



Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys

Tuuli Oksanen, Ari Kevarinmäki, Rainer Yli-Koski & Olli Kaitila
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6589-4 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)
ISSN 1459-7683 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2005

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 5, P.O. Box 2000, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Kivimiehentie 4, PL 1803, 02044 VTT
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4815

VTT Bygg och transport, Stenkarlsvägen 4, PB 1803, 02044 VTT
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4815

VTT Building and Transport, Kivimiehentie 4, P.O.Box 1803, FI-02044 VTT, Finland
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 4815

Tekijä(t) Oksanen, Tuuli, Kevarinmäki, Ari, Yli-Koski, Rainer & Kaitila, Olli		
Nimeke Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys		
Tiivistelmä <p>Tutkimuksessa kehitettiin kokeellisesti varmennettuja suunnittelumenetelmiä valituille austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä valmistetuille R30- ja R60-paloluokan puurakenteiden liitoksille. Lähtökohtana olivat kilpailukykyiset tappivaarna-, pultti-, vinotanko- ja palkkikenkäliitokset sekä uudentyypiset holkkiliitokset.</p> <p>Tutkimuksessa tehtiin ruostumattomasta teräksestä valmistettujen palkkikenkä-, vinotanko-, tappivaarna- ja holkkiliitosten kuormituskokeita standardipalorasituksella ja normaalilämpötilassa. Palonkestävyyskokeiden yhteydessä tehtiin myös pienempiä kokeita tappivaarno- ja ruuvien ja nauhojen tartunnan selvittämiseksi korkeissa lämpötiloissa. Tutkimukseen kuului myös puikkoliitosten palonkestävyyttä koskeva kirjallisuusselvitys sekä liitosten lämpötilakentän laskennallisia mallinnuksia 30 min ja 60 min palorasituksella.</p> <p>Normaalilämpötilan kokeet osoittivat, että austeniittisistä ruostumattomista teräksistä valmistettujen puurakenteiden liitosten mitoituksessa voidaan soveltaa Eurocode 5:tä. Liitosten paloteknisessä suunnittelussa tulee huomioida rst-materiaalin lujuuden ja kimmokertoimen alenemisen lisäksi myös mahdollinen liitoksen toimintatavan muuttuminen palotilanteessa sekä puun hiiltymisestä aiheutuva väljyys liitoksessa.</p> <p>Merkittävä puurakenteiden liitosten palonkestävyyden paraneminen voidaan saavuttaa hyödyntämällä ruostumattomien teräslaatu- ja jäykkyysominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa. Ruostumattomasta teräksestä valmistetuissa liitoksissa mitoittavaksi tekijäksi tulee yleensä puun hiiltyminen, joka on rst-levyn alla tai jopa suljetun rst-holkin sisällä yhtä nopeaa kuin suojaamattoman puupinnan hiiltyminen. Suojaamattomilla ulkopuolisilla rst-levyllisillä liitoksilla, kuten muotolevykiinnikkeillä ja holkkiliitoksilla, päästään ilman normaalilämpötilan ylimitoitusta R30-luokan palonkestävyyteen, kun liittimet ovat yli 60 mm pitkiä ja niiden reunaetäisyydet ovat riittävän suuria. Monileikkeisellä tappivaarnaliitoksella saavutetaan 60 min palonkestävyys ilman tappivaarno- ja puun sisäin sijoitetun teräslevyn valmistamista ruostumattomasta teräksestä.</p> <p>Tutkimustuloksiin perustuvat rst-liitosten rakennesuunnitteluohjeet on esitetty erillisessä VTT Working Papers 38 -julkaisussa.</p>		
Avainsanat construction timber, timber structures, timber connections, stainless steels, fasteners, fire testing, fire resistance, fire technical design, design recommendations, modelling		
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Materiaalit ja tuotteet, Betonimiehenkuja 3, PL 1801, 02044 VTT		
ISBN 951-38-6589-4 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Projektinumero R3SU00026
Julkaisu-aika Lokakuu 2005	Kieli suomi, engl. tiivist.	Sivuja 104 s. + liitt. 108 s.
Projektin nimi Ruostumattomalla teräksellä palonkestäviä puurakenteiden liitoksia	Toimeksiantaja(t) Tekes, VTT, Outokumpu Stainless Oy, Wood Focus Oy, Anstar Oy, MiTek Finland Oy, Late-Rakenteet Oy, Stalatube Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)	Julkaisija VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Published by



Series title, number and
report code of publication

VTT Working Papers 29
VTT-WORK-29

Author(s) Oksanen, Tuuli, Kevarinmäki, Ari, Yli-Koski, Rainer & Kaitila, Olli		
Title Fire resistance on timber connections with stainless steels fasteners		
Abstract <p>A research project was carried out with the objective of developing experimentally verified design methods for timber connections with austenitic stainless steel fasteners at fire resistance times R30 and R60. Ultimate loading tests were performed on timber connections with stainless steel fasteners such as joist hangers, inclined glued-in ribbed bars, dowels and a new type sleeve joint with screws. The tests were carried out according to both the standard ISO-fire test curve and at normal temperature. In addition to the fire resistance tests, some minor tests were done in order to examine the heating of dowels and the withdrawal capacity of annular ring shank nails and screws at elevated temperatures. The project also included a literature study on the fire resistance and numerical modeling of temperature profiles of dowel-type connections after 30 min and 60 min standard fire exposure.</p> <p>The normal temperature tests showed that timber connections with austenitic stainless steel fasteners may be designed by applying Eurocode 5. In the structural fire design of joints, the decrease of strength and stiffness of the stainless steel material at high temperatures has to be considered. Also the possible changes in the behaviour of the joint at high temperatures due to the loosening of the connection between wood and steel parts and the charring of wood have to be taken into account.</p> <p>The fire resistance on timber connections can be improved notably by using the good strength and stiffness properties of stainless steel at elevated temperatures. Usually charring of wood is decisive in the design of timber joints with stainless steel fasteners. The charring of wood under a stainless steel plate or even inside a closed stainless steel sleeve is equal to that of unprotected wood exposed to fire. For unprotected external stainless steel fasteners, such as nail plates, joist hangers and sleeves, the fire resistance requirement R30 is satisfied without overdesign at normal temperature, when fasteners are of at least 60 mm length and their edge distances are sufficient. In multiple shear steel to timber connections with dowels and slotted-in steel plates, a fire resistance time of 60 min is reached without protection of the end of dowels and without overdesign at normal temperature, when dowels and steel plates are produced from stainless steels.</p> <p>The design recommendations for timber connections with stainless steels fasteners that are based on these research results are presented in paper VTT Working Papers 38.</p>		
Keywords construction timber, timber structures, timber connections, stainless steels, fasteners, fire testing, fire resistance, fire technical design, design recommendations, modelling		
Activity unit VTT Building and Transport, Materials and Products, Forest Products, P.O.Box 1801, FI-02044 VTT		
ISBN 951-38-6589-4 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Project number R3SU00026
Date October 2005	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 104 p.+ app. 108 p.
Name of project Ruostumattomalla teräksellä palonkestäviä puurakenteiden liitoksia	Commissioned by Tekes, VTT, Outokumpu Stainless Oy, Wood Focus Oy, Anstar Oy, MiTek Finland Oy, Late-Rakenteet Oy, Stalatube Oy	
Series title and ISSN VTT Working Papers 1459-7683 (URL: http://www.vtt.fi/inf/pdf/)		Publisher VTT Information Service P.O. Box 2000, FI-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +358 20 722 4374

Alkusanat

Tämä julkaisu liittyy tutkimukseen *Ruostumattomalla teräksellä palonkestäviä puurakenteiden liitoksia*, joka alkoi vuoden 2003 alussa ja päättyi elokuussa 2005. Tutkimus suoritettiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikassa.

Tämä julkaisu sisältää tutkimuksen yhteydessä tehdyn palonkestävyyskokeita koskevan kirjallisuusselvityksen, tutkittujen liitosten normaalilämpötilan ja palonkestävyyden kokeet sekä niiden analysoinnin sekä nauiloille ja ruuveille tehtyjä kokeita. Lopuksi esitellään liitosten mallinnusta ja laskentatuloksia. Tutkimusprojektin muut tulokset on julkaistu VTT:n Tiedotteessa 2279 ”Ruostumattomien terästen mitoituserusteet puurakenteiden liitoksissa” (Yli-Koski ym. 2005). Lisäksi projektissa on laadittu rakennesuunnittelijoille tarkoitettu ohje ”Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten suunnittelu – Yleiset ohjeet ja palomitoitus” (Kevarinmäki ym. 2005).

Tutkimusta rahoittivat Tekesin ja VTT:n lisäksi seuraavat yritykset: Outokumpu Stainless Oy, Wood Focus Oy, Anstar Oy, MiTek Finland Oy, Late-Rakenteet Oy ja Stalatube Oy.

Tutkimuksen johtoryhmään ovat julkaisuhetkellä kuuluneet Raimo Viherma, pj. (Outokumpu Stainless Oy), Jouni Hakkarainen (Finnforest Oyj), Tomi Koskenniemi (Versowood Oy), Pekka Nurro (Wood Focus Oy), Kari Viljakainen (Anstar Oy), Ilmari Absetz (TKK), Pekka Kanerva (TKK), Reijo Talja (MiTek Finland Oy), Veijo Lehtonen (Late-Rakenteet Oy) ja Matti Kokkala (VTT). Olli-Pekka Nordlund ja Tom Warras toimivat Tekesin valvojina. Tutkimuksen vastuullinen johtaja oli tutkimuspäällikkö Laura Apilo ja projektipäällikkönä toimi erikoistutkija Ari Kevarinmäki.

Kirjoittajien lisäksi projektiin ovat osallistuneet ruostumattomien terästen ominaisuuksien ja rakenteellisen käytön asiantuntijoina VTT:n erikoistutkijat Tiina Ala-Outinen ja Asko Talja.

Kiitämme kaikkia niitä tahoja, jotka ovat osallistuneet tämän tutkimuksen käynnistämiseen ja työn ohjaamiseen.

Espoo, syyskuu 2005

Tekijät

Sisällysluettelo

Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	9
1.1 Tausta.....	9
1.2 Tavoite.....	10
2. Kirjallisuusselvitys viime vuosien liitoskokeista.....	11
2.1 Fire resistance tests of timber connections.....	11
2.2 Predicting the behaviour of dowelled connections in fire: Fire test results and heat transfer modelling.....	17
2.3 Fire tests on timber connections with dowel-type fasteners.....	18
2.4 Yhteenveto.....	20
3. Palkkikenkäliitosten palonkestävyyskokeet.....	23
3.1 Koekappaleet.....	23
3.2 Kokeet.....	24
3.3 Koetulokset.....	25
3.4 Koetulosten analysointi.....	25
4. Liimatankoliitokset.....	29
4.1 Murtokuormituskoe normaalilämpötilassa.....	29
4.2 Palonkestävyyskokeet.....	34
4.2.1 Koekappaleet.....	34
4.2.2 Kokeet.....	35
4.2.3 Koetulokset.....	36
4.2.4 Koetulosten analysointi.....	38
5. Tappivaarnaliitokset.....	39
5.1 Normaalilämpötilan murtokuormitustestit.....	39
5.1.1 Yleistä.....	39
5.1.2 Koekappaleet.....	39
5.1.3 Kuormitusjärjestelyt.....	44
5.1.4 Murtotavat.....	45
5.1.5 Koetulokset.....	48
5.1.6 Vertailu laskennallisiin kapasiteetteihin.....	49
5.2 Tappivaarnojen lämpötilakokeet.....	51
5.3 Palonkestävyyskokeet.....	53
5.3.1 Liitoskokeiden koekappaleet.....	53
5.3.2 Kokeet.....	54

5.3.3	Koetulokset	56
5.3.4	Koetulosten analysointi	59
6.	Holkkiliitokset	60
6.1	Kuormituskokeet normaalilämpötilassa	60
6.1.1	Yleistä	60
6.1.2	Koekappaleet	60
6.1.3	Kuormitusjärjestelyt	64
6.1.4	Murtotavat	65
6.1.5	Koetulokset	66
6.1.6	Vertailu laskennallisiin kapasiteetteihin	68
6.2	Palonkestävyyskoe	71
6.2.1	Koekappale	71
6.2.2	Koe	72
6.2.3	Koetulokset	74
6.2.4	Koetulosten analysointi	76
7.	Naulojen ja ruuvien tartunta korkeissa lämpötiloissa	79
8.	Liitoksen lämpötilanlaskenta	81
8.1	Laskentamenetelmät	81
8.2	Materiaaliominaisuudet	82
8.2.1	Ruostumattoman teräksen termiset ominaisuudet	82
8.2.2	Ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet	84
8.2.3	Puun termiset ominaisuudet	86
8.3	Laskentatulokset ja vertailu koetuloksiin	87
8.3.1	Teräslevyt puupalkin päällä	87
8.3.2	Teräslevy puupalkin sisällä	89
8.3.3	Tappivaarnaliitoksen mallinnus	91
9.	Yhteenveto	96
9.1	Koetulokset	96
9.2	Johtopäätökset	99
	Lähdeluettelo	102

Liitteet

Liite A: Palkkikenkäliitokset

Liite A.1: Koekappalepiirustukset

Liite A.2: Koejärjestelyt

Liite A.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat

Liite A.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat

Liite A.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä

- Liite A.6: Havainnot ja mitatut siirtymät
- Liite A.7: Valokuvat
- Liite B: Liimatankoliitokset
 - Liite B.1: Koekappalepiirustukset
 - Liite B.2: Koejärjestelyt
 - Liite B.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat
 - Liite B.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat
 - Liite B.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä
 - Liite B.6: Havainnot ja mitatut siirtymät
 - Liite B.7: Valokuvat
- Liite C: Tappivaarnaliitokset
 - Liite C.1: Koekappalepiirustukset ja materiaalitodistus
 - Liite C.2: Koejärjestelyt
 - Liite C.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat
 - Liite C.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat
 - Liite C.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä
 - Liite C.6: Havainnot ja mitatut siirtymät
 - Liite C.7: Valokuvat
- Liite D: Holkkiliitos
 - Liite D.1: Koekappalepiirustus
 - Liite D.2: Koejärjestelyt
 - Liite D.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat
 - Liite D.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat
 - Liite D.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä
 - Liite D.6: Havainnot ja mitatut siirtymät
 - Liite D.7: Valokuvat
- Liite E: Liitoksen lämpötilanlaskenta
 - Liite E.1. Lasketut lämpötilat rakenteessa, jossa teräslevyt puupalkin päällä
 - Liite E.2. Lasketut lämpötilat rakenteessa, jossa teräslevyt puupalkin sisällä

1. Johdanto

1.1 Tausta

Julkiset kokoontumistilat, liike- ja kaupparakennukset, urheilu-, liikunta- ja näyttelyhallit, teollisuushallit ja suuret maatalouden tuotantorakennukset ovat pääsääntöisesti paloluokan R30 tai R60 rakennuksia. Enintään 4-kerroksisissa asuin- ja työpaikkarakennuksissa saadaan käyttää R60-luokan täyttäviä puurakenteita. Enintään 2-kerroksisia asuin-, työpaikka-, hoitolaitos- ja majoitusrakennuksia voidaan tehdä puurunkoisina paloluokassa R30.

Puuta käytetään entistä vaativammissa rakenteissa, joissa on erilaisia liitosratkaisuja. Yleensä liitoksissa käytetään metallisia liitososia, joiden täytyy toimia moitteettomasti erilaisissa olosuhteissa. Rakennetta ympäröivät olosuhteet voivat olla kosteita, kemiallisten aineiden pitoisuudet voivat olla korkeita, tai niiden yhteisvaikutus saattaa aiheuttaa korroosiorasituksia. Palonkestävyys asettaa omat vaatimuksensa myös puurakenteiden liitoksille, joiden tulee täyttää samat palonkestovaatimukset kuin liitettäviltä osiltakin edellytetään. Yleensä liitokset joudutaan palosuojaamaan palonkestoluokissa R30 ja R60, mikäli liitoksessa on teräsosia.

Ruostumattomilla teräksillä on hyviä ominaisuuksia, kuten hyvä korroosionkestävyys, sitkeys ja hiiliteräksiä paremmat lujuus- ja jäykkyysominaisuudet korkeissa lämpötiloissa. Myös lämmönjohtavuus on hiiliterästä alhaisempi. Titaanistabiloidut EN 1.4541- ja 1.4571-laadut toimivat parhaiten korkeissa lämpötiloissa, ja niillä voidaan saavuttaa jopa 60 min palonkestävyyksiä ilman merkittävää ylimitoitusta. Haponkestävillä 1.4401- ja 1.4404-laaduilla voidaan päästä 30 min palonkestävyyteen ilman normaali-lämpötilan ylimitoitusta. Edullisimman peruslaadun 1.4301 myötölujuus on 30 min standardipalorasituksen jälkeen vielä 22 % kylmälujuudesta, kun se hiiliteräksellä on vastaavasti alle 10 %. Palonkestävyyttä vaativissa kantavissa rakenteissa optimaalisin teräslaatu on yleensä EN 1.4318, jolla on korkea 0,2-ajan lujuus ja joka on hinnaltaan edullinen ruostumaton teräslaatu.

Ruostumattoman teräksen ominaisuuksien hyödyntäminen korkeissa lämpötiloissa on uusi mahdollisuus, jota ei ole aikaisemmin tutkittu puurakenteiden liitoksissa. Ruostumattomasta teräksestä voidaan valmistaa kaikkia puurakenteissa käytettäviä liitosten teräsosia, kuten liitoslevyjä, palkkikenkiä, vetotankoja, vaarnatappeja, nauloja, ruuveja ja pultteja. Puurakenteiden liitosten suunnitteluohjeet koskevat kuitenkin pääsääntöisesti vain hiiliteräksestä valmistettuja liittimiä – sekä normaalilämpötilassa että palomitoituksessa.

1.2 Tavoite

Tutkimuksen tavoite oli kehittää kokeellisesti varmennetut suunnittelumenetelmät ruostumattomasta teräksestä valmistetuille R30- ja R60-paloluokan puurakenteiden liitoksille. Lähtökohtana olivat kilpailukykyiset tappivaarna-, pultti-, vinotanko- ja palkkikenkäliitokset sekä uudentyypiset holkkiliitokset. Myös mahdollisuuksia uudentyypisten liitosten kehittämiseksi tutkittiin.

Ruostumattoman teräksen ominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa hyödyntämällä voitaisiin vähentää palosuojaustarvetta tai mahdollisesti päästä kokonaan suojaamattomiin rakenteisiin tietyillä liitostyypeillä. Myös mahdolliset keveämmät rakenteet ja pienemmät liitostyöt pienentäisivät materiaali- ja valmistuskustannuksia ja sitä kautta parantaisivat puurakenteiden kilpailukykyä. Koko elinkaaren aikaisissa kustannuksissa säästöä syntyisi liitosten teräsosien käytönaikaisen maalauksen ja pinnoituksen jäädessä pois. Korroosiohukkaa ei tulisi, ja rakennuksen purun yhteydessä kaikki ruostumaton teräsmateriaali olisi kierrätettävissä.

2. Kirjallisuusselvitys viime vuosien liitokskeista

Viime vuosina on tehty puu-puu- ja teräs-puuliitosten palonkestävyyttä koskevia tutkimuksia Ranskassa ja Sveitsissä. Liitoksissa käsitellään puu-puuliitoksia, joissa liittiminä on käytetty pultteja, pultteja ja tappivaarvoja tai nauvoja, sekä teräs-puuliitoksia, joissa teräslevy on joko puun sisällä tai ulkopuolella ja liittiminä on käytetty pulttien ja tappivaarvojen yhdistelmää tai nauvoja. Seuraavassa esitetään yhteenveto tehdyistä tutkimuksista.

2.1 Fire resistance tests of timber connections

”Fire resistance tests of timber connections” -raportti (Kruppa ym. 2000) on julkaistu Ranskassa vuonna 2000. Se on yhteenveto D. Dhiman raportista ”Verification experimentale de la resistance au feu des assemblages d’elements en bois” – CTICM report (INC 99/399-DD/NB, 1999).

Raportti sisältää neljäntoista liitoksen palonkestävyysskoekuiden tulokset. Erityyppisiä liitoksia on viisi. Jokaista koetta tehtiin kaksi kappaletta tavoitteena 30 %:n ja 60 %:n kuormitusaste. Normaalilämpötilan murtokuorma saatiin joko määrittämällä murto-kuorma kokeellisesti tai laskennallisesti pienenmittakaavan kokeista.

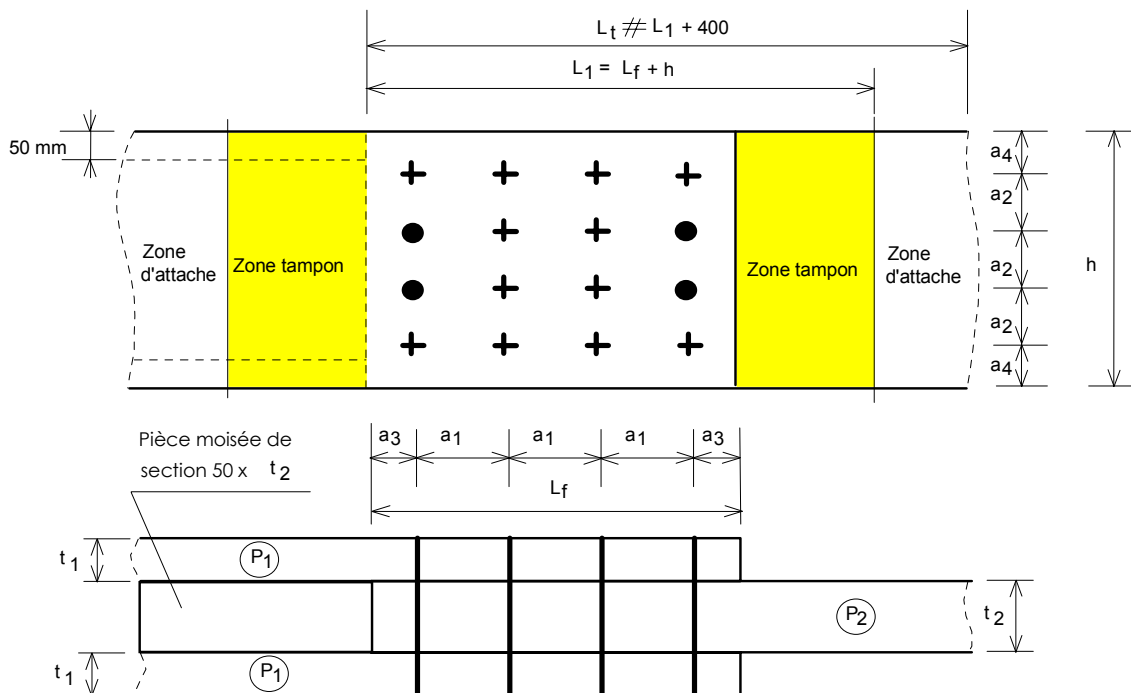
Testatut viisi erilaista liitostyyppiä olivat

- aluslevylliset pulttiliitokset
- pulttiliitokset
- tappivaarnaliitokset (päädyt suojattu tai suojaamatta)
- teräslevyliitokset
- naulaliitokset.

Liittimien koko ja määrä vaihtelivat seuraavasti:

- Pultti- ja tappivaarnaliitoksissa liittimiä oli 8 tai 16 ja liittimen halkaisija joko 12 mm tai 20 mm.
- Teräslevyliitoksissa liittimiä oli 4, 8 tai 16 ja niiden halkaisija oli joko 12 mm tai 20 mm.

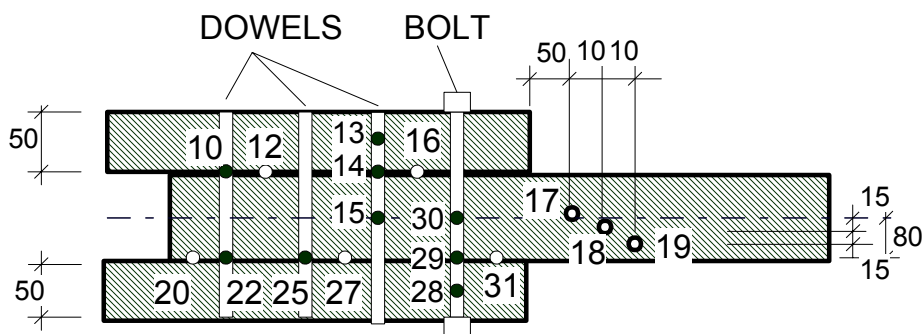
Koekappaleiden koot ja yksityiskohdat näkyvät taulukosta 2.1. Kuvassa 2.1 on esitetty taulukon merkkien selitykset.



Kuva 2.1. Esimerkki liitostyyppistä sekä taulukon 1 merkkien selitykset.

Palorasitus noudatti standardipalokäyrää. Lämpötiloja mitattiin liitoksen eri pisteistä sekä puusta että teräksestä, ks. kuva 2.2. Lisäksi mitattiin liukuma.

Taulukossa 2.2 on esitetty liitosten koetulokset. Normaalilämpötilan murtokuorman N_u perusteella on määritetty kuormitusaste palonkestävyyksikeessa.



Kuva 2.2. Liitoksen nro 7 (6 tappia ja 2 pulttia, $d = 12$ mm) lämpötilojen mittauspisteet.

Taulukko 2.1. Liitosten mitat ja liittimet.

Liitos	Liitin tyyppi	N_b	h	t_1	t_2	a_1	a_2	a_3	L_0	L_f	L_1	L_t	L_{ta}	Koe		
														Palo		Normaalilämpötila
														F1	F2	
1	Pultit 20 mm & Sinkilät 95	4	270	60	100	142.5	114	142.5		427.5	697.5	1097.5	1767.5	x	x	X
2	Pultit 20 mm	8	240	60	100	140	80	140		700	940	1340	1980	x	x	
3	Tapit 20 mm (ja 2 pulttia)	6+2	240	60	100	140	60	140		700	940	1340	1980	x	x	X
4	Suojatut tapit 20 mm (ja 2 pulttia)	6+2	240	60	100	140	60	140		700	940	1340	1980	x	x	
5	Tapit 20 mm (ja 4 pulttia)	12+4	400	60	100	140	60	140		700	1100	1500	2300	x	x	
6	Pultit 12 mm	8	170	50	80	84	48	84		420	590	990	1560	x	x	
7	Pultit 12 mm (ja 2 pulttia)	6+2	170	50	80	84	36	84		420	590	990	1560	x	x	
8	Suojatut tapit 12 mm (ja 2 pulttia)	6+2	170	50	80	84	36	84		420	590	990	1560	x	x	X
9	Teräs levy + pultit 20 mm	8	240	60		140	60	140	700	1400	940	1340	2680	x	x	
10	Teräs levy + pultit 20 mm	16	400	60		140	80	140	700	1400	1100	1500	3000	x	x	
11	Teräs levy + pultit 12 mm	4	170	50		84	48	84	252	504	420	820	1640	x	x	
12	Teräs levy + pultit 12 mm	8	170	50		84	48	84	420	840	590	990	1980	x	x	
13	Teräs levy + pultit 12 mm	16	240	50		84	48	84	420	840	660	1060	2120	x	x	
14	Naulat 110 x 21	56	175	50	90	30	25	74		388	563	963	1538	x	x	

L_f : Liitososan pituus

L_{ta} : Liitoksen kokonaispituus

L_a : Siirtymäalueen pituus = 400 mm

L_f : Palolle alttiin liitoksen pituus

N_b : Liitinten lukumäärä

$$L_{ta} = L_f + 2 * h + 2 * L_a$$

Taulukko 2.2. Koetulokset.

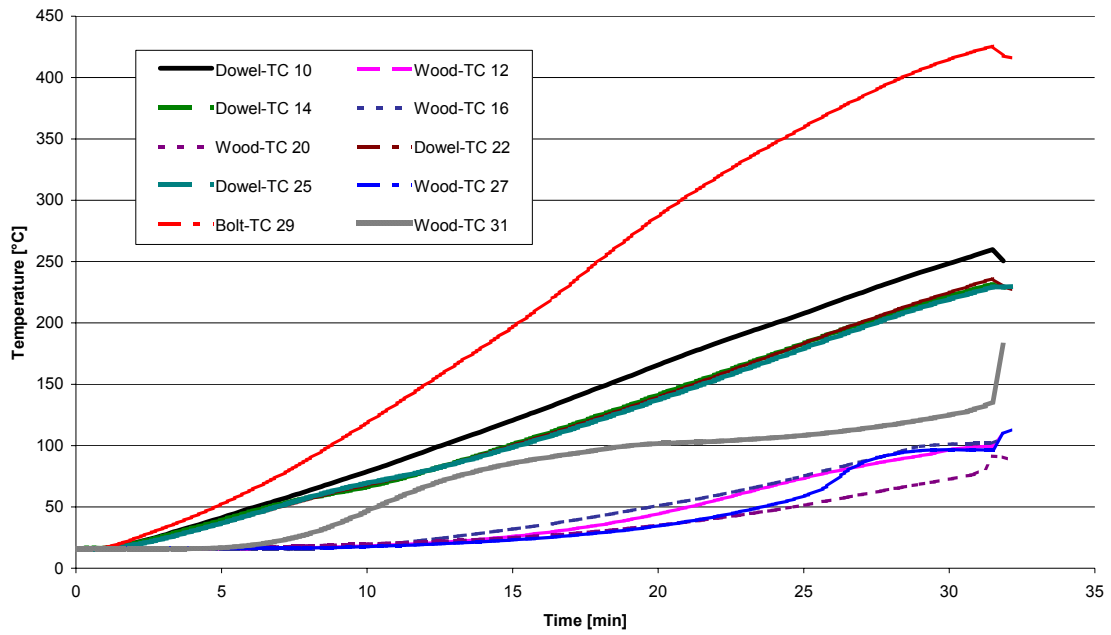
Liitos	Liittimet	Kuormitus (kN)	Kuormitusaste	Palonkestävyysaika [min]
1	16 sinkilät Ø95 4 pulttia d20	90	0,28	22
		180	0,56	14
2	8 pulttia d20	111	0,30	24
		221	0,59	15
3	6 tappivaarnaa d20 2 pulttia d20	111	0,33	35
		221	0,65	7 **
4	6 suojattua tappivaarnaa d20 2 pulttia d20	99	0,31	41
		198	0,62	22
5	12 tappivaarnaa d20 4 pulttia d20	144	0,21	38
		287	0,42	23
6	8 pulttia d12	39	0,24	22
		91,5	0,57	13
7	6 tappivaarnaa d12 2 pulttia d12	45	0,28	32
		90	0,56	13
8	6 suojattua tappivaarnaa d12 2 pulttia d20	39	0,27	27 *
		78	0,54	9**
9	8 pulttia d20 Teräslevy	97	0,19	22
		197	0,39	15
10	16 pulttia d20 Teräslevy	192	0,19	23
		380	0,38	16
11	4 pulttia d12 Teräslevy	30	0,29	17
		60	0,58	10
12	8 pulttia d12 Teräslevy	51	0,25	18
		102	0,49	11
13	16 pulttia d12 Teräslevy	99	0,24	18
		198	0,48	13
14	56 naulaa d4,9	39	0,39	31
		78	0,77	18

* Murto johtui puuosien palamisesta. Palosuojausta parannettiin seuraavissa kokeissa.

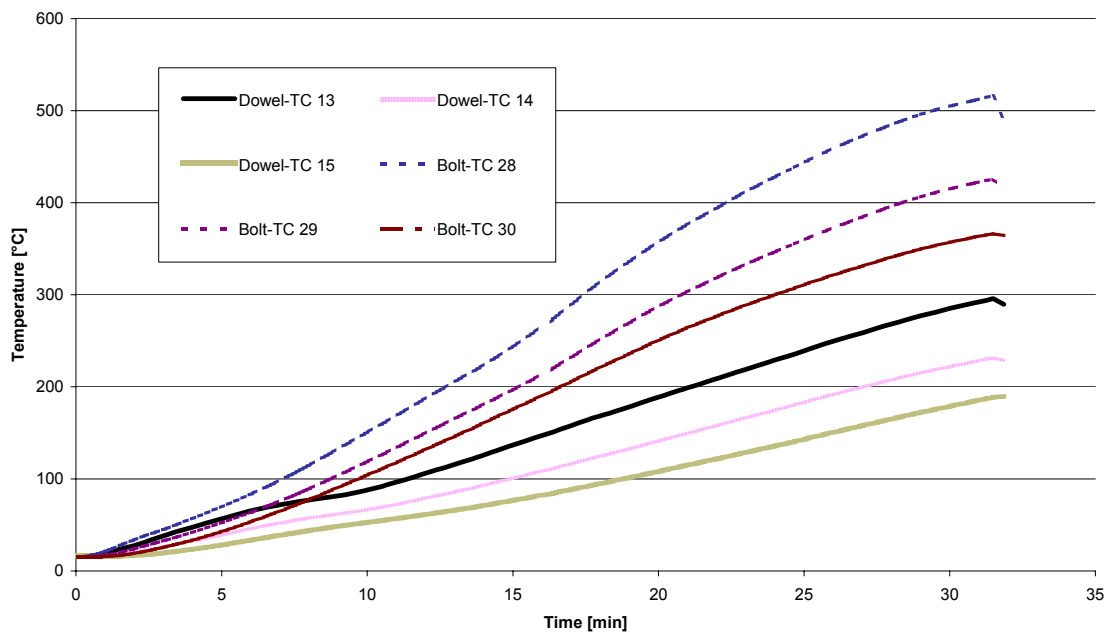
** Murto johtui huonosta laminoinnista.

Kuvissa 2.3 ja 2.4 on esitetty puusta ja teräksestä mitattuja lämpötiloja sekä kuvassa 2.5 erikokoisten pulttien ja tappien lämpötilagradientteja. Kuvassa 2.6 on esitetty puun hiil-tymänopeuden arvoja eri ajanhetkillä mitattuna puupoikkileikkauksen eri sivuilta.

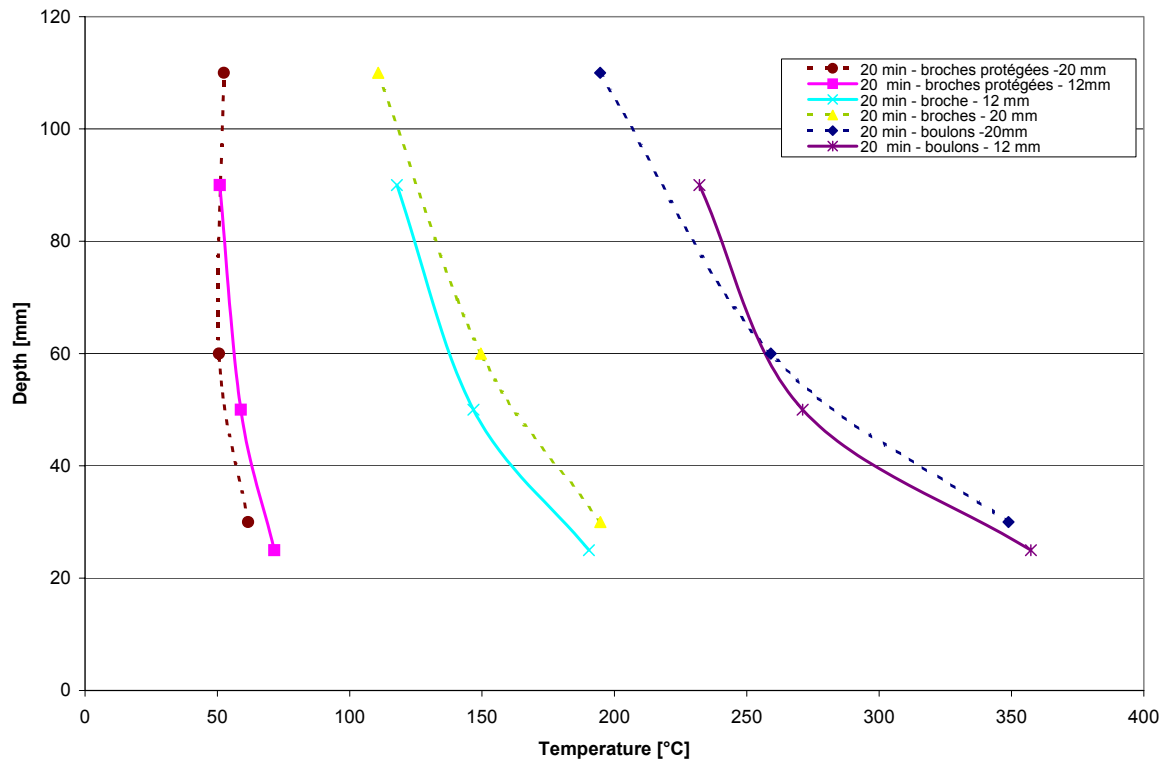
Murto tapahtui yleensä puusten sivuosien leikkautumisena liittimien tasolla.



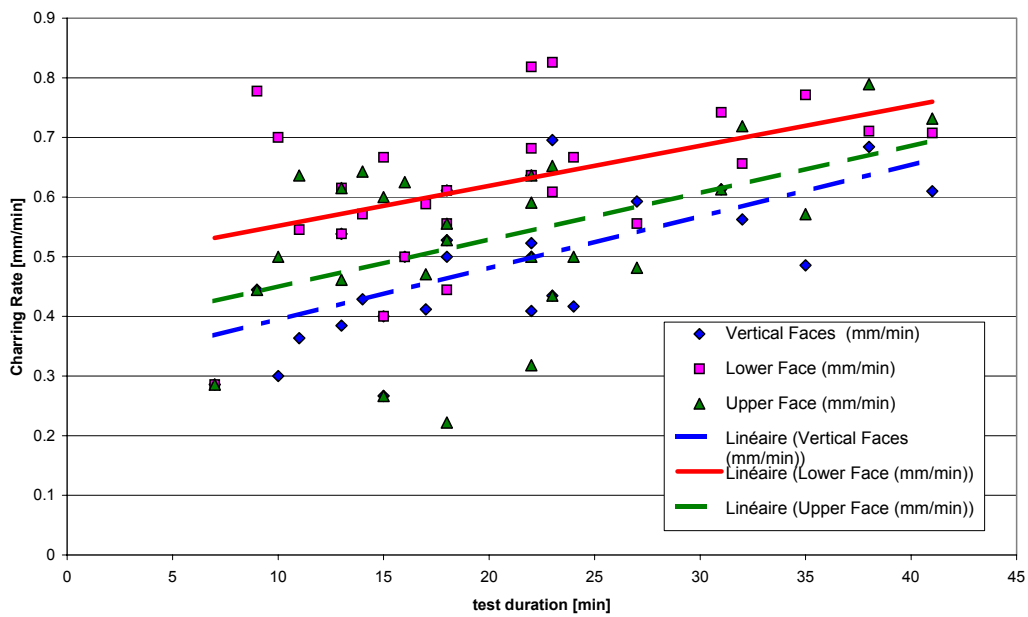
Kuva 2.3. Puusta, pultista ja tapeista mitatut lämpötilat, sivu- ja keskipuun välissä.



Kuva 2.4. Pultista ja tapista mitatut lämpötilat.



Kuva 2.5. Halkaisijaltaan 12 mm tai 20 mm paksun pultin ja tapin lämpötilagradientit.



Kuva 2.6. Puun hiiltymänopeus eri ajanhetkinä mitattuna poikkileikkauksen eri sivuilta.

2.2 Predicting the behaviour of dowelled connections in fire: Fire test results and heat transfer modelling

Esitelmä ”Predicting the behaviour of dowelled connections in fire: Fire test results and heat transfer modelling” (Laplanche ym. 2004) pidettiin World Conference on Timber Engineering -tilaisuudessa. Esitelmä sisältää tappivaarnaliitoksilla tehtyjä palonkestävyyskokeita, liitoksen poikkileikkauksen lämpötilajakauman analysoinnin FEmenetelmällä sekä laskentatulosten ja koetulosten vertailua. Tutkimus on tehty Ranskassa.

Palonkestävyyskokeet. CSTB on tehnyt tappivaarnoilla ja pulteilla liitettyjen puu-puuliitosten palonkestävyyskokeita. Liitokset on mitoitettu Eurocode 5:n, Part 1-1:n ja 1-2:n mukaan, ja niiden päämitat on esitetty taulukossa 2.3.

Taulukko 2.3. Puu-puuliitosten mitat.

Koe	Liittimen halkaisija [mm]	Palkin korkeus [mm]	Palkin sivuosien paksuus t_1 [mm]	Palkin keskiosien paksuus t_2 [mm]
A	16	254	84	160
B			64	112

Puutavara oli GL28h-liimapuuta, ja liittimet oli asennettu kahteen neljän liittimen riviin. Liittimistä kolme oli tappeja ja yksi oli pultti. Liitokset testattiin aluksi normaali-lämpötilassa liitoskapasiteetin selvittämiseksi, minkä jälkeen normaalilämpötilan liitoskapasiteetin perusteella laskettiin 10 %:n, 20 %:n ja 30 %:n kuormitusastetta vastaavat palonkestävyyskokeiden kuormat. Liitokset olivat kokeissa neljältä sivulta palolle alttiina. Koetulokset on esitetty taulukossa 2.4. Koetulosten perusteella voidaan lisäksi todeta, että pulttien ja tappien lämpötilaprofiilit poikkesivat huomattavasti toisistaan.

Taulukko 2.4. Koetulokset.

Koe	t_1 [mm]	t_2 [mm]	Kuorma [kN]	Kuormitusaste F_{fi}/N_u [%]	Aika [min]
A	84	160	26,6	9,9	79
A			80,6	29,9	54
B	64	112	26,0	9,7	59
B			53,7	20,0	46
B			53,1	19,8	45
B			80,5	30,0	38
B			80,6	30,1	41

Liitoksen lämpötilan laskenta. Liitosten lämpötilojen laskentaa varten tarvittavat materiaalien termiset ominaisuudet saatiin kirjallisuudesta. Teräksen termiset ominaisuudet

ovat hyvin tunnettuja, ja laskennassa käytettiin Eurocode 3:n, Part 1-2:n (prEN 1993-1-2:2001) mukaisia lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvoja. Tiheydelle käytettiin arvoa $7\,850\text{ kg/m}^3$.

Puun osalta tehtiin laajempi kirjallisuusselvitys ja vertailtiin eri lähteissä annettuja lämmönjohtavuuden, ominaislämpökapasiteetin ja tiheyden arvoja lämpötilan funktiona. Näiden mallien erot syntyvät siitä, miten puun kosteus ja sen haihtuminen 100 °C :ssa sekä puun muuttuminen hiileksi noin 300 °C :ssa huomioidaan.

Analyysi. Liitoksen poikkileikkauksen lämpötilat laskettiin aluksi kaksidimensio-naalisella FEM-ohjelmalla, jotta voitiin vertailla eri materiaalimallien antamia tuloksia koetuloksiin. Materiaalimallit, joilla saatiin paras korrelaatio mahdollisimman monella kokeella, valittiin käytettäväksi jatkossa analysoitaessa liitoksia kolmedimensio-naalisella FEM-ohjelmalla. Laskentatulokset ovat hyvin yhteneväisiä kokeissa mitattujen lämpötilojen kanssa erityisesti teräksellä. Puusta mitatut lämpötilat (kohdasta, johon liitin ei vaikuta) jäävät vähän alhaisemmiksi kuin lasketut arvot, eli laskemalla saadaan varmalla puolella olevia tuloksia.

Yhteenveto. Puu-puuliitoksilla, jotka on liitetty yhteen tapeilla ja pulteilla, voidaan saavuttaa 30 minuutin tai jopa 60 minuutin palonkestoajoja kuormitusasteen suuruuden mukaan.

2.3 Fire tests on timber connections with dowel-type fasteners

”Fire tests on timber connections with dowel-type fasteners” -esityksessä (Frangi & Mischler 2004) käsitellään Sveitsissä tehtyjä puu-teräslitosten palonkestävyysskojeita sekä kerrotaan liitoksia koskevista jatkohankkeista.

Palonkestävyysskojeissa puu-teräslitosskojeissa teräslevyt olivat puun sisällä ja liittiminä oli tappeja, tai joissain kokeissa teräslevyt olivat uloinna ja liittiminä oli nauvoja. Teräslevyjen ollessa puun sisällä kokeissa varioitiin seuraavia muuttujia:

- kuormitusaste, 30 %, 15 % tai 7,5 %
- tappien määrä ja sijainti (9 x 2, 9 x 3, 3 x 3 ja 4 x 2)
- uloimpien puuosien paksuus, reuna- ja päätyetäisyydet
- terästappien halkaisija, 6,3 mm ja 12 mm
- ei palosuojausta tai puu- tai kipsilevysuojaus.

Kaikkien liitostyyppien kapasiteetit määritettiin normaalilämpötilassa. Palonkestävyysskojeita tehtiin kaksi kullekin liitostyypille standardipalorasituksella. Kaikkiaan normaalilämpötilassa tehtiin 30 koetta ja korkeissa lämpötiloissa 26 koetta.

Puutavara oli GL24h-luokan liimapuuta useimmissa liitoksissa, paitsi kun tappeja oli kolmessa rivissä, lujuusluokka oli GL36h puun murtumisen estämiseksi. Kaikista koe-kappaleista määritettiin puun kosteus ja tiheys.

Teräslevyjen paksuus oli 5 mm, ja teräslevyjä oli kaksi tai kolme liitoksessa. Teräslevyjen karakteristinen myötölujuus ja vetolujuus olivat 355 N/mm² ja 510 N/mm². Halkaisijaltaan 6,3 mm tapin keskimääräinen vetolujuus oli 598 N/mm² ja 12 mm tapin 636 N/mm². Naulat olivat halkaisijaltaan 4 mm.

Palonkestävyyskokeiden jälkeen uloimmat puuosat olivat täysin hiiltyneet, samoin kuin liitoksen ylimpiä ja alimpia tappeja suojaava puukerros. Taulukossa 2.5 on esitetty kokeiden tulokset.

Liitosten D01.1–D03.1, joissa kaikissa oli sama palkkikoko sekä reuna- ja päätyetäisyydet mutta eri määrä tappeja, sekä liitoksen D04.1, jossa oli samankokoinen palkki mutta isommat tapit ja reuna- ja päätyetäisyydet, palonkesto-aika vaihteli 30,5–35 minuutin välillä. Kuormitusasteen pienentäminen, tappivaarjien määrän lisääminen tai tappien halkaisijan kasvattaminen ei siis merkittävästi lisännyt palonkesto-aikaa yli 30 min.

Taulukko 2.5. Koetulokset.

Koe	Tappien määrä ja halkaisija Puusauva	Kuormi- tusaste	Kuorma [kN]	Aika [min]	Murtotapa
D01.1	9x2, ø 6,3 mm 200x200 mm ²	0,3	145	32/34	– tapeissa muodonmuutoksia, puun reunapuristusmurto poikkileikkaus murtui
		0,15	72	38/34,5	– puun reunapuristusmurto ja puun halkeilu
		0,075	36	41.5/41	– puun reunapuristusmurto ja puun halkeilu
D02.1	9x3, ø 6,3 mm 200x200 mm ²	0,3	188	30,5/32	– poikkileikkaus murtui ja liitos- alueen leikkautuminen
D03.1	3x3, ø 6,3 mm 200x200 mm ²	0,3	69	32/33	– puun halkeilu
D04.1	4x2, ø 12 mm 200x200 mm ²	0,3	124	34,5/35	– tapeissa muodonmuutoksia, puun reunapuristusmurto
D01.2	9x2, ø 6,3 mm 280x280 mm ²	0,3	173	73/73	– poikkileikkaus ja puun reunapu- ristusmurto
D01.3	9x2, ø 6,3 mm 200x200 mm ² 27 mm puulevy	0,3	145	72/57	– poikkileikkaus murtui ja liitos- alueen leikkautuminen
D01.4	9x2, ø 6,3 mm 200x200 mm ² 15/18 mm kipsilevy	0,3	145	60,5/61	– poikkileikkaus murtui ja liitos- alueen leikkautuminen
N01.1	9x6, ø 4,0 mm naulat 120x180 mm ²	0,3	90	11,5/12	– naulojen muodonmuutoksia, puun reunapuristusmurto
		0,15	45	14/12,5	
N01.2	9x6, ø 4,0 mm naulat 120x180 mm ² 2 mm palosuojaus	0,3	90	31/28,5	– poikkileikkaus murtui ja liitos- alueen leikkautuminen
		0,15	45	35,5/38	

Liitoksen D01.2 palkkikokoa lisättiin 200 x 200 mm²:stä 280 x 280 mm²:iin, jolloin teräslevyjä suojaava puukerros kasvoi 40 mm, kuten myös tappivaarujen reuna- ja päätyetäisyydet. 200 mm leveässä palkissa suojarahsuus oli 37 mm, kun tapin halkaisija oli 6,3 mm, ja 44 mm, kun tapin halkaisija oli 12 mm. 280 mm leveässä palkissa suojarahsuus oli 77 mm, kun tapin halkaisija oli 6,3 mm. Tällöin palonkesto-aika oli 73 minuuttia, eli palonkesto-aika kasvoi noin yhden minuutin kutakin suojakerroksen lisämillimetriä kohden.

Nauiloilla kiinnitettyjen suojaamattomien teräslevyjien ollessa uloinna liitoksessa sen palonkesto oli vähän yli kymmenen minuuttia (N01.1). Käyttämällä suojausta palonkesto-aikaa voidaan pidentää (N01.2).

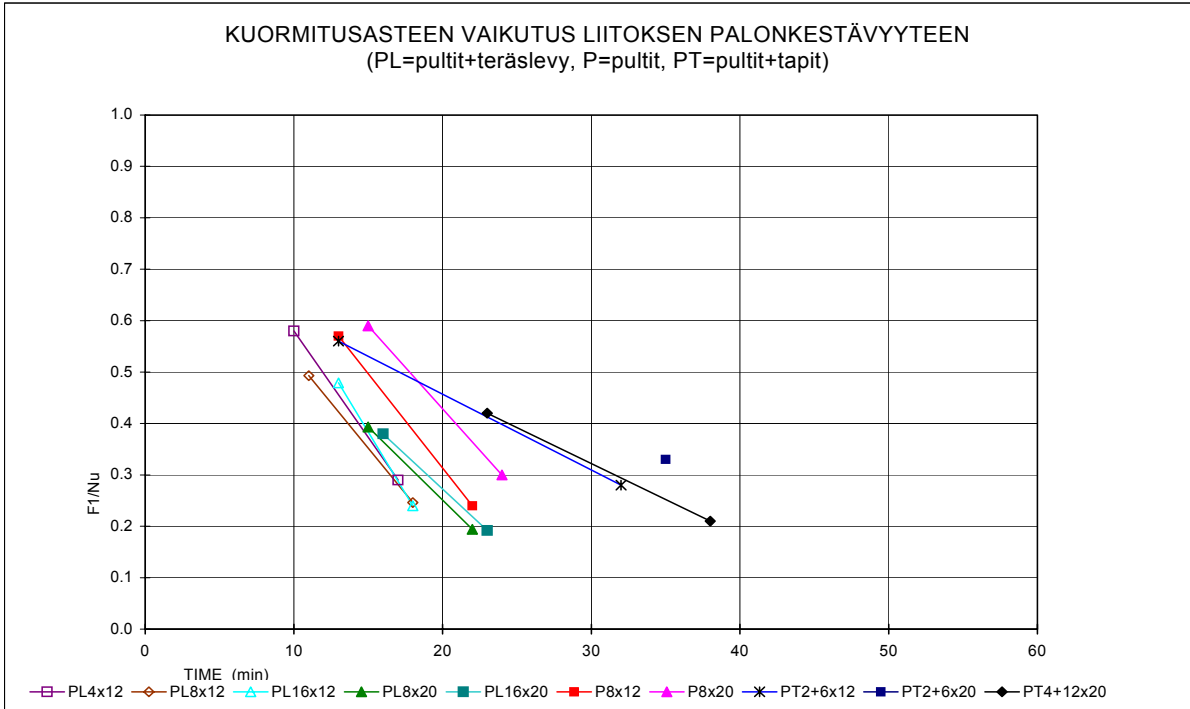
Yhteenveto. Koetulosten perusteella voidaan tarkistaa Eurocode 5:n palo-osan laskentamenetelmiä ja kehittää yksinkertainen laskentamenetelmä tämän tyyppisten liitosten 60 min palonkeston määrittämiseen. Liitoksen lämpötilakehitystä tullaan jatkossa analysoimaan myös FE-laskennalla.

2.4 Yhteenveto

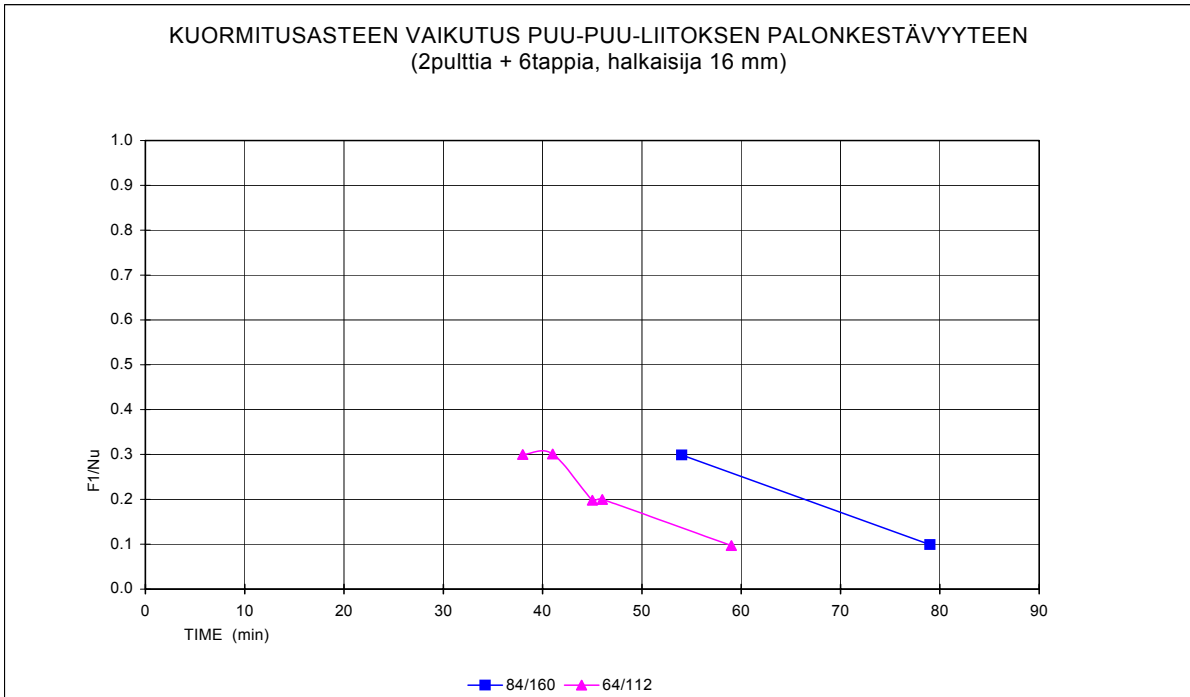
Edellä esitettyjen tutkimusten koetulosten perusteella on piirretty käyrät, joissa esitetään kuormitusasteen vaikutus palonkestävyyteen erilaisilla liitostyypeillä; ks. kuvat 2.7–2.9. Kuvassa 2.7 esitetään kohdan 2.1 koetuloksia. Niistä nähdään, että sellaisten liitosten palonkestävyys, joissa oli teräslevy puuosien välissä ja kiinnikkeinä pultit, kuormitusaste putoaa hyvin jyrkästi palonkestoajan kasvaessa. Näissä liitoksissa kuormitusasteen putoamisnopeus on melkein sama pulttien eri halkaisijalla tai määrällä. Kuormitusasteen putoamisnopeus on sama myös pelkillä pulteilla. Pulttien ja tappien yhdistelmällä kuormitusasteen putoamisnopeus on hitaampaa, ja niillä päästään yli 30 minuutin palonkesto-aikaan. Putoamisnopeus on myös kaikilla pulttien ja tappien yhdistelmillä samanlainen.

Kuvassa 2.8 esitetään kohdan 2.2 koetuloksia. Näissä kokeissa tutkittiin puuosien paksuuksien muutosta palonkestoan liittimien koon ja määrän pysyessä samana. Kuormitusasteen putoamisnopeus on molemmilla liitostyypeillä samansuuruinen. Kasvattamalla puuosien paksuuksia tarpeeksi voidaan päästä 60 minuutin palonkestoan.

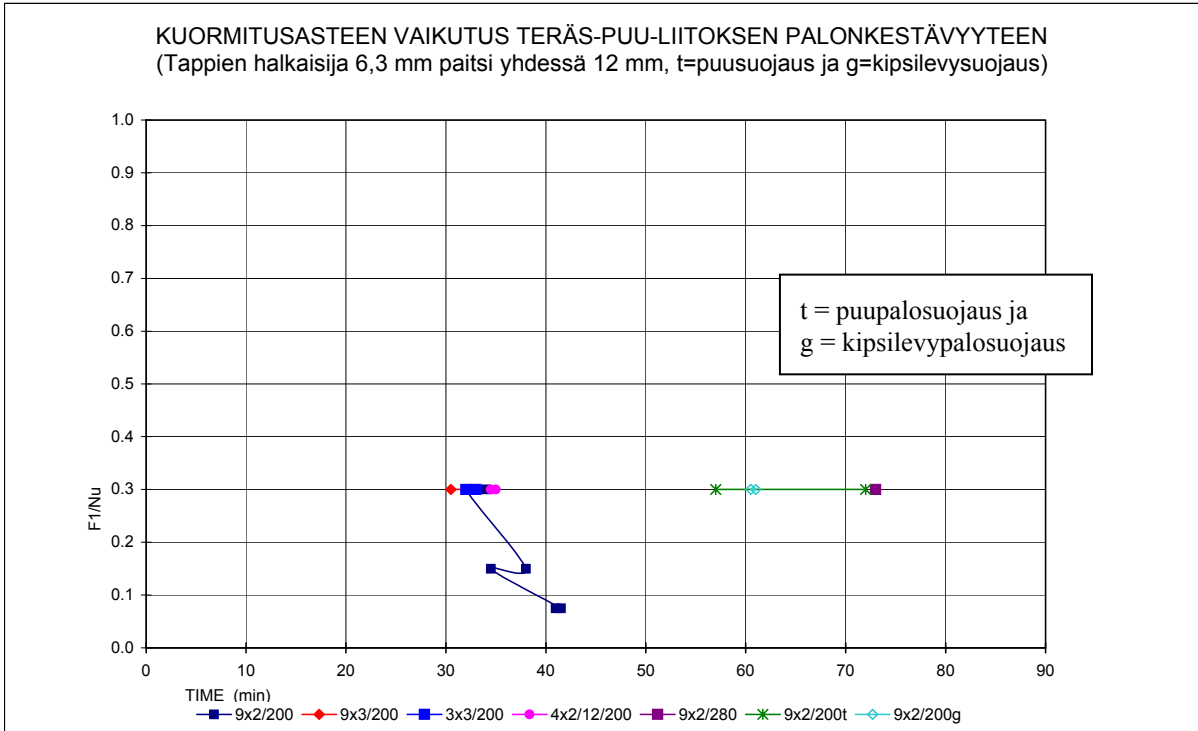
Kuvassa 2.9 esitetään kohdan 2.3 koetuloksia. Näissä kokeissa tutkittiin enemmän tappien määrän ja sijainnin vaikutusta, minkä vuoksi vain yhdellä liitostyyppillä on tehty kokeita eri kuormitusasteilla. 30 minuutin palonkesto on saavutettu samalla 200 x 200 mm² palkkikoolla ja eri liitinmäärillä kuormitusasteen ollessa 0,3. Suuremmalla palkkikoolla ja erilaisilla palosuojuuksilla on päästy kuormitusasteella 0,3 yli 60 minuutin palonkestoan.



Kuva 2.7. Kohdan 2.1 "Fire resistance tests of timber connections" koetuloksia.



Kuva 2.8. Kohdan 2.2 "Predicting the behaviour of dowelled connections in fire: Fire test results and heat transfer modelling" koetuloksia.



Kuva 2.9. Kohdan 2.3 ”Fire tests on timber connections with dowel-type fasteners” koetuloksia.

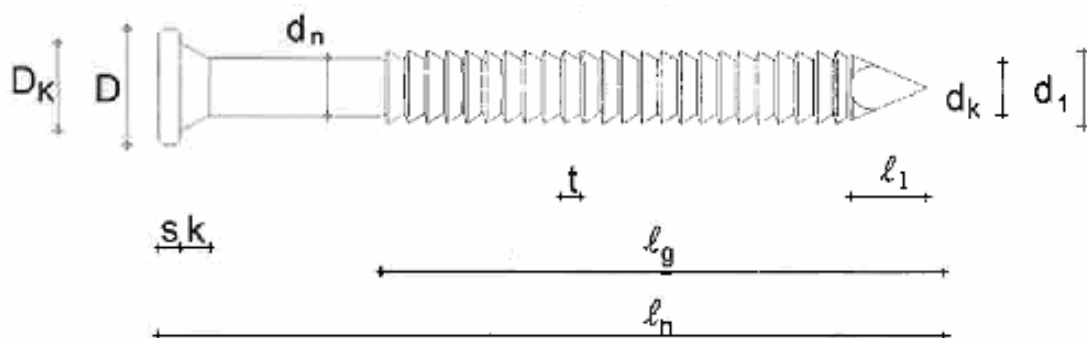
3. Palkkikenkäliitosten palonkestävyyskokeet

3.1 Koekappaleet

Palkkikenkäliitosten palonkestävyyskokeita tehtiin kaksi kappaletta. Kokeissa palkkikenkien mitat olivat erilaiset. 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) ja EN 1.4571 (AISI 316 Ti) (koe 2). Palkkikengät kiinnitettiin Gunnebon ankkurinauloilla, AISI 316 (EN 1.4401, A4) puuhun. Taulukossa 3.1 ja kuvassa 3.1 on esitetty naulojen mitat ja profiili. Palkkikengät kiinnitettiin 60 x 4,0 nauloin pääpalkkiin sekä ensimmäisessä kokeessa 40 x 4,0 nauloin poikkipalkkiin ja toisessa kokeessa 60 x 4,0 nauloin. Pääpalkit (115 x 315 mm²) ja poikkipalkit (koe 1: 90 x 270 mm² ja koe 2: 115 x 270 mm²) olivat liimapuuta, jonka lujuusluokka oli L40 (GL32c). Tarkemmat tiedot palkkikengistä, niiden naulauksesta sekä puupalkeista on esitetty liitteessä A.1. Kuvassa 3.2. on koekappale uunissa ennen koetta.

Taulukko 3.1. Ankkurinaulojen nimellismitat (mm). Symbolit on määritelty kuvassa 3.1.

Naula $l_n \times d_n$	d_1	d_k	l_g	D	D_k	s	k	t	Koe 1 määrä (kpl)	Koe 2 määrä (kpl)
40 x 4,0	4,4	3,6	30	8,0	6,0	1,5	2,8	1,25	16	-
60 x 4,0	4,4	3,6	50	8,0	6,0	1,5	2,8	1,25	16	16 + 16



Kuva 3.1. Ankkurinaulan profiili.



Kuva 3.2. Palkkikenkäliitos (koe 1) uuniin asennettuna ennen koetta.

3.2 Kokeet

Ensimmäinen palkkikenkäliitostekoe (koe 1) tehtiin 10.6.2003. Koetulosten perusteella koekappaleen mittoja ja palkkikengän muotoa muutettiin sekä liittimien reuna-etaisyyksiä lisättiin toiseen kokeeseen (koe 2), joka tehtiin 16.3.2004.

Kokeet tehtiin ns. K-uunissa soveltaen standardia SFS-EN-1365-3:1999 (ISO 834-6:1999). Koejärjestelyt on esitetty liitteessä A.2.1. Koekappaletta kuormitettiin kokeen aikana poikkipalkin jännevälän puolivälistä 22,8 kN (koe 1) tai 24,0 kN (koe 2) vakiovoimalla (kuormalaskelma, ks. liite A.2.2), jolloin kummankin palkkikenkäliitoksen kuorma oli 11,4 kN (koe 1) tai 12 kN (koe 2). Kuormitus vastasi 55 % (koe 1) tai 46 % (koe 2) lasketusta keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista normaalilämpötilassa. Kuormitus aloitettiin 15 min ennen palonkestävyyskokeen alkua.

Uunin lämpötilaa ohjattiin neljän plattatermoelementin avulla, joista kaksi oli suunnattu uunin lattiaan ja kaksi uunin seinään. Lämpötilan nousunopeus oli standardin SFS-EN 1363-1:1999 (ISO 834-1:1999) mukainen.

Kokeen aikana mitattiin koekappaleen lämpötiloja palkkikengästä sekä kummankin palkin sisältä eri syvyyksiltä sekä palkin alapinnasta että pystysivuilta (liite A.3).

Koe 1 (10.6.2003) lopetettiin ajassa 23 min ja koe 2 (16.3.2004) ajassa 28 min 40 s, kun palkkikengät eivät enää kantaneet koekuormaa.

3.3 Koetulokset

Uunin ja koekappaleiden mitatut lämpötilat on kokeen 1 osalta esitetty liitteen A.4 kuvissa A.10–A.17 ja kokeen 2 osalta kuvissa A.22–A.27. Liitteessä A.5 on esitetty paineero uunin ja koehallin välillä kummankin kokeen osalta. Lisäksi tehtiin havaintoja koekappaleen käyttäytymisestä sekä mitattiin poikkipalkin siirtymä jänteen puolivälistä. Tulokset on esitetty liitteessä A.6. Liitteessä A.7 on valokuvia koekappaleista ennen koetta, kokeen aikana ja sen jälkeen.

3.4 Koetulosten analysointi

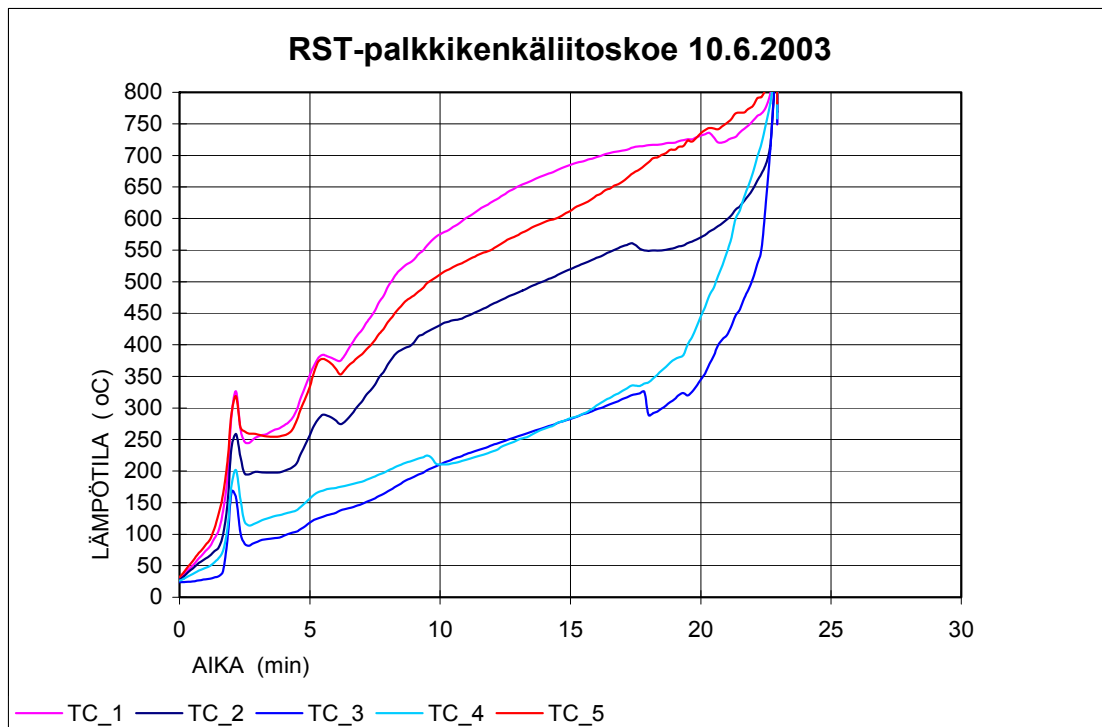
Koe 1. Keskipalkkiin kiinnittyvän palkkikengän lämpötilat ovat korkeammat kuin reunapalkkiin kiinnittyvän, mikä johtuu uunin koon aiheuttamasta epätasaisesta lämpötilajakaumasta. Kuvassa 3.3 on esitetty keskipalkkiin kiinnittyvän palkkikengän lämpötilat. Palkkikengän lämpötiloissa näkyy pienellä viiveellä, noin 2 min ja 5 min kohdalla, uunin lämpötiloissa mitatut lämpötilapiikit, jotka johtuvat palavan materiaalin aiheuttamasta lisälämmöstä, jota uunin ohjausjärjestelmä ei heti pysty korjaamaan. Muuten lämpötilat nousevat koko kokeen ajan; alapinnan lämpötila (tc1) odotetusti nopeimmin. Sivulämpötiloissa (tc2 ja tc5) on huomattava ero.

Liitos antoi sivunauloista yhtäkkisesti myöten noin ajassa 17,5 min, mutta kantoi kuitenkin koekuorman uudelleen. Palkin irtoaminen palkkikengästä näkyy sekä palkkien välissä (tc3 ja tc4) että toisella sivulla olleessa termoelementissä (tc2). Samoin irtoaminen näkyy siirtymänopeuden nopeana kasvuna kuvassa 3.4. Irtoamishetkellä palkkikengän lämpötilat palkkien välissä olivat 300 °C–350 °C, sivulla 550 °C–700 °C ja alapinnassa yli 700 °C. Liitos kantoi vielä koekuorman notkahduksen jälkeenkin aina 22 min:iin asti, jolloin kaikki lämpötilat olivat noin 800 °C.

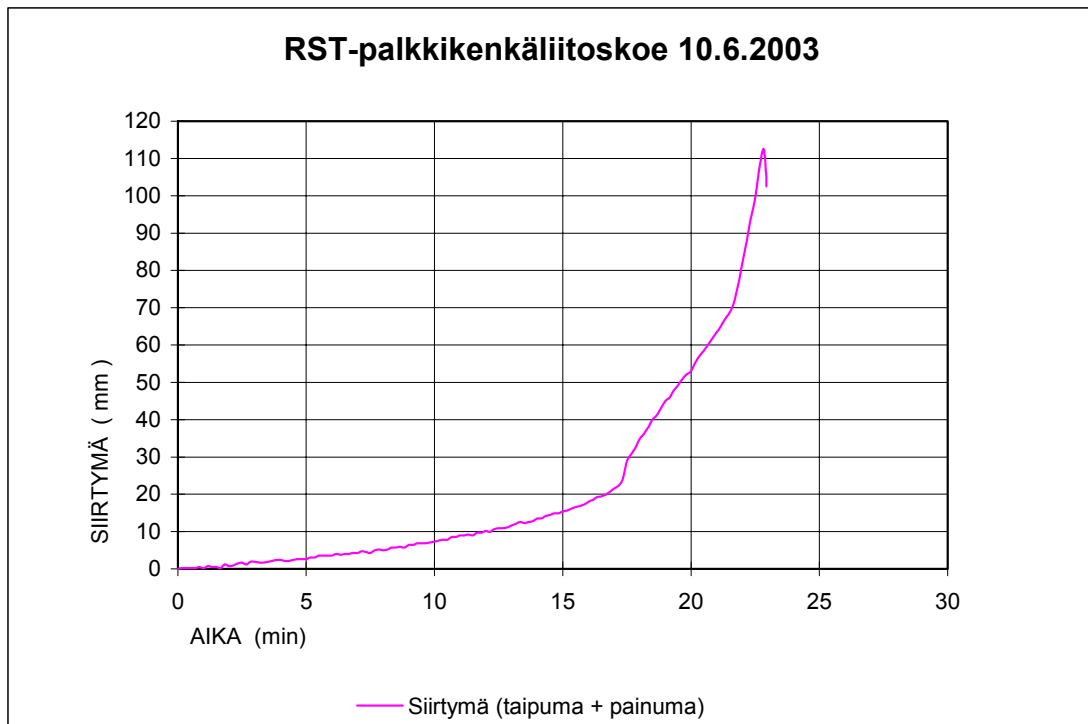
Palkkikengästä mitattujen lämpötilojen lisäksi mitattiin lämpötiloja puun sisältä eri etäisyyksiltä pinnasta: 18 mm ja 30 mm etäisyydeltä palkkien alapinnasta sekä 12 mm ja 24 mm etäisyydeltä palkkien pystysivuilta. Mittausten perusteella voidaan arvioida hiiltymän etenemistä palkissa, kun hiiltymän alkamislämpötilana pidetään 300 °C. Lämpötilamittaukset on esitetty liitteen A.4 kuvissa A.14–A.17 ja hiiltymän eteneminen palkissa 90 x 270 mm² kuvissa A.18–A.19 ja palkissa 115 x 315 mm² kuvissa A.20–A.21.

Koe 2. Kuten kokeessa 1, keskipalkkiin kiinnittyvän palkkikengän lämpötilat ovat korkeammat kuin reunapalkkiin kiinnittyvän. Kuvassa 3.5 on esitetty keskipalkkiin kiinnittyvän palkkikengän lämpötilat. Muuten lämpötilat nousevat kuten kokeessa 1 koko kokeen ajan, alapinnan lämpötila (tc1) odotetusti nopeimmin. Sivulämpötilojen ero (tc2 ja tc5) on pienempi kuin kokeessa 1.

