoitus: käytönrajat johdin, pylvästyyppi, orsi ja juurituki

RJ 12:96 on esitetty 11 ja 12 metristen puupylväiden käytönrajat tuulikuormille VIM:in mukaan. Esimerkiksi orsityypillä Headpower G11 sallittu tuulikuormitus on kuitenkin suurempi kuin RJ 12:96 sallii (kuva 13). Tämä siksi, että nykyisissä puupylvään käytönrajoissa ei ole huomioitu, että orren kiinnityskohta/juurituki/tyvivahvike vaikuttaa momenttivarren pituuteen (lyhempi momenttivarsi sallii suuremman tuulikuormituksen). Jatkossa käytönrajat tulisi määrittää koko rakenteelle pylväs, juurituki, orsityyppi, ilmajohto. Kuvissa 55, 56 ja 57 on esitetty kalliopylvään tuentaratkaisu ja erilaisia orsityyppejä, jotka vaikuttavat olennaisesti momenttivarren pituuteen ja lahoamisvaran laskentaan puupylväällä.



Kuva 54. Lehmon koelinjan kreosoottikyllästetty (80 kg/m³) puupylväs, jossa orsityyppi Headpower G11.



Kuva 55. Kallionpylvään kiinnitystapoja voidaan hyödyntää myös maaperään upotettavilla pylväillä.



Kuva 56. Erilaisia orsityyppejä.



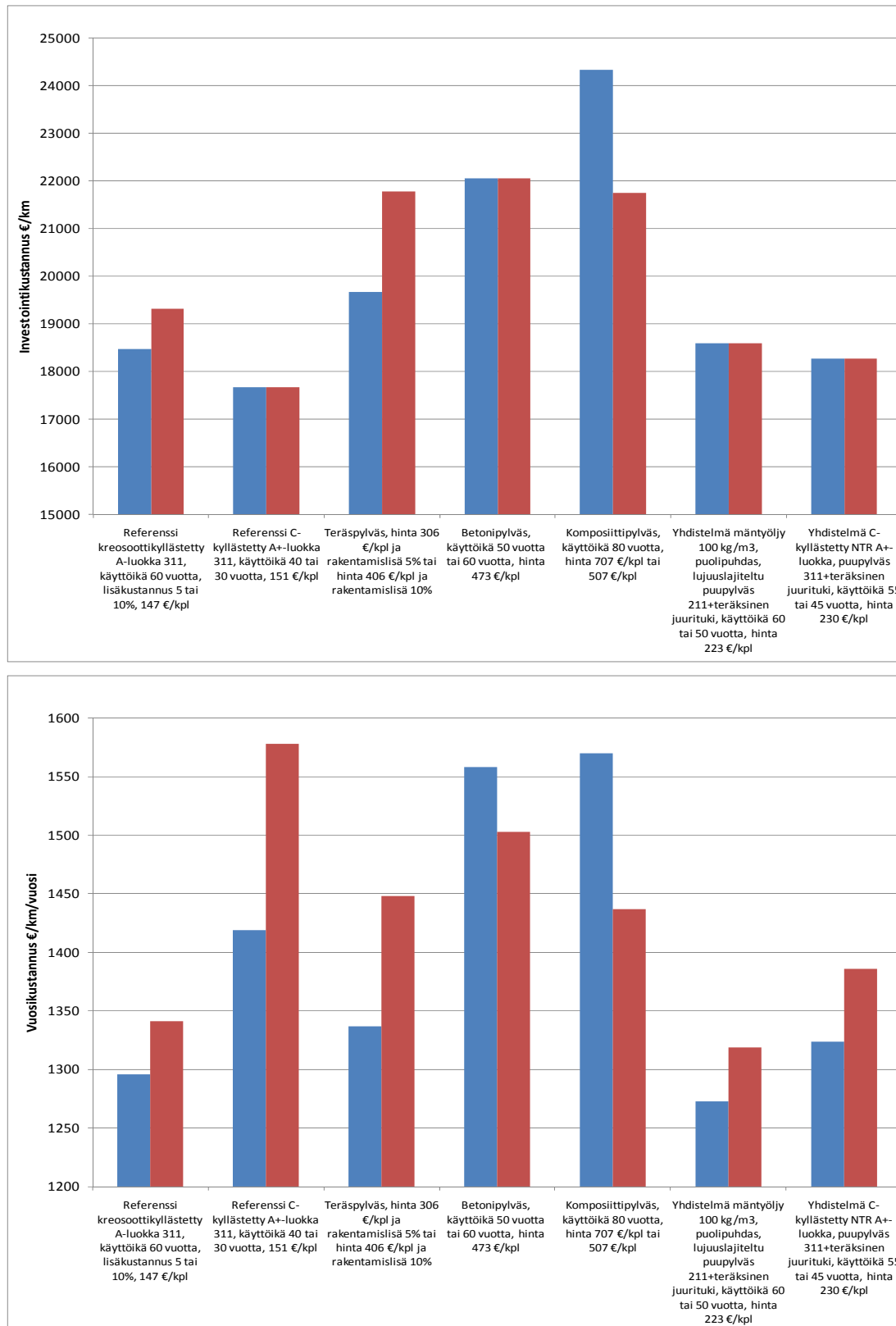
Kuva 57. Erilaisia orsityyppejä.

