

# RUOSTUMATTOMASTA TERÄKSESTÄ VALMISTETTUJEN PUURAKENTEIDEN LIITOSTEN PALONKESTÄVYYS

Tuuli Oksanen, Ari Kevarinmäki, Rainer Yli-Koski & Olli Kaitila  
VTT  
PL1000, 02044 VTT

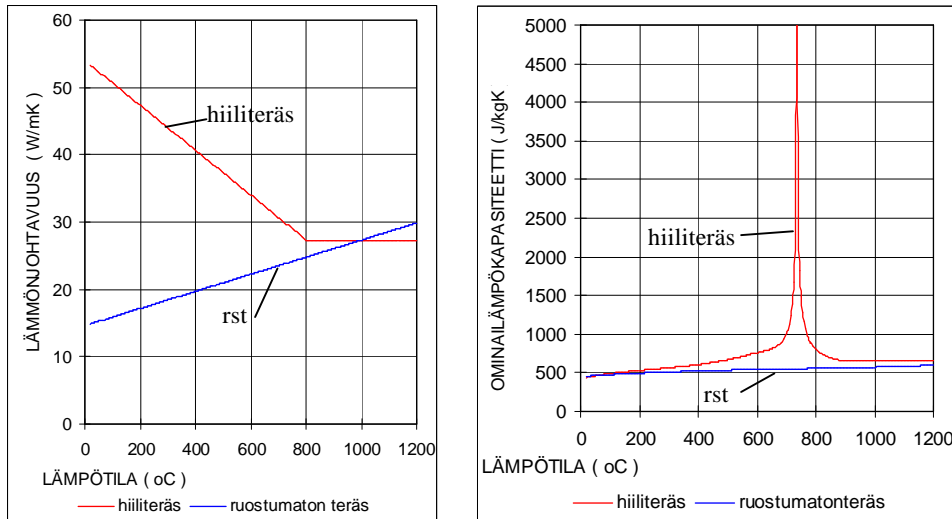
## Tiivistelmä

Esitelmä perustuu tutkimukseen *Ruostumattomalla teräksellä palonkestäviä puurakenteiden liitoksia*, joka toteutettiin VTT:llä vuosina 2003-2005. Tavoitteena oli kehittää kokeellisesti varmennetut suunnittelumenetelmät R30- ja R60-paloluokan puurakenteiden liitoksille, joiden liittimet on valmistettu austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä. Lisäksi tavoitteena oli hyödyntää ruostumattoman teräksen joitakin hiiliterästä parempia ominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa. Lähtökohtana olivat kilpailukykyiset tappivaarna-, pultti-, vinotanko-, palkki-kenkä- ja holkkiliitokset, joille tehtiin kuormituskokeita sekä standardipalorasituksella että normaalilämpötilassa. Koetulosten analyysien lisäksi tehtiin liitosten lämpötilakentän laskennallisia mallinnuksia. Tutkituissa liitoksissa mitoittavaksi tekijäksi tuli yleensä puun hiiltyminen, joka oli rst-levyn alla tai suljetun rst-holkin sisällä yhtä nopeaa kuin suojaamattoman puupinnan hiiltyminen. Liitosten palomitoituksessa tulee rst-materiaalin lujuuden ja kimmokertoimen alenemisen lisäksi huomioida mahdollinen liitoksen toiminnan muuttuminen, teräsosien lämpölaajeneminen sekä puun hiilymisestä aiheutuva väljyys liitoksessa. Koetulosten ja analyysien pohjalta laadittiin rst-liitosten rakennesuunnitteluohjeet puurakenteille, jotka on tarkoitettu käytettäväksi Eurocode-järjestelmän mukaisessa suunnittelussa.