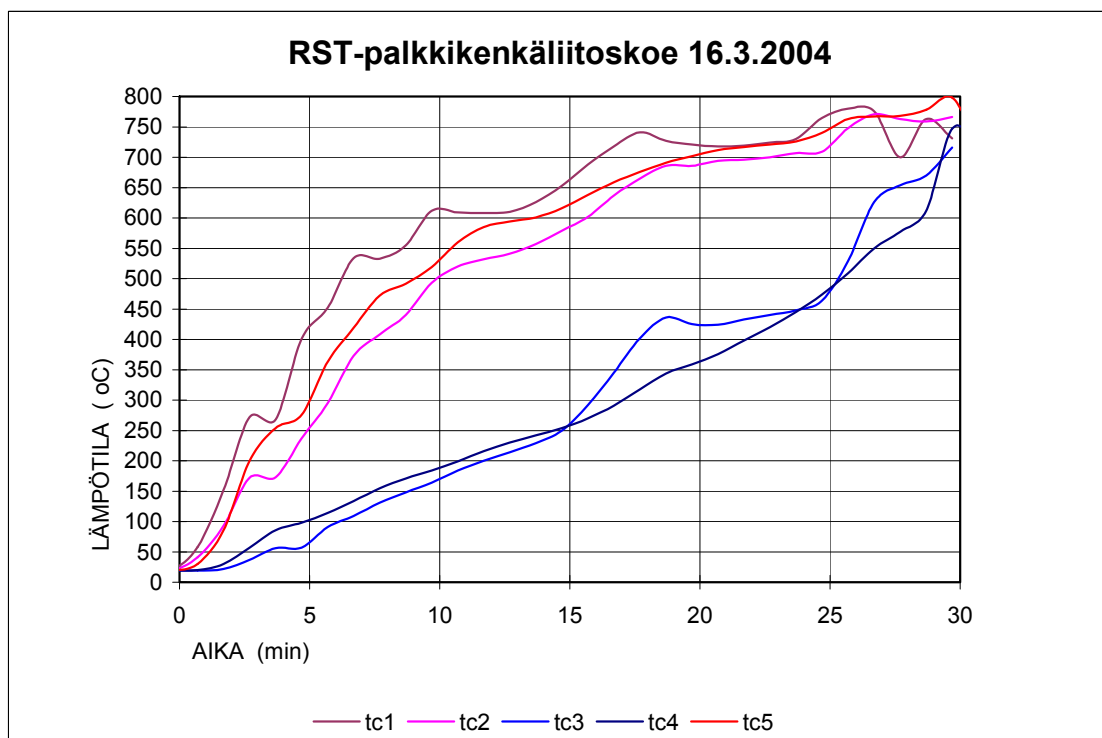
Palkkien välistä (tc3 ja tc4) mitatut lämpötilat nousivat tasaisesti aina murtoon asti, kuten myös taipuma. Taipumanopeus kasvoi myös tasaisesti (ks. kuva 3.6). Murto tapahtui 27 min kuluttua kokeen aloituksesta naulaliitoksen pettäessä kannatettavassa palkissa. Kokeen jälkeen liitokset avattiin ja hiiltymäsyvyydet mitattiin. Palkkikengän alla puu oli hiiltynyt 2–6 mm syvemmälle kuin muualla ja naulojen ympärillä noin 6 mm syvemmälle. Noin 30 min kestäneessä palorasituksessa liimapuun hiiltymän syvyys oli rst-levyn alla keskimäärin 22 mm ja naulojen kohdalla noin 27 mm (ks. kuva 3.7), mistä jonkin verran saattaa olla kokeen lopettamisen jälkeen tapahtunutta hiiltymistä.



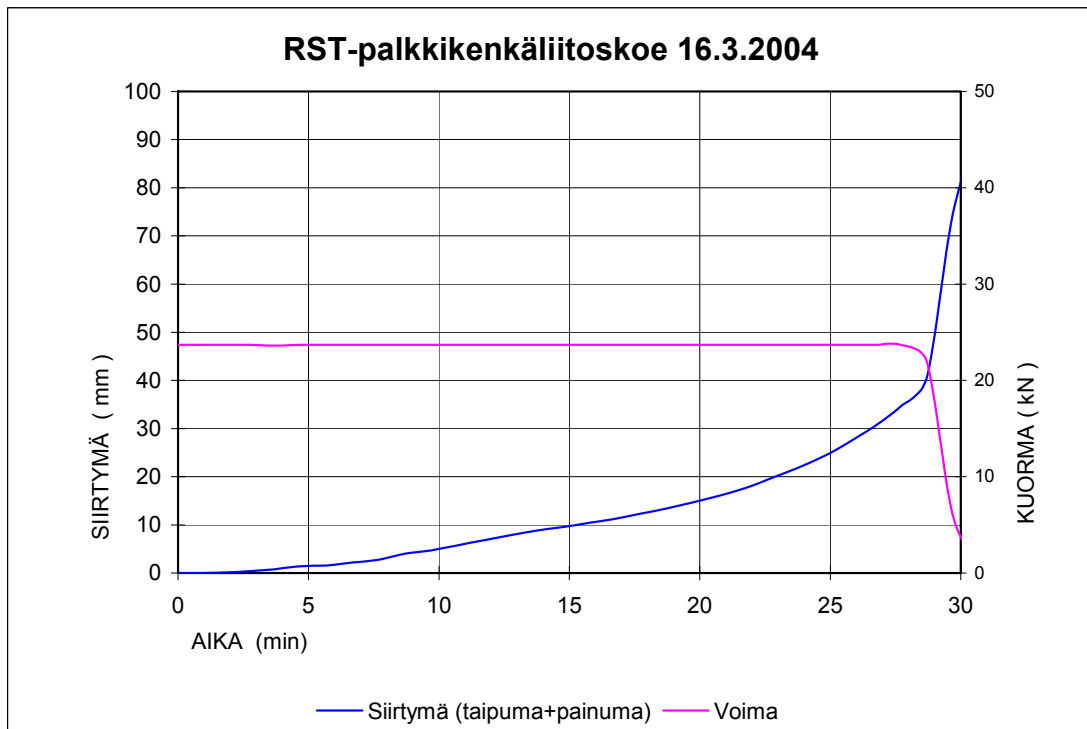
Kuva 3.3. Kokeen 1 palkkikengän mitatut lämpötilat: tc1 alapinnassa, tc2 ja tc5 sivuilla sekä tc3 ja tc4 päädyssä palkkien välissä.



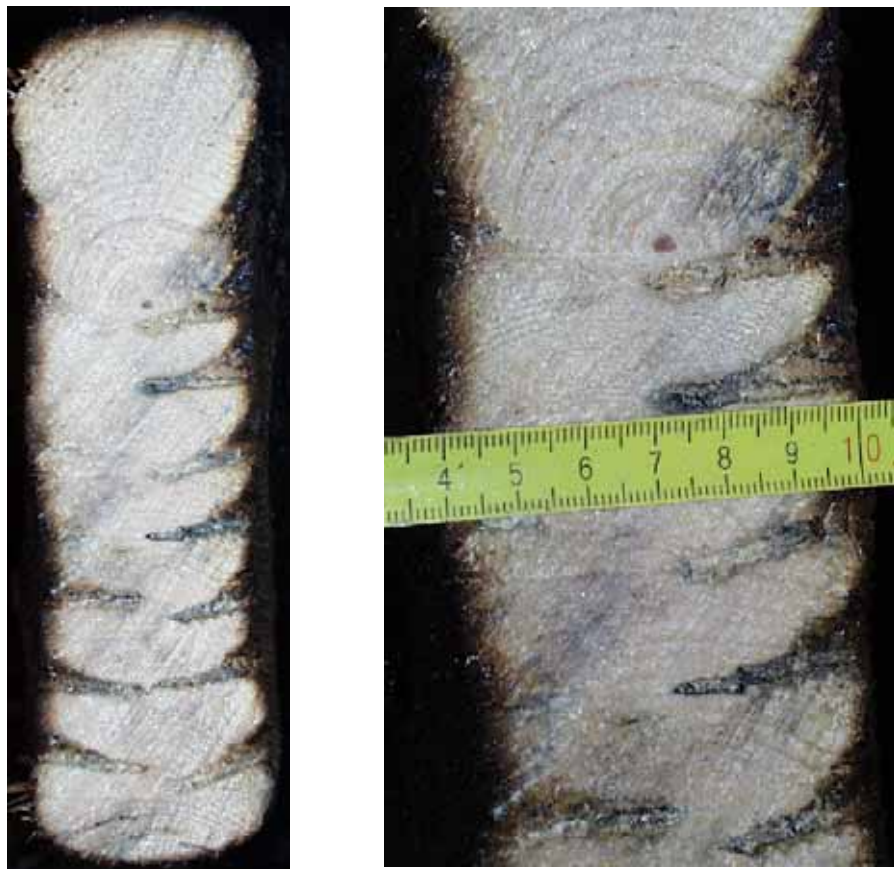
Kuva 3.4. Kokeen 1 poikki-palkin siirtymä ajan funktiona.



Kuva 3.5. Kokeen 2 palkkikengän mitatut lämpötilat: tc1 alapinnassa, tc2 ja tc5 sivuilla sekä tc3 ja tc4 päädyssä palkkien välissä.



Kuva 3.6. Kokeen 2 poikkipalkin keskikohdan siirtymä ja koekuorma ajan funktiona.



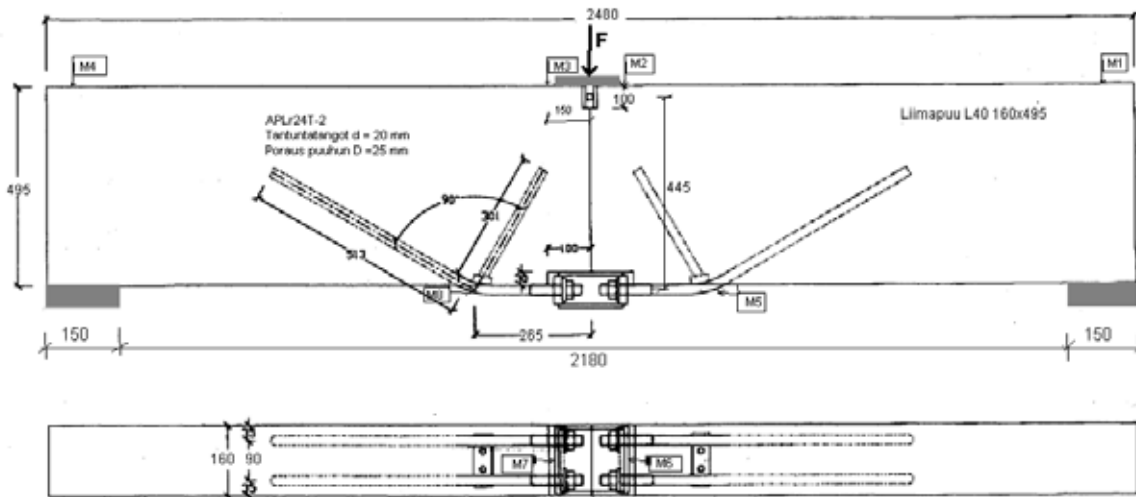
Kuva 3.7. Poikkipalkki (koe 2, murtopää) naularivin kohdalta. Hiiltymä on poistettu.

4. Liimatankoliitokset

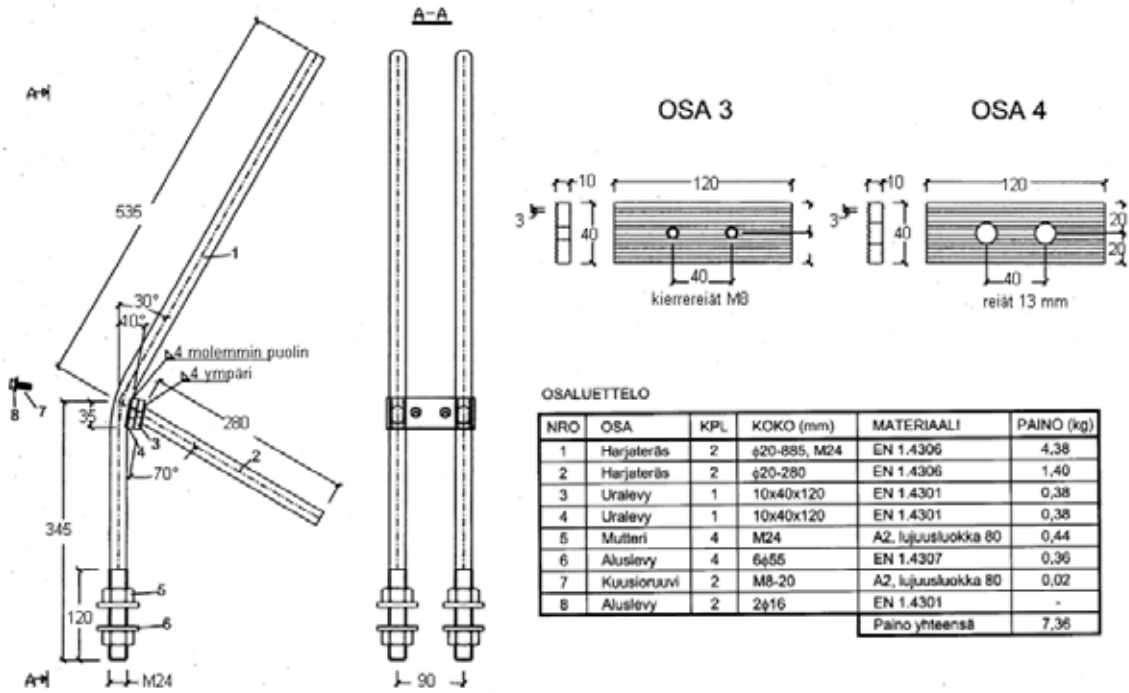
4.1 Murtokuormituskoee normaalilämpötilassa

Palonkestävyysskojeita vastaavan vinotankoliitoksen normaalilämpötilan kuormituskoee tehtiin kuvassa 4.1 esitetyllä koekappaleella ja kuormitusjärjestelyllä. Vinotankoliitoksen teräsosat olivat Anstar Oy:n valmistamia vakioituja liimapuurakenteiden APLr24T-2-liitoskomponentteja (ks. kuva 4.2). Liitososien vinotangot, $d=20$ mm, oli liimattu epoksiliimalla L40-lujuusluokan liimapuuhun porattuihin väljiin 25 mm reikiin.

Tangot olivat kuumavalssattuja EN 1.4306 (AISI 304L) -laadun ruostumattomasta teräksestä valmistettuja harjaterästankoja, joiden kiinnityspäähän oli tehty M20-kierteet. Saman valmistuserän harjatangoilla tehdyissä tartuntakokeissa tangon vetomurtona murtuneissa liitoksissa nimellispoikkileikkauksella laskettu tangon suurin vetojännitys oli kokeissa keskimäärin 826 N/mm^2 (Yli-Koski & Kevarinmäki 2005). Liitoksen keskellä olevan vetoholkin 20 mm paksuihin pohjalevyihin oli hitsattu 6 mm paksut $6 \times 150 \text{ mm}^2$:n vetolatat. Pohjalevyt oli valmistettu EN 1.4301-laadun ruostumattomasta teräksestä, jonka valmistuserän ainestodistuksen mukaiset testatut lujuusarvot olivat $R_{p0,2} = 269 \text{ N/mm}^2$ ja $R_m = 598 \text{ N/mm}^2$. Vetolatan rst-laatu oli EN 1.4307, ja ainestodistuksen mukaiset lujuusarvot olivat $R_{p0,2} = 285 \text{ N/mm}^2$ ja $R_m = 597 \text{ N/mm}^2$. Muiden teräsosien materiaalitiedot on esitetty kuvan 4.2 osaluettelossa.



Kuva 4.1. Vinotankoliitoskoekappale ja sen kuormitusjärjestelyt. Taipumien ja siirtymien mittauspisteet on merkitty M-symbolilla ja ko. anturin numerolla.



Kuva 4.2. Vakiodun APLr24T-2-liitososan rakenne ja mitat. Koekappaleen vetotankojen päihin oli tehty vakioliitoksesta poiketen M20-kierteet.

Liimatankoliitosten reikien poraukset ja tankojen liimaukset suoritettiin Lamicon Ltd. Palkin puolikkaita säilytettiin VTT:ssä RH 65 %:n kosteushuoneessa noin 1 kk:n ajan ennen jatkosliitoksen kokoamista ja palkin kuormituskoetta. Välittömästi kuormituskokeen jälkeen palkista otetusta näytteestä mitattiin puun kosteuspitoisuudeksi $\omega = 13,2\%$ ja puun tiheydeksi $\rho_w = 493 \text{ kg/m}^3$.

Kuormituskoe tehtiin jännevälillä keskipisteeseen kohdistetulla pistekuormalla. Palkin yläreuna tuettiin sivusuunnassa kahdesta pisteestä (ks. kuva 4.3). Taipumaa mitattiin palkin yläreunasta kuormituspisteen kummaltakin puolelta 100 mm:n antureilla. Tukipainumaa mitattiin tuen keskipisteen kohdalta vastaavasti 20 mm:n antureilla. Liitosliukumia mitattiin neljällä 10 mm:n anturilla (ks. kuva 4.4).

Testaus sisälsi kuvan 5.7 mukaisen 40 %:n esikuormitusosuuden. Estimoitu murto-kuorma oli $F_{\text{est}} = 275 \text{ kN}$. Kuormitusnopeus oli 55 kN/min voima-arvoon $F = 190 \text{ kN}$. Tämän jälkeen kuormitusnopeutta hidastettiin lineaarisesti niin, että estimoitu murto-kuorma saavutettiin 12 minuutin kokonaiskuormitusajassa. Mitatut voima- ja siirtymäarvot tallennettiin 2 sekunnin välein.

Kokeen murtokuorma oli $F_{\text{max}} = 304 \text{ kN}$, ja lopullinen hauras murtuminen tapahtui palkin leikkausmurtona (ks. kuva 4.5). Leikkausmurtoa edelsi sitkeä puun poikittainen puristusmurto tuella. Liimapuun tukipainuma leikkausmurron puoleisella tuella oli noin 40 mm (anturin mittavara oli vain 20 mm). Kuvassa 4.6 on esitetty mitatut taipumat ja tu-

kipainumat. Kuvassa 4.7 esitetyistä liitosliukumittauksista voidaan todeta, että vino-
tankojen liimauksissa ei tapahtunut tartuntamurtoa ja että ilmeisesti pääosin tankojen
kierteisellä osalla tapahtunut venymä oli murtokuormalla 3–4 mm luokkaa.



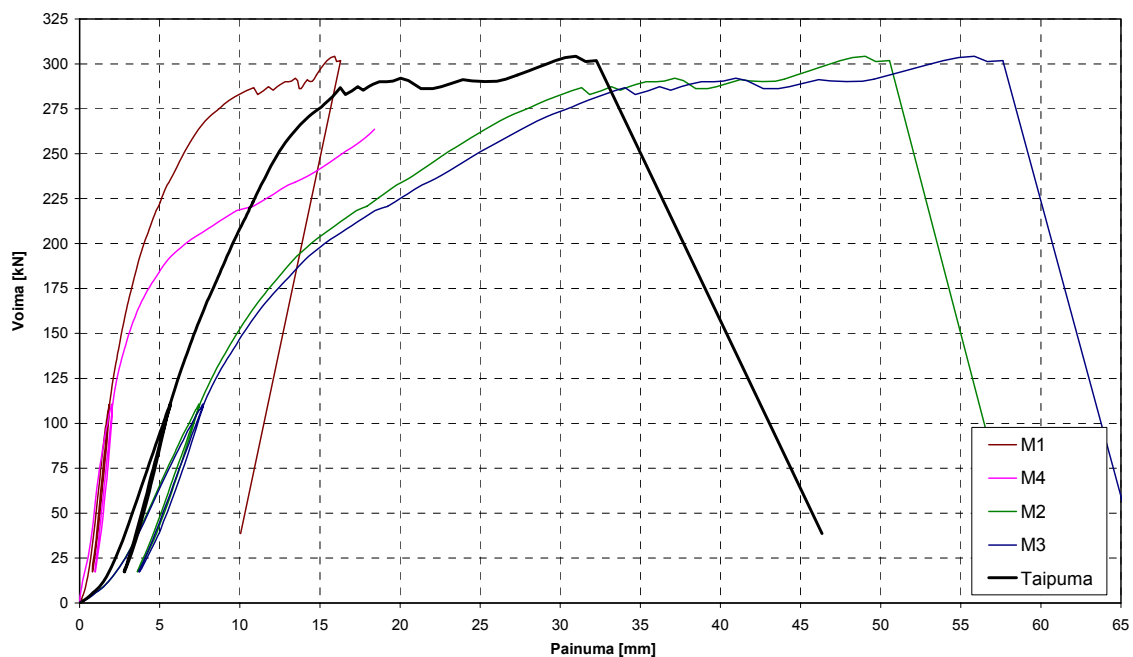
Kuva 4.3. Kuormitus ja mittausjärjestelyt.



Kuva 4.4. Liitosliukumien mittauksessa käytettyjen anturien sijoitus.



Kuva 4.5. Tukipaine- ja leikkausmurtoon kuormitettu koekappale.



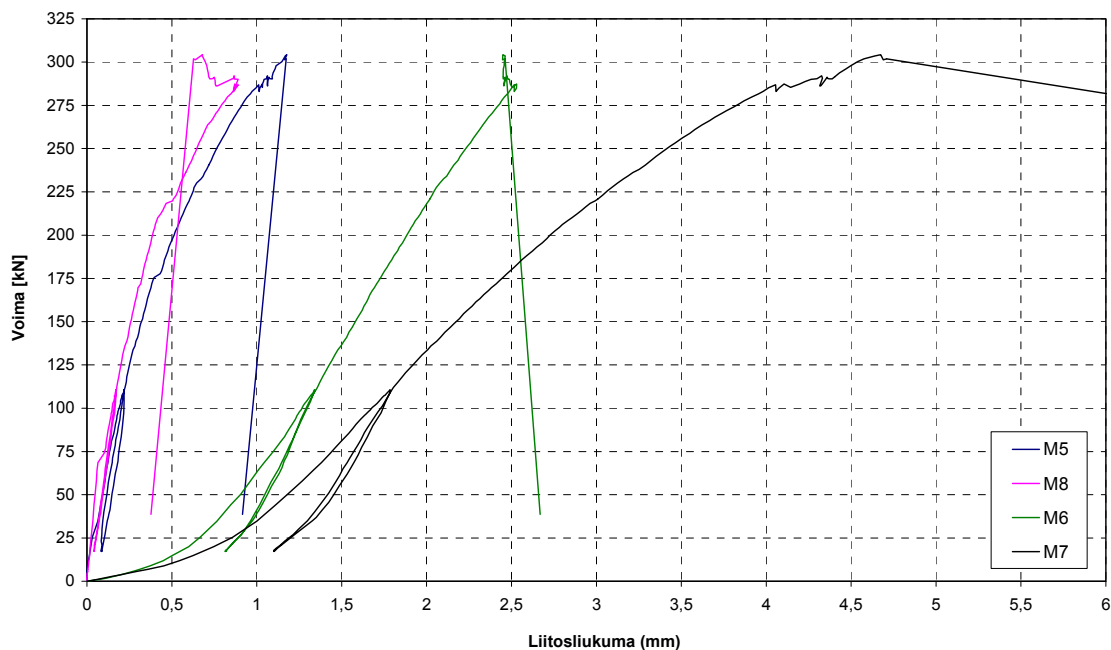
Kuva 4.6. Palkin yläpinnasta mitatut taipumat ja tukipainumat. ”Taipuma”-käyrä on laskettu vähentämällä keskipisteen taipumamittauksien keskiarvosta mitattujen tukipainumien osuus.

APL24T-2-liitososien käyttöohjeen (<http://www.anstar.fi/pdf/apl-t.pdf>) mukaan laskettu koepalkin pistekuormakapasiteetin ominaisarvo on $F_k = 238$ kN, kun terästankojen myötääminen on mitoittava tekijä. Valmistajan ilmoittama kapasiteetti perustuu terästankojen myötölujuuteen $f_y = 500$ N/mm². Rst-tankojen todellisen vetomurtolujuuden, 826 N/mm², mukaan laskettu koekappaleen pistekuormakapasiteetti olisi 393 kN. Tankojen tartuntamurtoon perustuva koekappaleen laskennallinen kapasiteetti on $F_k = 313$ kN,

kun tartuntalujuutena käytetään Eurocode-mitoitukseen tarkoitettua ominaisarvoa $f_{a,k} = 6,5(1-l_a/100d)$ (ks. Yli-Koski & Kevarinmäki 2005).

RIL 205-2003:n mukaan laskettu koekappaleen tukipainekapasiteetin ominaisarvo vastaa pistekuormaa $F_k = 288$ kN. Vastaavasti palkin laskennallista leikkauskapasiteettia vastaava pistekuorma olisi $F_k = 370$ kN. Palkin lopullinen murtuminen leikkauksesta huomattavasti tätä alhaisemmalla kuormalla, $F_{\max} = 304$ kN, johtui ilmeisesti puun poikkittaisen puristumurron aiheuttaneesta leikkauslujuuden alentumisesta ja poikkileikkauksen tehollisen korkeuden pienemisestä (vrt. lovipalkki).

Koetuloksesta voidaan päätellä, että rst-vinotankoliitoksen laskennallinen kapasiteetti on selkeästi varmalla puolella, mikäli mitoituksessa noudatetaan A500HW-harjaterästankoihin perustuvia APL24T-2-liitososien käyttöohjeita. Rst-tankojen korkean vetolujuuden hyödyntäminen vinotankoliitosten normaaleissa käyttökohteissa edellyttäisi kuitenkin tankojen tartuntapituuksien pidentämistä, koska pidempiaikaisissa kuormituksissa tankojen tartuntalujuus muodostuu mitoittavaksi tekijäksi.

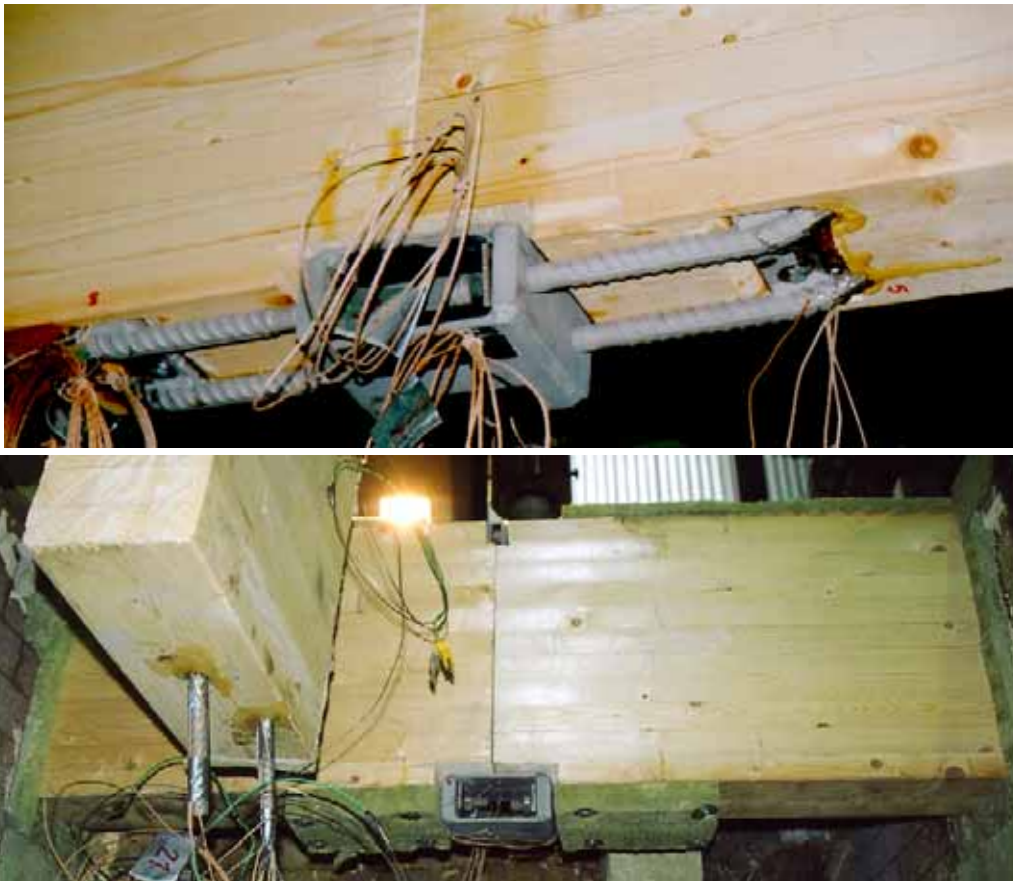


Kuva 4.7. Mitatut liitosliukumat.

4.2 Palonkestävyyskokeet

4.2.1 Koekappaleet

Liimatankoliitosten palonkestävyyskokeita tehtiin kaksi: ensimmäinen suojaamattomalla liitoksella 7.10.2003 ja toinen palosuojatulla liitoksella 15.10.2003. Koekappaleiden mitat on esitetty liitteessä B.1. Kokeessa 1 liimatankoja suojaavan puun paksuus oli 22,5 mm, ja kokeessa 2 se oli 37,5 mm. Kokeen 2 liitos suojattiin 20 mm paksulla palovillalla PV-PAL (kuva 4.8) ja koteloitiin seostamattomasta teräksestä valmistetulla pelillä, ks. liite B.1 kuva B.2. Vinotankoliitoksen teräsosat olivat Anstar Oy:n valmistamia vakioitua liimapuurakenteiden APLr24T-2-liitoskomponentteja (kuva 4.2). Liitososien vinotangot, $d = 20$ mm, oli liimattu epoksiliimalla L40-lujuusluokan liimapuuhun porattuihin väljiin 25 mm reikiin. Kokeessa 2 vierekkäisten tankojen keskeltä keskelle väli oli 60 mm, kun se kokeessa 1 oli 90 mm. Kokeessa 2 veto- ja puristustangot oli yhdistetty toisiinsa yhdellä pultilla ja liitosta oli vahvistettu hitsaamalla ns. pyykkilautateräslevyt (kuva B.2). Liitteessä B.7 on valokuvia koekappaleista.



Kuva 4.8. Yläkuvassa vinotankoliitos 1 (7.10.-03) ja alakuvassa liitos 2 (15.10.-03) ennen koteloointia, osa palovilla kiinnitettyinä.

4.2.2 Kokeet

Kokeet tehtiin ns. K-uunissa soveltaen standardia SFS-EN-1365-3. Koejärjestelyt on esitetty liitteessä B.2 ja kuvassa 4.9. Koekappaletta kuormitettiin kokeen aikana jännevälän puolivälistä 84 kN (koe 1) ja 88 kN (koe 2) vakiovoimalla. Kuormitus aloitettiin 15 min ennen palonkestävyyskokeen alkua.

Polttokokeen kuormitusaste oli 28 % normaalilämpötilan kokeen murtokuormasta, $F_{\max} = 304$ kN. Normaalilämpötilakokeen lopullinen hauras murtuminen tapahtui kuitenkin palkin leikkausmurtona (ks. kuva 4.5) eikä siis liitoksen murtumisena. Tankojen tartuntamurtoon perustuva laskennallinen normaalilämpötilan keskipitkän aikaluokan kapasiteetti on $F_d = 209$ kN, kun tartuntalujuutena käytetään Eurocode-mitoitukseseen tarkoitettua ominaisarvoa $f_{a,k} = 6,5(1-I_a/100d)$ (ks. Yli-Koski & Kevarinmäki 2005) ja kansallisen liitteen ehdotusta (päiväty 13.4.2005). Palotilanteen kuormitusasteeksi näillä arvoilla tulee 40 % ja 42 % normaalilämpötilan mukaisesta mitoituskapasiteetista.



Kuva 4.9. Palonkestävyyskokeen koejärjestely: palkki uunissa (vas.) ja kuormitus-sylinteri (oik.).

Uunin lämpötilaa ohjattiin neljän plattatermoelementin avulla, joista kaksi oli suunnattu uunin lattiaan ja kaksi uunin seinään. Lämpötilan nousunopeus oli standardin SFS-EN 1363-1:1999 (ISO 834-1:1999) mukainen.

Kokeen aikana mitattiin koekappaleen teräsosien lämpötiloja sekä palkin ulkopuolelta että palkin sisältä. Lisäksi mitattiin puun lämpötiloja palkin sisältä. Mittauspisteiden paikat on esitetty liitteen B.3 kuvissa B.4–B.6. Taipuma mitattiin palkin jännevälän puolivälistä.

Koe 1 (7.10.2003) lopetettiin 32 min kuluttua ja koe 2 (15.10.2003) 38 min 40 s kuluttua kokeen aloittamisesta, jolloin kokeen 1 liitos oli menettänyt kantavuutensa ajassa 21 min ja kokeen 2 liitos ajassa 37 min.

4.2.3 Koetulokset

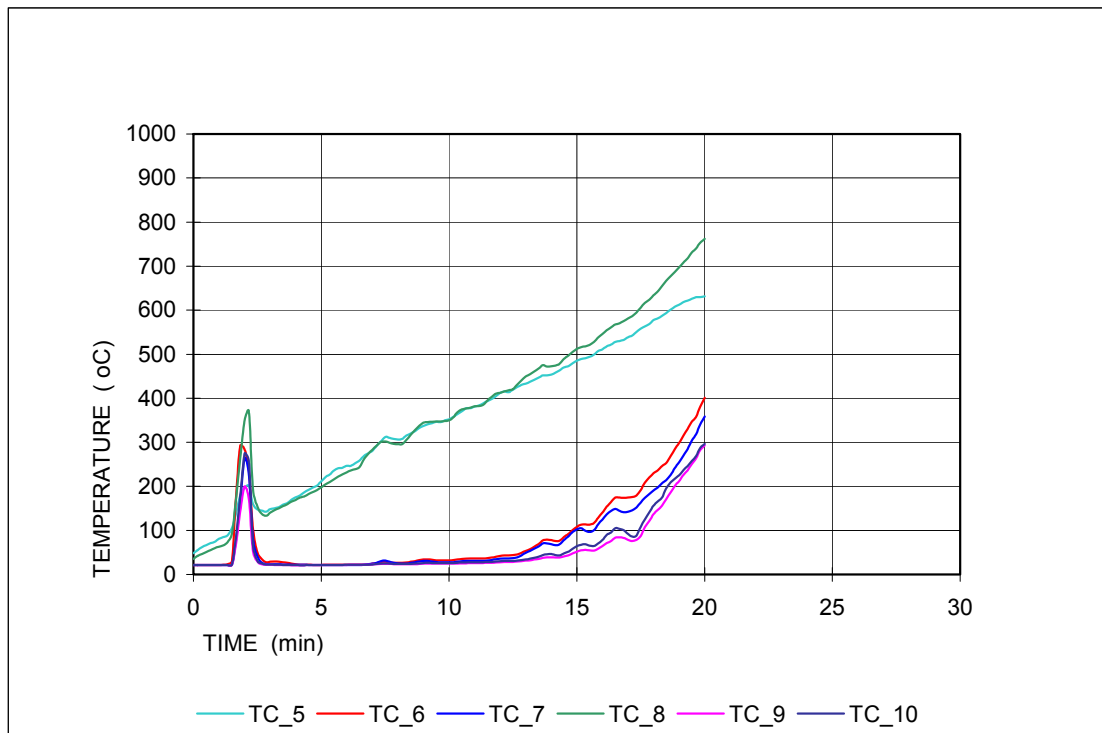
Uunin ja koekappaleiden mitatut lämpötilat on esitetty liitteen B.4 kuvissa B.7–B.10 kokeen 1 osalta ja kuvissa B.11–B.15 kokeen 2 osalta. Liitteessä B.5 on esitetty paine-ero uunin ja koehallin välillä molempien kokeiden osalta. Lisäksi tehtiin havaintoja koekappaleen käyttäytymisestä sekä mitattiin poikkileikkauksen taipuma jänteen puolivälissä. Tulokset ovat liitteessä B.6. Liitteessä B.7 on valokuvia koekappaleesta ennen koetta, kokeen aikana ja sen jälkeen. Koehallin lämpötila kokeen alussa oli 20 °C molemmissa kokeissa.

Palkki on menettänyt kantavuutensa standardin SFS-EN 1363-1 mukaan, jos sekä taipumakriteeri että taipumanopeuskriteeri ylittyvät. Taipumanopeuskriteeri huomioidaan vasta kun palkin taipuma on ylittänyt $L / 30$ rajan. Taulukossa 4.1 on esitetty taipuma- ja taipumanopeuskriteerit sekä ajat, milloin kriteerit ylittyivät kokeissa.

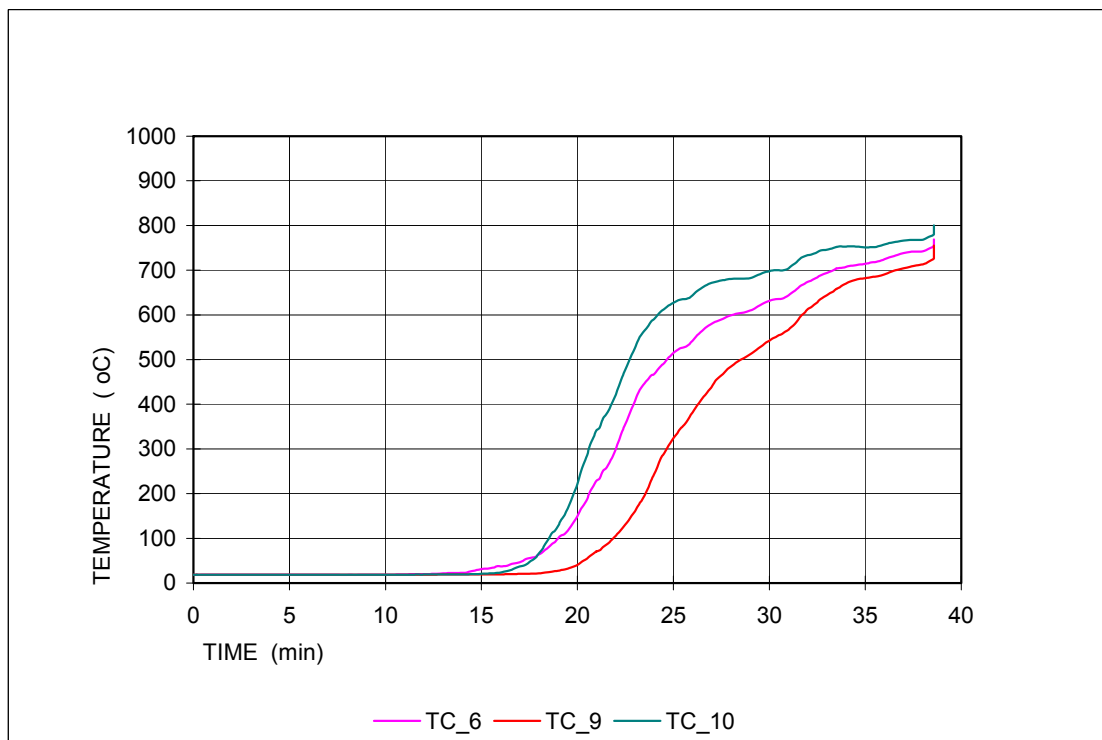
Taulukko 4.1 Taipuma- ja taipumanopeuskriteerit (SFS-EN 1363-1).

Kantavuus kriteerit	Kriteeri ylittyy	
	Koe 1	Koe 2
taipuma $D = L^2 / 400d$ [mm] = 29 mm	17 min 50 s	32 min 30 s
taipumanopeus $dD/dt = L^2 / 9000d$ [mm/min] = 1,3 mm/min, kun $L / 30 = 80$ mm ylittynyt	21 min ($L/30$), jolloin nopeus 36,2 mm/min	$L/30$ raja ei ylity ennen yhtäkkistä murtoa ajassa 37 min
kun $L = 2400$ mm jänneväli $d = 495$ mm palkin korkeus		

Kokeessa 1 (7.10.2003) liitos menetti kantavuutensa ajassa 21 min ja koe 2 (15.10.2003) ajassa 37 min. Kuvissa 4.10 ja 4.11 on esitetty molempien kokeiden liimatankojen mitatut lämpötilat.



Kuva 4.10. Kokeen 1 palkin pitkien liimatankojen (513 mm) lämpötilat, tc5 ja tc8 taivutuskohdassa (ei vielä puun sisällä), tc6 ja tc9 tangon keskellä puun sisällä ja tc7 ja tc10 tangon päässä puun sisällä.

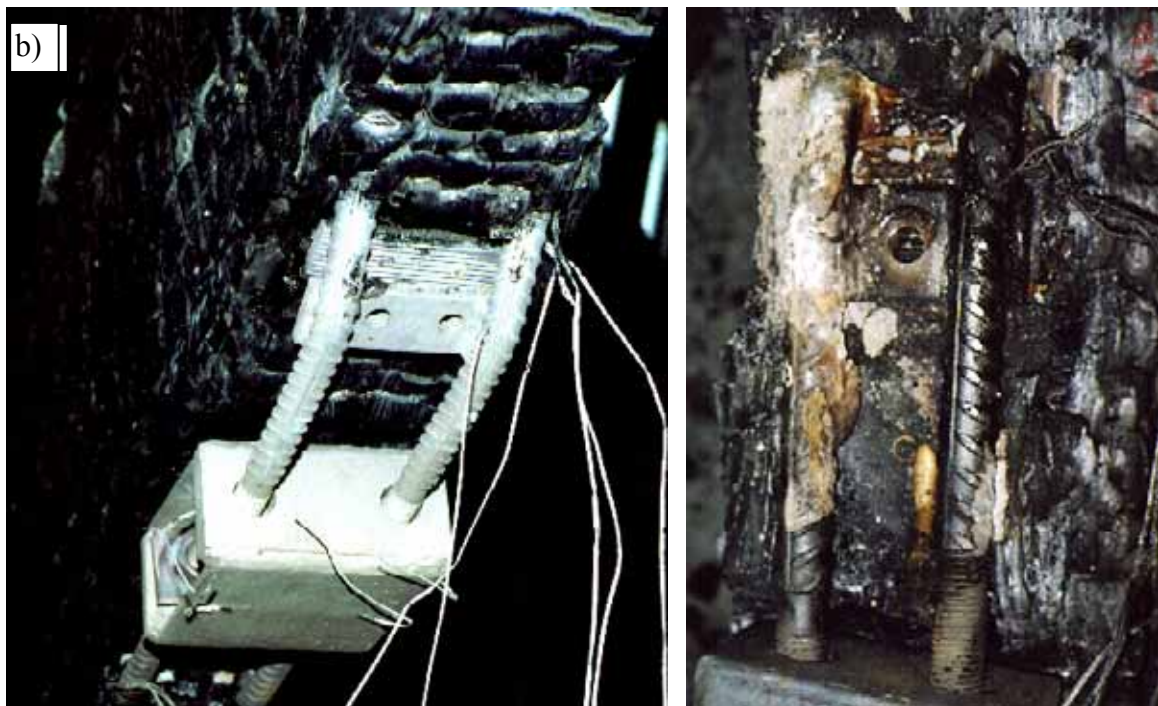


Kuva 4.11. Koe 2:n palkin pitkien liimatankojen (513 mm) lämpötilat, tc6 ja tc9 tangon keskellä puun sisällä ja tc10 tangon päässä puun sisällä.

4.2.4 Koetulosten analysointi

Kokeen 1 palonkestävyysaika oli 21 min. Liitoksen kantavuuden pettäminen johtui liitoksen toimintatavan muutoksesta palotilanteessa eli vetotankojen tartuntamurtoa seuranneesta puristustankojen kiinnityspultin leikkausmurtumisesta (ks. kuva 4.12 a). Kiinnityspulttien lämpötila oli murtohetkellä noin 600–750 °C. Normaalilämpötilassa puristus-vetosauvavoimaparina toimivassa liitoksessa ko. asennuspultti ei saa leikkausrasitusta. Palomitoituksessa liitoksen puristussauvan oletetaan toimivan vaarnatappina, jonka kapasiteetti on mitoitettu palotilanteen kuormitukselle. Liitososan suunnittelussa ei ole kuitenkaan otettu huomioon leikkausvoiman välittymistä puristustangolle tartunnan pettäessä liiman pehmettyä. Liiman pehmenemislämpötila riippuu liimatyypistä ja voi olla alle 100 °C.

Kokeen 2 liitosta parannettiin hitsaamalla Anstarin toimesta ns. pyykkilautateräslevyt yhteen asennuspultin vierestä. Toiselle puolelle saatiin hitsattua vain yksi hitsi. Liitoksen palonkesto-aika oli 37 min, ja murtopaikka ja -tapa olivat samat kuin ensimmäisessä kokeessa – asennuspultin leikkausmurto hitsin murruttua vetotankojen tartuntamurron jälkeen (ks. kuva 4.12 b). Kiinnityspultin lämpötila oli murtohetkellä samaa suuruusluokkaa kuin kokeessa 1. Kokeessa ei saavutettu 60 min:n tavoitetta tyyppiliitoksen rakenteellisen puutteen vuoksi: liitoksen rakenne poikkeaa niistä vinotankoliitoksista, joilla 90-luvun lopulla tehdyissä kokeissa saatiin hyviä palonkestävyysaikoja (suojatut liitokset).



Kuva 4.12. Vinotankoliitosten liitoksen murtokohdat, a) koe 1 ja b) koe 2.

5. Tappivaarnaliitokset

5.1 Normaalilämpötilan murtokuormitustestit

5.1.1 Yleistä

Rst-tappivaarnaliitosten normaalilämpötilan murtokuormitustestit tehtiin palonkestävyyskoekappaleita vastaavilla liitoksilla (ks. kohta 5.2). Testeillä määritettiin palonkestävyyskokeissa käytettävä kuormitusaste. Testit tehtiin myös sen varmistamiseksi, että Eurocode 5:n mitoitusmenetelmiä voidaan soveltaa hyväksyttävästi järeille rst-tappivaarnaliitoksille.

Tutkimuksessa testattiin lyhytaikaisessa murtokuormituksessa kaksi koesarjaa teräsvylyllisiä 4-leikkeisiä tappivaarnaliitoksia. Molemmissa koesarjoissa oli kolme samanlaisia koekappaleita, ja koekappaleiden molemmissa päissä oli samanlaiset liitokset. Puumateriaaleina käytettiin homogeenista liimapuuta L40 ja kertopuuta Kerto-S. Liimapuuliitoksissa puun sisään sijoitetut teräslevyt olivat 8 mm paksuja, ja haponkestävät tappivaarnat olivat halkaisijaltaan 12 mm paksuja. Kertopuuliitosten teräslevyt olivat vastavasti 6 mm ja tappivaarnat 10 mm paksuja. Liimapuuliitoksissa oli 24 vaarnaa ja kertopuuliitoksissa 31 liitintä.

Late-Rakenteet Oy toimitti VTT:lle valmiiksi kootut liimapuukoekappaleet. Finnforest Oyj toimitti valmiiksi työstetyt kertopuukoekappaleiden puuaihiot, joihin VTT:llä asennettiin liitosten teräslevyt ja liittimet. Testauksessa koekappaleet vetokuormitettiin murtoon noudattaen EN 26891 (ISO 6891) standardin mukaista kuormitusohjelmaa. Koetuoksia verrattiin eri suunnitteluohjeiden mukaan laskettuihin kapasiteetteihin.

5.1.2 Koekappaleet

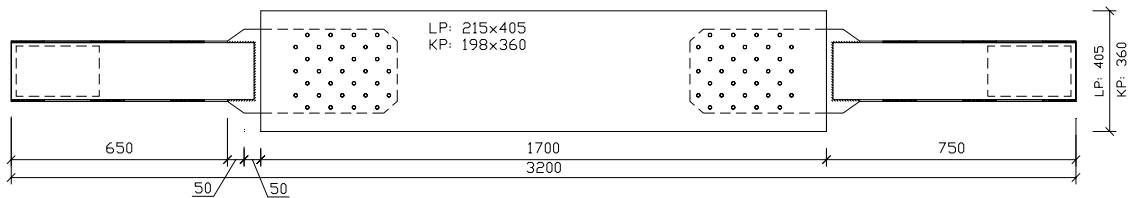
Koekappaleiden mittapiirroksia on esitetty kuvissa 5.1–5.5 ja koesarjojen muuttujat taulukossa 5.1. LP-sarjan homogeeninen liimapuu L40 oli valmistettu MLT30-lujuusluokkaan lajitelluista 45 mm paksuista kuusilamelleista. Kuvan 5.4 mukaiseen kokoonpanoon hitsatut 8 mm teräslevyt työnnettiin liimapuuhun sahattuihin 10 mm leveisiin uriin. Tappivaarnoille porattiin 12 mm reiät samanaikaisesti puun ja teräslevyjen läpi. Liitoksen tapitettiin porauksen yhteydessä.

KP-sarjan koekappaleet valmistettiin Kerto-S-lamelleista. KP-liitosten ulkolamellit oli kalibroitu hiomalla 56 mm ja sisälamellit 72 mm paksuisiksi. Lamelleihin porattiin 10 mm:n reiät liittimille. Osasauvat liimattiin yhteen PU-puristusliimaustekniikalla käyttäen välikkeinä 7 mm paksuja ja 50 mm leveitä havupuusahatavarasta höylättyjä listoja, jotka sijoitettiin osasauvojen reunoille.

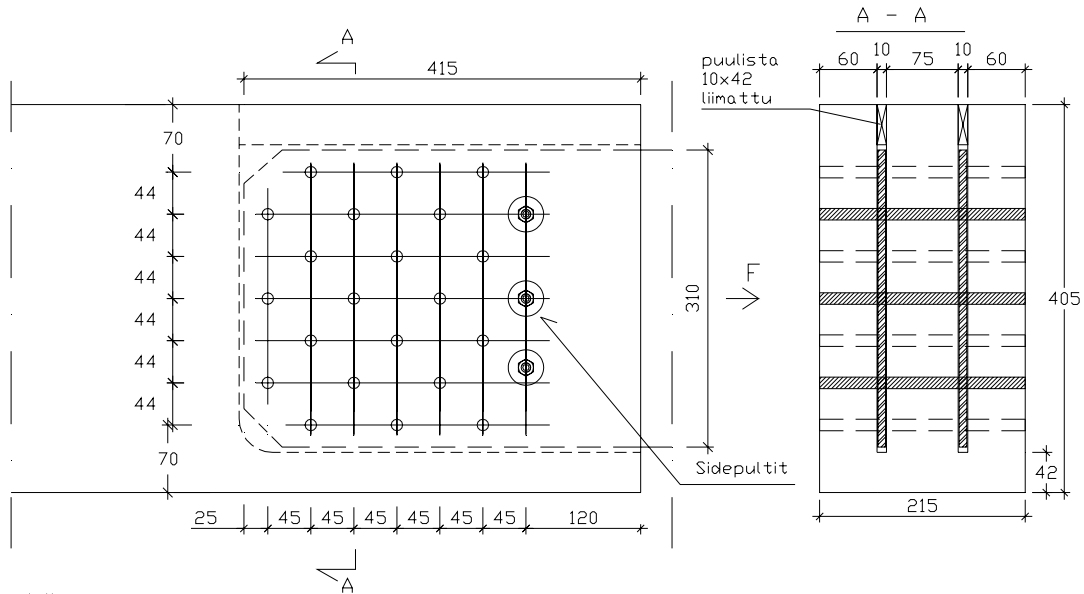
KP-liitosten 6 mm paksuihin teräslevyihin oli esiporattu 10,5 mm:n reiät. Kiinnityspäiden 73 mm paksut täytepalat hitsattiin teräslevyihin vasta liitosten tapituksen jälkeen (ks. kuva 5.5). Koekappaleen KP-3 liitoslevyjen viimeisen rivin reiät (3 kpl) jouduttiin poraamaan koekappaleen pituussuunnassa 4 mm soikeiksi puuosan reikäporauksen asemoinnissa tapahtuneen virheen vuoksi: viimeisen rivin keskiöetäisyys oli edellisestä rivistä puussa 66 mm, kun se teräslevyssä oli suunnitelman mukaisesti 70 mm.

Taulukko 5.1. Koesarjojen muuttujat. Merkinnot: d = tappivaarnan paksuus, t = teräslevyn paksuus, B = sauvan paksuus, H = sauvan korkeus, t_u = ulkolamellin paksuus, t_s = sisälamellin paksuus, n = tappivaarnojen lkm, a_1 = peräkkäisten liitinten välinen etäisyys, a_2 = liitinväli puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, a_3 = päätyetäisyys ja a_4 = reunaetäisyys.

koe-sarja	d (mm)	t (mm)	$B \times H$ (mm)	t_u (mm)	t_s (mm)	n	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)	a_4 (mm)
LP	12	8	215x405	60	75	24	90	44	120	70
KP	10	6	198x360	56	72	31	70	36	105	72



Kuva 5.1. Koekappaleiden rakenne.



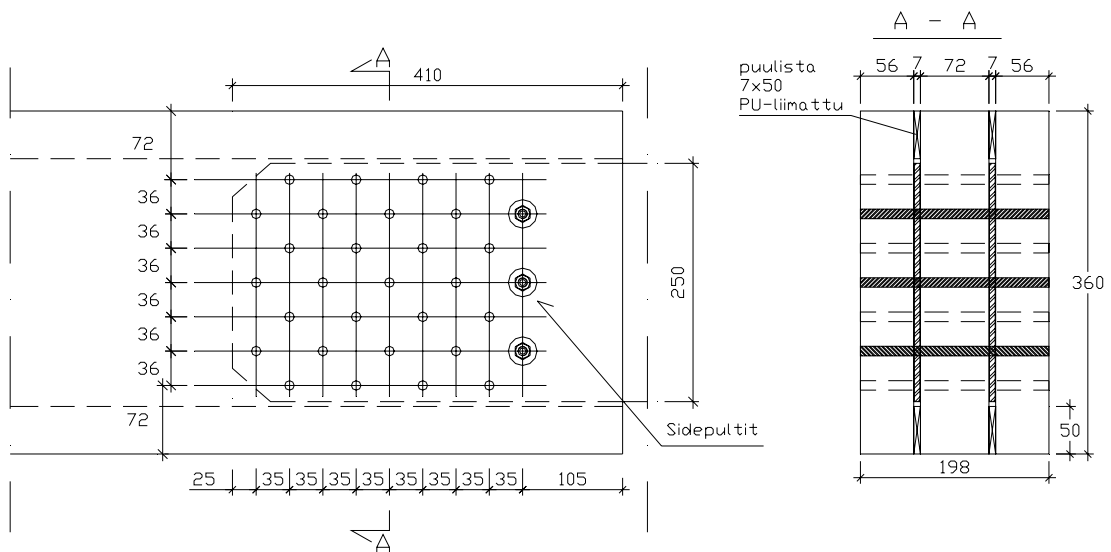
Liimapuu: L40 homogeeninen 215x405

Teräslevyt: 2x 8x310 S355. Levyille sahataan 10 mm urat.

Tappivaarnat: 21x $\varnothing 12$ L215, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Sidepultit: 3x $\varnothing 12$ +M10 L265 täsmäpultit, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Kuva 5.2. LP-liitoksen rakenne ja mitat.



KERTO-S

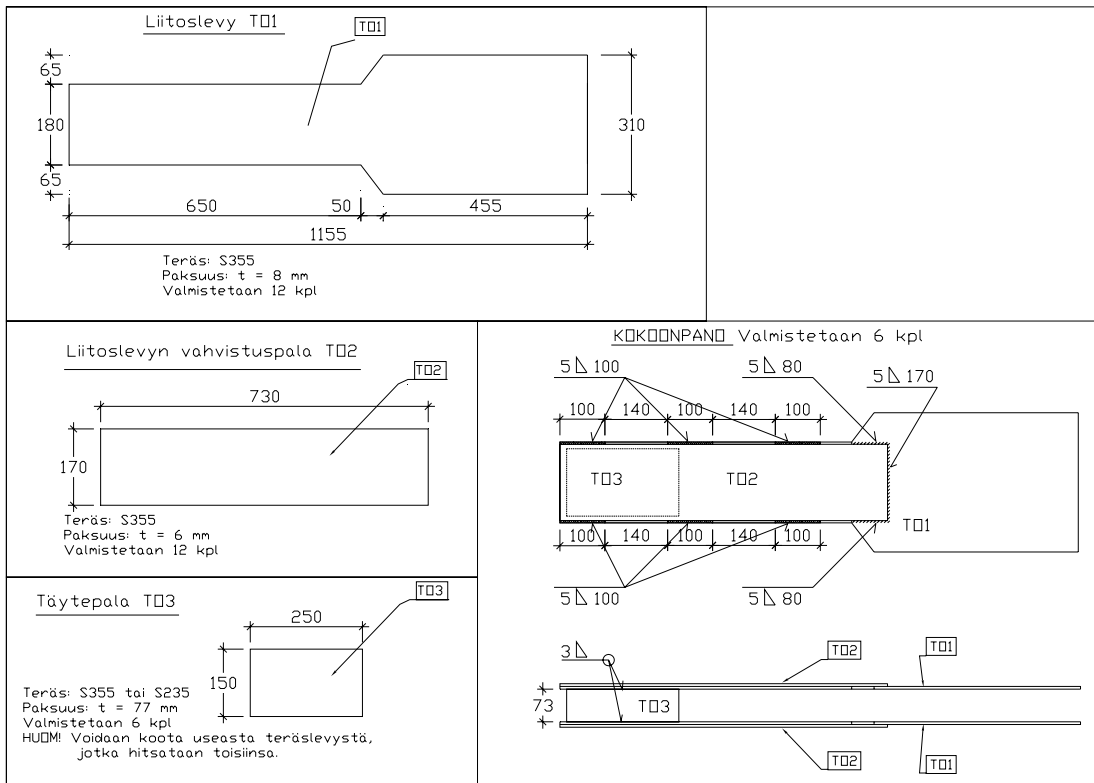
Teräslevyt: 2x 6x250 S650MC

Tappivaarnat: 28x $\varnothing 10$ L198, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

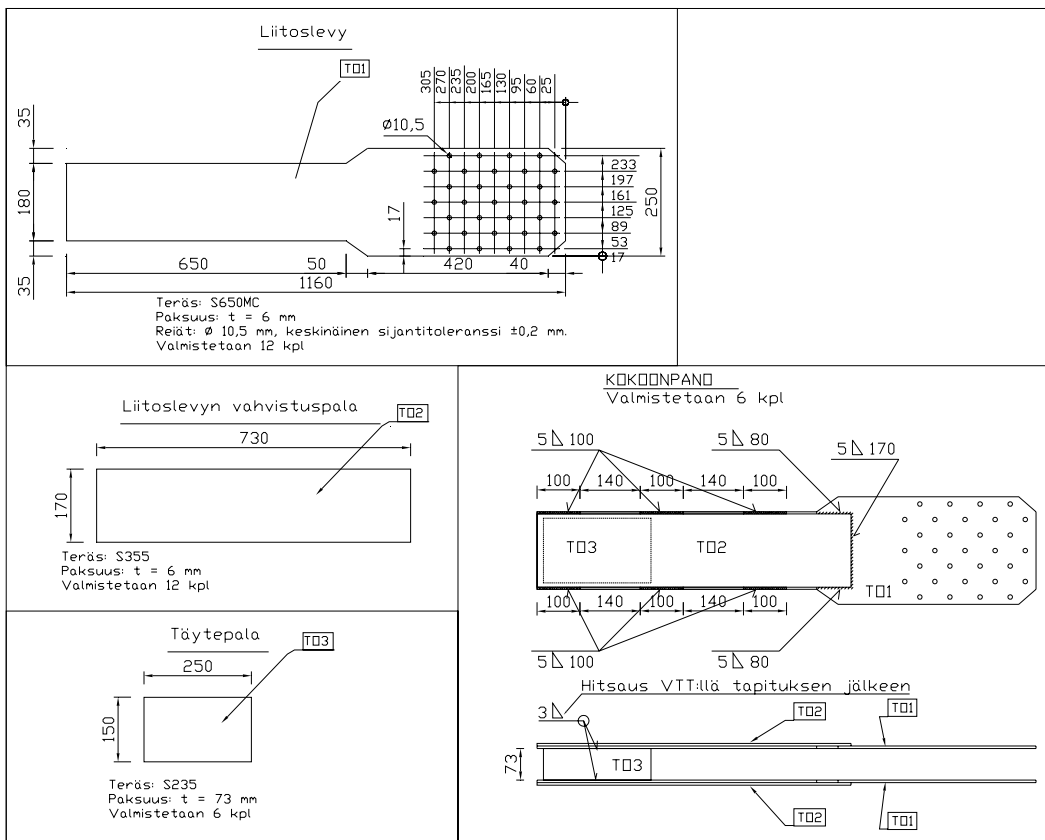
Sidepultit: 3x $\varnothing 10$ +M10 L240, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Teräslevyissä esiporatut $\varnothing 10,5$ mm reiät. Puussa $\varnothing 10$ reiät.

Kuva 5.3. KP-liitoksen rakenne ja mitat.



Kuva 5.4. LP-liitoksen teräsosat.



Kuva 5.5. KP-liitoksen teräsosat.

Kaikki tappivaarnat oli valmistettu haponkestävästä teräslaadusta AISI 316L (X2CrNiMo17-12-2, EN 1.4404). Tappivaarnojen valmistaja, Vanpipe Oy, ilmoitti liittimien vetolujuuden minimiarvoksi 664 N/mm² ja maksimiarvoksi 744 N/mm². VTT:ssä mitattiin tappivaarnojen paksuuksien keskiarvoiksi 9,98 mm ja 12,00 mm. Kolmelle tappivaarnalle kumpaakin kokoa suoritettiin EN 10002-1-standardin mukaiset vetokokeet, joilla määritettiin taulukossa 5.2 esitetyt 0,2-rajaa ja vetomurtoa vastaavat jännitykset. Ohuempien, 10 mm, tappivaarnojen 0,2-rajaa oli keskimäärin $R_{p0,2} = 517$ N/mm² ja vetomurtolujuus $R_m = 667$ N/mm². Vastaavasti 12 mm:n tappivaarnoille määritettiin $R_{p0,2} = 589$ N/mm² ja $R_m = 716$ N/mm².

Taulukko 5.2. Tappivaarnoille VTT:llä suoritettujen vetokokeiden tulokset.

Tanko		Vetokoe					
d	nro	0,2-voima	0,2-rajaa 1)	0,2-rajaa 2)	Suurin voima	Murtolujuus 1)	Murtolujuus 2)
mm		$F_{p0,2}$ kN	$R_{p0,2}$ N/mm ²	$R_{p0,2}$ N/mm ²	F_m kN	R_m N/mm ²	R_m N/mm ²
10	1	40,7	518	520	52,6	670	673
"	2	40,5	516	518	52,0	662	665
"	3	40,2	512	514	51,8	660	662
12	1	67,5	597	597	81,4	720	720
"	2	65,9	583	583	80,6	713	713
"	3	66,3	587	587	80,8	715	715

- 1) Jännitykset on laskettu käyttäen tankojen nimellisiä poikkipinta-aloja (d 10 mm = 78,5 mm² ja d 12 mm = 113 mm²).
- 2) Jännitykset on laskettu käyttäen tankojen todellisia poikkipinta-aloja (d 9,98 mm = 78,2 mm² ja d 12,00 mm = 113 mm²).

Tappivaarnat olivat toisesta päästä viistettyjä. Viisteen pituus oli 2 mm ja kulma 45°. Kaikissa liitoksissa käytettiin ensimmäisessä rivissä kolmea sidepulttia. Sidepultit oli valmistettu samasta materiaalista kuin tappivaarnat. Sidepulttien sileän varren pituus oli LP-sarjassa 212 mm ja KP-sarjassa 196 mm. Sidepulttien kummassakin päässä oli M10-kierteet ja haponkestävien (A4) muttereiden alla käytettiin DIN 9021:n mukaisia aluslaattoja R11 316L.

LP-sarjan koekappaleet toimitettiin VTT:lle 22.3.2005 ja niiden kuormituskokeet tehtiin 30.3.2005. KP-liitosten koekappaleaihiot toimitettiin VTT:lle 15.3.2005, koekappaleet koottiin 18.3. ja kuormituskokeet tehtiin 19.3.2005. VTT:ssä koekappaleita ja niiden kertopuuaihiota säilytettiin vakioilmastohuoneessa RH 65 %:n suhteellisessa kosteudessa +20 °C lämpötilassa. Välittömästi kuormituskokeiden jälkeen kaikkien koekappaleiden keskeltä otettiin kosteus- ja tiheysnäytteet. Liimapuun näytepalat sahattiin koko poikkileikkauksen läpi ulottuvina niistä sisälamelleista, joihin tappivaarnat oli sijoitettu.

Kertopuukoekappaleissa näytepalat otettiin erikseen ulko- ja sisälamelleista. Näytteistä standardien ISO 3130 ja ISO 3131 mukaan määritetyt puun kosteudet ja tiheydet on esitetty taulukossa 5.3.

Taulukko 5.3. Koekappaleista otetuista näytteistä määritetyt puun tiheydet ja kosteudet.

	ρ_w (kg/m ³)	ρ_0 (kg/m ³)	ω (%)
LP1	430	386	11,2
LP2	423	381	11,0
LP3	369	332	11,3
LP keskiarvo	407	366	11,2
KP1 sisä	512	467	9,7
KP1 ulko	509	468	8,7
KP2 sisä	507	459	10,5
KP2 ulko	535	490	9,3
KP3 sisä	523	469	11,4
KP3 ulko	508	467	8,9
KP sisä ka:	514	465	10,5
KP ulko ka:	517	475	9,0

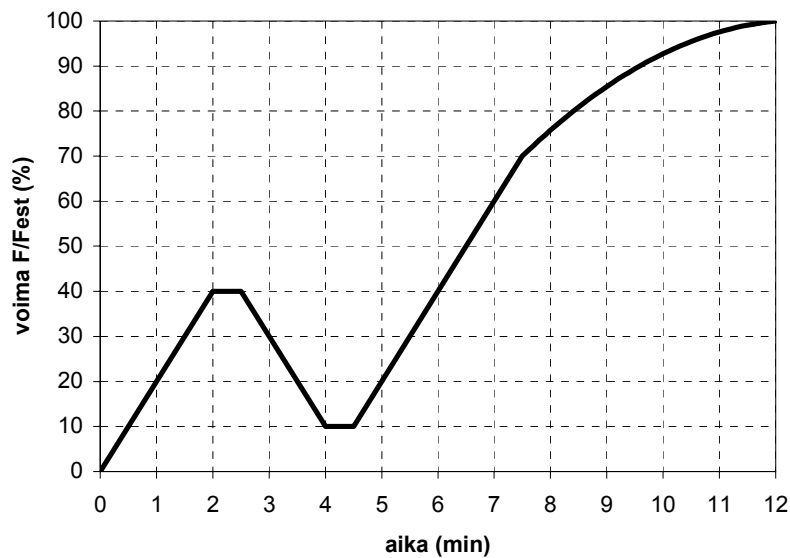
5.1.3 Kuormitusjärjestelyt

Kuormituskokeet suoritettiin hydraulisella yleisaineenkoestuskoneella, jonka valmistaja on Amstler & Co ja joka on tyypiltään 3 MN:n makaava vetokone. Kuormitus- ja mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 5.6. Koekappaleiden teräksiset kiinnityspäät asennettiin vetolaitteen puristavien leukojen kitkapintojen väliin. Teräslevyjen ja puun päädyn välistä liukumaa mitattiin kummastakin päästä kahdella ± 20 mm:n induktiivisella anturilla. Jousianturit kiinnitettiin koekappaleen keskilinjalle teräslevyjen ulkopinnoille. Anturin kiinnityspisteen etäisyys puun päädyistä oli 50 mm. Kuormitukset tehtiin 2 000 kN:n kuormitusalueella, jossa käytetyn laitteiston voiman erottelukyky on 1 kN ja vetovoiman mittauksen SFS-EN ISO 7500-1:2000 -standardin mukainen kalibroitu tarkkuusluokka on 1, kun $F \geq 300$ kN.

Testaus sisälsi kuvan 5.7 mukaisen 40 %:n esikuormitusosuuden. Kuormitus toteutettiin sähköisesti voimaohjattuna kuormitusnopeudella $0,2F_{est}/min$ voima-arvoon $0,7F_{est}$ saakka. Tämän jälkeen kuormitusnopeutta pienennettiin lineaarisesti niin, että estimoitu murtokuorma olisi saavutettu 12 minuutin kokonaiskuormitusajassa. Mitatut voima- ja siirtymäarvot tallennettiin 2 sekunnin välein. Estimoitu murtokuorma oli LP-sarjassa 1 350 kN ja KP-sarjassa 1 050 kN.



Kuva 5.6. Kuormitus- ja mittausjärjestelyt.



Kuva 5.7. Testauksessa noudatettu kuormitusaikakaavio.

5.1.4 Murtotavat

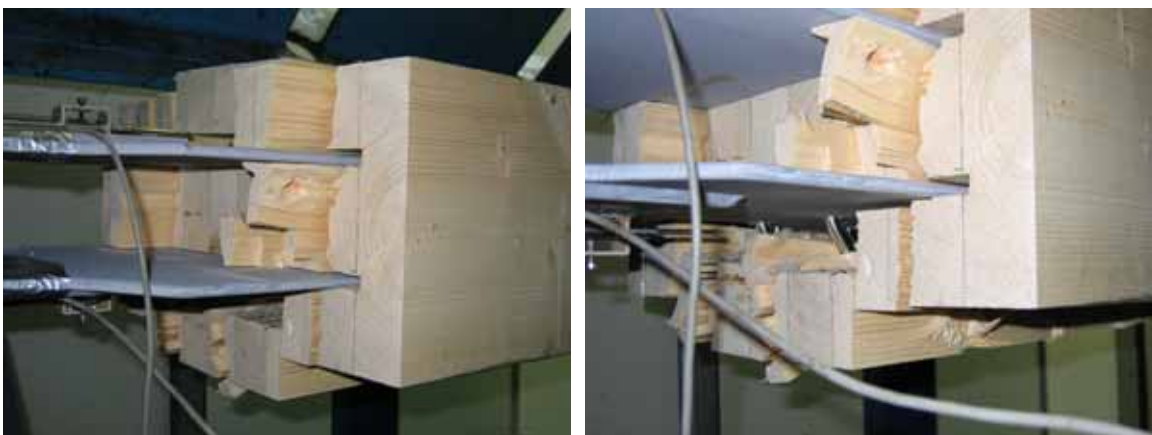
LP-sarjan koekappaleiden murtotapa oli halkeilulla redusoitunut reunapuristusmurto. Koekappaleen pituussuuntaiset halkeamat muodostuivat tappirivien kohdalle (ks. kuva 5.8). Koekappaleessa LP-1 vain suurimpien halkeamien kohdalla sijainneet tappivaarnat pysyivät suorina muiden taipuessa sitkeässä murtumisessa: 17 mm liitossiirtymällä

kuormitusaste oli vielä yli 90 % maksimikuormasta (kuva 5.9). LP-2- ja LP-3- koekappaleilla lopulliseen murtumiseen yhdistyi osittaisia – kahden liitinrivin välisiä – lohkeamismurtoja (kuva 5.10). Lohkeamisvyöhykkeen tappivaarnat pysyivät suorina, mutta muut taipuivat selkeästi teräslevyjen kohdalta.

KP-sarjan liitosten murtotapa oli keskimmäisessä lamelleissa tapahtunut hauras lohkeamismurto (ks. kuva 5.11). Ulkolamelleissa tapahtui ns. palalohkeamisia, joissa liitinalueen puukappale lohkesi viilutasojen suuntaisesti (kuva 5.12). KP-1- ja KP-2- koekappaleissa palalohkeaminen ilmeni vain toisessa ulkolamellissa. Keskilamellien ensimmäiset halkeamat muodostuivat reunimmaisten liitinrivien kohdalla kaikkiin liitoksiin 800–870 kN kuormalla.



Kuva 5.8. LP-1-liitoksen halkeilumurto.



Kuva 5.9. LP-1-koekappaleen murtopää kuormituskokeen jälkeen.



Kuva 5.10. Osittaisia lohkeamismurtoja LP3-koekappaleen keskilamellissa ja toisessa reunalamellissa.



Kuva 5.11. Lohkeamismurto keskilamellissa KP-sarjan koekappaleissa.



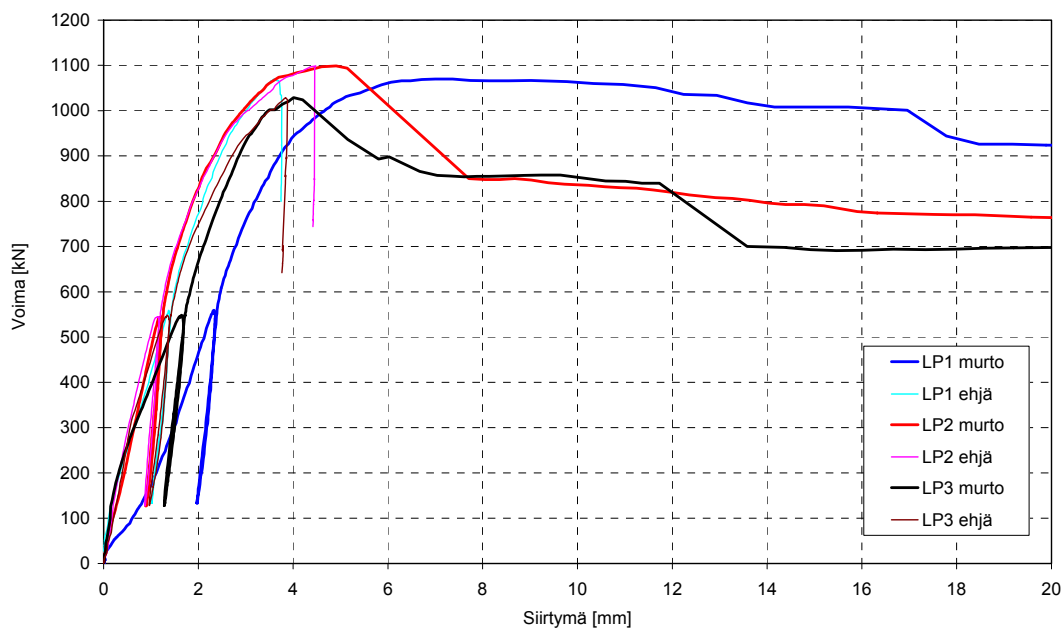
Kuva 5.12. Palamurto KP2 ja KP3 -koekappaleiden reunalamellissa.

5.1.5 Koetulokset

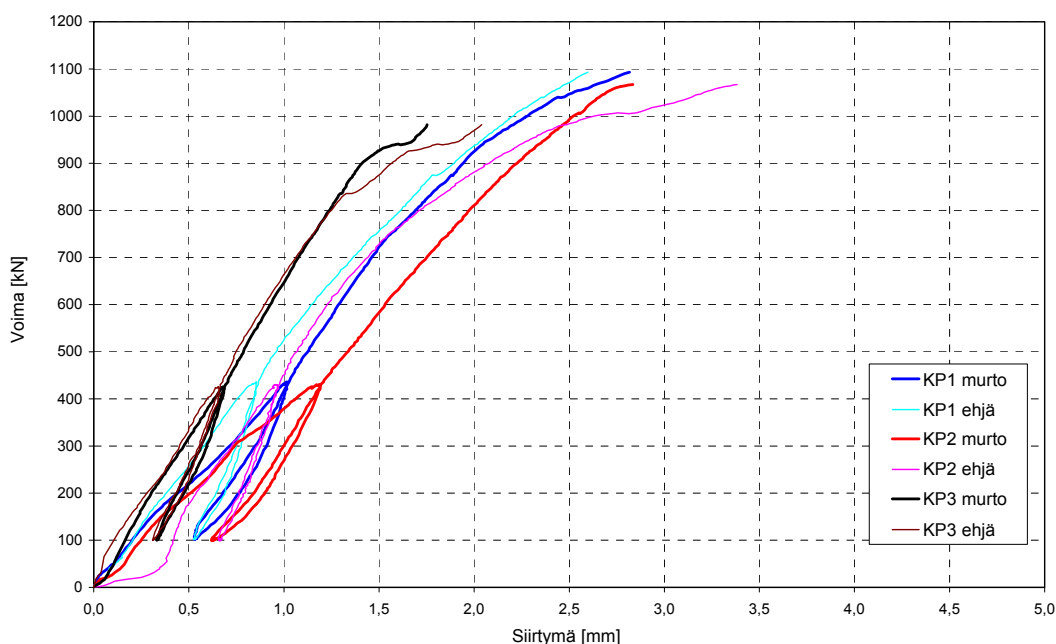
Murtokuormat ja niitä vastaavat liitosliukumat on esitetty taulukossa 5.4. Mitatut voima-siirtymäriippuvuudet on esitetty kuvissa 5.13 ja 5.14. Esitetyt liitosliukumat ovat liitoksen molemmilta puolilta mitattujen siirtymien keskiarvoja. Taulukossa 5.4 on esitetty myös koesarjojen murtokuormien ja liitosten murtosiirtymien keskiarvot sekä niiden variaatiokertoimet *var* (= keskihajonta/keskiarvo). Huomattakoon, että kussakin koekappaleessa oli kaksi samanlaista liitosta, joista vain toinen murtui, ja taulukossa 5.4 esitetyt keskiarvotulokset koskevat pelkästään murtopään liitoksia.

