

Antti Nurmi, Tuula Hakkarainen & Ari Kevarinmäki

## Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus

ISBN 978-951-38-7487-2 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)  
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2010

**JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER**

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

Tekijä(t) Antti Nurmi, Tuula Hakkarainen & Ari Kevarinmäki		
Nimeke <b>Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus</b>		
Tiivistelmä <p>Projektin päätulos on, että normaaleissa rakenteiden käyttöolosuhteissa ei tapahdu tutkituilla palosuoja-aineilla käsitellyissä vaneri- tai puutuotteissa lujuuden muutoksia, jotka olisi otettava huomioon kantavien rakenteiden suunnitteluohjeissa. Yhdysvalloissa todettujen vakavien, käytön aikaisten lujuuden heikentymien on todettu johtuvan käytettyjen kemikaalien alhaisesta pH-arvosta.</p> <p>Tämän esitutkimuksen perusteella suositellaan, että kantavien puurakenteiden yhteydessä käytettävät uudet palosuojakyllästeet testataan vähintään seuraavalla menettelyllä:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Määritetään kyllästetyn puun pH-pitoisuus.</li><li>2. Määritetään RH65 tasaannutuksen jälkeen kyllästetyn puun tasapainokosteus ja taivutuslujuus EN 408:n mukaisesti käyttäen vertailusarjana vastaavaa kyllästämätöntä puuta (esimerkiksi tässä tutkimuksessa noudatettujen "olosuhde 1:n" mukaisia koekappaleita).</li></ol> <p>Jos kohdassa 2 havaitaan sellaista lujuuden tai jäykkyyden heikkenemistä, mikä ei vastaa tasapainokosteuden muutosten aiheuttamia poikkileikkausmittojen muutoksia, tulee ko. heikentymiset ottaa rakennesuunnittelussa aina erikseen huomioon esimerkiksi kaikkia lujuusarvoja koskevalla pienennyskertoimella.</p>		
ISBN 978-951-38-7487-2 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinnumero 40268
Julkaisuaika Heinäkuu 2010	Kieli Suomi, Engl. abstr.	Sivuja 39 s. + liitt. 6 s.
Projektin nimi Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus	Toimeksiantaja(t) Kemira Oyj, Oy interenergy Ltd, Sepa Oy, Tekes, UPM-Kymmene Wood Oy	
Avainsanat Fire classification, fire test, fire protection, heat release, long-term performance, structural fire design, timber construction, timber structure	Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4520 Faksi 020 722 4374	



Series title, number and  
report code of publication

VTT Working Papers 146  
VTT-WORK-146

Author(s) Antti Nurmi, Tuula Hakkarainen & Ari Kevarinmäki		
Title <b>Long-term performance of fire retardant treated timber structures</b>		
Abstract <p>The main result of the project was that the strength properties of plywood and timber treated with the studied fire retardants do not decrease in such a scale that it should be considered in design of load bearing structures in normal operating conditions. Severe decrease of strength properties during long-term use that was noticed in the USA has been verified to result from the low pH value of used chemicals. According to the results of this preliminary study it is recommended to test load bearing timber structures treated with new fire retardants at least with following procedure:</p> <ol style="list-style-type: none"><li>1. Determine the pH value of impregnated timber.</li><li>2. Determine the equilibrium moisture content and bending strength of impregnated timber after stabilising it in relative humidity of 65%. Determination of bending strength should be done according to EN 408 using matched specimens of untreated timber as a reference.</li></ol> <p>If such decreases in strengths or stiffness are noticed that can not be explained with differences in moisture contents and cross-section dimensions related to moisture content, should those decreases be noticed in structural design for example with a reduction factor for all strength properties.</p>		
ISBN 978-951-38-7487-2 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Project number 40268
Date July 2010	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 39 p. + app. 6 p.
Name of project Long-term performance of timber structures with fire protection treatment	Commissioned by Kemira Oyj, Oy interenergy Ltd, Sepa Oy, Tekes, UPM-Kymmene Wood Oy	
Keywords Fire classification, fire test, fire protection, heat release, long-term performance, structural fire design, timber construction, timber structure	Publisher VTT Technical Research Centre of Finland P. O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4520 Fax +358 20 722 4374	

## Alkusanat

Tämä julkaisu on VTT:n vetämän Tekes-tutkimushankkeen Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus loppuraportti. Raportti käsittelee palosuoja-aineilla kyllästettyjen puu- ja havuvanerikappaleiden lujuusmuutoksia pitkäaikaisessa lämpörasituksessa. Hanketta ovat rahoittaneet TEKES sekä johtoryhmässä mukana olevat yritykset. Raportti pohjautuu VTT:ssä tehtyihin lujuus- sekä kartiokalorimetrikokeisiin.

Tutkimuksen johtoryhmään ovat kuuluneet

Ilmari Absetz	Tekes
Seppo Ahonen	Sepa Oy
Bernt Hoffrén	Oy Interenergy Ltd, Presso Center
Simo Koponen	UPM-Kymmene Wood Oy
Heikki Kukko	VTT
Timo Nissinen	Kemira Oyj
Hannu Pellikka	Sepa Oy.

Kiitämme kaikkia, jotka ovat osallistuneet tämän tutkimuksen tekemiseen.

# Sisällysluettelo

Alkusanat .....	5
1. Johdanto .....	7
1.1 Tausta .....	7
1.2 Aikaisempien tutkimusten tuloksia .....	7
1.3 Rakennustuotteiden eurooppalaisesta paloluokitusjärjestelmästä .....	9
1.4 Tavoitteet .....	10
2. Aineisto ja menetelmät .....	11
2.1 Puumateriaalit .....	11
2.2 Palosuoja-aineet .....	11
2.3 Kyllästyksen .....	12
2.4 Rasitusolosuhteet .....	14
2.5 Koemenetelmät .....	14
2.5.1 pH:n määrittäminen .....	14
2.5.2 Höylätyn sahatavaran taivutuskokeet .....	14
2.5.3 Vanerin taivutuskokeet .....	15
2.5.4 Kartiokalorimetrikokeet .....	16
3. Tulokset ja tulosten tarkastelu .....	18
3.1 Kyllästemäärät, tasapainokosteudet ja pH-arvot .....	18
3.2 Taivutuskokeet .....	20
3.3 Lujuustulosten tarkastelu .....	25
3.3.1 Höylätty sahatavara .....	25
3.3.2 Vaneri .....	27
3.4 Palokokeet .....	27
3.4.1 Savuntuotosta .....	35
3.4.2 Yhteenveto kartiokalorimetrikokeista .....	35
4. Päätelmät ja suositukset .....	36
Lähdeluettelo .....	38
Liitteet	

Liite A: Taivutuskokeiden tulokset

# 1. Johdanto

## 1.1 Tausta

Palosuojaus kattorakenteissa ja esimerkiksi lasi-puu-kaksoisjulkisivuissa voi olla merkittävä turvallisuusetu palotilanteissa. Suomessa on kuitenkin hyvin vähän kokemuksia palosuoja-aineilla käsitellyistä kantavista puurakenteista ja niiden pitkäaikaistoimivuudesta. Palosuojattujen puisten rakenteiden pitkäaikaistoimivuus -projektin pohjatietoina ja lähtökohtina ovat USDA Forest Servicen (Madison, Yhdysvallat) viimeisen vuosikymmenen aikana saavuttamat palosuojattujen puurakenteiden tutkimustulokset sekä VTT:n omarahoitteisessa Paloturvalliset puutuotteet -hankkeessa saadut tiedot.

Teräsrakenteiden palosuojaukselle on olemassa hyväksytyjä suojausmenetelmiä, joten myös puurakenteissa, niin keveissä kuin massiivisissakin, tulisi päästä samalle tasolle muullakin tavoin kuin kipsilevyn käytöllä. Puurakenteiden palosuojaus voidaan optimoida käyttäen uusia toiminnallisen palomitoituksen menetelmiä, mikä tarjoaa mahdollisuuden selviin kustannussäästöihin ja kilpailuetuun.

Valtioneuvosto teki 17.3.2005 periaatepäätöksen puun käytön ja puurakentamisen edistämisestä. Periaatepäätöksen mukaan sellaisia toimenpiteitä edistetään ja tuetaan, jotka korvaavat uusiutumattomien luonnonvarojen käyttöä uusiutuvilla luonnonvaroilla muun muassa rakentamisessa. Puurakentamisen edistämisen tavoitteita ovat muun muassa kaupunkimaisten pientalojen alue- ja täydennysrakentaminen sekä näiden pilottihankkeet, viranomaisohjauksen tarkistaminen erityisesti palomääräysten ja kerrosalan laskennan osalta, ja puun käytön edistäminen muussa rakentamisessa kuten kerrostaloissa, toimitilarakentamisessa, maatalousrakentamisessa, korjausrakentamisessa, sisustuksessa ja piha- ja ympäristörakentamisessa. Puun palosuojauksella ja sen vaikutusten tuntemisella voidaan edesauttaa edellä mainittua kehitystä.

## 1.2 Aikaisempien tutkimusten tuloksia

Palosuojattujen puurakenteiden ominaisuuksia on tutkittu 1960-luvulta lähtien. Suurin osa tutkimuksesta on kohdistunut vaneriin. Tältä pohjalta on tiedossa, että puun pa-

## 1. Johdanto

losuojaus aiheuttaa sen lujuuden heikkenemistä, mikä johtuu palosuojakemikaalien luonteesta [1, 2]. Huoneenlämpötilassa olevan puun lujuuden oletettu palosuoja-käsittelyn aiheuttama heikkenemä on noin 10–20 % välittömästi käsittelyn jälkeen [3]. Lisäksi 30 vuoden kokemus on osoittanut, että huoneenlämpötilassa puun lujuus ei tästä enää heikkene. Yhdysvalloissa havaittiin kuitenkin 1980-luvulla, että palosuojakäsittelyjen puurakenteiden laatu heikkenee erityisesti olosuhteissa, joissa puu on altistunut korkeille lämpötiloille. Selkeimmin ongelma on tullut esiin, kun palosuojattua puuta on käytetty vesikatteiden alusrakenteissa. Joissain tapauksissa palosuojattu vaneri on jopa täytynyt korvata uudella. Nämä havainnot herättivät tutkijoiden kiinnostuksen, ja tutkimus onkin painottunut Yhdysvaltoihin 1990-luvulle. Viimeisimmät tiedossamme olevat tutkimukset ovat 2000-luvun puolivälistä [4, 5].

Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuuden aikaisemmissa tutkimuksissa on siis havaittu, että puun käsittely palosuoja-aineella heikentää puun lujuutta välittömästi käsittelyn jälkeen noin 10–20 % käytetystä käsittelystä ja kuivauslämpötilasta riippuen. Tämän alkunotkahduksen jälkeen puun lujuus ei enää heikkene, mikäli käsiteltyä tuotetta pidetään huoneenlämmössä. Ongelmia muodostuu, kun käsitelty puutuote altistuu normaalia huoneenlämpöä korkeammille lämpötiloille [1].

Ongelman on arvioitu johtuvan siitä, että altistuminen korkeammille lämpötiloille ikään kuin aktivoi käytetyn palosuoja-aineen ennenaikaisesti [6]. Tästä seuraa happokatalysoitu kuivuminen (engl. *acid-catalyzed dehydration* tai *thermal-induced acid degradation*). Reaktion voimakkuuteen vaikuttavat merkittävästi puun pH käsittelyn jälkeen (ts. käytetyn palosuoja-aineen happamuus) ja ympäristön lämpötila [3, 7, 8, 9]. Reaktion seurauksena puu usein tummuu, halkeilee ja muuttuu helposti murenevaksi [2]. Tällöin myös puun lujuusominaisuudet tietenkin heikkenevät.

Aikaisemmissa tutkimuksissa on havaittu, että palosuoja-aineen ennenaikaiseen aktivoitumiseen vaikuttaa jokseenkin merkittävästi myös ympäristön kosteus edellä mainittujen tekijöiden lisäksi [2, 3]. Kokeellisesti on todettu, että puun laadulla ja jälkikäsitteilylämpötilalla näyttäisi olevan vain vähän vaikutusta reaktion voimakkuuteen [6, 8], mutta täyttä varmuutta tästä ei kuitenkaan ole. Erityisesti korkeisiin jälkikäsitteilylämpötiloihin liittyy epävarmuutta. Tilan tuuletuksen vaikutusta reaktion voimakkuuteen ei ole järjestelmällisesti tutkittu, mutta silläkin saattaa olla merkitystä lopputuloksessa [6].

Seuraavien palosuoja-aineiden vaikutusta puun lujuusominaisuuksiin eri olosuhteissa on tutkittu [3, 5]: fosforihappo (PA), monoammoniumfosfaatti (MAP), borax-boorihappo (BBA), guanylureafosfaatti-boorihappo (GUP-B), disyaanidiamidifosforihappo-formaldehydi (DPF), dietyyli-N,N-bis-aminometyylifosfaatti (OPE), alumiiniitrihydroksidi (ATH), dinatriumoktoboraattitetrahydraatti (DOT) sekä näiden sekoitukset.

Yhteenvetona aikaisemmista tutkimuksista voidaan todeta, että altistuslämpötilalla on havaittu olevan suurempi vaikutus kuin tilan kosteudella. Lisäksi on huomattu, että altistuslämpötilan ja -ajan kasvaessa puun mekaaniset ominaisuudet heikkenevät. On myös näyttöä siitä, että tilan korkea kosteuspitoisuus kiihdyttää hajoamisreaktiota. Tut-



kituista aineista fosforihapolla on pienin pH (se on siis happamin), ja se myös heikentää puun lujuusominaisuuksia eniten. BBA ja OPE ovat pH-arvoltaan lähes neutraaleja, eikä niillä ole kovin suurta vaikutusta tutkitun puun mekaanisiin ominaisuuksiin. Toisaalta ne eivät myöskään ole kovin tehokkaita palosuoja-aineita.

### 1.3 Rakennustuotteiden eurooppalaisesta paloluokitusjärjestelmästä

Monissa EU-maissa on käytössä rakennustuotteiden harmonisoitu eurooppalainen pintakerrosten paloluokitusjärjestelmä (ns. euroluokkajärjestelmä), jossa määritellään rakennustuotteiden paloteknistä käyttäytymistä kuvaavat luokat ja luokituksessa käytettävät palokoemenetelmät. Euroluokkajärjestelmä edellyttää koemenetelmien ja luokituksen sisällyttämistä EU:n jäsenmaiden lainsäädäntöön. Euroluokkajärjestelmän mukaan suoritettavat testit ja luokitukset ovat käyttökelpoisia kaikissa jäsenmaissa, joissa järjestelmä on otettu käyttöön. Luokkavaatimukset eri käyttökohteisiin määritellään kuitenkin kansallisesti.

Euroluokkajärjestelmässä rakennustuotteet luokitellaan paloteknisen käyttäytymisensä mukaan seitsemään luokkaan, jotka ovat parhaasta huonoimpaan A1, A2, B, C, D, E ja F muille rakennustuotteille kuin lattianpäällysteille ja A1<sub>FL</sub>, A2<sub>FL</sub>, B<sub>FL</sub>, C<sub>FL</sub>, D<sub>FL</sub>, E<sub>FL</sub> ja F<sub>FL</sub> lattianpäällysteille. Tämän päällysteen lisäksi käytetään savuntuoton ja palavien pisaroiden tai osien lisäluokitusta. Lisäluokat ovat savuntuotolle s1, s2 ja s3 ja palaville pisaroille tai osille d0, d1 ja d2.

Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 [10] pintakerrosten paloluokkavaatimuksissa päällysteeseen liittyvät aina tietyt savuntuoton ja palavien pisaroiden tai osien lisäluokat. Käytössä olevat luokkayhdistelmät ovat A2-s1,d0, B-s1,d0, C-s2,d1 ja D-s2,d2 muille rakennustuotteille kuin lattianpäällysteille ja A2<sub>FL</sub>-s1 ja D<sub>FL</sub>-s1 lattianpäällysteille (ei palavien pisaroiden ja osien luokkavaatimusta).