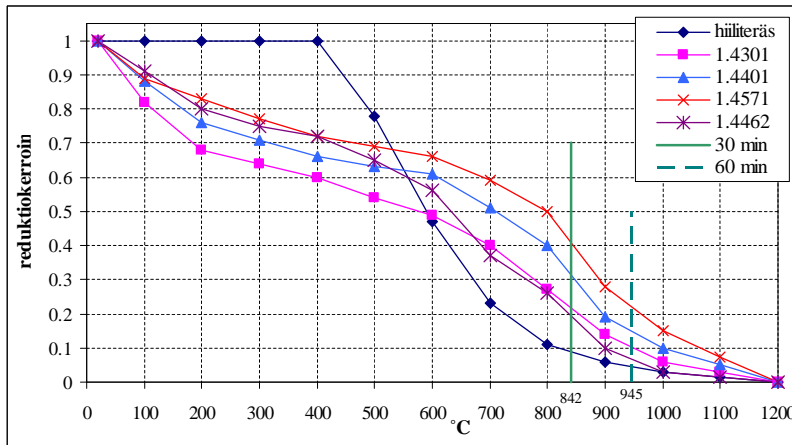
## JOHDANTO

Puuta käytetään entistä vaativammassa rakenteissa, joissa on erilaisia liitosratkaisuja. Yleensä liitoksissa käytetään metallisia liitososia olosuhteissa, joiden täytyy toimia moitteettomasti vaativissakin olosuhteissa kuten hyvin kosteassa tai kemiallisesti rasittavassa ympäristössä. Palonkestävyys asettaa omat vaatimuksensa puurakenteiden liitoksille, joiden tulee täyttää samat palonkestovaatimukset kuin mitä liitettäviltä osiltakin edellytetään. Yleensä liitokset joudutaan palosuojaamaan palonkestoluokissa R30 ja R60, mikäli liitoksessa on teräsoasia.

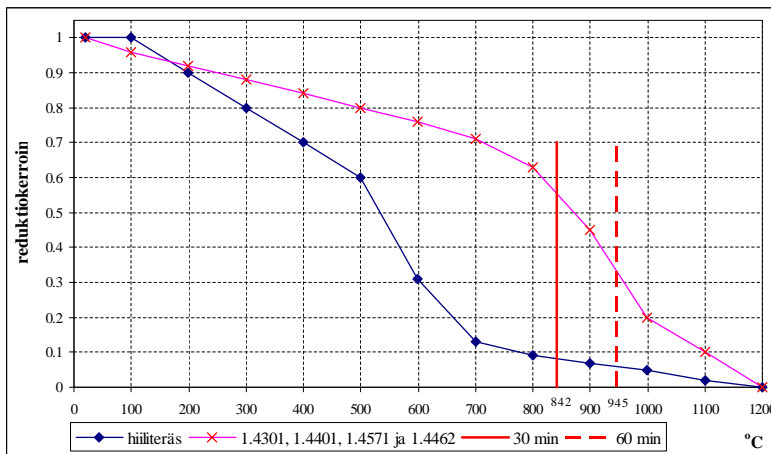
Ruostumattomilla teräslaaduilla on hyviä ominaisuuksia kuten hyvä korroosionkestävyys, sitkeys ja hiiliteräksiä paremmat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet korkeissa lämpötiloissa. Myös lämmönjohtavuus on aluksi hiiliterästä alhaisempi. Ruostumattoman teräksen hyviä ominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa ei ole aikaisemmin tutkittu puurakenteiden liitosten yhteydessä ja niitä pyrittiin hyödyntämään tutkimuksessa *Ruostumattomalla teräksellä palonkestäviä puurakenteiden liitoksia* [1], johon seuraava esitys perustuu. Kuvissa 1, 2 ja 3 on vertailtu ruostumattoman ja hiiliteräksen lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia sekä lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia standardin EN 1993-1-2:2003 [2] ja Euro Inox & VTT, 2002 [3] mukaan. Hiiliteräksen lämpölaajenemiskerroin ( $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ) on alhaisempi kuin ruostumattomien terästen ( $18 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ).



Kuva 1. Terästen lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona.



Kuva 2. Myötölujuuden riippuvuus lämpötilasta. 30 min = kaasun lämpötila 30 min jälkeen sekä 60 min = kaasun lämpötila 60 min jälkeen, Euro Inox & VTT (2002), EN 1993-1-2:2003.



*Kuva 3. Kimmokertoimen riippuvuus lämpötilasta. 30 min = kaasun lämpötila 30 min jälkeen sekä 60 min = kaasun lämpötila 60 min jälkeen, Euro Inox & VTT (2002), EN 1993-1-2:2003.*

Lisäksi puurakenteiden liitosten suunnitteluohjeet koskevat pääsääntöisesti vain hiiliteräksestä valmistettuja liittimiä - sekä normaalilämpötilassa että palomitoituksessa, minkä vuoksi tavoitteena oli myös kehittää kokeellisesti varmennetut suunnittelumenetelmät ruostumattomasta teräksestä valmistetuille R30- ja R60-paloluokan puurakenteiden liitoksille.

Tutkimukseen kuului kirjallisuusselvitys puurakenteiden liitoksista, erityyppisten liitosten koikeita sekä normaalilämpötilassa että korkeissa lämpötiloissa, kun liittimet olivat ruostumattomasta teräksestä, koetulosten analysointia, liitosten mallinnusta sekä laskentaa. Kokeilla tutkittiin palkkikenkä-, liimatanko-, holkki- sekä tappivaarnaliitosten palonkestävyyttä. Seuraavassa käsitellään holkki- ja tappivaarnaliitosten palonkestävyysskoikeita, mallinnusta, laskentaa sekä koetulosten pohjalta tehtyä suunnitteluohjetta.