9.7 Riskianalyysi teräs-, betoni- ja komposiittipylväille sekä yhdistelmärakenteille

Kuvassa 58 on esitetty yhteenveto kustannuslaskennan tuloksista teräs-, betoni-, komposiitti ja yhdistelmärakenteilla. Lisäksi laskentaan liitettiin riskitarkastelu, joka on tehty seuraavasti eri ratkaisuille:

- Teräspylvään hintaa on korotettu 300 eurosta 400 euroon kappale ja rakentamislisää 5 %:sta 10%:iin.
- Betonipylväällä riskitarkastelu tehtiin positiivisessa mielessä eli käyttöikä nostettiin 50 vuodesta 60 vuoteen
- Komposiittipylväillä tehtiin myös positiivinen riskitarkastelu eli hinta-arvio laskettiin 700 eurosta 500 euroon kappale. Tämä siksi, että komposiittituotteet ja tuotantomenetelmät kehittyvät nopeasti ja hinnat voivat jopa laskea nykyisestä.
- Yhdistelmärakenteilla laskettiin käyttöikä-arviota seuraavasti: mäntyöljykyllästetty puupylväs+teräksinen juurituki 60 vuodesta 50 vuoteen ja C-kyllästetty puupylväs 55 vuodesta 45 vuoteen.

Riskianalyysin perusteella kilpailukykyisimmät ratkaisut ovat teräspylväs ja yhdistelmärakenne puupylväs+teräksinen juurituki. Edullisin ratkaisu on käyttää puupylväänä puolipuhdasta, lujuuslajiteltua mäntyöljykyllästettyä (100 kg/m³) puupylvästä teräksisen juurituen kanssa. Myös C-kyllästetty pylväs + teräksinen juurituki on kilpailukykyinen, jos C-kyllästetty puupylväs on lujuuslajiteltu eli ominaislujuus on nostettu nykyisestä 41,8 N/mm² vähintään 47 N/mm². Mäntyöljykyllästettyä pylvästä ei tässä tapauksessa tarvitse välttämättä lujuuslajitella, koska puolipuhdasta sen suurempi läpimitta verrattuna sorvattuun C-pylvääseen korvaa pienemmän ominaislujuuden. Lujuuslajittelu lisää kuitenkin huomattavasti myös mäntyöljykyllästetyn puupylvään kilpailukykyä.



Kuva 58. Yhteenveto kustannuslaskennan tuloksista teräs-, betoni-, komposiitti ja yhdistelmärakenteilla. Ylhäällä inventointikustannus €/km ja alhaalla vuosikustannus €/km/vuosi.

10. Johtopäätökset

Kuvassa 59 on esitetty parhaiden sähköpylväsratkaisun investointi- ja vuosikustannukset. Tutkimus vahvistaa olemassa olevan käsityksen siitä, että kreosootikyllästetty puupylväs on taloudellisesti paras ratkaisu sähköpylvääksi - vaikka sen pitoisuutta laskettaisiin 75 kg/m³ nykyisestä 110 kg/m³. Toiseksi paras ratkaisu on yhdistelmä rakenne, jossa on lujuuslajiteltu ja/tai puolipuhdas (vähintään tyvestä 3,5 metriä) mäntyöljykyllästetty puupylväs ja teräksinen juurituki, joka ulottuu vähintään 1,25 metriä maanpinnan yläpuolelle. Muita lähes yhtä hyviä ratkaisuja ovat lujuuslajitellut/puolipuhdas vesilasi-, mäntyöljy ja CC-kyllästetyt puupylväät. Ns. combipylväs (C-kyllästetty pylväs, jonka tyviosa on kyllästetty kreosootilla) sekä yhdistelmä rakenne C-kyllästetty pylväs+teräksinen juurituki ovat edellä mainittuja ratkaisuja 4...6% kalliimpia vuosikustannusten suhteen. C-kyllästetty pylväs on vain 9% kalliimpi ratkaisu kuin kreosootipylväs, vaikka käyttöikäarvioissa on eroa 20 vuotta. Jos C-kyllästettyjen pylväiden käyttöikä on yli 45 vuotta, niin se on varteenotettava vaihtoehto myös tulevaisuudessa.

Vesilasilla ja mäntyöljyllä on kuitenkin vielä kehityspotentiaalia, jonka vuoksi niiden kilpailukyky voi tulevaisuudessa kasvaa. Mikäli pelkkä vesilasikäsitteily antaa puupylväälle 50 vuoden käyttöiän, niin sen kilpailukyky on jopa parempi kuin kreosootilla. Jos taas mäntyöljykyllästettyjen pylväiden tahraavuusongelma saadaan ratkaistua, niin tällöin rakentamiskustannukset (työntekijöiden suojautumiskulut yms) laskevat 5%:a, joka tekisi mäntyöljypylvästä yhtä hyvän ratkaisun kuin kreosootipylväs.

Tulosten perusteella betonista ja komposiiteista valmistetut sähköpylväät eivät ole kilpailukykyisiä Suomen olosuhteissa. Komposiittirakenteet-, materiaalit ja valmistusmenetelmät kehittyvät kuitenkin nykyisin vauhdilla ja panostus nanoteknologiaan sekä volyymien kasvu voi tuoda tulevaisuudessa kilpailukykyisiä ratkaisuja myös sähköpylväisiin.

Tällä hetkellä muista materiaaleista ainoastaan teräspylväs voi haastaa puupylvään kustannuksien suhteen. Esimerkkitapauksessa (BLL62-johdin) teräspylväs oli vuosikustannuksiltaan 7% kalliimpi kuin kreosootipylväs, mutta samalla tasolla C-kyllästetyn pylvään kanssa. Ratkaisevaa teräspylvään kannalta on, miten uusien CENELEC-ohjeiden soveltaminen käytännössä tulee vaikuttamaan ilmajohtorakentamiseen ja miten teräspylvään maadoitus 20 kV:n ilmajohdoissa tulee määräysten

mukaan tehdä. Tarkkaa ohjetta maadoituksesta ei tällä hetkellä ole käytettävissä. Uusien CENELEC-ohjeiden vuoksi teräspylvään kilpailukyky verrattuna puupylvääseen on joka tapauksessa parantunut. Mitä suurempi johdon poikkileikkauspinta-ala ja jänneväli, sitä parempi on teräspylvään kilpailukyky suhteessa puupylvääseen.