Palosuojaamattomat puutuotteet sijoittuvat yleensä euroluokkaan D edellyttäen, että tuotteella on riittävän suuri paksuus ( $\geq 9$  mm) ja tiheys ( $\geq 400$  kg/m<sup>3</sup>). Savuntuoton lisäluokka on tyypillisesti s1 tai s2. Palosuojauksella puutuotteen palo-ominaisuuksia on mahdollista parantaa siten, että tuote täyttää luokan C tai jopa luokan B vaatimukset. Palosuojauksen vaikutus savuntuottoon riippuu käytetyistä kemikaaleista ja menetelmistä.

Euroluokkajärjestelmän keskeisin palokoemenetelmä luokissa B, C ja D on standardin EN 13823 mukainen ns. SBI-koe (yksittäisen palavan esineen koe, engl. *single burning item test*) [11]. Sen lisäksi on suoritettava ns. pienen liekin testi standardin EN ISO 11925-2 mukaisesti [12]. Pienen liekin testin tulos ei puutuotteiden tapauksessa yleensä muuta SBI-kokeen antamaa luokitusta. Jos näin ollen pystytään ennustamaan SBI-kokeen tulos, voidaan myös tuotteen euroluokka ennakoita. Tämä on mahdollista standardin ISO 5660-1 mukaisen ns. kartiokalorimetrikokeen [13] tulosten perusteella [14, 15, 16]. Kartiokalorimetrin käytöllä tuotekehityksessä voidaan säästää aikaa ja kustannuksia, koska kartiokalorimetrikokeen näytekeho on vain 0,01 m<sup>2</sup>, kun taas SBI-

## 1. Johdanto

kokeeseen tarvitaan yli 2 m<sup>2</sup> testattavaa tuotetta. Virallista luokitusta varten vaaditaan kuitenkin SBI-koe ja pienen liekin testi.

### 1.4 Tavoitteet

Tämän esitutkimushankkeen tavoitteina oli

- 1) hankkia perustieto palosuoja-aineiden vaikutuksesta puun ja vanerin lyhyt- ja pitkäaikaislujuuteen. Tutkimuksessa määritettiin laboratoriossa tapahtuvien nopeutetuin kokein erityyppisten palosuojakemikaalien vaikutuksia puumateriaalien lujuuksiin. Tuloksia verrattiin USDA Forest Servicen saamiin tuloksiin. Alustavien mittausten ohella suoritettiin vanhennuskoe suuremmilla dimensioilla tarkoituksena kehittää matemaattinen malli lujuuden heikkenemisen enustamiseksi.
- 2) arvioida potentiaaliset menetelmät, joilla puurakenteiden palosuojaus voidaan tehdä kemiallisesti muita ominaisuuksia heikentämättä, kun kohteina ovat esimerkiksi ullakoiden ristikot ja massiiviset hallien puurakenteet.

## 2. Aineisto ja menetelmät

### 2.1 Puumateriaalit

Massiivipuiseksi koemateriaaliksi otettiin männyn pintapuu, koska se on helposti kylästettävää. Vaneritutkimuksiin päätettiin ottaa mukaan 15 mm:n paksuinen kuusivaneri, koska se on yleisesti käytetty aluskatemateriaali kattahuovan alla. Tässä tutkimuksessa yhtenä lähtökohtana oli selvittää vanerin kestävyys palosuojattuna tällaisessa kohteessa, sillä Yhdysvalloissa on raportoitu lukemattomia kattovaurioita em. rakenteissa. Myös massiivipuun ajateltu käyttökohde oli sateelta suojattu rakenne.

Sahatavaran hankkimiseksi kaksi VTT:n edustajaa kävi valitsemassa UPM-Kymmene Wood Oy:n Kaukaan sahalta hyvälaatuista, lähes oksatonta männyn pintapuuta. Sahatavaran dimensio oli 25 x 100 mm. Tutkimusta varten sahatavarat höylättiin mittaan 22 x 66 mm ja katkaistiin 1 250 mm:n pituisiksi. Rinnakkaiskappaleiden määräksi sovittiin 10 kpl.

Vanerikoemateriaaliksi haettiin Puukeskuksesta 3 kpl 15 mm paksua 5-ply-kuusi- vaneria mitoiltaan 1220 x 2440 mm. Vanereissa oli leima CE 0809-CPD-0252 UPM 06 EN133986 – EN 636-2 E1 78 1901 2147. Vanerit sahattiin pituussuunnassa 200 mm:n suikaleiksi (200 mm x 2440 mm) niin, että kylästettäväksi dimensioksi tuli 15 x 200 x 1 220 mm.

### 2.2 Palosuoja-aineet

Tässä projektissa otettiin tutkittaviksi seuraavat palosuoja-aineet:

- 1) BSM 2000 (kalium- ja natriumsitraattipohjainen), Oy Interenergy Ltd, Presso Center
- 2) Woodium Fire (orgaaninen fosfonaatti), Kemira Oyj
- 3) Vital Protect® (boraatti-booraksipohjainen), Sepa Oy.

Yritykset toimittivat 200 litraa kutakin palosuojakyllästettä VTT:lle vuoden 2006 loppupuolella.

## 2. Aineisto ja menetelmät

### 2.3 Kyllästyksset

Olosuhdekäsittelyjen määrä: Yhdellä palokyllästeellä käsiteltiin 4 x 10 kpl = 40 kpl.

Vanerikyllästyskappaleiden määrä 1 kpl, josta sahattiin 9 kpl.

Olosuhdekäsittelyjen määrä: 4.

Yhdellä palokyllästeellä käsiteltyjä vanerikoekappaleita oli siis kyllästyksen jälkeisen sahausken jälkeen: 4 x 9 kpl = 36 kpl, joista tehtiin eri olosuhteisiin menevät 9 kappa- leen lajitelmat. Myös sahatavarakappaleet mitattiin, punnittiin ja jaettiin mahdollisim- man samanlaisiin tiheysryhmiin kyllästystä varten.

Taulukko 1. Koekappaleet eri rasitusolosuhteisiin. Sarja 5 (pelkästään tasaannutetut) ei vaadi kyllästystä.

		Tunnus	Olosuhde 1	Olosuhde 2	Olosuhde 3	Olosuhde 4
1	Vesikyllästetty ja tasaannutettu	K	x	x	x	x
2	BSM-2000 –kyllästetty	BS	x	x	x	x
3	Vital Protect –kyllästetty	VP	x	x	x	x
4	Woodium Fire –kyllästetty	WF	x	x	x	x
5	Pelkästään tasaannutettu sarja	T	x			

**x = 10 kpl sahatavaraa ja 1 kpl vaneria sekä 2 kpl kartiokalorimetrikappaleita**

sahatavaradimensio	22 mm x 66 mm x 1250 mm
vaneridimensio	15 mm x 200 mm x 1220 mm
kartiokalorimetridimensio	10 mm x 22 mm x 240 mm (päätysuljettuja)

Kyllästyskaavana käytettiin seuraavaa:

Alkutyhjö ilman liuosta 40 min.

Pumppu pidetään käynnissä koko ajan liuosta imettäessä.

Paine 12 bar (1,2 MPa).

Paine 1 h, jonka jälkeen nesteet pois.

Lopputyhjö 20 min.

Boraatti-booraksipohjainen palosuoja-aine ei tunkeutunut puuhun kunnolla. Koekylläs- tyksen jälkeen päätettiin, että sen alkutyhjöaika kaksinkertaistettiin (1 h 20 min), samoin paineaika (2 h). Kyllästyksen jälkeen todettiin, että näin käsiteltyjen kappaleiden pinnal- le muodostui geelimäinen kerros, joka oli pestävä pois kappaleiden jatkokäsittelyn mahdollistamiseksi.

Kyllästyksset kalium- ja natriumsitraattipohjaisella aineella ja orgaanisella fosfonaatil- la tehtiin kuten vesikyllästys, mutta niitä jouduttiin laimentamaan, jottei haluttua reten- tiota ylitettäisi.

Tavoiteretentiot sekä masiivipuulle että vanerille:

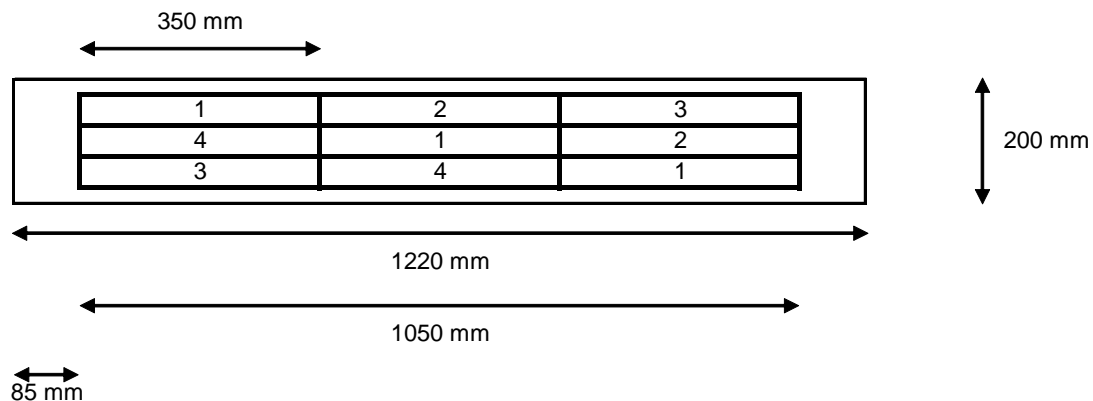
Vesi	650 kg/m <sup>3</sup>
Boraatti-booraksipohjainen	137 kg/m <sup>3</sup>
Kalium- ja natriumsitraattipohjainen	283 kg/m <sup>3</sup>
Orgaaninen fosfonaatti	170 kg/m <sup>3</sup>

Kyllästyksen jälkeen jokainen koekappale punnittiin. Tavarat varastoititiin olosuhteissa RH 65 %, T 20 °C, ja kuivattiin, kun kaikki kyllästyksesi oli tehty.

Kuivaus tapahtui Vanicek-puutavarakuivaamossa VTT:ssä. Yhteen kuivauskuormaan mahtuivat kahden kyllästyksen kaikki sahatavara- ja vanerikoekappaleet taivutus- ja kartiokalorimetrikokeita varten.

Ensimmäisessä erässä kuivattiin vedellä kyllästetyt ja boraatti-booraksipohjaisella palosuoja-aineella kyllästetyt kappaleet 58 °C:n lämpötilassa. Tavoitekosteutena oli 12 %, joka saavutettiin 140 tunnissa.

Toisessa erässä kuivattiin kalium- ja natriumsitraattipohjaisella aineella ja orgaanisella fosfonaatilla kyllästetyt kappaleet vastaavissa olosuhteissa. Kuivaus kesti 300 tuntia.



Kuva 1. Kyllästetyn vanerisuikaleen paloittelu taivutuskappaleiksi eri rasitusolosuhteisiin. Vane-ritaivutuskappaleen koko on 15 × 50 × 350 mm.

Sahatavara- ja vanerikappaleet vietiin kyllästyksen jälkeen tasaantumaan (20 ± 2) °C:n lämpötilaan ja RH (65 ± 5) %:n suhteelliseen kosteuteen. Kartiokalorimetrikappaleet tasaannutettiin vastaavasti (23 ± 2) °C:n lämpötilassa ja RH (50 ± 5) %:n suhteellisessa kosteudessa.

Puurakenteita koskevan standardin mukaan tasaantumisen katsottiin tapahtuneen, kun massan muutos 6 tunnissa on korkeintaan 0,1 % (EN 408, *timber structures – structural timber and glued laminated timber – determination of some physical and mechanical properties*). Kartiokalorimetrikokkappaleita ilmastoitiin, kunnes massan muutos 24 tunnin aikana oli enintään 0,1 % koekappaleen massasta tai 0,1 g [13].

## 2.4 Rasitusolosuhteet

Palosuoja-aineiden vaikutuksia rakenteellisiin ominaisuuksiin on tutkittu eniten Yhdysvalloissa, jossa ongelmat havaittiin 1980-luvulla. Tutkimuksissa on todettu, että korkea lämpötila aktivoi palosuoja-aineen ennenaikaisesti ja aiheuttaa happokatalysoidun kuivumisen, johon vaikuttavat varsinkin pH ja lämpötila. Tästä syystä koeolosuhteiksi valittiin seuraavat rasitusolosuhteet:

- 1) T 20 °C, RH 65 %: pelkkä tasaannutus
- 2) T 60 °C, RH 50 %: 3,5 kk
- 3) T 60 °C, RH 50 %: 7 kk
- 4) T 60 °C, RH 50 %: 7 kk + T 80 °C, RH 85 %: 2 kk.

Pidemmät altistusajat eivät olleet mahdollisia tämän projektin puitteissa. Tälläkin aikataululla analysointi, mallintaminen ja raportointi oli tehtävä nopeutetulla aikataululla.

Kussakin olosuhdekäsittelyssä testattiin kolme palokyllästettyä ja yksi vesikyllästetty koekappalesarja. Lisäksi testattiin pelkästään tasaannutettu vertailusarja ilman vesikyllästystä. Olosuhde 1:ssä oli siis viisi koesarjaa sekä sahatavaraa että vaneria. Sahatavaralla oli aina kymmenen rinnakkaista kappaletta eli yhteensä 170 koekappaletta ja vanerilla yhdeksän rinnakkaista kappaletta eli yhteensä 153 koekappaletta.

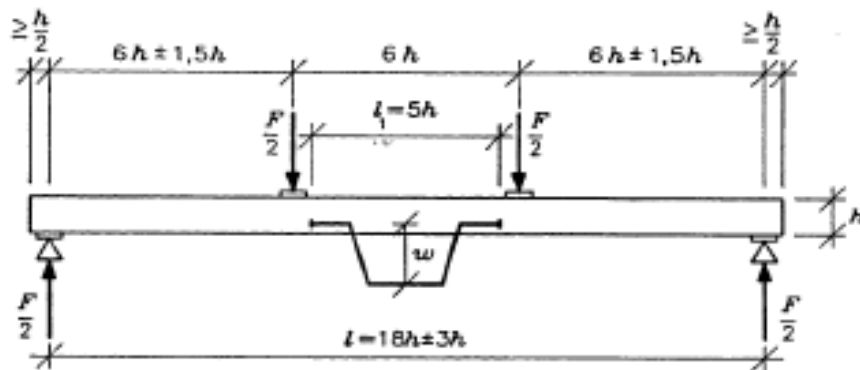
## 2.5 Koemenetelmät

### 2.5.1 pH:n määrittäminen

pH on vetyioniaktiivisuuden negatiivinen logaritmi, ja se ilmaisee liuoksen happamuuden. Sahatavaran taivutuskoekappaleista määritettiin pH-arvot pilkkomalla 15 g:n absoluuttisen kuivat puutikut, jotka laitettiin 400 ml:n dekantterilasiin. Tähän lisättiin 200 ml tislattua vettä. Seosta keitettiin 30 minuuttia. Keittämisen jälkeen neste erotettiin suodattamalla ja jäädytettiin 25 °C:een. Suodatteen pH-arvo mitattiin pH-mittarilla. Koe tehtiin Bisonwerke Laborkontrolle 740110/12 -ohjeen mukaan. Ohje perustuu standardiin ASTM E70–68 (menetelmäkuvaus N:o PUU/M/92).

### 2.5.2 Höylätyn sahatavaran taivutuskokeet

Höylätyn sahatavaran taivutuskokeet tehtiin standardin EN 408:2003 mukaisesti neljänpisteen taivutuksena.



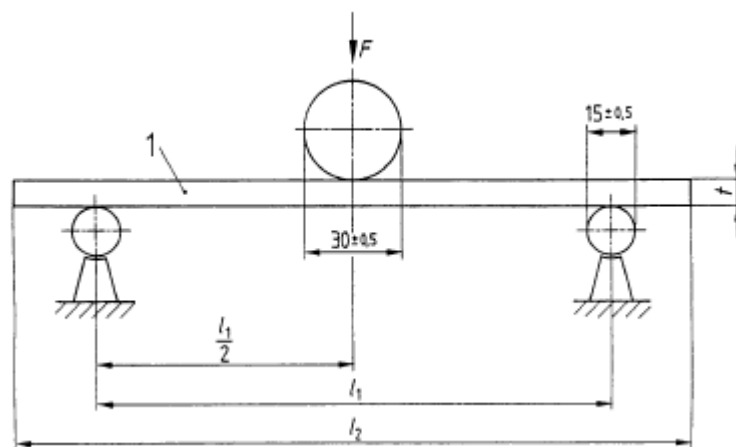
Kuva 2. Taivutuskoejärjestely standardin EN 408:2003 mukaisesti:  $h = 66 \text{ mm}$ ,  $l = 1176 \text{ mm}$ .