## **LIITOSTEN PALONKESTÄVYYSKOIKEET**

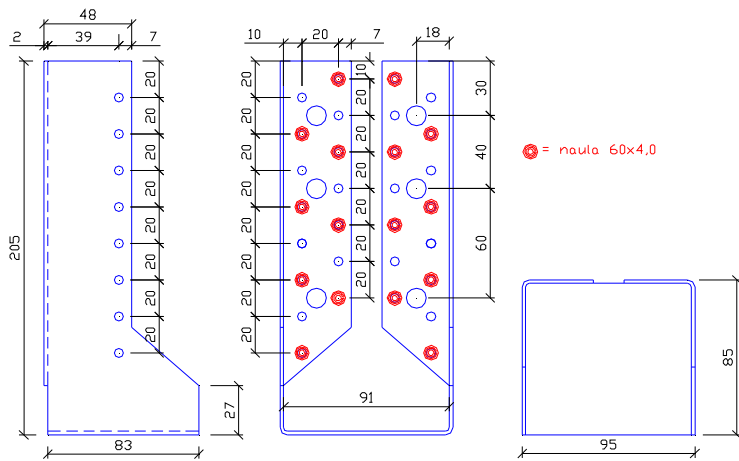
Tappivaarnaliitosten palonkestävyysskoikeet tehtiin horisontaaliuunissa standardien SFS-EN-1363-1:1999 [4] (ISO 834-1:1999 [5]) ja SFS-EN-1365-3:1999 [6] (ISO 834-6:1999 [7]) mukaan ja palkkikenkä-, liimatanko- ja holkkiliitosten palonkestävyysskoikeet ns. K-uunissa soveltaen edellä mainittuja standardeja. Kokeissa mitattiin teräsosien ja puun lämpötiloja eri syvyyksiltä sekä siirtymiä.

### **Palkkikenkäliitokset**

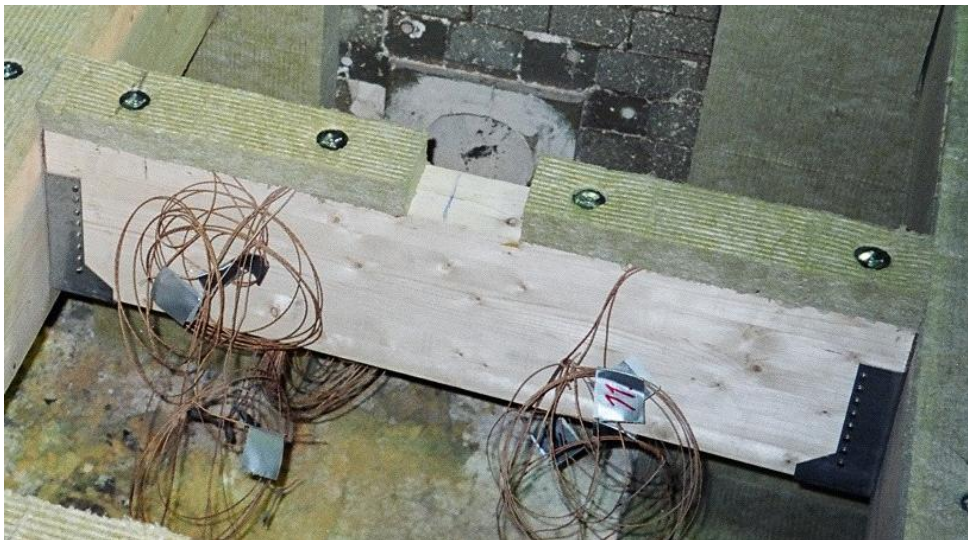
Palkkikenkäliitosten palonkestävyysskoikeita tehtiin kaksi. Tavoitteena oli 30 min palonkestävyys suojaamattomilla koekappaleilla. Koekappaleet koostuivat kahdesta pääpalkista ja niiden väliin päistään palkkikengillä kiinnitetystä poikkipalkista. Palkkikengät oli valmistettu 2 mm paksusta ruostumattomasta teräksestä AISI 316 (EN 1.4401, koe 1 kuva 4) ja AISI 316 Ti (EN 1.4571, koe 2). Lisäksi palkkikengät poikkisivat mitoiltaan ja muodoltaan toisistaan. Palkkikengät kiinnitettiin puuhun Gunnebon ankkurinauloilla, AISI 316 (EN 1.4401, A4); palkkikenkä/pääpalkki 60x4,0 nauloin sekä palkkikenkä/poikkipalkki 40x4,0 nauloin kokeessa 1 ja 60x4,0 nauloin kokeessa 2. Pääpalkit (115 x 315 mm<sup>2</sup>) ja poikkipalkit (koe 1: 90 x 270 mm<sup>2</sup> ja koe 2: 115 x 270 mm<sup>2</sup>) olivat liimapuuta, jonka lujuusluokka oli L40 (GL32c).