Uusista ratkaisuksista paras on siis vahvistaa puupylvään kriittistä kohtaa eli maanrajaa nykyisen kaltaisella teräksisellä juurituella, joka ylettyy vähintään 1,25 metrin korkeudelle maanrajasta. Öljyttömillä kyllästeillä käsitellyissä puupylväissä esiintyy paljon myös latvalahoa, jota edistää voimakkaasti tikan aiheuttamat reiät pylväiden latvaosiin. Käyttämällä yhdistelmäarakenteessa puolipuhdasta, mäntyöljykyllästettyä pylvästä voidaan vähentää tätäkin ongelmaa merkittävästi. Tällöin koko pylväs on täysin kierrätettävissä ilman erillisiä ja pakollisia kierrätysmaksuja. Teräksinen juurituki on uudelleen käytettävissä tai voidaan toimittaa metallinkierrätykseen (tuloja verkonhallintayhtiölle). Mäntyöljykyllästetty pylväs voidaan jättää maanomistajalle, hakettaa ja polttaa missä tahansa normaalia puuta käyttävässä lämpölaitoksessa. Myös C-kyllästettyä pylvästä voidaan käyttää yhdistelmäarakenteessa, mutta se huonompi ratkaisu kuin mäntyöljykyllästetty pylväs, koska

- C-kyllästetyn pylvään kierrätyskustannukset ovat 60 €/kpl vrt. mäntyöljykyllästetty 0 €/kpl
- C-kyllästeen korroosion vuoksi juurituen kiinnitys voi pettää
- C-kyllästeen huuhtouman vuoksi pylväillä on latvalaho-ongelmia (harustetut pylväät), jonka vuoksi käyttöikä ei juurituen ansiosta välttämättä kasva

Tutkimuksessa vertailtiin myös eri tapoja hakea kustannussäästöjä. Näitä olivat jännevälin maksimointi ja/tai käyttöiän maksimointi joko ylimitoittamalla puupylväs tai käyttämällä lujuslajiteltuja pylväitä. Tulosten perusteella ilmajohdon investointi- ja vuosikustannuksiin per kilometri vaikuttaa eniten

1. Jänneväli – kuinka lähellä maksimaalista jänneväliä kullakin pylväsratkaisulla päästään?
2. Pylvästyksen kokonaishinta eli pylväs, pylvään pystytys, orsi, orren ja johtojen asennustyö yms – öljykyllästetyillä pylväillä asentajien suojautumiskulut voivat olla jopa 10% kokonaiskustannuksista
3. Käyttöikä – jos pylvään käyttöikä on vähintään 40 vuotta, ratkaisevat muut tekijät paremmuusjärjestyksen, koska maksimikäyttöikä on käytännössä 65...70 vuotta.
4. Pylvään hinta ja kierrätyskustannukset

Lujuuslajitelluilla puupylväillä on suurempi ominaislujuus, jolloin samankokoisella pylväällä saadaan suurempi jänneväli ja/tai pidempi käyttöikä kuin normaaleilla pylväillä. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää pienempiä pylväitä samalla jännevälillä. Lujuuslajiteltujen pylväiden käyttö on erittäin kannattavaa, jos siitä tuleva hyöty on mahdollista käyttää jännevälän pidentämiseen. Tämän vuoksi lujuuslajitellusta puupylvästä (ominaislujuus 10...20% suurempi kuin nykyisin) voidaan maksaa lisähintaa.

Jos käyttöikää maksimoidaan, se vaatii puupylväiden osalta nykyistä laadukkaamman lahotarkastuksen, sillä käyttöikä riippuu suoraan puupylvään lahoamisvarasta. Tämän vuoksi lahoamisvaran laskenta kannattaa liittää osaksi uusia mitoitusohjelmia. Lujuuslajitellulla, puolipuhalla 2-luokan pylväällä voidaan korvata normaali 3-luokan pylväs, etenkin jos mitoitus- ja lahoamisvara laskelmissa käytettäisiin todellisia läpimittoja. Standardi antaa aina läpimitalle vähimmäisvaatimuksen, jonka vuoksi käytännössä 2-luokan pylväs on 5...10 mm suurempi keskimäärin kuin standardin vaatimus.