Koekappaleiden korkeus ja leveys mitattiin koekappaleen keskeltä. Jos koekappaleen keskialueella oli oksia, oksaisempi reuna asetettiin ylöspäin. Koekappaleen keskipisteen taipumaa mitattiin samanaikaisesti sekä jännevälin kokonaistaipumana (*global*) että kuvan 2 mukaisesti 330 mm:n mittaväliltä paikallisena keskialueen taipumana (*local*). Kuormitus toteutettiin siirtymäohjattuna painimen liikkeen ollessa 2 mm/min, jolloin kuormitusaika oli noin 300 s. Mittausdatan talletusväli oli 1 s. Koekappaleet kuormitettiin murtoon saakka.

Koejärjestely valokuvattiin, ja se on nähtävissä julkaisun kannessa. Jokainen erilainen murtotapa valokuvattiin ja jokaisesta koekappaleesta merkittiin ylös murtotapa.

### 2.5.3 Vanerin taivutuskokeet

Vanerin taivutuskokeet tehtiin standardin EN 310:1993 mukaisesti kolmenpisteen taivutuksena kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3. Standardin EN 310:1993 mukainen kolmenpisteen taivutuskoe.

## 2. Aineisto ja menetelmät

Taivutuslujuus laskettiin kaavasta 1:

$$\delta = \frac{3 \times P_{\max} \times L}{2 \times b \times h^2} \quad (1)$$

jossa

$\delta$  on taivutuslujuus ( $\text{N/mm}^2$ ),  
 $P_{\max}$  voima murtorajalla (N),  
 $L$  taivutuskappaleiden jänneväli (mm),  
 $b$  taivutuskappaleiden leveys (mm) ja  
 $h$  taivutuskappaleiden paksuus (mm).

Kimmomoduuli laskettiin kaavasta 2:

$$E = \frac{kk \times L^3}{4 \times b \times h^3} \quad (2)$$

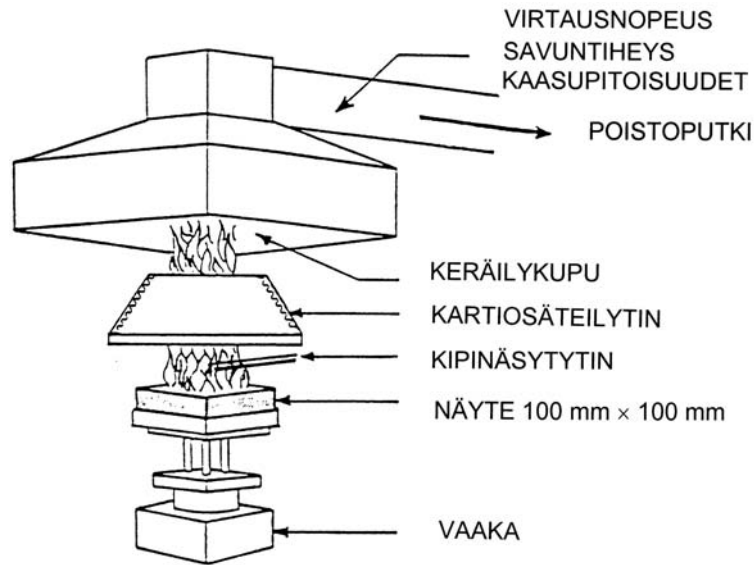
jossa

$E$  on kimmomoduuli ( $\text{N/mm}^2$ ),  
 $kk$  koestuksesta saatu kulmakerroin ( $\text{N/mm}$ ),  
 $L$  taivutuskappaleiden jänneväli (mm),  
 $b$  taivutuskappaleiden leveys (mm) ja  
 $h$  taivutuskappaleiden paksuus (mm).

### 2.5.4 Kartiokalorimetrikokeet

Koekappaleiden palo-ominaisuudet määritettiin käyttäen ISO 5660 -standardin [13] mukaista palotestilaitteistoa, ns. kartiokalorimetriä. Kartiokalorimetrikoe on pienen mitakaavan palotesti, jolla voidaan tutkia testattavan tuotteen lämmöntuoton kehittymistä sen altistuessa säteilyrasitukselle. Laitteiston pääosat ovat kartionmuotoinen lämpösäteilijä, kipinäsytytin, vaaka, näytteenpidin ja savukaasujen keräys- ja poistojärjestelmä. Kuva 4 esittää kartiokalorimettilaitteistoa.





Kuva 4. Kartiokalorimetrin kaavakuva.

Kartiokalorimetrikokeessa tutkittavan näytteen pinta-ala on  $100 \times 100$  mm ja paksuus enintään 50 mm. ISO 5660 -standardin mukaisessa kokeessa näytteenpitimeen sijoitettu näyte asetetaan vaakasuoraan kartiosäteilijän alle. Näytteen asento voi olla vaakasuora tai pystysuora, joista vaakasuora asento on standarditestauksessa tavallisempi. Näytteestä vapautuvat palamistuotteet virtaavat kartiosäteilijän yläosassa olevan aukon läpi keräilykupuun ja poistoputkeen, josta otetaan kaasunäyte analysoitavaksi. Tärkeimmät mitaukset ovat näytteen syttymisaika, massahäviö ja paloteho, joka lasketaan mitatun hapenkulutuksen perusteella. Kartiokalorimetrikokeissa on mahdollista tehdä myös savun tuottomittaus laitteiston poistoputkessa olevan savun aiheuttaman valon vaimenemisen perusteella.

Kaikki tämän projektin kartiokalorimetrikokeet suoritettiin näytteen ollessa vaakasuorassa asennossa säteilyvuon tiheydellä  $50 \text{ kW/m}^2$ . Näytteen reunoja suojasi metallikehä. Kullekin koekappaletyypille suoritettiin kaksi rinnakkaiskoetta.

## 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

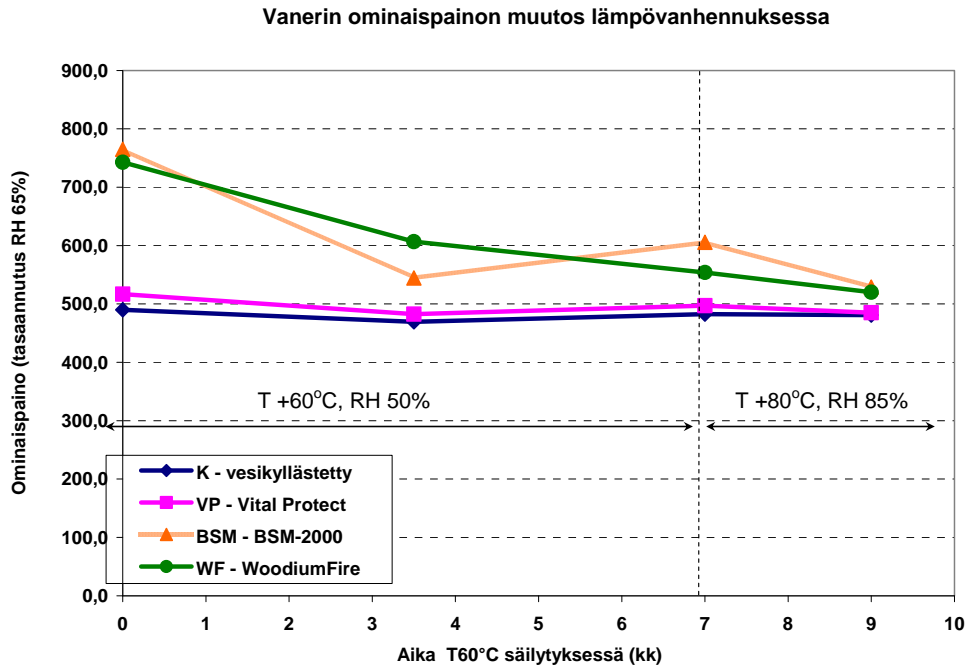
### 3.1 Kyllästämäärät, tasapainokosteudet ja pH-arvot

Tasapainokosteudet olivat sitä suurempia, mitä enemmän palosuoja-ainetta puussa oli ainetyypistä riippumatta. Koekappaleiden todellisten palokyllästämäärien laskenta osoitti, että Vital Protect® -kyllästettä ei ollut saatu menemään haluttua määrää (tavoite  $132 \text{ kg/m}^3$ ), vaikka kyllästyksessä oli käytetty kaksinkertaisia aikoja (alkutyhjö 1 h 20 min ja paineaika 2 h). VP:n retentio jäi sahatavaralla  $11 \text{ kg/m}^3$ :iin. BSM 2000:n retentio oli  $240 \text{ kg/m}^3$  (tavoite  $283 \text{ kg/m}^3$ ) ja Woodium Firen  $207 \text{ kg/m}^3$  (tavoite  $180 \text{ kg/m}^3$ ).

Tasapainokosteuksien muutokset ovat selvät palosuojakyllästetyillä koekappaleilla. Myös vesikyllästetyssä sarjassa on nähtävissä hysteresis-ilmiön aiheuttama tasapainokosteuden lisääntyminen. Vanerilla retentiot olivat Vital Protect®  $27 \text{ kg/m}^3$ , BSM 2000  $224 \text{ kg/m}^3$  ja Woodium Fire  $200 \text{ kg/m}^3$ .

Koesarjan 1 (vain tasaannutetut) sahatavaran taivutuskoekappaleista määritettiin pH-arvot luvussa 2.5.1 esitetyllä menetelmällä. Vertailumännyn ja Woodium Fire -näytteen pH oli 4,3, vesikyllästetyt 4,2 ja BSM-2000:n 5,6 sekä Vital Protectin 7,2.

Vanerin tasapainokosteudet alenivat kaikissa koesarjoissa lähelle kyllästämätöntä ja rasittamatonta vertailusarjaa, jopa hieman sen alapuolelle. Palosuoja-aineen poishuutoutumisen lisäksi tämä selittyy hysteresis-ilmiöllä. Kun lämpötila on  $+60 \text{ °C}$  ja suhteellinen kosteus RH 50 %, on puun tasapainokosteus 7,14 %. Kun tasaannutus nyt tehdään olosuhteissa, joissa lämpötila on  $+20 \text{ °C}$  ja suhteellinen kosteus RH 65 %, lähestytään tasapainokosteutta kuivemmalta puolelta. Käsittelemättömän ja rasittamattoman puun tasapainokosteus siinä tilassa on 12 %. Palosuoja-aineet voimistavat hysteresis-ilmiötä.

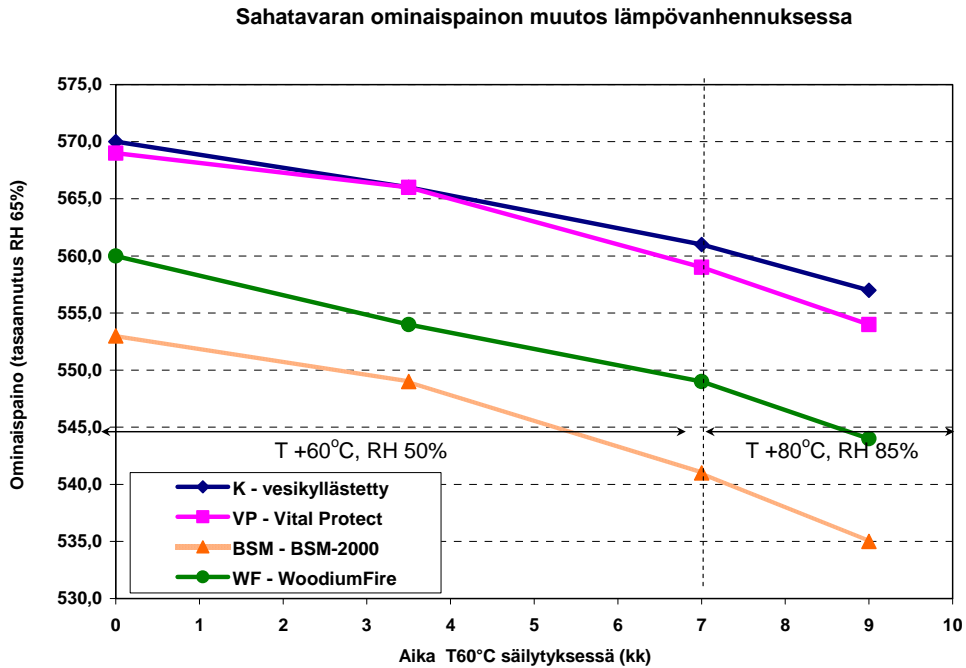


Kuva 5. Eri palosuoja-aineilla kyllästettyjen havuvaneri-kappaleiden ominaispainot (tasaannutus RH 65 %, T +22 °C).

Palosuojakyllästeestä oli huuhtoutunut vallinneissa rasitusolosuhteissa kolmasosa BSM:llä ja WF:llä. VP oli pysynyt puussa. Suolaa oli myös tullut runsaammin sahatavaran pintaan WF- ja BSM-koekappaleissa rasituksen seurauksena. VP-kappaleissa ei ollut suolakertymiä. Tasapainokosteus on laskenut lähelle kyllästämättömän vertailukappaleen kosteutta kuten sahatavarallakin, mutta ei aivan niin paljon. Se taas johtuu vanerin liimaukseen käytetystä fenoliformaldehydiliimasta, joka on hygroskooppista.

Höylätyllä palosuojakyllästetyllä sahatavaralla tiheyden muutokset rasituksen aikana ovat erittäin pieniä. Tiheyden lasku on vain 2–3 %. Kyllästetyillä kappaleilla tiheyden lasku ei poikkea vesikyllästettyjen koekappaleiden tiheyden muutoksista.

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu



Kuva 6. Eri palosuoja-aineilla kyllästettyjen höylättyjen sahatavarakappaleiden ominaispainot (tasaannutus RH 65 %, T +22 °C).

## 3.2 Taivutuskokeet

Taivutuskokeiden tulokset on esitetty taulukkomuodossa liitteessä A. Yhteenveto koe-sarjakohtaisista taivutuslujuuksien ja kimmomoduulien keskiarvoista ja niiden muutok-sista on esitetty taulukoissa 2–4 ja kuvissa 7–10.

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Taulukko 2. Sahatavaran taivutuskokeet: taivutuslujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat.

Koesarja	Taivutuslujuus / Olosuhde 1			Taivutuslujuus / Olosuhde 2 (3,5 kk)		
	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$f_m/f_{m,T}$	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$f_m/f_{m,T}$
T - tasaannutettu	<b>75,3</b>	6 %	-	-	-	-
K - vesikyllästetty	80,3	8 %	1,07	89,5	11 %	1,19
VP - Vital Protect	82,9	12 %	1,10	97,3	15 %	1,29
BSM - BSM 2000	62,8	15 %	0,83	60,1	14 %	0,80
WF - Woodium Fire	68,7	14 %	0,91	84,4	16 %	1,12
Koesarja	Taivutuslujuus / Olosuhde 3 (7 kk)			Taivutuslujuus / Olosuhde 4 (9 kk)		
	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$f_m/f_{m,T}$	$f_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$f_m/f_{m,T}$
K - vesikyllästetty	82,8	16 %	1,10	76,0	12 %	1,01
VP - Vital Protect	94,5	14 %	1,26	81,2	18 %	1,08
BSM - BSM 2000	63,9	14 %	0,85	64,5	12 %	0,86
WF - Woodium Fire	82,8	14 %	1,10	58,2	24 %	0,77

Taulukko 3. Sahatavaran taivutuskokeet: kimmomoduulien keskiarvot ja keskihajonnat.