Taulukko 5.4. Koekappaleiden murtokuormat sekä niitä vastaavat liitosliukumat.

Koekappale	F_{\max} (kN)	$\delta_{\max, \text{murto}}$ (mm)	$\delta_{\max, \text{ehjä}}$ (mm)
LP1	1070	7,00	3,77
LP2	1099	4,91	4,48
LP3	1029	4,01	3,88
LP: keskiarvo	1066	5,31	
LP: <i>var</i>	3,3 %	29 %	
KP1	1093	2,82	2,60
KP2	1067	2,84	3,38
KP3	982	1,75	2,04
KP: keskiarvo	1047	2,47	
KP: <i>var</i>	5,5 %	25 %	



Kuva 5.13. LP-liitosten voima-siirtymäriippuvuudet.



Kuva 5.14. KP-liitosten voima-siirtymäriippuvuudet.

5.1.6 Vertailu laskennallisiin kapasiteetteihin

Taulukossa 5.5 on esitetty Eurocode 5 -esistandardin ENV 1995-1-1 ja sen Suomen kansallisen liitteen (NAD 23.9.2003), uuden Eurocode 5:n EN 1995-1-1:2004 sekä kertopuuliitoksille lisäksi VTT:n lausunnon RTE1707/04 (VTT 2004a) mukaan lasketut liitostokapasiteetit. VTT:n lausunto perustuu kertopuuliitoksilla EN 26891:1991 -standardin mukaan tehtyjen liitostokokeiden tulosten prEN 14358 -standardin mukaiseen evaluointiin, jolla on määritetty Kerto-S-materiaalille EN 1995 -mitoituksen yhteydessä hyväksyttävät liitinvälit ja peräkkäisistä liittimistä johtuvan liitostokapasiteetin vähennyskerroimen laskentakaava.

Taulukossa 5.5 on esitetty sekä materiaalien ominaisarvoilla, F_k , että mitatuilla koekappaleiden keskimääräisillä materiaaliarvoilla lasketut kapasiteetit, F_m . Rst-tappivaarujen myötömomentit laskettiin suoraan hiiliteräslittimille tarkoitetuilla kaavoilla. Määrävinä materiaaliomaisuuksina kyseeseen tulivat puun tiheys ja tappivaarujen vetomurtolujuus ($f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$). Eurocode 5 -esistandardin (RIL 205-2003) mukaisessa mitoituksessa liimapuun L40 ominaistiheys oli $\rho_k = 440 \text{ kg/m}^3$ ja EN 1995-1-1:n mukaisessa tarkastelussa käytettiin GL32h-lujuusluokan liimapuun tiheyttä $\rho_k = 430 \text{ kg/m}^3$. Kertopuun ominaistiheys oli $\rho_k = 480 \text{ kg/m}^3$ kummankin normin yhteydessä.

LP-liitoksien todellisilla materiaaliarvoilla lasketut kapasiteetit (F_m) olivat ominaisarvoja (F_k) pienempiä, koska mitattu liimapuun keskimääräinen tiheys oli vain 407 kg/m^3 . Todellisilla materiaaliarvoilla tehdyissä laskelmissa KP-liitoksien ulko- ja keskilamel-

leille käytettiin taulukossa 5.3 esitettyjä keskiarvotiheyksiä ja 10 mm tappivaarnoille käytettiin mitattua keskiarvopaksumutta 9,98 mm sekä vetomurtolujuutta $f_{u,m} = 667 \text{ N/mm}^2$.

Kaikissa laskentatapauksissa mitoittavana tekijänä oli halkeilulla redusoitu puikkoliitosteorian mukainen liitoskapasiteetti. Peräkkäisistä liittimistä johtuva kapasiteetin pienennyskerroin oli tapauksesta riippuen 0,74...0,87. Laskentaohjeiden mukaisessa mitoituksessa liitosalueen lohkeamismurto ei tule mitoittavaksi tekijäksi. LP-liitoksien lohkeamismurtokapasiteetti olisi RIL 205-2003 -normin mukaan laskettuna 1 251 kN ja KP-liitoksilla vastaavasti 1 241 kN. Uuden EN 1995-1-1 -standardin mukaiset lohkeamismurtokapasiteetit olisivat vielä tätä suurempia.

Taulukko 5.5. Eurocode 5:n mukaan lasketut koeliitosten ominaiskapasiteetit F_k sekä mitatuilla koekappaleiden todellisilla materiaaliarvoilla lasketut kapasiteetit F_m .

liitos \ normi	ENV 1995 (RIL 205)		EN 1995-1-1:2004		EN 1995 + RTE1707/04	
	F_k (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	F_m (kN)	F_k (kN)	F_m (kN)
LP: $F_{koe} = 1066 \text{ kN}$	1058	1027	888	872		
KP: $F_{koe} = 1047 \text{ kN}$	1006	1040	881	923	1037	1086

Koetulokset vastasivat hyvin RIL 205-2003:n mukaan todellisilla materiaaliarvoilla laskettuja kapasiteetteja. Kertopuuliitoksien kokeelliset murtokuormat jäivät keskimäärin 3,6 % VTT:n lausunnon RTE1707/04 (VTT 2004a) mukaan todellisilla materiaaliarvoilla laskettua kapasiteettia pienemmäksi. Tämän voidaan katsoa johtuvan puurakenteiden normaalista lujuushajonnasta ja siitä, että koekappaleet murtoivat aina heikommasta päästä. KP-3-koekappaleen selkeästi muita liitoksia alhaisempi kestävyys saattoi johtua myös siitä, että kolmen tapin kohdalla teräslevyjen reiät jouduttiin poraamaan soikeiksi niin, että kyseiset tapit eivät ottaneet murtohetkellä vielä lainkaan kuormaa.

EN 1995-1-1:2004:n mukainen mitoitusmenetelmä osoittautui testatuille liitoksille selkeästi konservatiiviseksi. Mitoitusohjeiden oleellinen ero on peräkkäisistä liittimistä johtuvassa liitoskapasiteetin reduktiokertoimessa. RIL 205:ssä ja RTE1707/04:ssä (VTT 2004a) reduktiokerroin lasketaan Eurocode 5 -esistandardin kansallisen sovellusohjeen täydennyksessä (23.9.2003) esitetyllä kaavalla, jossa EN 1995-1-1 -standardista poiketen otetaan huomioon myös liittimen hoikkuuden vaikutus.

Normaalilämpötilan kokeilla varmistettiin, että rst-tappivaarnaliitokset voidaan mitoittaa sekä RIL 205-2003:n että EN 1995-1-1:n ohjeiden mukaan. Palonkestävyysskokeissa käytettävät kuormitusasteet määritettiin siten, että palotilanne ei muodostuisi mitoittavaksi tekijäksi kattokannattimien liitoksissa, kun kattorakenteiden omapaino $g_k = 0,6 \text{ kN/m}^2$ ja lumikuorma katolla $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$. Liimapuuliitokselle sovellettiin sille edul-

lisempaa Eurocode 5 -esistandardin (RIL 205-2003) mukaista mitoitusta ja kertopuulii-tokselle RTE1707/04 -lausunnon mukaan sovellettua EN 1995-1-1 -standardia käyttäen kansallisena liitteenä VTT:ssä laadittua 13.4.2005 päivättyä ehdotusta. Näillä kuormituk-silla normaalilämpötilan ja palotilanteen mitoitukset tulevat tasapainoon, kun liimapuulii-toksen kestävyys palotilanteessa on 40 % Eurocode 5 -esistandardin mukaan lasketusta lyhytaikaisen aikaluokan mitoituskapasiteetista ($0,40 \cdot 799 \text{ kN} = 320 \text{ kN}$) ja kertopuulii-toksen palotilanteen kapasiteetti on vastaavasti 38 % EN 1995:n mukaisesta normaaliläm-pötilan keskipitkän aikaluokan mitoituskäytävyydestä ($0,38 \cdot 762 \text{ kN} = 290 \text{ kN}$).

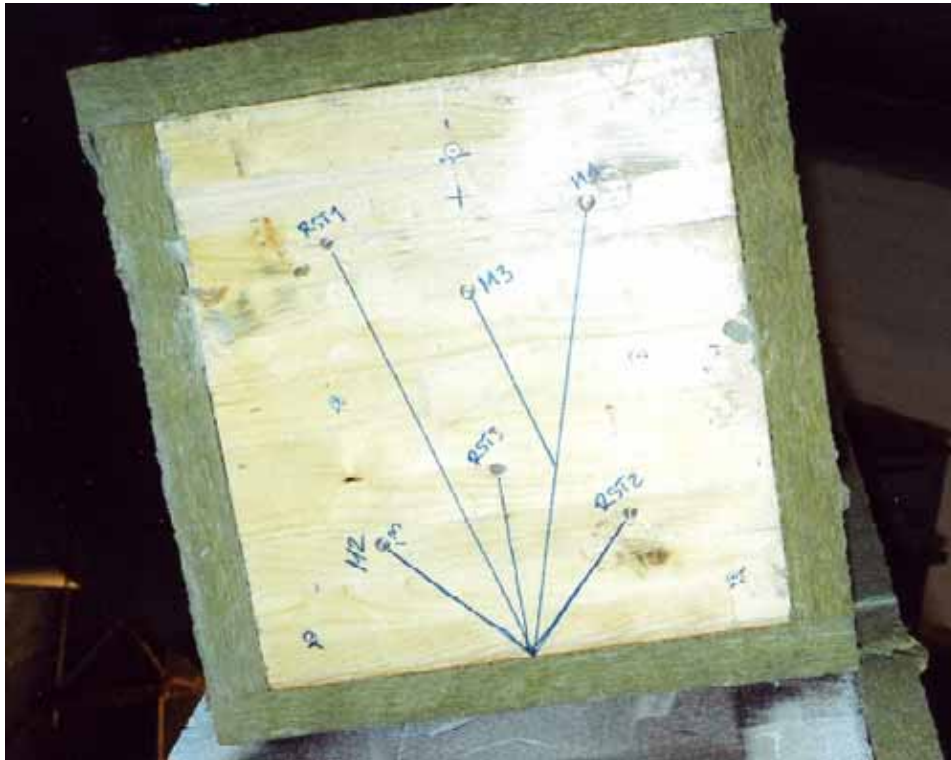
5.2 Tappivaarujen lämpötilakokeet

Tappivaarujen lämpenemiskokeita tehtiin kaksi kappaletta. Ensimmäinen koe tehtiin 13.2.2004 ns. K-uunissa (pieni uuni) ja toinen 25.4.2005 horisontaaliuunissa (iso uuni). Kokeissa mitattiin puuhun porattuihin reikiin asennettujen tappivaarujen lämpötiloja eri syvyydeltä muiden standardipalonkestävyyskokeiden yhteydessä. Kokeet tehtiin sekä rst-tappivaarunoilla että vertailun vuoksi vastaavan kokoisilla lujuusluokan 8.8 hii-literäsvaarunoilla. Taulukossa 5.6 on esitetty kokeiden materiaalitiedot. Tappivaarut asen-nettiin siten, että tappien päät olivat pinnassa näkyvissä (ks. kuva 5.15). Liimapuu oli va-rastoitu ilmastointihuoneessa, jonka ilman suhteellinen kosteus oli RH 50 % ja lämpötila 23 °C. Kokeessa lämpötilan nousunopeus oli standardin SFS-EN 1363-1 mukainen.

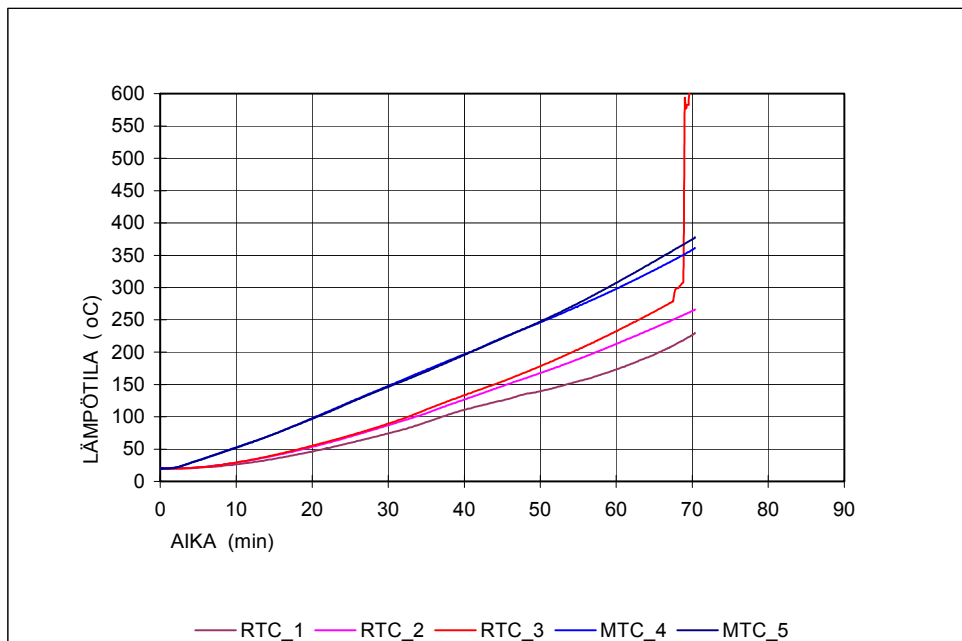
Taulukko 5.6. Tappivaarun lämpötilakokeen materiaalitiedot.

Koe	Teräslaji	Halkaisija d pituus l	Vetomurtolujuus $f_{u,k}$ (N/mm ²)	Puumateriaali ja paksuus
1 (13.2.2004)	EN 1.4401 AISI 316	12 mm 190 mm	680	L40 190 mm
1 (13.2.2004) 2 (25.4.2005)	hiiliteräs	12 mm 190 mm	640	L40 190 mm
2 (25.4.2005)	EN 1.4401 AISI 316	12 mm 190 mm	680	L40 190 mm

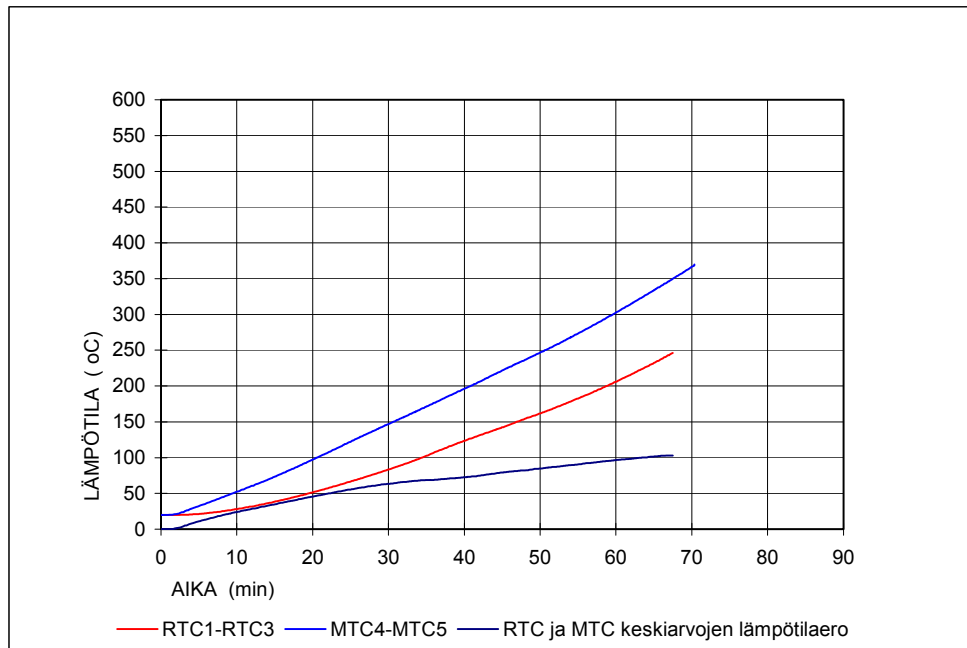
Liitteessä C.2 on esitetty koejärjestely ja liitteen C.3 kuvissa on kerrottu lämpötilan mit-tauspisteiden paikat. K-uunissa tehdyistä lämpötilamittauksista havaittiin, että tappien paikka vaikutti huomattavasti niiden lämpenemiseen eli esimerkiksi siihen, miten lähel-lä liekit olivat. Tämän vuoksi koe uusittiin suuremmassa horisontaaliuunissa. Kuvassa 5.16 on esitetty uusitussa kokeessa mitatut rst-tappien ja mustasta teräksestä valmistet-tujen tappien keskikohdan lämpötilat ajan funktiona ja kuvassa 5.17 eri teräslaaduista valmistettujen tappien lämpötilaero. Ero on 30 min kohdalla reilut 50 °C ja 60 min koh-dalla 100 °C. Liitteen C.4 kuvissa on esitetty kummankin kokeen lämpötilamittaukset, uuninlämpötilat (ks. C.8 ja C.13), rst- ja hiiliteräsvaarujen lämpötilat sekä niiden ver-tailuja (ks. C.9–C.12 ja C.14–C.15).



Kuva 5.15. Rst-tappivaarujen lämpötilakoejärjestely 13.2.2005.



Kuva 5.16. Tappivaarujen lämpötilat kokeessa 25.4.2005.



Kuva 5.17. Rst-tappien ja mustasta teräksestä valmistettujen tappien lämpötilojen keskiarvot ja niiden välinen ero kokeessa 25.4.2005.

Edellä esitetyt lämpötilat olivat tapin keskikohdasta mitattuja ja jäivät vielä alle 300 °C:n, mitä pidetään puun hiiltymisen alkamislämpötilana. Lähempänä pintaa lämpötilat nousivat kuitenkin yli 300 °C:seen, jolloin puu hiiltyy vaaran ympäriltä. Tämä reunapuristetun puun hiiltyminen aiheuttanee kuormitetussa liitoksessa merkittävää liitosliukumaa ja rakoja puusauvojen väliin.

5.3 Palonkestävyyskokeet

5.3.1 Liitoskokeiden koekappaleet

Rst-tappivaarnaliitosten R60-palonkestävyyskokeet tehtiin tutkittavien liitosten osalta normaalilämpötilan murtokuormitustestien kappaleita vastaavilla liitosgeometrioilla (ks. kohta 5.1). Tutkimuksessa testattiin kaksi koekoekappaletta teräslevyllisiä 4-leikkeisiä tappivaarnaliitoksia (ks. kuva 5.18). Puumateriaaleina käytettiin homogeenista liimapuuta L40 ja kertopuuta 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), ainetodistus liitteessä C.1 (kuva C.5), 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.

Late-Rakenteet Oy toimitti 22.3.2005 VTT:lle valmiiksi kootun liimapuisen ristikon. Koekappaleita säilytettiin koestukseen asti ilmastointihuoneessa, jonka lämpötila on 23 °C ja suhteellinen kosteus 50 % RH. Finnforest Oyj toimitti valmiiksi työstetyt kertopuuristikon puuaihiot, joihin VTT:ssä asennettiin liitosten teräslevyt ja liittimet. Koekappaleiden mittapiirroksia on esitetty liitteessä C.1 ja kohdassa 5.1.2 (kuva 5.2 ja kuva 5.3) sekä koesarjojen muuttujat taulukossa 5.1.



Kuva 5.18. R60-tappivaarnaliitos liima- (20.4.2005 ylä) ja kertopuussa (25.4.2005 ala).

5.3.2 Kokeet

Liimapuinen R60-tappivaarnaliitoskoe (koe 1) tehtiin 20.4.2005 ja kertopuinen (koe 2) liitoskoe 25.4.2005. Koe tehtiin horisontaaliuunissa standardin SFS-EN-1365-3:1999 mukaan. Koejärjestelyt on esitetty liitteessä C.2. sekä kuvissa 5.20 ja 5.21. Koekappaleita kuormitettiin kokeen aikana ristikon harjalta (kuva 5.19) 281 kN (koe 1) ja 256 kN (koe 2) vakiovoimalla (kuormalaskelma, ks. liite C.2), jolloin tutkittavan liitoksen veto-voima oli 324 kN tai 290 kN. Kokeessa 1 käytetty tarkistettu vakiovoima oli hieman suurempi kuin laskelmassa (277 kN) esitetty. Kuormitusasteeksi tuli 40,6 % ENV 1995:n mukaan lasketusta normaalilämpötilan lyhytaikaisen aikaluokan mitoituskapasiteetista. Kuormitus aloitettiin 15 min ennen palonkestävyyskokeen alkua.

Uunin lämpötilaa ohjattiin kahdeksan plattatermoelementin avulla, joista puolet oli suunnattu uunin lattiaan ja puolet uunin seinään. Lämpötilan nousunopeus oli standardin SFS-EN 1363-1 (ISO 834-1) mukainen.

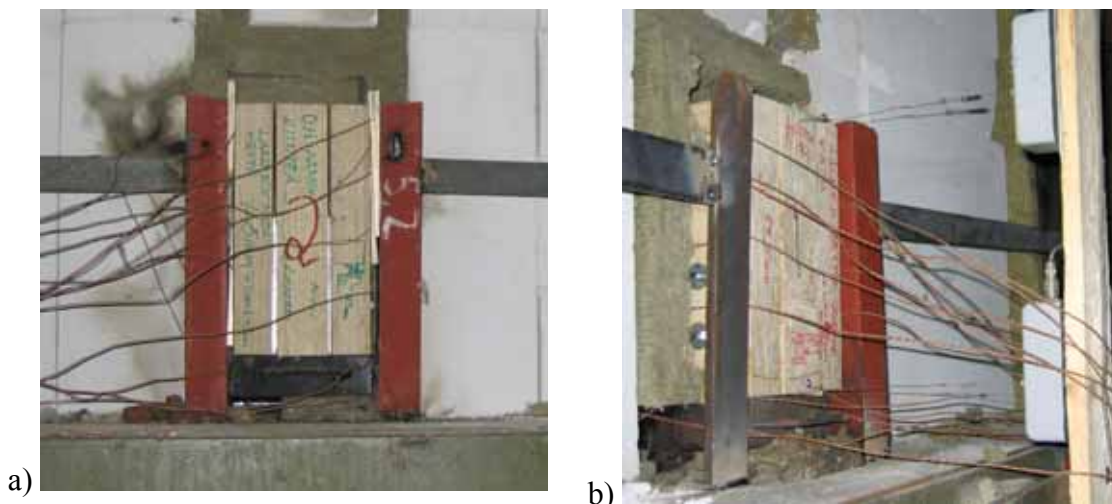
Kokeen aikana mitattiin koekappaleen teräslevyjen lämpötiloja (liite C.3). Lisäksi molemmissa kokeissa mitattiin ristikon harjan painumaa sekä kokeessa 2 liikkuvan tuen vaakasuuntaista siirtymää alapaarteen ylä- ja alareunasta. Koe 1 lopetettiin 57 min 50 s ja koe 2 lopetettiin 70 min 20 s kokeen aloittamisen jälkeen, kun liitos ei enää kantanut kuormaa.



Kuva 5.19. R60-liitoskokeen kuormitusjärjestely.



Kuva 5.20. R60-liitoskokeen koejärjestely, kuvia uunista. Koe 25.4.2005.



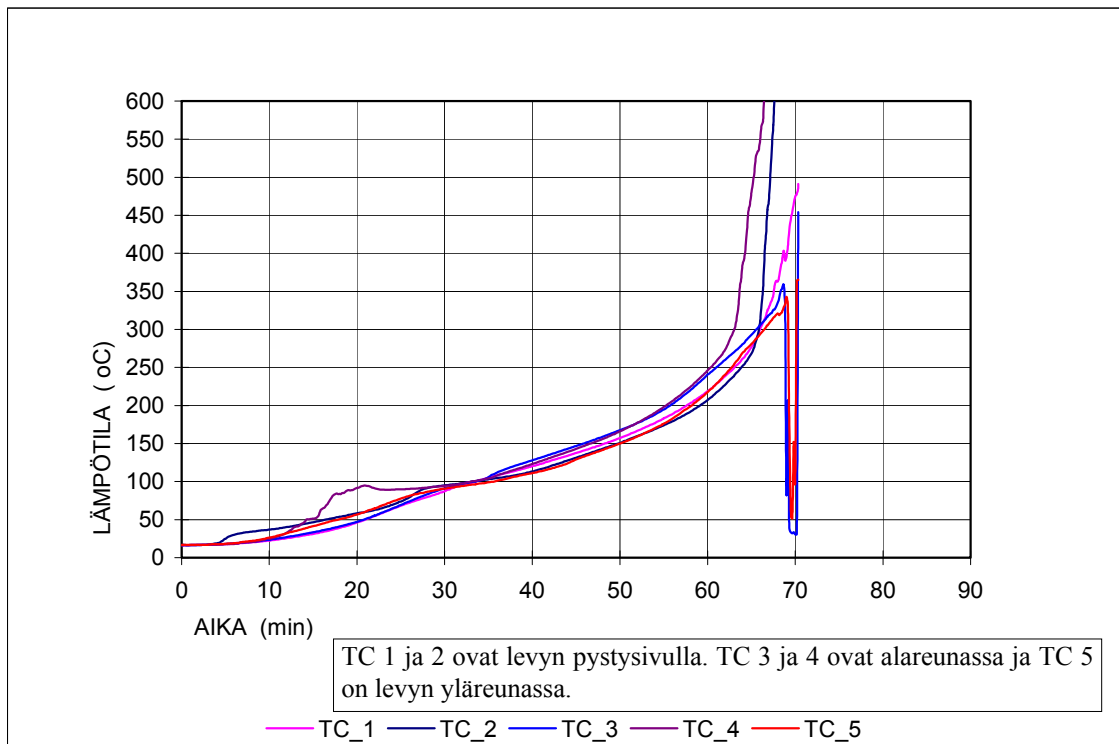
Kuva 5.21. R60-liitoskokeen koearjestely: a) kiinteä tuki ja b) liikutuki sekä siirtymämittaus paarteiden ylä- ja alareunasta. Koe 25.4.2005.

5.3.3 Koetulokset

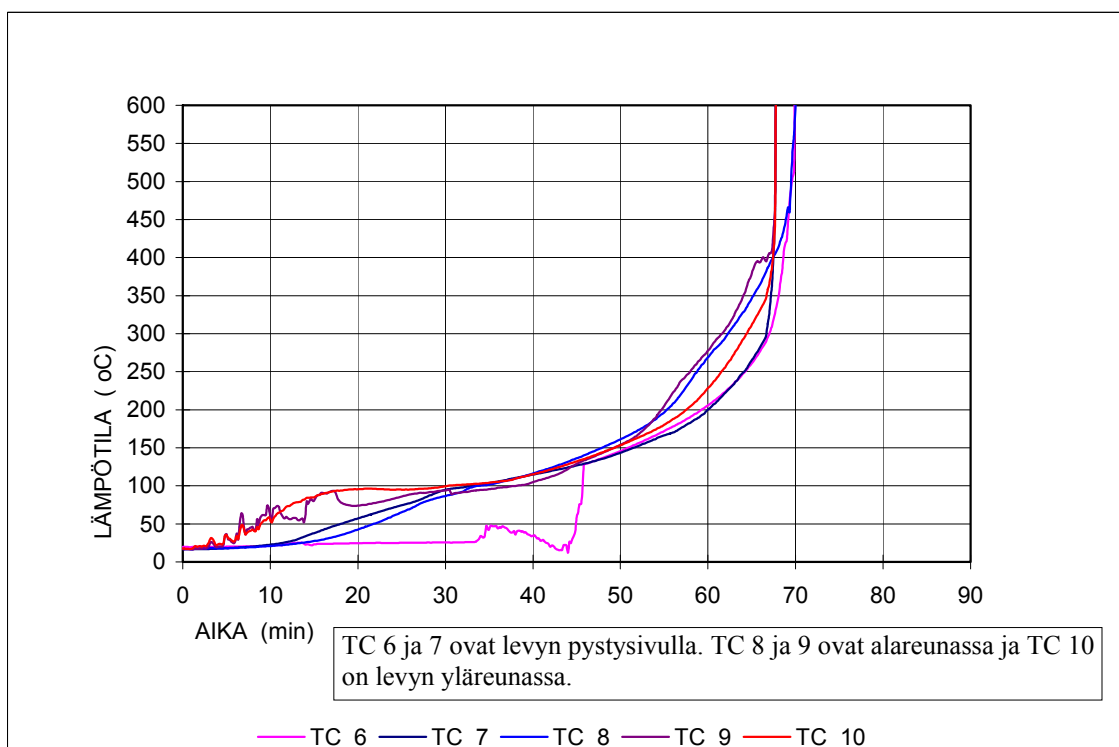
Kokeessa mitatut lämpötilat, paine-ero uunin ja koehallin välillä, siirtymät, havainnot ja valokuvat kokeen aikana ja sen jälkeen on esitetty liitteissä C.4–C.7. Koehallin lämpötila kokeen alussa oli 20 °C molemmissa kokeissa. Kokeessa 1 (20.4.2005, ks. kuva 5.24) liitos menetti kantavuutensa ajassa 56 min 50 s ja koe 2 (25.4.2005, ks. kuva 5.24) ajassa 67 min 50 s.

Kuvassa 5.22 ja 5.23 on esitetty kokeessa 2 mitatut teräslevyjen 1 ja 2 lämpötilat. Mittauspisteet olivat teräslevyn ylä- ja alareunalla sekä pystysivuilla, mutta lämpötiloissa ei näy kovin paljon eroja ennen kuin kokeen lopussa, jolloin liitos alkaa aueta. 60 min kohdalla teräslevyn lämpötilat ovat noin 200–275 °C.

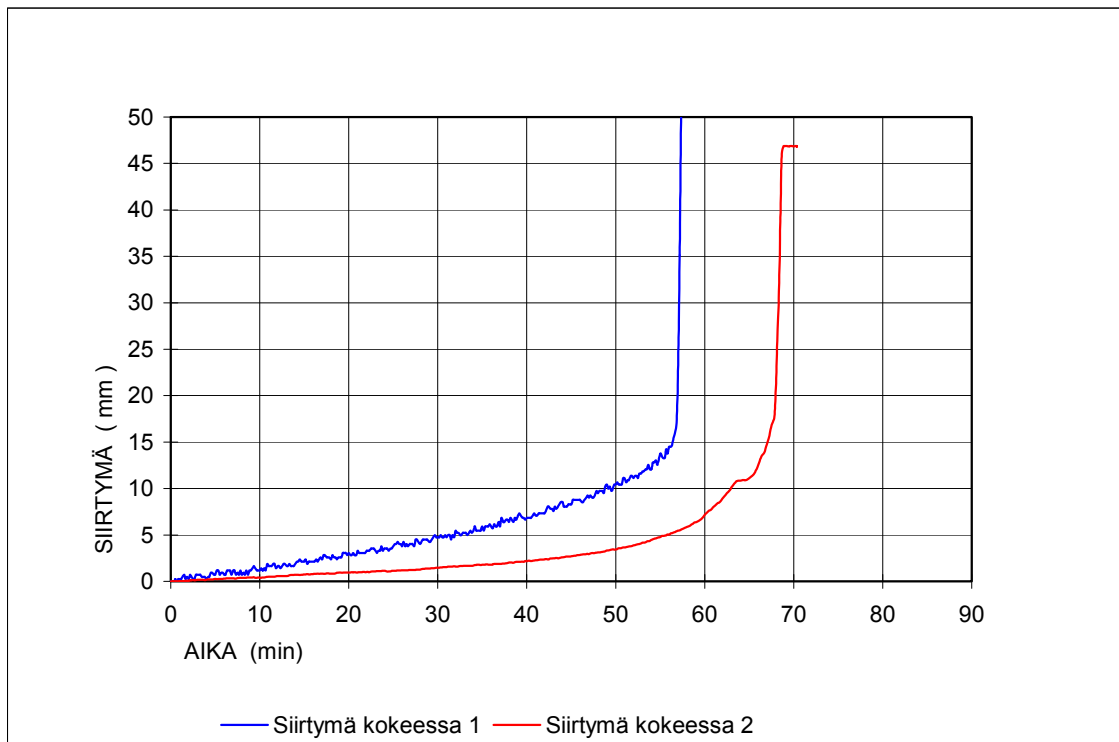
Kuvaan 5.24 on piirretty molempien kokeiden ristikon harjan siirtymä ajan funktiona. Kokeessa 1 murto on tapahtunut yhtäkkiä liitoksen saavutettua palonkestävyytensä. Kokeessa 2 siirtymänopeus on kasvanut hitaammin ja murto on tapahtunut sitkeämmin.



Kuva 5.22. Teräslevyn 1 lämpötiloja ajan funktiona.



Kuva 5.23. Teräslevyn 2 lämpötiloja ajan funktiona.



Kuva 5.24. Kokeiden 1 ja 2 ristikon harjan siirtymä ajan funktiona.



Kuva 5.25. Liimapuun tappivaarnaliitos palon jälkeen (20.4.2005).



Kuva 5.26. Kertopuun tappivaarnaliitos palon jälkeen (25.4.2005).

5.3.4 Koetulosten analysointi

LP-liitoksessa (20.4.2005) käytettiin 12 mm haponkestäviä tappivaarnejä ja 8 mm seostamattomia teräslevyjä. Kuormitusaste polttokokeessa oli 30 % vastaavilla liitoksilla normaalilämpötilassa testattujen liitosten murtokuormien keskiarvosta. KP-liitoksessa (25.4.2005) käytettiin 10 mm haponkestäviä tappivaarnejä ja 6 mm haponkestäviä teräslevyjä. Kuormitusaste oli 28 % normaalilämpötilan murtokuormasta.

Kumpikin liitos murtui keskimmaisessä lamellissa tapahtuneena liitoksen puuosan petämisenä. Tappivaarnat pysyivät keskimmaisessä lamellissa suorina eikä teräslevyihin tullut pysyviä muodonmuutoksia. KP-liitoksessa osa tapeista taipui ulompien puiden osalla (kuva 5.26). Nelileikkeisessä 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 5.25).

LP-liitoksen halkeaminen saattoi johtua ainakin osittain teräslevyjen lämpölaajenemisesta aiheutuneista puun poikittaisista vetojännityksistä. LP-liitokset oli valmistettu po-raamalla samanaikaisesti tiukat reiät puuhun ja teräslevyihin. KP-liitoksien teräslevyissä oli hieman väljät reiät ja teräsosat olivat ohuempia.

6. Holkkiliitokset

6.1 Kuormituskokeet normaalilämpötilassa

6.1.1 Yleistä

Ruuvattujen rst-holkkiliitosten normaalilämpötilan murtokuormitustestit tehtiin palonkestävyyskoekappaleita vastaavilla liitoksilla (ks. kohta 6.2). Testeillä määritettiin palonkestävyyskoeksessa käytettävä kuormitusaste. Testit tehtiin myös sen varmistamiseksi, että puu-puuliitoksille esitettyä vinoruuviliitosten mitoitusmenetelmää (Kevarinmäki 2002) voidaan soveltaa teräs-puu holkkiliitokselle ja että Eurocode 5:n leikkauskuormittujen ruuvien mitoitusmenetelmää voidaan soveltaa suurissakin teräs-puuliitoksissa ilman lukumääräreduktiota.

Tutkimuksessa testattiin lyhytaikaisessa murtokuormituksessa kaksi koesarjaa ruuvattuja rst-holkkiliitoksia. Molemmissa koesarjoissa oli kolme samanlaista koekappaletta. Puumateriaaleina käytettiin liimapuuta L40. Holkit olivat seinämältään 6 mm paksuja 200 x 300 mm² rst-putkipalkkeja. Toisessa koesarjassa holkin ja puun välinen liitos toteutettiin vinoruuvaustekniikalla ja toisessa koesarjassa leikkauskuormitetuilla ruuveilla. Vinoruuvaustekniikan yhteydessä käytettiin 6 x 140 mm kokoisia rst-yleisruuveja ja leikkausliittiminä käytettiin kuusiokantaisia 6,5 x 127 mm kokoisia osakierteisiä rst-ruuveja. Vinoruuviliitoksissa oli kussakin yhteensä 98 ruuvia ja leikkausliitoksissa oli 96 ruuvia.

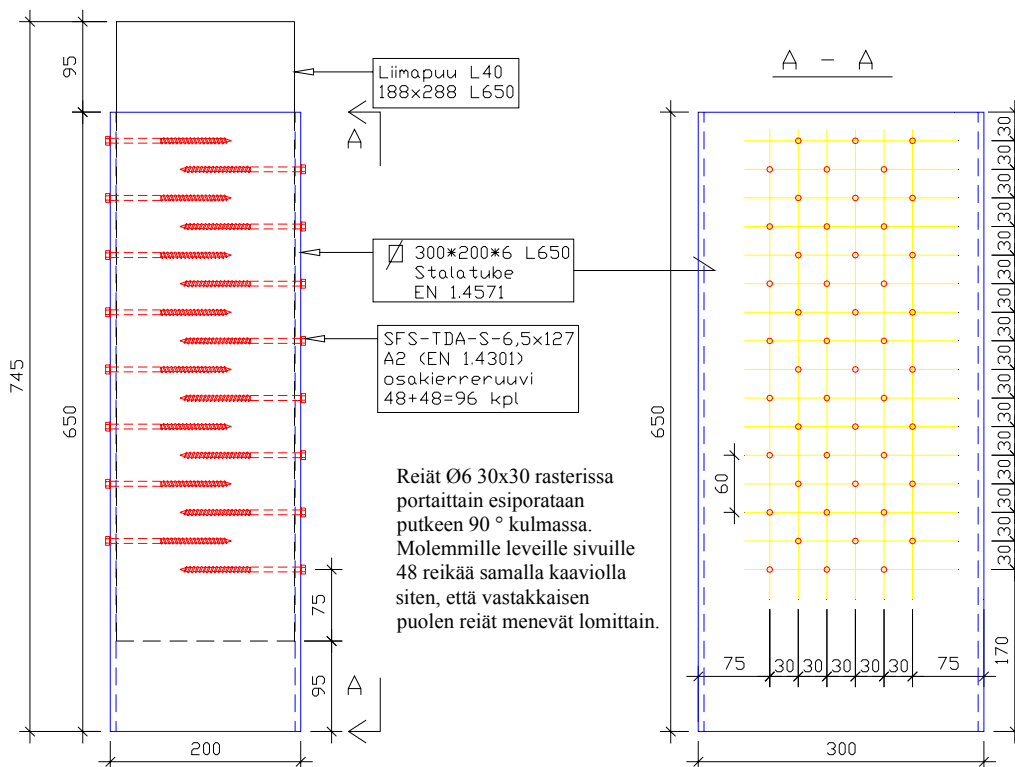
Vierumäen Teollisuus Oy toimitti VTT:lle liimapuun. Outokumpu Oyj teki Stalatube Oy:n valmistamiin putkipalkkeihin ruuvinreiät ja toimitti valmiiksi työstetyt holkit VTT:lle. Liimapuun kosteustasaannutus ja mitallistaminen sekä holkkiliitosten ruuvaus tehtiin VTT:ssä. Testauksessa koeliitokset kuormitettiin murtoon noudattaen EN 26891 (ISO 6891) -standardin mukaista kuormitusohjelmaa. Koetuloksia verrattiin suunniteluohjeiden mukaan laskettuihin kapasiteetteihin.

6.1.2 Koekappaleet

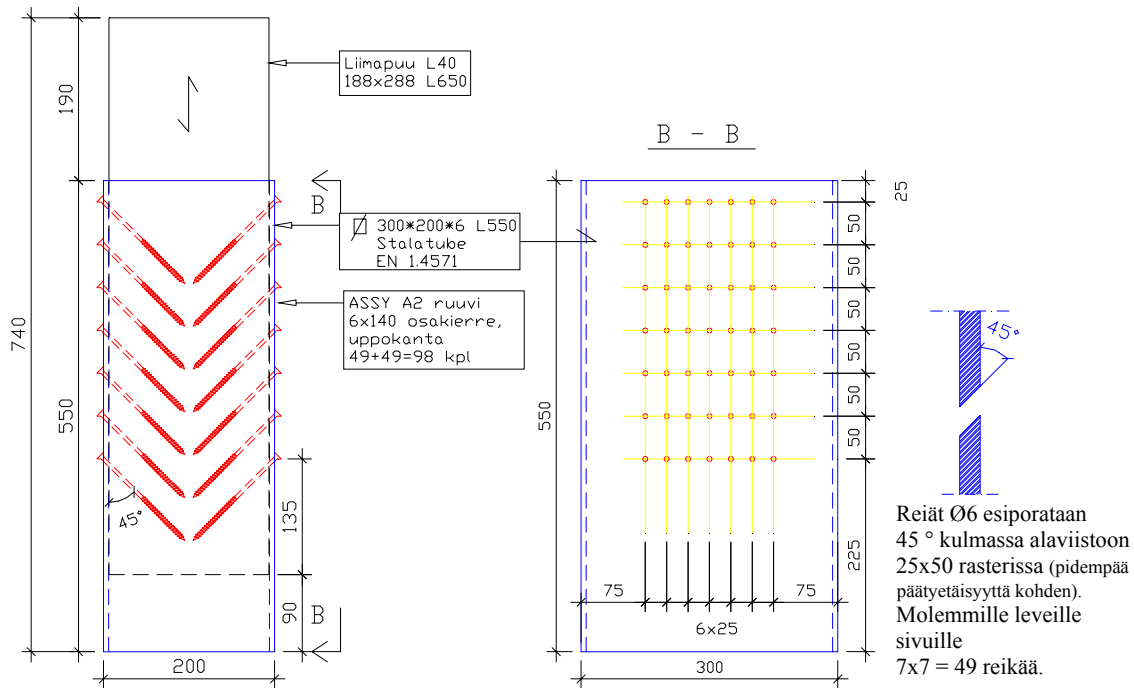
Koekappaleiden mittapiirrokset on esitetty kuvissa 6.1 ja 6.2 ja koesarjojen muuttujat taulukossa 6.1. Liimapuu L40 oli valmistettu 45 mm paksuista kuusilamelleista poikkileikkauksen 190 x 315 mm² palkiksi. Palkki mitallistettiin poikkileikkaukseen 188 x 288 mm² ja kulmat pyöristettiin niin, että liimapuuosat voitiin kevyesti työntää holkkien sisään.

Ruuvauksessa ruuvinvääntimen vääntömomentti rajoitettiin niin, että se oli enintään noin 80 % ruovin vääntömomenttikapasiteetista, joka määritettiin ko. ruuvinvääntimellä ja ruuveilla etukäteen teräslevyn ja puun välisten ruuviliitosten kiristämiskokeilla. Holkkiliitosten kaikki ruuvit kiristettiin näin rajoitettuun ruuvinvääntimen vääntömomenttiin saakka. Ruuvaustyön yhteydessä ei ilmennyt ongelmia: kaikki ruuvit menivät hyvin puun sisään akkukäyttöisellä ruuvinvääntimellä ilman esiporausta ja ilman tartunnan pettämisiä, ruuvien katkeamisia tai ruuvauskannan pyöristymisiä.

Vinoruuvauksen (D-sarja) yhteydessä käytettiin 45° kulmaan puusta sahattua ruuvien ohjaussapluunaa. Toisaalta todettiin, että ilman ohjuriakin ruuvaus olisi hyvin onnistunut $\pm 5^\circ$ kaltevuuskulmatoleranssilla, koska ruovin reikä oli ruuvien kierreläpimittaa hieman pienempi ja ruuvit pureutuivat tällöin automaattisesti oikeaan suuntaan. Leikkausliitosten (N-sarja) suoraruuvaus tapahtui vielä tiukkasovitteisempiin holkin reikiin, eikä niiden ruuvauksen yhteydessä käytetty mitään ohjureita. Ruuvaustyön yhteydessä tehdyissä mittauksissa ruuvien todettiin asettuvan kohtisuoraan asentoon holkin pintaan nähden.



Kuva 6.1. N-sarjan koekappaleen rakenne ja mitat (leikkausliitos).



Kuva 6.2. D-sarjan koekappaleen rakenne ja mitat (vinoruuviliitos).

Taulukko 6.1. Koesarjojen muuttujat. Merkinnät: dxL = ruuvien nimellismitat, $f_{u,k}$ = valmistajan ilmoittama ruuvimateriaalin vetomurtolujuuden minimiarvo, α = ruuvauskulma, n = ruuvien lukumäärä holkkiliitoksessa, a_1 = peräkkäisten ruuvien välinen etäisyys, a_2 = liitinväli puun syitä vastaan kohtisuorassa suunnassa, a_3 = etäisyys puun päädyistä ja a_4 = reunaetäisyys.

koesarja	dxL (mm)	$f_{u,k}$ (N/mm ²)	α (°)	n	a_1 (mm)	a_2 (mm)	a_3 (mm)	a_4 (mm)
N	6,5x127	700	90°	96	60	30	75	69
D	6x140	500	45°	98	50	25	36	69

Holkit oli valmistettu titaanistabiloidusta kuumavalssatusta austeniittisestä teräslaadusta EN 1.4571 (X6CrNiMoTi17-12-2), jonka 0,2-rajan minimiarvo on 220 N/mm² ja vetomurtolujuus 540–690 N/mm².

N-sarjan leikkausliitoksissa käytettiin SFS intecin kuusiokantaisia ja osakierteisiä TDA-S-6,5x127 A2 -luokan rst-ruuveja (ks. kuva 6.3). Ruuvit oli valmistettu austeniittisestä teräslaadusta EN 1.4301. Ruuvien kierreosan ulkohalkaisija oli 6,5 mm, sileän varren paksuus 5,1 mm ja kierreosan sisähalkaisijamitta 4,5 mm. Ruuvien sileän varren pituus oli 53 mm ja kierreosan 74 mm. Valmistajan ilmoittama ruuvien vetomurtolujuuden ominaisarvo $f_{u,k} = 700$ N/mm². EN 409:n mukaisella testauksella TDA-S-6,5-ruuvien myötömomentin keskiarvoksi on aikaisemmin VTT:ssä määritetty kierreosalle $M_{y,m} = 20\,142$ Nmm ja sileälle varrelle $M_{y,m} = 20\,805$ Nmm (Yli-Koski & Kevarinmäki 2005).

Vinoruuviliitoksissa käytettiin osakierteisiä ja uppokantaisia Würthin Assy A2 -ruuveja 6x140 (ks. kuva 6.3), joissa oli AW25-ruuvauskolokanta. Ruuvien sileän varren paksuus oli 4,3 mm, ja ulkohalkaisijaltaan 6,0 mm paksun kierreosan pituus on 70 mm. Ruuvit oli valmistettu EN 10088:n mukaisesta austeniittisestä teräslaadusta X3CrNiCu18-9-3, jonka vetomurtolujuus on vähintään 500 N/mm². Koekappaleissa käytettyjen ruuvien pakkauksista otettiin 5 kpl ruuveja, joille VTT:ssä suoritettiin vetokokeet. Kaikki ruuvit murtuivat kierreosalta (ks. kuva 6.4). Testattu Assy A2 6x140 -ruuvien vetokapasiteetin keskiarvo oli $F_{u,m} = 9,63$ kN, kun pienin arvo oli $F_{u,min} = 9,54$ kN ja suurin $F_{u,max} = 9,67$ kN.



Kuva 6.3. Koekappaleissa käytetyt ruuvit: a) SFS-TDA-S-6,5x127 ja b) Assy A2 6x140.



Kuva 6.4. Vetokokeissa murtoon testattuja Assy 6x140 A2 -ruuveja.

Koekappaleet valmistettiin yhdestä 5,2 m pitkstä liimapuupalkista, joka oli toimitettu VTT:lle marraskuussa 2004. Liimapuu mitallistettiin 4.5.2005, koekappaleet koottiin 6.5.2005 ja kuormituskokeet tehtiin 11.5.2005. VTT:ssä liimapuuta ja koekappaleita säilytettiin vakioilmastohuoneessa RH 65 %:n suhteellisessa kosteudessa +20 °C lämpötilassa. Välittömästi kuormituskokeiden jälkeen kaikista D-sarjan koekappaleista otettiin kosteus- ja tiheysnäytteet noin 100 mm etäisyydeltä koekappaleen päästä. Liimapuun näytepalat sahattiin koko poikkileikkauksen läpi ulottuvina niistä sisälamelleista, joihin ruuvit oli sijoitettu. Näytteistä standardien ISO 3130 ja ISO 3131 mukaan määritetty puun kosteuspitoisuus oli keskimäärin $\omega = 11,5$ % ja puun tiheys $\rho_w = 394$ kg/m³.

6.1.3 Kuormitusjärjestelyt

Kuormituskokeet suoritettiin Amstler & Co:n valmistamalla 2 MN:n puristavalla ai-
neenkoetuskoneella. Kuormitus- ja mittausjärjestelyt on esitetty kuvassa 6.5. Koekappa-
leet asennettiin pystyyn holkipää alaspäin testauslaitteen teräksisten puristus-
pintojen väliin. Holkin ja puun päädyn välistä liukumaa mitattiin liimapuun kummaltakin syrjä-
reunalta ± 20 mm:n induktiivisilla antureilla. Jousianturit kiinnitettiin koekappaleen
keskilinjalle teräslevyjen ulkopinnoille. Anturin kiinnityspisteen etäisyys holkin päästä
oli 40 mm ja mittausvälin pituus oli 100 mm. Kuormitukset tehtiin 1 000 kN:n kuormi-
tusalueella, jossa käytetyn laitteiston voiman erottelukyky on 0,5 kN ja puristusvoiman
mittauksen SFS-EN ISO 7500-1:2000 -standardin mukainen kalibroitu tarkkuusluokka
on 1, kun $F \geq 150$ kN.



Kuva 6.5. Kuormitus- ja mittausjärjestelyt.

Testaus sisälsi kuvan 5.7 mukaisen 40 %:n esikuormitusosuuden. Kuormitus toteutettiin
sähköisesti voimaohjattuna kuormitusnopeudella $0,2F_{est}/\text{min}$ voima-arvoon $0,7F_{est}$
saakka. Tämän jälkeen kuormitusnopeutta pienennettiin lineaarisesti niin, että estimoitu
murtokuorma olisi saavutettu 12 minuutin kokonaiskuormitusajassa. Mitatut voima- ja
siirtymäarvot tallennettiin 2 sekunnin välein. Estimoitu murtokuorma, F_{est} , oli N1 ja
D1 -koekappaleilla 500 kN, N2 ja N3 -testeissä 750 kN sekä D2 ja D3 -kokeissa 650
kN.

6.1.4 Murtotavat

N-sarjan leikkausliitoksissa murtuminen tapahtui hyvin sitkeästi yli 15 mm liitosliukumalla. Liitoksen murtuminen vastaa Eurocode 5:n (2004) mukaista paksun teräslevyn ja puun välistä puikkoliitoksen murtotapaa, jossa liittimeen muodostuu kaksi plastista niveltä ja puu reunapuristuu myötönivelten väliseltä alueelta. Ruuvien katkeamisia tai kannan lävistymisiä, holkin muodonmuutoksia tai liitoskapasiteettia heikentävää puun halkeilua ei esiintynyt kokeissa. Koekappaleen N2 päädyssä havaittiin kuormituksen jälkeen kummallakin liitopinnalla yksi pienehkö halkeama liitinrivien kohdalla (ks. kuva 6.6). Koekappaleisiin nro N1 ja N3 muodostui vastaava halkeama, mutta vain toiselle liitospinnalle.



Kuva 6.6. Koekappale nro N2 murtokuormituksen jälkeen.

D-sarjan vinoruuviliitokset murtuivat hauraasti noin 5 mm liitosliukumalla ruuvien tartunnan pettäessä puusta. Yhtäkään ruuvien katkeamista tai kannan lävistymistä ei havaittu. Holkeissa ei tapahtunut silmännähtäviä muodonmuutoksia. Kaikissa vinoruuviliitoksissa tapahtui liimapuun korkeussuuntainen läpihalkeaminen huomattavasti ennen liitoksen murtumista, mikä voidaan havaita kuvassa 6.9 esitetyissä voima-siirtymäkuvaajissa nytkähdyksinä kuorma-arvoilla 282 kN (D1), 490 kN (D2) ja 589 kN (D3). Halkeama syntyi poikkileikkauksen keskelle tasolle, johon ruuvien kärjet eivät

ulottuneet (ks. kuva 6.7). Halkeaman leveys holkin sisällä olevassa puun päädyssä oli kussakin koekappaleessa enimmillään 2–3 mm. Halkeaman muodostuminen alensi liitoksen jäykkyyttä, mutta muuten liitoksen toimintaan ja murtokuormaan sillä ei ollut negatiivista vaikutusta.



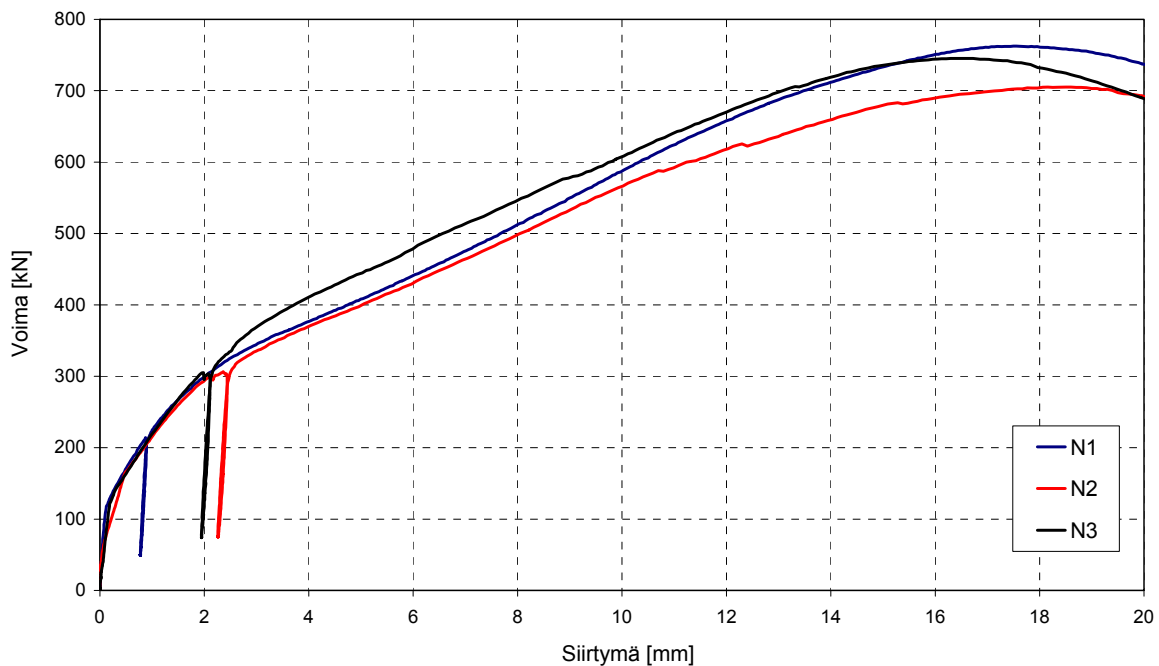
Kuva 6.7. Valokuvia murtoon kuormitetuista vinoruuviliitoksista.

6.1.5 Koetulokset

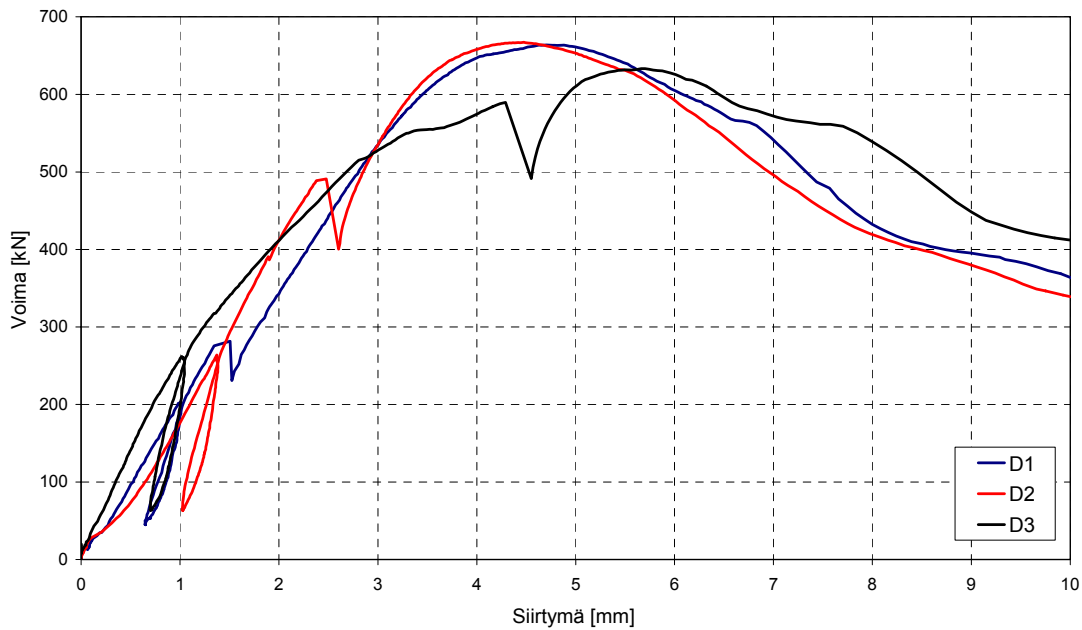
Murtokuormat ja niitä vastaavat liitosliukumat on esitetty taulukossa 6.2. Mitatut voima-siirtymäriippuvuudet on esitetty kuvissa 6.8 ja 6.9. Esitetyt liitosliukumat ovat liitoksen molemmilta puolilta mitattujen siirtymien keskiarvoja. Taulukossa 6.2 on esitetty myös EN 26891 -standardin mukaiset enintään 15 mm liitossiirtymää vastaavat maksimikuormat F_{\max} sekä alkukuormitusosuudella mitattujen liitosliukumien perusteella lasketut liitosten ja liittimien siirtymäkertoimet k_s ja K_{ser} . Taulukossa on esitetty lisäksi koetulosten koesarjakohtaiset keskiarvot sekä niiden variaatiokertoimet var (= keskihajonta/keskiarvo).

Taulukko 6.2. Koekappaleiden murtokuormat, murtoliukumat ja siirtymäkertoimet.

Koekappale	F_{murto} (kN)	δ_{murto} (mm)	F_{max} (kN)	k_s (kN/mm)	K_{ser} (N/mm)
N1	762,6	17,5	734,2	139,4	1452
N2	705,0	18,2	679,5	123,3	1285
N3	745,1	16,5	735,5	133,6	1391
N: keskiarvo	738	17,4	716	132	1376
N: var	4,0 %	4,9 %	4,5 %	6,1 %	6,1 %
D1	663,7	4,68	663,7	249,4	2545
D2	667,3	4,47	667,3	235,2	2400
D3	633,1	5,66	633,1	276,8	2824
D: keskiarvo	655	4,94	655	254	2590
D: var	2,9 %	13 %	2,9 %	8,3 %	8,3 %



Kuva 6.8. N-sarjan leikkausliitosten voima-siirtymäriippuvuudet.



Kuva 6.9. D-sarjan vinoruuviliitosten voima-siirtymäriippuvuudet.

6.1.6 Vertailu laskennallisiin kapasiteetteihin

Taulukossa 6.3 on esitetty Eurocode 5:n (EN 1995-1-1:2004) mukaiseen suunnitteluun tarkoitettujen mitoitusmenetelmien mukaan lasketut liitoskapasiteetit. Taulukossa on esitetty sekä materiaalien ominaisarvoilla, F_k , että mitatuilla koekappaleiden keskimääräisillä materiaaliarvoilla lasketut kapasiteetit, F_m . Liimapuun L40 on laskelmissa oletettu vastaavan EN 1194:n mukaista liimapuun lujuusluokkaa GL32c, jonka ominaistihyys $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$. Liitosten kapasiteetilaskelmissa oletettiin, että kaikki liittimet toimivat aina samanaikaisesti täydellä teholla eli $n_{ef} = n$.

N-sarjan leikkausliitoksen kapasiteetti on laskettu Eurocode 5:n ohjeiden mukaisesti esiporaamattoman naulaliitoksen kaavoilla käyttäen ruuvin halkaisijana tehollista paksuutta $d_{eff} = 4,95 \text{ mm}$, joka on 1,1 kertaa ruuvin kierreosan sisämitta. Liitoksen mitoittaa Eurocode 5:n paksun teräslevyn yhteydessä käytettävä kaava 8.10d, jossa liittimeen muodostuu kaksi plastista myötöniveltä. Köysivoimaefektin laskennassa tarvittava ruuvin tartuntakapasiteetti on laskettu CIB-W18/37-7-14:ssä esitetyn Eurocode 5:n muutosohjeiden mukaan (Kevarinmäki 2004):

$$F_{ax,Rk} = \left(\frac{8d}{l_{ef}} \right)^{0,2} f_{ax,k} d l_{ef} \quad (6.1)$$

missä $f_{ax,k} = 0,037 \rho_k \quad (6.2)$

d on ruuvin kierreosan ulkohalkaisija

l_{ef} on ruuvin kierreosan tartuntapituus vähennettynä ruuvin halkaisijalla d .

Liitoksen ominaiskapasiteetin laskennassa TDA-S-ruuvin myötömomentti laskettiin Eurocode 5:n pyöreille nauiloille tarkoitetulla kaavalla käyttäen vetomurtolujuutena valmistajan ilmoittamaa rst-ruuvin vetolujuuden minimiarvoa $f_{u,k} = 700 \text{ N/mm}^2$. Mitattuja materiaaliominaisuuksia vastaava liitoskapasiteetti F_m laskettiin ruuvin sileällä osalla ($d = 5,1 \text{ mm}$) testatulla myötömomentin keskiarvolla $M_{y,m} = 20\,805 \text{ Nmm}$ ja käyttäen reunapuristus- ja tartuntalujuuksien laskennassa koekappaleista mitattua puun todellista tiheyttä $\rho_o = 394 \text{ kg/m}^3$.

Vinoruuviliitosten mitoittamiseen sovellettiin CIB-W18/35-7-4:ssä puuosien välisille vinoruuviliitoksille esitettyä mitoitusmenetelmää (Kevarinmäki 2002). Mitoituksessa tarkasteltiin vedetyn vinoruuvin kapasiteettia kärjen puoleisessa puuosassa olettaen, että kannan lävistyskapasiteetti teräsosassa on riittävä. Tällöin vedetyn vinoruuviliitoksen leikkausvoimakapasiteetin ominaisarvo

$$R_k = R_{T,k} (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad (6.3)$$

missä
$$R_{T,k} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_{a,2,k} \pi d (s_2 - d) \\ F_{u,k} \end{array} \right. \quad (6.4)$$

$$f_{a,2,k} = f_{ax,\alpha,k} \left(\frac{8d}{s_2} \right)^{0,2} \quad (6.5)$$

α on voiman ja ruuvin akselin välinen kulma ($= 45^\circ$)

μ rst-teräksen ja puun välisen liikekitkakertoimen mitoitusarvo, kun puu on höylättyä pinnoittamatonta kuusta ja voima on puun syiden suuntainen

s_2 on ruuvin kierreosan pituus kärjen puoleisessa puussa ($= 70 \text{ mm}$)

d on ruuvin kierreosan ulkoläpimitta ($= 6,0 \text{ mm}$)

$f_{ax,\alpha,k}$ on ruuvin tartuntalujuus suuntakulmassa α puun syihin nähden

$F_{u,k}$ on ruuvin vetomurtokapasiteetin ominaisarvo ($= 5\,670 \text{ N}$).

Assy 6x140 -ruuvin vetomurtokapasiteetin ominaisarvo on laskettu ruuvin kierteisen osan sisähalkaisijan 3,8 mm ja valmistajan ilmoittaman ruuvimateriaalin vetolujuuden $f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$ mukaan. Teräksen ja höylätyn pinnoittamattoman havupuutavaran keskimääräiseksi liikekitkakertoimeksi esitetään kirjallisuudessa arvoja $\mu_m = 0,4-0,5$, kun liike on puun syiden suuntaista (mm. RIL 106). Laskelmissa liikekitkakertoimen mitoitusarvoksi on oletettu $\mu = 0,3$. Tartuntalujuudelle on käytetty ominaisarvoa

$f_{ax,45^\circ,k} = 5,1 \text{ N/mm}^2$, joka on laskettu GL32c-lujuusluokan tiheyteen korjatuista 6 mm:n yleisruuvilla tehdyistä ja CIB-W18/35-7-4:ssä esitetyistä ulosvetolujuuskokeiden tuloksista.

Vinoruuviliitoksen todellisia materiaaliominaisuuksia vastaava liitoskapasiteetti F_m laskettiin käyttämällä ruuvien vetokapasiteetille testattua keskiarvoa $F_{u,m} = 9,63 \text{ kN}$, liikekitkakertoimelle keskiarvoa $\mu_m = 0,45$ ja tartuntalujuudelle mitattuun vinoruuviliitosten puun tiheyteen $\rho_w = 394 \text{ kg/m}^3$ korjattua 6 mm:n ruuvien ulosvetolujuustestien keskiarvoa $f_{ax,45^\circ,m} = 5,64 \text{ N/mm}^2$ (Kevarinmäki 2002). Tiheyskorjaus tehtiin CIB-W18/35-7-4:ssä esitetyllä vinoruuviliitoksen tartuntalujuuden tiheysriippuvuuden $\rho^{1,5}$ mukaan.

Taulukko 6.3. EN 1995-1-1:2004:n mukaiseen suunnitteluun tarkoitettulla mitoitusmenetelmällä lasketut koeliitosten ominaiskapasiteetit F_k sekä mitatuilla koekappaleiden todellisilla materiaaliarvoilla lasketut kapasiteetit F_m . F_{max} on liitoskokeissa saatujen maksimikuormien keskiarvo.

koesarja	F_{max} (kN)	F_k (kN)	F_m (kN)	F_{max}/F_m
N -leikkausliitokset	716	411	467	1,53
D -vinoruuviliitokset	655	511	634	1,03

EN 1995-1-1:2004:n mitoitusmenetelmä osoittautui testatuille N-sarjan leikkausliitoksille selkeästi konservatiiviseksi. Esiporaamattoman naulaliitoksen laskentakaavalla määritettävä reunapuristuslujuuden arvo on todennäköisesti liian pieni itseporautuvalle ruuville. Köysivoimaefektin rajoittaminen 25 %:iin ruuvien tartuntalujuudesta on ilmeisen varovainen approksimaatio. Köysivoima johtaa myös liitososien väliseen kontaktiin, ja siitä aiheutuu liitoskapasiteettia parantavaa kitkaa. Kitkaa ei hyödynnetä Eurocode 5:n leikkausliitosten mitoitusohjeissa. Itseporautuvilla ruuveilla toteutettavien leikkausliitoksien suunnitteluohjeita tulisi kehittää niin, että niiden todellinen kapasiteetti voitaisiin hyödyntää mitoituksessa paremmin. Tässä tutkimuksessa tehtyjen kolmen liitoksen koearvojen perusteella suunnitteluohjeita ei ole kuitenkaan mahdollista muuttaa.

Vinoruuvattujen rst-holkkiliitosten koetulokset vastasivat sen sijaan erittäin hyvin CIB-W18/35-7-4:ssä esitettyä laskentamenetelmää. Jos holkin sisäpinnan ja puun välillä käytettäisiin liikekitkakertoimena kirjallisuudessa teräs-puuliitoksille esitettyä suurinta arvoa $\mu_m = 0,5$, keskiarvolujuuksilla laskettu liitoksen kapasiteetti vastaisi täsmälleen liitoskokeiden keskiarvoa 655 kN. Mitoituksessa käytettävä kitkakerroin suositellaan kuitenkin rajoitettavaksi arvoon $\mu = 0,3$, koska käytännön liitoksissa puuosan ja rst-holkin välissä voi olla rakoa, joka umpeutuu vasta puun halkeamisen tai holkin seinämän taipumisen seurauksena.

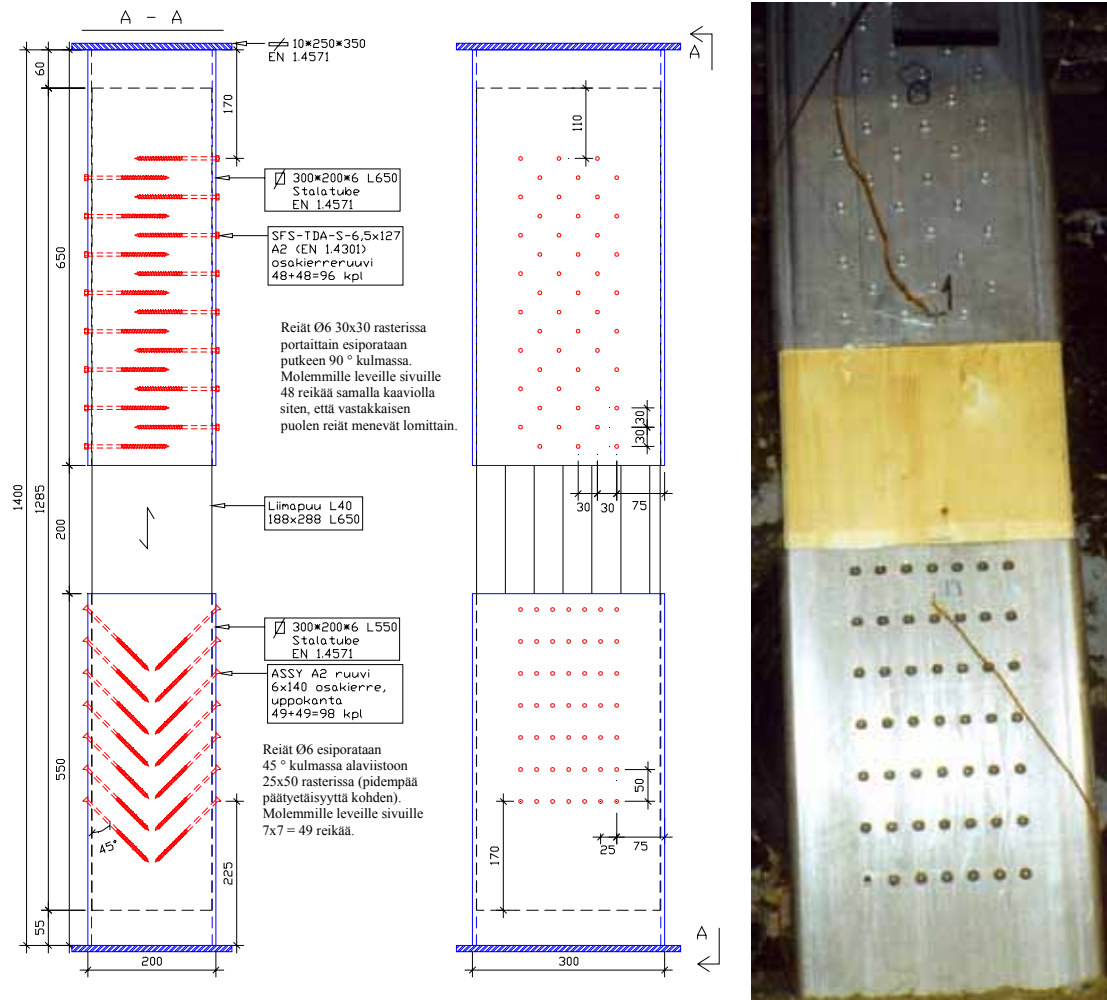
Kokeet osoittivat, että molemmissa liitostyypeissä kaikki liittimet toimivat suurissakin liitoksissa täydellä teholla eikä niille tarvitse tehdä Eurocode 5:ssä leikkauskuormitetuille naulaliitoksille tai aksiaalisesti kuormitetuille ruuviliitoksille esitettyjä lukumääräreduktioita. Eurocode 5:ssä esitetty naulaliitosten lukumääräreduktio perustuu puuosien välisten liitosten halkeiluun, ja sen soveltamisvelvollisuutta teräs-puuliitoksiin voidaan pitää yleisemminkin tulkinnanvaraisena. Eurocode 5:n aksiaalisesti kuormitetujen ruuvien lukumääräreduktio-ohjeen soveltamista vinoruuviliitoksiin ei voida pitää velvoittavana, koska Eurocode 5:ssä ei ole esitetty muutoinkaan vinoruuviliitosten mitoitusohjeita.

6.2 Palonkestävyyskoe

6.2.1 Koekappale

Palonkestävyyskokeen koekappaleosien materiaalit olivat samat kuin normaali-lämpötilakokeissa (vrt. kohta 6.1.2). Koekappale koostui liimapuupilarista, jonka molempiin päihin asennettiin rst-holkki (ks. kuva 6.10).

Puumateriaalina käytettiin liimapuuta L40. Holkit olivat seinämältään 6 mm paksuja $200 \times 300 \text{ mm}^2$ rst-putkipalkkeja EN 1.4571, joiden toinen pää suljettiin rst-levyllä $10 \times 250 \times 350 \text{ mm}^3$. Pilarin alapäässä oleva holkin ja puun välinen liitos toteutettiin vinoruuvaustekniikalla ja yläpäässä oleva liitos tavanomaisena leikkauskuormitettuna ruuviliitoksena. Vinoruuviliitoksessa käytettiin $6 \times 140 \text{ mm}$ kokoisia rst-yleisruuveja ja leikkausliittiminä käytettiin kuusiokantaisia $6,5 \times 127 \text{ mm}$ kokoisia osakierteisiä rst-ruuveja. Molemmissa liitoksissa oli yhteensä 96 ruuvia (kaksi vinoruuviliitoksen ruuvia katkesi asennettaessa, ja ko. reiät jätettiin tyhjiksi). Koekappaleen mittapiirustus on esitetty liitteessä D.1. Liimapuun säilytys tasapainokosteuden saavuttamiseen asti. Mitalistaminen ja valmiiksi työstettyjen holkkien ruuvaus liimapuuhun tehtiin VTT:ssä.