Koejärjestelyt uunissa ennen koetta on esitetty kuvassa 5. Koekappaletta kuormitettiin kokeen aikana poikkipalkin jännevälin puolivälistä vakiovoimalla siten, että kummankin palkkikenkäliitoksen kuorma oli 11,4 kN (koe 1) ja 12 kN (koe 2). Kuormitus vastasi 55 % (koe 1) / 46 % (koe 2) lasketusta keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista normaalilämpötilassa.

Kokeessa 1 liitos antoi sivunauloista yht'äkkisesti myöten noin ajassa 17,5 min, mutta kantoi kuitenkin koekuorman uudelleen. Palkin irtoaminen palkkikengästä näkyi sekä palkkien välistä mitatuista lämpötiloista että siirtymänopeuden nopeana kasvuna. Liitos kantoi vielä koekuorman notkahduksen jälkeenkin aina 22 min asti kunnes päätynaulat irtosivat.



Kuva 4. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kokeen 1 palkkikenkä.



Kuva 5. Palkkikenkäliitos (koe 1) uuniin asennettuna ennen koetta.

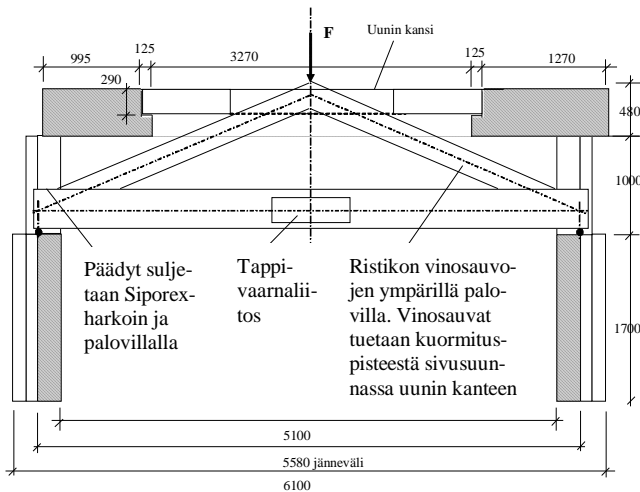


Kuva 6. Kokeen 1 ja 2 palkkikengät kokeen jälkeen.

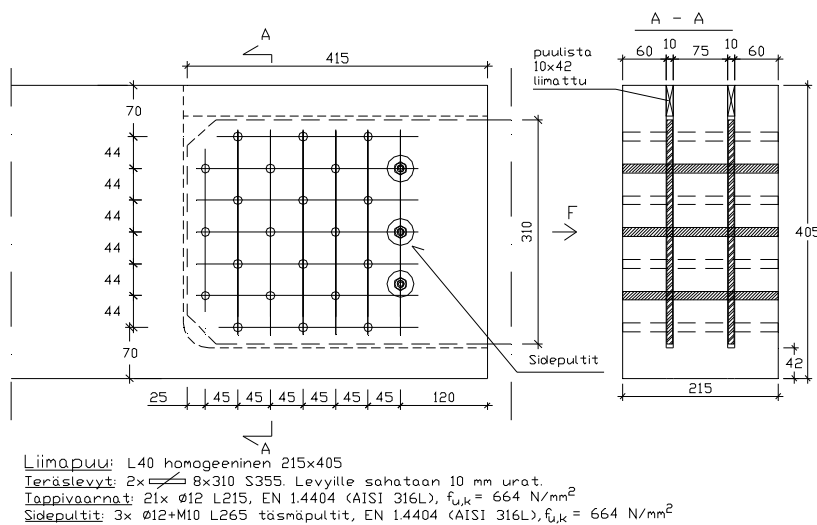
Kokeessa 2, jossa palkkikokoa, liittimien reunaetäisyyksiä ja pituutta oli kasvatettu sekä kuormitusta pienennetty, palkkien välistä mitatut lämpötilat nousivat tasaisesti aina murtoon asti samoin siirtymä. Murto tapahtui 27 min kuluttua kokeen aloituksesta naulaliitoksen pettäessä sivulta ja sen seurauksena myös päädyistä. Palkkikengän alla puu oli hiiltynyt 2–6 mm syvemmälle kuin muualla ja naulojen ympärillä noin 6 mm syvemmälle. Kuvassa 6 näkyy kokeiden 1 ja 2 palkkikengät kokeen jälkeen.