Koesarja	Kimmomoduuli / Olosuhde 1			Kimmomoduuli / Olosuhde 2 (3,5 kk)		
	$E_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$E_m/E_{m,T}$	$E_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$E_m/E_{m,T}$
T - tasaannutettu	<b>14800</b>	13 %	-	-	-	-
K - vesikyllästetty	16200	15 %	1,09	15110	17 %	1,02
VP - Vital Protect	16800	12 %	1,14	16430	12 %	1,11
BSM - BSM 2000	13900	17 %	0,94	11510	19 %	0,78
WF - Woodium Fire	14700	14 %	0,99	15490	11 %	1,05
Koesarja	Kimmomoduuli / Olosuhde 3 (7 kk)			Kimmomoduuli / Olosuhde 4 (9 kk)		
	$E_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$E_m/E_{m,T}$	$E_m$ (N/mm <sup>2</sup> )	var	$E_m/E_{m,T}$
K - vesikyllästetty	16750	17 %	1,13	15300	13 %	1,03
VP - Vital Protect	16950	13 %	1,15	15730	16 %	1,06
BSM - BSM 2000	13780	15 %	0,93	12820	16 %	0,87
WF - Woodium Fire	17090	11 %	1,15	14020	10 %	0,95

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

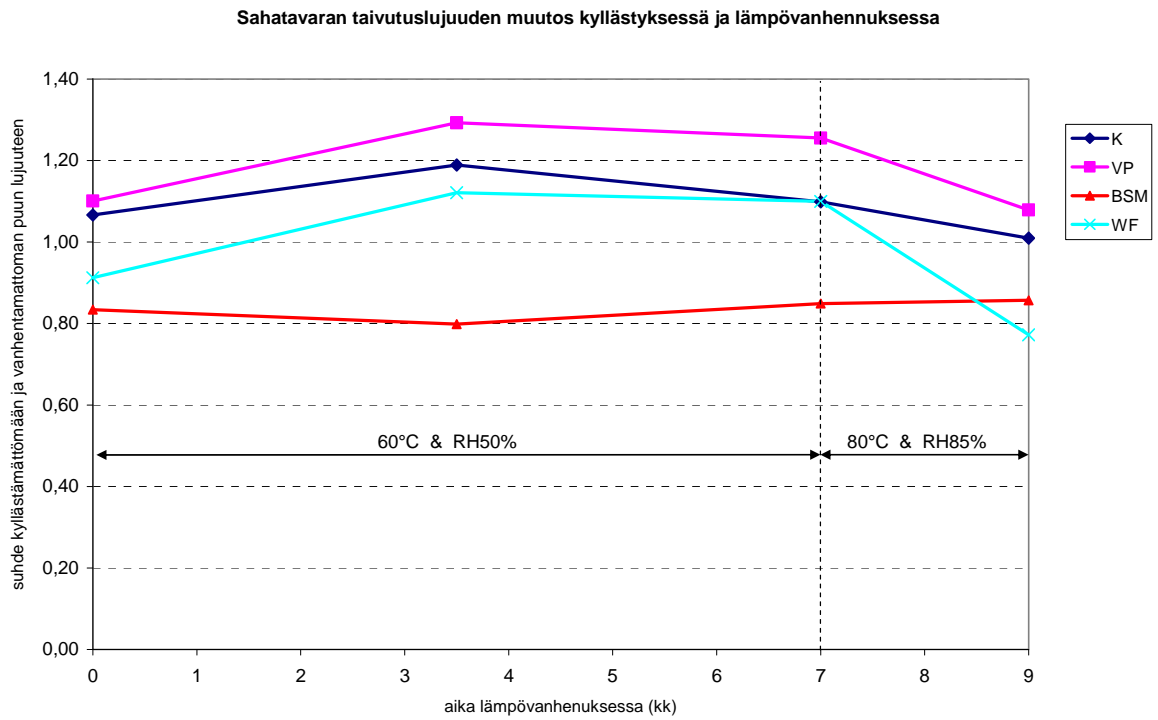
Taulukko 4. Vanerin taivutuskokeet: taivutuslujuuksien keskiarvot ja keskihajonnat.

Koesarja	Taivutuslujuus / Olosuhde 1			Taivutuslujuus / Olosuhde 2 (3,5 kk)		
	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>
T - tasaannutettu	45,8	20 %				
K - vesikyllästetty	40,2	10 %	0,88	43,9	3 %	0,96
VP - Vital Protect	41,3	16 %	0,90	48,6	8 %	1,06
BSM - BSM-2000	46,0	12 %	1,00	48,0	13 %	1,05
WF - WoodiumFire	41,1	5 %	0,90	57,8	13 %	1,26
Koesarja	Taivutuslujuus / Olosuhde 3 (7 kk)			Taivutuslujuus / Olosuhde 4 (9 kk)		
	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>
T - tasaannutettu						
K - vesikyllästetty	38,0		0,83	30,1	16 %	0,66
VP - Vital Protect	38,8		0,85	32,8	12 %	0,72
BSM - BSM-2000	40,3		0,88	38,0	10 %	0,83
WF - WoodiumFire	47,4		1,03	34,3	10 %	0,75

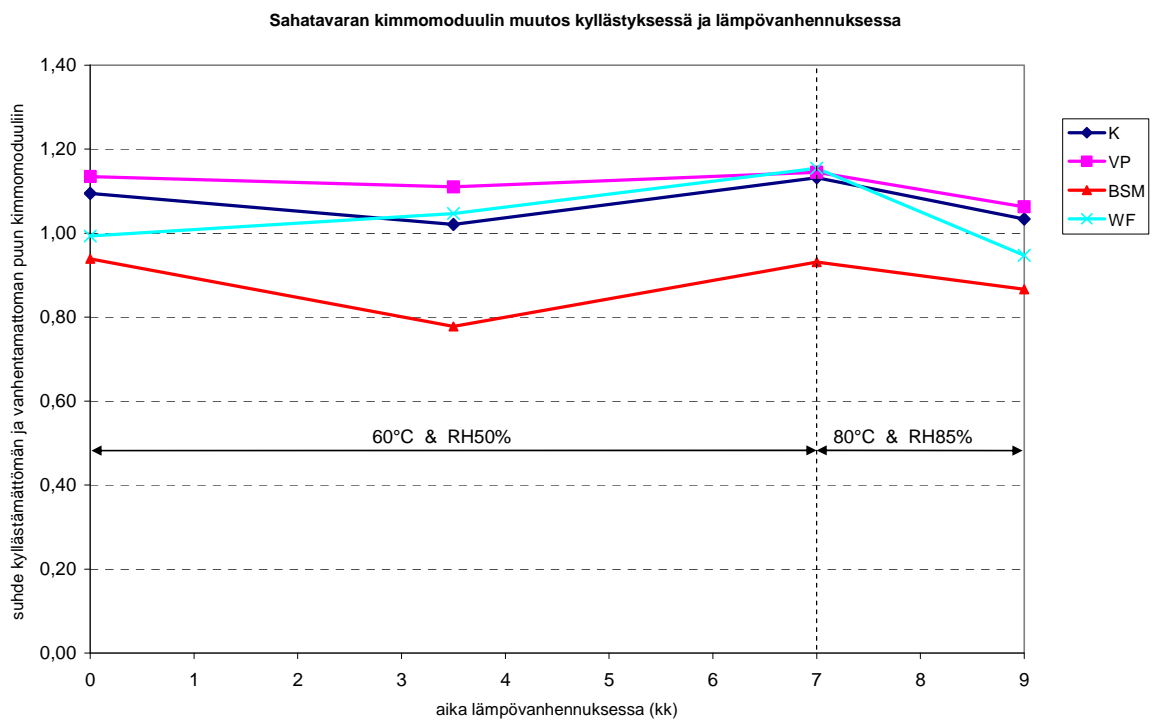
Taulukko 5. Vanerin taivutuskokeet - kimmomoduulien keskiarvot ja keskihajonnat.

Koesarja	Kimmomoduuli / Olosuhde 1			Kimmomoduuli / Olosuhde 2 (3,5 kk)		
	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>
T - tasaannutettu	6257	14 %	-	-	-	-
K - vesikyllästetty	5007	13 %	0,80	6144	4 %	0,98
VP - Vital Protect	5343	12 %	0,85	7052	13 %	1,13
BSM - BSM-2000	6280	11 %	1,00	7095	10 %	1,13
WF - WoodiumFire	5847	9 %	0,93	9084	10 %	1,45
Koesarja	Kimmomoduuli / Olosuhde 3 (7 kk)			Kimmomoduuli / Olosuhde 4 (9 kk)		
	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>	N/mm <sup>2</sup>	var	f <sub>m</sub> /f <sub>m,T</sub>
T - tasaannutettu	-					
K - vesikyllästetty	4773		0,76	3367	18 %	0,54
VP - Vital Protect	5429		0,87	3411	19 %	0,55
BSM - BSM-2000	5748		0,92	5186	15 %	0,83
WF - WoodiumFire	6822		1,09	4313	19 %	0,69

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

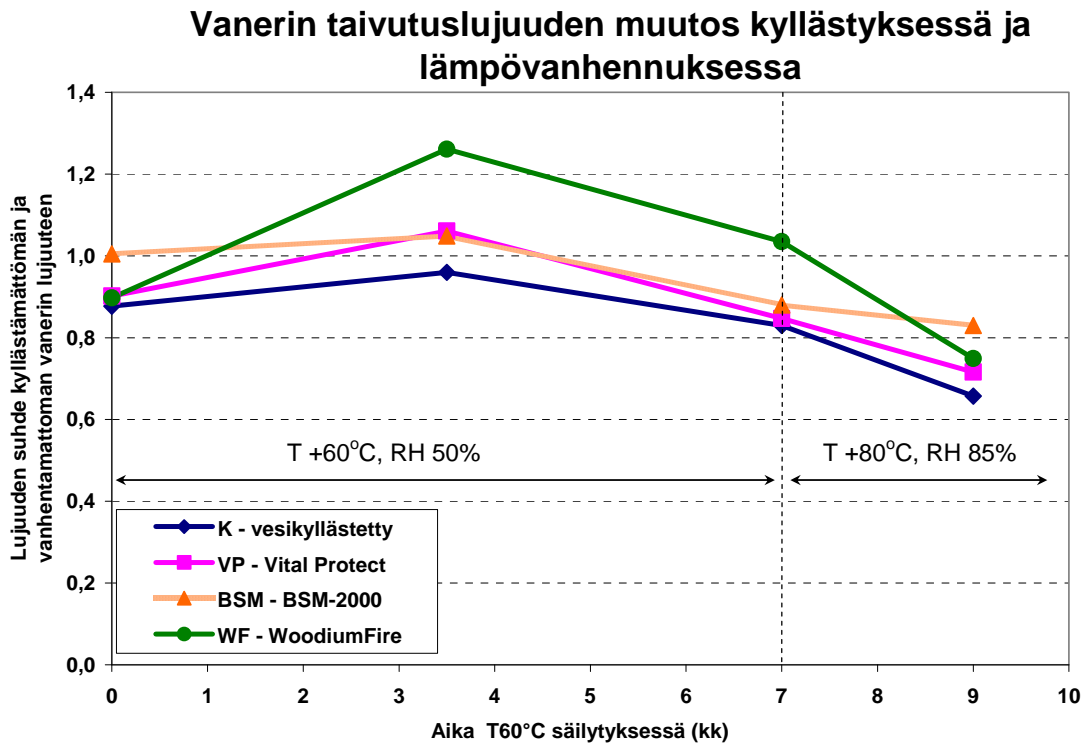


Kuva 7. Sahatavaran taivutuskokeet – taivutuslujuuksien muutokset.

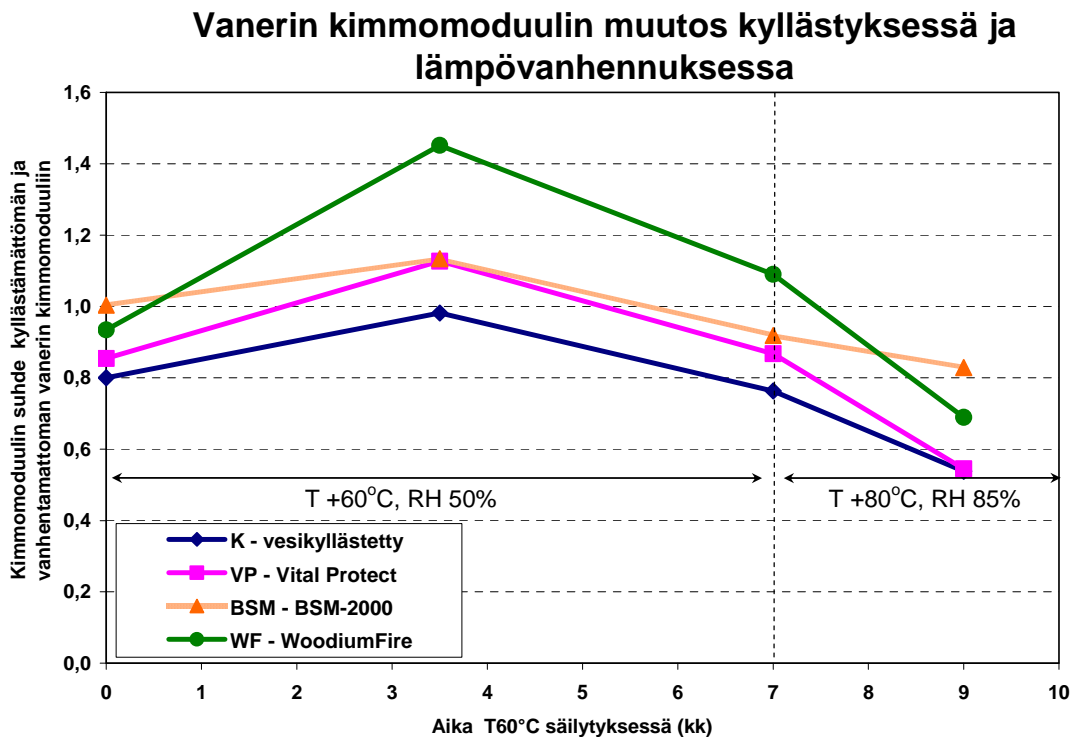


Kuva 8. Sahatavaran taivutuskokeet – kimmomoduulien muutokset.

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu



Kuva 9. Vanerin taivutuskokeet – taivutuslujuuksien muutokset.



Kuva 10. Vanerin taivutuskokeet – kimmomoduulien muutokset.



### 3.3 Lujuustulosten tarkastelua

#### 3.3.1 Höylätty sahatavara

Ennen olosuhderasitusta tehdyissä taivutuskokeissa murtuminen tapahtui yleensä yläreunan puristusmurtona. Pelkästään tasaannutetussa (T) sarjassa kaikki murtumat olivat puristusmurtumia, ja palosuojakyllästetyistä koekappaleista 30 %:lla murtumistapa oli alareunan vetomurto. BSM 2000 ja Woodium Fire -kyllästettyjen kappaleiden taivutuslujuus oli selkeästi pienempi kuin vertailuryhmän (T). Tämä johtuu ainakin osittain palokyllästyksen vuoksi kohonneesta tasapainokosteudesta ja siitä johtuvista dimensioiden muutoksista. Nimellisdimensiolla lasketut lujuudet em. sarjoissa ovat BSM 2000:lla 6,2 N/mm<sup>2</sup> ja Woodium Firella 5,4 N/mm<sup>2</sup> suuremmat kuin todellisilla mitoilla lasketut lujuudet. Vital Protect -kyllästys ei heikentänyt taivutuslujuutta. Kimmomoduuleihin kyllästyksellä ei ollut oleellista vaikutusta.