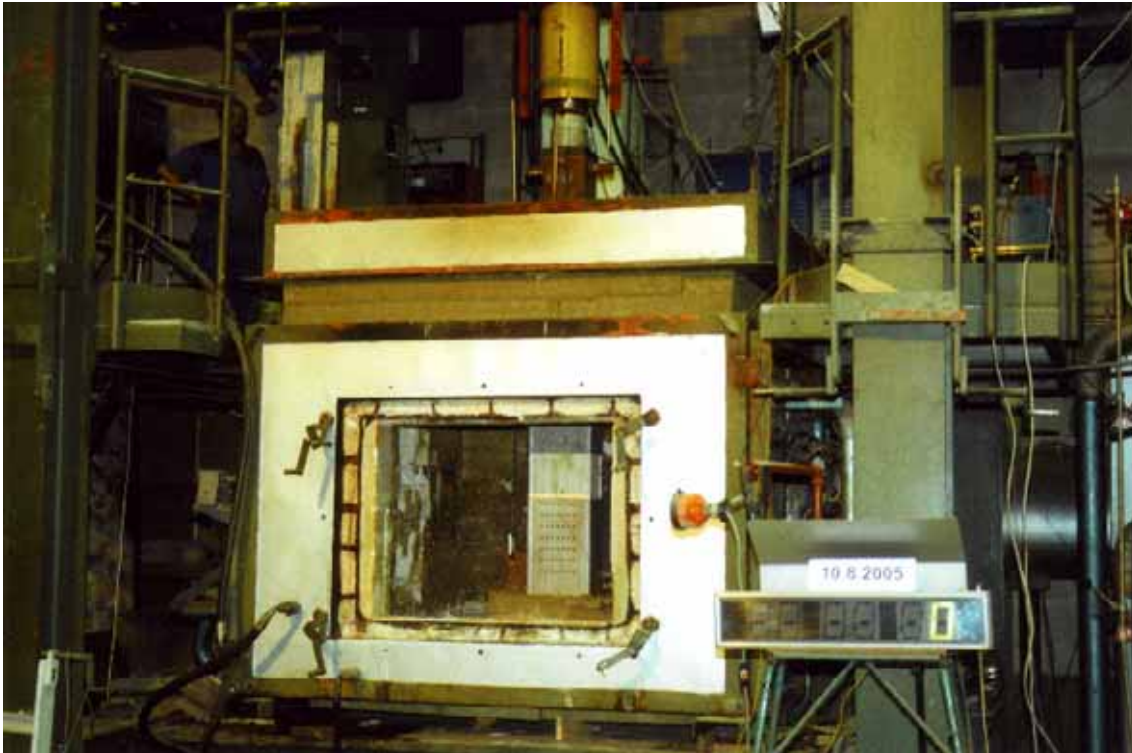
Kuva 6.10. Holkkiliitoskoekappale.

6.2.2 Koe

Koe tehtiin 10.8.2005 ns. K-uunissa soveltaen standardia SFS-EN-1365-3:1999. Koejärjestelyt on esitetty liitteessä D.2 ja kuvassa 6.11. Koekappaletta kuormitettiin kokeen aikana pilarin yläpäästä 130 kN vakiovoimalla. Alkukuormitus tehtiin kahteen kertaan, jolloin liitosten yhteenlaskettu siirtymä oli alle 2 mm.

Normaalilämpötilan kokeilla varmistettiin, että ruuvatut rst-holkkiliitokset voidaan mitoittaa standardissa EN 1995-1-1:2004 esitetyillä suunnitteluohjeilla. Palonkestävyyskokeessa käytetty kuormitusaste määritettiin siten, että palotilanne ei muodostuisi mitoittavaksi tekijäksi kattokannattimien liitoksissa, kun kattorakenteiden omapaino $g_k = 0,6 \text{ kN/m}^2$ ja lumikuorma katolla $q_k = 2,0 \text{ kN/m}^2$. Näillä kuormituksilla normaalilämpötilan ja palotilanteen mitoitus tulivat tasapainoon, kun liitoksen kestävyys palotilanteessa on 38 % EN 1995:n mukaan lasketusta keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista. Vinoruuviliitoksen mitoituskapasiteetin perusteella saatiin siis koekuor-

maksi $0,38 \cdot 343 \text{ kN} = 130 \text{ kN}$, joka koejärjestelyjen vuoksi oli myös leikkausruuviliitoksen koekuorma ja vastasi 43 %:n kuormitusastetta normaalilämpötilan mitoituskapasiteetista. 130 kN koekuormalla kuormitusaste vinoruuvatulla liitoksella on 20 % ($130 \text{ kN} / 655 \text{ kN} = 0,20$) ja leikkauskuormitetuilla ruuveilla kootulla liitoksella 18 % ($130 \text{ kN} / 716 \text{ kN} = 0,18$) normaalilämpötilan murtokuormasta. Kuormituslaskelma on esitetty liitteessä D.2.2.



Kuva 6.11. Polttokokeen koejärjestely.

Uunin lämpötilaa ohjattiin neljän plattatermoelementin avulla, jotka oli sijoitettu pilarin eri puolille kaksi kummankin holkin sivuille (ks. kuva 6.12). Lämpötilan nousunopeus oli standardin SFS-EN 1363-1:1999 mukainen. Kokeen aikana mitattiin koekappaleen lämpötiloja holkkien ulkopinnasta holkin ja puun välistä sekä puusta holkkien sisältä eri syvyyksiltä. Mittauspisteiden paikat on esitetty liitteen D.3 kuvissa D.3–D.4. Kokonaispuristuma mitattiin pilarin yläpäästä (sisältää molempien holkkien siirtymät ja lämpölaajentuman).

Koe lopetettiin ajassa 37 min 40 s, kun kumpikaan liitos ei enää kantanut kuormaa.



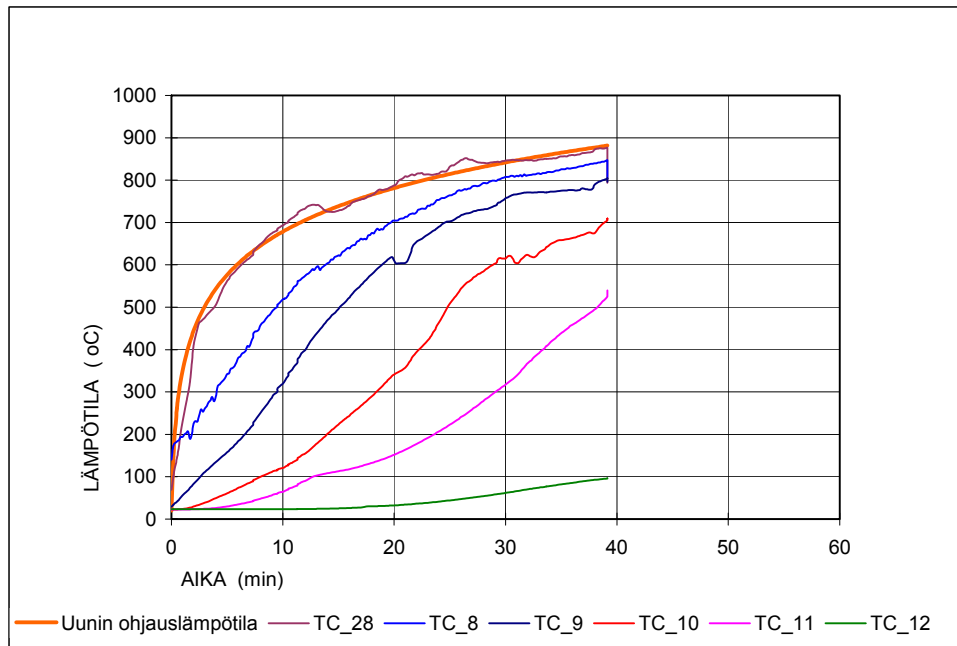
Kuva 6.12. Koekappale uunissa kokeen alkaessa.

6.2.3 Koetulokset

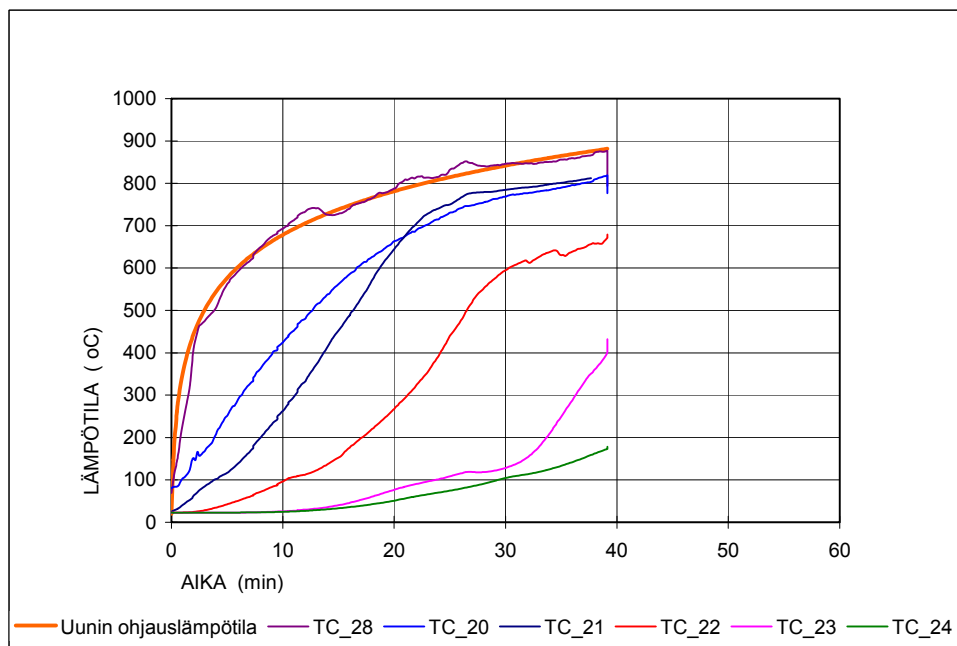
Kokeessa mitatut lämpötilat, paine-ero uunin ja koehallin välillä ja siirtymät sekä kokeen aikana tehdyt havainnot ja otetut valokuvat on esitetty liitteissä D.4–D.7. Koehallin lämpötila kokeen alussa oli 22 °C. Suoraruuvausliitos menetti kantavuutensa 29 min ja vinoruuvaus 37 min kuluttua kokeen aloittamisesta.

Kuvassa 6.13 on esitetty uunin (tc28) ja teräsholkin ulkopinnan (tc8) mitatut lämpötilat, teräksen ja puun välistä mitattu (tc9) sekä puun sisältä mitattuja lämpötiloja (tc10–tc12) suoraruuvatussa liitoksessa. Lämpötilojen mittauspiste tc10 oli 12 mm etäisyydellä puupinnasta, tc11 24 mm ja tc12 36 mm etäisyydellä. Kuvassa 6.14 on esitetty vastaavat mittaukset vinoruuvatusta liitoksessa. Uunin lämpötilamittaus on tehty alhaalta samalta sivulta kuin teräksen ja puun mittaukset. Uunin eri osista mitatuissa lämpötiloissa oli jonkin verran eroja, jotka näkyvät myös teräksen lämpötiloissa.

Mittausten perusteella teräsholkin lämpötila nousi 400 °C:seen noin kahdeksassa minuutissa. 30 minuutin kohdalla holkin lämpötila oli noussut 800–900 °C:seen ja kokeen lopussa lämpötilat olivat 850–950 °C. Mittausten perusteella puu alkoi hiiltäytyä holkin sisällä noin 10 min kuluttua kokeen alkamisesta (hiiltymisen alkamislämpötila 300 °C). Puun sisältä eri syvyyksiltä mitatuissa lämpötiloissa on eroja.

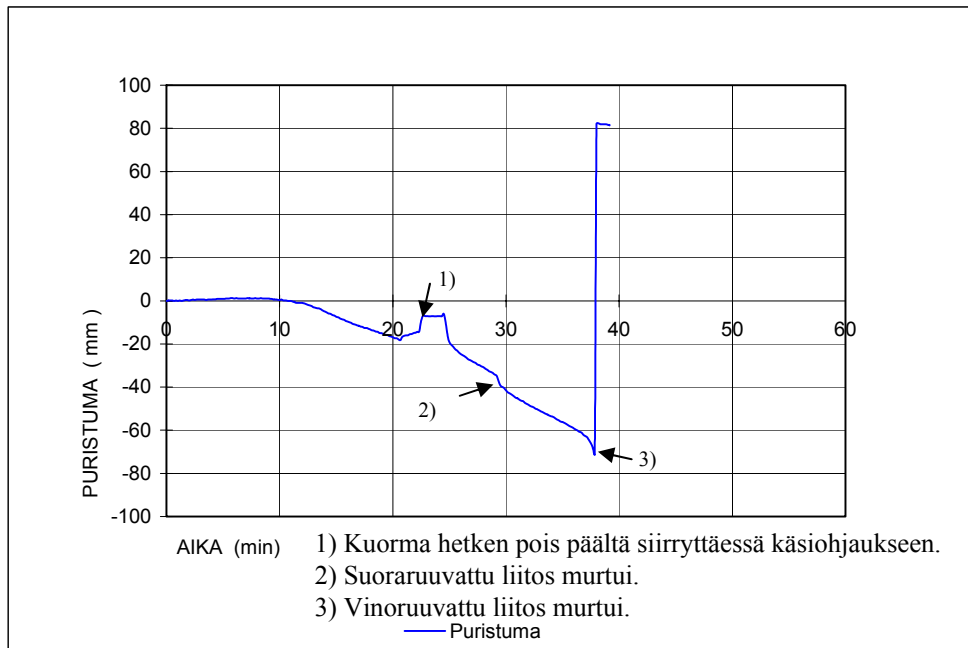


Kuva 6.13. Uunin sekä suoraruuvatun holkkiliitoksen teräksen ja puun lämpötilat.



Kuva 6.14. Uunin sekä vinoruuvatun holkkiliitoksen teräksen ja puun lämpötilat.

Kuvaan 6.15 on piirretty pilarin kokonaispuristuma ajan funktiona. Kymmenen ensimmäisen minuutin aikana koekappale laajeni hiukan, mutta sen jälkeen puristuma alkoi kasvaa ollen muutaman minuutin ajan noin 1 mm/min ja sitten 2 mm/min aina 20 min:iin asti, jolloin siirryttiin kuormituksen käsiohjaukseen. Tämän jälkeen puristumanopeus oli 3 mm/min aina leikkauskuormitetun ruuviliitoksen murtoon asti. Murron jälkeen puristumanopeus palautui jälleen 3 mm/min:iin aina vinoruuvauksen murtoon asti.



Kuva 6.15. Holkkiliitosten kokonaispuristuma.

6.2.4 Koetulosten analysointi

Holkit olivat seinämältäään 6 mm paksuja 200 x 300 mm² rst-putkipalkkeja EN 1.4571, jotka vinoruuviliitoksessa oli kiinnitetty 6 x 140 mm kokoisilla rst-yleisruuveilla ja leikkauskuormitetussa ruuviliitoksessa kuusiokantaisilla 6,5 x 127 mm kokoisilla osakierteisillä rst-ruuveilla. Kuormitusaste polttokokeessa oli 20 % vinoruuviliitoksessa ja 18 % leikkauskuormitetussa ruuviliitoksessa normaalilämpötilassa testattujen liitosten murtokuormien keskiarvosta.

Vinoruuviliitoksen murto tapahtui yhtäkkiä liitoksen saavutettua palonkestävyytensä. Leikkauskuormitetun ruuviliitoksen murtotapa oli sitkeämpi. Molemmista liitoksista katkesi ruuveja liitoksen murruttua (ks. kuva 6.16).

Vinoruuvattun liitoksen teräsosien lämpötilat kohosivat 850 °C–950 °C:seen, jolloin teräslaadultaan A2 olevien ASSY-ruuvien normaalilämpötilan vetomurtokapasiteetista on jäljellä 11–20 %. Normaalilämpötilassa suoritetun ruuvin vetolujuustestin perusteella laskettu sileän varren keskimääräinen normaalilämpötilan vetokapasiteetti on noin 12 250 N, jolloin ruuvien jäännösvetokapasiteetti on 1 348–2 450 N murtohetkellä. Ruuvien ollessa vedettyjä ruuvin kuormaksi polttokokeessa tulee laskemalla 1 876 N, eli arvo osuu lämpötilamittausten perusteella määritetyille välille.



Kuva 6.16. Holkkiliitokset palonkestävyysskoheen jälkeen.

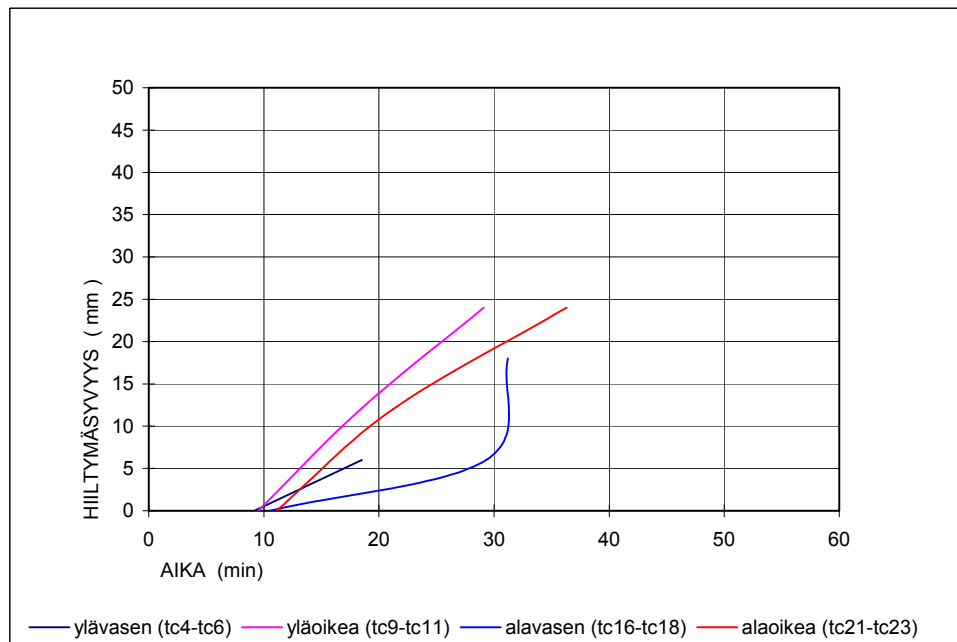
Puikkoliitosteorian pohjalta johdetut Eurocode 5:n mukaiset suojaamattoman rst-levyllisen raollisen liitoksen mitoitusyhtälöt (Kevarinmäki ym. 2005) antavat leikkauskuormitetun ruuviliitoksen laskentakapasiteetiksi 29 minuutin palon jälkeen (lämpötila 800–900 °C) $F_{v,Rd,fi} = 123$ kN, kun laskennassa käytetään liimapuun GL32c ominaistihyettä $\rho_k = 410$ kg/m³ ja TDA-S-ruuvien kierreosalle ($d_{ef} = 4,95$ mm) testattua myötömomentin ominaisarvoa $M_{y,k} = 18\,200$ Nmm. Testattua myötömomentin arvoa kannattaa käyttää, mikäli se on tiedossa, koska laskettaessa Eurocode 5:n kaavalla $M_{y,k} = 0,3f_{u,k}d^{2,6} = 13\,434$ Nmm, kun $f_{u,k} = 700$ N/mm². Tätä arvoa käytettäessä ruuviliitoksen laskentakapasiteetiksi 29 minuutin palon jälkeen saataisiin 94 kN.

Käytettäessä laskennassa mitattuja materiaaliominaisuuksien keskiarvoja leikkausliitoksen 29 min palonkestoaikaa vastaavaksi kapasiteetiksi saadaan $F_m = 135$ kN. Tällöin on käytetty ruuvien kierreosalle ($d_{ef} = 4,95$ mm) testattua myötömomentin keskiarvoa

$M_{y,m} = 20\,142\text{ Nmm}$ ja reunapuristus- ja tartuntalujuuksien laskennassa mitattua keskimääräistä puun tiheyttä $\rho_m = 394\text{ kg/m}^3$.

Kuvassa 6.17 on esitetty puun sisältä tehtyjen lämpötilamittausten perusteella lasketut hiiltymäsyvyydet ajan funktiona. Puu alkoi hiiltymä noin 10 min kuluttua kokeen alusta, mutta hiiltymä oli tämän jälkeen nopeampaa kuin tapauksessa, jolloin teräslevyä ei olisi ollut puun pinnalla. Noin 20 min kuluttua hiiltymä oli edennyt 10–15 mm syvyydelle ja 30 min kuluttua noin 20–25 mm syvyydelle. Nämä hiiltymäsyvyydet vastaavat siis samoja arvoja kuin vastaavina aikoina saataisiin suojaamattoman puun hiiltymäsyvyydeksi käytettäessä standardin EN 1995-1-2:2004 mukaisia hiiltymänopeuden arvoja.

Holkkiliitoksen palonkestävyyskoe osoitti, että puun hiiltymä holkin alla on käytännössä yhtä nopeaa kuin suojaamattoman puun hiiltymä ja että holkkiliitoksen palotilanteen kapasiteetti voidaan arvioida suojaamattomille rst-levyllisille liitoksille johdetulla mitoitusmenetelmällä, joka on esitetty lähteessä Kevarinmäki ym. (2005). Vinoruuvattulla liitoksella saavutetaan leikkauskuormitettua ruuviliitosta parempi palonkestävyys. R60-palonkestävyysluokan vinoruuvattu holkkiliitos edellyttäisi kuitenkin huomattavaa ruuviliitoksen ylimitoitusta normaalilämpötilassa ja titaanistabiloidusta rst-laadusta valmistettuja erikoisruuveja.

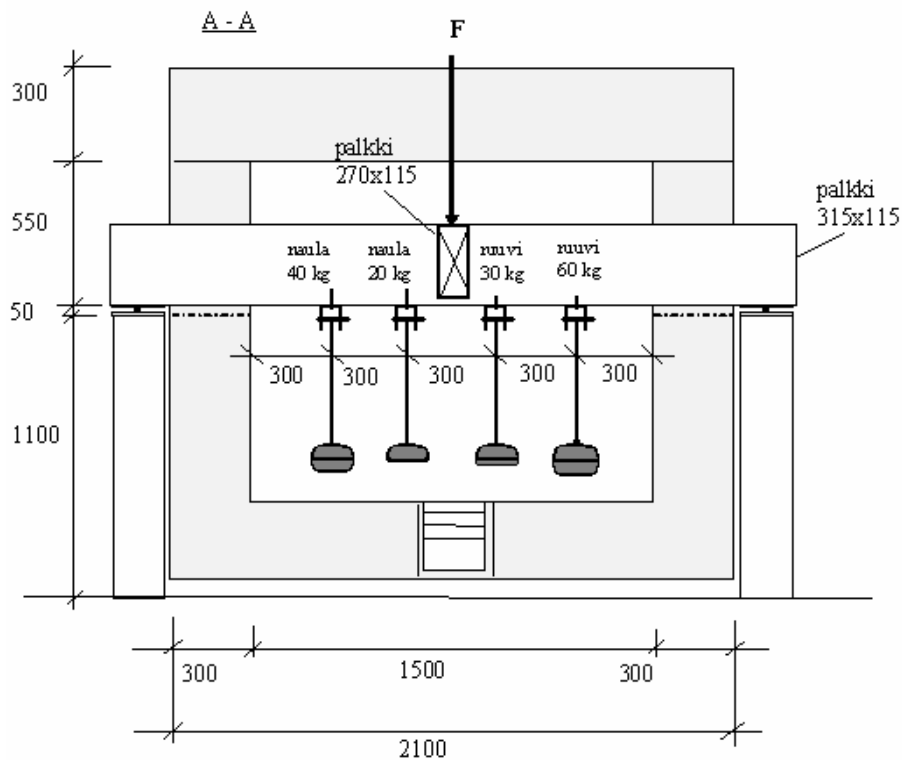


Kuva 6.17. Hiiltymäsyvyys ajan funktiona.

7. Naulojen ja ruuvien tartunta korkeissa lämpötiloissa

Naulojen ja ruuvien tartuntaa korkeissa lämpötiloissa tutkittiin palkkikenkäliitosten palonkestävyyskokeen 2 yhteydessä (16.3.2005). Koejärjestely on esitetty kuvassa 7.1. Tutkittavat liittimet olivat kartiokantainen kampanaula, ns. ankkurinaula (60x4,0 AISI 316 (EN 1.4401) (ks. kuva 7.2) ja kupukantainen ruuvi (Spax-S 4,0x50 A4, EN 1.4401). Naulan kampaosan pituus on 50 mm. Taulukossa 7.1 on esitetty ruuvin mitat. Palkkikenkäliitoksen pääpalkkiin kiinnitettiin tutkittavalla liittimellä 2 mm paksusta ja 100 mm leveästä rst-levystä (EN 1.4571) valmistettu U-kiinnike. Kiinnikkeeseen ripustettiin kutakin kuormitusastetta vastaava paino. Palkki oli lujuusluokan L40 (GL32c) liima-puuta, jota oli säilytetty ilmastointihuoneessa, jonka lämpötila on 23 °C ja suhteellinen kosteus 50 % RH.

Naulojen kuormina oli 40 kg ja 20 kg, ja ruuvien kuormina oli 60 kg ja 30 kg, mitkä vastaavat noin 40 %:n ja 20 %:n kuormitusastetta lyhytaikaisesta mitoituskuormasta. Kuormalaskelmassa käytetyt lähtötiedot ja tulos on esitetty taulukossa 7.2. Naulan ulosvetolujuuden arvona on käytetty VTT:n lausunnon RTE 2560/04 (VTT 2004b) mukaista arvoa, ja ruuville koetuloksiin (Yli-Koski 2004) perustuvaa ominaisarvoa. Osavarmuus-kertoimena on käytetty NA-ehdotuksen mukaan $\gamma_m = 1,2$.



Kuva 7.1. Naulojen ja ruuvien tartunnan palonkestävyyskokeen koejärjestely palkkikenkäkokeen yhteydessä.



Kuva 7.2. Naula 60x4,0 (vas.) ja ruuvi 4,0x50 (oik.).

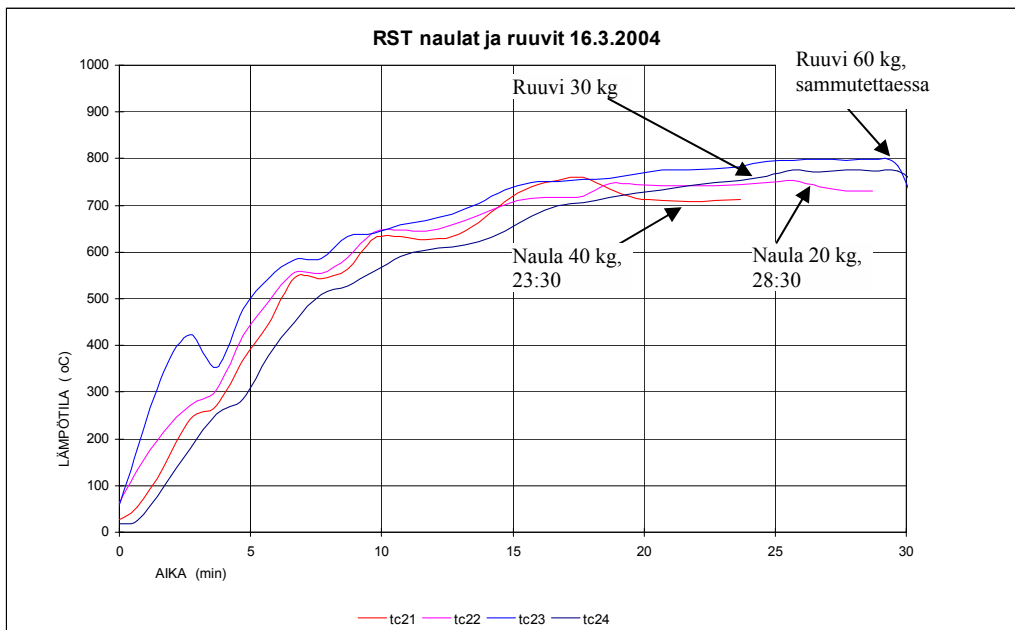
Taulukko 7.1. Ruuvien (SPAX-S) 4,0x50 mitatut mitat (mm).

Liitin	d_{varsi}	$d_{\text{sisä}}$	d_{ulko}	kierreosa, l_g	kierteen nousu, p	kanna halkaisija, d_k
Spax-s 4,0x50	3,03	2,69	4,05	47	2,0	8,0

Kuvassa 7.3 on esitetty naulojen ja ruuvien kantojen lämpeneminen ajan funktiona sekä aika, jolloin tartunta pettää. Liitteen A.7. kuvissa A.49–A.52 on valokuvia ennen ja jälkeen kokeen sekä palon aikana. Puu hiiltäytyi naulan ympäriltä noin 7 mm syvemmälle kuin ympäristössä. Ruuvilla vastaava arvo oli noin 5 mm. Ruuvi, jonka kuormitus oli 30 kg, pysyi paikoillaan loppuun saakka. Laskennallisesti tartuntapituus hiiltymättömässä puussa riittäisi kantamaan ko. kuormat 30 min ajan kaikissa tapauksissa. Liittimet johtavat lämpöä syvemmälle puuhun, jolloin puun lujuusominaisuudet heikkenevät ja lisäksi puu alkaa hiiltäytyä lämpötilan kohotessa yli 300 °C:n.

Taulukko 7.2. Testauskuormat naulalle ja ruuville.

Liitin	Tartuntapituus l_p (mm)	Ulosvetolujuus $f_{ax,k}$ (N/mm ²)	Mitoituskapasiteetti $F_{ax,d}$ (N)	Testauskuormat	
				n. %	N
naula 60x4,0	50	6,7	1005	40	393
				20	197
ruuvi 4,0x50	47 $l_{\text{eff}} = l_p - d = 42,95$	12,4	1618	37	590
				18	296



Kuva 7.3. Rst-naulojen (tc21 ja tc22) ja -ruuvien (tc23 ja tc24) kantojen lämpötilat ja tartuntamurtoja vastaavat palonkestoajat.

8. Liitoksen lämpötilanlaskenta

8.1 Laskentamenetelmät

Elementtimenetelmään perustuvan laskentamenetelmän avulla voidaan laskea lämmön siirtyminen 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. Seuraavassa on esitetty laskennassa käytetyt lämmönsiirtymistä kuvaavat yhtälöt. Konvektiolla rakenteeseen siirtyvä lämpövuoto pinta-alayksikköä kohden määritetään seuraavan yhtälön avulla:

$$q'' = h \cdot (T_g - T_s) \quad [\text{W/m}^2] \quad (8.1)$$

missä h on konvektion lämmönsiirtokerroin [$\text{W/m}^2\text{K}$]
 T_g on kaasun lämpötila [K]
 T_s on pinnan lämpötila [K].

Säteilyn aiheuttama lämpövuoto pinta-alayksikköä kohden on

$$q'' = \varepsilon \sigma (T_g^4 - T_s^4) \quad [\text{W/m}^2] \quad (8.2)$$

missä ε on resuloiva emissiokerroin [-]
 σ on Stefan-Bolzmännin vakio [$\text{W/m}^2\text{K}^4$]
 T_g on kaasun lämpötila [K]
 T_s on pinnan lämpötila [K].

Kokonaislämpövuoto rakenteen pinnalle tai pinnalta pois lasketaan konvektion ja säteilyn summana, eli yhdistämällä yhtälöt (8.1) ja (8.2).

Lämmön siirtyminen materiaalissa tapahtuu johtumalla, jolloin siirtyvän lämpövuon suuruus stationääritilassa pinta-alayksikköä kohden on

$$q'' = k \frac{\Delta T}{L} \quad [\text{W/m}^2] \quad (8.3)$$

missä k on lämmönjohtavuus [W/mK]
 ΔT on pintojen välinen lämpötilaero [K]
 L on rakenteen paksuus [m].

Lämmönjohtavuuden k lisäksi lämpötilajakaumaan materiaalissa vaikuttavat myös materiaalin muut termiset ominaisuudet. Tällaisia ominaisuuksia ovat tiheys ρ ja ominaislämpökapasiteetti c . Tulo $c \cdot \rho$ kuvaa materiaalin kykyä varastoida lämpöenergiaa.

Materiaalin yksidimensionaalinen lämpötilanjohtavuus ($k / (c \cdot \rho)$) voidaan määrittää seuraavan yhtälön avulla (Incropera & DeWitt 2002):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c \cdot \rho} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (8.4)$$

missä T on lämpötila
 t on aika
 k on lämmönjohtavuus [W/mK]
 c on ominaislämpökapasiteetti [K]
 ρ on tiheys [m³].

Kaksidimensionaalisessa lämmönsiirtomallissa lämpötilanjohtavuus määritetään seuraavasti:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{c \cdot \rho} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] \quad (8.5)$$

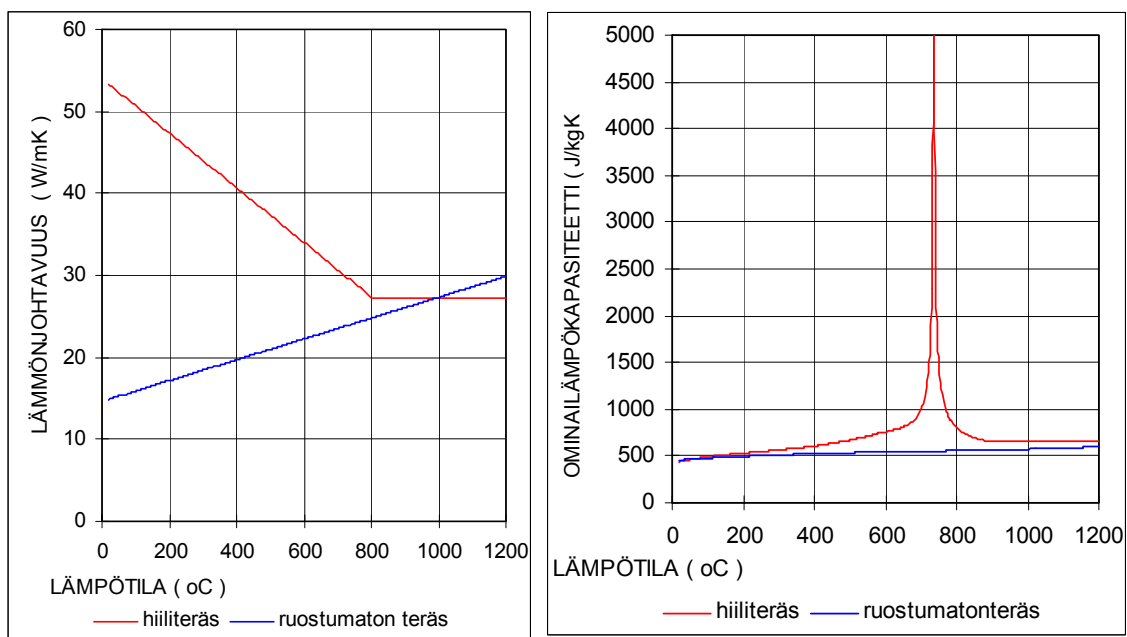
Laskentaan käytettiin tässä tutkimuksessa elementtimenetelmään perustuvaa ohjelmaa FEMLAB[®] 3.1 (FEMLAB[®] 3.1 User's Guide 2004) ja siihen kytkettävää Heat Transfer Modulea, jonka avulla voidaan ratkaista kaikkien peruslämmönsiirtomekanismien (johduminen, konvektio, säteily) mukaisia tapauksia. Mallien geometria tehtiin kaksiulotteisena tulosten havainnollisuuden parantamiseksi, vaikka käytännössä yksidimensionoinen analyysi olisi riittänyt. Mallien suhteellisen yksinkertaisuuden ja pienen koon vuoksi laskenta-ajat pysyivät lyhyinä, vaikka dimensioiden määrän kasvattaminen luonnollisesti kasvattaa vapausasteiden määrää.

8.2 Materiaaliominaisuudet

8.2.1 Ruostumattoman teräksen termiset ominaisuudet

Austeniittisten ja austeniittis-ferriittisten terästen (seuraavassa ruostumattomat teräkset) lämmönjohtavuus on pienempi ja lämpölaajenemiskerroin suurempi kuin ferriittisillä ja martensiittisillä teräksillä (seuraavassa hiiliteräs). Kuvassa 8.1 on vertailtu ruostumat-

toman ja hiiliteräksen lämmönjohtavuutta ja ominaislämpökapasiteettia korkeissa lämpötiloissa EN 1993-1-2:2003:n mukaan. Hiiliteräksen lämmönjohtavuus (52 W/mK) on huomattavasti korkeampi normaalilämpötilassa kuin ruostumattoman teräksen (15 W/mK), mutta ero pienenee korkeammissa lämpötiloissa, ja 1 000 °C:ssa lämmönjohtavuudet ovat yhtä suuret. Hiiliteräksen ja ruostumattoman teräksen ominaislämpökapasiteetit ovat samaa suuruusluokkaa sekä normaalilämpötiloissa että korkeissa lämpötiloissa, mutta noin 750 °C:ssa hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetti nousee hetkellisesti noin kymmenkertaiseksi. Taulukossa 8.1 esitetään joidenkin hehkutettujen ruostumattomien terästen fysikaalisia ominaisuuksia. Hiiliteräksen lämpölaajenemiskerroin ($12 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) on alhaisempi kuin ruostumattomien terästen.



Kuva 8.1. Terästen lämmönjohtavuus ja ominaislämpökapasiteetti lämpötilan funktiona.

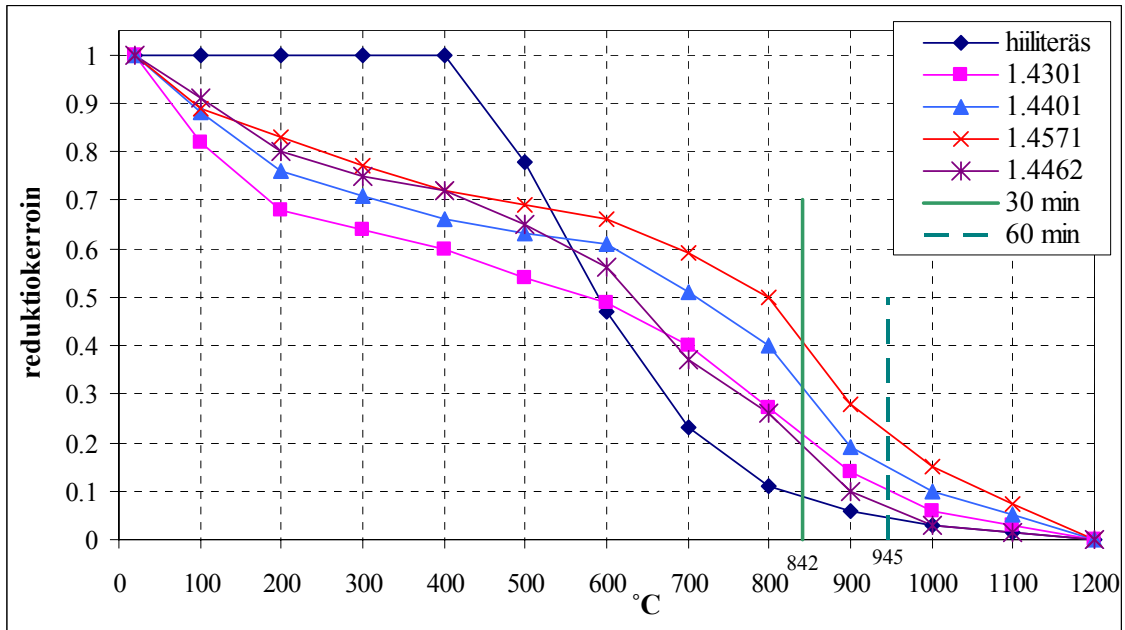
Taulukko 8.1. Fysikaalisia ominaisuuksia (EN 10088-1).

Teräksen merkintä EN 10088-1 mukaan		Tiheys kg/m ³	Lämpölaajenemiskerroin (x 10 ⁻⁶ /K)		Lämmön- johtavuus W/m °C
Nimi	Numero		20 °C–200 °C	20 °C–400 °C	
X2CrNi18-7	1.4318	7,9	16,5	17,5	15
X2CrNi18-9	1.4307		16,5	18	
X5CrNi18-10	1.4301		16,5	17,5	
X6CrNiTi18-10	1.4541		16,5	17,5	
X2CrNiMo17-12-2	1.4404	8,0	16,5	17,5	15
X5CrNiMo17-12-2	1.4401		16,5	17,5	15
X6CrNiMoTi17-12-2	1.4571		17,5	18,5	15
X2CrNiMo17-12-3	1.4432		16,5	17,5	15
X3CrNiMo17-13-3	1.4436		16,5	17,5	15
X2CrNiMoN17-13-5	1.4439		16,5	17,5	14
X1NiCrMoCuN25-20-7	1.4529	8,1	16,1	16,9	12
X2CrNiMoN22-5-3	1.4462	7,8	13,5	14,0	15

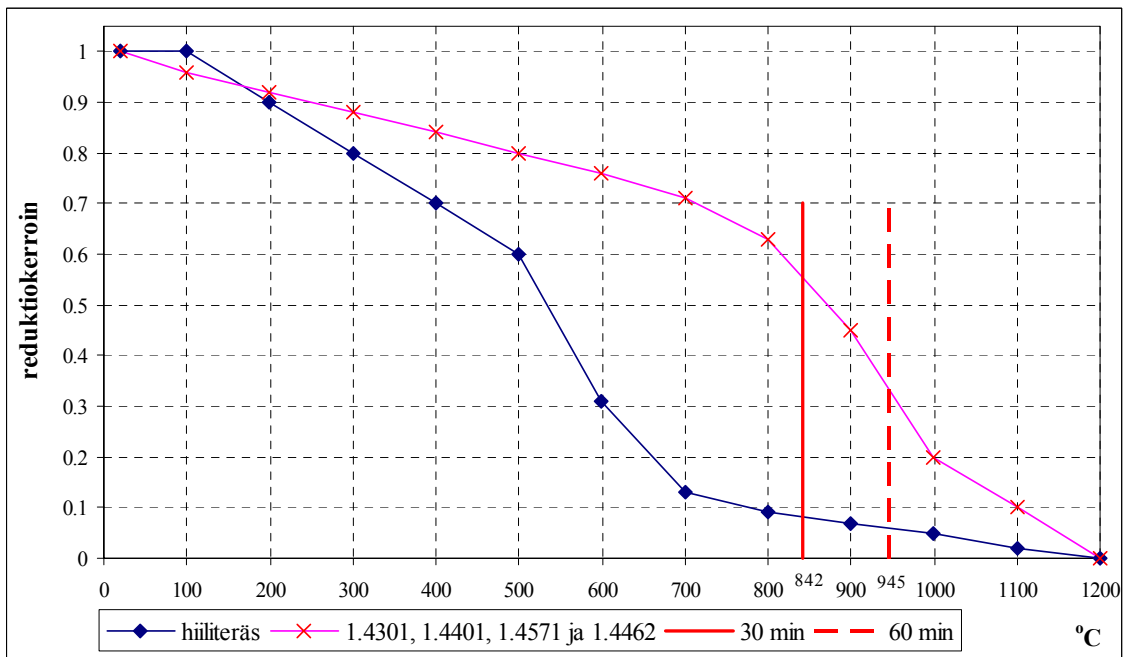
8.2.2 Ruostumattoman teräksen mekaaniset ominaisuudet

Kuvissa 8.2 ja 8.3 esitetään ruostumattoman teräksen ja hiiliteräksen lujuus- ja kimmo-ominaisuuksien vertailu korkeissa lämpötiloissa, vaikka laskennassa ei olekaan käsitelty liitosten kapasiteetin laskentaa. Kuvassa 8.2 on verrattu myötölujuuden alenemista: ruostumattoman teräksen lujuus alkaa aleta heti lämpötilan nousun alettua, kun taas hiiliteräksen lujuus alkaa pudota vasta 400 °C:ssa, mutta lujuus alenee sitten jyrkemmin kuin ruostumattomalla teräksellä. 550 °C ja 600 °C:n välillä hiiliteräksen lujuus putoaa alle ruostumattoman teräksen lujuuden. Kuvassa 8.3 on vertailtu ruostumattoman teräksen ja hiiliteräksen kimmokertoimien muutosta korkeissa lämpötiloissa. Hiiliteräksen kimmokerroin putoaa huomattavasti nopeammin kuin ruostumattoman teräksen.

Kuviin on merkitty 30 min ja 60 min standardipalorasitusta vastaavat kaasun lämpötilat 842 °C ja 945 °C. 30 min kohdalla ruostumattoman teräksen lujuudesta on jäljellä noin 20–40 % ja hiiliteräksen 10 %, eli lujuuden puolesta palosuojaamattomat ruostumattomasta teräksestä valmistetut 30 min rakenteet ovat mahdollisia. 60 min kohdalla lujuus on pudonnut niin alhaiseksi, ettei tällaisilla rakenteilla ole käytännössä merkitystä.



Kuva 8.2. Myötölujuuden riippuvuus lämpötilasta. 30 min = kaasun lämpötila 30 min jälkeen sekä 60 min = kaasun lämpötila 60 min jälkeen. Arvot lähteistä Euro Inox & VTT (2002), teräs EN 1993-1-2:2003.



Kuva 8.3. Kimmokertoimen riippuvuus lämpötilasta. 30 min = kaasun lämpötila 30 min jälkeen sekä 60 min = kaasun lämpötila 60 min jälkeen. Arvot lähteistä Euro Inox & VTT (2002), teräs EN 1993-1-2:2003.

8.2.3 Puun termiset ominaisuudet

Puun termisistä ominaisuuksista ei kirjallisuudessa ole sellaista yksimielisyyttä kuin teräksen ominaisuuksista. Tässä tutkimuksessa puun termisinä ominaisuuksina on käytetty arvoja, jotka on saatu muuntamalla lähteessä Fredlund (1988) esitettyjä tietoja. Taulukkoon 8.2 on kerätty tiedot kuivan puun ja hiilen lämmönjohtavuusominaisuuksista eri lämpötiloissa. Taulukon viimeisessä sarakkeessa on arvot, joita on käytetty rakenteiden lämpötilan laskennassa. Lämpötilavälillä 0–300 °C lämmönjohtavuuden arvoina on käytetty kuivan puun arvoja ja tästä eteenpäin hiilen arvoja. Kosteuden vaikutus lämmönjohtavuuteen on niin pieni, että se on jätetty huomioimatta.

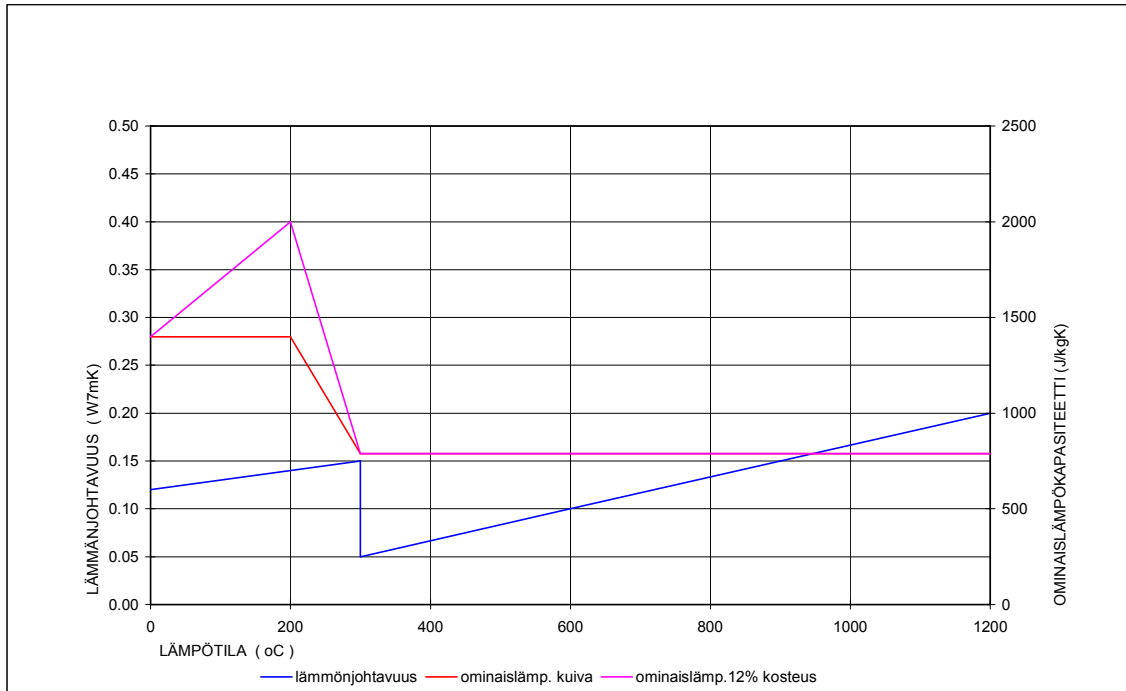
Taulukko 8.2. Puun lämmönjohtavuus.

Lämmönjohtavuus [W/mK]			
Lämpötila [°C]	Kuiva puu	Hiili	Laskennassa käytetyt arvot
0	0,12	0,05	0,12
300	0,15	0,05	0,15/0,05
600	0,18	0,1	0,1
900	0,21	0,15	0,15
1 200	0,24	0,2	0,2

Laskelmissa käytettiin puun ominaislämpökapasiteettina useampia erilaisia malleja riippuen veden määrästä sekä tavasta, jolla sen vaikutus otettiin huomioon. Taulukossa 8.3 on esitetty ominaislämpökapasiteetin arvot kuivalle puulle sekä puulle, jonka kosteus on 12 %. Puun 12 %:n kosteuden vaikutus on sisällytetty ominaislämpökapasiteetin arvoihin 0 ja 200 °C:n välillä. 300 °C lämpötilasta eteenpäin käytetään hiilen ominaislämpökapasiteetin arvoja. Laskennassa käytetyt puun lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvot on esitetty kuvassa 8.4.

Taulukko 8.3. Puun ominaislämpökapasiteetin arvoja.

Ominaislämpökapasiteetti [J/kgK]		
Lämpötila [°C]	Kuiva puu	Puu + 10 % kosteus
0	1 400	1 400
200	1 400	2 000
300	790	790
1 200	790	790



Kuva 8.4. Laskennassa käytetyt puun termiset ominaisuudet.

8.3 Laskentatulokset ja vertailu koetuloksiin

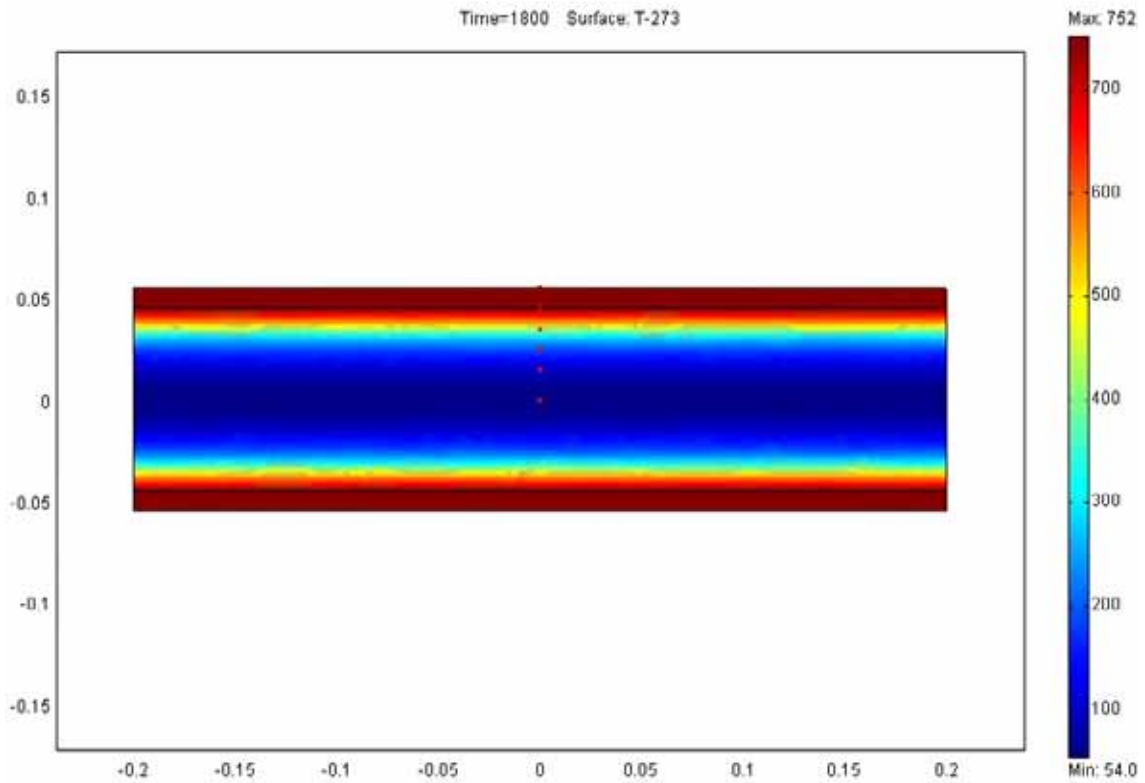
8.3.1 Teräslevyt puupalkin päällä

Aluksi laskettiin 90 mm leveän puupalkin lämpötilakenttä, kun palkin molemmilla pystysivuilla oli 10 mm paksu teräslevy. Laskenta tehtiin sekä ruostumattomalla teräslevyllä (AISI 304) että vertailun vuoksi myös hiiliteräksellä (S355) FEMLAB-ohjelmistolla. Ruostumattoman teräksen ja hiiliteräksen termiset materiaaliominaisuudet olivat standardin EN 1993-1-2:2003 mukaiset ja puun ominaisuudet taulukon 8.3 mukaiset. Lämpötilat laskettiin erikseen kuivalle puulle ja puulle, jonka kosteus on 10 %. Palorasitus oli palkin molemmilla pystysivuilla. Emissiivisyyden arvona käytettiin 0,4 ruostumattomalle teräkselle ja 0,7 hiiliteräkselle (EN 1993-1-2:2003). Konvektiokertoimen arvo oli $25 \text{ W/m}^2\text{K}$ (EN 1991-1-2:2003).

Kuvissa 8.5 ja 8.6 on esitetty lasketut lämpötilat tapaukselle, jossa puupalkin molemmin puolin on ruostumattomat teräslevyt ja puun kosteus on 10 %. Teräslevyjen ollessa hiiliterästä lämpötilat ovat samansuuruisia.

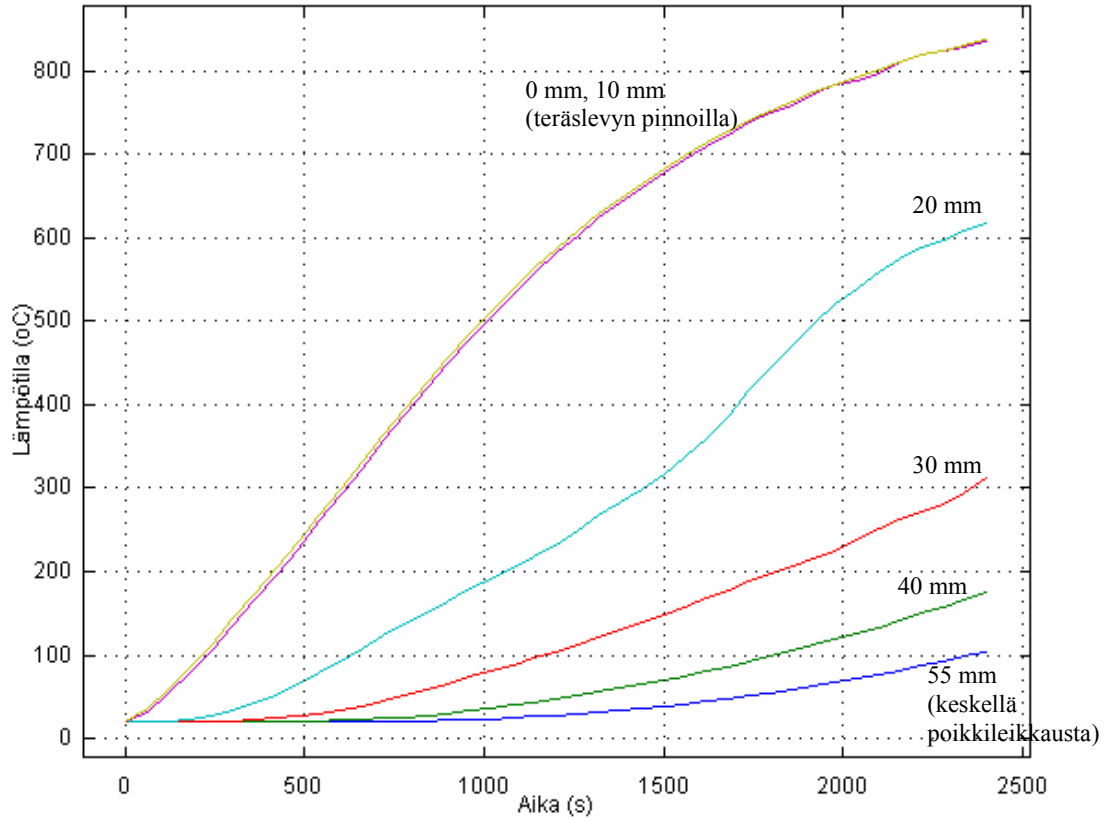
Kosteuden vaikutus näkyy vertaamalla kuvia 8.6 (kosteus 10 %) ja liitteen E.1 kuvaa E.2, joka on laskettu kuivan puun materiaalimallilla. Palkin keskellä (käyrä 55 mm) 30 min palorasituksen jälkeen lämpötila on 10 % kosteudella noin 55 °C ja kuivalla puulla noin 20 °C korkeampi eli 75 °C . Hiiltymäraja on kostealla puulla 26 mm etäisyy-

dellä pinnasta ja kuivalla puulla 28 mm etäisyydellä, eli kosteasta puusta on hiiltynyt 16 mm ja kuivasta 18 mm. Näiden laskelmien perusteella teräslevyn alla 10 % kostean puun hiiltymänopeudeksi saadaan 0,53 mm/min ja kuivalla puulla 0,60 mm/min. Kaikki laskentatulokset on esitetty liitteessä E.1.



Kuva 8.5. Puupoikkileikkauksen ja pinnassa olevien rst-levyjen lasketut lämpötilat 30 min palorasituksen jälkeen.

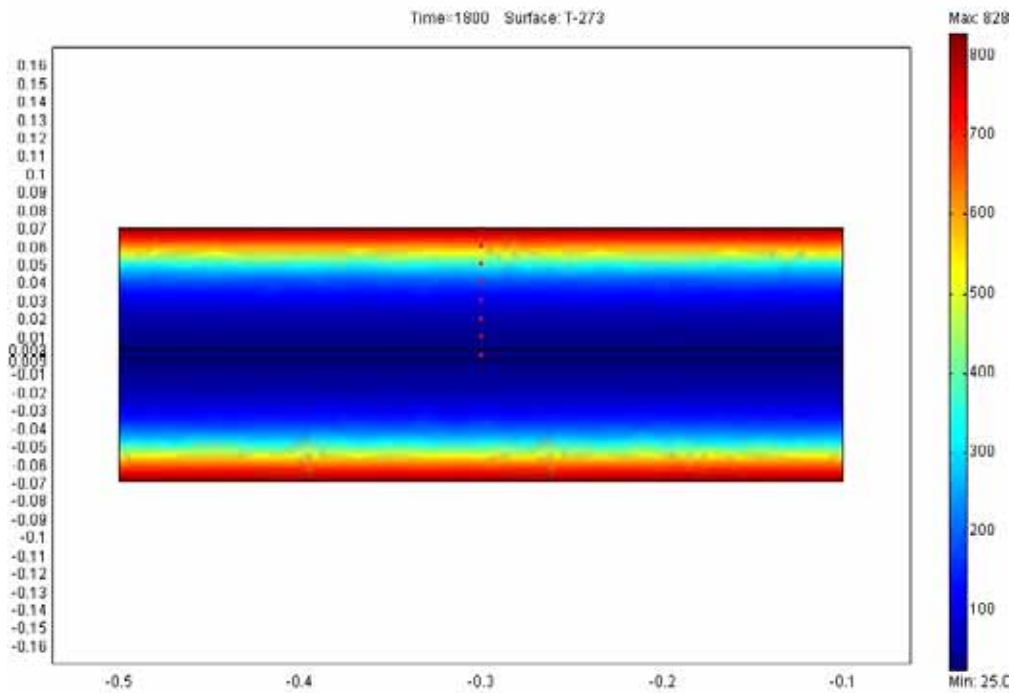
rst-puu10%-rst: lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta



Kuva 8.6. Puupalkin ja pinnassa olevien rst-levyjen eri syvyyksiltä lasketut lämpötilat (pisteet punaisella kuvassa 8.5).

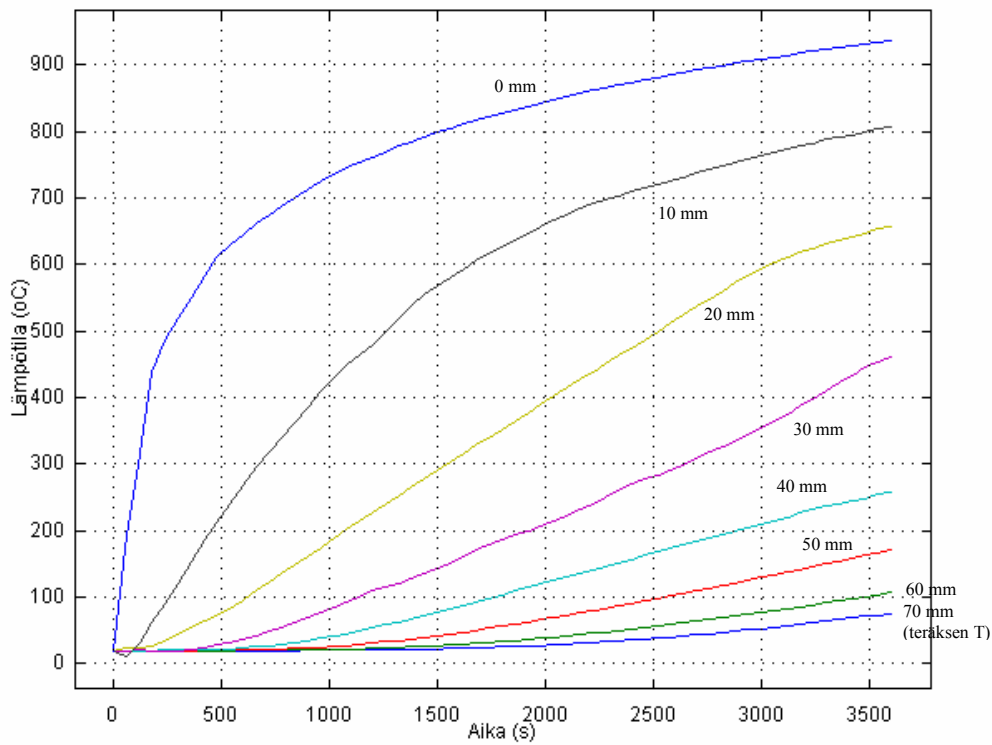
8.3.2 Teräslevy puupalkin sisällä

Toisena tapauksena laskettiin puupoikkileikkaus, jonka sisällä on 6 mm paksu teräslevy. Terästä suojaavien puuosien paksuus oli 67 mm. Laskenta tehtiin vastaavasti kuin kohdassa 8.3.1 sekä ruostumattomalla teräslevyllä että hiiliteräslevyllä. Puun emissiivisyyden arvona käytettiin 0,5:tä. Lasketut lämpötilat on esitetty kuvissa 8.7 ja 8.8. Teräslevyn lämpötila nousee 70 °C:seen 60 min:n standardipalorasituksen aikana. Kaikki lasketatulokset on esitetty liitteessä E.2.



Kuva 8.7. Puupoikkileikkauksen ja sen sisässä olevan rst-levyn lasketut lämpötilat 30 min palorasituksen jälkeen.

Lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta (eps_surface = 0.5)

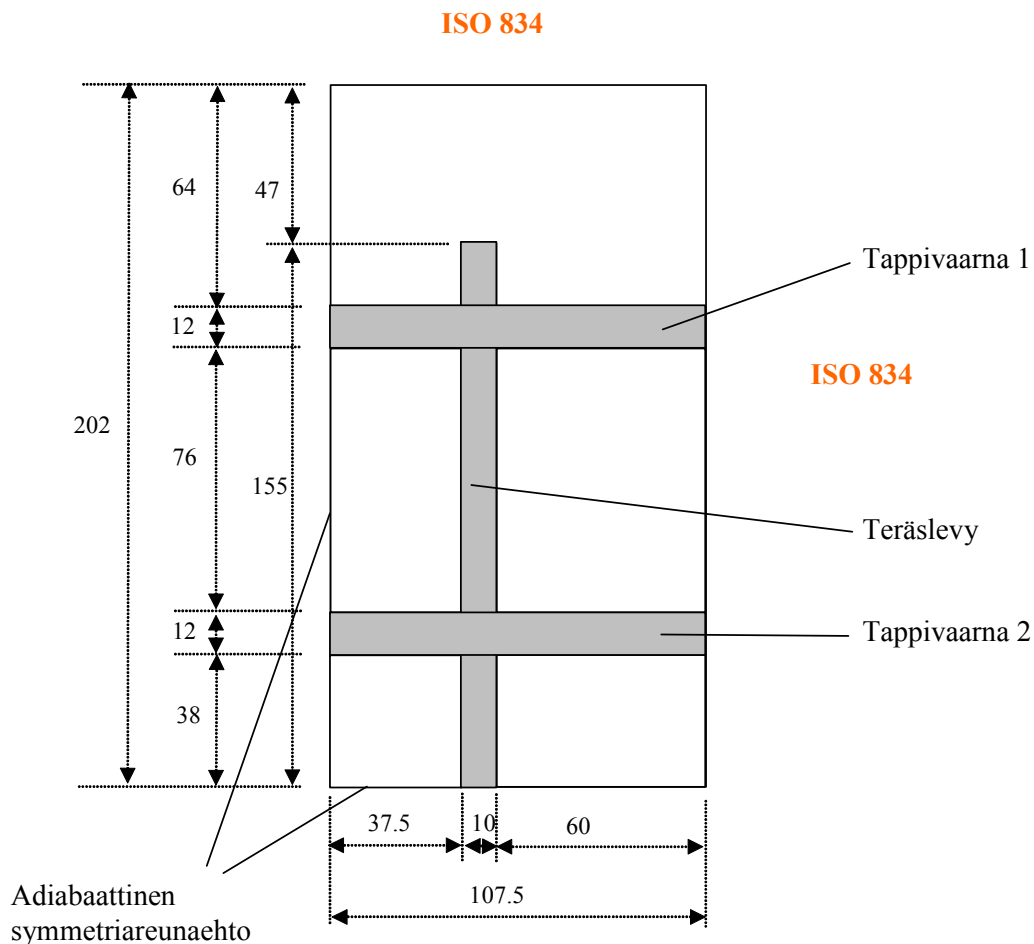


Kuva 8.8. Puupalkin ja sen sisällä olevan rst-levyn eri syvyyksiltä lasketut lämpötilat (pisteet punaisella kuvassa 8.7).

8.3.3 Tappivaarnaliitoksen mallinnus

Suojaamattoman rst-tappivaarnaliitoksen lämpötilat laskettiin ennen liitoksen palonkestävyyskoetta 20.4.2005. Liitoksen rakennepiirustus on esitetty liitteen C.1 kuvassa C.3.

Poikkileikkauksesta mallinnettiin $\frac{1}{4}$ symmetriareunaehtoja hyväksi käyttäen, ks. kuva 8.9, 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:tä ja rst-pinnan emissiivisyytenä 0,4:ää. Konvektiolämmönsiirtokerroin laskennassa oli $25 \text{ W/m}^2\text{K}$.

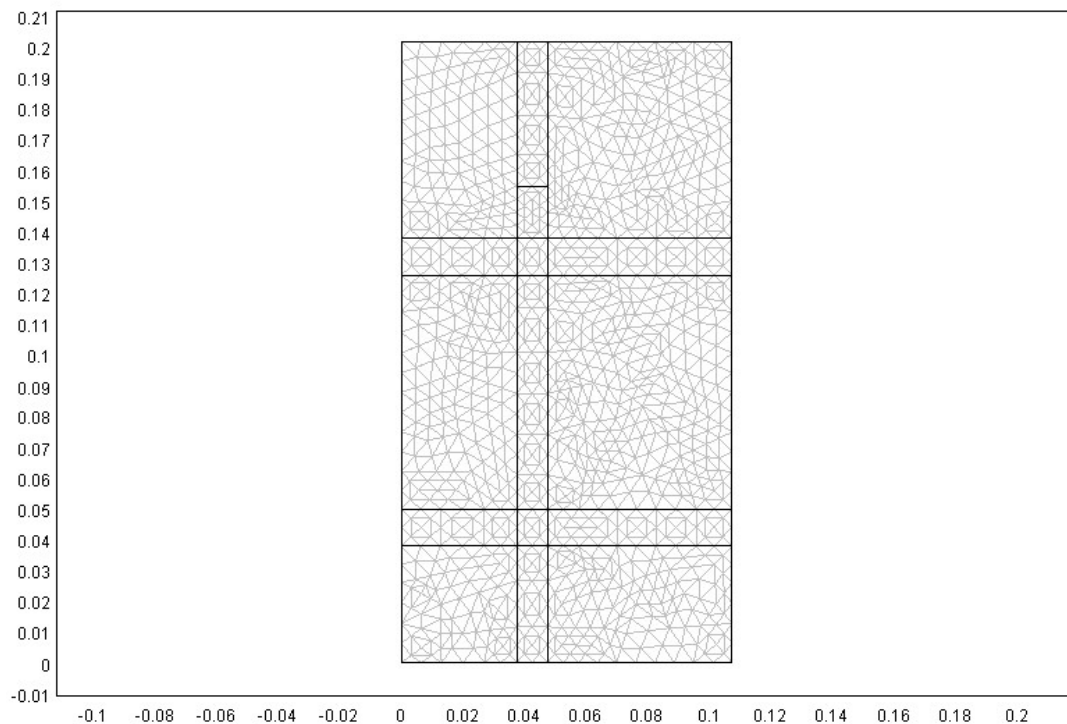


Kuva 8.9. Mallinnettu poikkileikkaus.

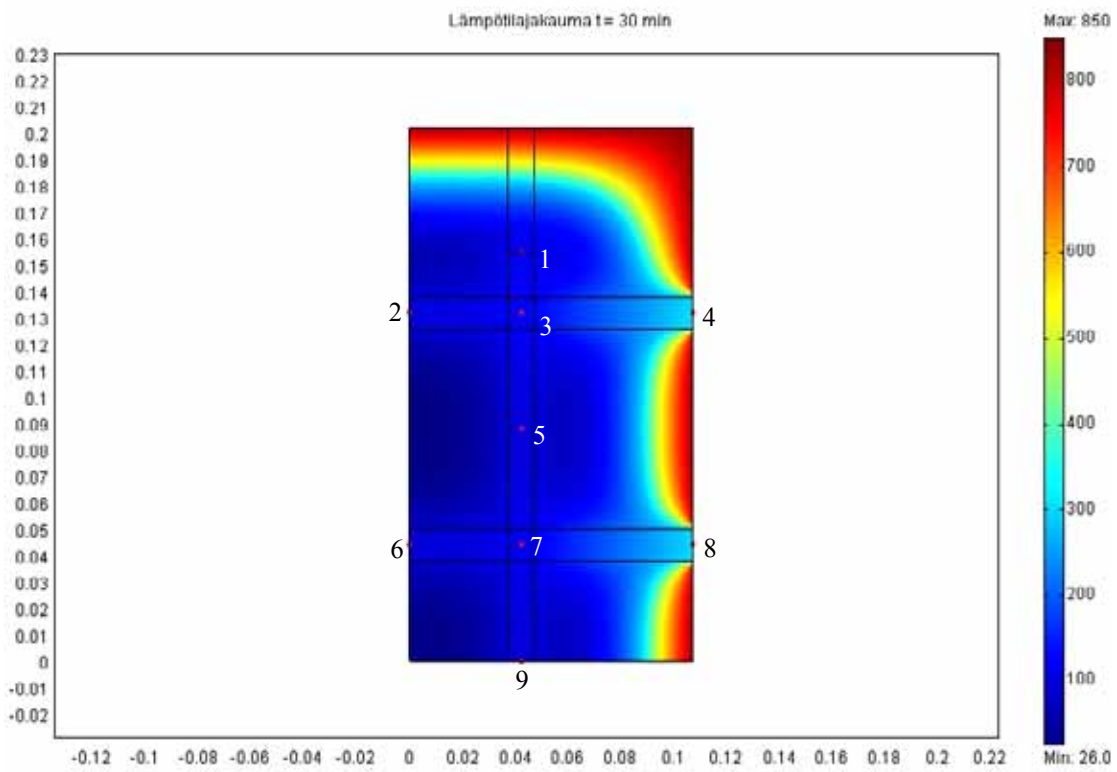
Ruostumattoman teräksen materiaaliominaisuuksina käytettiin standardin EN 1993-1-2:2003 arvoja ja puun materiaaliominaisuuksina taulukossa 8.3 annettuja 10 % kostean puun arvoja.

Kuvassa 8.10 on esitetty laskennan käyttämä elementtiverkko. Kuvissa 8.11 ja 8.12 on esitetty poikkileikkauksen lämpötilajakauma 30 min ja 60 min palorasituksen jälkeen ja kuvassa 8.13 poikkileikkauksen isotermit 60 min palorasituksen jälkeen. 300 °C:n isotermin kohdalla kulkee hiiltymäraja, eli teräslevyn yläpuolelta puu on hiiltynyt kokonaan, kuten myös pystysivuilta tappien ympäriltä. Kuvaan 8.14 on piirretty teräslevyn ja kuvaan 8.15 ja 8.16 tappien lämpötilat eri kohdissa. Teräslevyn lämpötilat vaihtelevat 250 °C ja 300 °C:n välillä 60 min:n kohdalla. Reunassa olevan tapin 1 lämpötila vaihtelee pinnan 500 °C:sta tapin keskikohdan noin 270 °C:seen ja keskellä olevan tapin 2 taas noin 480 °C:sta 240 °C:seen.