## Tappivaarnaliitokset

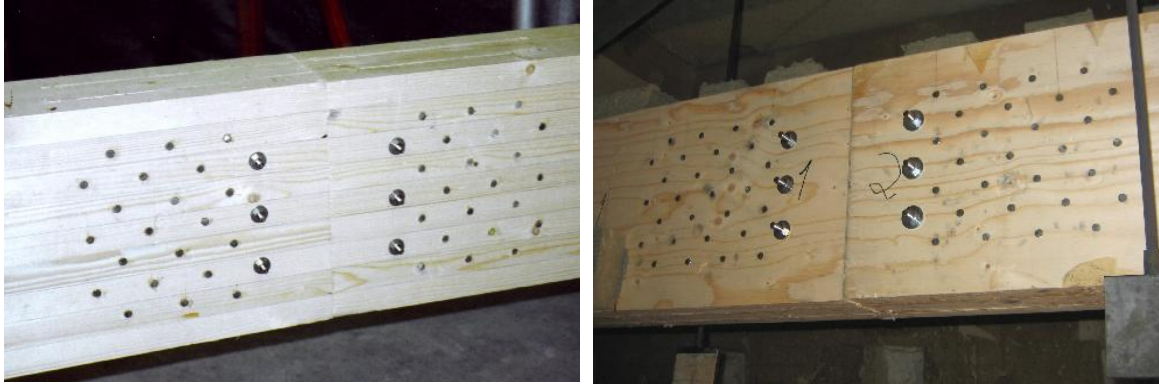
Rst-tappivaarnaliitoskokeita tehtiin kaksi ja kummankin tavoitteena oli 60 min palonkestävyys. Koekoekappaleiden liitokset olivat teräslevyllisiä 4-leikkeisiä tappivaarnaliitoksia, kuva 7 ja 8, joissa puumateriaalina oli joko liimapuu L40 tai kertopuu Kerto-S. Liimapuuliitoksessa puun sisään sijoitetut S355 teräslevyt olivat 8 mm paksuja ja haponkestävät tappivaarnat olivat halkaisijaltaan 12 mm paksuja. Kertopuuliitoksen haponkestävät teräslevyt (EN 1.4432) olivat vastaavasti 6 mm ja tappivaarnat 10 mm paksuja. Liimapuuliitoksissa oli 24 vaarnaa ja kertopuuliitoksissa 31 liitintä. Käytetyt teräsmateriaalit olivat tutkittua kertopuuliitoksen teräslevyjä lukuun ottamatta samoja kuin normaalilämpötilan kokeissa.



Kuva 7. Tappivaarnaliitoskokeen koejärjestely.



Kuva 8. Tutkittava tappivaarnaliitos liimapuussa.

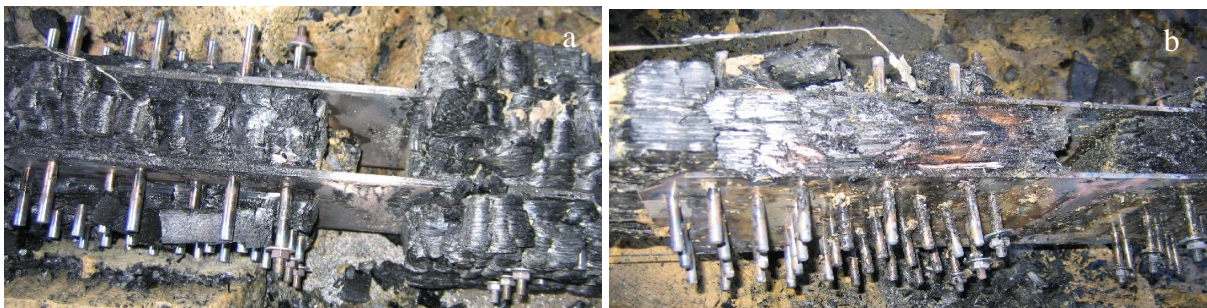


*Kuva 9. R60 tappivaarnaliitos liima- ja kertopuussa.*

Koekappaletta kuormitettiin kokeen aikana ristikon harjalta vakiovoimalla siten, että tutkittavan liitoksen vetovoima oli 324 kN kokeessa 1 ja 290 kN kokeessa 2. Nämä vastaavat 30 % ja 28 % kuormitusastetta verrattaessa normaalilämpötilan murtokuormiin.

Kokeessa 1 liitos menetti kantavuutensa ajassa 56 min ja kokeessa 2 ajassa 67 min. Kokeessa 2 mitatuissa teräslevyjen lämpötiloissa ei ollut kovin paljon eroja ennen kuin kokeen lopussa, jolloin liitos alkoi aueta. 60 min kohdalla teräslevyn lämpötilat olivat noin 200–275 °C ja ennen murtoa 300 – 400 °C.