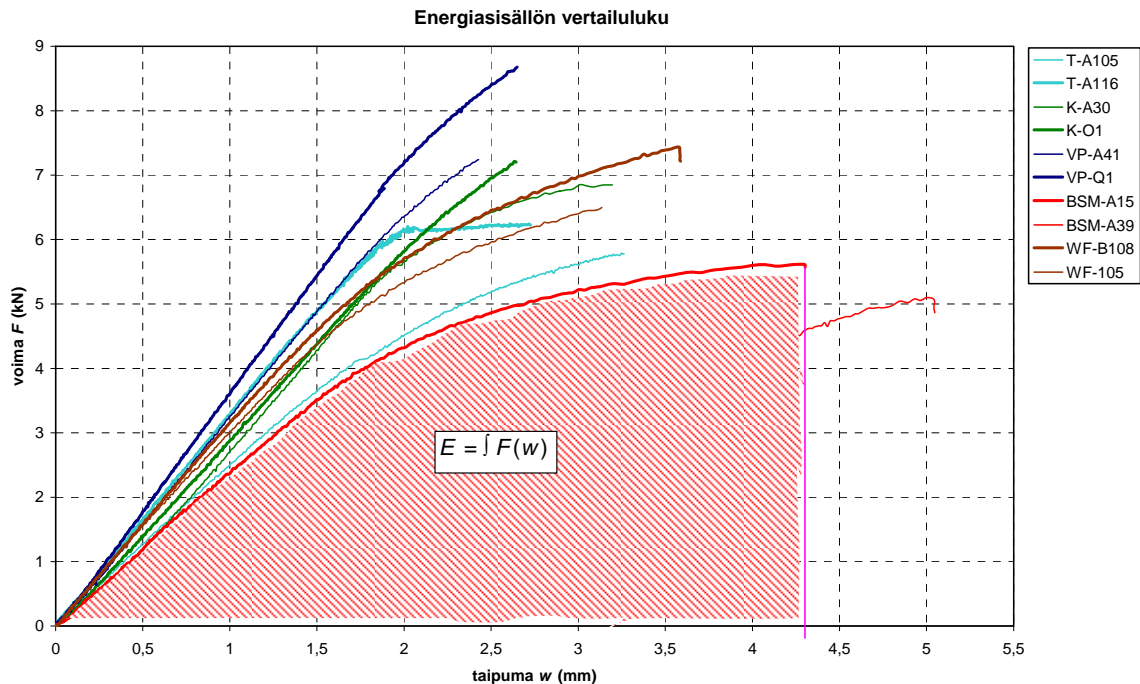
Lämpörasituksella T = +60°C (RH50 %) ei ollut taivutuslujuutta tai kimmomoduulia heikentävää vaikutusta, eikä rasituksen jatkaminen 3,5 kuukaudesta 7 kuukauteen vaikuttanut tuloksiin. Vital Protectilla ja Woodium Firellä kyllästetyillä koekappaleilla tämä lämpörasitus jopa paransi taivutuslujuutta. Vanhennuksen aiheuttamat lujuuden parantumiset selittyvät hystereesi-ilmiön vuoksi alentuneella tasapainokosteudella. BSM 2000:lla kyllästetyillä koekappaleilla ei tapahtunut muita koesarjoja vastaavaa tasapainokosteuden pienentymistä, eikä vanhentaminen tämän vuoksi vaikuttanut taivutuslujuuteen.

Lämpörasituksen seurauksena vetomurrot yleistyivät, mutta puristusmurto oli edelleen vallitseva murtotapa (ks. liite A). Eniten vetomurtoja esiintyi vesikyllästyksellä ja Vital Protectilla käsitellyllä puulla. BSM 2000:n yhteydessä puristusmurto säilyi vanhennuskäsittelyjenkin jälkeen selkeästi vallitsevana: 80 % koekappaleista murtui puristuspuolelta.

Vital Protect kyllästyksellä saatua virheettömän puun taivutuslujuuden paranemista voidaan pitää jo tilastollisestikin merkittävänä: 10 % heti kyllästyksen jälkeen ja noin 25 % lämpövanhennukseen T = 60 °C yhdistettynä. Viitteitä taivutuslujuuden paranemisesta booripohjaisten palosuoja-aineiden yhteydessä on saatu myös pohjoisamerikkalaisissa tutkimuksissa [3].

Murtotavan sitkeyden vertailemiseksi taivutuskokeiden energiasisällöt määriteltiin kahdesta tyypillisestä olosuhde 2 -sarjan (3,5 kk lämpörasitus) kokeesta per koesarja. Kyseisten kokeiden voima-siirtymäkuvaajat on esitetty kuvassa 11. Energiasisällön vertailuluvut määritettiin integroimalla voima-siirtymäriippuvuus kuvassa esitetyllä tavalla. Lasketut energiasisällöt on esitetty taulukossa 6. Tuloksista voidaan päätellä, että tutkitut palosuoja-aineet eivät lisää taivutusmurrin haurautta – pikemminkin päinvastoin. BSM:llä ja WF:llä on tapahtunut sitkistymistä; VP:llä sen sijaan lievää haurastumista.

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu



Kuva 11. Taivutuskokeiden voima-siirtymäriippuvuuksia (*local*-taipuma) ja energiasisällön vertailuvun määrittäminen.

Taulukko 6. Lasketut energiasisältöjen keskiarvot ja niiden perusteella määritetty murtotapojen sitkeysjärjestys (BSM sitkein ja VP haurain).

Koesarja	Kyllästys	Olosuhterastitus	E (J)	Sitkeys
T	kyllästämätön	-	1,13	4.
K	vesikyllätys	60°C 3,5 kk	1,16	3.
VP	Vital Protect	60°C 3,5 kk	1,09	5.
BSM	BSM 2000	60°C 3,5 kk	1,69	1.
WF	Woodium Fire	60°C 3,5 kk	1,47	2.

Viimeisille koesarjoille tehty 2 kk:n lisävanhennus ankarissa lämpö- ja kosteusolosuhteissa (80 °C ja RH85 %) ei vaikuttanut kimmomoduuleihin eikä BSM 2000:lla kyllästettyjen koekappaleiden taivutuslujuuteen mutta heikensi selkeästi vedellä, Woodium Firellä ja Vital Protectillä käsiteltyjen koekappaleiden taivutuslujuutta. Tämän rasituksen jälkeen murtotavat olivat hauraampia ja vetomurrosta tuli kaikissa koesarjoissa vallitseva murtotapa. Lujuuden heikkenemiset voidaan kuitenkin pitkälti selittää hystereesistä johtuneesta suuremmasta tasapainokosteudesta, kun koekappaleet tasaannutettiin nyt kosteammasta tilasta kuivempaan. BSM 2000 -aineella käsitellyillä koekappaleilla tätä ilmiötä ei esiintynyt – tasapainokosteus oli käytännössä sama kuin aikaisemmissa koesarjoissa.

Yhteenvetona voidaan todeta, että tutkitut palosuoja-aineet eivät aiheuta pitkäaikaiseen lämpörasitukseen yhdistettynäkään niin merkittäviä muutoksia sahatavaran taivutuslujuuteen tai kimmomoduuliin, että se tulisi erikseen ottaa suunnittelussa huomioon. Määritetyt taivutuslujuuden muutokset selittyvät palosuoja-aineiden aiheuttamilla puun tasapainokosteuksien muutoksilla. BSM 2000 -palosuoja-aineen yhteydessä tasapainokosteuden kasvu oli merkittävintä, mutta sen vaikutus kompensoituu, jos suunnittelussa käytetään kyllästämättömän poikkileikkauksen nimellismittoja. Mikäli rakennesuunnittelussa käytetään kyllästyksen ja sitä seuranneen kuivauksen jälkeisiä ”turvonnetta” mittoja, BSM 2000:lla kyllästetyn lujuuslajitellun sahatavaran taivutuslujuutta tulisi pienentää tehtyjen kokeiden perusteella 20 % ja kimmomoduulia vastaavasti 15 %.

Tutkitut palosuoja-aineet eivät lisänneet puun happamuutta. Pohjois-Amerikassa havaitut merkittävät lujuuden heikentymiset ovat koskeneet palosuoja-aineita, jotka ovat alentaneet puun pH:ta [3, 9]. Tämän tutkimuksen perusteella ei ole syytä epäillä, että Suomessa käytännön rakenteissa esiintyvät suurimmatkaan lämpötilat aiheuttaisivat palosuoja-aineella käsitellyn puun lujuuden tai jäykkyyden heikentymistä, jos puun pH-pitoisuus on kyllästyksenkin jälkeen vähintään 4,2.

#### 3.3.2 Vaneri

Varianssi on vanerikokeissa suurempi kuin sahatavaralla. Tulosten vertaamisen helpottamiseksi tuloksista poistettiin oksaiset ja vinosyiset koekappaleet. Hysteresis-ilmiöstä ja vesikyllästyksen aiheuttamasta kokoonpuristuman palautumasta (*spring-back*) johtuen myös koekappaleiden paksuus suurentui ja sitä kautta taivutuslujuus pienentyi.

Kosteus- ja lämpörasituksessa taivutuslujuus ja -kimmomoduuli on lisääntynyt kaikilla käsittelyillä ja oli rasituksen jälkeisissä kokeissa vesikyllästystä lukuun ottamatta suurempi kuin käsittelemättömällä ja vanhentamattomalla vanerilla. Kyllästyksen seurauksenahan sekä taivutuslujuus että -kimmomoduuli olivat pienentyneet VP:llä ja WF:llä 10 % ja pysynyt ennallaan BSM:llä.

Kosteus- ja lämpörasituksessa taivutuslujuus ja -kimmomoduuli on lisääntynyt ensin kaikilla käsittelyillä 3,5 kuukauden rasituksen jälkeen. Rasituskokeita jatkettaessa molemmat suureet alkoivat laskea kaikilla käsittelyillä. Kaikissa tapauksissa muutokset olivat suurimmat vesikyllästetyissä kontrollivanereissa. Palosuojakyllästeistä eniten muutoksia lujuusarvoissa aiheutti Woodium Fire -käsittely.

#### 3.4 Palokokeet

Kartiokalorimetrikokeet suoritettiin sahatavaranäytteille kunkin rasitusolosuhteen mukaisen lämpökäsittelyn jälkeen. Ennen kokeita näytteet ilmastoitiin vakiomassaan lämpötilassa ( $23 \pm 2$ ) °C ja suhteellisessa kosteudessa RH ( $50 \pm 5$ ) %. Kullekin näytetyypille suoritettiin kaksi rinnakkaiskoetta säteilyvuon tiheydellä  $50 \text{ kW/m}^2$ . Tämän tutkimuk-

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

sen kannalta kiinnostavimmat koetulokset olivat koekappaleiden syttymisaika ja lämmöntuotto. Myös savuntuotto mitattiin.

Koekappaleiden syttyvyys- ja lämmöntuottotulokset palosuoja-aineittain eri rasitusten jälkeen esitetään taulukoissa 7–10. Kartiokalorimetrikokeissa mitatut lämmöntuottokäyrät esitetään kuvissa 12–15. Rasitusolosuhteet olivat seuraavat:

- 1) T 20 °C, RH 65 %: pelkkä tasaannutus
- 2) T 60 °C, RH 50 %: 3,5 kk
- 3) T 60 °C, RH 50 %: 7 kk
- 4) T 60 °C, RH 50 %: 7 kk + T 80 °C, RH 85 %: 2 kk.

Taulukoissa 7–10 käytetyt lyhenteet ovat seuraavat:

ka = keskiarvo

$t_{ig}$  = syttymisaika

$HRR_{max,300s}$  = lämmöntuottonopeuden maksimi kokeen ensimmäisten 300 s ajalta

$HRR_{max}$  = lämmöntuottonopeuden maksimi koko kokeen ajalta

THR = kokonaislämmöntuotto.

Taulukko 7. Vesikyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden kartiokalorimetrikokeiden syttyvyys- ja lämmöntuottotulokset eri rasitusolosuhteiden jälkeen.

Olosuhde	Koe	$t_{ig}$ (s)	$HRR_{max,300s}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$HRR_{max}$ (kW/m <sup>2</sup> )	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	Huom.
1	1	25	148	210	137	
	2	25	157	162	119	
	ka	25	152	186	128	
2	1	28	165	200	123	
	2	17	160	162	117	
	ka	23	163	181	120	
3	1	26	–	–	–	a)
	2	18	–	–	–	a)
	ka	22				
4	1	25	71	104	89	
	2	21	169	184	128	
	ka	23	120	144	109	

a) epäluotettava lämmöntuottomittaus

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Taulukko 8. BSM 2000 -palosuoja-aineella kyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden kartiokalorimetrikokeiden syttyvyys- ja lämmöntuottotulokset eri rasisolosuhteiden jälkeen.

Olosuhde	Koe	$t_{ig}$ (s)	$HRR_{max,300s}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$HRR_{max}$ (kW/m <sup>2</sup> )	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	Huom.
1	1	28	48	48	41	b)
	2	31	65	65	40	
	ka	30	57	57	41	
2	1	38	47	47	42	
	2	90	52	61	59	
	ka	64	49	54	50	
3	1	60	–	–	–	a) a)
	2	86	–	–	–	
	ka	73	–	–	–	
4	1	72	68	101	97	
	2	39	86	105	102	
	ka	56	77	103	100	

a) epäluotettava lämmöntuottomittaus

b) sammui t = 38 s, syttyi uudelleen t = 65 s

Taulukko 9. Vital Protect -palosuoja-aineella kyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden kartiokalorimetrikokeiden syttyvyys- ja lämmöntuottotulokset eri rasisolosuhteiden jälkeen.

Olosuhde	Koe	$t_{ig}$ (s)	$HRR_{max,300s}$ (kW/m <sup>2</sup> )	$HRR_{max}$ (kW/m <sup>2</sup> )	THR (MJ/m <sup>2</sup> )	Huom.
1	1	63	70	146	74	
	2	50	73	111	62	
	ka	57	71	128	68	
2	1	29	66	169	84	
	2	25	61	179	93	
	ka	27	63	174	88	
3	1	37	–	–	–	a) a)
	2	58	–	–	–	
	ka	48	–	–	–	
4	1	19	115	129	91	
	2	19	127	127	101	
	ka	19	121	128	96	

a) epäluotettava lämmöntuottomittaus

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Taulukko 10. Woodium Fire -palosuoja-aineella kyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden kartiokalorimetrikokeiden syttyvyys- ja lämmöntuottotulokset eri rasitusolosuhteiden jälkeen.

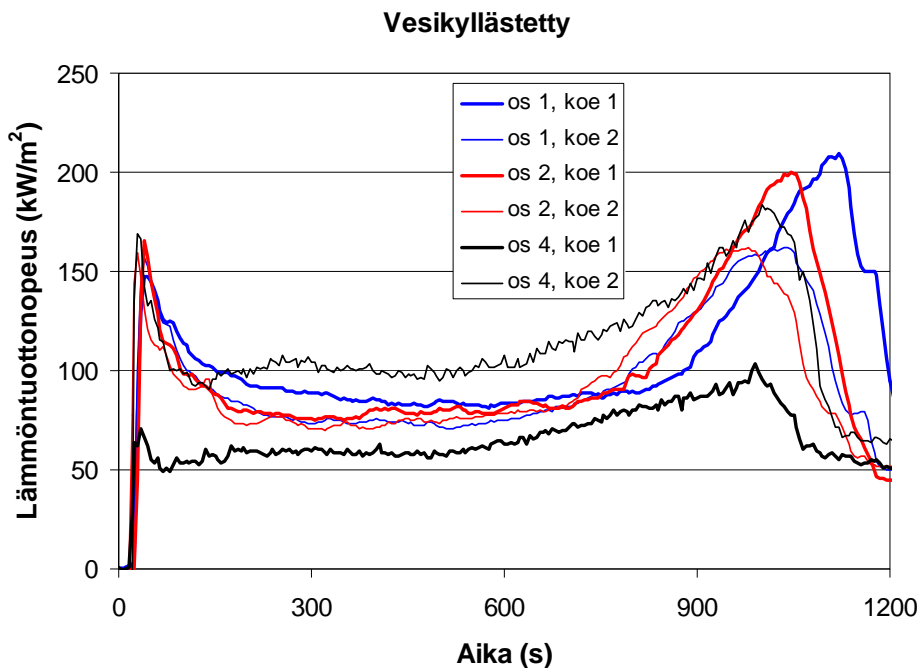
Olosuhde	Koe	$t_{ig}$ (s)	$HRR_{max,300s}$ ( $kW/m^2$ )	$HRR_{max}$ ( $kW/m^2$ )	THR ( $MJ/m^2$ )	Huom.
1	1	ei sytt.	6	11	8	c)
	2	ei sytt.	5	10	8	c)
	ka		6	11	8	
2	1	21	18	18	< 10	d)
	ka	ei sytt.	–	–	< 10	c), e)
3	1	ei sytt.	–	–	–	a), c)
	ka	ei sytt.	–	–	–	a), c)
4	1	19	196	202	130	
	2	16	137	137	105	
	ka	18	167	170	118	