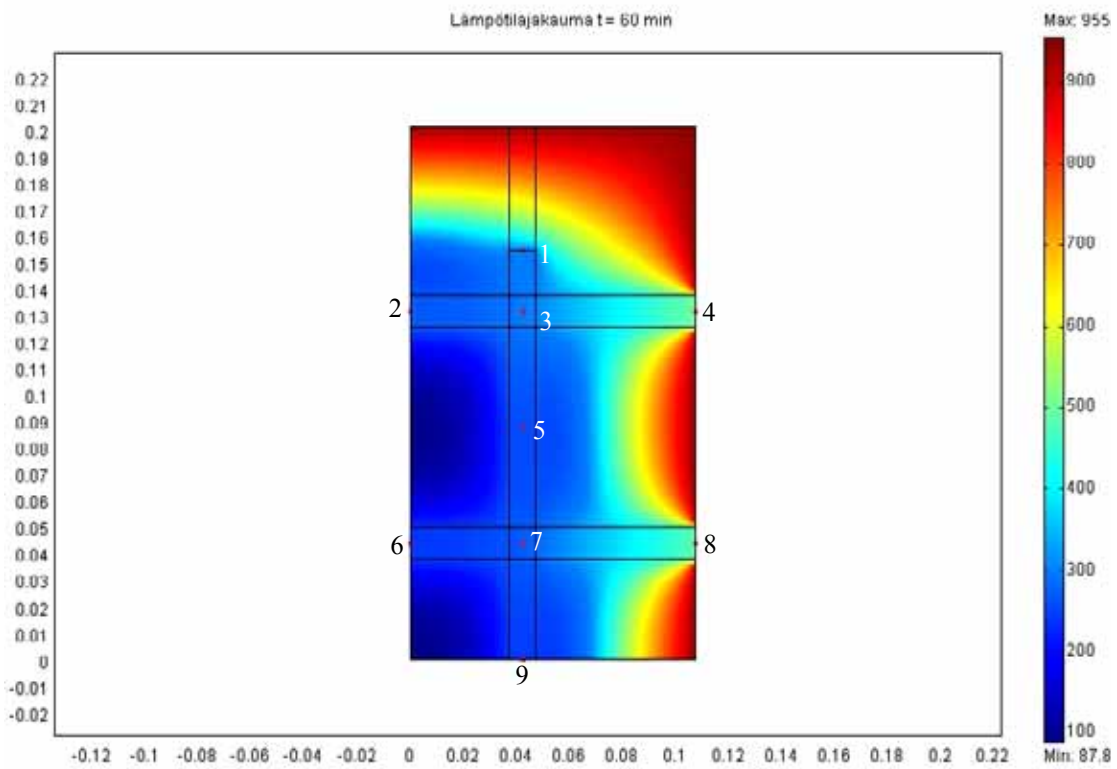
Valitettavasti kokeessa ei saatu mitattua rakenteen sisältä lämpötiloja, joten laskentatulosten vertailua kokeellisiin arvoihin ei voida tehdä. Tappien päiden lasketut lämpötilat vaikuttavat alhaisilta verrattuna ympäröivän kaasun lämpötilaan 945 °C. Yksi syy tähän on, ettei ohjelma huomioi hiilikerroksen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



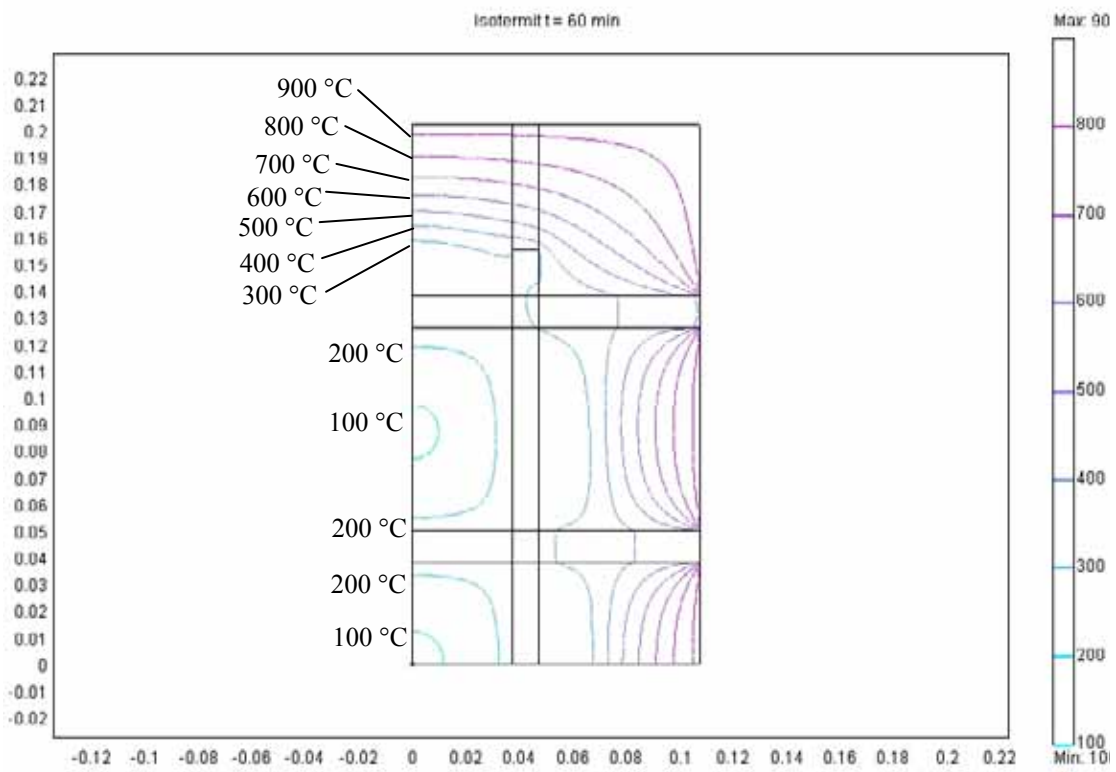
Kuva 8.10. Elementtiverkko.



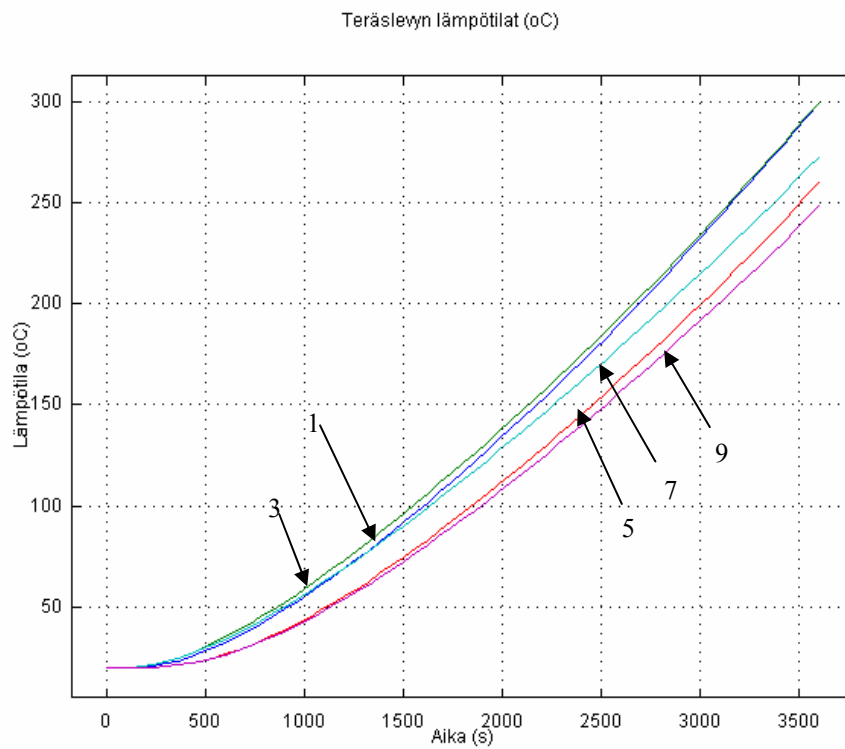
Kuva 8.11. Lämpötilajakauma ajanhetkellä $t = 30$ min.



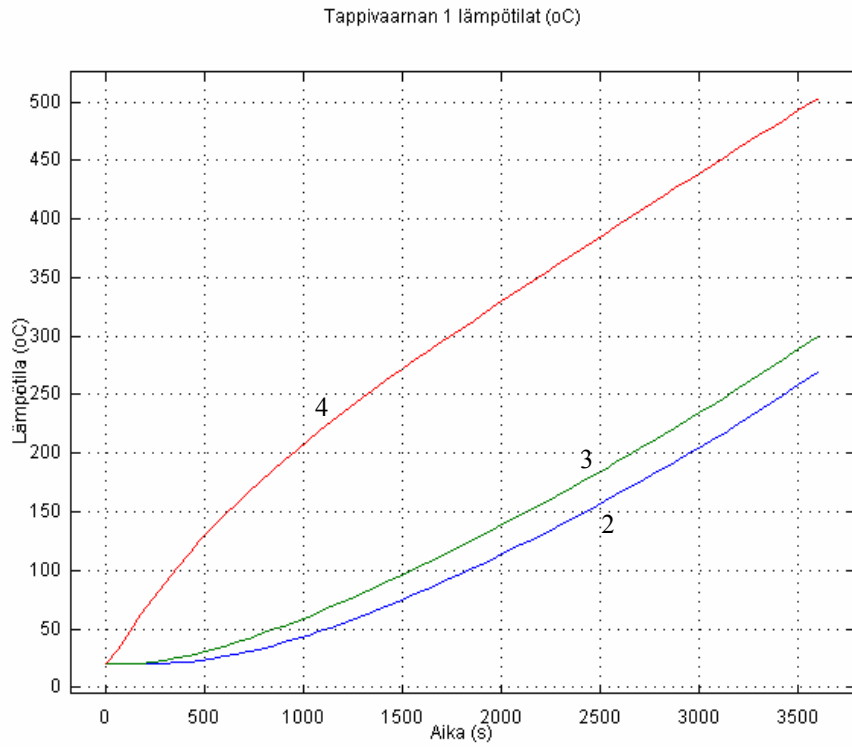
Kuva 8.12. Lämpötilajakauma ajanhetkellä $t = 60$ min. Kuvien 14–16 käyriä vastaavat pisteet on merkitty punaisella ja numeroitu (1–9).



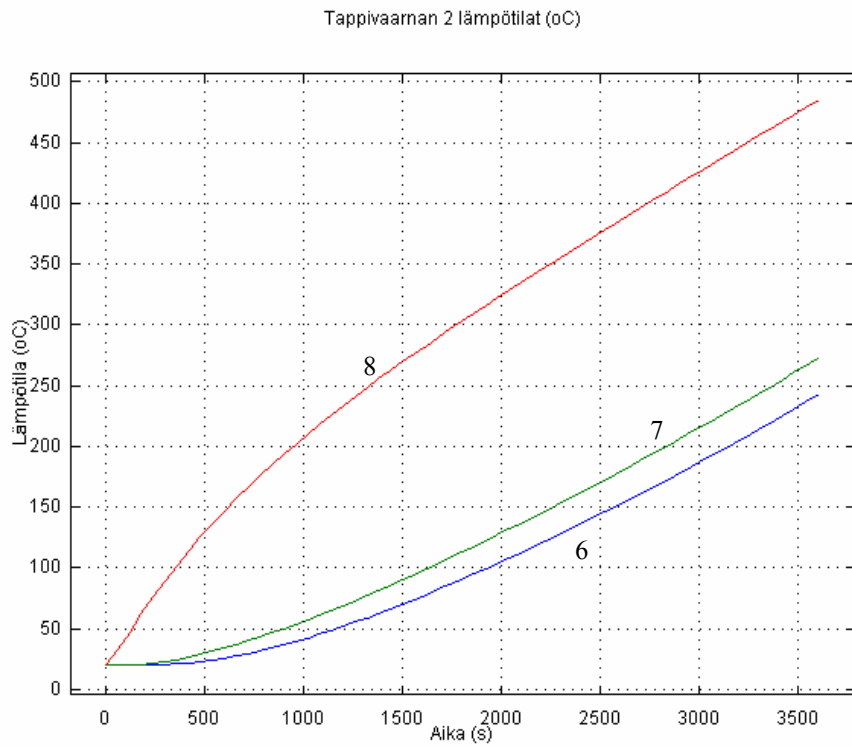
Kuva 8.13. Isotermit rakenteessa ajanhetkellä $t = 60$ min.



Kuva 8.14. Teräslevyn lämpötilat ajan funktiona kuvan 8.12 mukaisissa pisteissä 1, 3, 5, 7 ja 9.



Kuva 8.15. Tappivaarnan 1 lämpötilat ajan funktiona kuvan 8.12 mukaisissa pisteissä 2, 3 ja 4.



Kuva 8.16. Tappivaarnan 2 lämpötilat ajan funktiona kuvan 8.12 mukaisissa pisteissä 6, 7 ja 8.

9. Yhteenveto

9.1 Koetulokset

Tutkimuksessa tehtiin pääasiassa suojaamattomien liitosten palonkestävyyskokeita: kaksi palosuojaamatonta palkkikenkäliitoskoetta, kaksi liimatankoliitoskoetta, joista toinen oli palosuojattu, kaksi tappivaarnaliitoskoetta sekä kahden holkkiliitoksen koe. Ennen palonkestävyyskokeita tehtiin toista liimatankoliitoskoetta vastaava normaali-lämpötilan murtokuormitustesti, molempia tappivaarnaliitoskokeita vastaavat testit sekä holkkiliitoksien normaalilämpötilan murtokuormitustestit. Lisäksi palonkestävyyskoekiden yhteydessä tehtiin pienempiä lisäkokeita tappivaarnojen lämpenemisen sekä ruuvien ja naulojen tartunnan selvittämiseksi korkeissa lämpötiloissa. Lisäksi tehtiin puikkoliitosten palonkestävyyttä koskeva kirjallisuusselvitys ja liitosten numeerista mallinnusta, jossa määritettiin puun pinnalle ja sisälle sijoitettujen rst- ja hiiliteräslevyjen lämpötiloja standardipalorasituksessa ja laskettiin liitospoikkileikkausten lämpötilakenttiä 30 min ja 60 min palorasituksilla.

Suojaamattomista palkkikenkäliitoskokeista ensimmäisen kuormitusaste oli 55 % keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista (EN 1995-1-1:2004 + NA-ehdotus), jolloin palonkestävyys oli 22 min. Toiseen kokeeseen palkkikengän muotoa muutettiin, liittimien reunaetäisyyksiä lisättiin sekä kuormitusastetta pudotettiin 46 % keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista 30 min palonkestävyyden saavuttamiseksi. Liitos murtui 27 min kuluttua kokeen aloituksesta naulauksen pettäessä poikkipalkissa.

Liimatankoliitosten palonkestävyyskokeita tehtiin kaksi, joista toinen oli suojattu kivivillalla (20 mm) ja pellillä. Ennen palonkestävyyskokeita tehtiin liimatankoliitoksen murtokuormitustesti normaalilämpötilassa. Murtokuormaksi saatiin 304 kN, mutta murtto ei tapahtunut liitoksesta vaan palkin leikkauksesta. Tällä kuormalla ensimmäisen palonkestävyyskokeen kuormitusaste olisi 28 %. Tankojen tartuntamurtoon perustuva laskennallinen normaalilämpötilan keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetti on $F_d = 209$ kN, jota vastaava palonkestävyyskokeen kuormitusaste oli ensimmäisessä kokeessa 40 % ja toisessa 42 %. Ensimmäisen kokeen palonkesto-aika oli 21 min, ja murtto tapahtui vetotankojen tartuntamurtoa seuranneesta puristustankojen kiinnityspultin leikkausmurtumisesta. Vaikka kiinnitystä parannettiin hitsaamalla toiseen kokeeseen, murtotapa oli sama ja liitoksen palonkesto-aika oli 37 min. Kiinnityspulttien lämpötila oli molemmissa kokeissa murtohetkellä 600–750 °C. Liitoksen kantavuuden pettäminen johtui siis liitoksen toimintatavan muutoksesta palotilanteessa.

Titaanistabiloidusta rst-putkipalkista valmistetuissa holkkiliitoksissa testattiin kahta kiinnitystekniikkaa: leikkauskuormitettuja ruuveja ja vinoruuvausta. Ruuvit olivat ruostumattomasta teräksestä valmistettuja. Holkkiliitoskoekappaleet olivat järeän liimapuun

(200 x 300) sauvanpäälitoksia, joiden laskennallinen ominaiskapasiteetti oli noin 500 kN. Normaalilämpötilan murtokuormituskokeilla varmistettiin, että nämä uudentyypiset liitokset voidaan mitoittaa liitoskäyttämisen teoreettisella mallinnuksella johdetuilla laskentakaavoilla. Tehtyjen kokeiden mukaan teräs-puuliitoksen leikkauskuormitettujen ruuvien mitoituskaavat ovat Eurocode 5:ssä hyvin konservatiivisia: ruuvien lukumääräreduktio on tarpeeton, esiporaamattoman ruuvin reunapuristuslujuus aliarvioidaan ja ruuvien aksiaalisesta voimasta aiheutuva teräslevyn ja puun välinen kitka jätetään hyödyntämättä. Teräslevyn ja puun väliselle vinoruuviliitokselle sovellettiin puupuuliitoksille aikaisemmin kehitettyjä mitoituskaavoja, joiden mukaan lasketut kapasiteetit vastasivat erittäin hyvin koetuloksia.

Vinoruuvattun holkkiliitoksen palonkestävyyskokeeseen valittiin 38 %:n kuormitusastetta normaalilämpötilan keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista vastaava kuormitus. Tämä vastaa tavallisen kattorakenteen kuormitustilannetta, jossa normaalilämpötilan ja palotilanteen mitoitukset ovat tasapainossa eli normaalilämpötilamitoitus voidaan tehdä täydelle 100 %:n käyttöasteelle. Leikkauskuormitetuilla ruuveilla kootun holkkiliitoksen palonkestävyyskokeessa jouduttiin kuormitusjärjestelyjen vuoksi käyttämään vastaavasti 43 %:n kuormitusastetta. Testattujen normaalilämpötilan murtokuormien perusteella määritetyt kuormitusasteet polttokokeessa olivat 20 % vinoruuviliitoksessa ja 18 % leikkauskuormitetussa ruuviliitoksessa.

Vedetyillä vinoruuveilla kootun holkkiliitoksen palonkesto-aika oli 37 min ja leikkauskuormitettujen ruuvien tapauksessa palonkesto-aika oli 29 min. Leikkauskuormitettu liitos petti sitkeästi ruuvien taipuessa hiilymävyöhykkeellä. Lopullinen murtuminen tapahtui noin 40 mm liitossiirtymällä, kun osa ruuvista katkesi. Vinoruuviliitos murtui hauraasti noin 30 mm liitossiirtymällä ruuvien katketessa äkillisesti kannan tasolta. Kokeessa ei päästy vinoruuviliitoksen tavoitteeksi asetetulle 60 min palonkestävyystasolle, koska ruuvien lämpötila nousi arvioitua korkeammaksi puun hiiltyessä holkin sisällä lähes yhtä nopeasti kuin suojaamattomassa tilassa.

Kartiokantaisten kampanaulojen, ns. ankkurinaulojen (60 x 4,0) ja kupukantaisten ruuvien (4,0 x 50) tartuntaa tutkittiin kokeellisesti korkeissa lämpötiloissa ja vertailtiin laskennallisiin arvoihin. Käytetyt tartuntapituudet valittiin laskennallisesti siten, että tartuntapituus hiilymättömässä puussa riittäisi kantamaan 30 min ajan koekuormat, jotka vastasivat noin 40 %:n ja 20 %:n kuormitusastetta lyhytaikaisesta mitoituskuormasta. Puu hiiltyi kuitenkin naulan ympäriltä sen verran enemmän, että toinen naula irtosi 23 min ja toinen 28 min kuluttua. Ruuvit olisivat ilmeisesti pysyneet paikoillaan loppuun saakka, ellei koetta olisi lopetettu 27 min kuluttua aloituksesta.

Tappivaarnaliitosten normaalilämpötilan murtokuormituskokeissa testattiin vetokuormituksella kaksi koesarjaa teräslevyllisiä 4-leikkeisiä tappivaarnaliitoksia. Toinen sarja

tehtiin liimapuulla 12 mm paksuilla rst-tappivaarnoilla ja toinen kertopuulla 10 mm:n rst-tappivaarnoilla. Molemmissa koesarjoissa tappivaarujen päät olivat puun pinnan tasossa suojaamattomina. Testien perusteella määritettiin palonkestävyyskokeissa käytettävä kuormitusaste ja samalla varmistettiin, että rst-tappivaarnaliitokset voidaan mitoitaa sekä RIL 205-2003- että EN 1995-1-1 -ohjeiden mukaan.

Tappivaarnaliitoksen kuormitusaste liimapuulle tehdyssä palonkestävyyskokeessa oli 30 % ja kertopuulle tehdyssä kokeessa 28 % normaalilämpötilassa testatusta murto-kuorman keskiarvosta. Vastaavat palonkestoajat olivat 56 min ja 67 min. Toisessa kokeessa mitatut teräslevyjen lämpötilat (suojaava puukerros 56 mm) olivat 60 min kohdalla noin 200–275 °C, minkä jälkeen eri kohdista mitattujen lämpötilojen erot alkoivat kasvaa liitoksen alettua aueta. Kumpikin liitos murtui keskimmaisessä lamellissa tapahtuneena liitoksen puuosan pettämisenä. Tappivaarnat pysyivät keskimmaisessä lamellisssa suorina eikä teräslevyihin tullut pysyviä muodonmuutoksia. Kertopuuliitoksessa osa tapeista taipui ulomprien puiden osalla ja murtuminen tapahtui sitkeästi liitoksen avautuessa vähitellen kokeen loppuvaiheessa. Liimapuuliitos murtui hauraasti tappirivien kohdalle muodostuneiden halkeamien vuoksi. Liimapuuliitoksen halkeaminen saattoi johtua ainakin osittain teräslevyjen lämpölaajenemisesta aiheutuneista puun poikittaisista vetojännityksistä, sillä liitos oli valmistettu poraamalla samanaikaisesti tiukat reiät puuhun ja hiiliteräslevyihin. Kertopuuliitoksessa käytettiin ohuempia ruostumattomasta teräksestä valmistettuja liitoslevyjä, joissa oli hieman väljät reiät.

Pelkille tappivaarnoille tehdyissä lämpötilamittauksissa 60 min kohdalla ja 95 mm etäisyydellä puupinnasta lämpötilaksi saatiin haponkestävillä tappivaarnoilla noin 200 °C. Vastaavassa paikassa hiiliterästapeilla lämpötila oli noin 100 °C korkeampi.

Liitosten lämpötilan laskentaan käytettiin elementtimenetelmään perustuvaa ohjelmaa FEMLAB[®] 3.1 ja siihen kytkettävää Heat Transfer Modulea, jonka avulla voidaan ratkaista kaikkien peruslämmönsiirtomekanismien (johtuminen, konvektio, säteily) mukaisia tapauksia. Mallien geometria tehtiin kaksiulotteisena tulosten havainnollisuuden parantamiseksi. Ruostumattoman teräksen lämmönjohtavuuden ja ominaislämpökapasiteetin arvoina korkeissa lämpötiloissa käytettiin EN 1993-1-2:2003:n mukaisia arvoja. Puun lämmönjohtavuutena ja ominaislämpökapasiteettina käytettiin lämpötilavälillä 0–300 °C puun arvoja ja tästä eteenpäin hiilen arvoja. Laskelmat tehtiin sekä kuivalla puulla että kosteuspitäisyydeltään 10-prosenttisella puulla.

Laskennallisesti analysoitiin puupalkkia, jonka ulkopinnoilla oli 10 mm paksu ruostumaton teräslevy, tai puupalkkia, jonka sisällä oli 6 mm paksu ruostumaton teräslevy. Ulkopinnalla olevan teräslevyn lämpötila nousi noin 750 °C:seen 30 min palorasituksen aikana. Teräslevyjen ollessa hiiliterästä lämpötilat ovat samansuuruisia. Teräslevyn ol-

lessa puun sisällä suojaavan puuosan paksuus oli 67 mm ja tällöin laskennallinen lämpötila nousi 70 °C:seen 60 min standardipalorasituksen aikana.

Suojaamattoman liimapuisen rst-tappivaarnaliitoksen lämpötilat laskettiin standardipalokäyrän mukaiselle palorasitukselle ennen liitoksen palonkestävyyskoetta. Poikkileikkauksesta mallinnettiin ¼ symmetriareunaehtoja hyväksi käyttäen. Teräslevyn lämpötilat vaihtelivat 250 °C:n ja 300 °C:n välillä 60 min kohdalla ja tappivaarujen lämpötilat pinnan 500 °C:sta tapin keskikohdan noin 240 °C:seen.

Verrattaessa 60 min kohdalla kertopuisen rst-tappivaarnaliitoksen teräslevyn kokeessa mitattuja lämpötiloja (200–275 °C) laskettuihin arvoihin kokeelliset arvot olivat hiukan korkeampia. Pelkille tappivaaruille tehdyissä lämpötilamittauksissa 60 min palorasituksen jälkeen lämpötila oli keskimäärin noin 200 °C (etäisyys 95 mm) ja laskennallisesti 240 °C (etäisyys 107,5 mm). Ohjelma ei huomioi hiilikerroksen halkeamista eikä palon putoamista vaan olettaa hiilikerroksen pysyvän yhtenäisenä.

9.2 Johtopäätökset

Ruostumattomasta teräksestä voidaan valmistaa kaikkia puurakenteissa käytettäviä liitosten teräsosia, kuten liitoslevyjä, palkkikenkiä, vetotankoja, tappivaaruja, 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.

Tutkimukset osoittavat, että austeniittisiä ruostumattomia teräksiä voidaan käyttää puurakenteiden liitoksissa sekä normaalilämpötilassa että palonkestävyyttä vaativissa rakenteissa kunkin liitoksen vaatimusten mukaan. Puurakenteiden liitoksissa voidaan hyödyntää ruostumattomien teräslaatujen hyviä lujuus- ja jäykkyysominaisuuksia korkeissa lämpötiloissa. Suurin ero näissä ominaisuuksissa hiiliteräkseen nähden on lämpötilavälillä 600–850 °C, joka on kaasun lämpötila standardipalorasituksessa ennen 30:tä minuuttia. On kuitenkin huomattava, että ruostumattomilla teräksillä lämpölaajeneminen on suurempi kuin hiiliteräksillä ja tämä voi vaikuttaa liitoksen toimintaan. Liitosten rst-osat mitoitetaan Eurocode 3:n mukaan.

Ruostumattomasta teräksestä valmistetuissa liitoksissa mitoittavaksi tekijäksi tulee yleensä puun hiiltyminen. Ulkopuolinen rst-levy ei toimi liitosalueen palosuojauksena. Puun hiiltyminen rst-levyn alla ja jopa 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.

Ruostumattomasta teräksestä valmistetut liitokset saavuttavat kattorakenteiden tapauksessa yleensä 30 min palonkestävyyden ilman normaalilämpötilan ylimitoitusta edellyttäen, että liittimien reunaetäisyydet ja liittimien tunkeumasyvyydet puussa ovat riittävän suuria. Esimerkiksi ruostumattomasta teräksestä valmistettujen muotolevykiinnikkeiden yhteydessä käytettävien ankkurinaulojen pituuden on oltava yli 60 mm, jos liitoksella tavoitellaan 30 min palonkestävyyttä ilman normaalilämpötilan ylimitoitusta.

Liimatankoliitoksissa käytettävien liimojen pehmeneminen alkaa tyypillisesti jo 100 °C:n lämpötilassa. Tämän vuoksi myös ruostumattomasta teräksestä valmistetut liimatankoliitokset tulee palosuojata, jos vedetyltä liitokselta edellytetään yli 15 min palonkestävyyttä. Vinotankoliitokset voidaan suunnitella niin, että tankojen liimausta ei hyödynnetä palotilanteessa. Tällöin kaikki palotilanteen kuormat otetaan puristustankojen vaarnavaikutuksella. Tällöin on kiinnitettävä erityistä huomioita puristustankon pään kiinnityksen suunnitteluun puun pinnassa siten, että se pystyy välittämään leikkausvoiman sen jälkeen, kun vetotankojen tartunta pettää. Austeniittisesta ruostumattomasta teräksestä valmistettujen tankojen ja liitososien yhteydessä vinotankoliitoksen liitososat ja tankojen päät voidaan jättää puun pinnassa suojaamattomiksi R30-palonkestävyysluokan liitoksissa, mikäli niiden lämpötila huomioidaan mitoituksessa.

Teräslevyllisissä liima- ja kertopuun monileikkeisissä tappivaarnaliitoksissa voidaan jättää ruostumattomasta teräksestä valmistettujen liittimien päät suojaamattomiksi palonkestävyysluokassa R60 tietyin edellytyksin. Kun tappivaarnojen päiden puutulppaus jätetään pois, liittimet ovat nähtävillä ja laadunvarmistus helpottuu. Säästöjä saavutetaan sekä työkustannuksissa että puun materiaalimenekeissä. Tappivaarnaristikot voidaan optimoida paksuudeltaan yleensä vähintään 25 mm ohuemmiksi, jos liittimien päät voidaan ulottaa puun pintaan. Vetosauvoissa sauva-dimensio määräytyy yleensä liitosten lohkeamismurtoimituksella, jossa voidaan hyödyntää ainoastaan tappivaarnan pituuden mukaista puun paksuutta.

Normaalilämpötilassa mitoitettut rst-tappivaarnaliitokset täyttävät tietyin edellytyksin palonkestävyysluokan R60 vaatimukset, kun liitoksen palotilanteen kuormitus on enintään 40 % normaalilämpötilan keskipitkän aikaluokan mitoituskapasiteetista. Liitossauvassa tapahtuvan lämpenemisen vuoksi seostamattomasta teräksestä valmistetut liitoslevyt oli tehdyssä palonkestävyysskoeksessa ylimitoitettu niin, että niiden käyttöaste oli normaalilämpötilassa enintään 50 %. Ruostumattomien teräslevyjen yhteydessä vastavaa ylimitoitusta ei tarvita. Optimaalisin suojaamattoman R60-tappivaarnaliitoksen liitoslevyjen teräslaatu on hehkutettu EN 1.4318, jonka hinta ei ole juuri tavallista peruslaatua korkeampi mutta jolla on huomattavasti parempi lujuus sekä normaalilämpötilassa että palotilanteessa.

Projektissa tehtyihin tutkimuksiin perustuvat liitosten rakennesuunnitteluohjeet on esitetty erillisessä VTT Working papers -julkaisussa (Kevarinmäki ym. 2005): *Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten suunnittelu – Yleiset ohjeet ja palomitoitus.*

Lähdeluettelo

EN 409. 1993. Timber structures – Test methods – Determination of the yield moment of dowel type fasteners – Nails. Brussels: CEN. 8 s.

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.

EN 1993-1-2:2003. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1.2: Structural fire design. Brussels: CEN. 64 s.

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.

EN 1995-1-2:2004. Eurocode 5 – Design of timber structures. Part 1-2: General – Structural fire design. Brussels: CEN. 69 s.

EN 10088-1. Stainless steels. Part 1: List of stainless steels (SFS-EN 10088-1: Ruostumattomat teräkset. Osa 1: Ruostumattomien terästen luettelo). Brussels: CEN.

EN 26891. 1991. (ISO 6891:1983.) Timber structures. Joints made with mechanical fasteners. General principles for the determination of strength and deformation characteristics. Brussels: CEN.

Euro Inox & VTT. 2002. Käsikirja – Ruostumattomien terästen käyttö kantavissa rakenteissa. 2. painos Euro Inoxin käsikirjasta ”Design Manual for Structural Stainless Steel”. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. VTT:n Rakennussarja, julkaisu 3. 164 s.

Frangi, A. (Institute of Structural Engineering ETH, Zurich) & Mischler, A. (University of Applied Science HSR, Rapperswil). 2004. Fire tests on timber connections with dowel-type fasteners. CIB-W18/37-16-2. Edinburgh United Kingdom.

Fredlund, B. 1988. A model for heat and mass transfer in timber structures during fire. A theoretical, numerical and experimental study. Lund: Lund University. 254 s.

Incropera, F. & DeWitt, D. 2002. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. Fifth edition. New York: John Wiley & Sons. 981 s.

ISO 3130. 1975. Wood – Determination of moisture content for physical and mechanical tests.

- ISO 3131. 1975. Wood – Determination of density for physical and mechanical tests.
- ISO 834-1:1999. Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements (Palonkestävyyskokeet – rakennusosat – Osa 1: Yleiset vaatimukset).
- ISO 834-6:1999. Fire resistance tests – Elements of building construction – Part 6: Specific requirements for beams (Palonkestävyyskokeet – rakennusosat – Osa 6: Erityisvaatimukset palkeille).
- Kevarinmäki, A. 2002. Joints with Inclined Screws. CIB-W18/35-7-4. Proceedings of CIB-W18 Kyoto, Japan.
- Kevarinmäki, A. 2004. Behaviour of Fasteners and Glued-in Rods Produced from Stainless Steel. CIB-W18/37-7-14. Proceedings of CIB-W18 Edinburgh, Scotland, UK.
- Kevarinmäki, A., Oksanen, T. & Yli-Koski, R. 2005. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten suunnittelu – Yleiset ohjeet ja palomitoitus. VTT Working Papers 38. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 51 s. + liitt. 12 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/workingpapers/2005/W38.pdf>
- Kruppa, J., Lamadon, T. & Racher, P. 2000. Fire resistance tests of timber connections. CTICM, INC-00/187-JK/NB.
- Laplanche, K., Dhima, D. & Racher, P. 2004. Predicting the behaviour of dowelled connections in fire: Fire test results and heat transfer modelling. CSTB, 8th World Conference on Timber Engineering, wcte 2004, Lahti Finland.
- NAD. 2003. Ympäristöministeriön asetus esistandardia SFS-ENV 1995-1-1:1993 koskevan kansallisen soveltamisasiakirjan täydentämisestä. Helsinki: Ympäristöministeriö. 5 s.
- prEN 1993-1-2:2001. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2: General rules structural fire design. Brussels: CEN. 74 s.
- prEN 14358. 2003-8. Timber structures – Fasteners and wood-based products – Calculation of characteristic 5-percentile value and acceptance criteria for a sample. Brussels: CEN.
- RIL 106. 1975. Puurakenteet. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto. 366 s.

RIL 205. 2003. Puurakenteiden suunnittelu – Euronormi. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL r.y.

SFS-EN 1363-1:1999. Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements. (Palonkestävyyskokeet – Osa 1: Yleiset vaatimukset). Helsinki: Suomen standardisoimisliitto (SFS). 44 s.

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.

SFS-EN ISO 7500-1. 2000. Staattisten yksiakselisesti kuormittavien metallien aineen-koetusaineiden varmentaminen. Osa 1: Veto- ja puristuskoneet. Voimanmittausjärjestelmän kalibrointi. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto (SFS). 38 s.

VTT. 2004a. Design of laterally loaded dowel-type Kerto-LVL connections with prEN 1995-1-1. Statement no RTE1707/04. Espoo: VTT Technical Research Centre of Finland, VTT Building and Transport. 31.5.2004. 4 s. + 14 s.

VTT. 2004b. Lausunto Gunnebon ankkurinaulojen myötömomenteista ja ulosveto-parametreista. Lausunto no RTE2560/04. Espoo: VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 16.8.2004. 2 s.

Yli-Koski, R. 2004. RST-Liittimien mitoitusperusteet puurakenteiden liitoksissa. Diplomityö. Espoo: Teknillinen korkeakoulu. Rakennus- ja ympäristötekniikan osasto. 107 s. + 40 s.

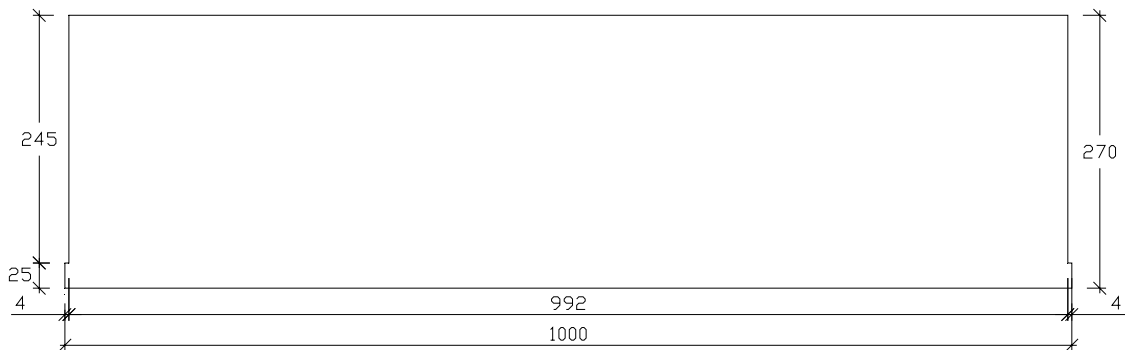
Yli-Koski, R. & Kevarinmäki, A. 2005. Ruostumattomien terästen mitoitusperusteet puurakenteiden liitoksissa. VTT Tiedotteita 2279. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 102 s. + liitt. 29 s. <http://www.vtt.fi/inf/pdf/tiedotteet/2005/T2279.pdf>

Liite A: Palkkikenkäliitokset

Liite A.1: Koekappalepiirustukset

A.1.1. Koekappale 1, koe 10.6.2003

PÄÄPALKKI liimapuuta 115 x 315 mm², pituus l = 2 600 mm, 2 kpl
POIKKIPALKKI liimapuuta 90 x 270 mm², pituus l = 1 000 mm, 1 kpl

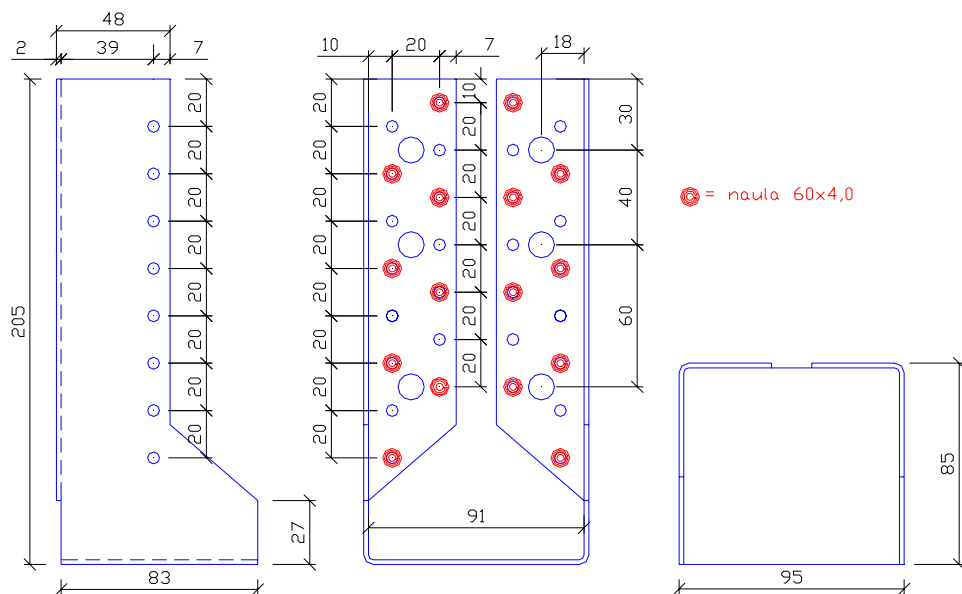


Kuva A.1. Koekappale 1, koe 10.6.2003.

Poikkipalkki liitetään pääpalkkiin rst-palkkikengillä siten, että yläpinnat ovat tasan.

Palkkikengän naulaus:

- pääpalkkiin 16 n 60x4,0, naula merkittyihin reikiin
- poikkipalkkiin (90 x 270 mm²) 16 n 40x4,0, naula joka reikään



Kuva A.2. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu palkkikengä ja pääpalkin naulat.

A.1.2. Koekappale 2, koe 16.3.2004

PÄÄPALKKI liimapuuta 115 x 315 mm², pituus l = 2 700 mm, 2 kpl

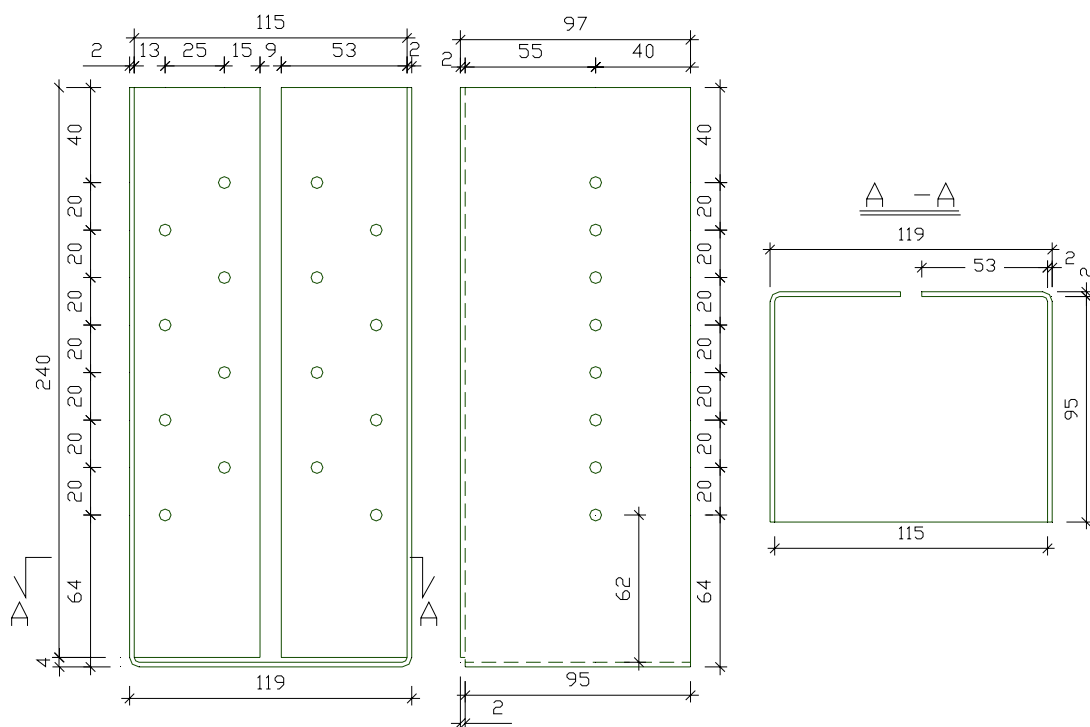
POIKKIPALKKI liimapuuta 115 x 270 mm², pituus l = 1 000 mm, 1 kpl

Poikkipalkki liitetään pääpalkkiin RST-palkkikengillä siten, että yläpinnat ovat tasan.

Palkkikengän naulaus:

–pääpalkkiin 16 n 60x4,0, naula joka reikään

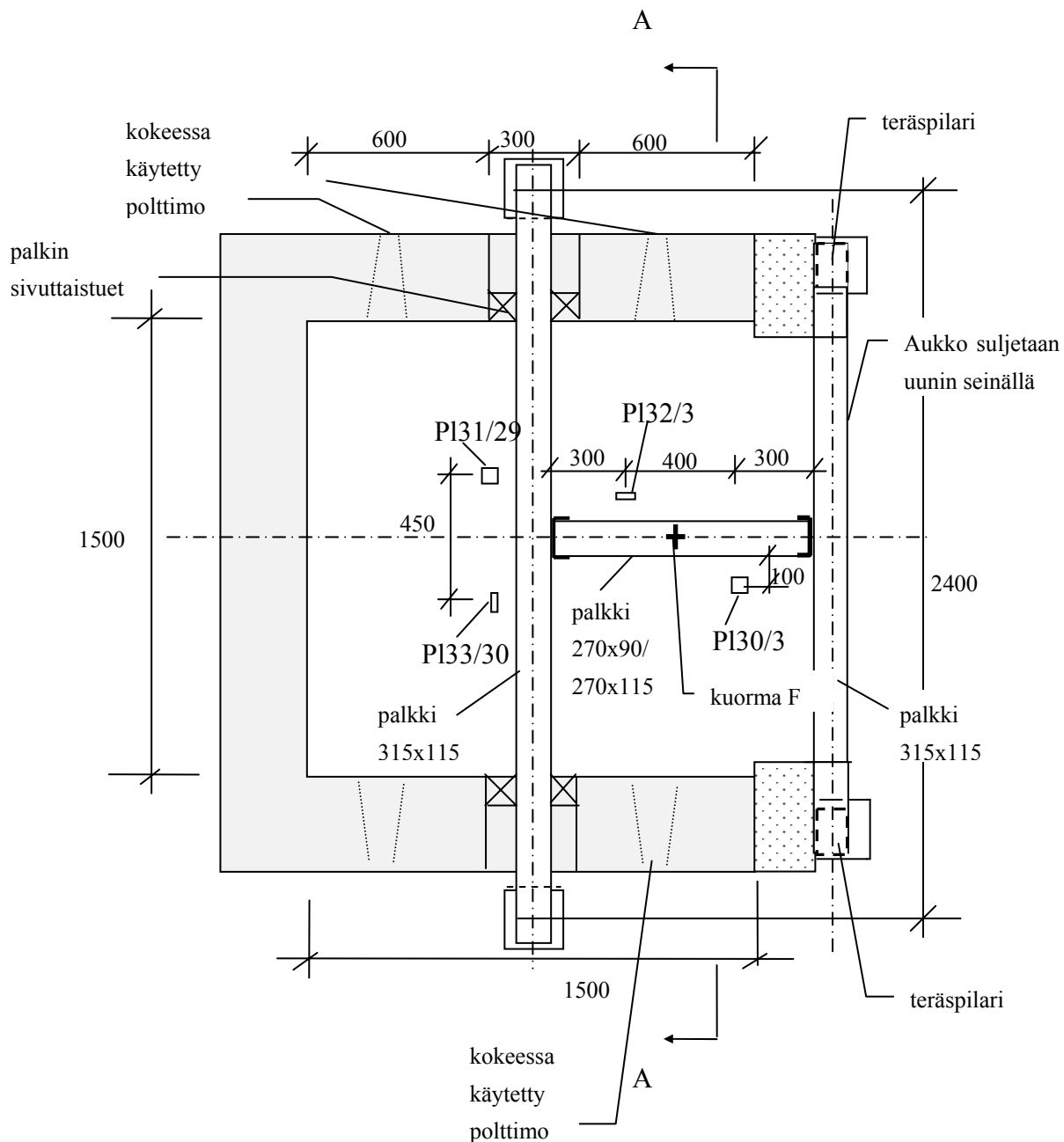
–poikkipalkkiin (115 x 270 mm²) 16 n 60x4,0, naula joka reikään



Kuva A.3. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu palkkikengä.

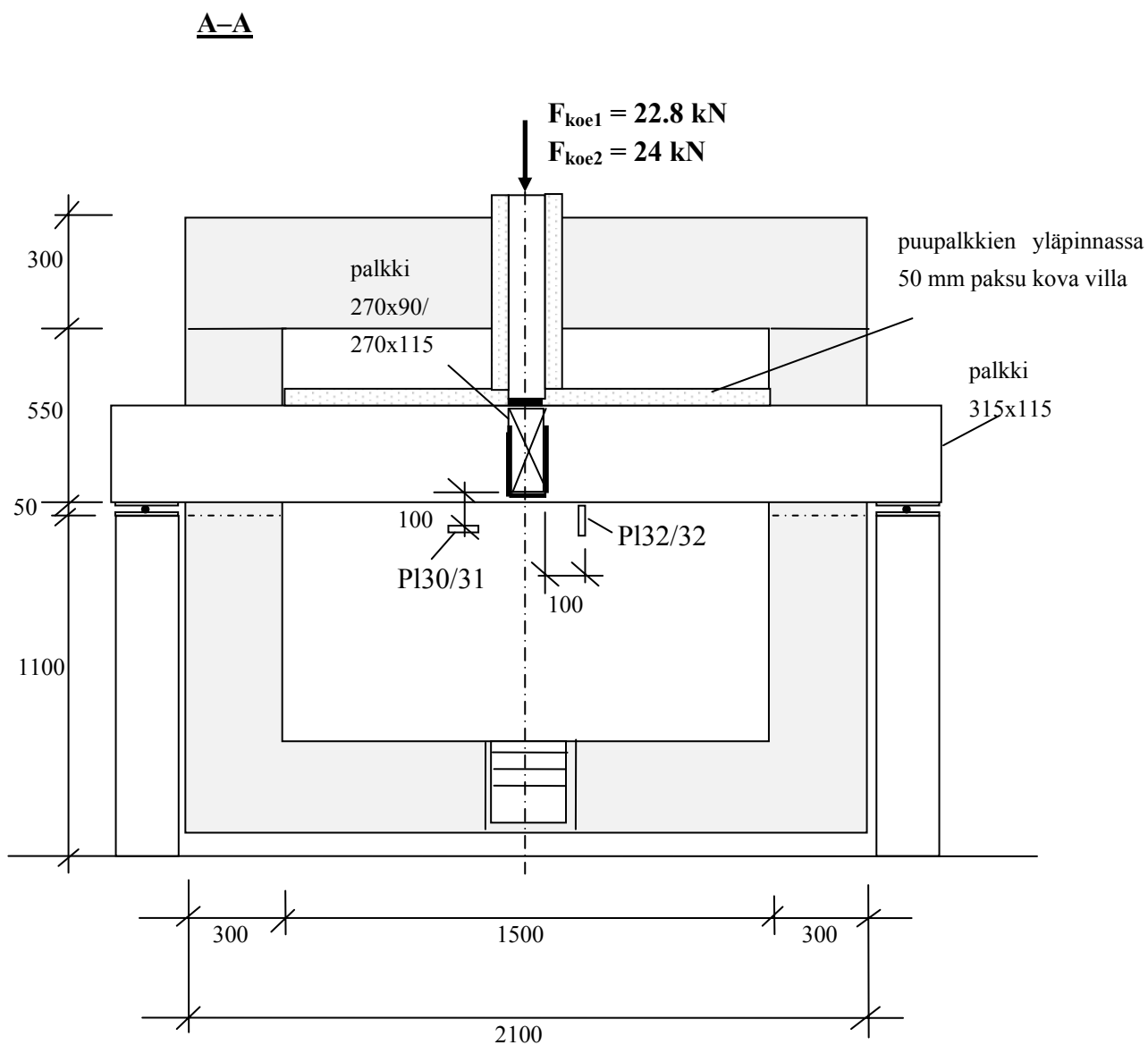
Liite A.2: Koejärjestelyt

Liite A.2.1: Koekappaleiden sijainti uunissa



- P130–P133 Uunin lämpötilojen mittauspisteet 10.6.2003
P129–P132 Uunin lämpötilojen mittauspisteet 16.3.2004

Kuva A.4. Koejärjestelyt uunissa.



PI30/31 ja PI32/32 Uunin lämpötilojen mittauspisteet

Kuva A.5. Koejärjestelyn leikkauspiirustus A-A.

Liite A.2.2: Kuormituslaskelmat

Palotilanteen testauskuorma on määritetty EN 1995-1-1:n ja sen NA-ehdotuksen mukaan. Kuorman aikaluokka on keskipitkä ja käyttöluokka 1. Naulojen myötömomentin ja ulosvetolujuuden arvoina on käytetty VTT:n lausunnon RTE 2560/04 (VTT 2004b) mukaisia arvoja. Liimapuun lujuusluokan GL32c ominaistiheys $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$.

Koe 1

Puu: GL32c tiheys $\rho_k = 410$ (kg/m³) paksuus $t_2 = 90$ mm

Teräs: EN 1.4401 (AISI 316) paksuus $t = 2$ mm

naula: EN 1.4401 (AISI 316) halkaisija $d = 4.0$ mm pituus $l = 40$ mm

kampaosan pituus $l_g = 30$ mm naulatyyppi: $naula = \text{"ankkurinaula"}$

Liittimen tunkeuma $t_I = \min[(l - t), t_2]$ $t_I = 38$ mm

Kuomien aikaluokka: keskipitkä

Kosteus- ja aikaluokkakerroin Käyttöluokissa 1 ja 2 $k_{mod} = 0.8$

Materiaaliosavarmuus liitoksille: $\gamma_M = 1.2$ Liimapuu NA-ehdotus

Puun reunapuristuslujuus: $f_{h,k} = 0.082 \rho_k \cdot d^{-0.3} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ $f_{h,k} = 22.2 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

Liittimen myötömomentti

Käytetään VTT:n lausunnon RTE 2560/04 mukaista arvoa. $M_{y,Rk} = 9520$ Nmm

Ulosvetolujuus:

Käytetään VTT:n lausunnon RTE 2560/04 mukaista arvoa $f_{ax,k} = 6.7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$

ulosvetokapasiteetti: $F_{ax,k} = f_{ax,k} \cdot d \cdot l_g$ $F_{ax,k} = 804$ N

Yhden leikkeen kapasiteetti:

Tutkimustulosten mukaan käytetään paksun levyn kaavoja ($t \geq d$), kun naulan kanta on kartio ja $d = 4$ mm sekä $t \geq 2$ mm

merkinnät (c) - (e) viittaavat EN 1995-1-1:2004:n murtotavan mukaiseen yhtälöön (8.10).

Paksu teräslevy $t \geq d$

Aksiaalisen voiman osuus Johansenin yhtälöstä, maks. 50% ankkurinauloille.

$$J_{(c)} = f_{h,k} \cdot t_I \cdot d \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_I^2}} - 1 \right) \cdot 50\% \quad J_{(c)} = 869 \text{ N}$$

$$J_{(d)} = 2.3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} \cdot 50\% \quad J_{(d)} = 1057 \text{ N}$$

$$F_{ax,Rk(c)} = \min\left(\frac{F_{ax,k}}{4}, J_{(c)}\right) \quad F_{ax,Rk(c)} = 201 \text{ N}$$

$$F_{ax,Rk(d)} = \min\left(\frac{F_{ax,k}}{4}, J_{(d)}\right) \quad F_{ax,Rk(d)} = 201 \text{ N}$$

Leikkauskapasiteetti (EN 1995-1-1:2004 kaava (8.10):

$$F_{v,Rk(c)} = f_{h,k} \cdot t_I \cdot d \cdot \left(\sqrt{2 + \frac{4 \cdot M_{y,Rk}}{f_{h,k} \cdot d \cdot t_I^2}} - 1 \right) + F_{ax,Rk(c)} \quad F_{v,Rk(c)} = 1940 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk(d)} = 2.3 \cdot \sqrt{M_{y,Rk} \cdot f_{h,k} \cdot d} + F_{ax,Rk(d)} \quad F_{v,Rk(d)} = 2315 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk(e)} = f_{h,k} \cdot t_I \cdot d \quad F_{v,Rk(e)} = 3372 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk} = \min(F_{v,Rk(c)}, F_{v,Rk(d)}, F_{v,Rk(e)}) \cdot N \quad \boxed{F_{v,Rk} = 1940 \text{ N}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad \boxed{F_{v,Rd} = 1293 \text{ N}}$$

Liitoksen laskentakapasiteetti normaalilämpötilassa:

Naulojen lukumäärä $n_n = 16 \Rightarrow \boxed{n_n \cdot F_{v,Rd} = 20.7 \text{ kN}}$

Kuormitusasteena käytetään 55 % lasketusta keskipitkän aikaluokan mitoitus-kapasiteetista. Tällöin testauskuorma $F_{R,d,fi} = 2 * 55 \% * 20,7 \text{ kN} = \mathbf{22,8 \text{ kN}}$.

Koe 2

Puu: GL32c tiheys $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$ paksuus $t_2 = 115 \text{ mm}$
Teräs: EN 1.4571 (AISI 316 Ti) paksuus $t = 2 \text{ mm}$
naula: EN 1.4401 (AISI 316) halkaisija $d = 4.0 \text{ mm}$ pituus $l = 60 \text{ mm}$
 kampaosan pituus $l_g = 50 \text{ mm}$ $t_I = 58 \text{ mm}$ naulatyyppe: $\text{naula} = \text{"ankkurinaula"}$

▣ ulosvetokapasiteetti: $F_{ax,k} = 1340 \text{ N}$

"Köysisvaikutus": $F_{ax,Rk(c)} = 335 \text{ N}$ $F_{ax,Rk(d)} = 335 \text{ N}$

Leikkauskapasiteetti (EN 1995-1-1:2004 kaava (8.10):

$$F_{v,Rk(c)} = 2695 \text{ N} \quad F_{v,Rk(d)} = 2449 \text{ N} \quad F_{v,Rk(e)} = 5146 \text{ N}$$

$$F_{v,Rk} = \min(F_{v,Rk(c)}, F_{v,Rk(d)}, F_{v,Rk(e)}) \cdot N \quad \boxed{F_{v,Rk} = 2449 \text{ N}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} \quad \gamma_M = 1.2 \quad k_{mod} = 0.8 \quad \boxed{F_{v,Rd} = 1633 \text{ N}}$$

Liitoksen laskentakapasiteetti normaalilämpötilassa:

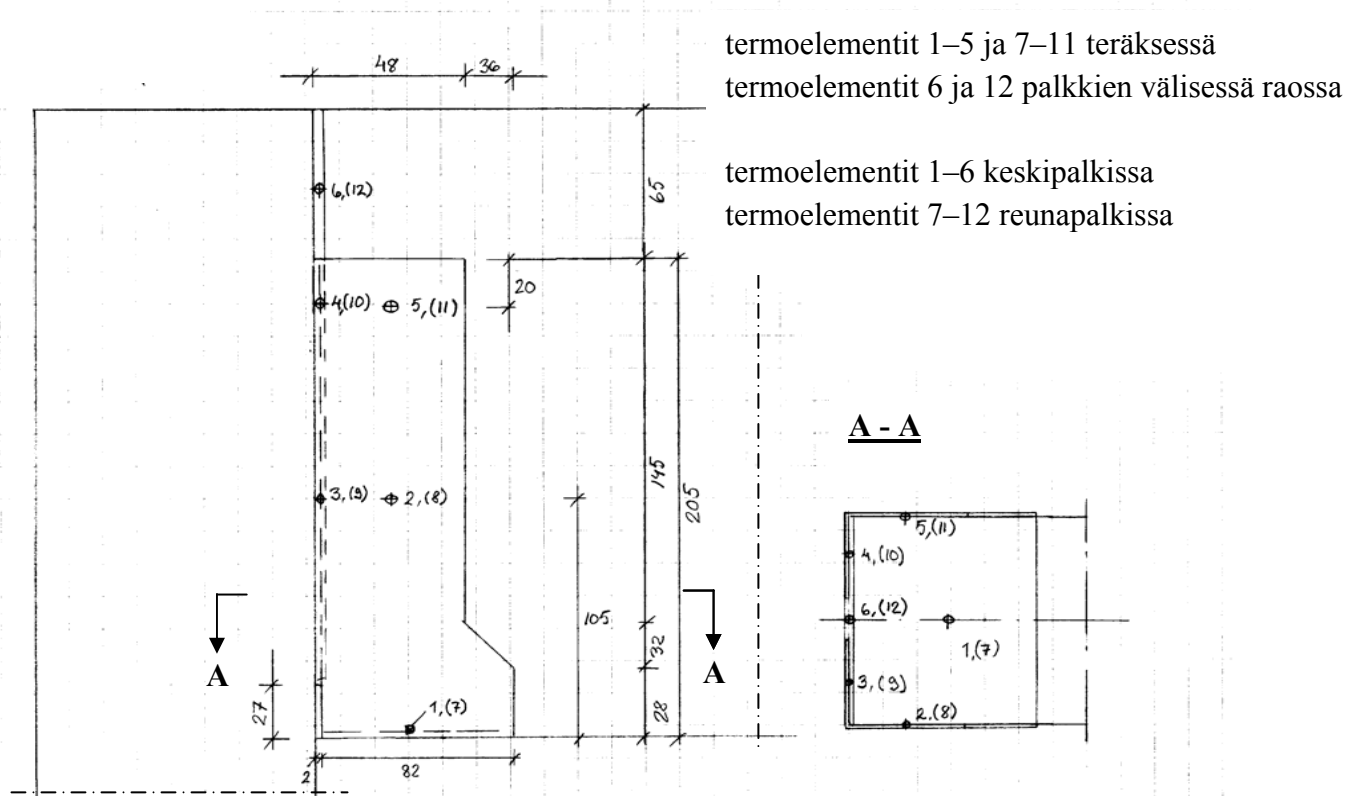
Naulojen lukumäärä $n_n = 16 \Rightarrow \boxed{n_n \cdot F_{v,Rd} = 26.12 \text{ kN}}$

Kuormitusasteena käytetään 46 % lasketusta keskipitkän aikaluokan mitoitus-kapasiteetista. Tällöin testauskuorma $F_{v,Rd,fi} = 2 * 46 \% * 26,12 \text{ kN} = \mathbf{24,0 \text{ kN}}$.

Liite A.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat

A.3.1 Palkkikengässä

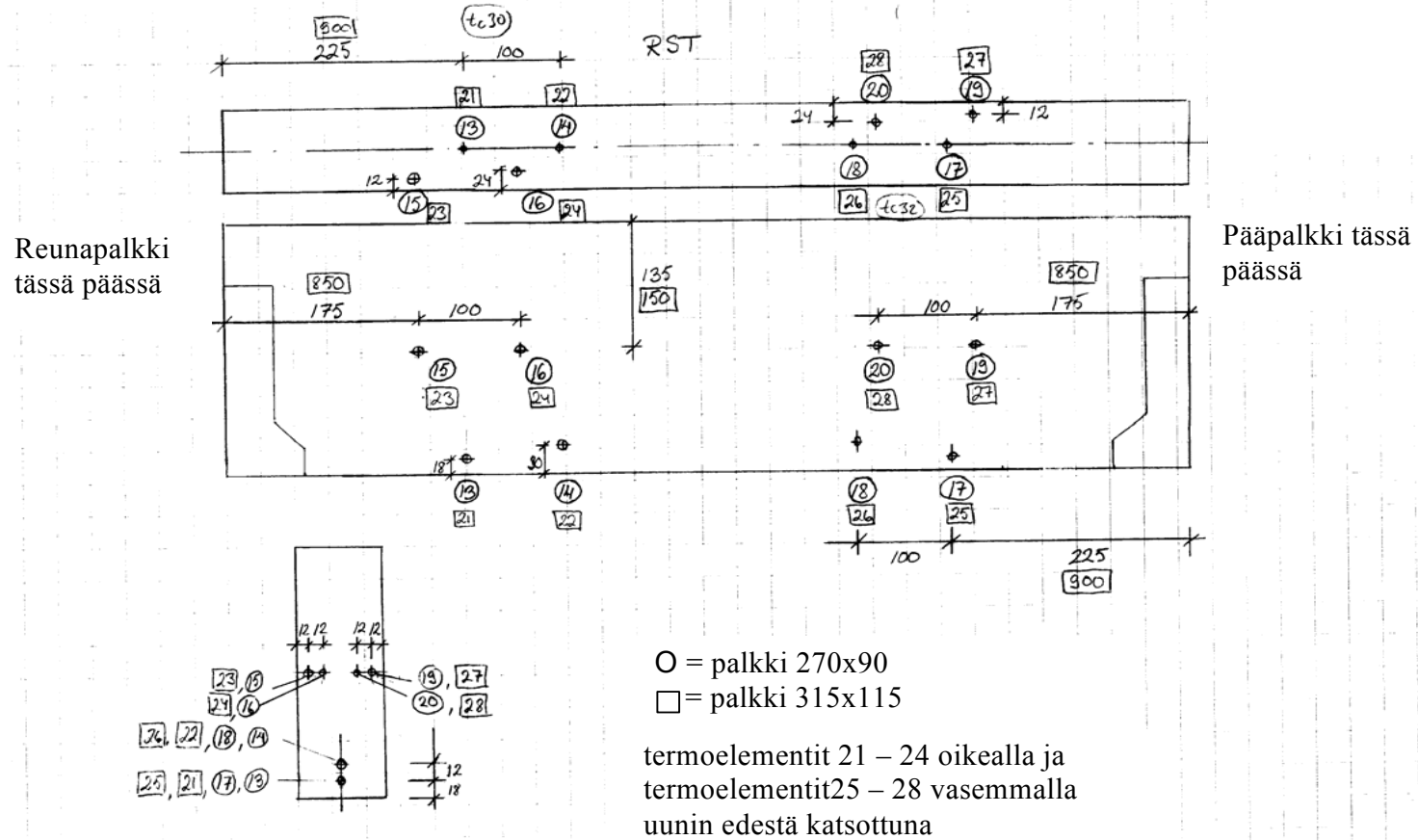
10.6.2003



Kuva A.6. Koekappaleen 1 lämpötilojen mittauspisteet palkkikengässä.

Puussa

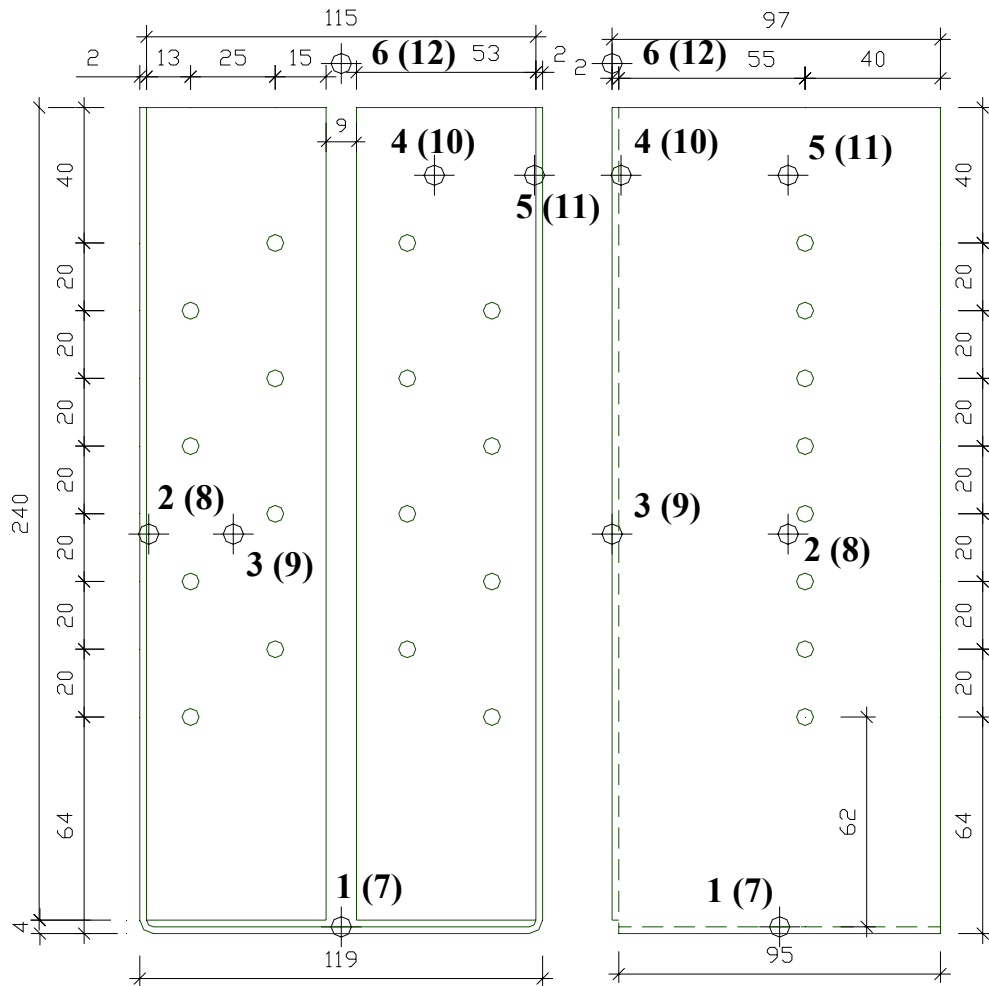
10.6.2003



Kuva A.7. Koekappaleen 1 lämpötilojen mittauspisteet poikkipalkissa.

A.3.2. Palkkikengässä

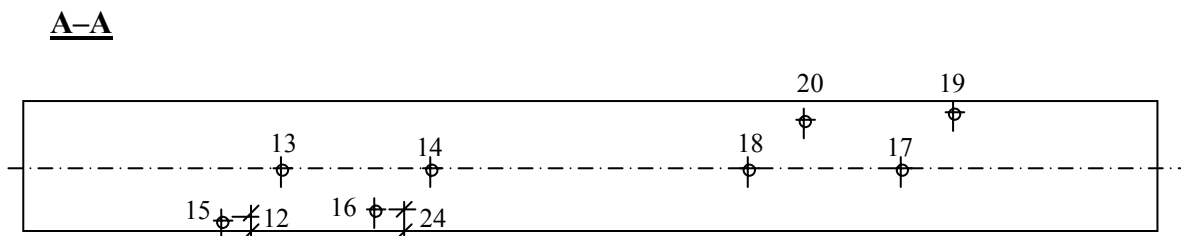
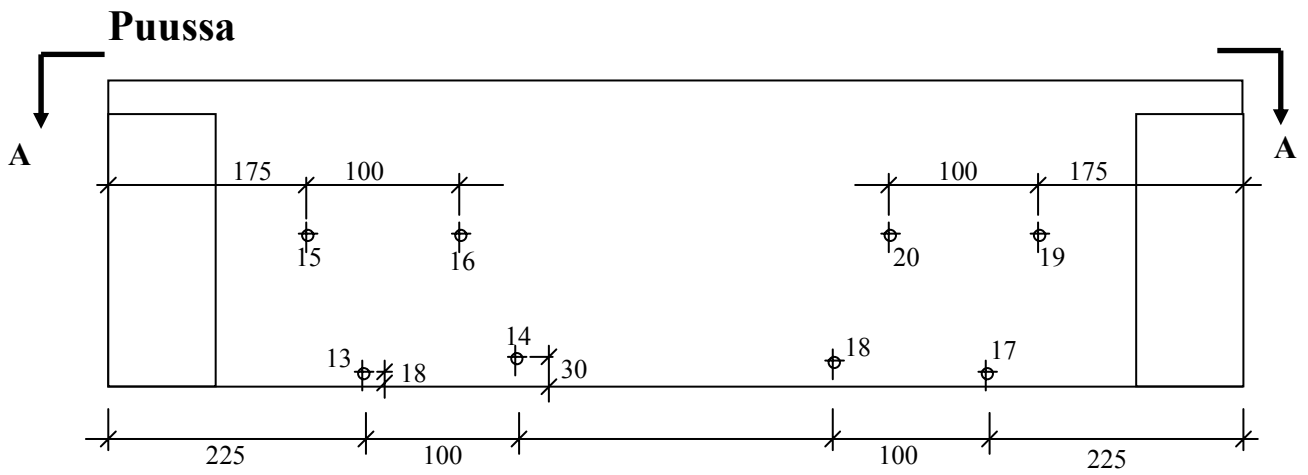
Koe 16.3.2004



Kuva A.8. Koekappaleen 2 lämpötilojen mittauspisteet palkkikengässä.

termoelementit 1–5 ja 7–11 teräksessä
termoelementit 6 ja 12 palkkien välisessä raossa

termoelementit 1–6 keskipalkin puoleisessa päässä
termoelementit 7–12 reunapalkin puoleisessa päässä

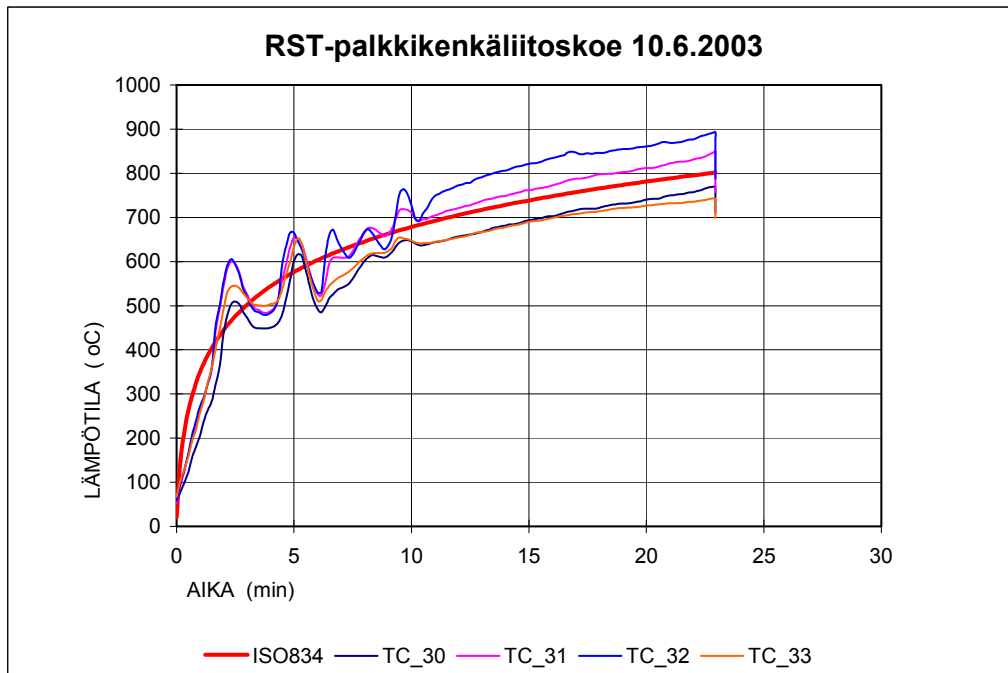


Kuva A.9. Koekappaleen 2 lämpötilojen mittauspisteet poikkipalkissa.