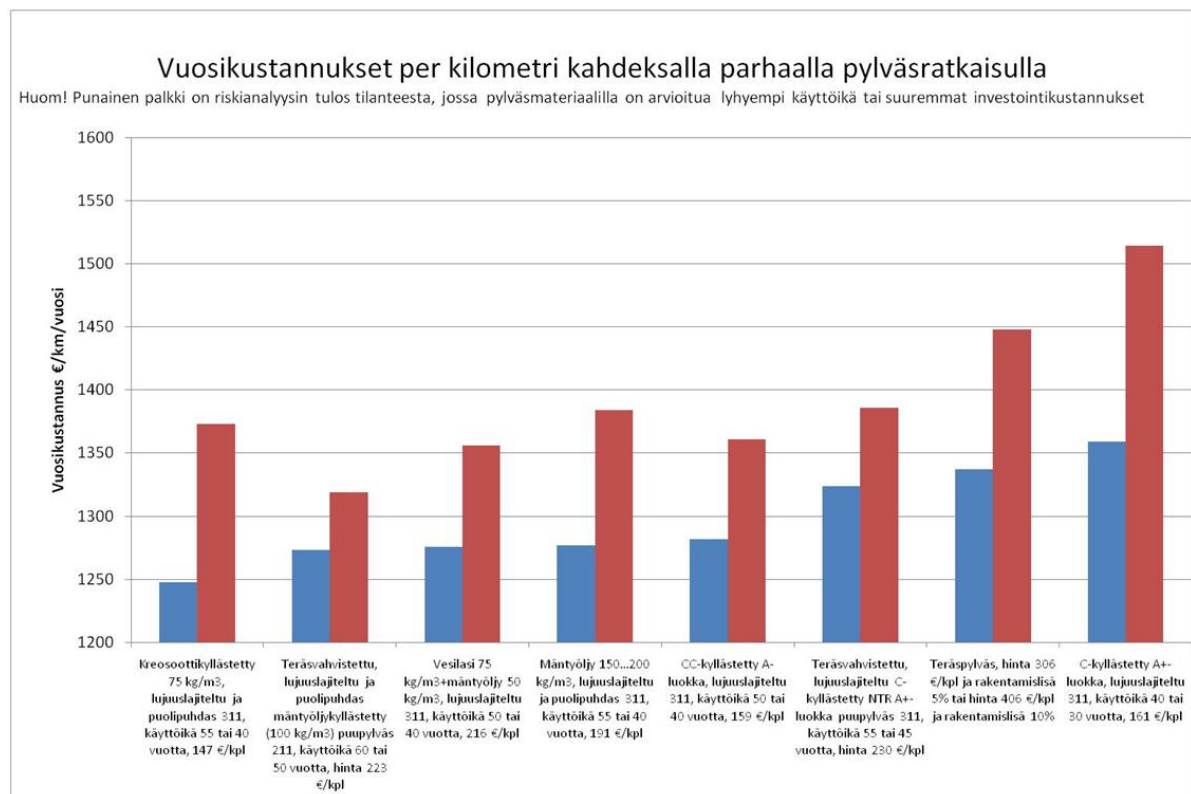
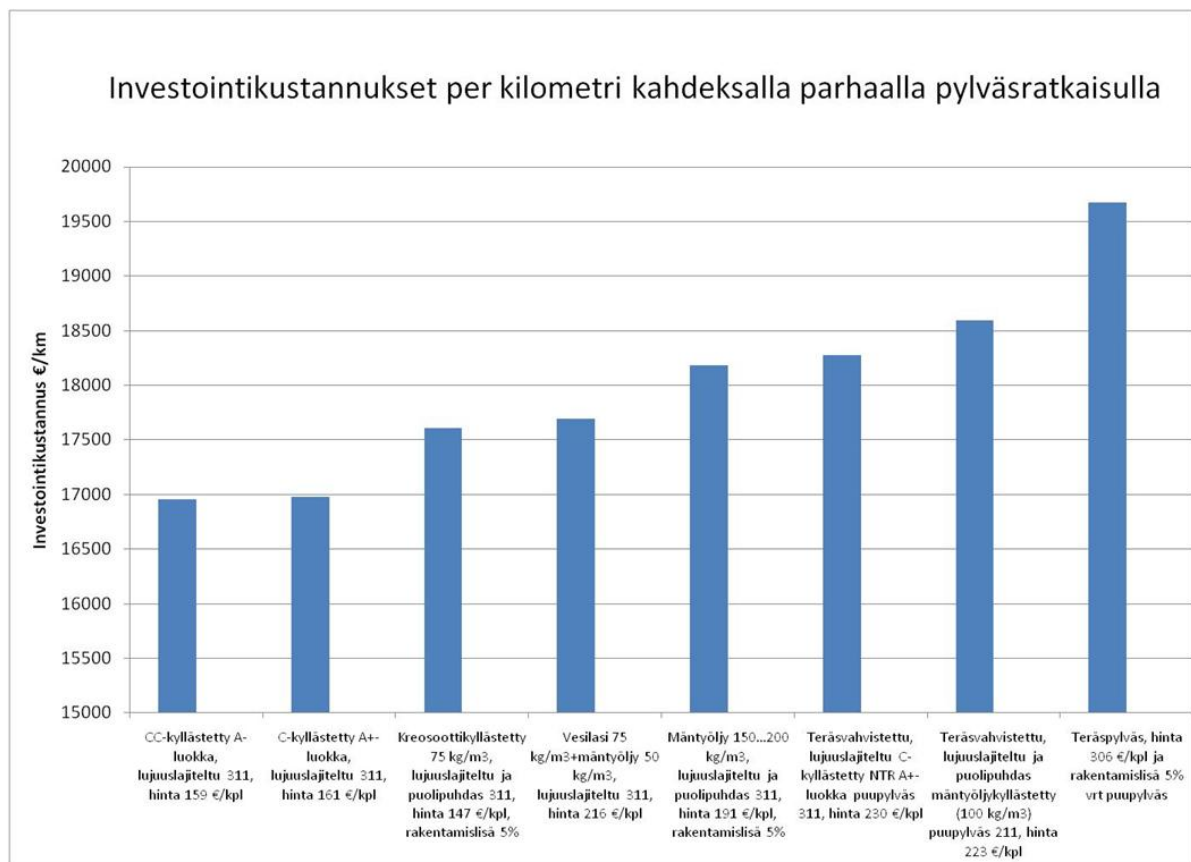
Tulevaisuuden sähköpylväät on valmistettu

- Lujuuslajitelluista ja/tai ainakin tyviosastaan puolipuhasta mäntyöljykyllästetyistä (100 kg/m³) puupylväistä, joiden tyviosa on vahvistettu teräksisellä juuritueella vähintään 1,25 metrin korkeudelle maanrajasta.

tai

- Lujuuslajitelluista puupylväistä, jotka on kyllästetty joko kreosootilla (75 kg/m³), CC-kyllästeellä (NTR A-luokka), mäntyöljyllä (150...200 kg/m³) tai vesilasilla (75...100kg/m³). Kreosootia käytettäessä pitoisuutta pienennetään siis nykyisestä 30%:a. Vesilasi- ja mäntyöljy käsittely yhdistetään tarvittaessa. Kreosootia ja mäntyöljyä käytettäessä pylväitä ei sorvata ainakaan tyviosasta.