Kumpikin liitos murtui keskimmaisessä lamellissa tapahtuneena liitoksen puuosan pettämisenä. Tappivaarnat pysyivät keskimmaisessä lamellissa suorina eikä teräslevyihin tullut pysyviä muodonmuutoksia. KP-liitoksessa osa tapeista taipui ulompien puiden osalla, kuva 10b. Nelileikeisessä liitoksessa rst-tappivaarnan lujuus on R60 palotilanteessa keskimmaisen puuleikkeen kohdalla riittävä ko. puun paksuuksilla. KP-liitos murtui sitkeästi liitoksen avautuessa vähitellen kokeen loppuvaiheessa 10–15 min ajan: reiät tulivat puussa 40–50 mm soikeiksi ("reunapuristuksen hiiltymämurto"). LP-liitos murtui hauraasti tappirivien kohdalle muodostuneiden halkeamien vuoksi, kuva 10a. LP-liitoksen halkeaminen saattoi johtua ainakin osittain teräslevyjen lämpölaajenemisesta aiheutuneista puun poikittaisista vetojännityksistä. LP-liitokset oli valmistettu poraamalla samanaikaisesti tiukat reiät puuhun ja teräslevyihin. KP-liitoksien teräslevyissä oli hieman väljät reiät ja teräsosat olivat ohuempia.



*Kuva 10. Liimapuun ja kertopuun tappivaarnaliitos palon jälkeen.*

# LIITOSTEN LÄMPÖTILAN LASKENTA

## Laskentamenetelmät

Elementtimenetelmään perustuvan laskentamenetelmän avulla voidaan laskea lämmön siirtymisen rakenteen eri kerrosten läpi. Menetelmän avulla määritetään rakenteen eri pisteiden lämpötilojen aikariippuvuus. Laskennassa sekä ydinosa että pintarakenne jaetaan elementteihin, jolloin saadaan laskettua lämpötilajakautuma rakenteen eri osissa.

Lämmön siirtyminen rakenteen pinnalle tapahtuu konvektiolla ja säteilemällä ja materiaalisella johtumalla. Laskentaan käytettiin tässä tutkimuksessa elementtimenetelmään perustuvaa ohjelmaa FEMLAB<sup>®</sup> 3.1 (FEMLAB<sup>®</sup> 3.1 User's Guide 2004) ja siihen kytkettävää Heat Transfer Modulea, jonka avulla voidaan ratkaista kaikkien peruslämmönsiirtomekanismien (johtuminen, konvektio, säteily) mukaisia tapauksia. Mallien geometria tehtiin kaksiulotteisena.

## Materiaaliominaisuudet

Ruostumattoman teräksen termiset ominaisuudet on esitetty edellä.

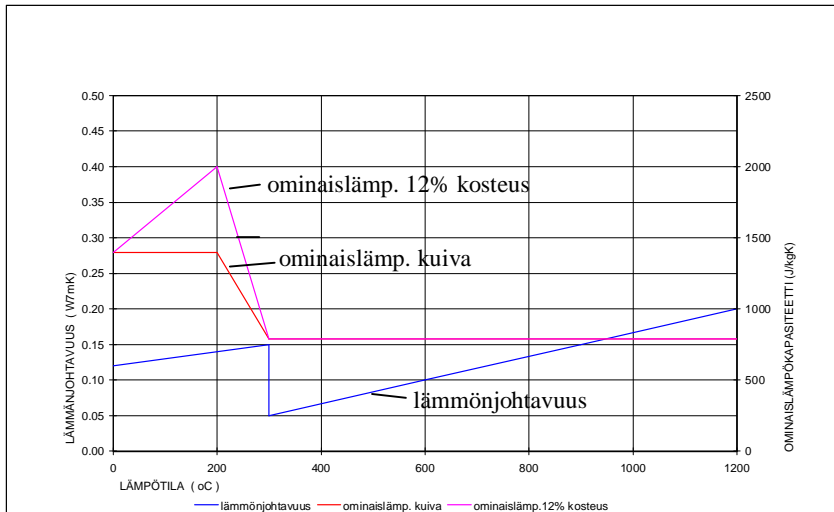
Puun termisistä ominaisuuksista ei kirjallisuudessa ole sellaista yksimielisyyttä kuin teräksen ominaisuuksista. Tässä puun termisinä ominaisuuksina käytettiin arvoja, jotka saatiin muuntamalla lähteessä (Fredlund 1988) esitettyjä tietoja. Lämpötilavälillä 0–300 °C lämmönjohtavuuden arvoina käytettiin kuivan puun arvoja ja tästä eteenpäin hiilen arvoja. Kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen on niin pieni, että se on jätetty huomioimatta. Puun ominaislämpökapasiteettina käytettiin useampia erilaisia malleja: kuiva puu tai 12 %:n kosteus. Kosteuden vaikutus sisällytettiin ominaislämpökapasiteetin arvoihin 0–200 °C välillä ja 300 °C lämpötilasta eteenpäin käytettiin hiilen ominaislämpökapasiteetin arvoja. Laskennassa käytetyt puun lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvot on esitetty kuvassa 11.