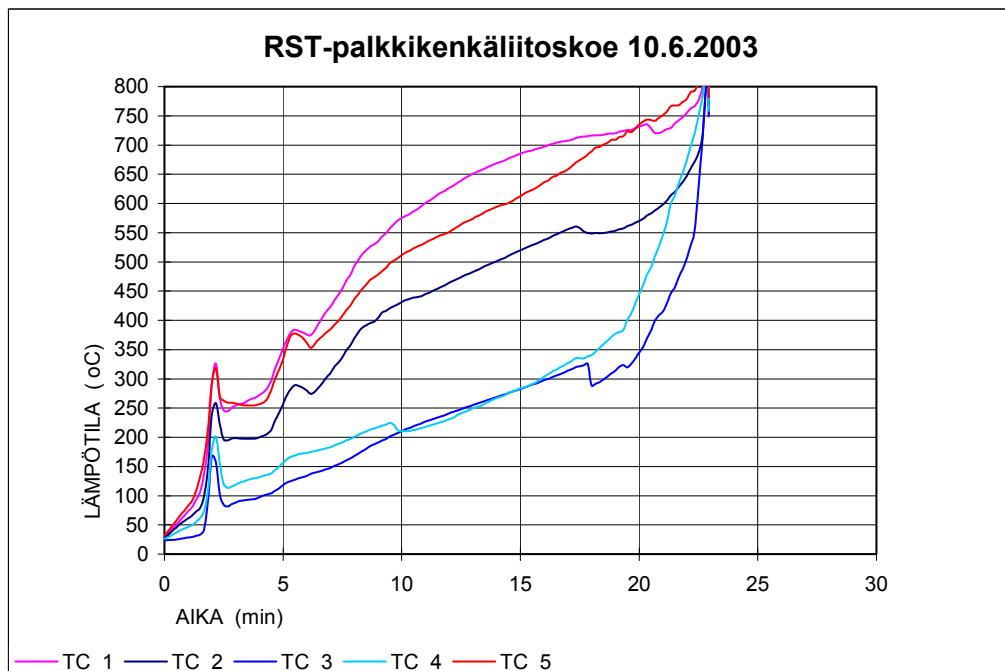
Liite A.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat

A.4.1. Koekappale 1

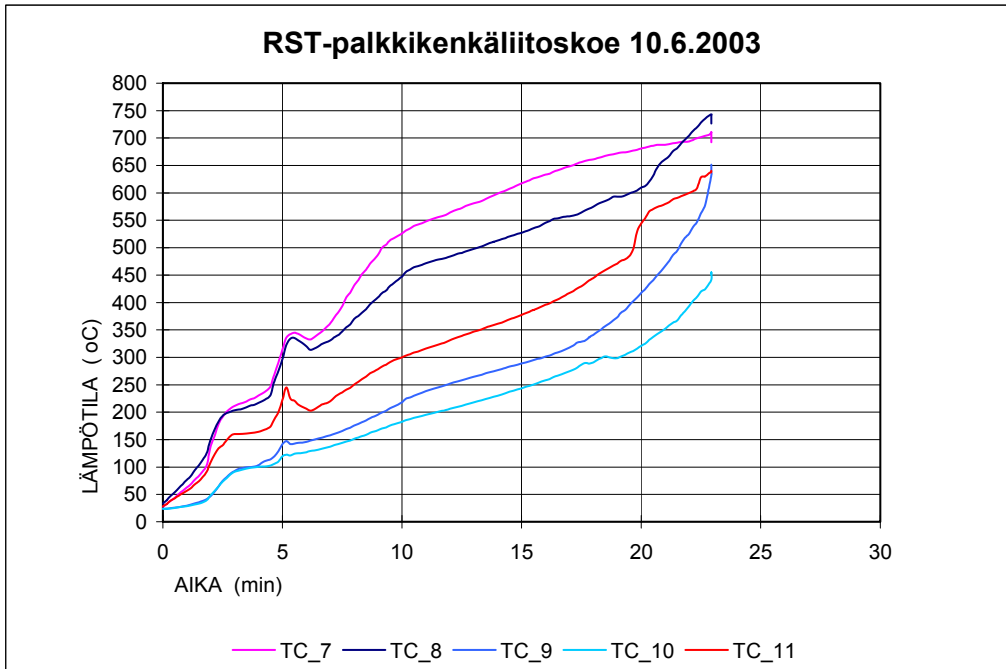
Koe 10.6.2003



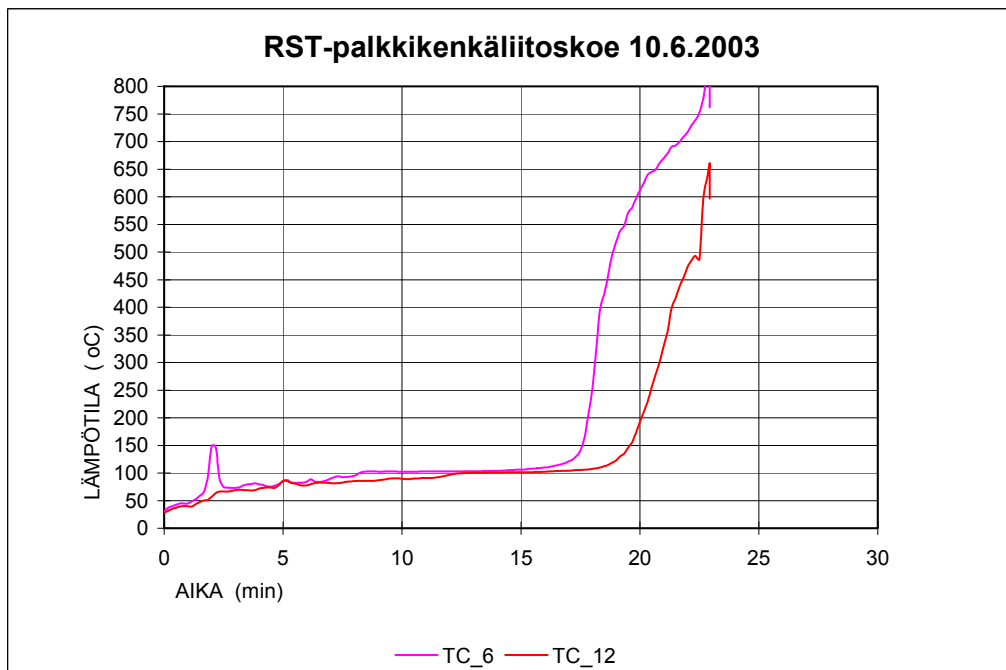
Kuva A.10. Uunin lämpötilat. Koekappale 1.



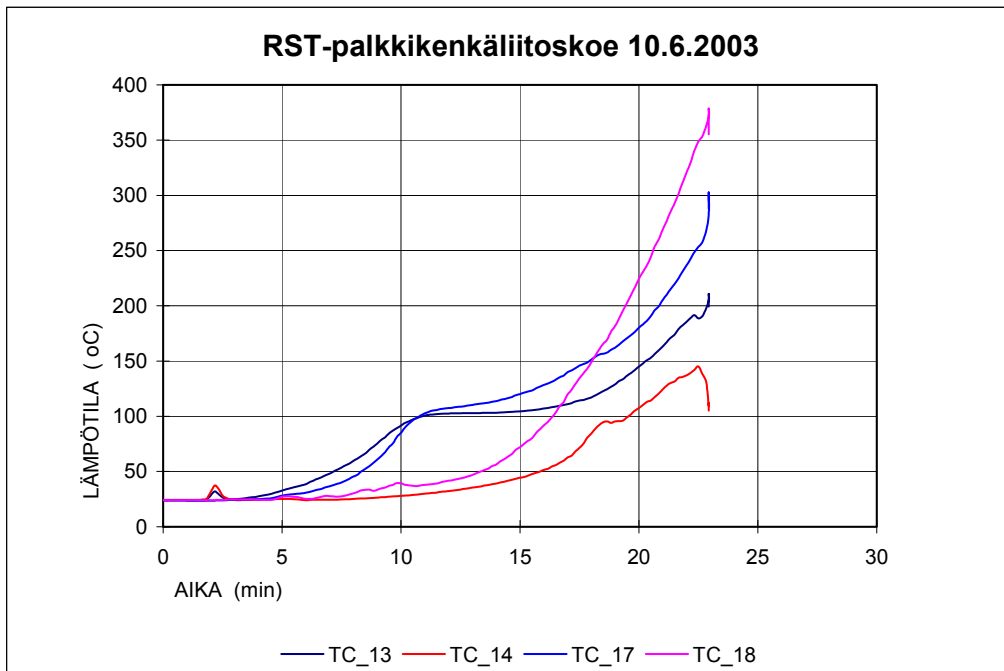
Kuva A.11. Palkkikengän lämpötilat (kiinnitys keskipalkkiin): tc1 alapinnassa, tc2 ja tc5 sivuilla sekä tc3 ja tc4 päädysssä palkkien välissä.



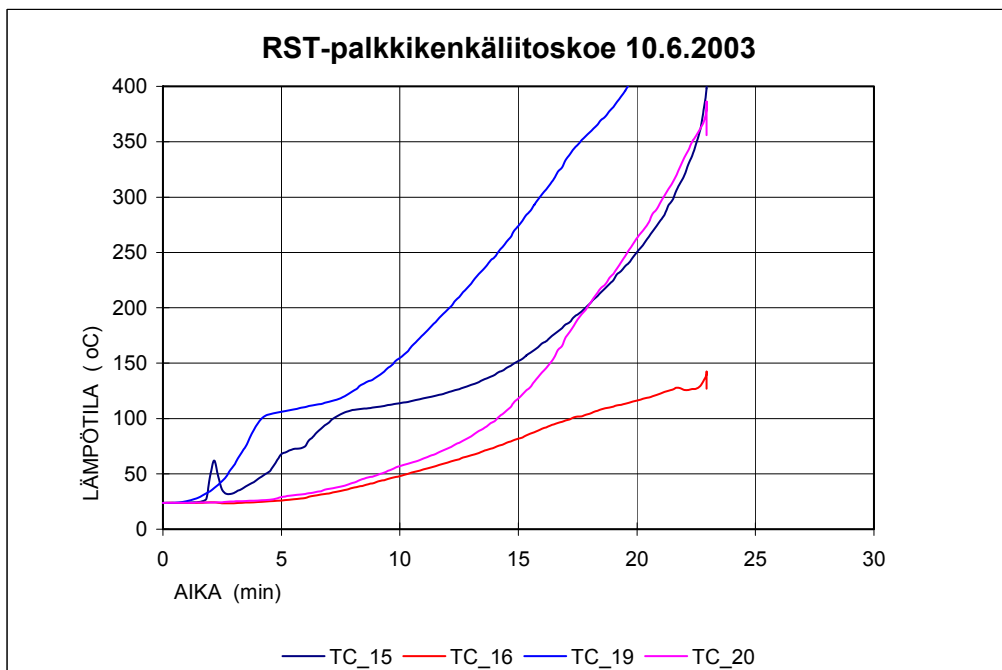
Kuva A.12. Palkkikengän lämpötilat (kiinnitys reunapalkkiin): tc7 alapinnassa, tc8 ja tc11 sivuilla sekä tc9 ja tc10 päädyssä palkkien välissä.



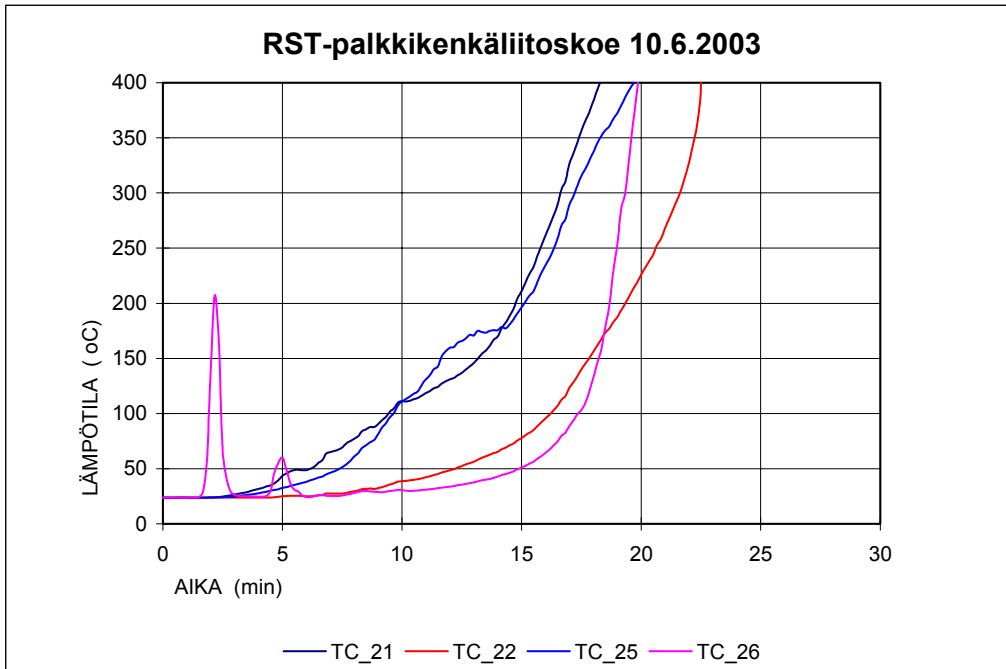
Kuva A.13. Palkkien välisestä raosta mitatut lämpötilat: tc6 keskellä ja tc12 reunalla.



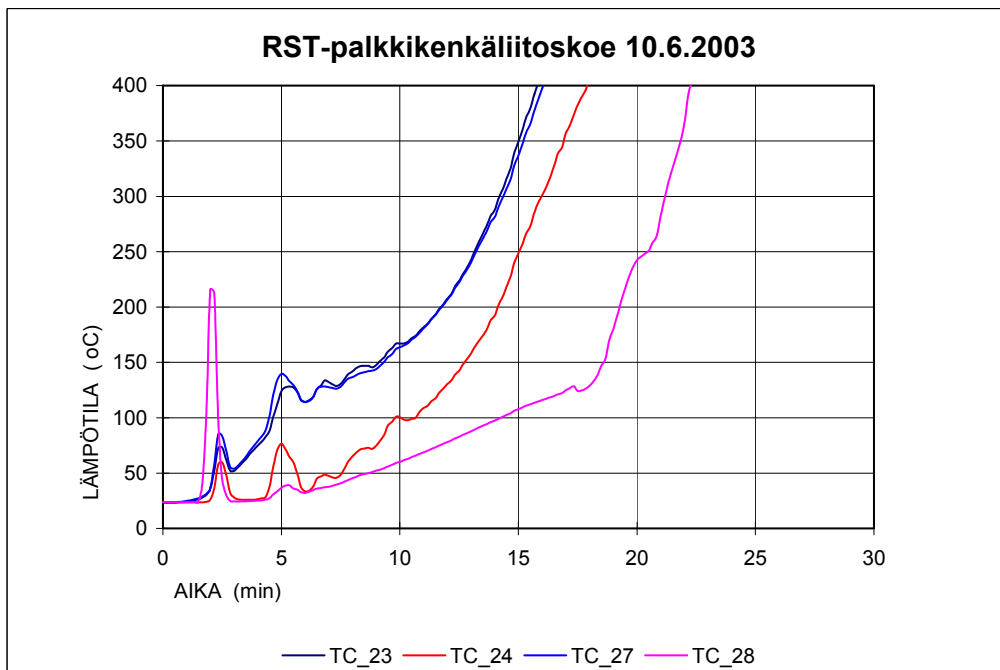
Kuva A.14. Puupalkin (90 x 270) lämpötilat: tc13 ja tc17 18 mm etäisyydellä alapinnasta sekä tc14 ja tc18 30 mm etäisyydellä alapinnasta.



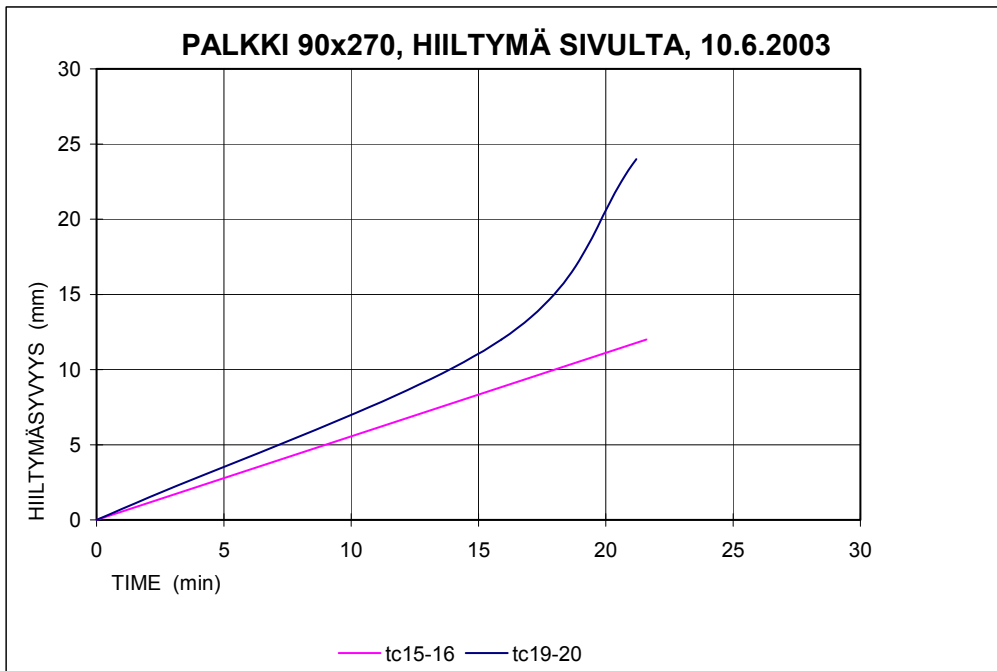
Kuva A.15. Puupalkin (90 x 270) lämpötilat: tc15 ja tc19 12 mm etäisyydellä pystysivusta sekä tc16 ja tc20 24 mm etäisyydellä pystypinnasta.



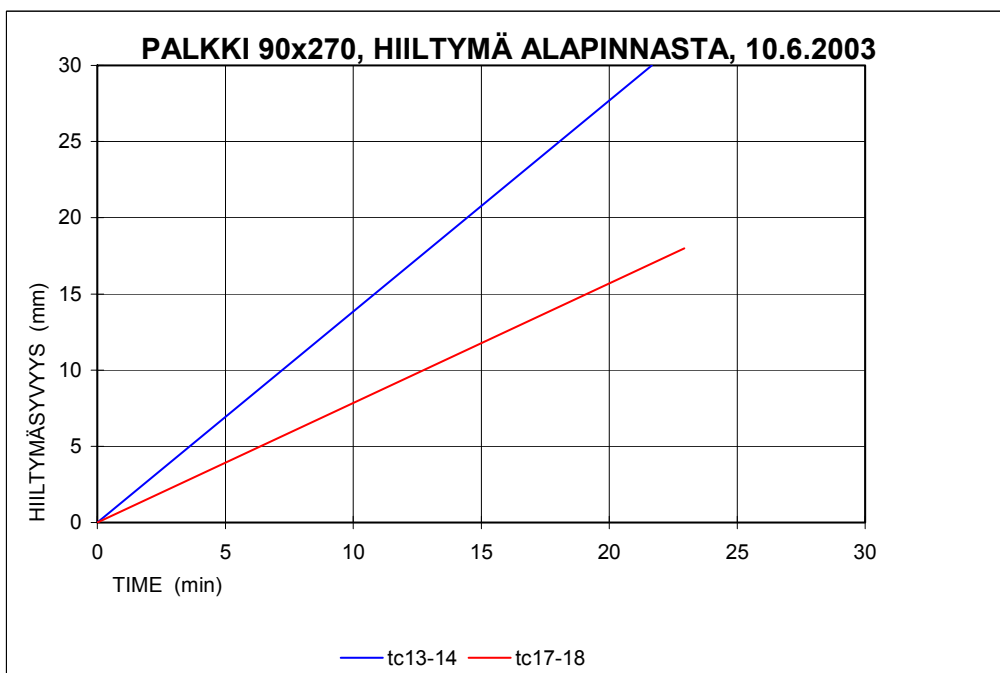
Kuva A.16. Puupalkin (115 x 315) lämpötilat: tc21 ja tc25 18 mm etäisyydellä alapinnasta sekä tc22 ja tc26 30 mm etäisyydellä alapinnasta.



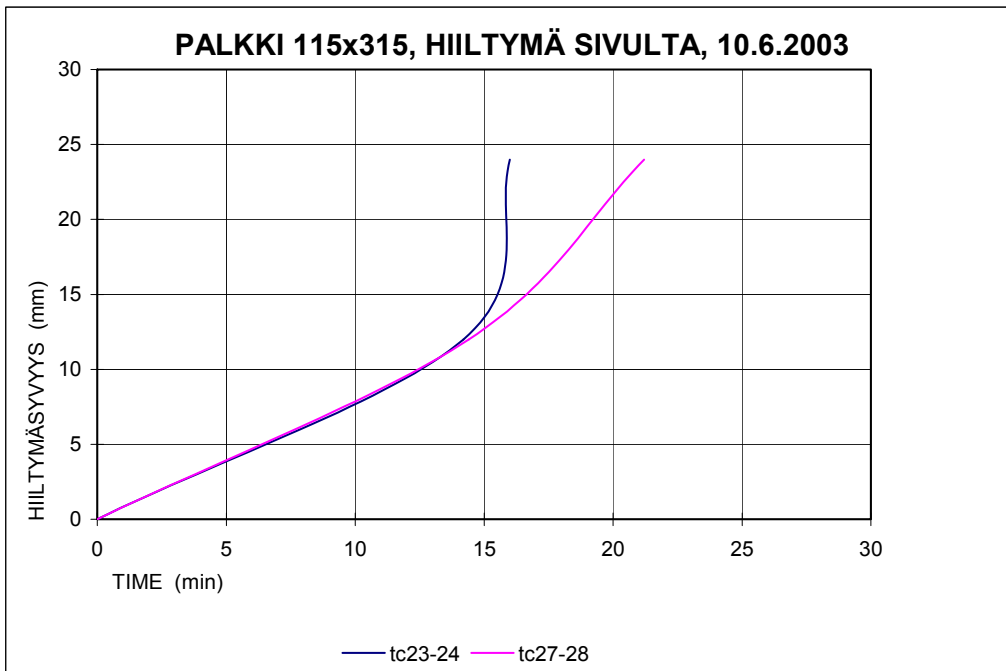
Kuva A.17. Puupalkin (115 x 315) lämpötilat: tc23 ja tc27 12 mm etäisyydellä pystysivusta sekä tc24 ja tc28 24 mm etäisyydellä pystypinnasta.



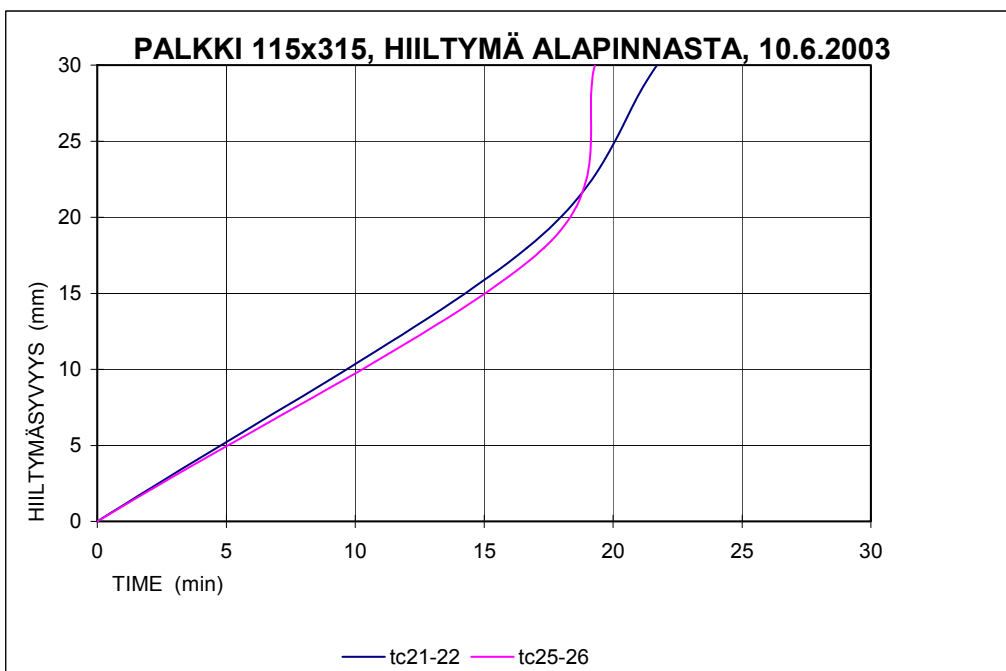
Kuva A.18. Hiiltymäsyvyys palkin 90 x 270 sivuilla.



Kuva A.19. Hiiltymäsyvyys palkin 90 x 270 alapinnassa.



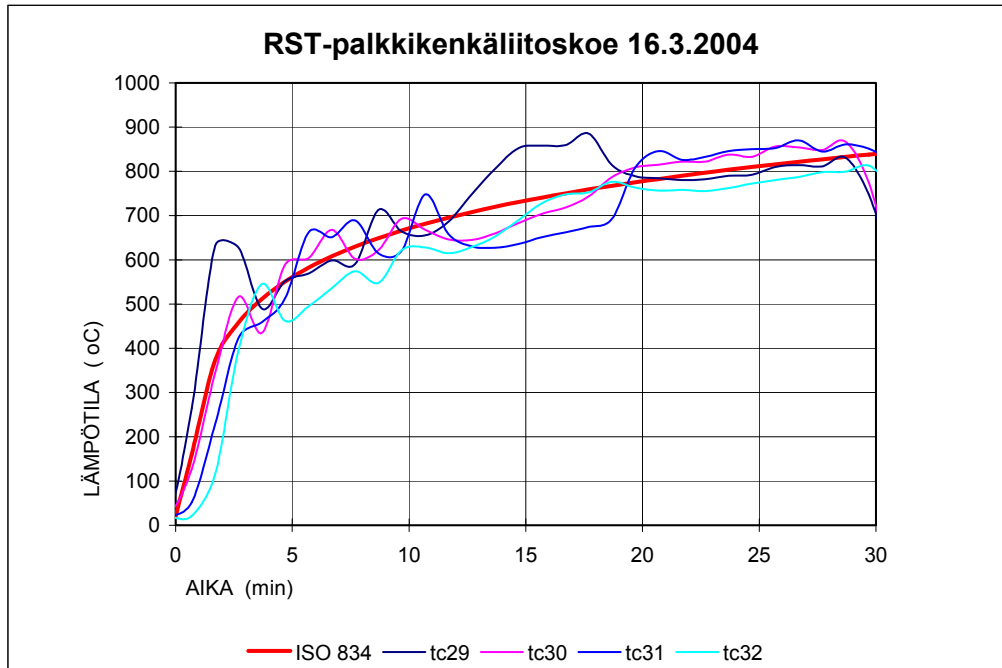
Kuva A.20. Hiiltymäsyvyys palkin 115 x 315 sivuilla.



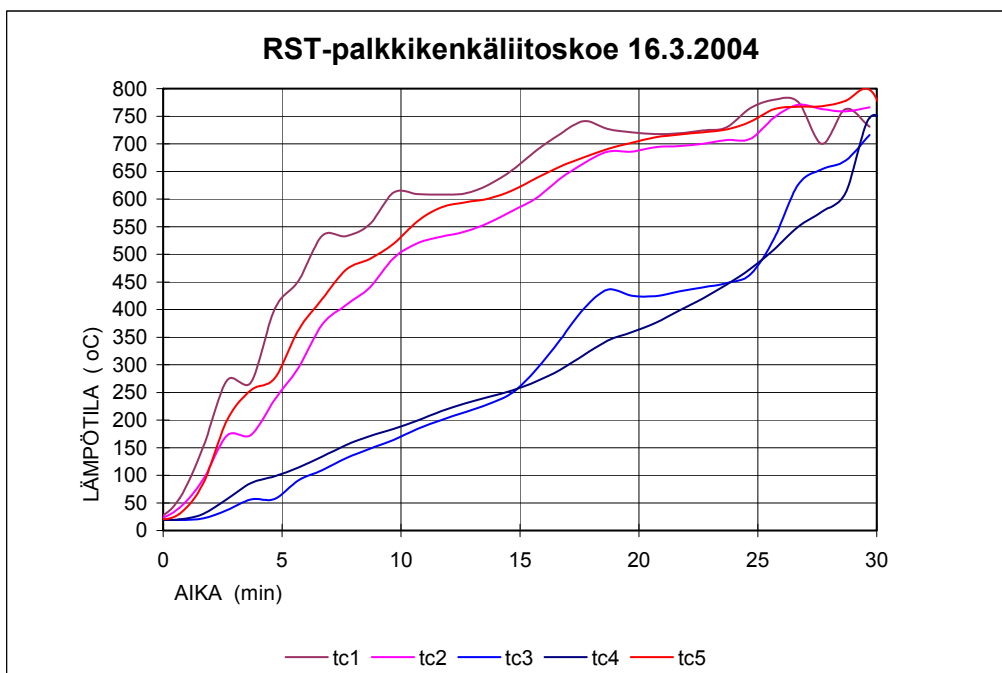
Kuva A.21. Hiiltymäsyvyys palkin 115 x 315 alapinnassa.

A.4.2. Koekappale 2

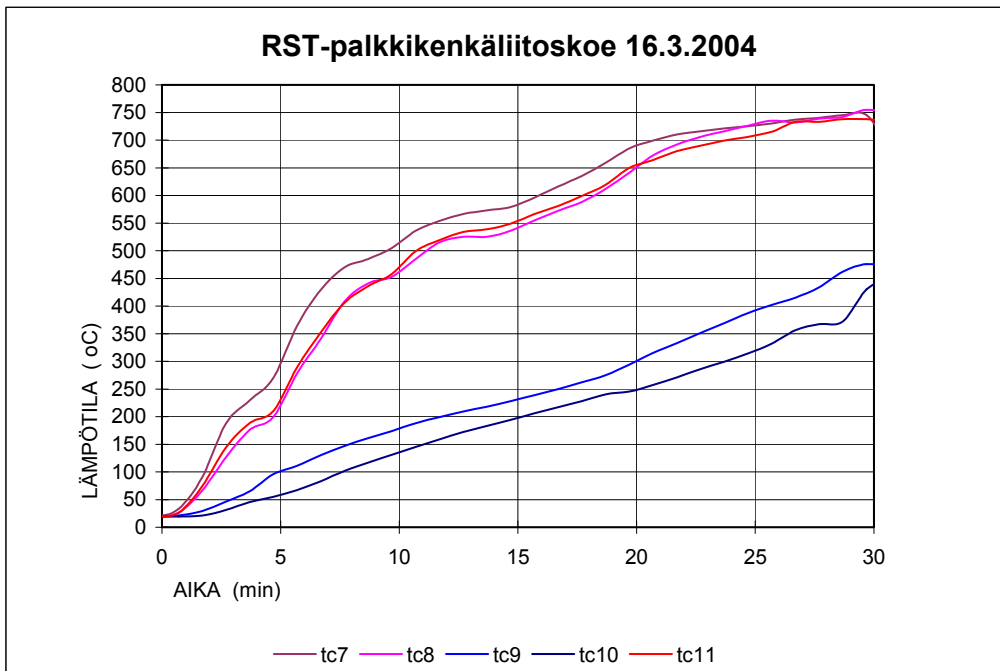
Koe 16.3.2004



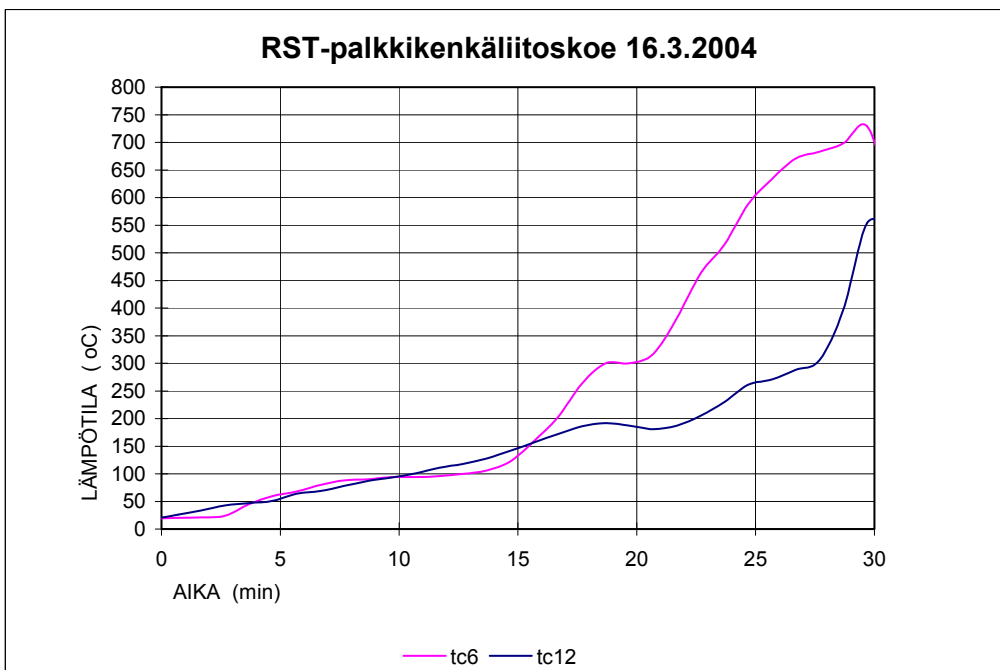
Kuva A.22. Uunin lämpötilat.



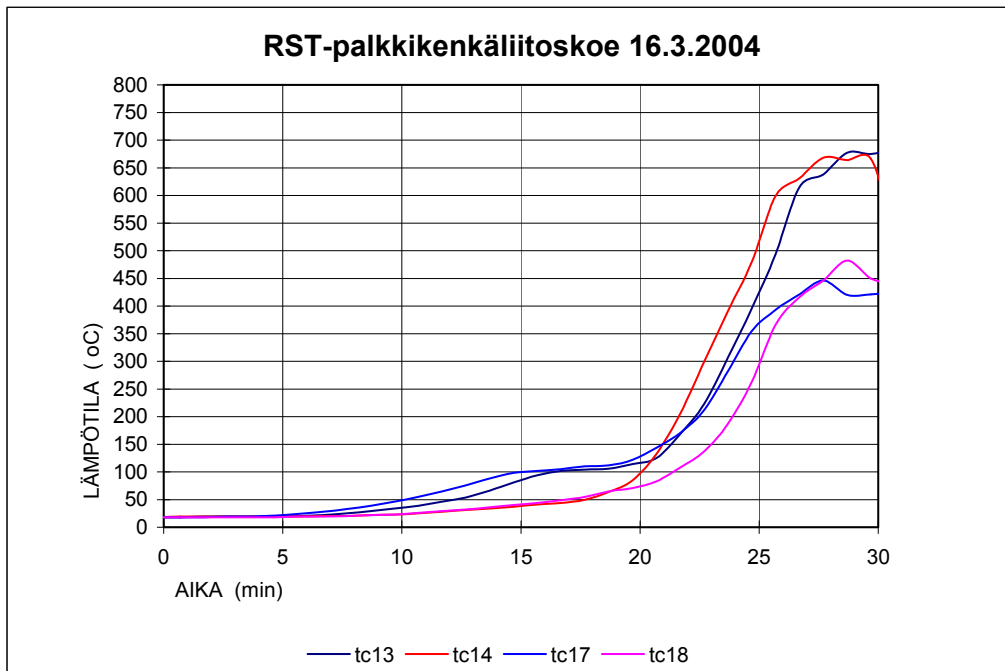
Kuva A.23. Palkkikengän lämpötilat (kiinnitys keskipalkkiin): tc1 alapinnassa, tc2 ja tc5 sivuilla sekä tc3 ja tc4 päädysä palkkien välissä.



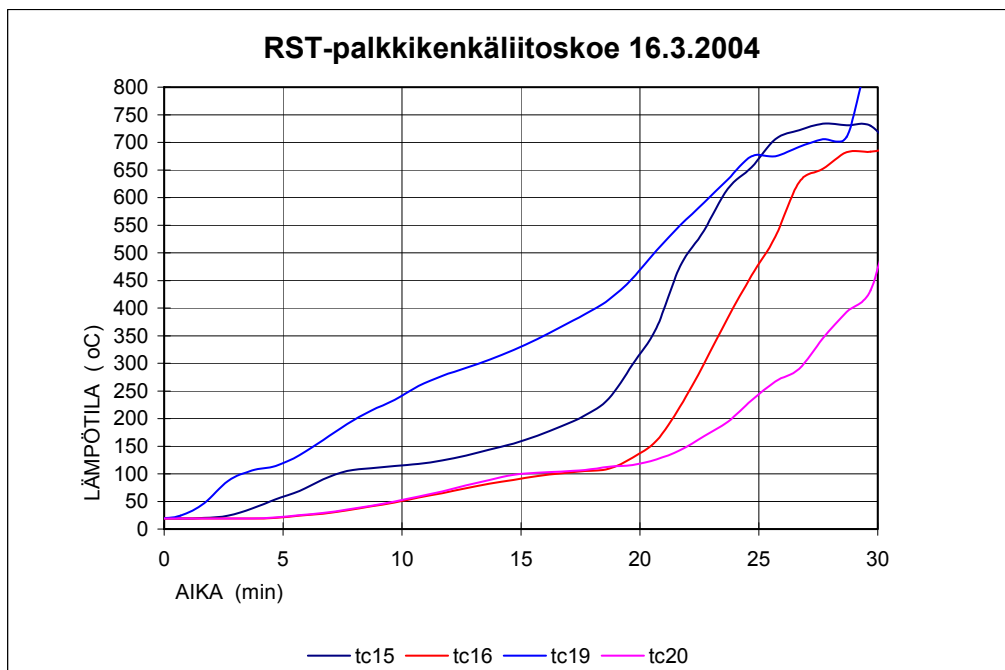
Kuva A.24. Palkkikengän lämpötilat (kiinnitys reunapalkkiin): tc7 alapinnassa, tc8 ja tc11 sivuilla sekä tc9 ja tc10 päädyssä palkkien välissä.



Kuva A.25. Palkkien välisestä raosta mitatut lämpötilat: tc6 keskellä ja tc12 reunalla.



Kuva A.26. Puupalkin lämpötilat: tc13 ja tc17 18 mm etäisyydellä alapinnasta sekä tc14 ja tc18 30 mm etäisyydellä alapinnasta.

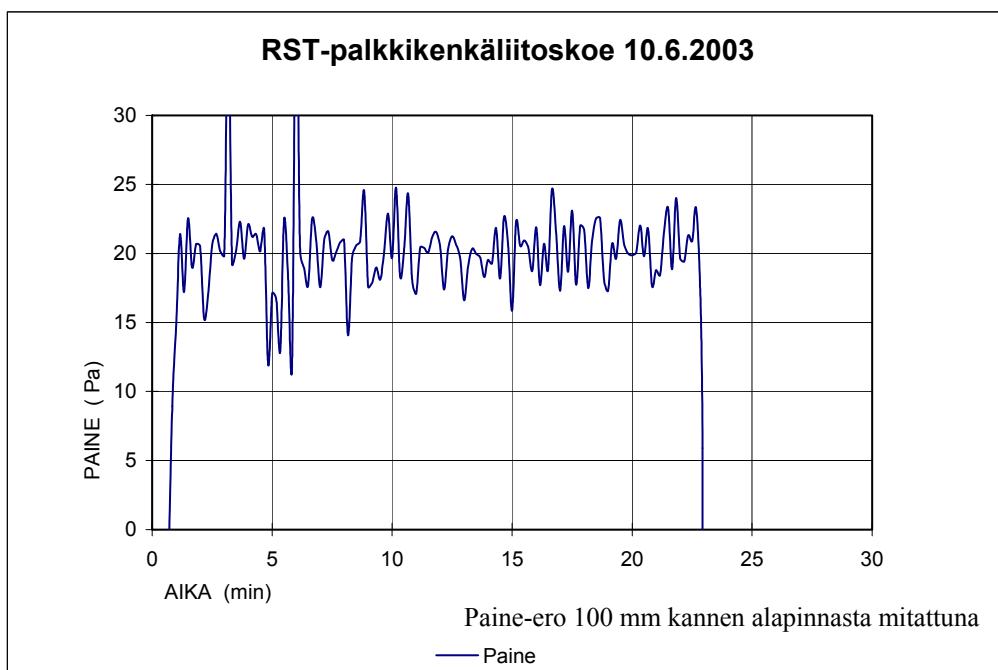


Kuva A.27. Puupalkin lämpötilat: tc15 ja tc19 12 mm etäisyydellä pystysivusta sekä tc16 ja tc20 24 mm etäisyydellä pystypinnasta.

Liite A.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä

A.5.1. Koekappale 1

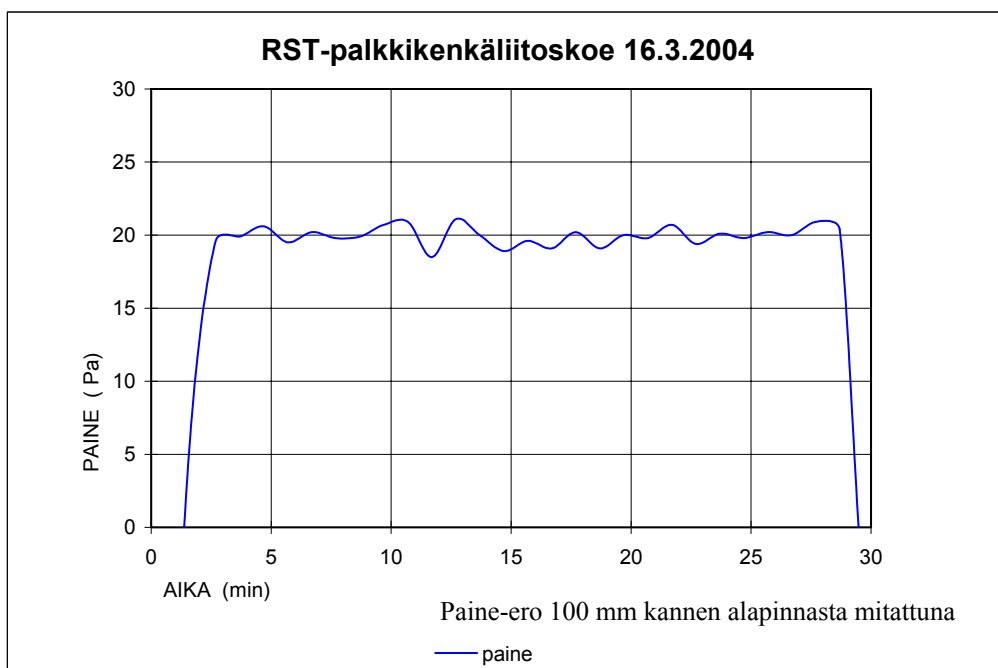
Koe 10.6.2003



Kuva A.28. Kokeen 1 paine-ero uunin ja koehallin välillä.

A.5.2. Koekappale 2

Koe 16.3.2004



Kuva A.29. Kokeen 2 paine-ero uunin ja koehallin välillä.

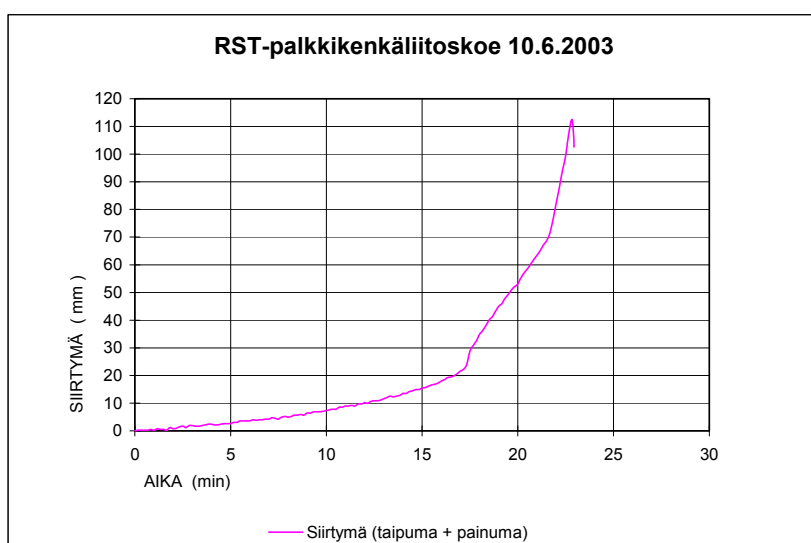
Liite A.6: Havainnot ja mitatut siirtymät

A.6.1. Koekappale 1

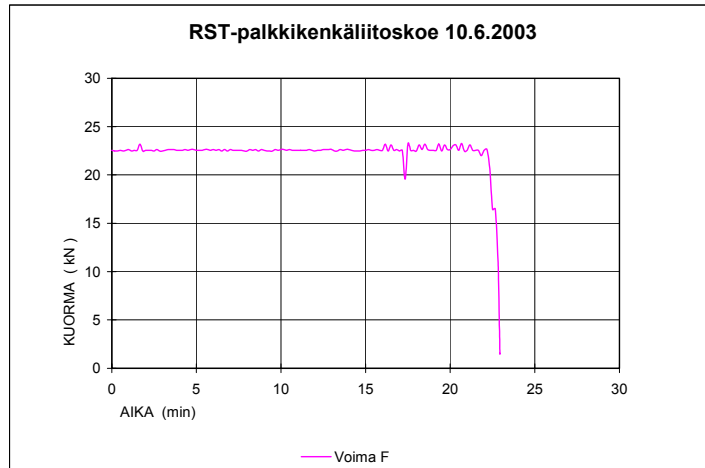
Koe 10.6.2003

Koeaika [min:s]	Havainnot
0:00	Koe alkoi.
1:00	Palkkien pinta alkoi tummua.
1:40	Pinta syttyi.
7:00	Poikkipalkin alapinnan kulmista pieniä paloja pudonnut.
10:00	Tunkkia on pumpattava hiukan koko ajan kuorman pitämiseksi vakiona.
13:00	Poikkipalkin alapinnasta pudonnut lisää pieniä paloja.
17:30	Liitos antoi sivunauloista myöten. Tunkkia pumpattiin uudelleen kuorman saamiseksi koekuorman suuruiseksi. Liitos kantoi kuorman.
20:30	Palkki painui koko ajan ja tunkkia oli pumpattava jatkuvasti.
22:00	Palkkikenkä painunut 60–70 mm poikkipalkin sisään.
23:00	Koe lopetettiin. Palkki ei enää kantanut kuormaa.

Kuva A.30:ssä on esitetty poikkipalkin keskikohdan siirtymä ajan funktiona palkin päältä mitattuna. Siirtymä sisältää sekä palkin taipuman että painuman. Kuvassa A.31 on esitetty kuormitus ajan funktiona.



Kuva A.30. Poikkipalkin keskikohdan siirtymä.



Kuva A.31. Palkin kuorma.

A.6.2. Koekappale 2

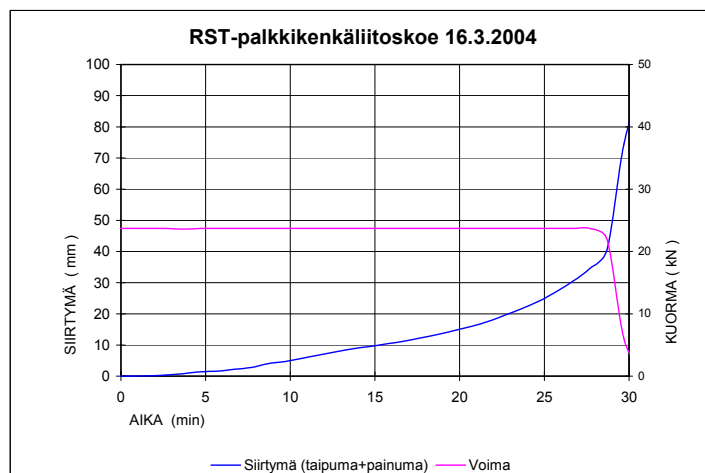
Koe 16.3.2004

Koeaika [min:s]

Havainnot

0:00	Koe alkoi.
1:15	Palkkien pinta alkoi tummua.
2:00	Pinta syttyi.
17:00	Palkin alapinnasta paloja pudonnut.
22:00	Palkkikenkä painunut puun sisään. Tunkkia on pumpattava silloin tällöin kuorman pitämiseksi vakiona.
28:10	Palkki painui koko ajan ja tunkkia oli pumpattava jatkuvasti.
28:40	Koe lopetettiin. Palkki ei enää kantanut kuormaa.

Naulaus irtosi ensin sivulta ja sen jälkeen päädystä. Kuvassa A.32 on esitetty poikki-palkin keskikohdan siirtymä ja kuormitus ajan funktiona palkin päältä mitattuna. Siirtymä sisältää sekä palkin taipuman että painuman.



Kuva A.32. Poikki-palkin keskikohdan siirtymä ja palkin kuorma.

Liite A.7: Valokuvat

A.7.1. Koe 1

10.6.2003



Kuva A.33. Palkkikenkä pääpalkkiin kiinnitettynä.



Kuva A.34. Palkkikenkäliitos uuniin asennettuna ennen koetta. Kuva uunin edestä.



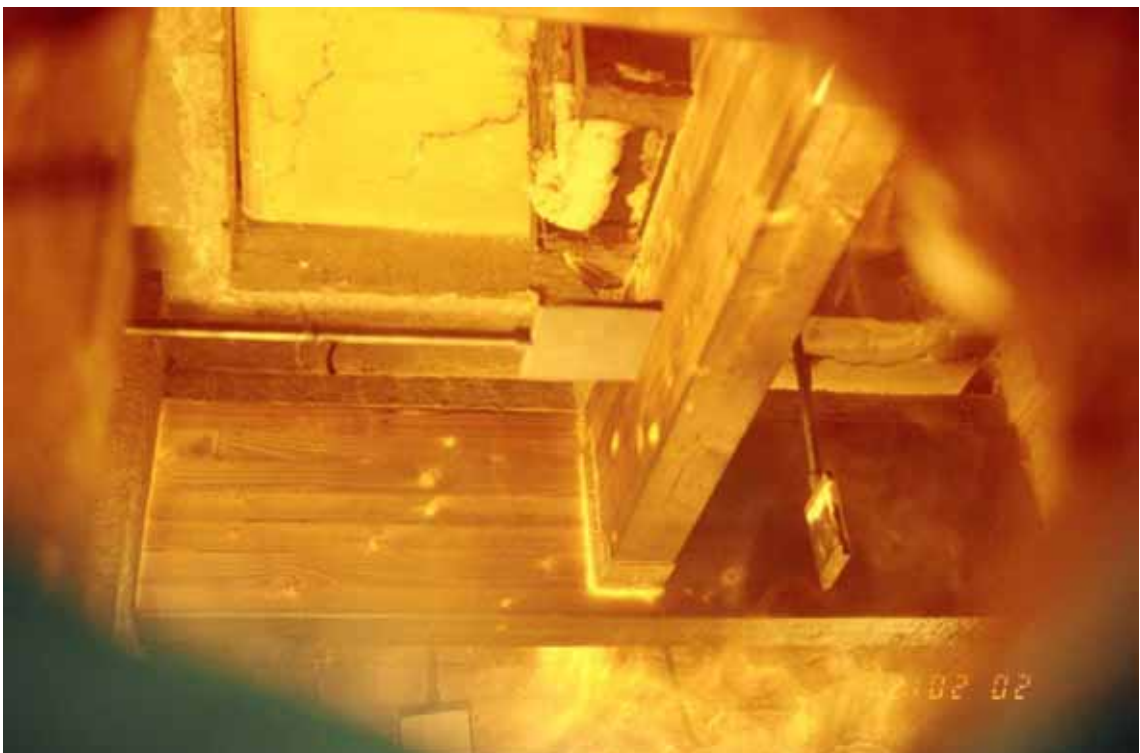
Kuva A.35. Palkkikenkäliitos uuniin asennettuna ennen koetta. Kuva ylhäältä.



Kuva A.36. Palkkikenkäliitos uuniin asennettuna ennen koetta



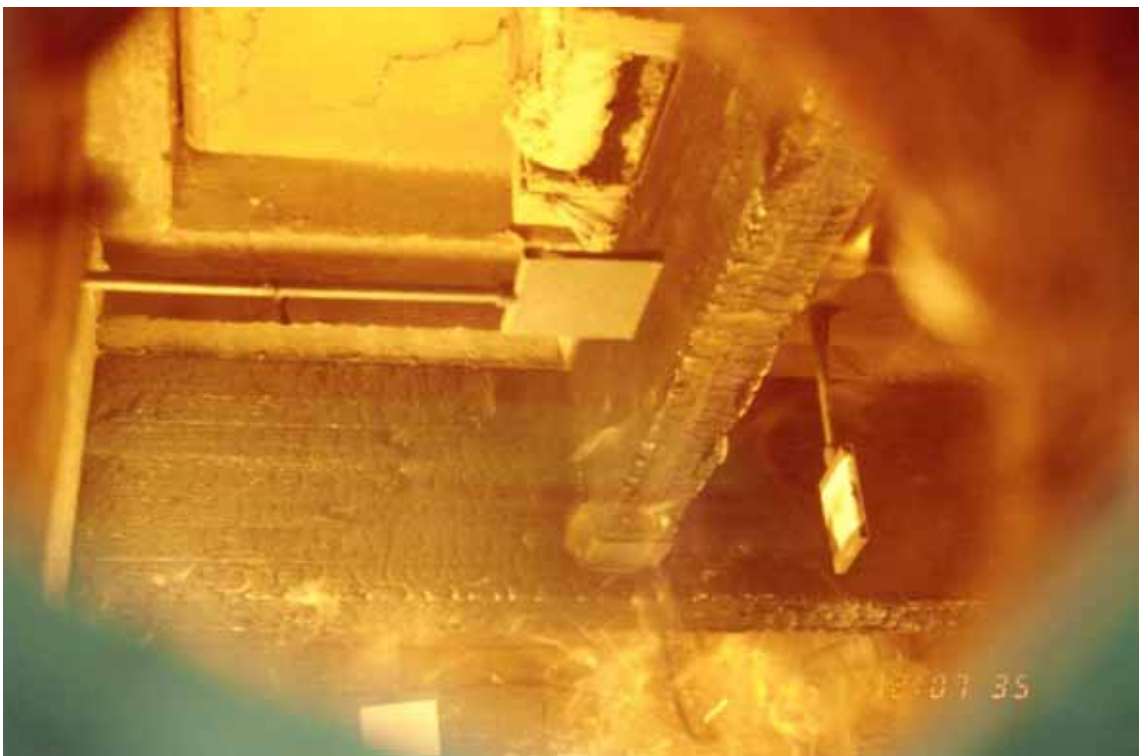
Kuva A.37. Koeaika 1 min 2 s.



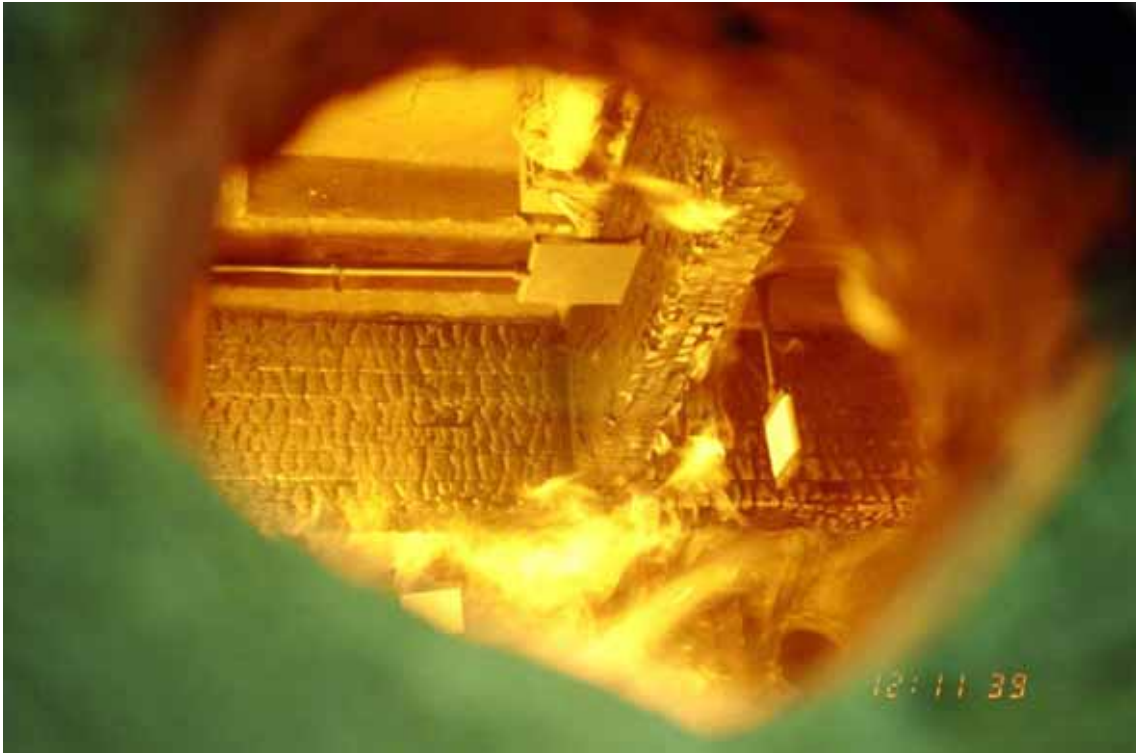
Kuva A.38. Koeaika 2 min 2 s.



Kuva A.39. Koeaika 4 min 58 s.



Kuva A.40. Koeaika 7 min 35 s.



Kuva A.41. Koeaika 11 min 39 s.



Kuva A.42. Koeaika 17 min 48 s.



Kuva A.43. Koeaika 20 min 58 s.



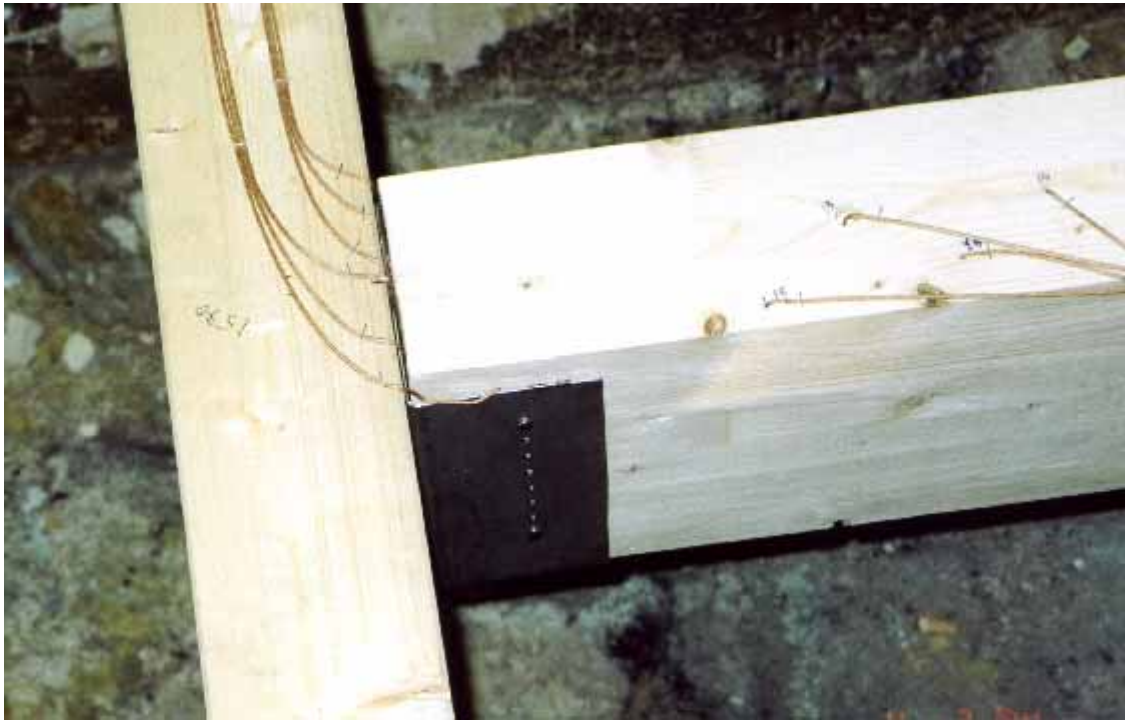
Kuva A.44. Koeaika 22 min 50 s.



Kuva A.45. Koekappale kokeen jälkeen.



Kuva A.46. Koekappale kokeen jälkeen.



Kuva A.47. Palkkikenkäliitos.



Kuva A.48. Palkit ja palkkikenkäliitokset.



Kuva A.49. Palkkikenkäliitos uunin sisältä katsottuna.



Kuva A.50. Koeaika 26 min 30 s.



Kuva A.51. Koeaika 28 min 30 s.



Kuva A.52. Koekappale kokeen jälkeen.



Kuva A.53. Poikkipalkin pääpalkin palkkikenkäliitos kokeen jälkeen.



Kuva A.54. Palkkikenkä kokeen jälkeen.



Kuva A.55. Palkkikenkäliitos kokeen jälkeen.



Kuva A.56. Palkkikenkäliitos (reunapalkki) kokeen jälkeen, kun hiiltymä poistettu.



Kuva A.57. Palkkikenkäliitos kokeen jälkeen, kun hiiltymä poistettu.



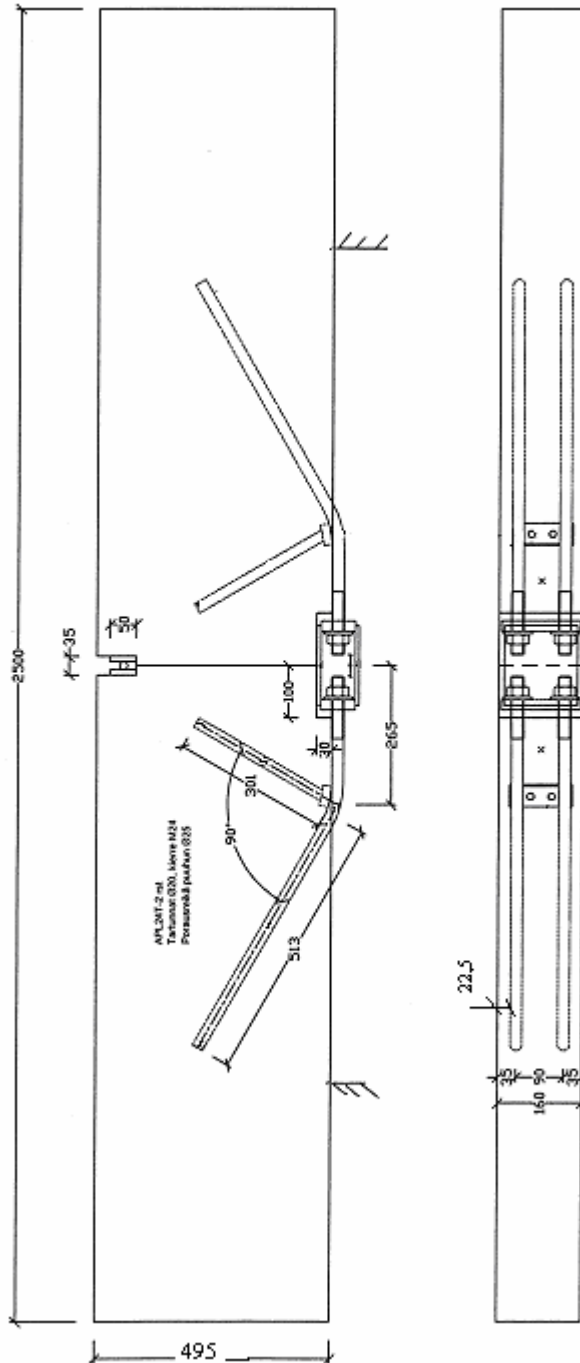
Kuva A.58. Poikkipalkin naulojen kohta kokeen jälkeen, kun hiiltymä poistettu.



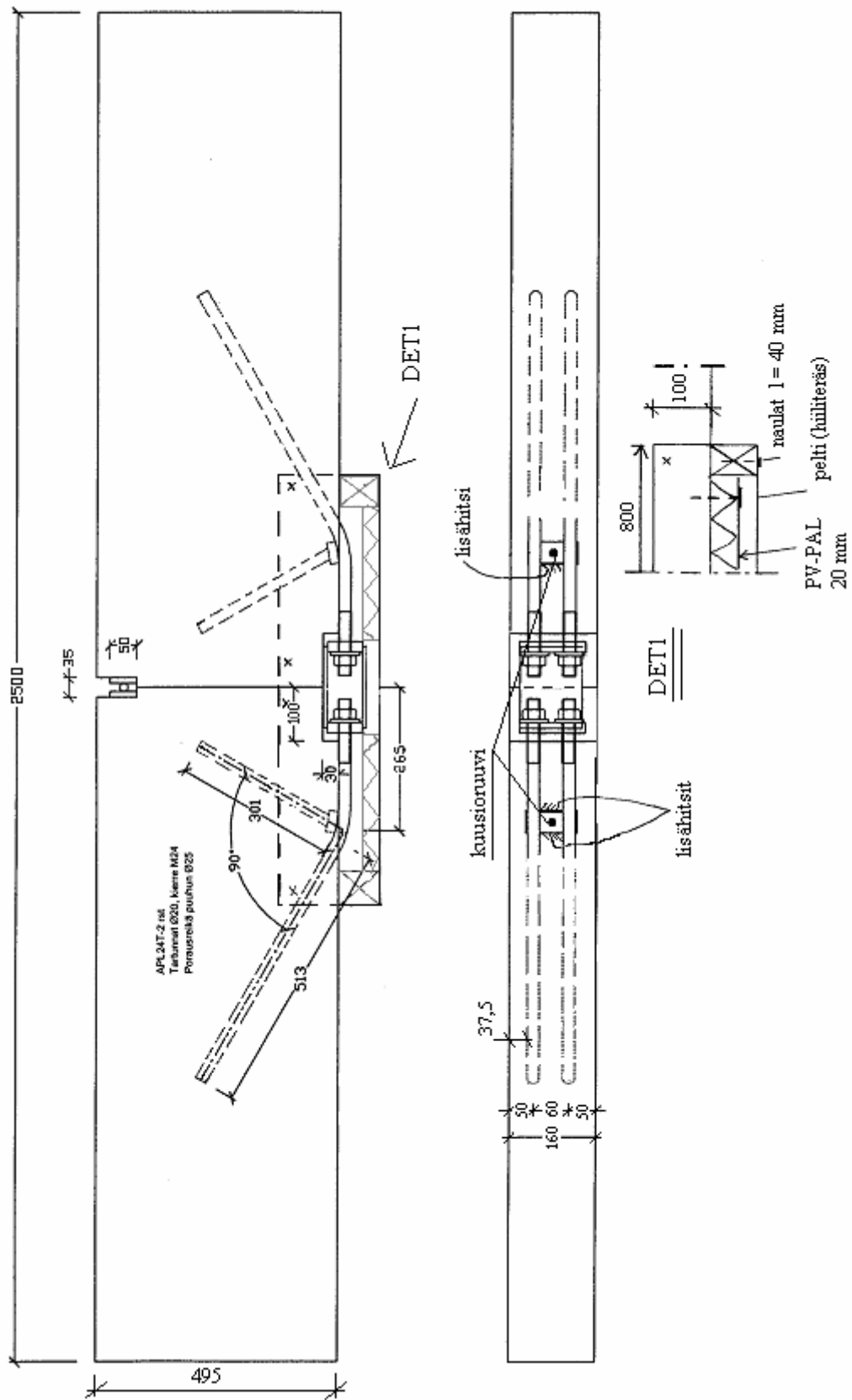
Kuva A.59. Poikkipalkin naulojen kohta kokeen jälkeen, kun hiiltymä poistettu.

Liite B: Liimatankoliitokset

Liite B.1: Koekappalepiirustukset

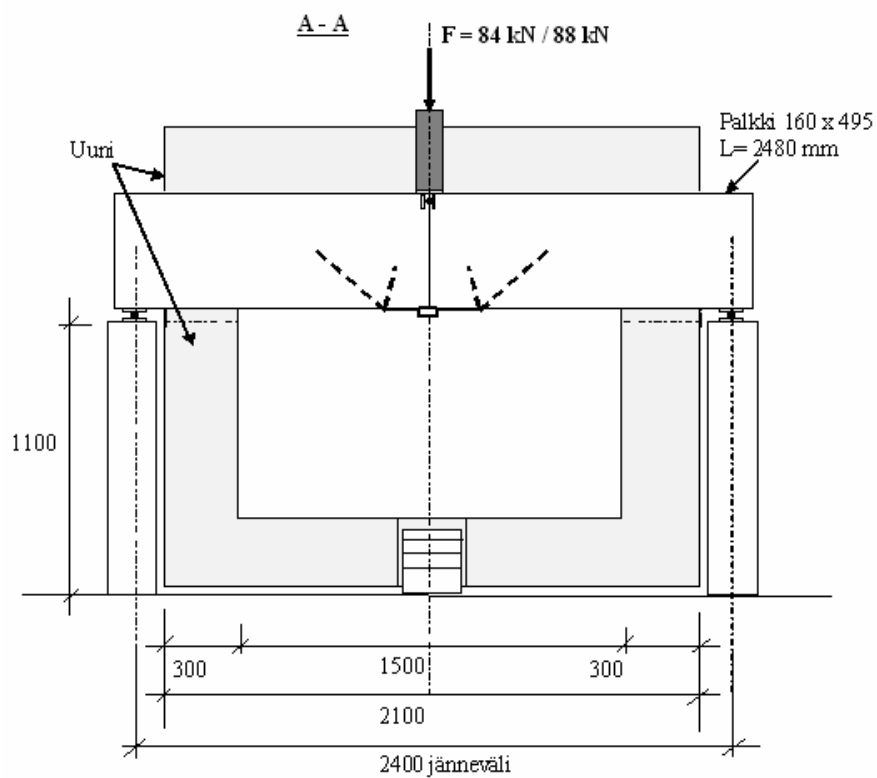
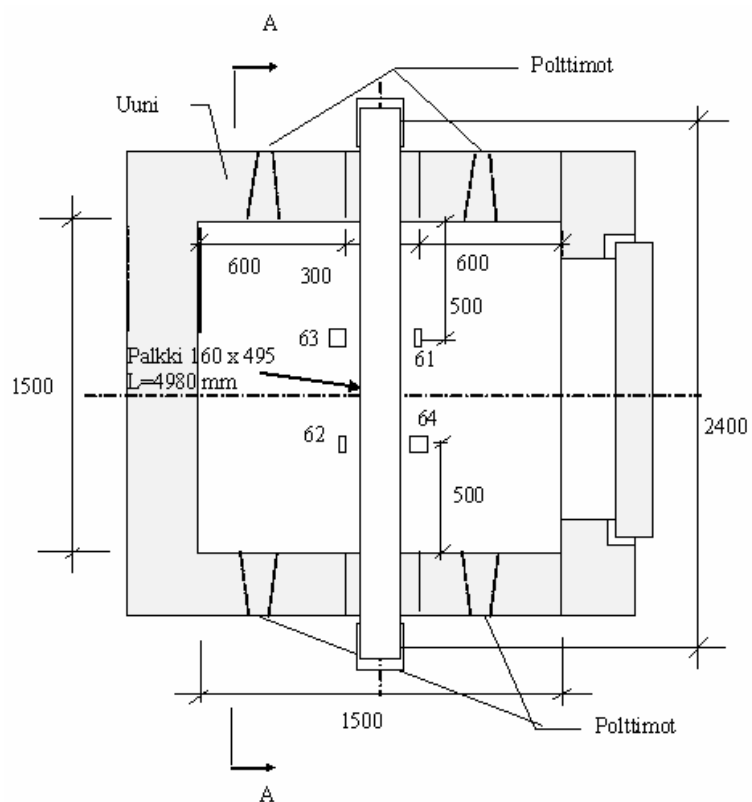


Kuva B.1. Vinotankoliitoksen koekappale 1 (7.10.2003).



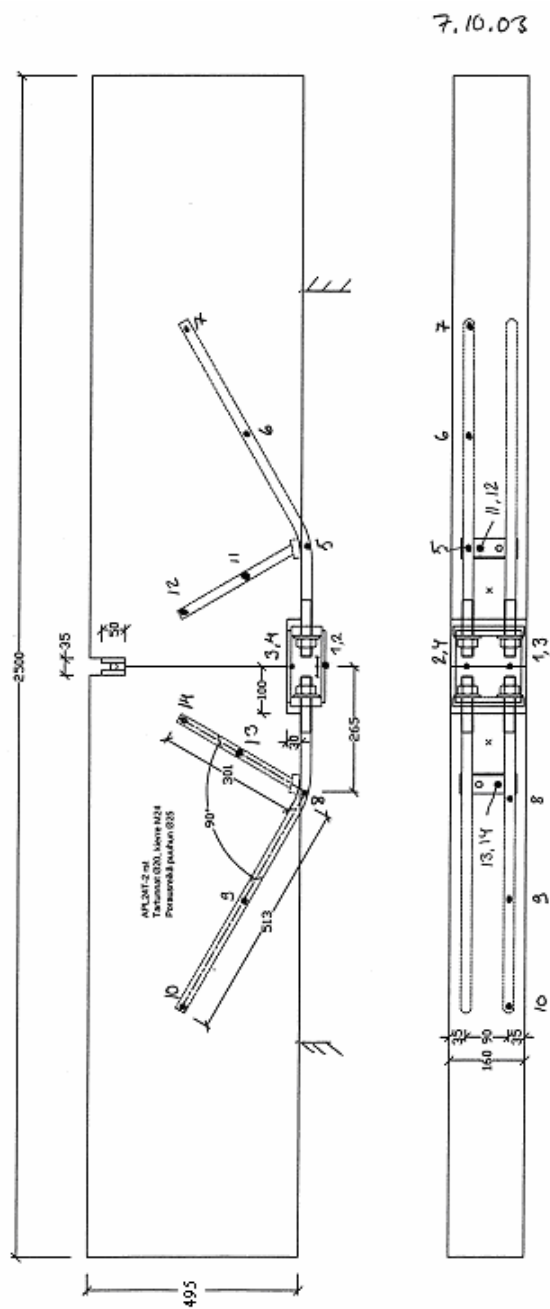
Kuva B.2. Vinotankoliitoksen koekappale 2 (15.10.2003).

Liite B.2: Koejärjestelyt

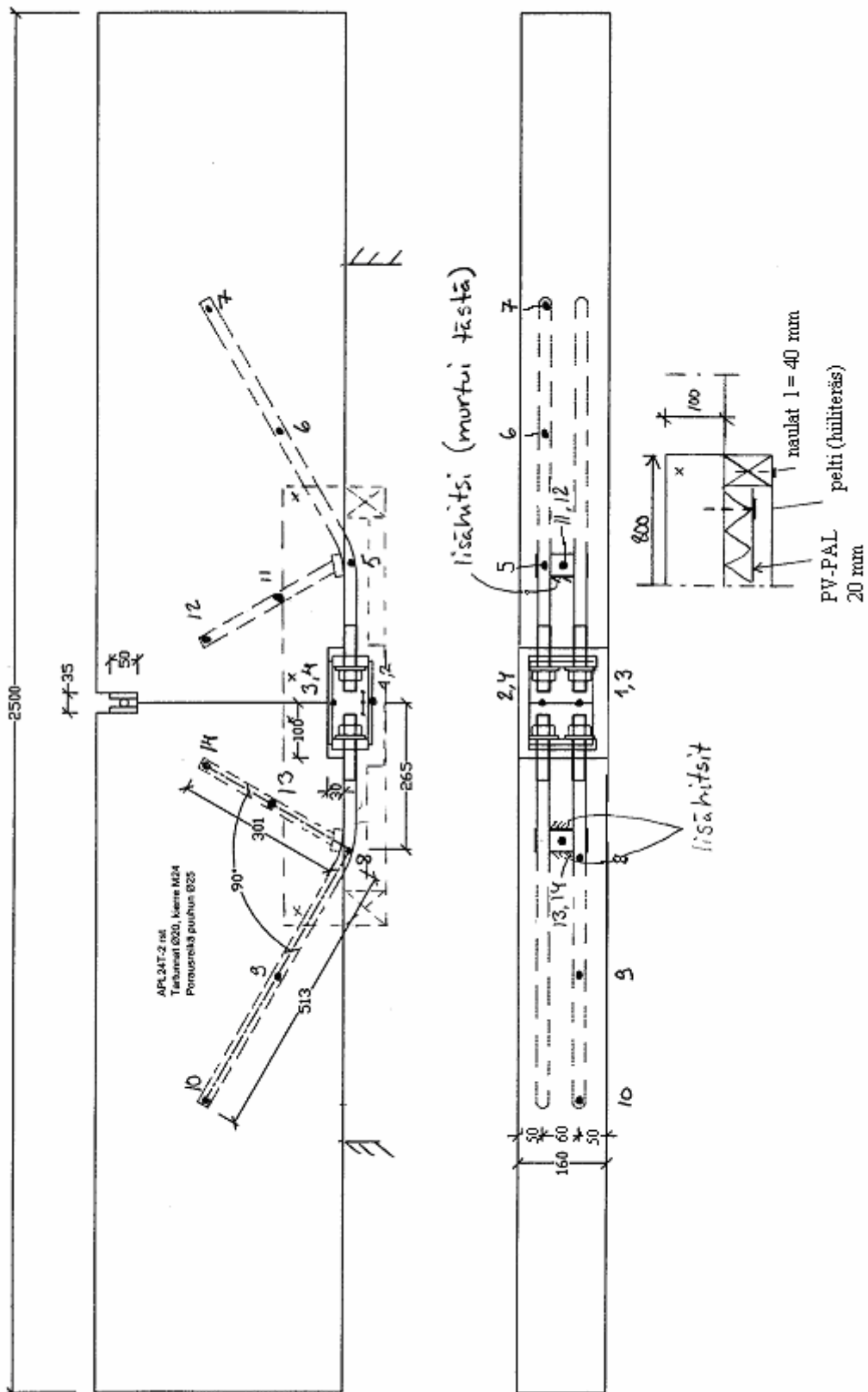


Kuva B.3. Koejärjestely.