Nämä muutokset nostavat investointikustannuksia 2...4 % per ilmajohtokilometri verrattuna C-kyllästettyyn pylvääseen, mutta vuosikustannukset ovat jopa 10%:a pienemmät. Lisäksi sähköpylvään tunnistetietoja tarkennetaan laadukkaamman lahotarkastuksen takaamiseksi ja eri tavoilla valmistettujen pylväiden tunnistamiseksi jatkossa. Tällä hetkellä Suomessa myydään ainakin kolmella eri C-kyllästeellä käsiteltyjä puupylväitä. Lisäksi samalla C-kyllästeellä kyllästettyjä pylväitä on jo valmistettu ainakin kahdella eri pitoisuudella, jotka täytyy tulevaisuudessa tunnistaa tarkasti.



Kuva 59. Kahdeksan parhaan sähköpylväsratkaisun investointi- ja vuosikustannukset.

11. Jatkotoimenpide-ehdotukset

Tutkimuksen perusteella Energiateollisuus Ry:n/sähkötutkimuspoolin kannattaa jatkossa toteuttaa seuraavat toimenpiteet

- Kansallisen puupylvään lujuuslajitteluohjeen laadinta puupylväsvalmistajille ja lahotarkastajille
- Juuritukien mallikuvien laadinta sekä koekappaleiden valmistus ja testaus yhteistyössä alan yritysten kanssa
- Yhdistelmärakenteen (teräksinen juurituki+puupylväs) testaus, jossa vahvistetaan teoreettisten laskelmien tulokset koskien rakenteen taipumaa ja kuormankantokykyä. Samalla voidaan tarkastella, miten erityyppiset teräksiset juurituet käyttäytyvät kuormitustilanteessa → juurituen rakennetta ja hintaa voidaan optimoida.
- Koska harmonisoitua EN-tuotestandardia yhdistelmärakenteelle (teräksinen juurituki+puupylväs) ei ole laadittu, tulee yritysten CE-merkin hakemiseksi laatia CUAP (hyväksyntäohje, joka käsitellään komissiossa). Työn nopeuttamiseksi Energiateollisuus ry:n/sähkötutkimuspoolin kannattaa laatia kansallinen ohje yhdistelmärakenteen (teräksinen juurituki+puupylväs) vähimmäisvaatimuksista.
- Kreosoottipitoisuuden pienentäminen puupylväissä kansallisella päätöksellä ellei pienennystä NTR:n kanssa yhteistyössä saada aikaiseksi
- CC-kyllästeen hyväksymistä tukeva materiaalin ja kannanoton toimittaminen SYKE:llä
- C-kyllästeen huuhtouman tutkimus pylväillä
- Koelinjan rakentaminen mäntyöljy- ja vesilasikyllästetyistä pylväistä, joissa referenssinä on C- ja kreosoottikyllästettyjä pylväitä.
- Ilmajohtojen mitoitus- ja lahotarkastusohjelmistojen yhteensovittaminen kaikkien verkonhallintayhtiöiden käyttöön
- Sähköpylvään merkintöjä koskevan ohjeistuksen uusiminen, jossa annetaan ohjeet nykyistä tarkemmista merkintävaatimuksista

Lisäksi CENELEC-standardeihin perustuvia käytännön ohjeita täytyy päivittää seuraavasti:

- SENER:in verkostosuositus RJ 33:96, Puupylväiden käytönrajat tulee uusia. Nykyisissä puupylvään käytönrajoissa ei ole huomioitu, että orren kiinnityskohta/juurituki/tyvivahvike vaikuttaa momenttivarren pituuteen (lyhempi momenttivarsi sallii suuremman tuulikuormituksen). Jatkossa käytönrajat tulisi määrittää koko rakenteelle pylväs, juurituki, orsityyppi, ilmajohto ja ottaa ne käyttöön lahotarkastuksissa.
- SENER:in verkostosuositus RJ 33:96 Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen tulee uusia. Ohjeistuksessa tulee määrittää ne kriteerit voimassa olevien standardien mukaan, joiden perusteella pylväs todetaan poistettavaksi linjasta tulevaisuudessa. Paras tapa tähän on määrittää ja laskea pylvään todellinen kuormankantokyky kriittisissä kohdissa ja verrata sitä ko. kohtiin pylvästä aiheutuviin kuormituksiin ko. käyttöolosuhteissa jäljellä olevan käyttöiän aikana. Ohjeessa tulee myös määrittää uusille kyllästevalmisteille vastaavat lahon etenemiskäyrät kuin CCA-kyllästetyille pylväille kuntotarkastajien käyttöön (kuva 42).