a) epäluotettava lämmöntuottomittaus

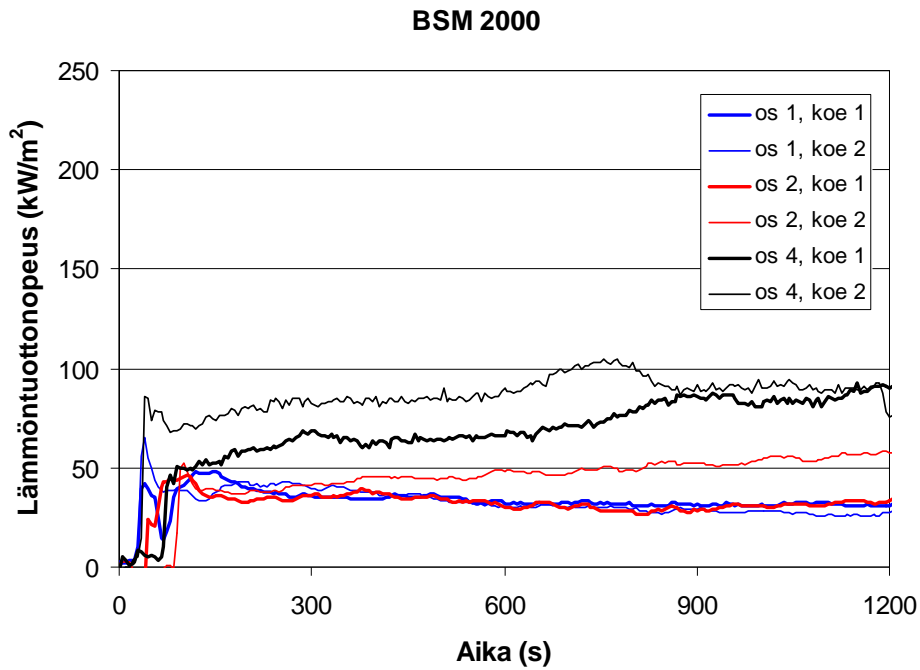
c) näyte ei syttynyt 20 min kestäneessä  $50 kW/m^2$ :n säteilyaltistuksessa

d) sammui  $t = 28$  s, ei syttynyt uudelleen

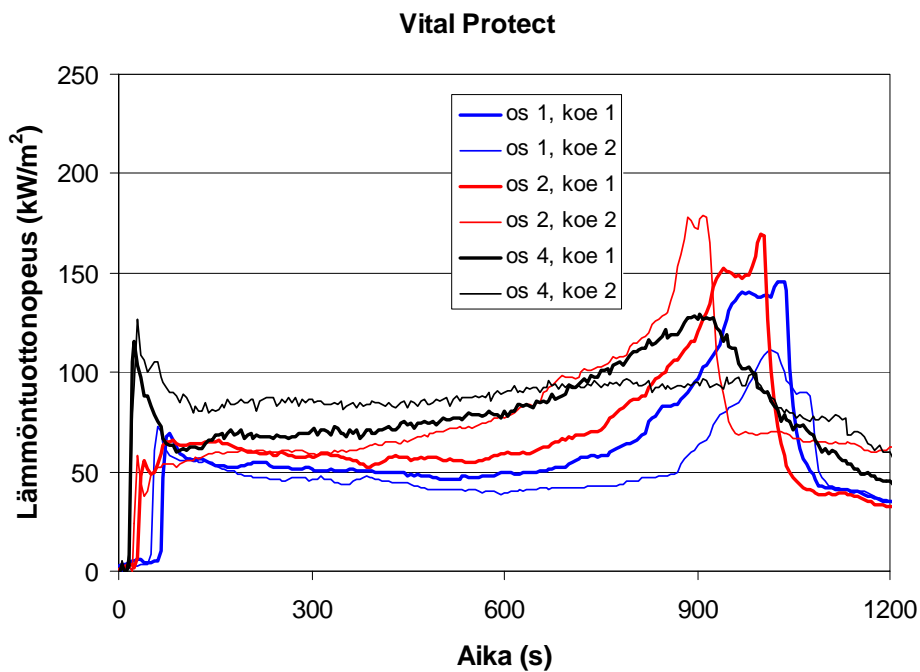
e) häiriö lämmöntuottomittauksessa



Kuva 12. Vesikyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden lämmöntuotto nopeus kartiokalorimetrikokeissa eri rasitusolosuhteiden jälkeen (os = olosuhde).

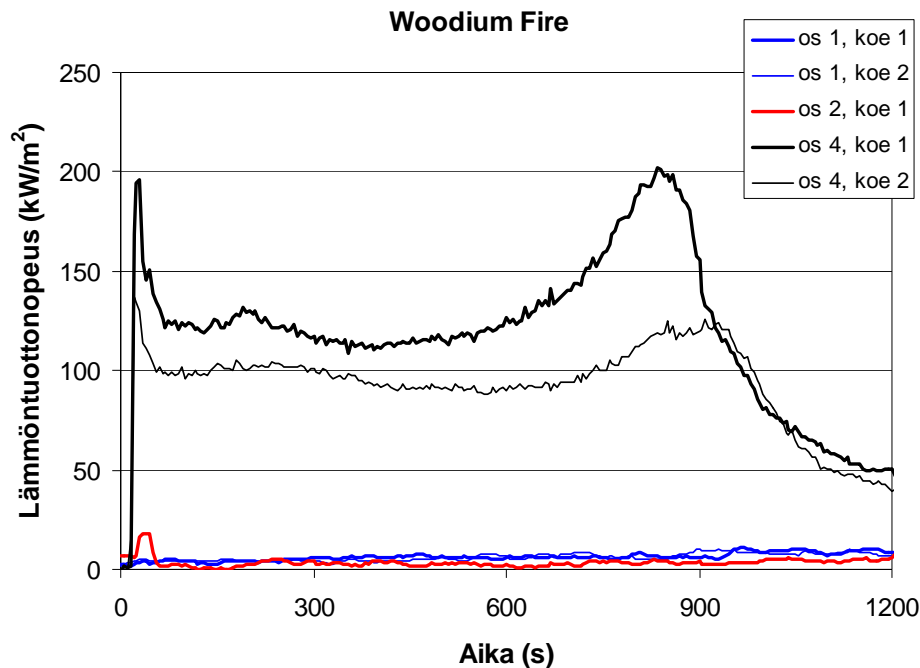


Kuva 13. BSM 2000:lla kyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden lämmöntuotto nopeus kartio-  
kalorimetrikokeissa eri rasitusolosuhteiden jälkeen (os = olosuhde).



Kuva 14. Vital Protectilla kyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden lämmöntuotto nopeus kartio-  
kalorimetrikokeissa eri rasitusolosuhteiden jälkeen (os = olosuhde).

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu



Kuva 15. Woodium Firella kyllästettyjen sahatavarakoekappaleiden lämmöntuottoisuus kartio-kalorimetrikokeissa eri rasitusolosuhteiden jälkeen (os = olosuhde).

#### Olosuhde 1) T 20 °C, RH 65 %: pelkkä tasaannutus

Vesikyllästetyille sahatavaranäytteille mitattiin palosuojaamattomille puutuotteille tyyppillisiä kaksihuippuisia lämmöntuottokäyriä, joiden ensimmäinen maksimi oli noin 150 kW/m<sup>2</sup> ja toinen suuruusluokkaa 200 kW/m<sup>2</sup>. Näytteet syttyivät 25 sekunnin kuluttua säteilyaltistuksen alkamisesta. Kaikki tutkitut palosuojakyllästeet paransivat selvästi puun palo-ominaisuuksia.

BSM 2000 -näytteiden lämmöntuottoisuus oli melko tasainen tasolla 30–40 kW/m<sup>2</sup> lukuun ottamatta kokeen alkuvaiheessa mitattua maksimiarvoa, joka oli vain noin kolmannes palosuojaamattoman näytteen maksimista. BSM 2000 -näytteiden syttymisaika oli keskimäärin 30 sekuntia, siis samaa suuruusluokkaa kuin vesikyllästetyillä näytteillä. Merkillepantavaa oli, että toinen näytteistä sammui itsestään 10 sekunnin palamisen jälkeen mutta syttyi uudelleen puolisen minuuttia myöhemmin ulkoisen säteilyrasituksen jatkuessa.

Vital Protect -näytteiden syttymisaika oli kaksinkertainen verrattuna vesikyllästettyihin näytteisiin, keskimäärin 57 sekuntia. Lämmöntuottoisuuskyyrät olivat samantyyppisiä kuin BSM 2000 -näytteillä lukuun ottamatta kokeen loppuvaiheen selkeätä lämmöntuottoisuuden kasvua. Palosuojaamattomaan puuhun verrattuna lämmöntuottoisuus oli huomattavasti pienempi.



Woodium Fire -näytteiden käyttäytyminen kokeissa poikkesi täysin muista näytteistä. Koekappaleet eivät syttyneet 20 minuuttia kestäneen säteilyaltistuksen aikana ( $50 \text{ kW/m}^2$ ), ja lämmöntuotto jäi hyvin vähäiseksi. Tämä viittaa siihen, että tuotteella on mahdollisuudet täyttää luokan B vaatimukset rakennustuotteiden eurooppalaisessa paloluokitusjärjestelmässä. Vertailun vuoksi todettakoon, että palosuojaamattomat puutuotteet sijoittuvat yleensä luokkaan D edellyttäen, että tuotteen tiheys ja paksuus ovat riittävän suuret.

Rinnakkaiskokeiden toistettavuus oli melko hyvä kaikilla näytetyypeillä.

#### **Olosuhde 2) T 60 °C, RH 50 %: 3,5 kk**

Kolmen ja puolen kuukauden lämpörasituksella 60 °C:n lämpötilassa ja RH 50 %:n kosteudessa ei ollut vaikutusta vesikyllästetyn sahatavaran palo-ominaisuuksiin. Sekä syttymisaika että lämmöntuotto olivat samaa suuruusluokkaa kuin pelkän tasaannutuksen jälkeen.

BSM 2000:lla tai Vital Protectilla kyllästettyjen sahatavaranäytteiden lämmöntuotto-  
tasot eivät muuttunut olennaisesti olosuhteen 2 mukaisessa lämpörasituksessa. Syttymisajoissa tapahtui muutoksia. BSM 2000 -näytteillä syttymisajan keskiarvo kaksinkertaistui 30 sekunnista 64 sekuntiin. On kuitenkin huomattava, että kahden rinnakkaisen näytteen syttymisaikojen (38 s ja 90 s) välillä oli merkittävä ero. Vital Protect -näytteillä tapahtunut muutos oli päinvastainen: syttymisajan keskiarvo puolittui 57 sekunnista 27 sekuntiin.

Woodium Fire -näytteistä toinen käyttäytyi olosuhteen 2 lämpörasituksen jälkeen samoin kuin pelkästään tasaannutetut näytteet (olosuhde 1), mutta toisella näytteellä havaittiin lyhytaikainen liekehtivä palo. Syttymisaika oli 21 sekuntia, jonka jälkeen näyte paloi 7 sekunnin ajan ja sammui itsestään. Uutta syttymistä ei tapahtunut ulkoisen säteilyrasituksen vaikutuksesta 20 minuutin aikana. Lämmöntuotto jäi molemmilla Woodium Fire -näytteillä varsin alhaiseksi.

#### **Olosuhde 3) T 60 °C, RH 50 %: 7 kk**

Olosuhteen 3 mukaisen lämpörasituksen jälkeen suoritettujen kartiokalorimetrikokeiden tulosten tulkintaa vaikeuttavat happipitoisuuden mittauksessa esiintyneet tekniset ongelmat, joiden vuoksi lämmöntuottotulokset eivät ole luotettavia. Näytteiden palo-ominaisuuksia voidaan kuitenkin arvioida syttymisaikojen ja savuntuottomittauksen tulosten perusteella.

Vesikyllästetyn sahatavaran syttymisaika ei olennaisesti muuttunut olosuhteen 3 mukaisessa rasituksessa. Myös savuntuotto oli samankaltainen ja -tasoinen kuin olosuhteen 1 ja 2 jälkeen tehdyissä kokeissa.

### 3. Tulokset ja tulosten tarkastelu

Koekappaleiden syttymisajat olosuhteen 3 rasiuksen jälkeen olivat BSM 2000:lla kyllästetyillä näytteillä samaa suuruusluokkaa ja Vital Protectilla kyllästetyillä näytteillä keskimäärin 20 sekuntia pidemmät kuin olosuhteen 2 rasiuksen jälkeen. Savuntuotossa ei tapahtunut merkittäviä muutoksia.

Woodium Fire -kyllästetyt näytteet eivät syttyneet 20 minuuttia kestäneen säteilyaltistuksen aikana ( $50 \text{ kW/m}^2$ ) olosuhteen 3 lämpörasituksen jälkeen. Näidenkin näytteiden savuntuotto oli samankaltainen kuin olosuhteen 2 rasiuksen jälkeen testatuilla Woodium Fire -näytteillä.

Käytävissä olevien tulosten perusteella voidaan arvioida, että lämpörasitusajan kaksinkertaistaminen 3,5 kuukaudesta 7 kuukauteen ei todennäköisesti ole aiheuttanut huomattavan suurta muutosta näytteiden lämmöntuottokäyttäytymiseen.

#### **Olosuhde 4) T 60 °C, RH 50 %: 7 kk + T 80 °C, RH 85 %: 2 kk**

Olosuhdetta 3 vastaavan lämpörasituksen jälkeen olosuhteen 4 koekappaleet altistettiin vielä kahden kuukauden ajan poikkeuksellisen korkealle lämpötilalla (80 °C) ja suhteelliselle kosteudelle (85 %). Käytännössä rakenteiden altistuminen tällaisille olosuhteille Suomessa on varsin epätodennäköistä.

Vesikyllästettyjen koekappaleiden syttymisaika ei olosuhteen 4 vaikutuksesta olennaisesti muuttunut. Lämmöntuoton suhteen rinnakkaiskokeet poikkesivat toisistaan: toisella koekappaleella (koe 2) lämmöntuotto muistutti aikaisempien koesarjojen tuloksia vesikyllästetyille sahatavaralle, mutta toisen koekappaleen (koe 1) lämmöntuottotasoa oli tuntemattomasta syystä poikkeuksellisen alhainen.

BSM 2000:lla ja Vital Protectilla kyllästettyjen koekappaleiden lämmöntuottotasot olivat olosuhteen 4 vaikutuksesta nousseet selvästi mutta olivat edelleen alempia kuin palosuojaamattomalle puulle tyypilliset arvot. Syttymisaika oli BSM 2000 -näytteillä keskimäärin 56 sekuntia, mutta rinnakkaiskokeiden välillä oli huomattava ero. Vital Protect -näytteiden syttymisaika oli huomattavan lyhyt, vain 19 sekuntia.

Merkittävin muutos palo-ominaisuuksissa olosuhteen 4 vaikutuksesta tapahtui Woodium Firella kyllästetyillä näytteillä. Olosuhteiden 1–3 jälkeen tehdyissä kokeissa Woodium Fire -näytteet eivät yhtä poikkeusta lukuun ottamatta syttyneet lainkaan 20 minuuttia kestäneessä säteilyrasituksessa säteilyvuon tiheydellä  $50 \text{ kW/m}^2$ . Olosuhteen 4 jälkeen molemmat näytteet syttyivät alle 20 sekunnissa. Toinen näytteistä (koe 1) tuotti lämpöä palosuojaamattoman puun tavoin ja toinenkin (koe 2) huomattavassa määrin, noin 70 % rinnakkaiskokeen tasosta. Palosuojauksella saavutettu etu siis menetettiin näytteiden altistuessa kahden kuukauden ajan poikkeuksellisen korkealle lämpötilalle ja kosteudelle.

### 3.4.1 Savuntuotosta

Kartiokalorimetrikokeissa mitattu savuntuotto oli suhteellisen vähäistä kaikkien rasitusolosuhteiden jälkeen vesikyllästetyille sekä BSM 2000:lla ja Vital Protectilla kyllästyille sahatavaranäytteille. Näiden näytteiden savuntuottoarvot olivat palosuojaamattomille puutuotteille tyypillisellä tasolla koesarjoissa, jotka tehtiin olosuhteiden 1–3 jälkeen. Olosuhteen 4 jälkeen tehdyissä kokeissa savua muodostui jonkin verran enemmän, mutta rinnakkaiskokeiden tulokset olivat melko vaihtelevia.