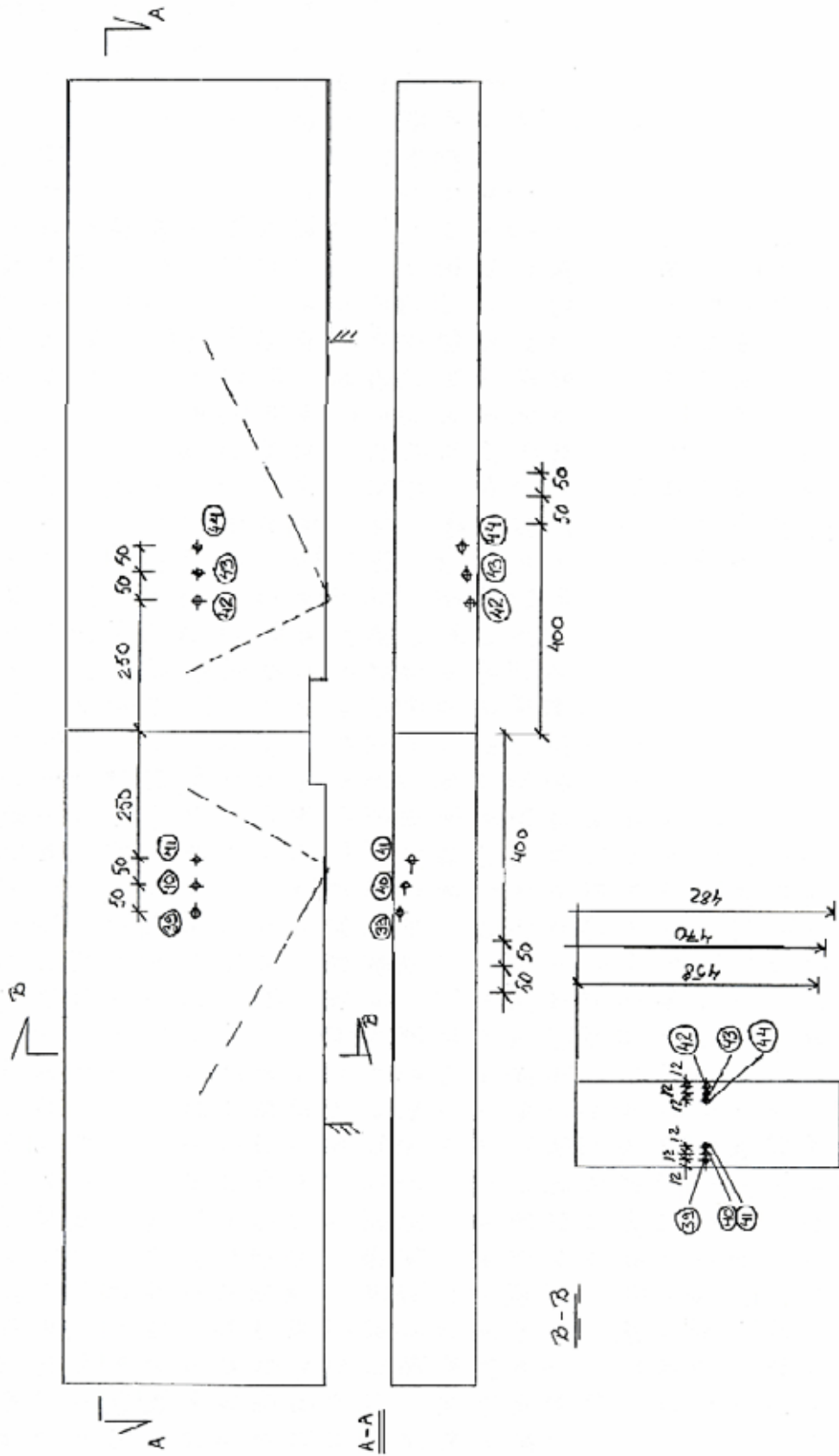
Liite B.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat



Kuva B.4. Vinotankoliitoksen lämpötilojen mittauspisteet (7.10.2003).



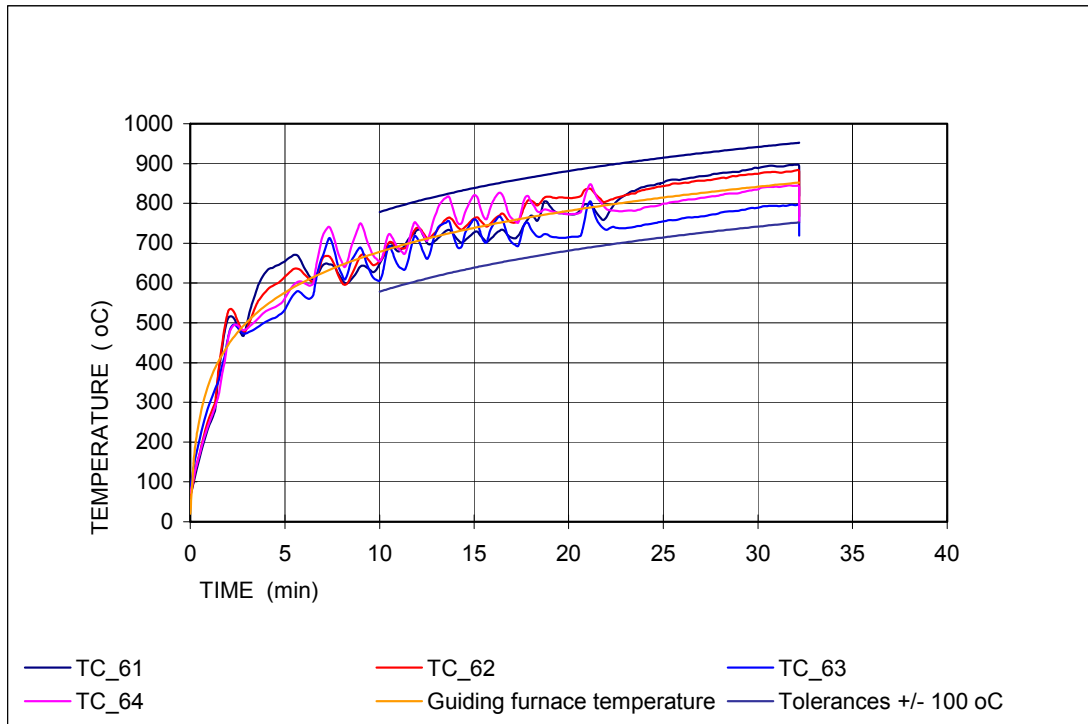
Kuva B.5. Vinotankoliitoksen koekappale ja lämpötilojen mittauspisteet (15.10.2003).



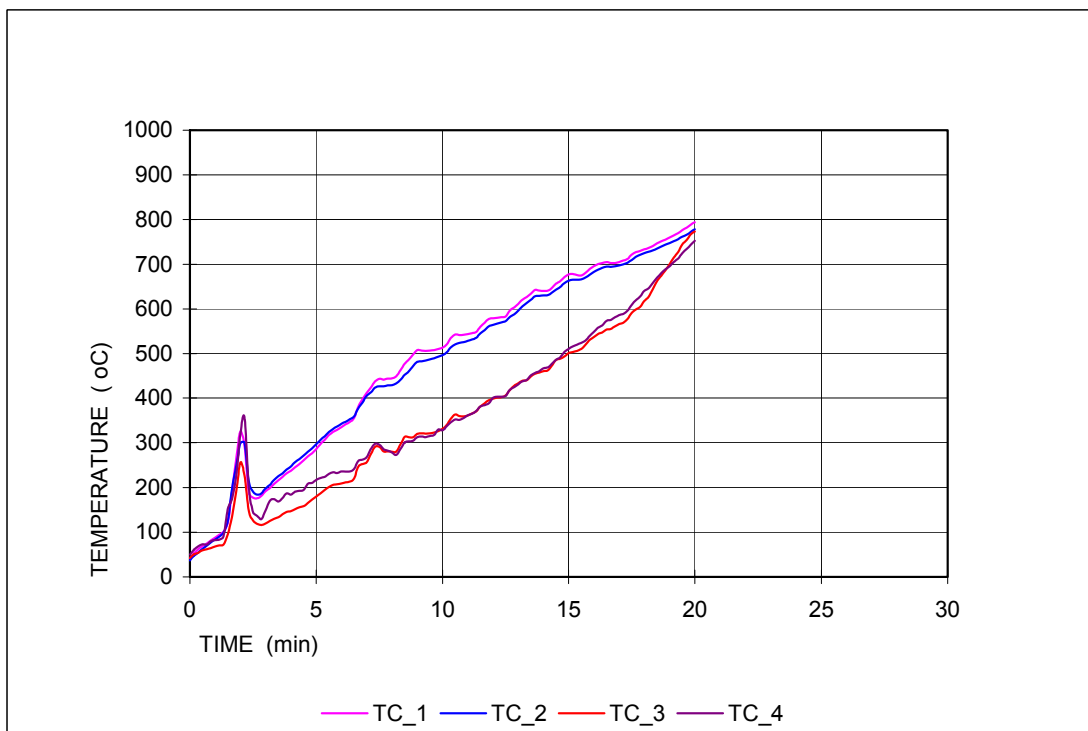
Kuva B.6. Puun lämpötilojen mittauspisteet (15.10.2003).

Liite B.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat

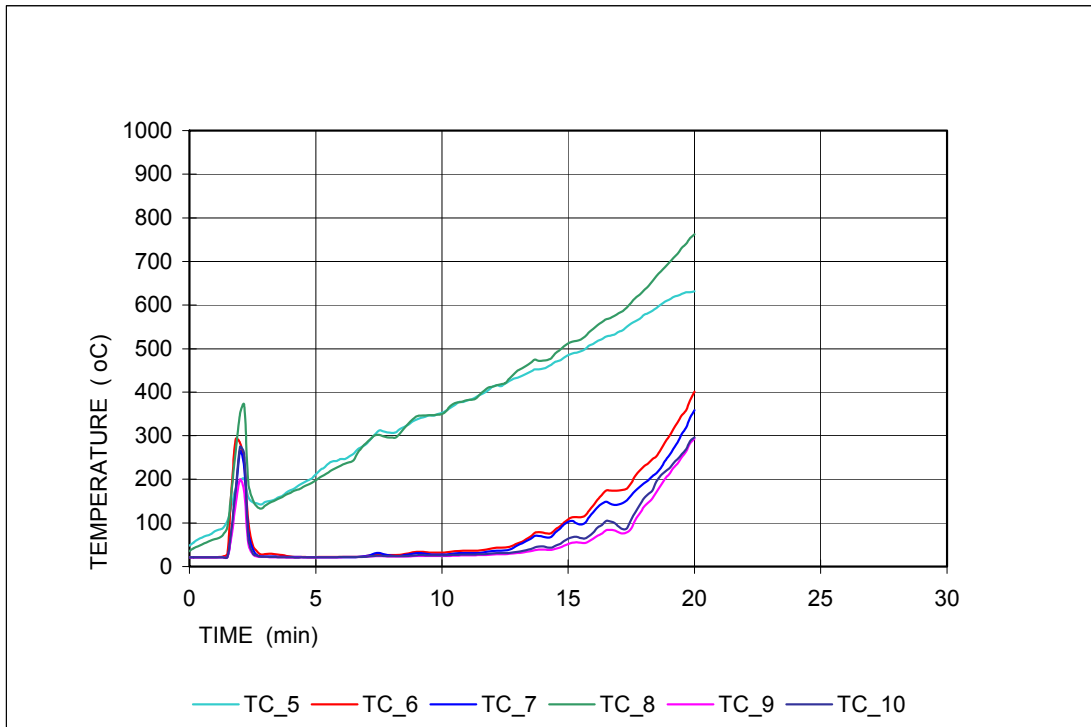
B.4.1. Rst-vinotankoliitos koe 7.10.2003



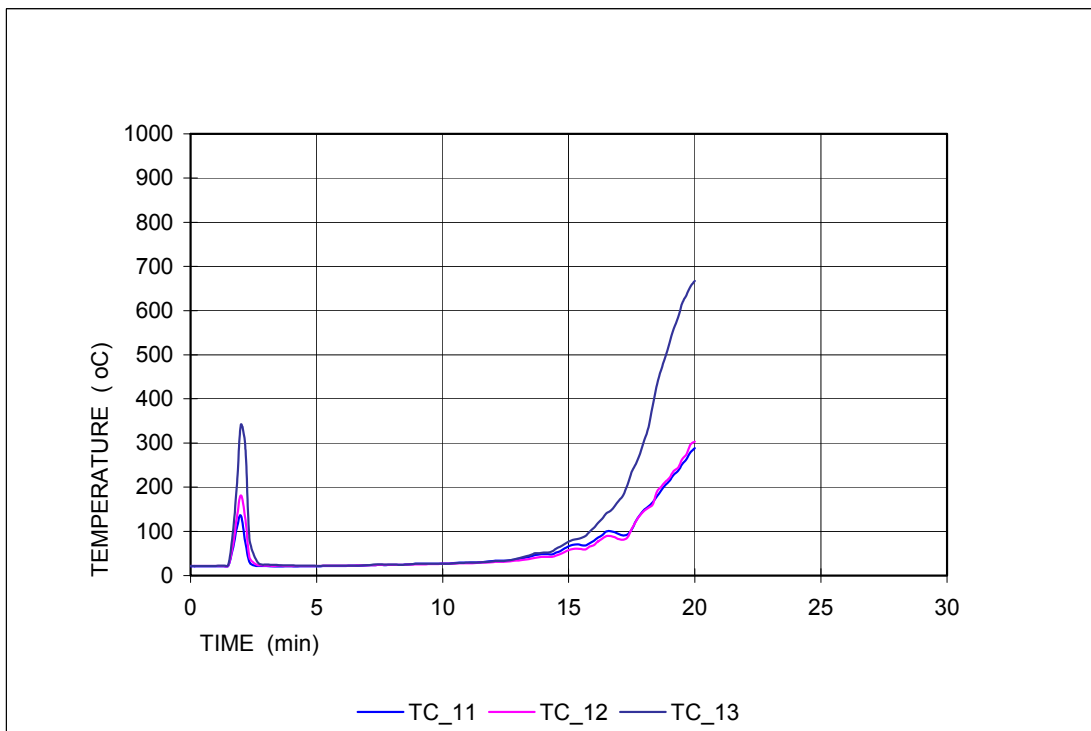
Kuva B.7. Uunin lämpötilat.



Kuva B.8. Palkin keskellä olevan liitoskappaleen lämpötilat, tc1 ja tc2 teräslevyn alapinnassa ja tc3 ja tc4 teräslevyn yläpinnassa.

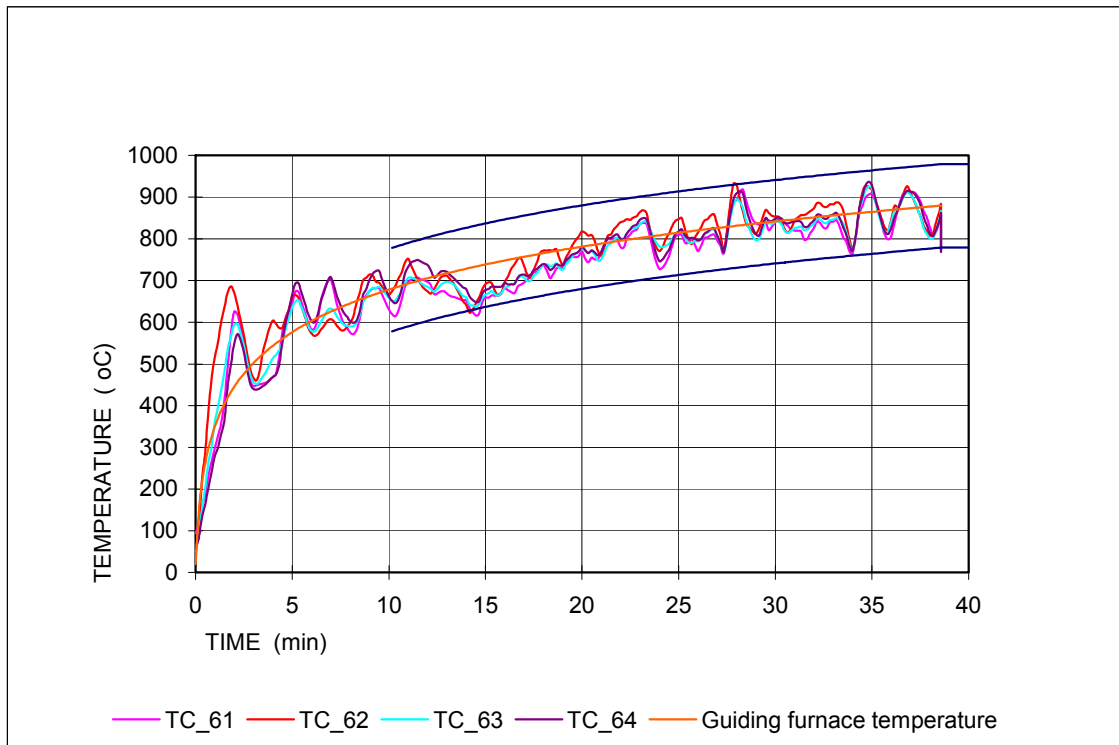


Kuva B.9. Palkin pitkien liimatankojen (513 mm) lämpötilat, tc5 ja tc8 taivutuskohdassa, tc6 ja tc9 tangon keskellä puun sisällä ja tc7 ja tc10 tangon päässä puun sisällä.

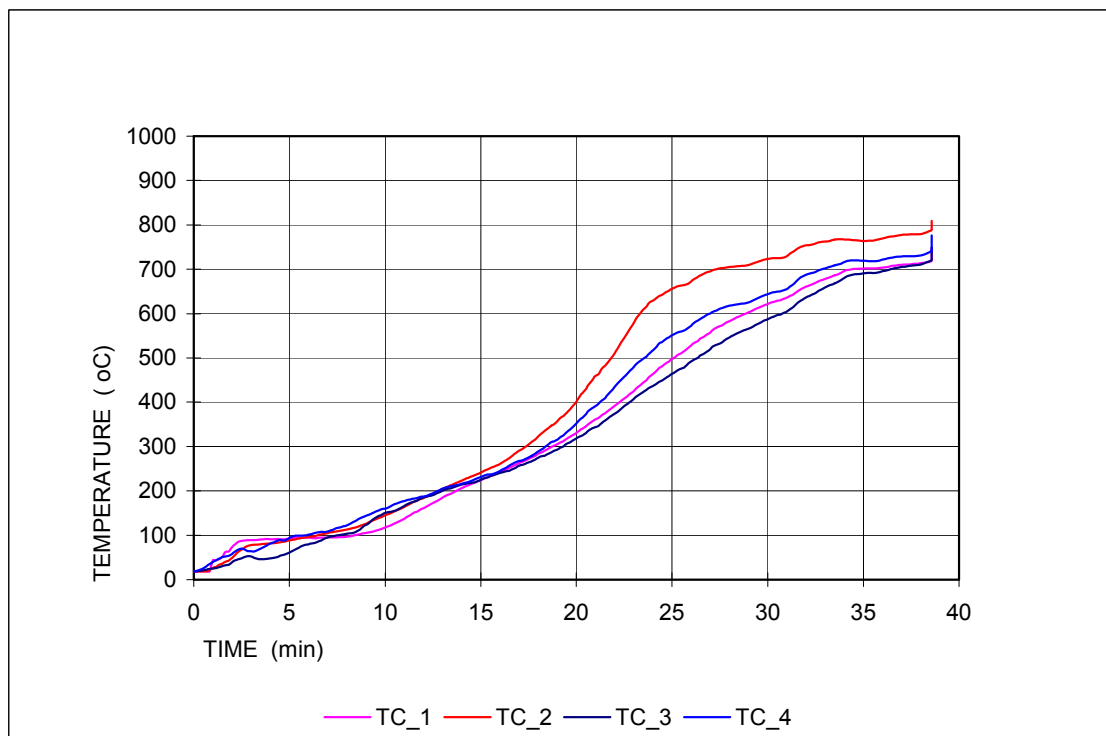


Kuva B.10. Palkin lyhyiden liimatankojen (301 mm) lämpötilat, tc11 ja tc13 tangon keskellä puun sisällä ja tc12 tangon päässä puun sisällä.

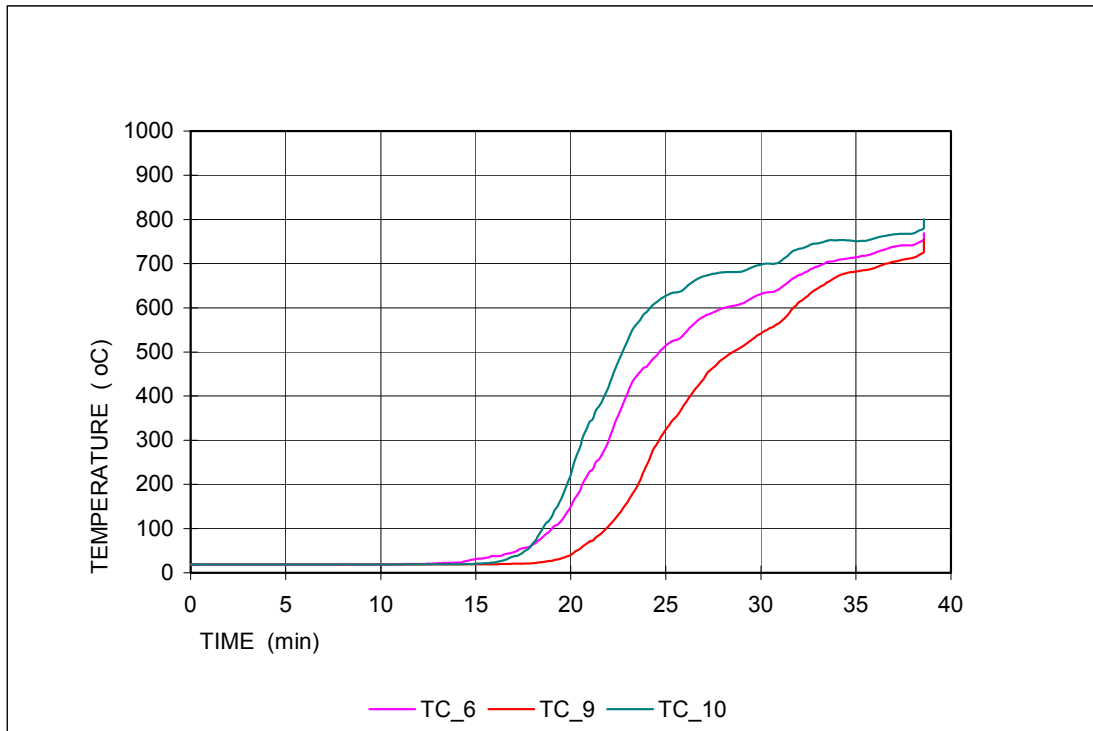
B.4.2. Rst-vinotankoliitos koe 15.10.2003



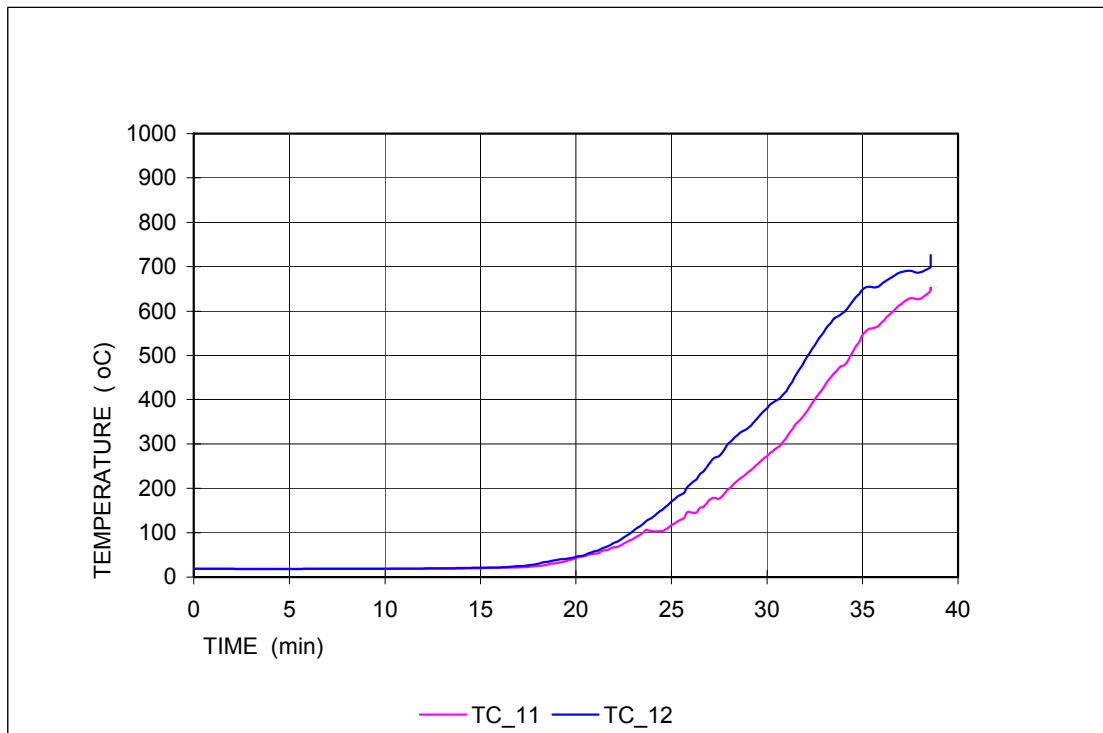
Kuva B.11. Uunin lämpötilat (15.10.2003).



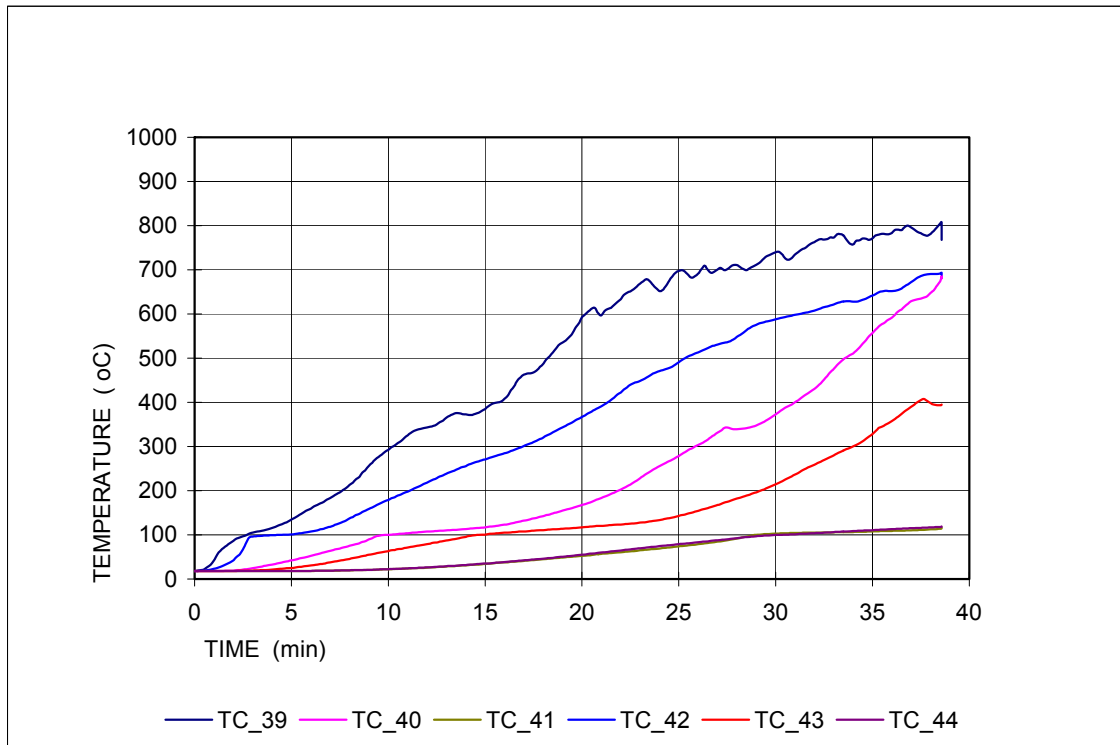
Kuva B.12. Palkin keskellä olevan liitoskappaleen lämpötilat, tc1 ja tc2 teräslevyn alapinnassa ja tc3 ja tc4 teräslevyn yläpinnassa.



Kuva B.13. Palkin pitkien liimatankojen (513 mm) lämpötilat, tc5 ja tc8 (rikki) taivutuskohdassa, tc6 ja tc9 tangon keskellä puun sisällä ja tc7 (rikki) ja tc10 tangon päässä puun sisällä.

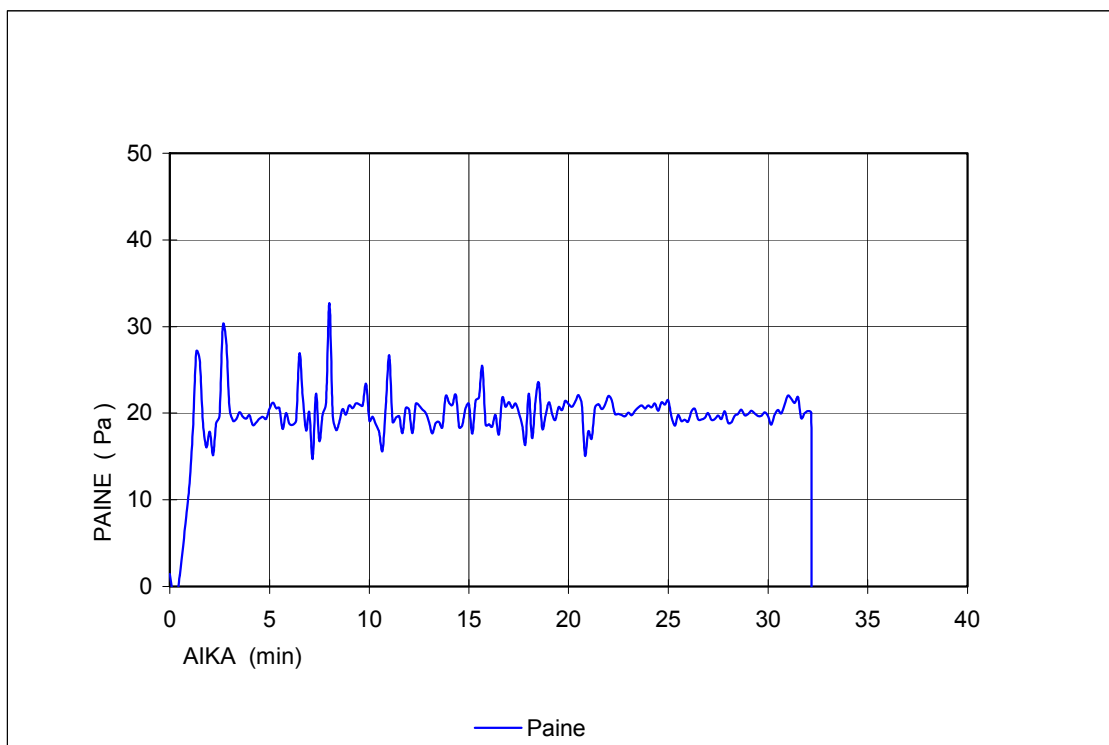


Kuva B.14. Palkin lyhyiden liimatankojen (301 mm) lämpötilat, tc11 tangon keskellä puun sisällä ja tc12 tangon päässä puun sisällä (tc13 ja tc14).

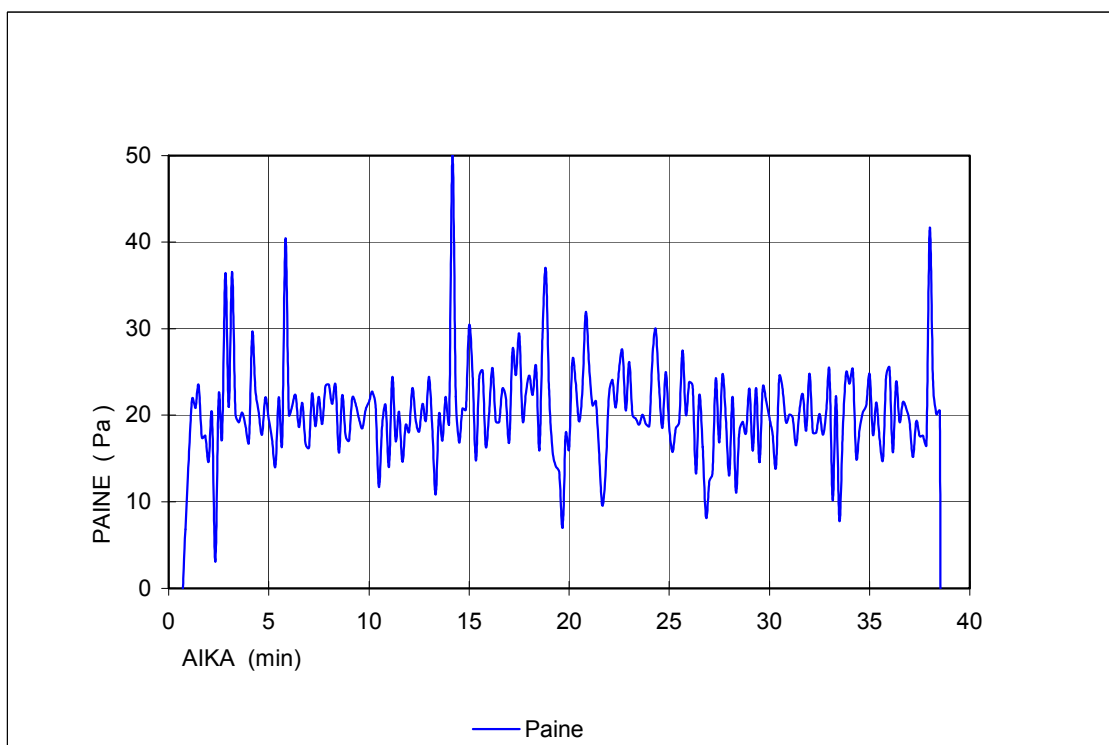


Kuva B.15. Palkin sivusta 12 mm:n (tc39 ja tc45), 24 mm:n (tc40 ja tc43) sekä 36 mm:n etäisyydeltä (tc41 ja tc44) mitatut lämpötilat (15.10.2003).

Liite B.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä



Kuva B.16. Paine uunissa 100 mm kannen alapuolelta mitattuna (7.10.2003).



Kuva B.17. Paine uunissa 100 mm kannen alapuolelta mitattuna (15.10.2003).

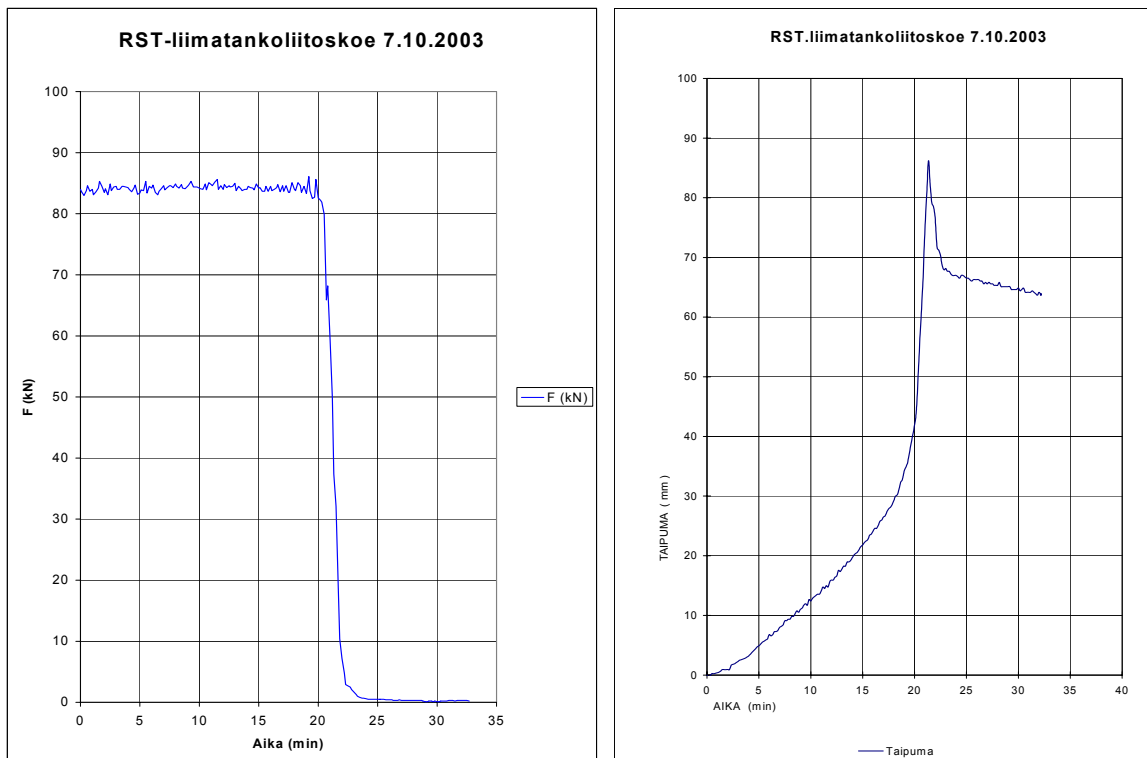
Liite B.6: Havainnot ja mitatut siirtymät

B6.1. Liimattu vinotankoliitos liimapuussa.

Koe 1, 7.10.2003

Koeaika [min:s]	Havainnot
0:00	Koe alkoi.
1:15	Palkkien pinta alkoi tummua.
1:50	Pinta syttyi.
15:30	Liitos auennut alareunasta noin 10 mm.
21:00	Liitos ei kanna enää kuormaa. Liitoksen alareunassa noin 30 mm rako. Kuormitus poistettiin, mutta muuten koetta jatkettiin vielä.
32:00	Koe lopetettiin.

Kuvassa B.18 on esitetty liitoksen kuormituskäyrä ja palkin keskikohdan taipuma ajan funktiona.

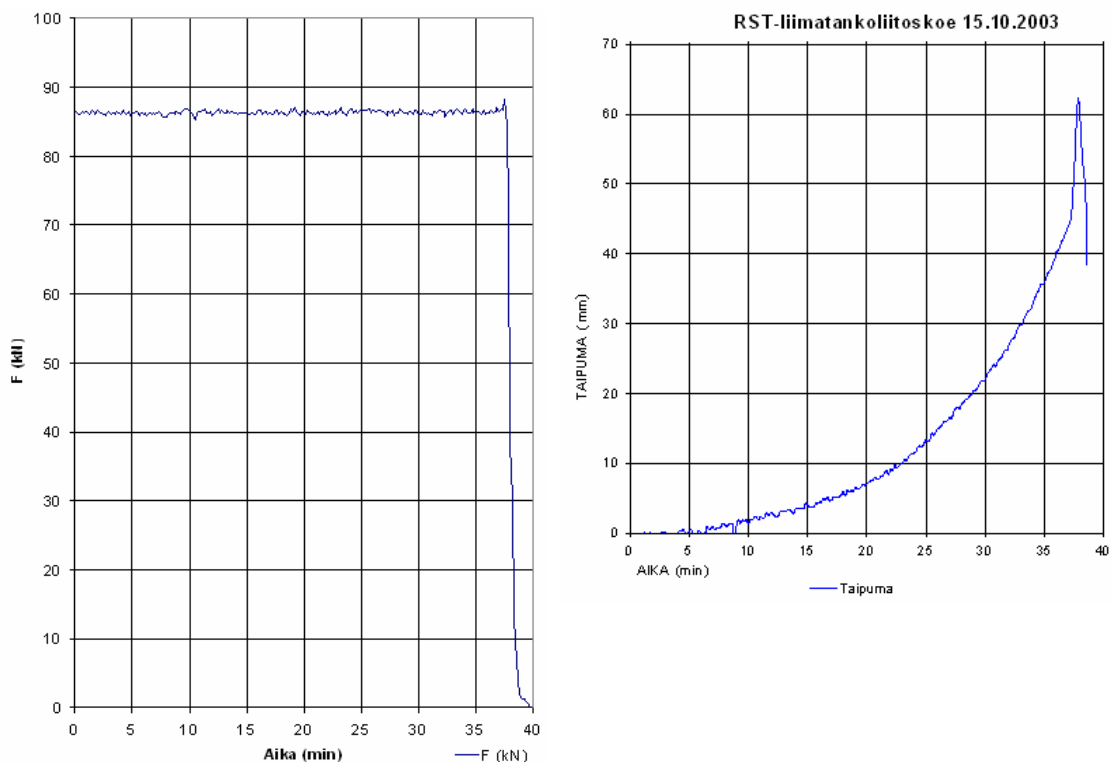


Kuva B.18. Palkin kuorma ja keskikohdan taipuma (7.10.2003).

B.6.2. Liimattu vinotankoliitos liimapuussa. Koe 2, 15.10.2003

Koeaika [min:s]	Havainnot
0:00	Koe alkoi.
1:20	Pinta syttyi.
17:30	Liitos auennut alareunasta noin 10 mm. Joitakin hiilen palasia pudonnut.
32:00	Liitos auennut alareunasta noin 20 mm.
35:00	Lisää hiilen palasia pudonnut palkin kyljestä.
37:10	Kuului paukaus ja liitos murtui.
38:40	Koe lopetettiin.

Kuvassa B.19 on esitetty liitoksen kuormituskäyrä ja palkin keskikohdan taipuma ajan funktiona.



Kuva B.19. Palkin kuorma ja keskikohdan taipuma (15.10.2003).

Liite B.7: Valokuvat

B.7.1. Liimattu vinotankoliitos liimapuussa.

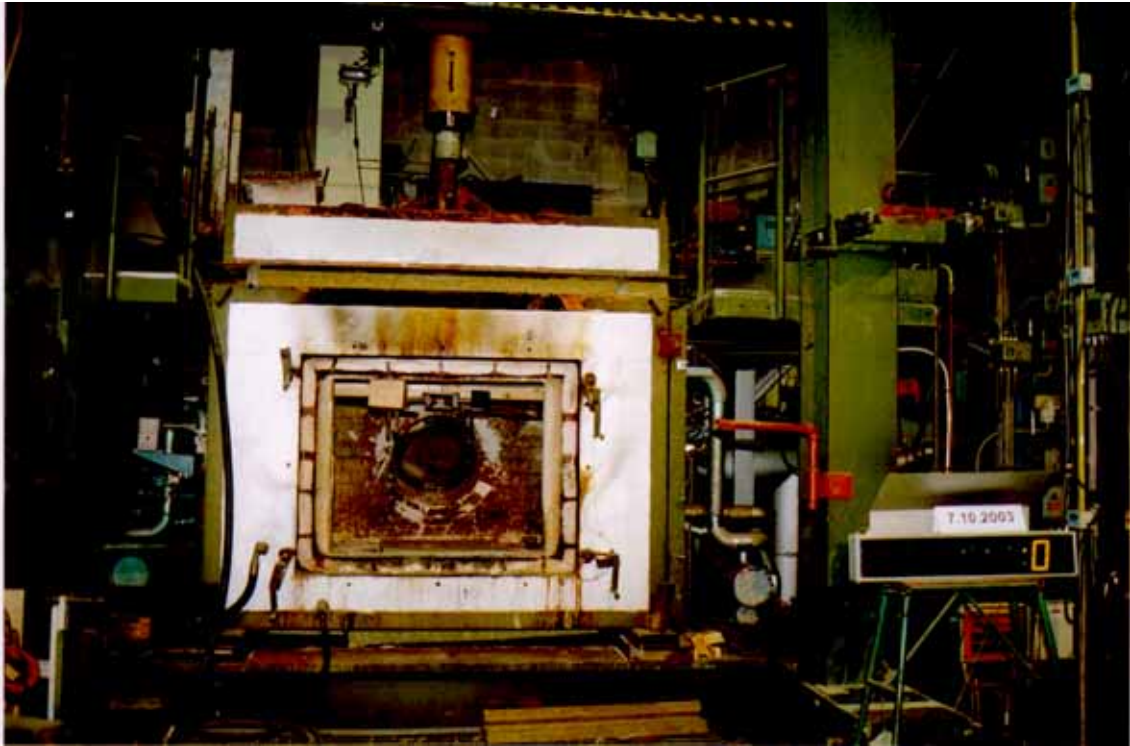
Koe 1, 7.10.2003



Kuva B.20. Koekappale uunissa ennen koetta.



Kuva B.21. Koekappaleen 1 yläosa ennen koetta.



Kuva B.22. Koekappale K-uunissa.



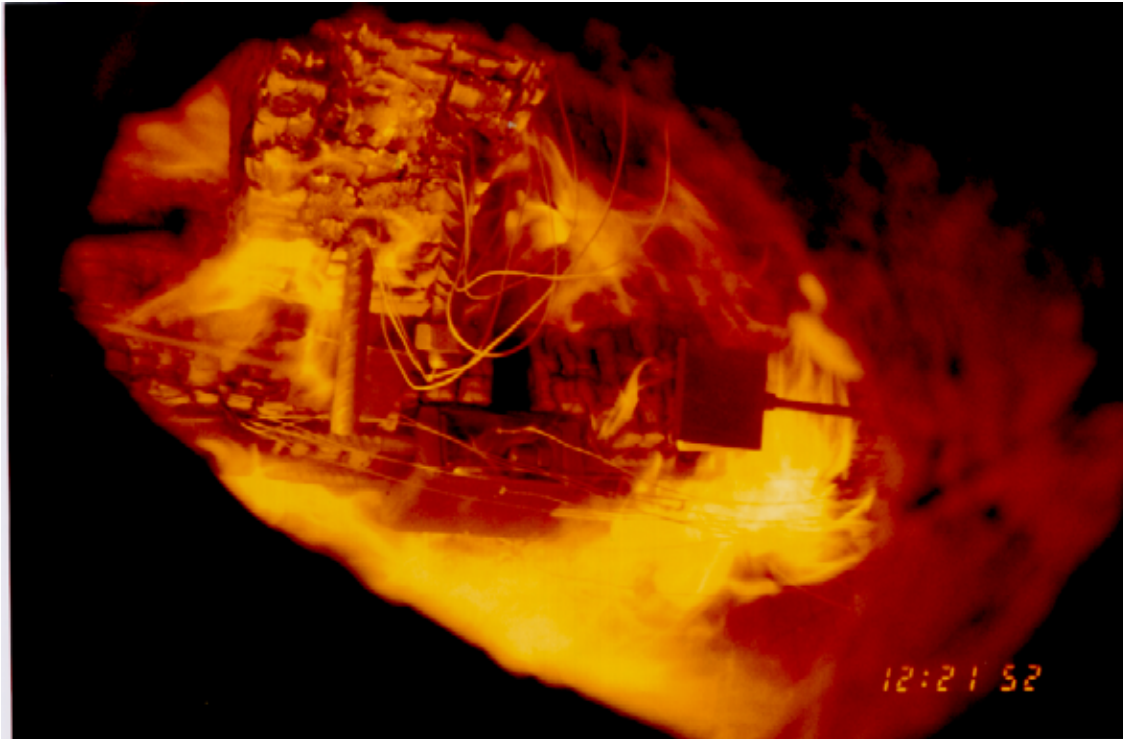
Kuva B.23. Koeaika 43 s.



Kuva B.24. Koeaika 3 min 24 s.



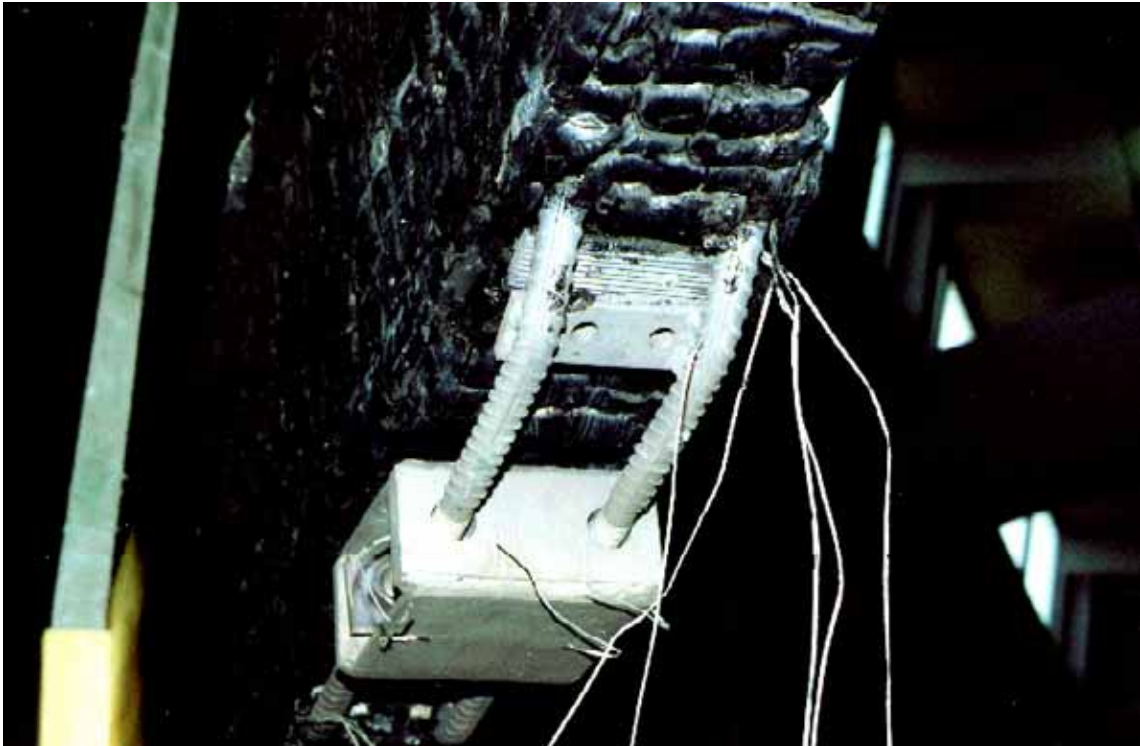
Kuva B.25. Koeaika 15 min 32 s.



Kuva B.26. Koeaika 21 min 52 s. Liitos on murtunut.



Kuva B.27. Koekappale polttokokeen jälkeen.



Kuva B.28. Liitoksen ruuvit leikkautuneet poikki ns. pyykkilautateräslevyjen liitoksessa.

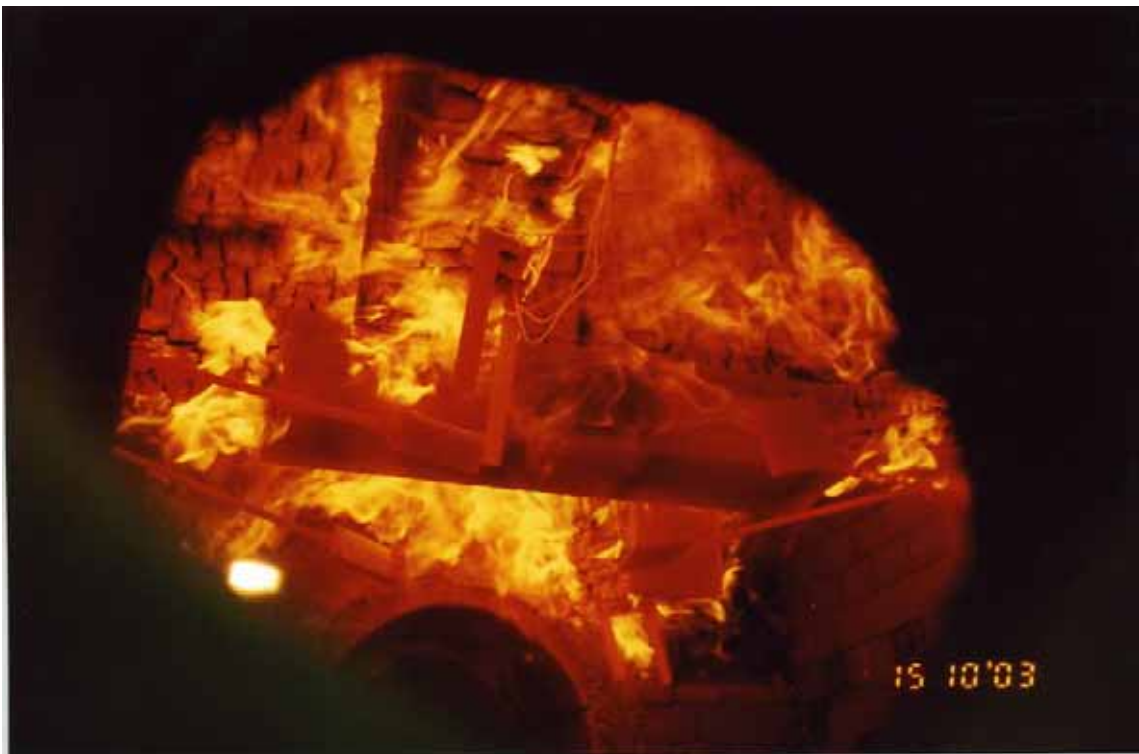
**B.7.2. Liimattu vinotankoliitos liimapuussa.
Koe 2, 15.10.2003**



Kuva B.29. Liitoksen suojauskotelo.



Kuva B.30. Koeaika 1 min.



Kuva B.31. Koeaika 15 min.



Kuva B.32. Koeaika 30 min 15 s.



Kuva B.33. Koekappale polttokokeen jälkeen.



Kuva B.34. Liitos aukaistuna polttokokeen jälkeen.



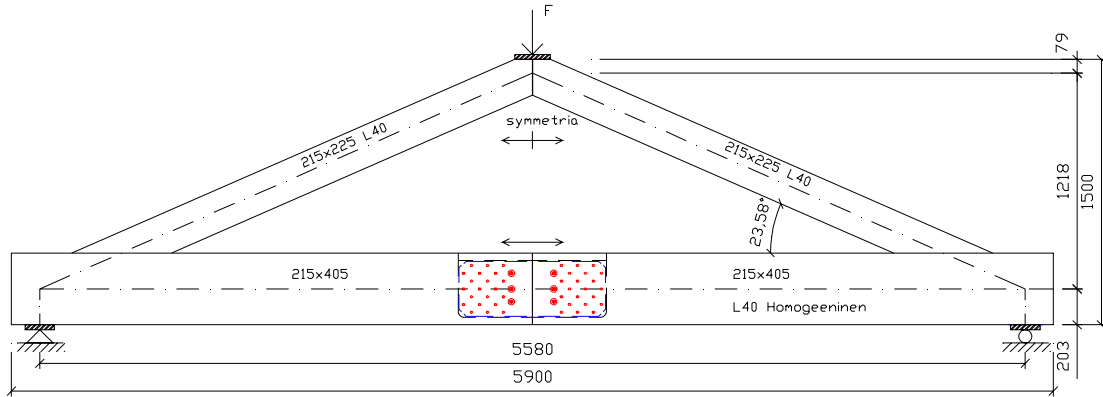
Kuva B.35. Liitoksen ruuvi leikkautunut poikki (yksi lisähitsi) ja ns. pyykkilautateräslevyt liukuneet.



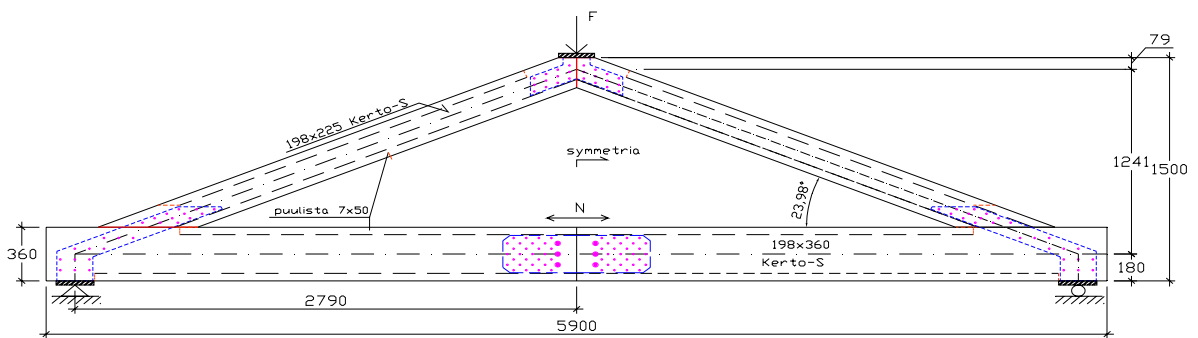
Kuva B.36. Toinen liitoksen ruuveista ehjä (kaksi lisähitsiä).

Liite C: Tappivaarnaliitokset

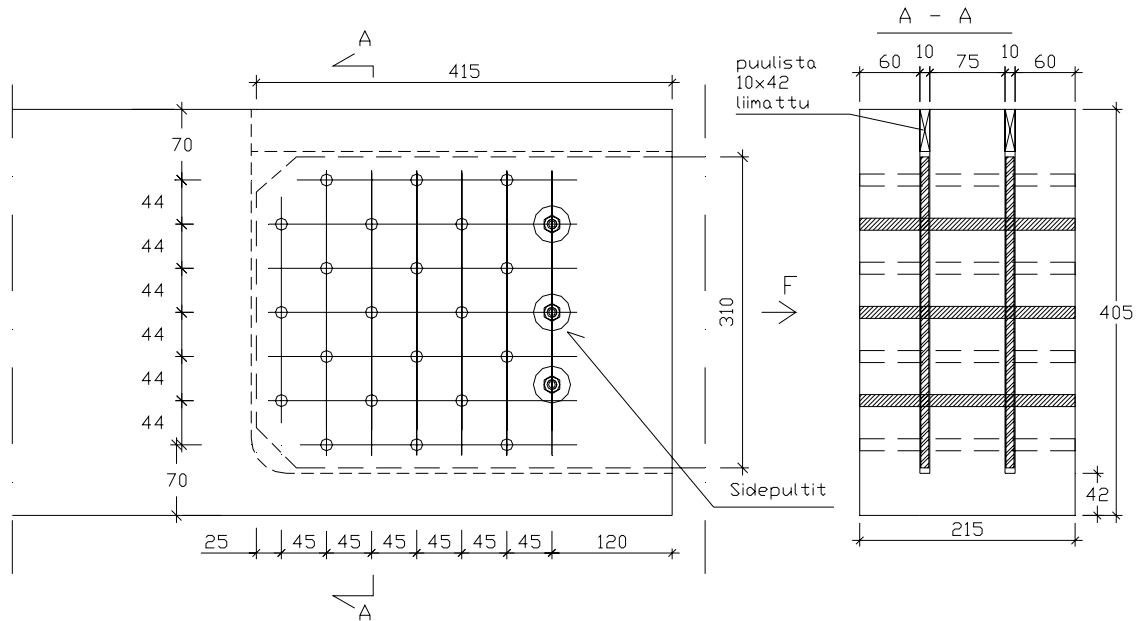
Liite C.1: Koekappalepiirustukset ja materiaalitodistus



Kuva C.1. Tappivaarnaliitoskoekappale liimapuussa. Koe 20.4.2005.



Kuva C.2. Tappivaarnaliitoskoekappale kertopuussa. Koe 25.4.2005.



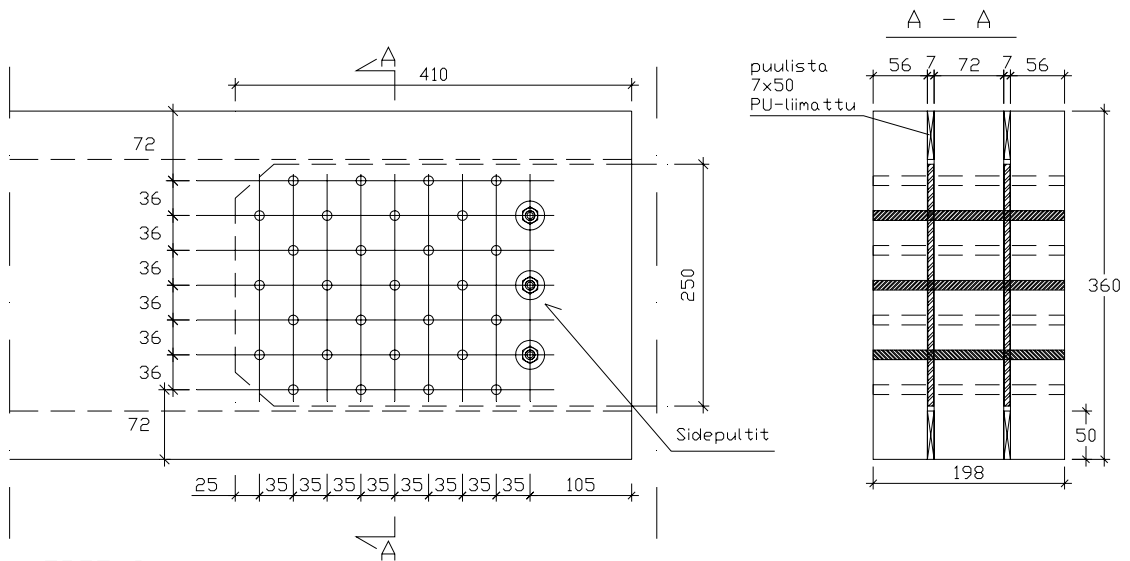
Liimapuusta: L40 homogeeninen 215x405

Teräslevyt: 2x 8x310 S355. Levyille sahataan 10 mm urat.

Tappivaarnat: 21x \varnothing 12 L215, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Sidepultit: 3x \varnothing 12+M10 L265 täsmäpultit, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Kuva C.3. Tutkittava tappivaarnaliitos liimapuussa.



KERTO-S


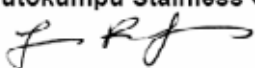
Teräslevyt: 2x 6x250 EN 1.4432 (AISI 316L),

Tappivaarnat: 28x \varnothing 10 L198, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Sidepultit: 3x \varnothing 10+M10 L240, EN 1.4404 (AISI 316L), $f_{u,k} = 664 \text{ N/mm}^2$

Teräslevyissä esiporatut \varnothing 10,5 mm reiät. Puussa \varnothing 10 reiät.

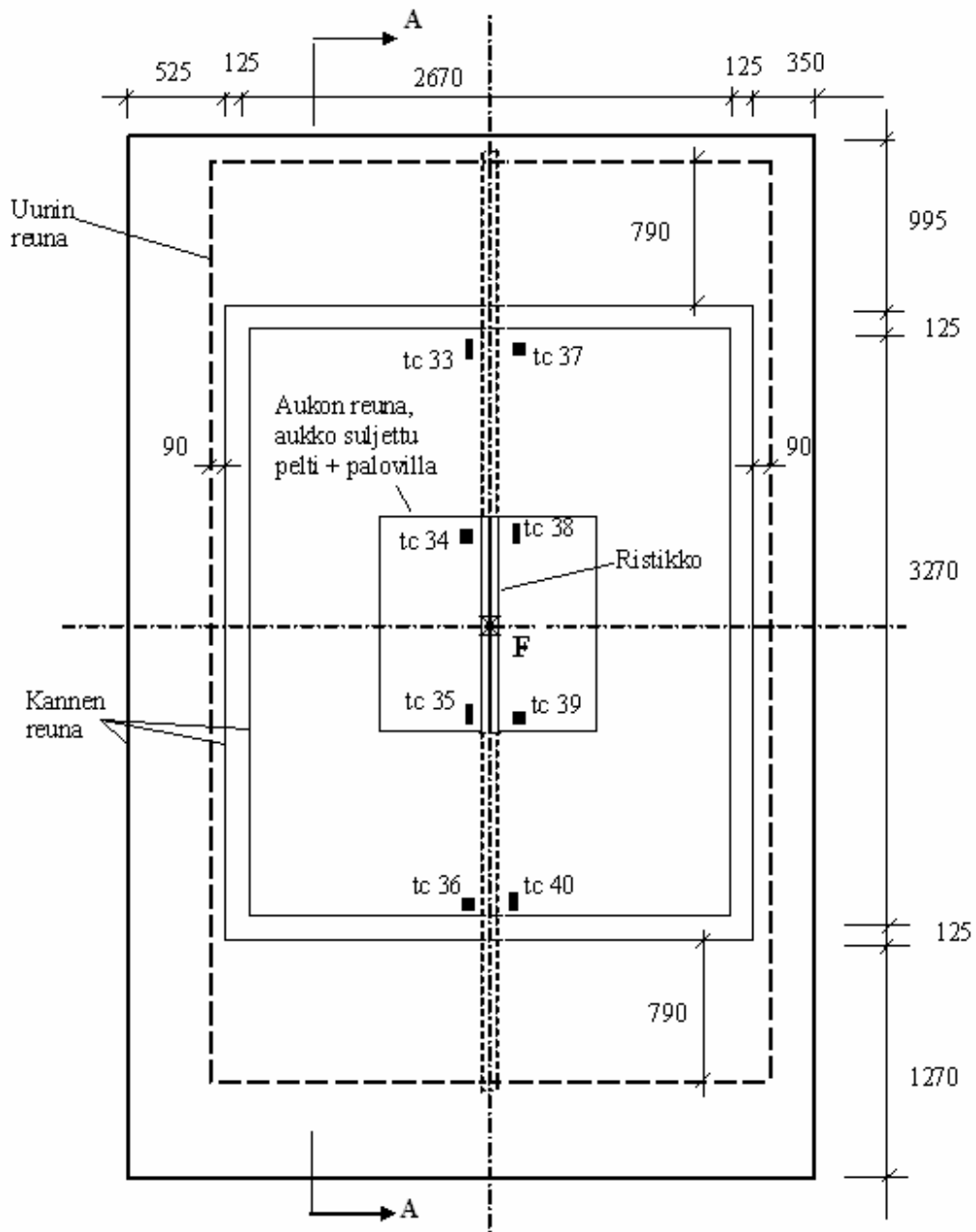
Kuva C.4. Tutkittava tappivaarnaliitos kertopuussa.

Delivery address, Empfänger, Lieu de livraison STARCKJOHANN STEEL OY AB LOTILA KIRKKAAT 2, OVET 5-7 VANHANRADANKATU 42 15522 LAHTI SUOMI -FINLAND		BESTELLER STARCKJOHANN STEEL OY AB PL 54 15101 LAHTI SUOMI -FINLAND										
Requirements, Anforderungen, Exigences AD 2000-MERKBL. W2 EN 10028-7 AD 2000-MERKBL. W2 DIN 17441 02.97 ASTM A240-04A ASME 2004 SECTION II PART A SA-240		Our Order No. / Unser Auftrag Nr. / Notre commande n° 57727	Your order, Ihre Bestellung, Votre commande 830/8091813									
Product, Erzeugnisform, Produit BLECHE AUS BAND , NICHTROSTEND		Mark of Manufacturer / Zeichen des Lieferanten / Signe de producteur OUTOKUMPU	Process / Erzeugungsart / Mode de fusion AOD									
Grade, Werkstoff, Nuance 1.4432 1.4436 TYPE 316L		Tolerances / Toleranzen, Tolérances EN 10259	Inspector's stamp / Zeichen d. Sachverständigen / Poisson de l'expert 									
Marking, Kennzeichnung, Marquage 1.4432 2B		Marks, Versandszeichen, Marques										
Line / Reihe / Ligne 1	Item Position / Poste 9	Charge-test No. / Schmelze-Probe Nr. / Coulée n° 34914 6	Size, Abmessungen, Dimensions 6,0 X 1500 X 3000 MM	Quantity / Stückzahl / Nombre 18	Weight, Gewicht, Poids 3880 KG	Finish / Ausführung / Fini 2B						
Charge No. / Schmelze Nr. / Coulée n° 34914	Chemical composition, Chemische Zusammensetzung, Composition mécanique											
	C %	Si %	Mn %	P %	S %	Cr %	Ni %	MO %	N %			
	0,024	0,42	1,26	0,027	0,007	16,8	10,6	2,57	0,044			
Line / Reihe / Ligne 1	Mechanical properties, Mechanische Eigenschaften, Caractéristiques mécaniques						ÜBERPRÜFT NACH AD 2000-WO/TRD100 DURCH TÜV NORD E.V. MIT VER- ZICHT AUF GEGENZEICHNUNG ZERTIFIZIERT NACH DRUCKGERÄTERICHTLINIE 97/23/EG DURCH DIE TÜV CERT-ZERTIFIZIERUNGS- STELLE FÜR DRUCK- GERÄTE DER TÜV NORD GRUPPE; BENANNTE STELLE, KENN-NR. 0045					
	Location / Ort / Lieu E A	Rp0.2 / N/mm² 310 306	Rp1.0 / N/mm² 344 351	Rm / N/mm² 595 594	A5 % 51 51	A50 % 51 51						
Identify test, Verwechslungsprüfung, Contrôle d'identification Sizes, Abmessungen, Dimensions Surface, Oberfläche, Surface Test of intergran. corros., Prüfung auf Interkrist. Korros., Test de corros. Interkrist. EN ISO 3651-2 GENEUCEND		O.B. O.B. O.B.		A = beginning / Anfang / Début E = end / Ende / Fin								
ASTM A240-04A ASME 2004 SECTION II PART A SA-240 TYPE 316 SS 142343 2002-11-15 SS 2343-28 AC72		We certify that the above mentioned products comply with the terms of the order contract. Wir bestätigen, dass die Lieferung den Vereinbarungen der Bestellannahme entspricht. Nous certifions que les produits énumérés ci-dessus sont conformes aux prescriptions de la commande.										
		This test certificate is made by controlled ADIP-system and is valid without signature. Dieses Zeugnis wurde von einem überprüften Datenverarbeitungssystem erstellt und ist ohne Unterschrift gültig. Ce certificat a été établi par un système informatique contrôlé et est valide sans signature.										
		Outokumpu Stainless Oy 										
		Authorized Inspector / Werkstoffversichtiger / Inspecteur autorisé JORMA RUKAJÄRVI										
		FIN-05400 Tormo, Finland Tel. +358 16 4821, Fax +358 16 482 380, www.outokumpu.com Domicle: Tormo, Finland, Business Identity Code 0023315-9										

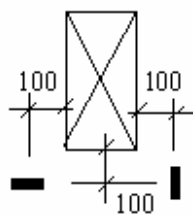
Kuva C.5. Kertopuisen tappivaarnaliitoksen teräslevyn ainetodistus. Koe 25.4.2005.

Liite C.2: Koejärjestelyt

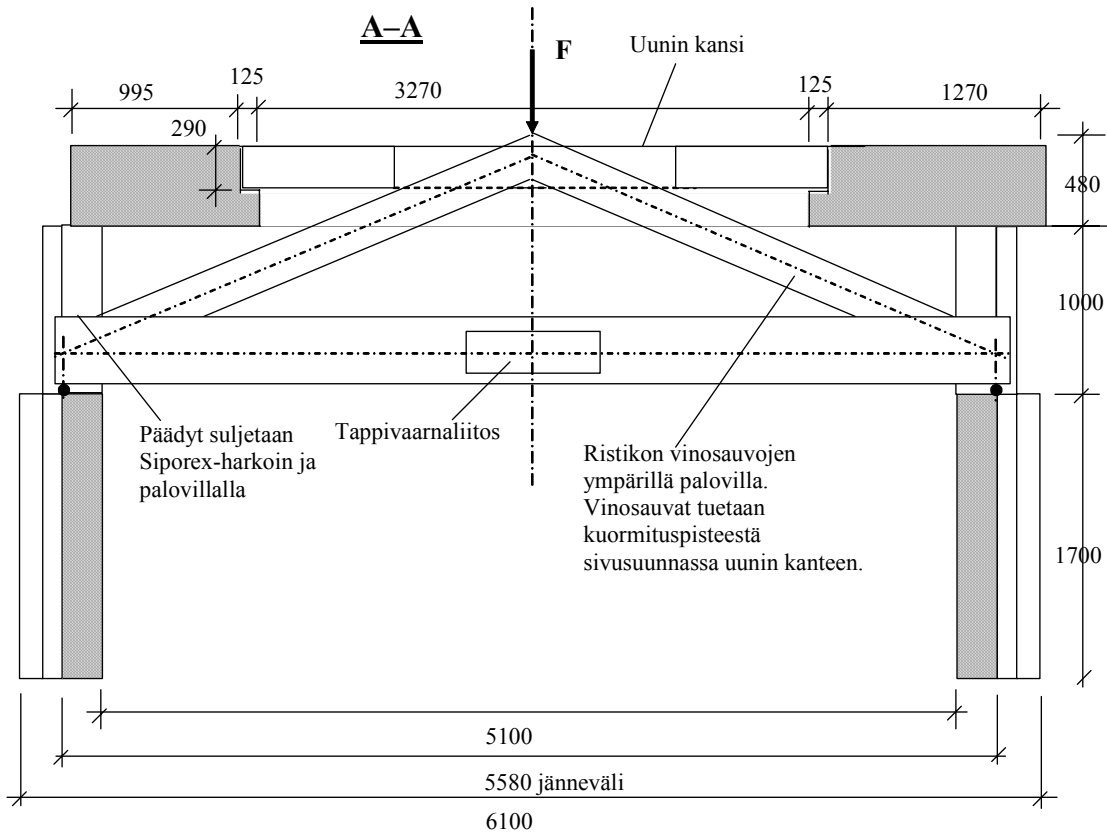
Liite C.2.1. Koekappaleen sijainti uunissa



Flattatermoelementtien sijainti



Kuva C.6. Tappivaarnaliitoksen koejärjestely.



Kuva C.7. Tappivaarnaliitoksen koejärjestelyn leikkaus A-A.

Liite C.2.2: Kuormituslaskelmat

Hallirakennuksen kattokannatin. Hallin koko 36x100 m ja katon kaltevuus 1:16. Rakennuksen sijaintipaikka: Jyväskylä, maastoluokka III. Kattorakenteiden omapaino 0,6 kN/m².

Liimapuukoekappaleen palokokeen kuormitusvoima:

Normaalilämpötilan mitoituskuorma (ENV 1995 + NAD):

– lumi: $q_{s,k} = 0,8 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2$

– tuulenpaine alas $q_{w,k} = (0,2+0,5) \cdot 0,473 \text{ kN/m}^2 = 0,33 \text{ kN/m}^2$.