## Tappivaarnaliitoksen mallinnus

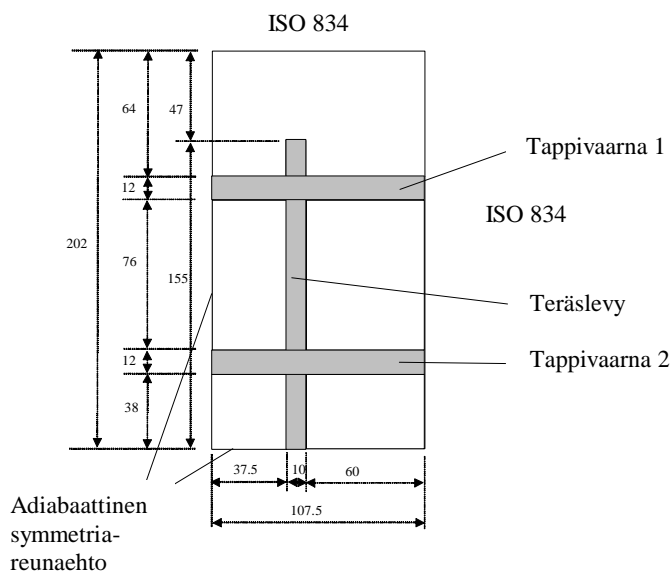
Poikkileikkauksesta mallinnettiin ¼ symmetriareunaehtoja hyväksikäyttäen, kuva 12, eli alapinnalle ja vasemmalle sivulle annettiin adiabaattinen symmetriareunaehto. Yläpinnalla ja oikealla sivulla oli standardipalokäyrän mukainen palorasitus, josta lämmönsiirto tapahtui säteilyn ja konvektion kautta rakenteeseen. Puupinnan emissiivisyytenä käytettiin 0,5 ja rst-pinnan emissiivisyytenä 0,4. Konvektiolämmönsiirtokerroin laskennassa oli 25 W/m<sup>2</sup>K.

Kuvassa 13 on esitetty poikkileikkauksen isotermit 60 min palorasituksen jälkeen. 300 °C isotermin kohdalla kulkee hiiltemärajä eli teräslevyn yläpuolelta puu on hiiltynyt kokonaan kuten myös pystysivuilta tappien ympäriltä. Teräslevyn lämpötilat vaihtelevat 250 °C–300 °C välillä, reunassa olevan tapin 1 lämpötila pinnan 500 °C:sta tapin keskikohdan noin 270 °C:een ja keskellä olevan tapin 2 noin 480 °C:sta 240 °C:een.

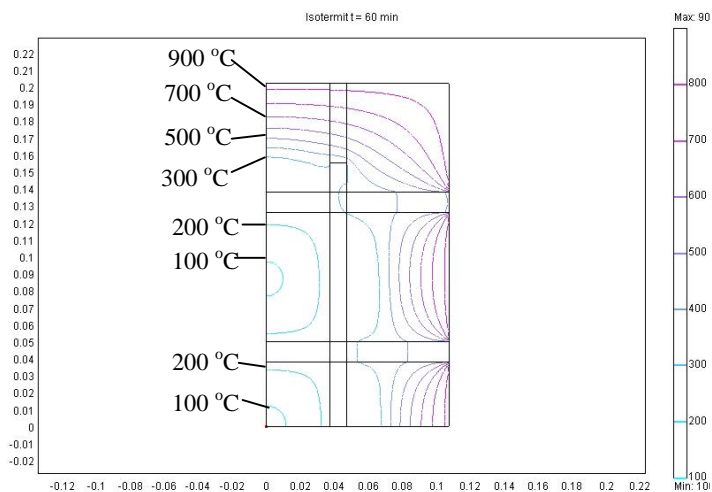
Valitettavasti kokeessa ei saatu mitattua rakenteen sisältä lämpötiloja, joten laskentatulosten vertailua kokeellisiin arvoihin ei voida tehdä. Tappien päiden lasketut lämpötilat vaikuttavat alhaisilta verrattuna ympäröivän kaasun lämpötilaan 945 °C. Yksi syy tähän on, ettei ohjelma huomioi hiilikerroksen halkeamista eikä palojen putoamista vaan olettaa kerroksen pysyvän yhtenäisenä. Lisäksi todellisuudessa palon edetessä lämpöä siirtyy enenevässä määrin myös liitoksen poikittaissauman kautta puun hiiltyessä pystysaumassa.



Kuva 11. Laskennassa käytetyt puun termiset ominaisuudet.



Kuva 12. Mallinnettu poikkileikkaus.



Kuva 13. Isotermi rakenteessa ajanhetkellä  $t = 60$  min.

## Johtopäätökset

Ruostumattomasta teräksestä voidaan valmistaa kaikkia puurakenteissa käytettäviä liitosten teräsosia, kuten liitoslevyjä, palkkikenkiä, vetotankoja, tappivaarvoja, nauvoja, ruuveja ja pultteja. Liitosten suunnittelussa tulee huomioida lujuuden ja kimmokertoimen alenemisen lisäksi myös mahdollinen liitoksen toimintatavan muuttuminen palotilanteessa sekä puun hiiltymisestä aiheutuva väljyys liitoksessa.