Woodium Firella kyllästettyjen näytteiden savuntuotto oli muihin näytteisiin verrattuna noin kolminkertainen olosuhteiden 1–3 jälkeen. Rungas savuntuotto liittyy siihen, että Woodium Firella kyllästetyillä näytteillä ei esiintynyt liekehtivää paloa kolmessa ensimmäisessä koesarjassa yhtä lyhytaikaista syttymää lukuunottamatta. ”Huonosti palaville” puupohjaisille näytteille on usein tyypillistä runsas savuntuotto. Olosuhteen 4 jälkeen tehdyissä kokeissa Woodium Fire -näytteet syttyivät, ja sen myötä savuntuotto-taso aleni hiukan. Myös näiden näytteiden tapauksessa kahden rinnakkaiskokeen tulokset poikkesivat toisistaan.

### 3.4.2 Yhteenveto kartiokalorimetrikokeista

Vesikyllästettyjen näytteiden syttyvyys ja lämmöntuotto eivät olennaisesti muuttuneet erilaisten lämpörasitusten vaikutuksesta. Eri palosuoja-aineilla kyllästetyn sahatavaran palo-ominaisuudet sen sijaan muuttuivat näytteiden altistuessa erilaisille lämpötila- ja kosteusolosuhteille.

Palosuojattujen näytteiden syttyvyystulokset eri rasitusolosuhteiden jälkeen olivat vaihtelevia. BSM 2000- ja Vital Protect -näytteillä syttymisajat vaihtelivat koesarjasta toiseen ilman selkeätä riippuvuutta altistusolosuhteista. Rinnakkaiskokeiden tulokset poikkesivat toisistaan varsinkin BSM 2000:lla. Woodium Fire -näytteiden syttyvyudessa tapahtui perinpohjainen muutos rankimman rasitusolosuhteen vaikutuksesta (ei syttymää kokeen aikana → suhteellisen lyhyt syttymisaika).

Kun rasitusolosuhteen lämpötila oli 60 °C ja suhteellinen kosteus 50 %, palosuojattujen koekappaleiden lämmöntuotossa ei vielä havaittu merkittäviä muutoksia. Lämpötilan noustessa 80 °C:seen ja suhteellisen kosteuden 85 %:iin, lämmöntuottotaso nousi kaikilla palosuojatuilla koekappaleilla. Merkittävin nousu tapahtui Woodium Fire -palosuoja-aineella kyllästetyillä näytteillä: muutamasta kW/m<sup>2</sup>:sta palosuojaamattoman puun tasolle.

## 4. Päätelmät ja suositukset

Puurakenteiden eurooppalaisen suunnitteluohjeen EN 1995-1-1:2004 (Eurokoodi 5) luvun 4.1 mukaan biologisen kestävyuden parantamiseksi käytettävien suojakäsittelyjen vaikutus lujuus- ja jäykkyysominaisuuksiin on otettava huomioon. Vastaava vaatimus tulee luonnollisesti esittää myös palosuojakäsittelyille. Koska säilyvyyden parantamiseen käytettävien kyllästysaineiden yhteydessä ei ole käytössä vakiintunutta menetelmää lujuus- ja jäykkyysvaikutusten todentamiseen, seuraavassa esitettävä suositus soveltuu noudatettavaksi myös lahontorjunta-aineiden yhteydessä.

Tämän esitutkimuksen perusteella suositellaan, että kantavien puurakenteiden yhteydessä käytettävät uudet palosuojakyllästeet testataan vähintään seuraavalla menettelyllä:

- 1) Määritetään kyllästetyn puun pH-pitoisuus.
- 2) Määritetään RH65 tasaannutuksen jälkeen kyllästetyn puun tasapainokosteus ja taivutuslujuus EN 408:n mukaisesti käyttäen vertailusarjana vastaavaa kyllästämätöntä puuta (esimerkiksi tässä tutkimuksessa noudatettu ”olosuhde 1:n” mukaiset koekappaleet).

Jos kohdassa 2 havaitaan sellaista lujuuden tai jäykkyyden alentumista, joka ei vastaa tasapainokosteuden muutosten aiheuttamia poikkileikkausmittojen muutoksia, tulee koheikentymiset ottaa rakennesuunnittelussa aina erikseen huomioon esimerkiksi kaikkia lujuusarvoja koskevalla pienennyskertoimella. Tasapainokosteuden muutoksista johtuvia lujuus- ja jäykkyysominaisuuksien heikentymisiä ei tarvitse ottaa huomioon, jos suunnittelussa käytetään kyllästystä edeltäviä nimellismittoja eikä poikkileikkauksia työstetä kyllästyksen jälkeen.

Mikäli kyllästetyn puun pH on alle 4,2, tulee palosuoja-aineen yhteydessä tehdä lisäksi lämpövanhennuskokeet esim. amerikkalaista standardia ASTM/ANSI D5664 soveltaen. Lämpövanhennuskokeiden perusteella voidaan määrittää rakennesuunnittelussa käytettävät lujuuden ja kimmomoduulin pienennyskertoimet.

Palosuoja-aineen mahdollinen korrosoiva vaikutus puurakenteissa käytettäviin metalliliittimiin tulee myös ottaa huomioon. Palosuoja-aine voi sisältää korroosiota kiihdyttäviä suoloja tai orgaanisia tehoaineita. Korrosioalttiutta lisää myös palosuoja-aineesta

johtuva suurempi puun tasapainokosteus. Ellei palosuoja-aineen korrosoivia vaikutuksia selvitetä erikseen, henkilöturvallisuuteen liittyvien kantavien puurakenteiden liittosuunnittelussa suositellaan käyttöluokittain seuraavaa menettelyä:

- käyttöluokassa 1 noudatetaan EN 1995-1-1:ssä (Eurokoodi 5) ko. liittimelle esitettyä käyttöluokan 2 korroosiosuojausta
- käyttöluokassa 2 noudatetaan EN 1995-1-1:ssä ko. liittimelle esitettyä käyttöluokan 3 korroosiosuojausta
- käyttöluokassa 3 käytetään vain ruostumattomasta teräksestä valmistettuja liittimiä ja liitososia.

## Lähdeluettelo

1. LeVan, S., Collet, M. Choosing and applying fire-retardant treated plywood and lumber for roof designs. U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 1989. (General Technical Report FPL-GTR-62.)
2. Winandy, J. E., LeVan, S., Ross, R. J., Hoffman, S. P., McIntyre, C. R. Thermal degradation of fire-retardant-treated plywood. U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 1991. (Research Paper FPL-RP-501.)
3. LeVan, S., Ross, R. J., Winandy, J. E. Effects of fire retardant chemicals on the bending properties of wood at elevated temperatures. U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 1990. (Research Paper FPL-RP-498.)
4. Wang, Q., Wang, W., Winandy, J. E. Effects of a new GUP-B fire retardant on mechanical properties of Korean pine when exposed to elevated temperature. *Forest Products Journal* 55 (12). 2005. S. 214–220.
5. Laufenberg, T., Ayrilmis, N., White, R. Fire and bending properties of blockboard with fire retardant treated veneers. *Holz als Roh- und Werkstoff* 64 (2). 2006. S. 137–143 (verkköjulkaisu vuonna 2005).
6. Winandy, J. E. Thermal degradation of fire-retardant-treated wood: Predicting residual service life. *Forest Products Journal* 51 (2). 2001. S. 47–54.
7. Winandy, J. E. Effects of fire retardant treatments after 18 months of exposure at 150 °F (66 °C). U. S. Department of Agriculture, Forest Products Laboratory. 1995. (Research Note FPL-RN-0264.)
8. Winandy, J. E. Effects of fire retardant retention, borate buffers, and redrying temperature after treatment on thermal-induced degradation. *Forest Products Journal* 47 (6). 1997. S. 79–86.
9. Lebow, S. T., Winandy, J. E. Effect of fire-retardant treatment on plywood pH and the relationship of pH to strength properties. *Wood Science and Technology* 33. 1999. S. 285–298.
10. E1 Suomen rakentamismääräyskokoelma. Rakennusten paloturvallisuus. Määräykset ja ohjeet 2002. Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto, 2002. 40 s.
11. EN 13823. Reaction to fire tests for building products – Building products excluding floorings exposed to the thermal attack by a single burning item. Brussels: European Committee for Standardization, 2002. 95 s.
12. EN ISO 11925-2. Reaction to fire tests – Ignitability of building products subjected to direct impingement of flame – Part 2: Single-flame source test (ISO 11925-2:2002). Brussels: European Committee for Standardization, 2002. 28 s.

13. ISO 5660-1. Reaction-to-fire tests – Heat release, smoke production and mass loss rate – Part 1: Heat release rate (cone calorimeter method). Geneva: International Organization for Standardization. Second edition. 2002-12-15. 39 s.
14. Hakkarainen, T. & Kokkala, M. A. Application of a one-dimensional thermal flame spread model on predicting the rate of heat release in the SBI test. *Fire and Materials*, 2001. Vol. 25, No. 2, s. 61–70.
15. Hakkarainen, T. Rate of heat release and ignitability indices in predicting SBI test results. *Journal of Fire Sciences*, 2001. Vol. 19, No. 4, s. 284–305.
16. Östman, B., Tsantaridis, L. Mikkola, E., Hakkarainen, T., Belloni, K., Brumer, H. & Piispanen, P. Innovative eco-efficient high fire performance wood products for demanding applications. Final report for Vinnova-Tekes project InnoFireWood. Stockholm: SP Swedish National Testing and Research Institute, 2006. 94 s. (SP REPORT 2006:30.)





# Liite A: Taivutuskokeiden tulokset

Olosuhde 1: Pelkkä tasaannutus / Sahatavara

Sarja	Koe- kpl  no	Paksuus  mm	Leveys  mm	Tiheys n. 12 %  kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Taivutusmurtotapa
					Lujuus  N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	
T	A16	22,0	65,7	538	81,4	16300	14900	Puristusmurto
T	A43	21,8	66,5	571	74,2	16000	14800	Puristusmurto
T	A57	21,8	66,5	568	80,4	13600	13100	Puristusmurto
T	A60	21,9	65,9	489	72,0	13400	14100	Puristusmurto
T	A67	21,9	65,8	602	68,7	12800	12200	Puristusmurto
T	A78	21,9	65,8	530	76,2	14300	13600	Puristusmurto
T	A105	21,7	65,3	581	73,0	13100	12700	Puristusmurto
T	A116	22,0	65,6	585	77,4	17200	15300	Puristusmurto
T	B54	21,9	65,5	546	70,2	12900	12200	Puristusmurto
T	C117	22,0	65,8	608	79,2	18000	16000	Puristusmurto
<b>T</b>	<b>mean</b>	21,9	65,8	562	<b>75,3</b>	<b>14760</b>	13890	
T	stdv	0,09	0,40	36,35	4,34	1939	1340	
T	var	0,4 %	0,6 %	6,5 %	5,8 %	13,1 %	9,6 %	

Sarja	Koe- kpl  no	Paksuus  mm	Leveys  mm	Tiheys n. 12 %  kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Taivutusmurtotapa
					Lujuus  N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	
K	A10	21,9	65,1	643	81,4	21700	18300	Puristusmurto
K	A44	21,9	64,9	616	74,2	17800	15600	Puristusmurto
K	A52	21,7	65,2	597	80,4	17800	16100	Puristusmurto
K	B15	22,0	65,5	585	72,0	15000	14600	Puristusmurto
K	A17	21,9	64,9	573	68,7	16000	14900	Puristusmurto
K	A28	21,9	65,1	563	76,2	14600	14500	Puristusmurto
K	I2	21,8	64,9	553	73,0	15500	15300	Puristusmurto
K	M1	21,9	65,4	537	77,4	15200	13500	Puristusmurto
K	C75	22,1	65,1	525	70,2	13900	12800	Vetomurto
K	B69	22,0	65,4	506	79,2	14100	13600	Puristusmurto
K	<b>mean</b>	21,9	65,2	570	<b>75,3</b>	<b>16160</b>	14920	
K	stdv	0,11	0,22	42,02	4,34	2371	1562	
K	var	0,5 %	0,3 %	7,4 %	5,8 %	14,7 %	10,5 %	

Sarja	Koe- kpl  no	Paksuus  mm	Leveys  mm	Tiheys n. 12 %  kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Taivutusmurtotapa
					Lujuus  N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	
VP	A26	22,0	65,3	648	92,6	20500	19200	Vetomurto
VP	D1	21,9	66,0	603	95,6	15900	14700	Vetomurto
VP	L1	21,8	65,1	591	92,0	18700	17100	Puristusmurto
VP	F2	21,7	65,6	584	89,6	15700	15100	Vetomurto
VP	B83	22,1	65,6	577	71,6	17200	15500	Vetomurto
VP	R1	22,0	65,7	567	77,3	16400	15400	Puristusmurto
VP	C52	22,0	65,6	558	90,5	15800	15400	Puristusmurto
VP	S2	21,9	66,0	547	74,4	15100	14500	Vetomurto
VP	B25	22,0	65,7	525	76,8	18300	14500	Puristusmurto
VP	A66	22,2	65,6	490	68,8	13900	12100	Puristusmurto
VP	<b>mean</b>	22,0	65,6	569	<b>82,9</b>	<b>16750</b>	15350	
VP	stdv	0,13	0,28	43,40	10,05	1948	1838	
VP	var	0,6 %	0,4 %	7,6 %	12,1 %	11,6 %	12,0 %	

Sarja	Koe- kpl  no	Paksuus  mm	Leveys  mm	Tiheys n. 12 %  kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Taivutusmurtotapa
					Lujuus  N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	
BSM	A25	22,9	68,5	670	82,6	19200	17100	Puristusmurto
BSM	B5	22,5	68,5	620	71,6	16800	15800	Puristusmurto
BSM	A85	22,5	68,6	584	60,3	12200	11100	Puristusmurto
BSM	S1	22,5	68,1	570	67,8	13200	13400	Puristusmurto
BSM	A37	22,5	68,1	554	66,6	13700	13000	Puristusmurto
BSM	B80	22,5	68,7	529	58,8	13100	11700	Vetomurto
BSM	C12	22,6	68,1	520	50,4	13900	11300	Vetomurto
BSM	A35	22,5	68,3	505	58,7	13600	12100	Puristusmurto
BSM	A14	22,8	67,8	497	56,7	11700	11200	Puristusmurto
BSM	B119	22,6	68,5	481	54,1	11300	11000	Puristusmurto
BSM	<b>mean</b>	22,6	68,3	553	<b>62,8</b>	<b>13870</b>	12770	
BSM	stdv	0,14	0,27	59,29	9,52	2409	2122	
BSM	var	0,6 %	0,4 %	10,7 %	15,2 %	17,4 %	16,6 %	

Sarja	Koe- kpl  no	Paksuus  mm	Leveys  mm	Tiheys n. 12 %  kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Taivutusmurtotapa
					Lujuus  N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	
WF	A88	22,5	68,1	646	78,2	15200	15500	Puristusmurto
WF	A38	22,3	67,5	626	86,0	16500	16500	Puristusmurto
WF	B84	22,8	68,1	585	71,8	16900	14900	Vetomurto
WF	B62	22,5	68,0	574	64,6	16600	13400	Vetomurto
WF	C85	22,3	67,6	563	63,8	13300	12700	Puristusmurto
WF	C99	22,7	68,4	557	75,7	16500	15200	Vetomurto
WF	B100	22,3	67,4	531	63,6	11400	11200	Puristusmurto
WF	A93	22,3	66,9	516	69,8	14600	14500	Puristusmurto
WF	A14	22,5	67,8	506	60,6	14100	13400	Puristusmurto
WF	A97	22,7	68,2	496	53,2	11400	11000	Puristusmurto
	<b>mean</b>	22,0	65,6	560	<b>82,9</b>	<b>16750</b>	15350	
	stdv	0,13	0,28	49,75	10,05	1948	1838	
	var	0,6 %	0,4 %	8,9 %	12,1 %	11,6 %	12,0 %	