Kirjallisuus

1. Ali Temiz a, Gry Alfredsen, Morten Eikenes, Nasko Terziev. Decay resistance of wood treated with boric acid and tall oil derivatives. *Bioresource Technology* 99 (2008) 2102–2110.
2. The 2nd European Conference on Wood Modification 2005. Edited by Holger Militz and Callum Hill.
3. The 3rd European Conference on Wood Modification 2007. Edited by C.A.S. Hill, D. Jones, H. Militz, G.A. Ormondroyd.
4. Puupylväiden mekaaninen mitoitus, tutkimusraportti jouko kolsi ja esko mustonen, teknillinen korkeakoulu, sähkölaitoslaboratorio 1982, ISBN 951-752545-1
5. Puupylväiden kunnossapidon ja uusimisen perusteita, lahontorjuntayhdistys r.y. 1982. ISBN 951-95740-1-8
6. Puupylväiden lujuuslaskentaohje, lahontorjuntayhdistys r.y. 1981. Risto mäkipuro. ISBN 951-95740-0-X
7. Energiateollisuus ry. 2007. Verkostotöiden kustannusluettelo KA2:06. 26 s.
8. SENER verkostosuositus RJ 33:96. Puupylväiden lahoisuustarkastus ja lujuuden määrittäminen.
9. H. Forsén, V. Tarvainen, A. Nurmi. 2006. Development of drying simulation model and drying schedules for class AB treated pine timber with copper based preservatives.. EDG Drying Seminar, Hamburg 2006. VTT.
10. Jöran Jermer. 2008. Trästolpar – Alternativ till stolpar impregnerade med CCA och kreosot. Elforsk rapport 08:67.
11. Durability of wood in ground contact tested in field and laboratory. 1998. Marie-Louise Edlund. Doctoral thesis. Swedish University of Agricultural Sciences. *Silvestria* 81. ISSN 1401-6230. ISBN 91-576-5615-0.
12. Wood pole final report. 2003. Compiled by: Ms R Geraldine Lea, Co-ordinator: Dr Janice K Carey FAIR PROJECT: CT98 3933 (WOODPOLE) 01-09-01 to 28-02-03.
13. Wood research, 51 (3): 2006. 69-76. Influence of water properties on leaching of copper-based preservatives from treated wood. M. Humar, F. Pohleven, University of Ljubljana, Biotechnical faculty, Department of Wood Science and Technology, Ljubljana, Slovenia. D. Žlindra, Slovenian Forestry Institute, Ljubljana, Slovenia.
14. Rakennusmääräys 3/2009. Säänkestoa kemikaaleilla vai kuumuudella?
15. SENER verkostosuositus RJ 12:96. Puupylväiden käytönrajat II. Taulukot ja käyrästä.
16. Jöran Jermer, Östen Bergman ja Thomas Nilsson. 1993. IRG Document. Fungus cellar test and field test with tall oil derivatives. Final report after 11 years testing.