Ruostumattomasta teräksestä valmistetuissa liitoksissa mitoittavaksi tekijäksi tulee yleensä puun hiiltyminen. Puun hiiltyminen rst-levyn alla tai suljetun rst-holkin sisällä on lähes yhtä nopeaa kuin suojaamattoman puupinnan hiiltyminen. Puun hiiltyminen liitoslevyn alla vaikuttaa oleellisesti leikkauskuormitetun liittimen kapasiteettiin. Suojaamattomilla ulkopuolisilla rst-levyllisillä liitoksilla ei päästä tämän vuoksi R30-luokkaa parempaan palonkestävyyteen. Lisäksi liittimien reunaetäisyyksien ja tunkeumasyvyyksien riittävyteen puussa on kiinnitettävä huomiota.

Teräslevyllisissä liima- ja kertopuun monileikkeisissä tappivaarnaliitoksissa voidaan ruostumattomasta teräksestä valmistettujen liittimien päät jättää suojaamatta palonkestävyysluokassa R60 tietyn edellytyksin. Kun tappivaarvojen päiden puutulppaus jätetään pois, liittimet on nähtävissä ja laadunvarmistus helpottuu.

## SUUNNITTELUOHJE

Koetulosten ja analyysien perusteella laadittiin suunnitteluohje *Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten suunnittelu - Yleiset ohjeet ja palomitoitus* [9]. Mitoitus perustuu standardoituun lämpötila-aikariippuvuuteen (EN 1991-1-2:2003) [10]. Ruostumattomien teräsosien mitoituksessa käytetään standardeja EN 1993-1-1:2003 [11], EN 1993-1-2:2003 [2] sekä julkaisua Euro Inox & VTT (2002) [3] ja puuosien mitoituksessa standardeja EN 1995-1-1:2003 [12] ja EN 1995-1-2:2003 [13]. Mahdolliset rakenteen toimintatavassa tapahtuvat muutokset sekä lämpölaajeneminen ja puupoikkileikkauksen hiiltyminen on huomioitava. Ohjeessa annetaan erityisohjeita edellä kuvattujen liitosten mitoittamiseen. Se sisältää myös esimerkkilaskelmia.

## KIITOKSET

Kiitokset tutkimuksen rahoittajille: Tekes, Outokumpu Stainless Oy, Wood Focus Oy, Anstar Oy, MiTek Finland Oy, Late-Rakenteet Oy, Stalatable Oy ja VTT.

## LÄHDELUETTELO

1. Oksanen T., Kevarinmäki A., Yli-Koski R. & Kaitila O. 2005. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus, 2005. 104 s. + liitt. 108 s. (VTT Working papers 29) ISBN 951-38-6589-4.
2. EN 1993-1-2:2003. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2: Structural fire design. Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 64 s.

3. Euro Inox & VTT. 2002. Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa. 2. painos Euro Inox:n käsikirjasta: Design Manual for Structural Stainless Steel. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT:n Rakennussarja, julkaisu 3. 164 s.
4. SFS-EN 1363-1:1999. Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements. (Palonkestävyyskokeet – Osa 1: Yleiset vaatimukset). Helsinki. Suomen standardisoimisliitto (SFS). 44 s.
5. ISO 834-1:1999, Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements (Palonkestävyyskokeet – rakennusosat - Osa 1: Yleiset vaatimukset)
6. SFS-EN 1365-3:1999, Fire resistance tests for loadbearing elements – Part 3: Beams. (Kantavien rakenteiden palonkestävyyskokeet - Osa 3: Palkit). Helsinki. Suomen standardisoimisliitto (SFS). 14 s.
7. ISO 834-6:1999, Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 6: Specific requirements for beams (Palonkestävyyskokeet – rakennusosat - Osa 6: Erityisvaatimukset palkeille)
8. Fredlund, B. 1988. A model for heat and mass transfer in timber structures during fire, A theoretical, numerical and experimental study. Lund University, Sweden. 254 s.
9. Kevarinmäki A., Oksanen T., Yli-Koski R. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten suunnittelu - Yleiset ohjeet ja palomitoitus. 2005.. Espoo. Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 51 s. + liitt. 12 s. (VTT Working papers 38)
10. EN 1991-1-2. 2003. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-2: General actions. Actions on structures exposed to fire. Brussels. CEN. 60 s.
11. EN 1993-1-1:2003. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.1: General rules and rules for buildings: European Committee for Standardization (CEN).
12. EN 1995-1-1. 2004. Eurocode 5 – Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. Brussels. CEN. 123 s.
13. EN 1995-1-2:2004, Eurocode 5 – Design of timber structures, Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels. CEN. 69 s.