### Olosuhde 2: 3,5 kk RH50%, T60°C / Sahatavara

Käsittely	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutuskoe			Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	Taivutusmurtotapa	
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>				
K	A23	634	21,77	64,32	95,0	19600	18700	Leikkaus veto puristus veto veto veto veto veto veto veto veto	
K	B23	605	21,69	64,27	108,7	19100	17800		
K	R2	597	21,83	64,24	90,2	19600	17700		
K	O1	582	21,78	64,35	93,6	16300	15600		
K	A47	572	22,10	64,35	75,2	16500	14400		
K	C58	561	22,01	65,13	94,2	16800	15400		
K	C2	552	21,66	64,76	94,6	14000	13700		
K	A30	533	21,88	65,43	85,6	15500	14700		
K	C1	522	21,67	64,69	83,2	12600	13000		
K	A40	503	21,97	65,37	74,9	10100	10100		
	X	566,1	21,8	64,7	<b>89,5</b>	<b>16010</b>	15110		
	s	40,4	0,2	0,5	10,2	3111	2568		
	var	7,1 %	0,7 %	0,7 %	11,4 %	19,4 %	17,0 %		

Käsitlety	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutuskoee			Kimmom. E-true N/mm2	Kimmom. E-app N/mm2	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm2			
VP	P2	647	21,68	64,40	122,2	19200	19800	puristus puristus veto puristus veto veto puristus puristus puristus veto/puristus
VP	R3	601	21,79	64,20	113,1	19000	18000	
VP	Q1	588	21,70	65,05	110,6	19600	17400	
VP	A16	584	21,87	64,83	107,7	17400	16200	
VP	A27	577	22,10	64,68	91,1	16200	15400	
VP	A41	566	21,93	65,05	91,3	17500	17000	
VP	C10	555	21,94	64,66	77,8	18600	17700	
VP	B20	543	21,88	65,12	88,3	15900	15600	
VP	A12	516	22,11	65,24	83,2	16000	14800	
VP	B97	485	22,12	65,91	87,9	12800	12400	
	X	566,1	21,9	64,9	<b>97,3</b>	<b>17220</b>	16430	
	s	45,1	0,2	0,5	14,8	2070	2039	
	var	8,0 %	0,7 %	0,7 %	15,2 %	12,0 %	12,4 %	

Käsitlety	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutuskoee			Kimmom. E-true N/mm2	Kimmom. E-app N/mm2	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm2			
BSM	A15	664	22,77	67,90	62,6	vutuskoe	10900	puristus veto puristus puristus puristus puristus puristus puristus puristus veto
BSM	A43	616	22,63	67,77	72,7	12800	14800	
BSM	B41	582	22,54	68,76	63,9	15300	13400	
BSM	U2	557	22,37	68,23	62,9	12700	12600	
BSM	B28	552	22,42	68,30	68,5	13800	13300	
BSM	A39	526	22,24	67,52	58,8	8900	8300	
BSM	G1	517	22,27	68,12	53,3	8600	8500	
BSM	A31	504	22,64	68,25	60,4	13800	12800	
BSM	A36	495	22,41	68,32	56,4	11200	10000	
BSM	A33	474	22,29	68,44	41,8	11900	10500	
	X	548,7	22,5	68,2	<b>60,1</b>	<b>12111</b>	11510	
	s	58,6	0,2	0,4	8,5	2242	2198	
	var	10,7 %	0,8 %	0,5 %	14,2 %	18,5 %	19,1 %	

Käsitlety	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutuskoee			Kimmom. E-true N/mm2	Kimmom. E-app N/mm2	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus	
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm2				
WF	B73	633	22,18	66,89	103,8	18200	18200	puristus puristus puristus puristus veto puristus puristus veto veto puristus veto puristus	
WF	B55	602	22,86	66,26	92,7	18800	17400		
WF	A72	582	22,20	67,35	97,2	18100	16900		
WF	B52	572	22,33	66,33	95,8	18300	16600		
WF	B90	562	22,50	66,72	79,7	16200	15900		
WF	B108	551	22,14	66,49	88,9	15400	14800		
WF	B105	530	22,40	66,65	76,4	14400	14400		
WF	P10	515	22,03	65,94	76,6	14100	14400		
WF	B118	503	22,29	66,40	64,0	12800	13000		
WF	B66	494	22,31	66,49	69,3	14300	13300		
	X	554,5	22,32	66,55	<b>84,4</b>	<b>16060</b>	15490		
	s	44,8	0,2	0,4	13,1	2161	1771		
	var	8,1 %	1,0 %	0,6 %	15,5 %	13,5 %	11,4 %		

**Olosuhte 3: 7 kk RH50%, T60°C / Sahatavara**

Käsittely	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutuskoe			Kimmom. E-true N/mm2	Kimmom. E-app N/mm2	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
K	H1	626	21,93	64,32	106,46	20900	18200	Puristusmurto
K	B1	604	21,76	64,39	78,17	18300	17600	Veto
K	K1	589	21,56	64,00	96,97	16600	15500	Leikkausmurto
K	A22	578	21,95	63,91	99,38	18800	16900	Puristusmurto
K	B2	570	21,91	63,95	62,21	20100	17100	Veto
K	J2	554	21,71	64,11	88,07	14100	13400	Puristusmurto
K	M2	546	21,67	64,70	48,25	12500	15300	Veto
K	N2	531	21,66	64,27	84,83	15200	14400	Puristusmurto
K	B14	510	21,77	64,53	81,03	16700	15000	Veto
K	B50	500	21,83	65,09	82,14	14300	13400	Puristusmurto
	X	560,8	21,8	64,3	<b>82,8</b>	<b>16750</b>	15680	
	s	40,4	0,1	0,4	17,4	2760	1707	
	var	7,2 %	0,6 %	0,6 %	21,0 %	16,5 %	10,9 %	

Käsittely	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm2	Kimmom. E-app N/mm2	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
VP	P1	618,3	21,86	64,19	117,0	20600	19400	Puristus
VP	U3	594,8	21,67	64,88	90,3	17800	15600	Veto
VP	A96	585,4	22,03	64,56	103,5	17600	15500	Puristus
VP	C55	580,5	22,26	64,84	96,0	19800	17100	Veto
VP	A90	570,5	22,14	64,96	100,6	17800	16000	Veto
VP	M3	563,1	21,93	65,03	100,8	15800	13700	Puristus
VP	U1	554,5	21,54	65,25	81,2	16000	14700	Veto
VP	T1	535,9	21,81	64,97	100,9	15900	14600	Puristus
VP	B37	509,8	21,87	65,07	84,3	14500	13400	Puristus
VP	A20	478,5	21,79	65,29	70,8	13800	12800	Veto
	X	559,1	21,9	64,9	<b>94,5</b>	<b>16960</b>	15280	
	s	41,6	0,2	0,3	13,2	2175	1942	
	var	7,4 %	1,0 %	0,5 %	14,0 %	12,8 %	12,7 %	

Käsittely	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm2	Kimmom. E-app N/mm2	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
BSM	A24	634	22,71	67,61	46,3	17500	16200	veto
BSM	T1	589	22,40	67,79	75,7	12800	11600	puristusmurto
BSM	C96	581	22,60	68,61	70,7	15500	13800	puristusmurto
BSM	E1	556	22,38	68,54	73,5	16200	13400	puristusmurto
BSM	B92	540	22,65	68,03	63,6	13100	12600	veto
BSM	N1	526	22,43	67,67	70,4	14200	12600	puristusmurto
BSM	C78	508	22,54	68,26	56,4	10800	10700	puristusmurto
BSM	B93	502	22,86	67,93	64,7	12400	11600	puristusmurto
BSM	C56	495	22,73	68,46	59,2	13400	11500	puristusmurto
BSM	A18	473	22,53	68,33	58,9	11900	10800	puristusmurto
	X	540,5	22,6	68,1	<b>63,9</b>	<b>13780</b>	12480	
	s	50,0	0,2	0,4	9,0	2074	1665	
	var	9,2 %	0,7 %	0,5 %	14,2 %	15,1 %	13,3 %	

Käsitlety	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
WF	B76	627	22,11	66,01	100,2	19800	17500	puristusmurto
WF	A71	589	22,15	66,04	100,2	20300	17500	puristusmurto
WF	C23	579	22,11	65,40	67,3	18700	17900	veto
WF	B110	569	22,34	65,90	86,4	16800	15000	puristusmurto
WF	A48	562	22,31	66,07	84,4	16500	15200	veto
WF	B65	545	22,39	66,32	67,1	16700	15600	puristusmurto
WF	B78	520	22,09	65,97	74,0	15800	13700	veto
WF	B56	508	22,44	65,88	89,7	16000	14300	puristusmurto
WF	B63	502	22,54	65,94	75,9	15500	14000	puristusmurto
WF	A106	492	22,79	65,96	83,1	14800	13500	puristusmurto
	X	549,3	22,3	65,9	<b>82,8</b>	<b>17090</b>	15420	
	s	43,6	0,2	0,2	11,9	1869	1666	
	var	7,9 %	1,0 %	0,3 %	14,4 %	10,9 %	10,8 %	

#### Olosuhde 4: 7 kk RH50%, T60°C + 2 kk RH85%, T80°C / Sahatavara

Käsitlety	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
K	H2	623	21,63	64,53	85,40	18700	17700	Veto
K	B101	601	21,59	64,26	76,96	17900	17700	Puristus
K	L2	588	21,59	64,24	87,61	15400	15300	Veto
K	A21	574	21,86	64,50	58,94	17000	16300	Veto
K	A65	568	22,06	64,97	85,99	15000	14300	Veto
K	O2	553	21,56	64,18	70,64	14900	14700	Veto
K	C60	540	21,85	64,35	68,06	14500	13900	Veto
K	B75	529	21,85	65,04	82,19	14400	13800	Puristus
K	A13	508	22,26	64,77	73,26	12100	11500	Puristus
K	A34	487	21,74	64,88	71,03	13100	13000	Puristus
	X	557,2	21,8	64,6	<b>76,0</b>	<b>15300</b>	14820	
	s	42,4	0,2	0,3	9,3	2055	1987	
	var	7,6 %	1,0 %	0,5 %	12,2 %	13,4 %	13,4 %	

Käsitlety	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
VP	P3	616	21,75	64,64	92,31	16200	16500	Veto
VP	B38	595	21,90	64,75	89,21	17900	16700	Veto
VP	A42	585	21,84	65,01	93,14	17400	16600	Veto
VP	B10	578	21,89	64,98	88,31	20000	16200	Puristus
VP	Q2	570	21,63	64,93	89,53	15000	15300	Veto
VP	B71	563	21,85	65,62	82,93	16400	15500	Leikkausmurto
VP	A83	548	22,02	65,80	83,12	13600	13500	Veto
VP	A45	527	21,72	65,09	84,54	14100	13900	Veto
VP	A32	502	21,84	65,15	50,88	15600	13500	Veto
VP	A11	460	21,71	65,25	58,48	11100	10700	Veto
	X	554,4	21,8	65,1	<b>81,2</b>	<b>15730</b>	14840	
	s	46,7	0,1	0,4	14,5	2485	1927	
	var	8,4 %	0,5 %	0,6 %	17,9 %	15,8 %	13,0 %	

Käsittely	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
BSM	C34	626	22,34	67,34	74,41	15600	15100	Veto
BSM	F1	589	22,15	67,86	74,52	13800	13300	Puristus
BSM	B58	578	22,43	67,22	70,44	14000	13500	Veto
BSM	A80	555	22,32	67,52	61,83	13000	12800	Puristus
BSM	A68	529	22,29	66,32	67,61	12800	12200	Puristus
BSM	A38	523	22,41	67,27	64,25	14800	13600	Veto
BSM	B46	506	22,61	67,58	59,86	12300	11400	Veto
BSM	B68	500	22,14	67,57	52,37	8600	8500	Veto
BSM	C93	487	22,36	67,39	65,36	12500	12400	Veto
BSM	A19	459	22,40	67,62	54,71	10800	10500	Puristus
	X	535,2	22,3	67,4	<b>64,5</b>	<b>12820</b>	12330	
	s	51,4	0,1	0,4	7,6	2008	1848	
	var	9,6 %	0,6 %	0,6 %	11,7 %	15,7 %	15,0 %	

Käsittely	Tunnus	Tiheys n. 12 % kg/m <sup>3</sup>	Taivutus			Kimmom. E-true N/mm <sup>2</sup>	Kimmom. E-app N/mm <sup>2</sup>	Taivutusmurtotapa Veto/Puristus
			Paksuus mm	Leveys mm	Lujuus N/mm <sup>2</sup>			
WF	B3	613	22,18	66,55	33,86	15100	14900	Veto
WF	C94	586	22,21	66,50	69,17	15800	15700	Leikkausmurto
WF	B49	575	22,15	66,86	58,43	14200	13700	Veto
WF	A110	564	22,48	67,19	68,32	14000	13700	Veto
WF	A17	558	22,04	66,66	73,42	15000	14400	Puristus
WF	A24	532	22,04	66,40	43,06	12000	11300	Veto
WF	B74	517	22,25	66,60	67,36	15400	13500	Puristus
WF	C25	507	22,41	66,95	65,08	14400	12900	Veto
WF	C14	497	22,28	67,38	41,65	12200	12200	Veto
WF	B106	489	22,33	67,43	61,21	12100	11700	Veto
	X	543,9	22,2	66,9	<b>58,2</b>	<b>14020</b>	13400	
	s	41,5	0,1	0,4	13,7	1432	1403	
	var	7,6 %	0,7 %	0,6 %	23,6 %	10,2 %	10,5 %	

## VTT Working Papers

- 130 Jukka Hemilä, Jyri Pötry & Kai Häkkinen. Tuotannonohjaus ja tietojärjestelmät: kokemuksia sekä kehittämisperiaatteita. 2009. 37 s.
- 131 Ilkka Hannula. Hydrogen production via thermal gasification of biomass in near-to-medium term. 2009. 41 p.
- 132 Hannele Holttinen & Anders Stenberg. Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosiraportti 2008. 2009. 47 s. + liitt. 8 s.
- 133 Elisa Rautioaho & Leena Korkiala-Tanttu. Bentomap: Survey of bentonite and tunnel backfill knowledge – State-of-the-art. 2009. 112 p. + app. 7 p.
- 134 Totti Könnölä, Javier Carrillo-Hermosilla, Torsti Loikkanen & Robert van der Have. Governance of Energy System Transition. Analytical Framework and Empirical Cases in Europe and Beyond. GoReNEST Project, Task 3. 2009. 49 p.
- 135 Torsti Loikkanen, Annele Eerola, Tiina Koljonen, Robert Van der Have & Nina Wessberg. Nordic Energy Research within the Framework of Energy System Transition. Task 2 Working Paper of the GoReNEST project. 65 p.
- 136 Toni Ahonen & Markku Reunanen. Elinkaaritiedon hyödyntäminen teollisen palveluliiketoiminnan kehittämisessä. 2009. 62 s. + liitt. 8 s.
- 137 Eija Kupi, Jaana Keränen & Marinka Lanne. Riskienhallinta osana pk-yritysten strategista johtamista. 2009. 51 s. + liitt. 8 s.
- 138 Tapio Salonen, Juha Sääski, Charles Woodward, Mika Hakkarainen, Otto Korkalo & Kari Rainio. Augmented Assembly – Ohjaava kokoonpano. Loppuraportti. 2009. 32 s. + liitt. 36 s.
- 139 Jukka Hietaniemi & Esko Mikkola. Design Fires for Fire Safety Engineering. 2010. 100 p.
- 140 Juhani Hirvonen, Eija Kaasinen, Ville Kotovirta, Jussi Lahtinen, Leena Norros, Leena Salo, Mika Timonen, Teemu Tommila, Janne Valkonen, Mark van Gils & Olli Ventä. Intelligence engineering framework. 2010. 44 p. + app. 4 p.
- 141 Juha Forström, Esa Pursiheimo, Veikko Kekkonen & Juha Honkatukia. Ydinvoimahankkeiden periaatepäätökseen liittyvät energia- ja kansantaloudelliset selvitykset. 2010. 82 s. + liitt. 29 s.
- 143 Olavi Lehtoranta. Knowledge flows from incumbent firms to newcomers. The growth performance of innovative SMEs and services start-ups. 2010. 36 p. + app. 2 p.
- 144 Katri Grenman. The future of printed school books. 2010. 42 p.
- 145 Anders Stenberg & Hannele Holttinen. Tuulivoiman tuotantotilastot. Vuosiraportti 2009. 2010. 47 s. + liitt. 5 s.
- 146 Antti Nurmi, Tuula Hakkarainen & Ari Kevarinmäki. Palosuojattujen puurakenteiden pitkäaikaistoimivuus. 2010. 39 s. + liitt. 6 s.