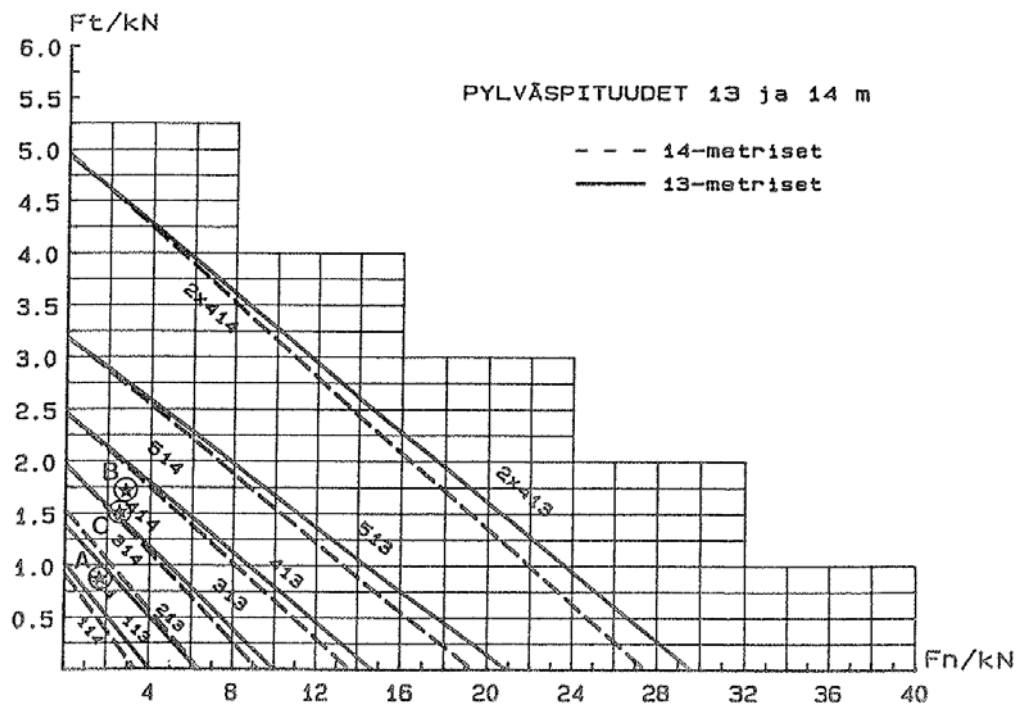
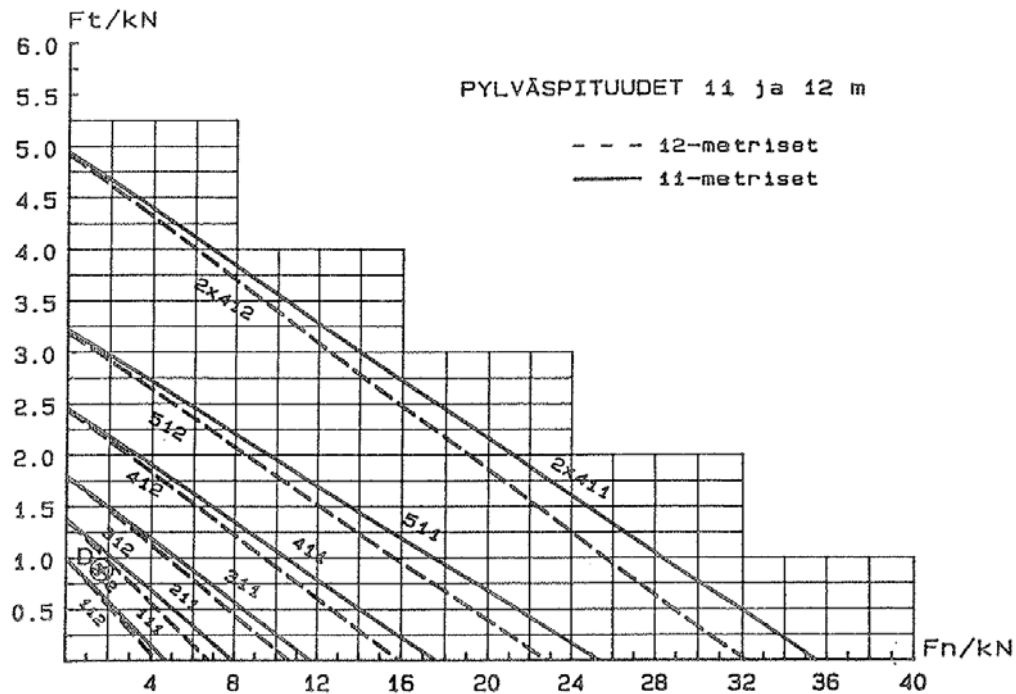
17. Field Stake Tests with Copper-based Preservatives. 2008. Alan Preston¹, Lehong Jin¹, Darrel Nicholas², Andrew Zahora¹, Paul Walcheski¹, Kevin Archer¹ and Tor Schultz² Section 3 Wood Protecting Chemicals. IRG/WP 08-30459. The international research group on wood protection.
18. Jöran Jermer, Rune Ziethén, Anders Clang. 2008. Cantilever bending test of furfurylated poles. SP Technical Research Institute of Sweden
19. Lutomski, K. 1997. Application of wood tars in wood protection. Proceedings of the First International Symposium on Wood Tar and Pitch. s. 249-252.
20. Hotti Esko ja Kalle Lehtonen. 2001. Terva-projektin loppuraportti. YTI-tutkimuskeskus. Mikkelin ammattikorkeakoulu.
21. Marie-Louise Edlund, Jöran Jermer ja Ingvar Johansson. 2006. Fältförsök med träskyddsmedel för klass AB. SP RAPPORT 2006:45.
22. Mats Westin. 2008. Durability of Thermowood against bacterial and fungal decay according to an expanded version of ENV 807. SP Report 2008-09-05 Ecomod.
23. Mike H. Freeman ja Graig R. McIntyre. 2008. A comprehensive review of copper based wood preservatives. Forest Products Journal 2008, Vol. 58, No. 11.
24. Marie-Louise Edlund ja Jöran Jermer. 2004. DURABILITY OF HEAT-TREATED WOOD. Final Workshop COST Action E22 'Environmental Optimisation of Wood Protection'. Lisboa – Portugal, 22nd - 23rd March 2004
25. Paajanen Leena ja Ritschkoff Anne-Christine 1997. VTT. Puunsuojausmenetelmä. Patenttinumero FI97707.
26. Seppo Nevalainen. 2005. Decay resistance of Scots pine in Finland and Sweden. Paper presented at Fifth Workshop IUFRO 5.01.04 "Wood Quality Modelling", New Zealand, November 20-27, 2005.
27. Paajanen Leena. 2000. Raakamäntyöljy ja sen käyttö puunsuojauksessa. Yhteenveto. VTT rakennustekniikka ja Lahontorjuntayhdistys.
28. Mick Hedley 1992. Relative performance of copper-chrome-boron (CCB) and copper-Chrome-Arsenate(CCA) in ground contact. IRG document No: IRG/WP/3694-92.
29. Len Sheard, Arch Timber Protection. 2009. Neuvottelu 15.4 Joensuu.
30. Ali. O. Shaban. 2002. Power pole research. Cal Poly San Luis Obispo. Electrical Engineering Department.
31. <http://www.steel.org/Content/NavigationMenu/Construction/ElectricUtilityDistributionPoles>
32. http://utility-poles.com/download/C6ee25466X10e9af95df2XY1346/Broschuere_Energie_engl_RZ.pdf
33. http://www.rocla.com.au/Drawings/PowerPoles_Brochure_-_technical_info.pdf
33. <http://www.polymercomposites.co.uk/results.html>

Liite 1.

RJ 12:96

KÄYRÄSTÖ 1.
sivu 2(3)

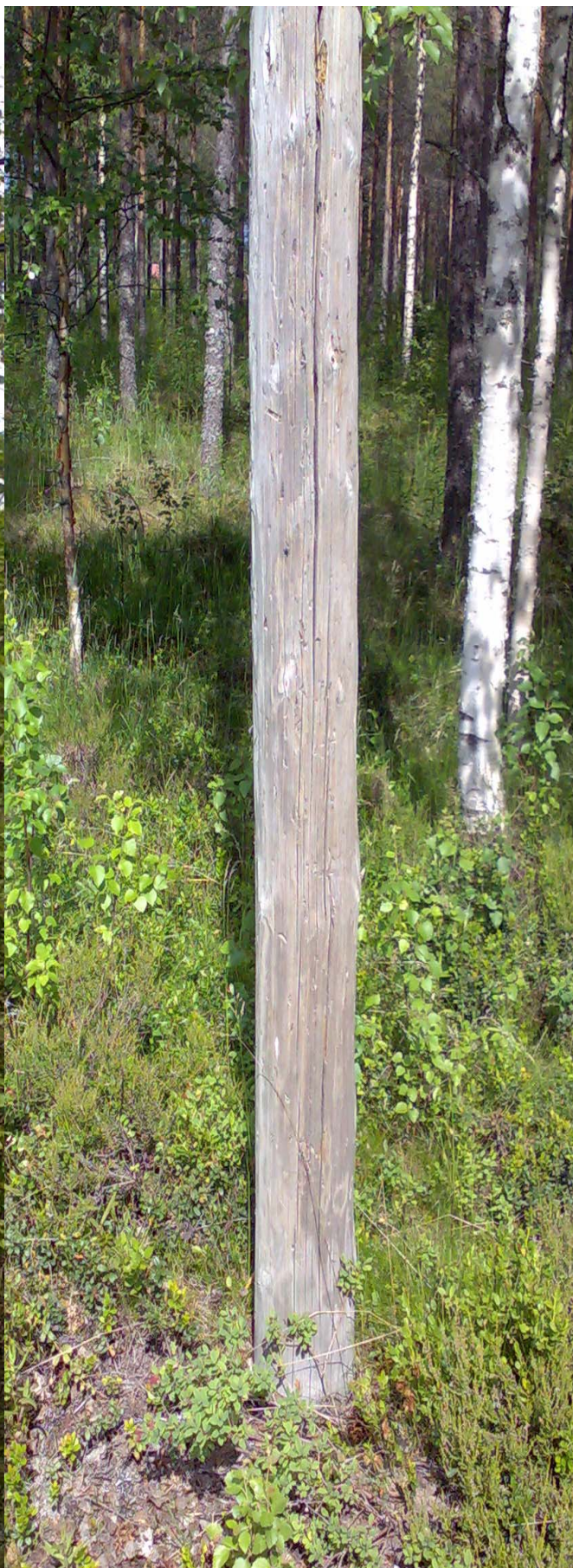
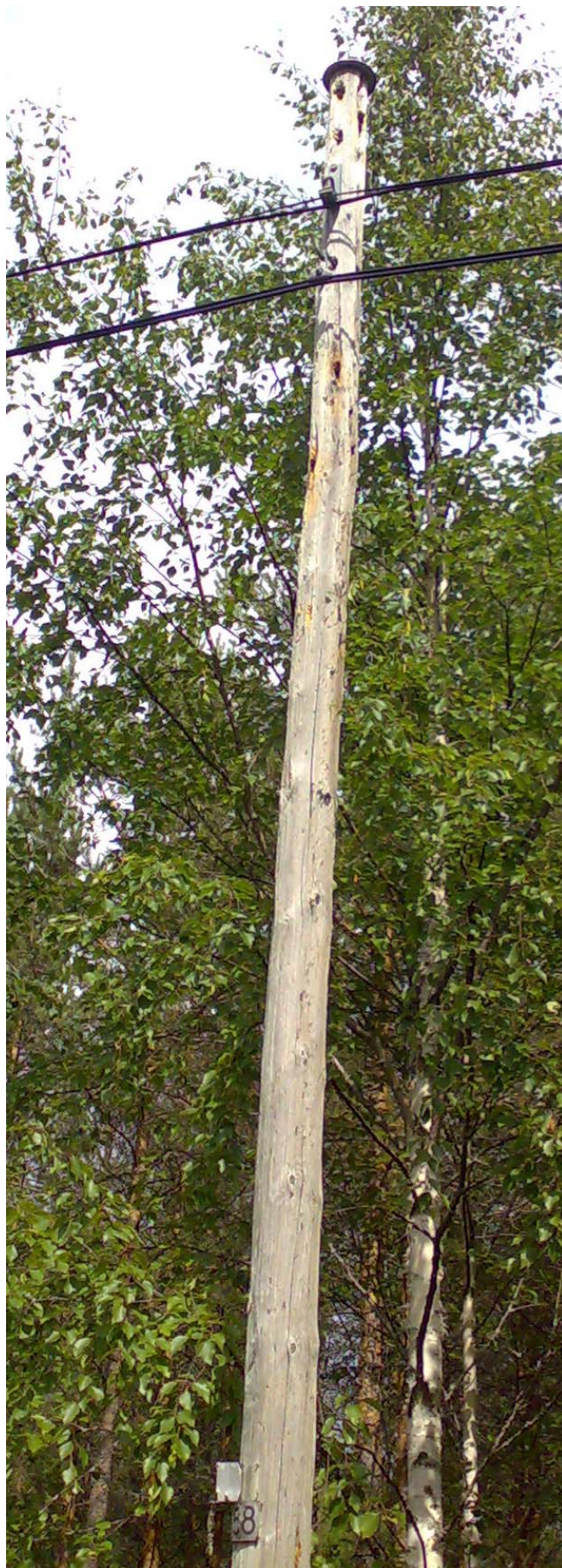
VAPAASTI SEISOVIEN KANNATUSPYLVÄIDEN KÄYTÖNRAJAT TUULIKUORMALLA



Sivu 5 (11)

Liite 2. Latvalaho ja tikan reiät ovat suuri ongelma öljyttömillä kyllästeillä.







Liite 3. Nostokori työskentely yleistyy, kun ilmajohtoja rakennetaan yhä enemmän tienvarsiin.