Lyhytaikaisen aikaluokan mitoituskuorma on mitoittava kuormitustapaus:

$$q_d = 1,2 \cdot 0,6 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \cdot 1,5 \cdot 0,33 \text{ kN/m}^2 = 3,97 \text{ kN/m}^2.$$

Palotilanteen mitoituskuorma:

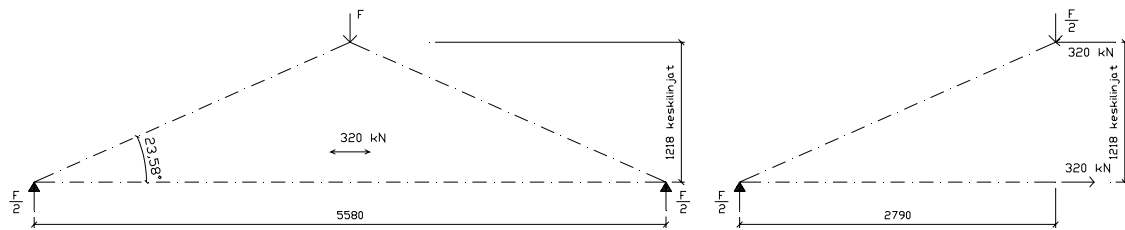
$$q_{d,fi} = 0,6 \text{ kN/m}^2 + 0,5 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 1,6 \text{ kN/m}^2$$

Suhde: $1,6 / 3,97 = 0,403$

=> Palotilanteessa vaaditaan 40 %:n kapasiteettia normaalilämpötilan lyhytaikaisen aikaluokan mitoituskuormasta.

Lyhytaikaisessa aikaluokassa liitoksen mitoituskapasiteetti (ENV 1995 + NAD):

$$F_{R,d} = 799 \text{ kN} \Rightarrow \text{Liitoksen kuormitus palotestissä: } \underline{F_{fi, \text{test}} = 0,4 \cdot 799 \text{ kN} = 320 \text{ kN}}$$



Voima F saadaan momenttitasapainoehdosta vasemman tuen suhteen.

$$320 \text{ kN} \cdot 1,218 \text{ m} - F / 2 \cdot (5,58 \text{ m}) / 2 = 0 \Rightarrow F = 279,4 \text{ kN}$$

Vähennetään omapainon osuus voimasta:

$$g = 0,215 \text{ m} \cdot (0,405 \text{ m} + 0,225 \text{ m} / \cos(23,58^\circ)) \cdot 5 \text{ kN/m}^3 = 0,70 \text{ kN/m}$$

Omapainosta aiheutuva momentti ja voima:

$$M_g = (g \cdot L^2) / 8 = (0,7 \text{ kN/m} \cdot (5,58 \text{ m})^2) / 8 = 2,72 \text{ kNm}$$

$$\rightarrow N_g = 2,72 \text{ kNm} / 1,218 \text{ m} = 2,23 \text{ kN}$$

$$F_g = (279,4 \text{ kN} / 320 \text{ kN}) \cdot 2,23 \text{ kN} = 1,95 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{\text{koe}} = 279,4 \text{ kN} - 1,95 \text{ kN} = 277,5 \text{ kN}$$

Valitaan kuormitusvoimaksi $\underline{F_{\text{koe}} = 277 \text{ kN}}$

Kertopuukoekappaleen palokokeen kuormitusvoima:

Normaalilämpötilan mitoituskuorma (EN 1995 + NA-ehdotus (13.4.2005):

$$- \text{lumi: } q_{s,k} = 0,8 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2.$$

Keskipitkä aikaluokka mitoittaa:

$$q_d = 1,15 \cdot 0,6 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 3,69 \text{ kN/m}^2.$$

Palotilanteen mitoituskuorma (EN 1990 + NA):

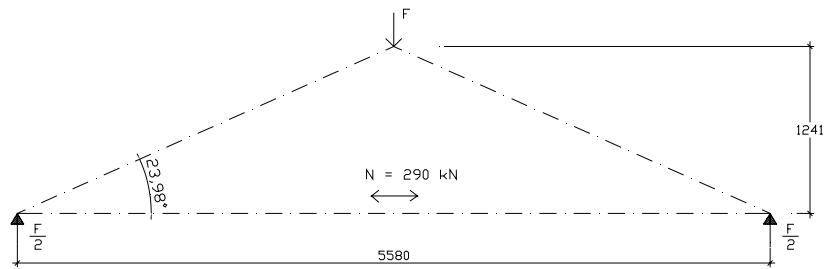
$$q_{d,fi} = 0,6 \text{ kN/m}^2 + 0,4 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 1,4 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Suhde: } 1,4 / 3,69 = 0,379$$

\Rightarrow Palotilanteessa vaaditaan 38 %:n kapasiteettia normaalilämpötilan keskipitkän aikaluokan mitoituskuormasta.

Keskipitkässä aikaluokassa liitoksen mitoituskapasiteetti (EN 1995:2004 + NA-ehdotus (13.4.2005) + RTE1707/04):

$$F_{R,d} = 762 \text{ kN} \Rightarrow \text{Liitoksen kuormitus palotestissä: } \underline{F_{fi, \text{test}} = 0,38 \cdot 762 \text{ kN} = 290 \text{ kN}}$$



Tarvittava kuormitusvoima lasketaan kuten liimapuukoekappaleelle käyttäen kertopuun mittoja, ja näin ollen tarvittavaksi kuormitusvoimaksi saadaan **$F = 256 \text{ kN}$** .

Voima F saadaan momenttitasapainoehdosta vasemman tuen suhteen.
 $290 \text{ kN} \cdot 1,241 \text{ m} - F / 2 \cdot (5,58 \text{ m}) / 2 = 0 \quad \Rightarrow F = 258,0 \text{ kN}$

Vähennetään omapainon osuus voimasta:

$$g = 0,198 \text{ m} \cdot (0,360 \text{ m} + 0,225 \text{ m} / \cos(23,98^\circ)) \cdot 5,2 \text{ kN/m}^3 = 0,62 \text{ kN/m}$$

Omapainosta aiheutuva momentti ja voima

$$M_g = (g \cdot L^2) / 8 = (0,62 \text{ kN/m} \cdot (5,58 \text{ m})^2) / 8 = 2,43 \text{ kNm}$$

$$\Rightarrow N_g = 2,43 \text{ kNm} / 1,241 \text{ m} = 1,96 \text{ kN}$$

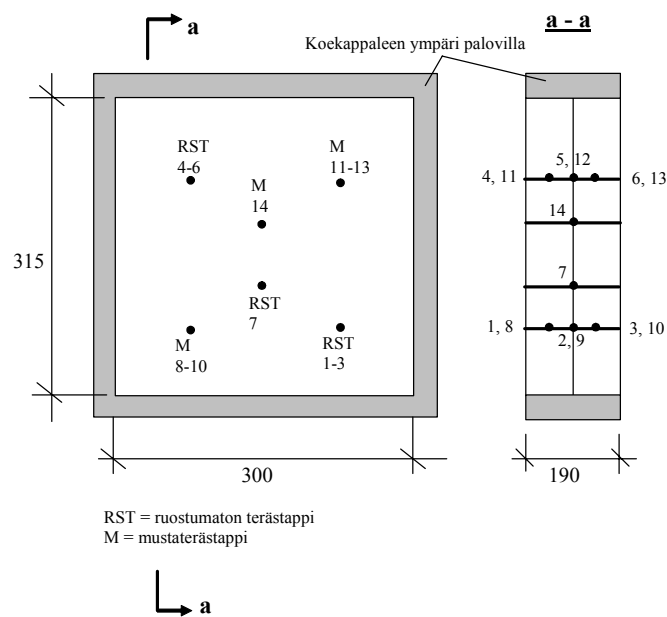
$$F_g = (258 \text{ kN} / 290 \text{ kN}) \cdot 1,96 \text{ kN} = 1,74 \text{ kN}$$

$$\Rightarrow F_{\text{koe}} = 258,0 \text{ kN} - 1,74 \text{ kN} = 256,3 \text{ kN}$$

Valitaan kuormitusvoimaksi **$F_{\text{koe}} = 256 \text{ kN}$**

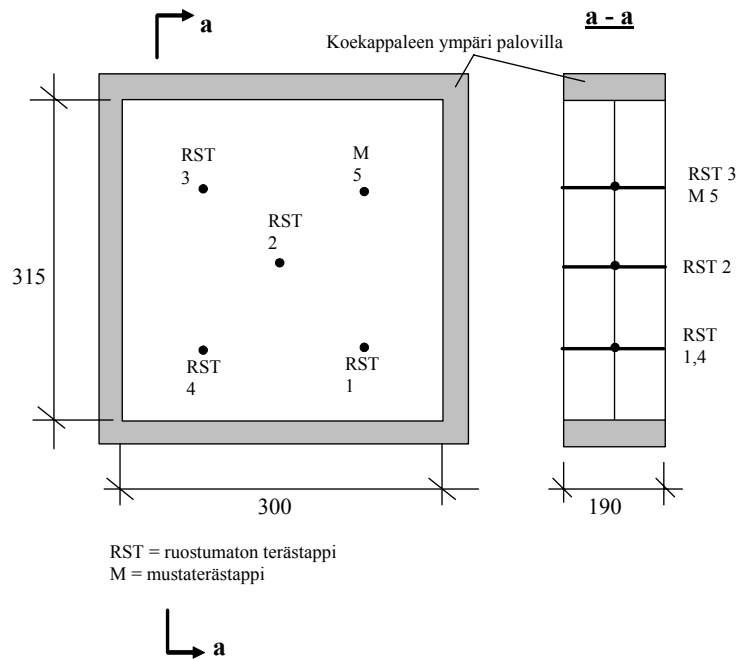
Liite C.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat

C.3.1 Tappivaarjoiden termoelementtien paikat kokeessa 13.2.2004



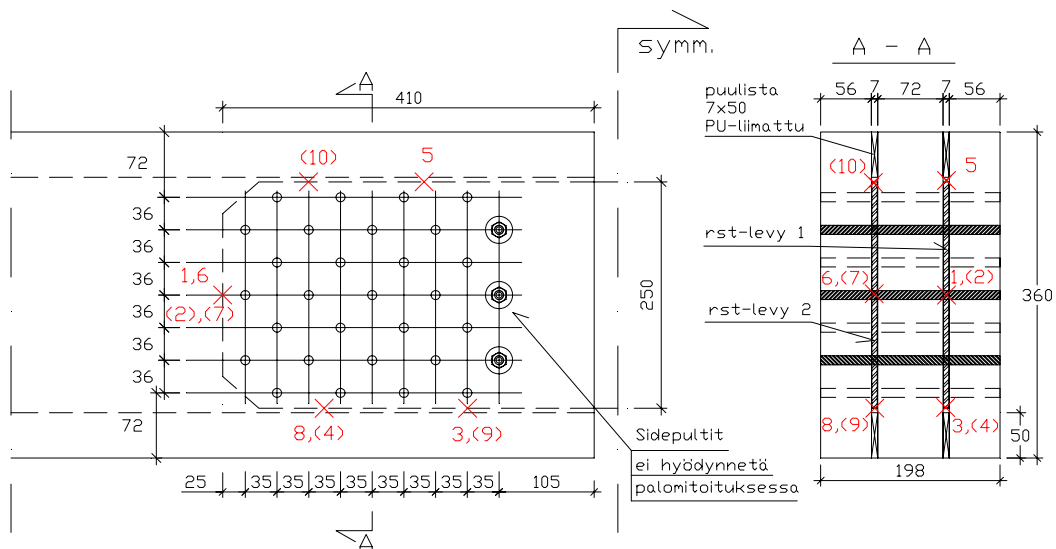
Koekappale koottiin kahdesta liimapuukappaleesta, joihin tappivaarnat asennettiin. Tappeihin oli ajettu urat neljännespisteisiin asti, jotta termoelementit saatiin upotettua teräkseen tapin tiukan sovituksen vuoksi. Liimapuukappaleet yhdistettiin liimaamalla paloliimalla yhteen.

C.3.2 Tappivaarnojen termoelementtien paikat kokeessa 25.4.2005



Koekappale koottiin kuten 13.2.2004 tehdyssä kokeessakin.

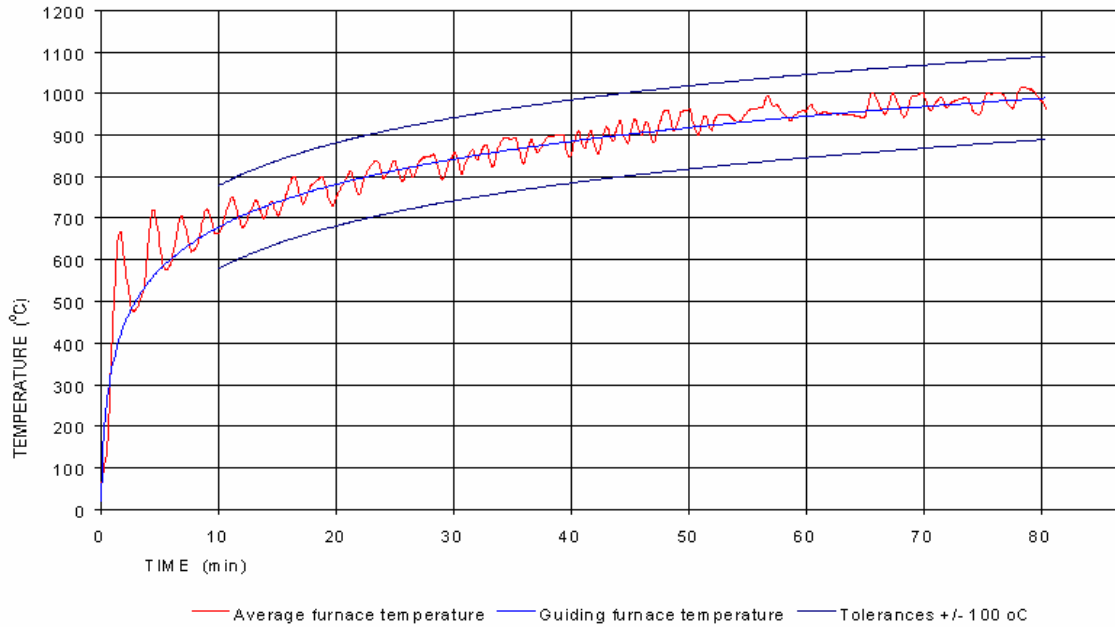
C.3.4 Tappivaarnaliitoksen termoelementtien paikat kokeessa 25.4.2005



Suluissa olevat numerot tarkoittavat, että kyseiset termoelementit ovat symmetria-akselin toisella puolen.

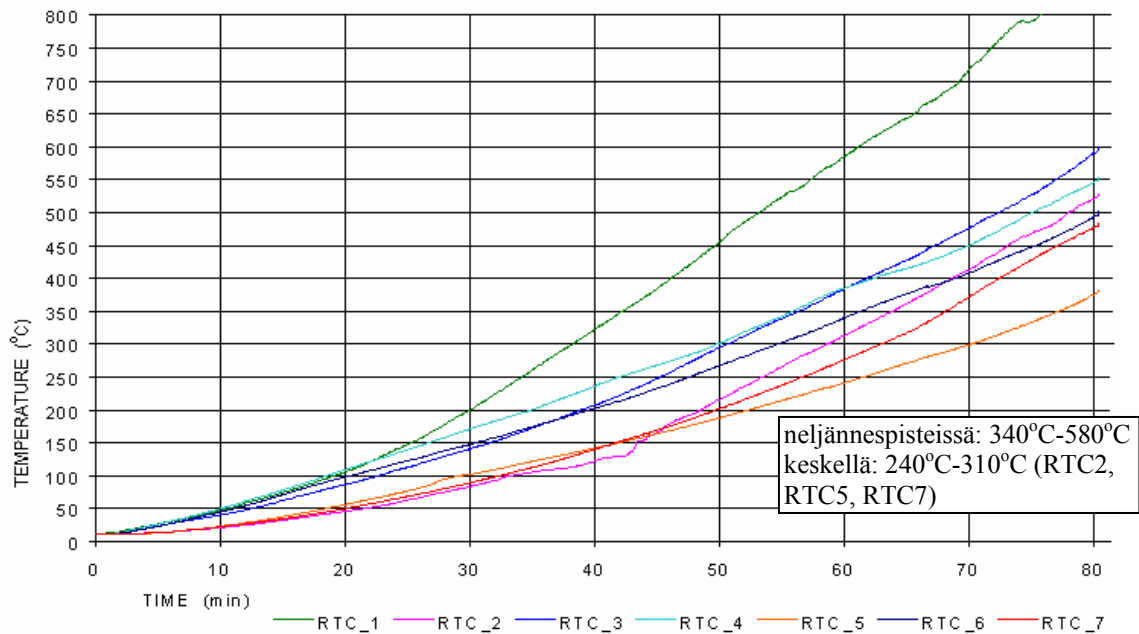
Liite C.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat

C.4.1 Lämpötilat kokeessa 13.2.2004: Vaarnatapit

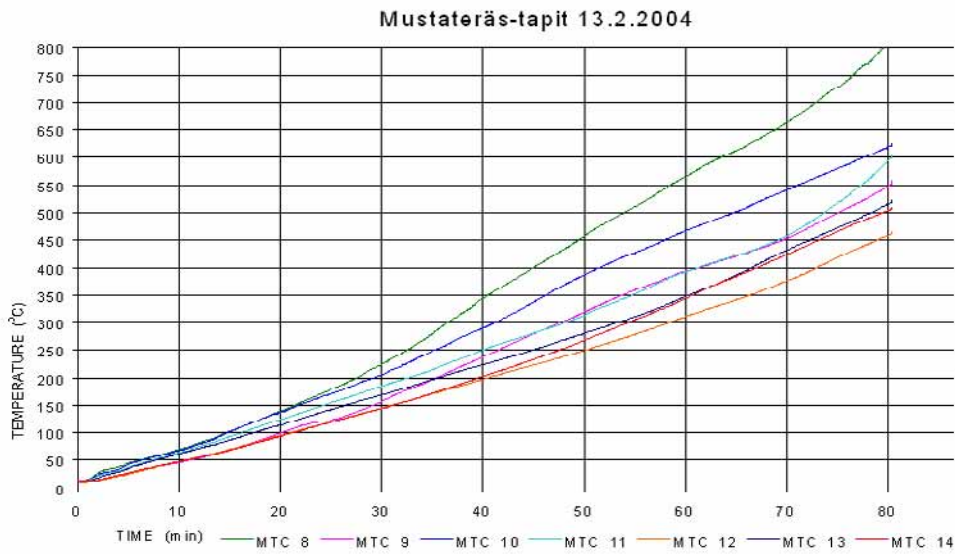


Kuva C.8. Uunin lämpötilat. Tappivaarujen lämpötilakoe. 13.2.2004.

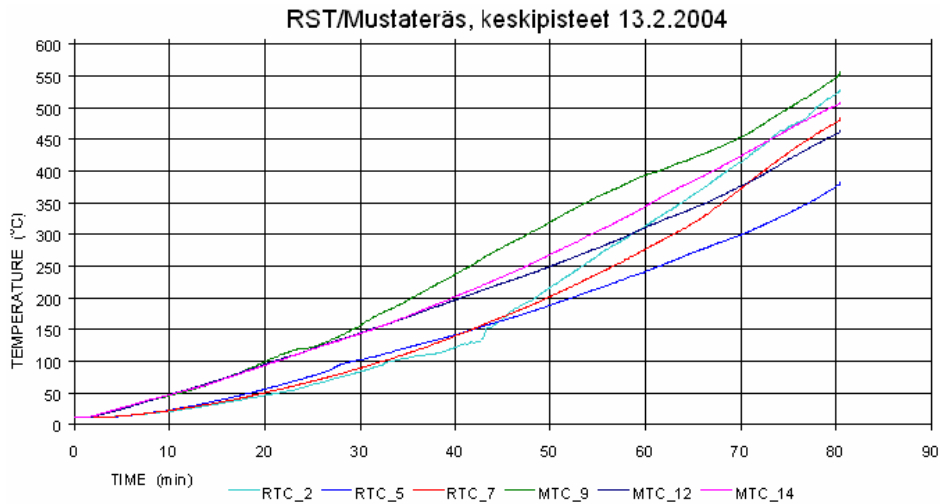
RST-tapit 13.2.2004



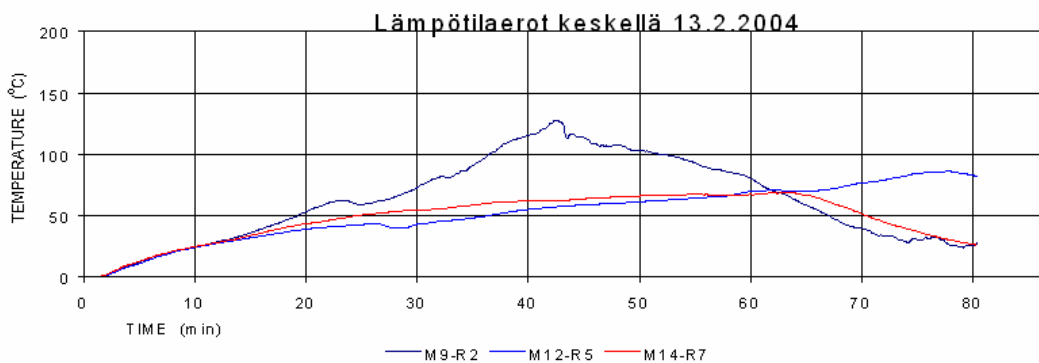
Kuva C.9. Ruostumattomien terästappien lämpötilat.



Kuva C.10. Mustasta teräksestä valmistettujen terästappien lämpötilat.

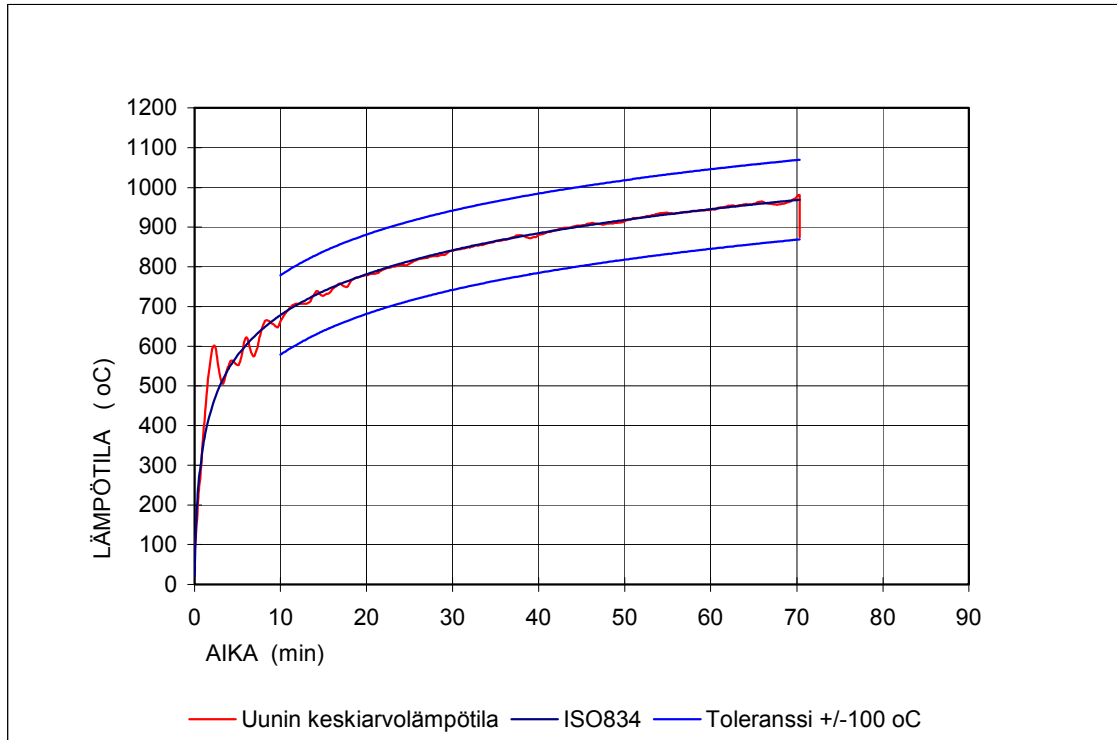


Kuva C.11. Ruostumattomasta teräksestä ja hiiliteräksestä valmistettujen terästappien keskipisteiden lämpötilojen vertailu 13.2.2004.

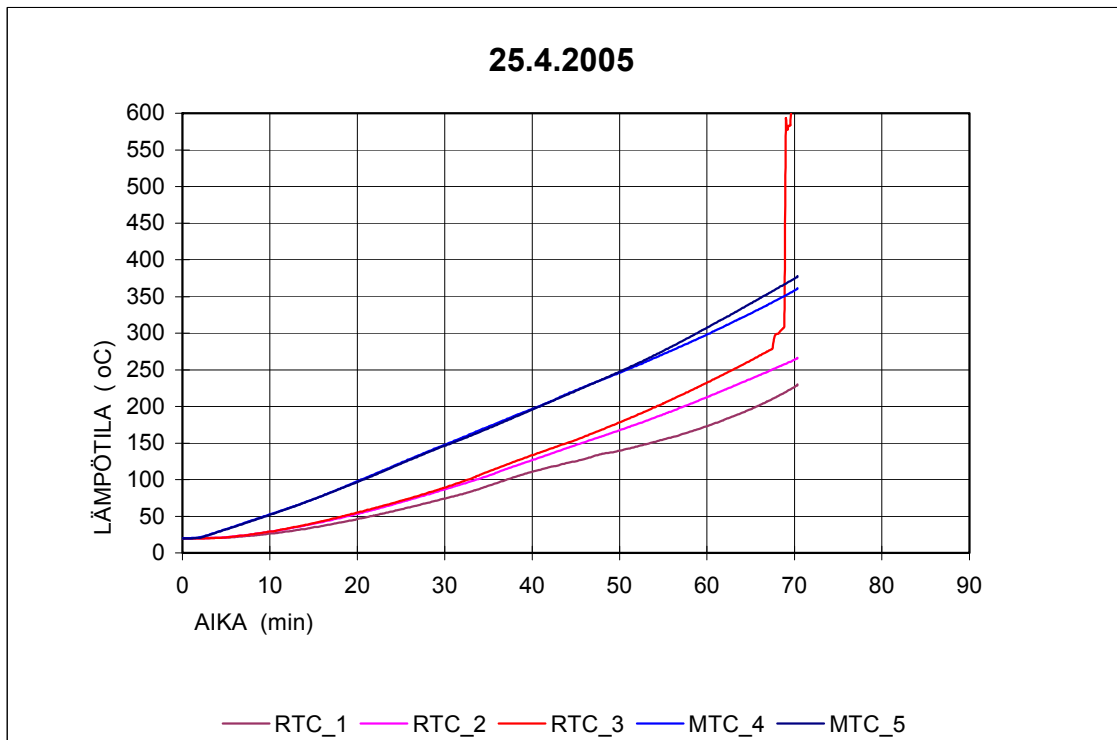


Kuva C.12. Ruostumattomasta teräksestä ja hiiliteräksestä valmistetun terästappin keskipisteiden lämpötilan vertailu 13.2.2004.

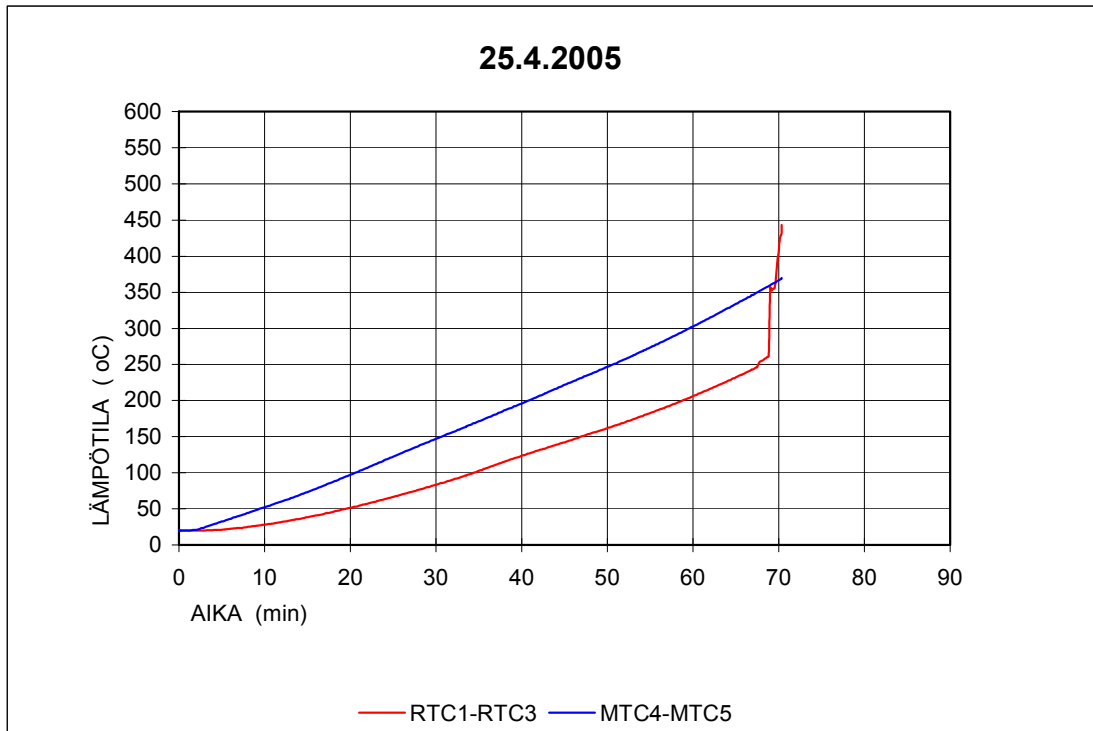
C.4.2 Lämpötilat kokeessa 25.4.2005: Vaarnatapit



Kuva C.13. Uunin lämpötilat. Koe 25.4.2005.

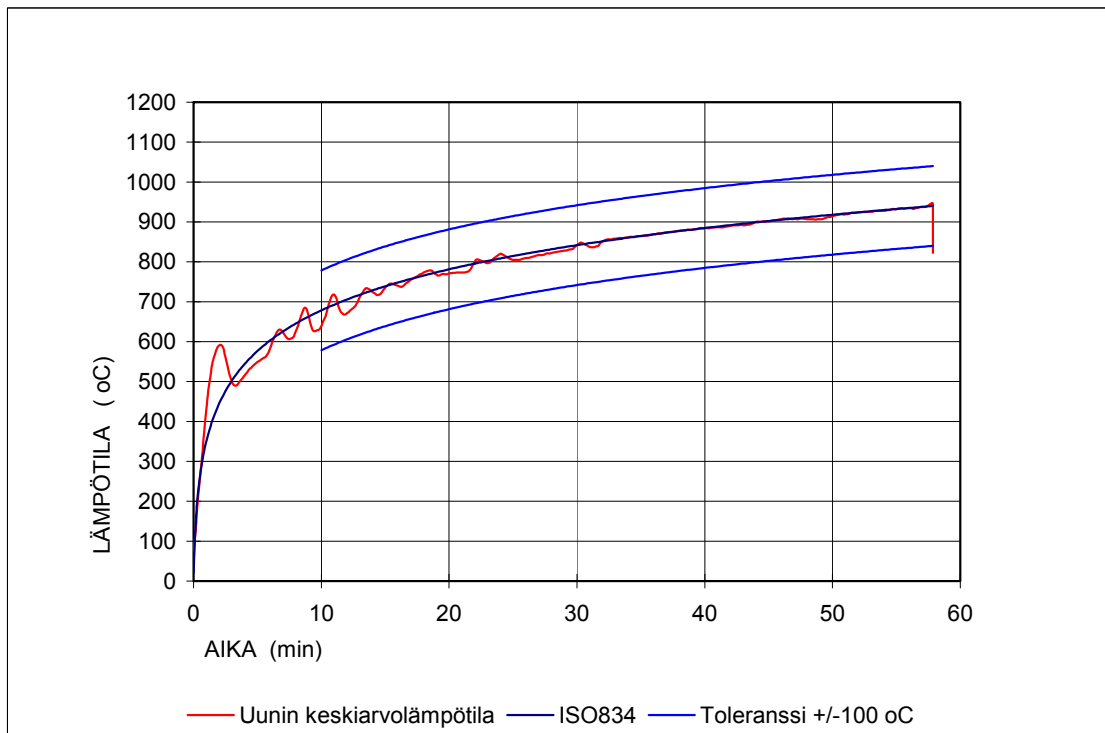


Kuva C.14. Ruostumattomasta ja mustasta teräksestä valmistettujen terästappien lämpötilat.



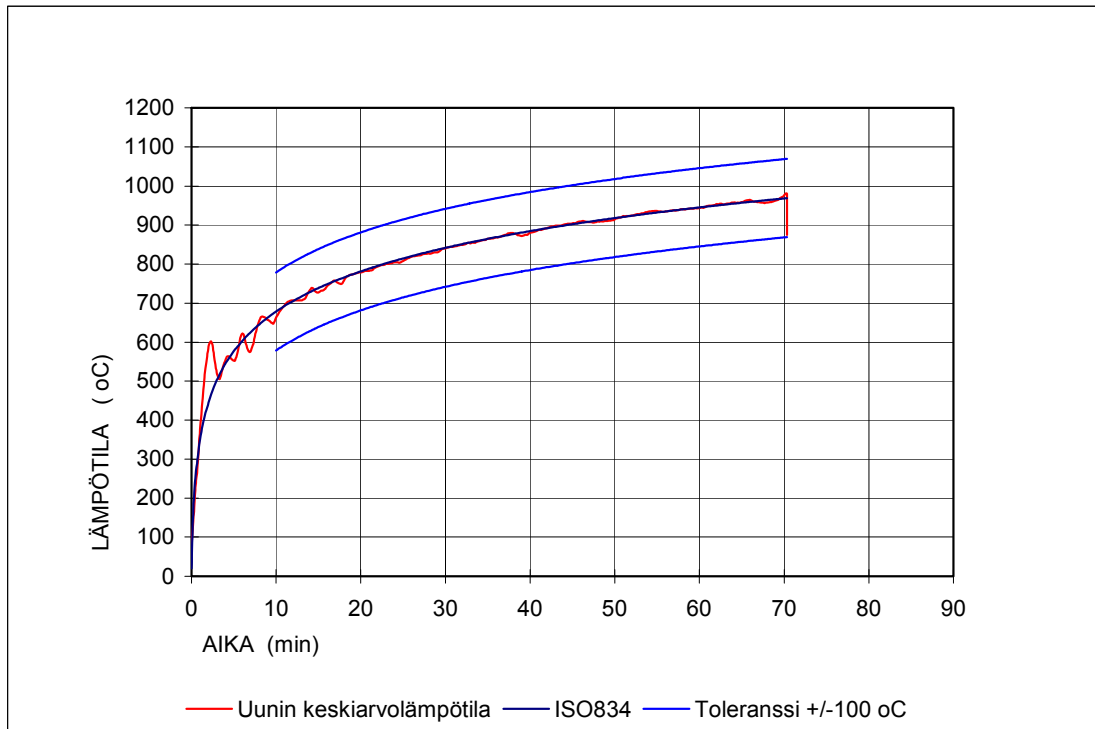
Kuva C.15. Ruostumattomasta teräksestä ja mustasta teräksestä valmistettujen terästappien lämpötilaerot.

C.4.3 Lämpötilat tappivaarnaliitoskokeessa 20.4.2005

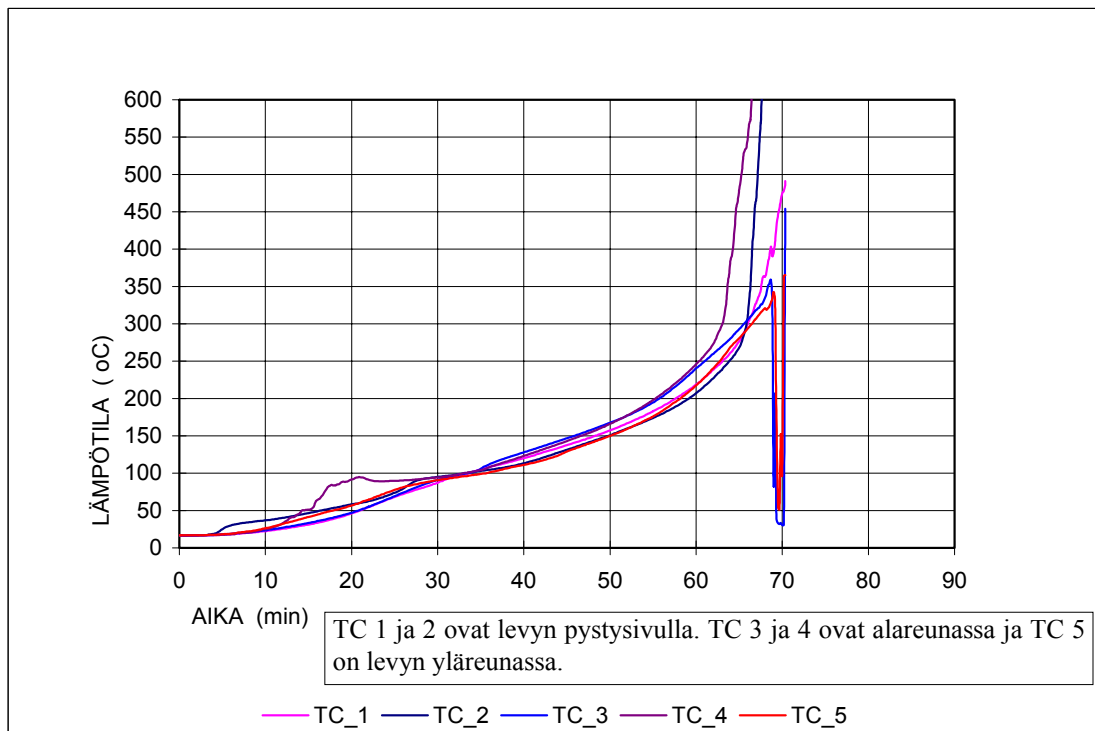


Kuva C.16. Uunin lämpötilat. Tappivaarnaliitos liimapuussa. Koe 20.4.2005.

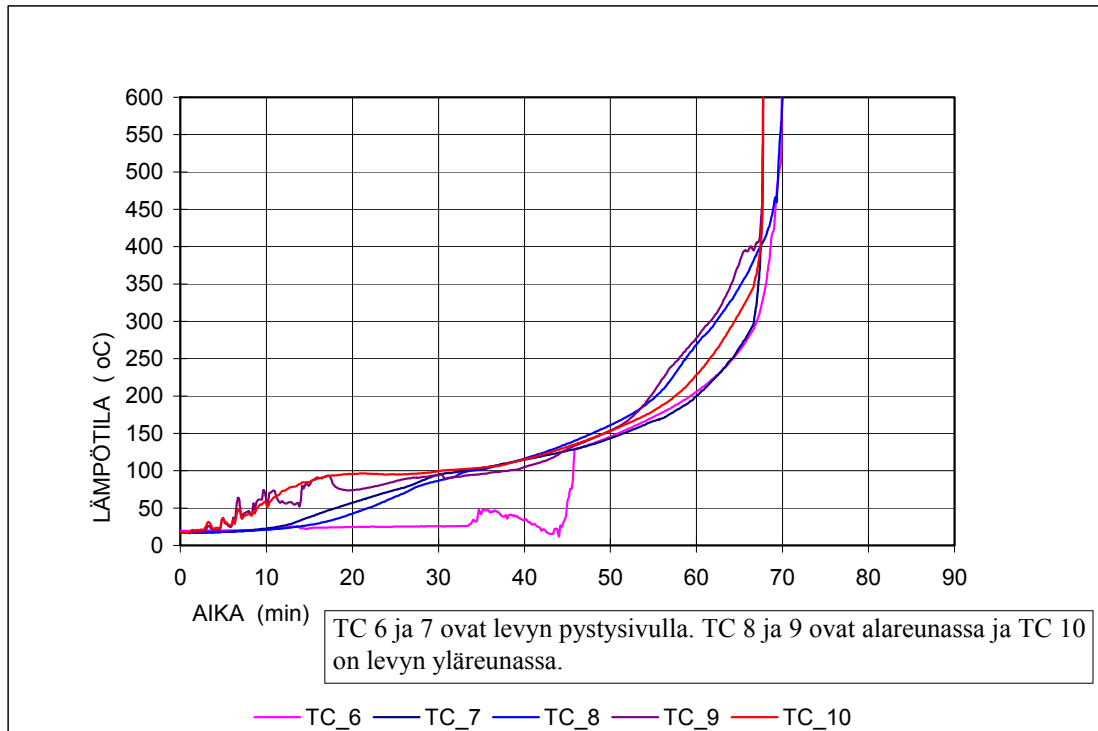
C.4.4 Lämpötilat tappivaarnaliitoksessa 25.4.2005



Kuva C.17. Uunin lämpötilat. Tappivaarnaliitos Kerto-puussa. Koe 25.4.2005.

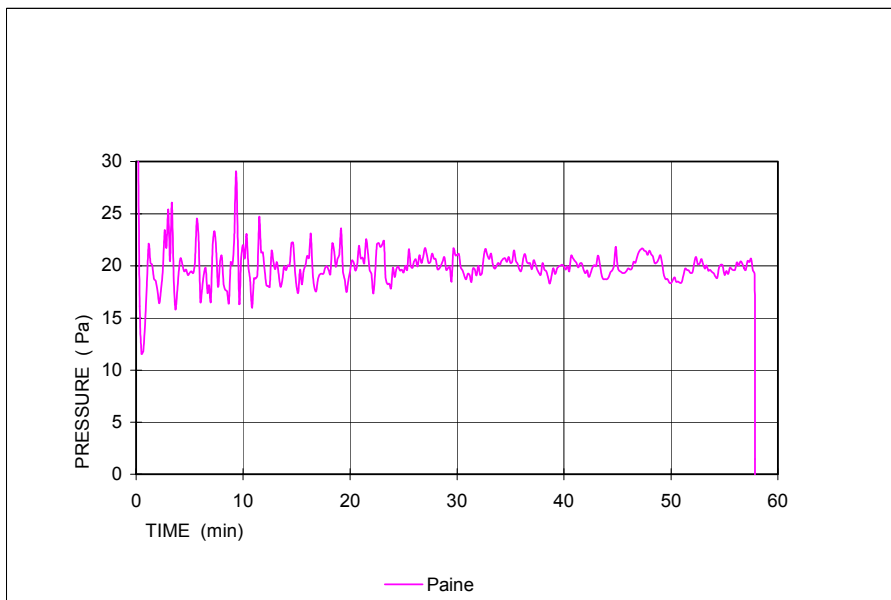


Kuva C.18. Teräslevyn lämpötilat. Tappivaarnaliitos Kerto-puussa 25.4.2005.

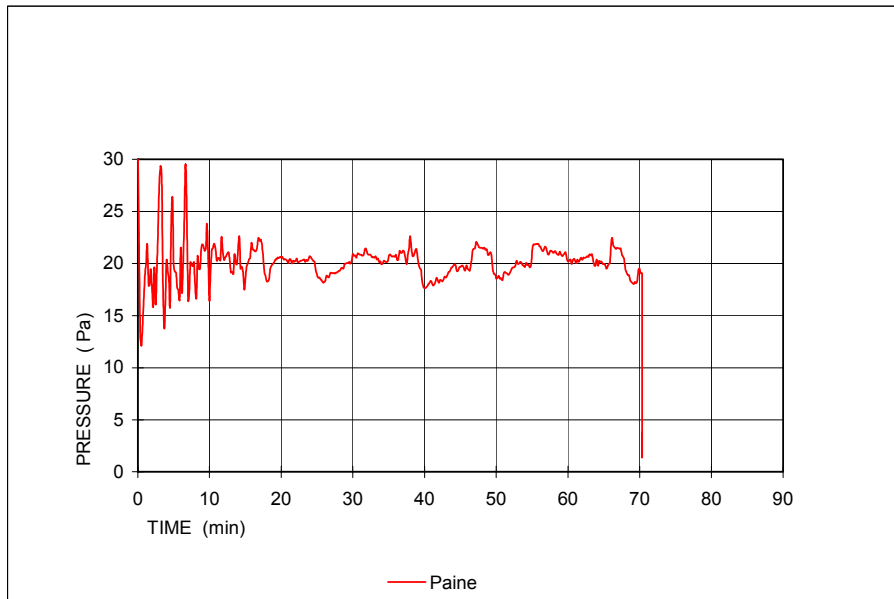


Kuva C.19. Teräslevyn lämpötilat. Tappivaarnaliitos Kerto-puussa 25.4.2005.

Liite C.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä



Kuva C.20. Paine-ero uunin ja koehallin välillä. Koe 20.4.2005. Tappivaarnaliitos liimapuussa.



Kuva C.21. Paine-ero uunin ja koehallin välillä. Koe 25.4.2005. Tappivaarnaliitos Kerto-puussa.

Liite C.6: Havainnot ja mitatut siirtymät

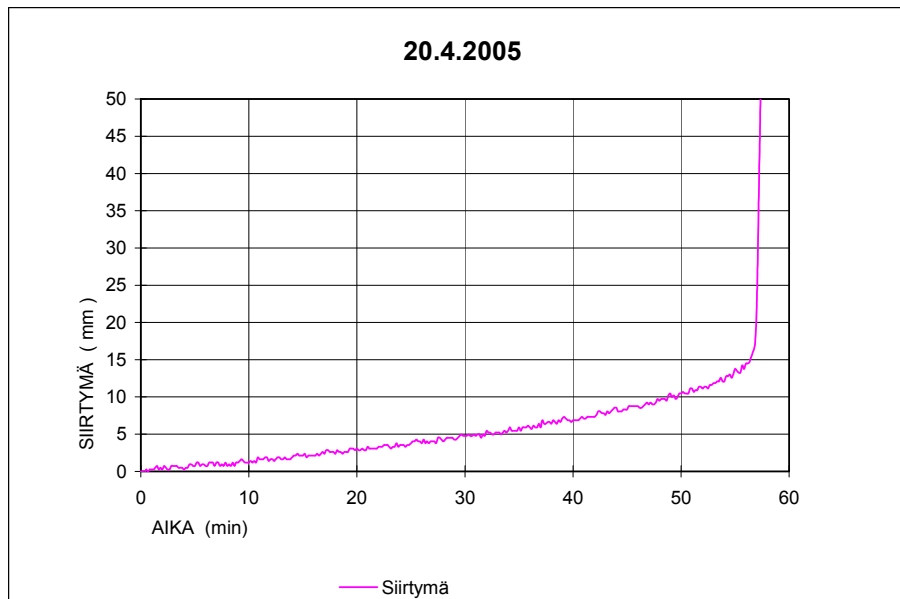
Tappivaarnaliitos liimapuussa

Koe 20.4.2005

Koeaika [min:s]	Havainnot
0:00	Koe alkoi.
0:10	Pinta syttyi
2:30	Pinta melkein sammunut, yksittäisiä liekkejä.
3:50	Palaa jälleen, saumasta tulee savua tai vesihöyryä.
7:00	Tasainen hiilikerros.
16:00	Alhaalta liitossaumasta on pudonnut hiilen pala. Muuten sauma on kiinni.
26:00	Pulttien päät näkyvät töröttäen. Hiilen paloja on pudonnut sieltä täältä.
47:00	Saumassa on vähän rakoa. Hiilen paloja putoilee välillä.
56:00	Taipuma alkoi kasvaa.
58:00	Koe lopetettiin. Liitos ei kantanut enää kuormaa.

Koekappale jäi paikoilleen uuniin kokeen lopettamisen jälkeen, ja sitä alettiin sammuttaa.

Kuvassa C.22 on esitetty ristikon huipun päältä mitattu keskikohdan siirtymä ajan funktiona.



Kuva C.22. Ristikon huipun päältä mitattu keskikohdan siirtymä.

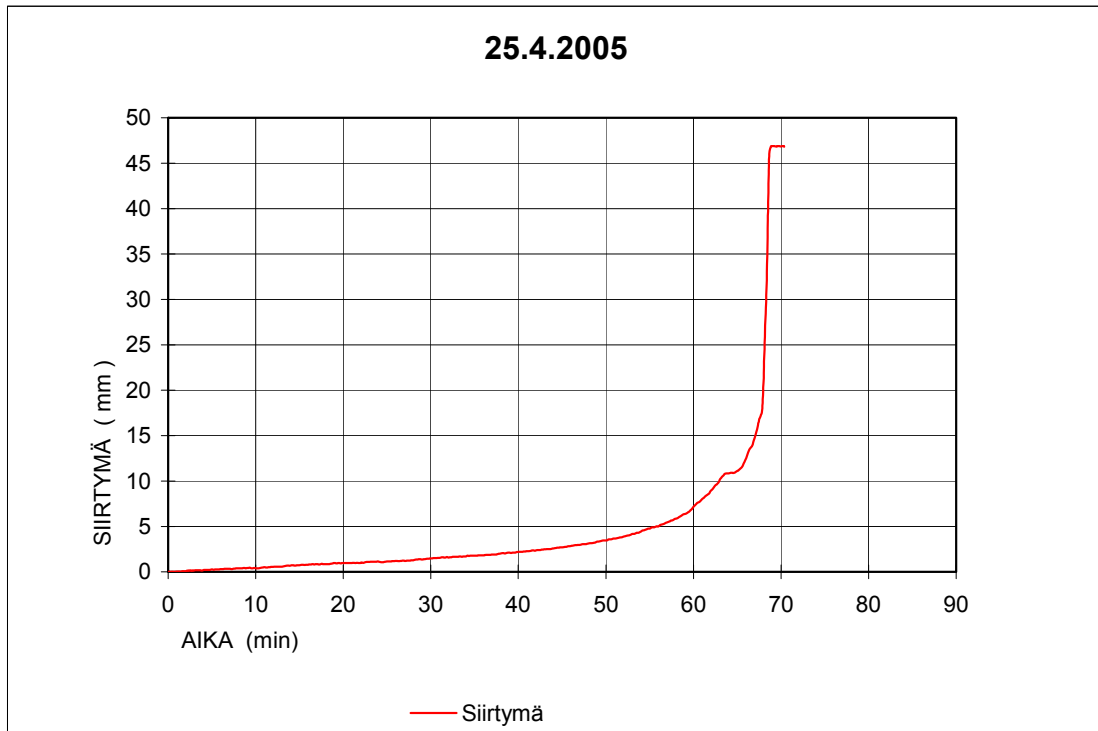
Tappivaarnaliitos Kerto-puussa

Koe 25.4.2005

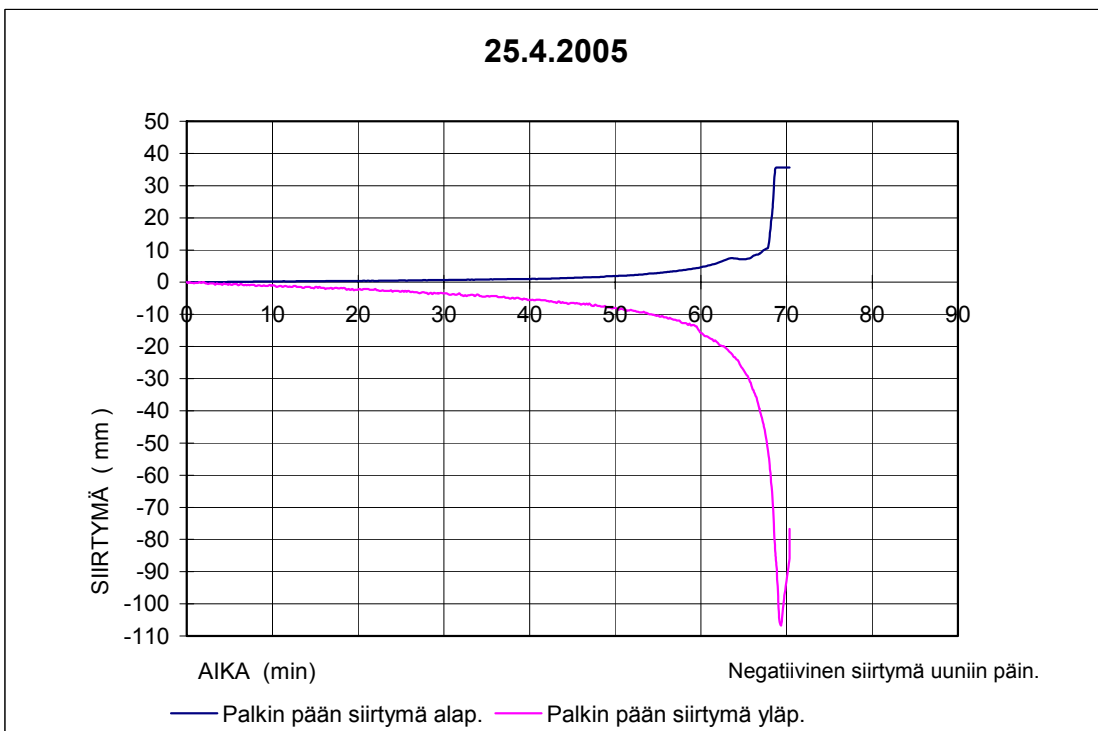
Koeaika [min:s]	Havainnot
0:00	Koe alkoi.
0:10	Palkin pinta syttyi toisesta päästä.
1:30	Koko palkki paloi rajusti.
2:20	Palaminen tyyntyi.
4:30	Palaminen tasaantunut.
45:00	Tasainen hiilikerros, hiilen paloja ei ole pudonnut. Liitoksessa noin 10 mm rako.
67:20	Taipuu tasaisesti. Hiilen paloja alkoi putoilla.
68:30	Liitos ei enää kantanut kuormaa.
70:15	Koe lopetettiin.

Koekappale jäi paikoilleen uuniin kokeen lopettamisen jälkeen, ja sitä alettiin sammuttaa.

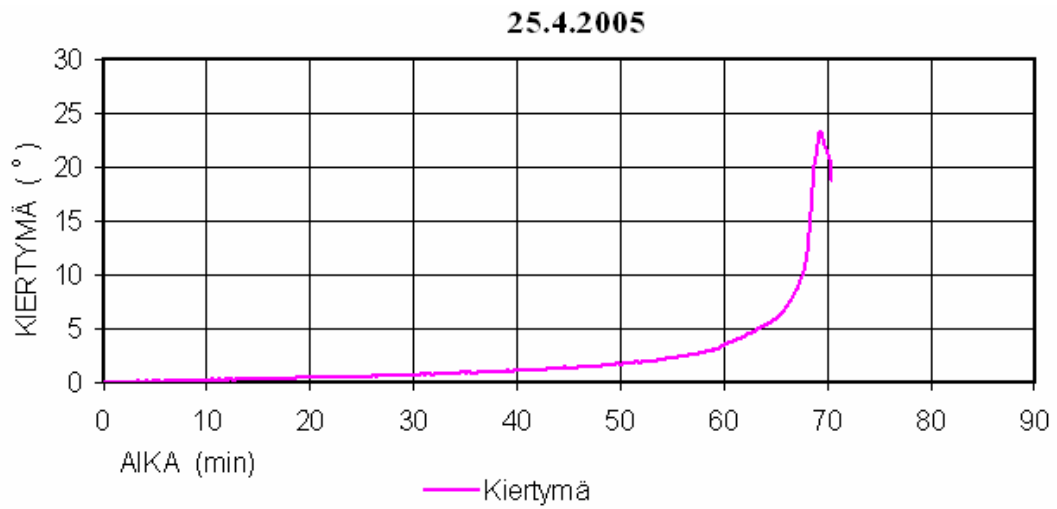
Kuvassa C.23 on esitetty ristikon huipun päältä mitattu keskikohdan siirtymä ajan funktiona. Kuvassa C.24 on esitetty ristikon liikkuvan tuen päästä mitatut alapaarteen ylä- ja alareunan pituussuuntaiset siirtymät ja kuvassa C.25 näiden siirtymien perusteella laskettu palkin pään kiertymä.



Kuva C.23. Ristikon huipun päältä mitattu keskikohdan siirtymä. Koe 25.4.2005.



Kuva C.24. Ristikon liikkuvan tuen päästä mitatut alapaarteiden ylä- ja alareunan pituussuuntaiset siirtymät. Koe 25.4.2005.



Kuva C.25. Ristikon pään kiertymä tuella. Koe 25.4.2005.

Liite C.7: Valokuvat

C.7.1 Tappivaarnejen lämpötilakoe 25.4.2005



Kuva C.26. Koekappale 62 min palon jälkeen.

C.7.2 Liimapuun tappivaarnaliitoskoe 20.4.2005



Kuva C.27. Liimapuuristikko uunissa ennen kokeen alkua.



Kuva C.28. Tilanne 3 minuutin jälkeen.



Kuva C.29. Tilanne 31 minuutin palon jälkeen.



Kuva C.30. Tilanne 52 minuutin jälkeen.



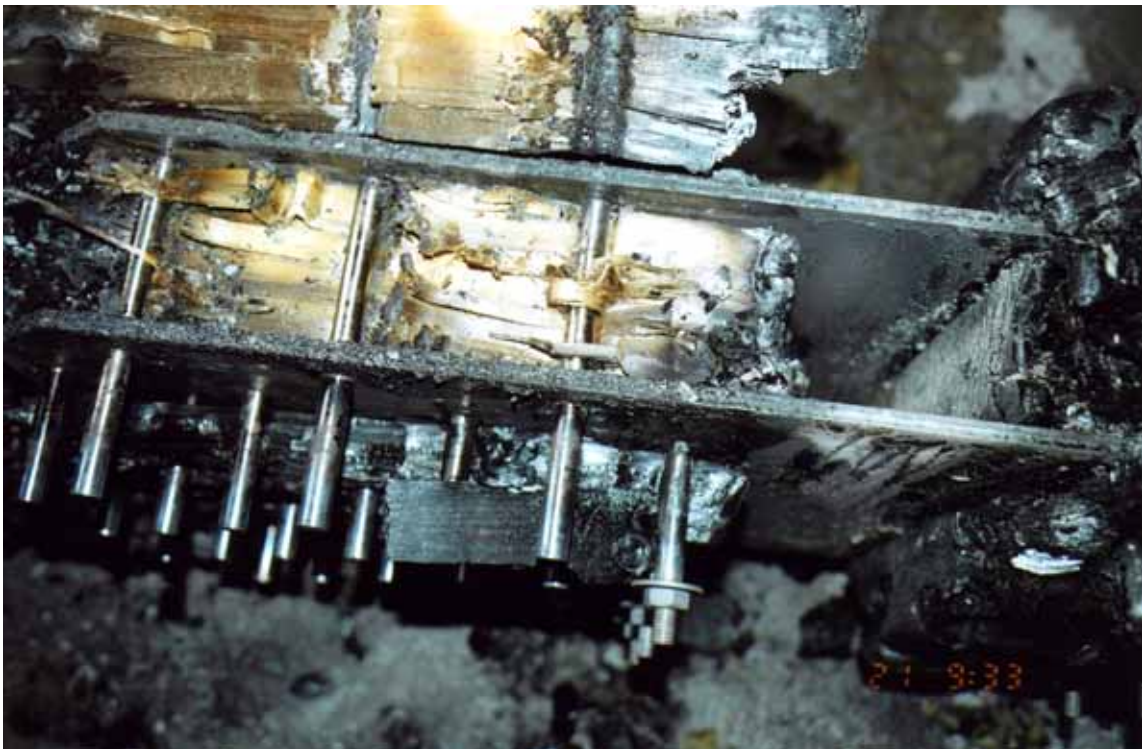
Kuva C.31. Liitos ei kannata kuormaa. Aika 57 minuuttia.



Kuva C.32. LP-liitos polttokokeen jälkeen.



Kuva C.33. LP-liitos polttokokeen jälkeen.



Kuva C.34. LP-liitos polttokokeen jälkeen.

C.7.3 Kertopuun tappivaarnaliitoskoe 25.4.2005



Kuva C.35. Liitoslevyt.



C.36. Valmis liitos.



Kuva C.37. Koekappale uunissa.



Kuva C.38. Uuni ja kuormitusjärjestely uunin päältä.



Kuva C.39. Koeaika 1 min.



Kuva C.40. Koeaika 32 min 10 s.



Kuva C.41. Koeaika 60 min 30 s.



Kuva C.42. Koeaika 67 min.



Kuva C.43. Koe on päättynyt.



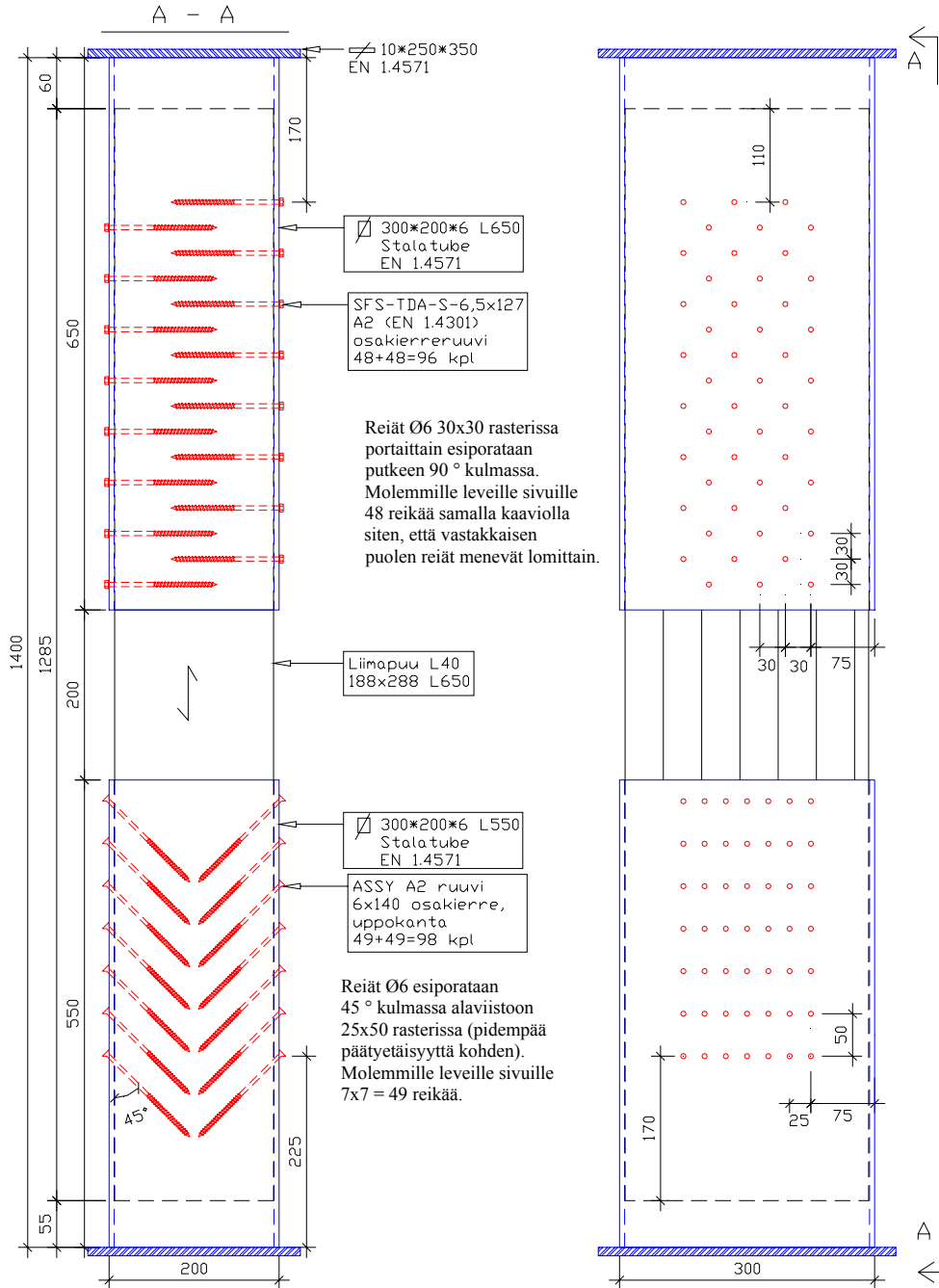
Kuva C.44. Koekappale palon jälkeen.



Kuva C.45. Koekappale palon jälkeen.

Liite D: Holkkiliitos

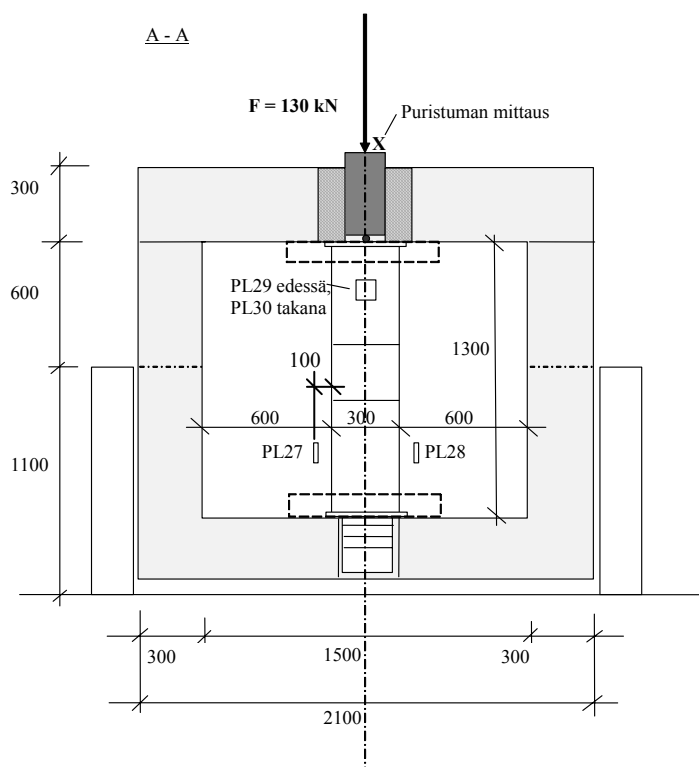
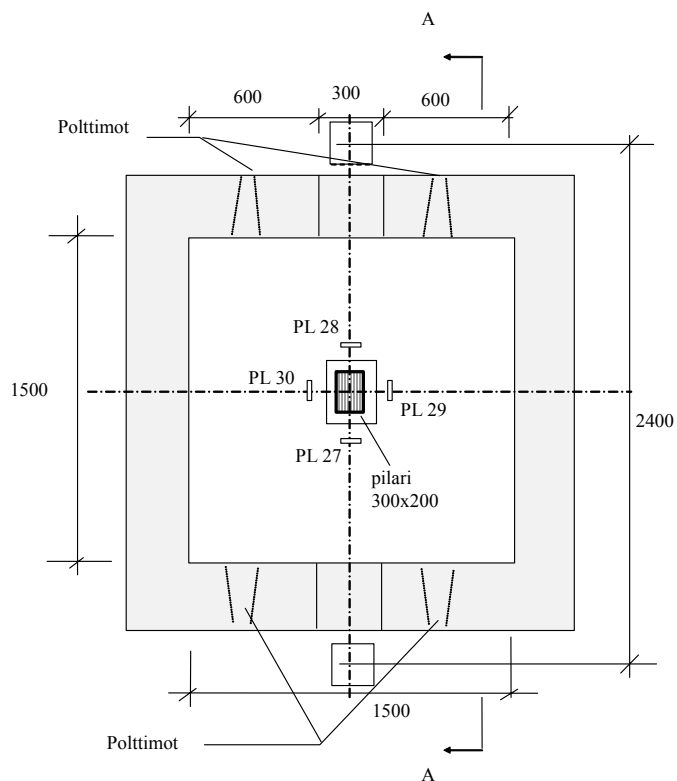
Liite D.1: Koekappalepiirustus



Kuva D.1. Holkkiliitosten koekappale. Koe 10.8.2005.

Liite D.2: Koejärjestelyt

Liite D.2.1. Koekappaleen sijanti uunissa



Kuva D.2. Koejärjestely uunissa (10.8.2005).

Liite D.2.2. Kuormituslaskelma

Normaalilämpötilan Eurocode 5:n mukaisten kapasiteettien laskennassa on käytetty seuraavia lähtötietoja:

- Liimapuun L40 on laskelmissa oletettu vastaavan EN 1194:n mukaista liimapuun lujuusluokkaa GL32c, jonka ominaistiheys $\rho_k = 410 \text{ kg/m}^3$.
- Suoraruuvauksessa leikkausliitoksen kapasiteetti on laskettu Eurocode 5:n ohjeiden mukaisesti esiporaamattoman naulaliitoksen kaavoilla. Ruuvien myötömomentti laskettiin Eurocode 5:n pyöreille nauloille tarkoitetulla kaavalla käyttäen vetomurtolujuutena valmistajan ilmoittamaa rst-ruuvien vetolujuuden minimiarvoa $f_{u,k} = 700 \text{ N/mm}^2$ ja ruuvien halkaisijana käytettiin tehollista paksuutta $d_{\text{eff}} = 4,95 \text{ mm}$, joka on 1,1 kertaa ruuvien kierreosan sisämitta. Köysivoimaefektin laskennassa tarvittava ruuvien tartuntakapasiteetti on laskettu CIB-W18/37-7-14:ssa esitetyn Eurocode 5:n muutosehdotuksen mukaan (Kevarinmäki 2004).
Liitoksen mitoittaa Eurocode 5:n paksun teräslevyn yhteydessä käytettävä kaava 8.10d, jossa liittimeen muodostuu kaksi plastista myötöniveltä.
- Vinoruuvausten kapasiteetin laskennassa käytettiin CIB-W18/35-7-4:n mukaista menetelmää. Vetomurtokapasiteetin ominaisarvo on laskettu ruuvien kierteisen osan sisähalkaisijan 3,8 mm ja valmistajan ilmoittaman ruuvimateriaalin vetolujuuden $f_{u,k} = 500 \text{ N/mm}^2$ mukaan $\Rightarrow F_{u,k} = 5,67 \text{ kN}$.
Tartuntalujuudelle on käytetty ominaisarvoa $f_{ax,45^\circ,k} = 5,1 \text{ N/mm}^2$, joka on laskettu GL32c-lujuusluokan tiheyteen korjatuista 6 mm:n yleisruuvilla tehdyistä ja CIB-W18/35-7-4:ssä esitetyistä ulosvetolujuuskokeiden tuloksista. Laskelmissa liikekitkakertoimen mitoitusarvoksi on oletettu $\mu = 0,3$.
- Liitosten kapasiteetilaskelmissa oletettiin, että kaikki liittimet toimivat aina samanaikaisesti täydellä teholla eli $n_{\text{ef}} = n$.
- Laskentakapasiteetti on laskettu NA-ehdotuksen mukaan keskipitkässä aikaluokassa ja käyttöluokassa 2.

Taulukko D.1. Liitosten ominais- ja laskentalujuudet.

koesarja	$F_{R,k}$ (kN)	$F_{R,d}$ (kN)
N -leikkausliitokset	411	303
D -vinoruuvi-liitokset	511	343

Holkkiiliitoksen palokokeen kuormitusvoima:

Normaalilämpötilan mitoituskuorma (EN 1995 + NA-ehdotus (13.4.2005):

– lumi: $q_{s,k} = 0,8 \cdot 2,5 \text{ kN/m}^2 = 2,0 \text{ kN/m}^2$.

Keskipitkä aikaluokka mitoittaa:

– $q_d = 1,15 \cdot 0,6 \text{ kN/m}^2 + 1,5 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 3,69 \text{ kN/m}^2$.

Palotilanteen mitoituskuorma (EN 1990 + NA):

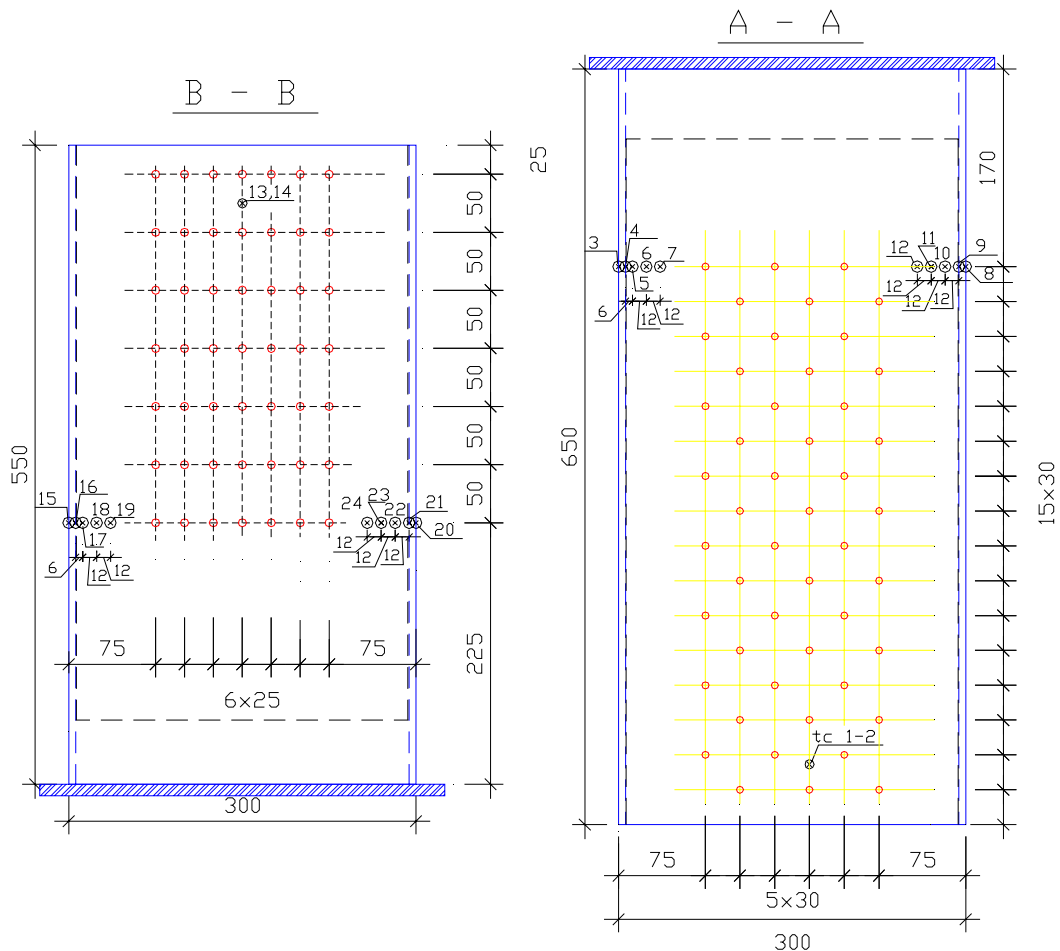
– $q_{d,fi} = 0,6 \text{ kN/m}^2 + 0,4 \cdot 2,0 \text{ kN/m}^2 = 1,4 \text{ kN/m}^2$. Suhde: $1,4 / 3,69 = 0,379$.

=> Palotilanteessa vaaditaan 38 %:n kapasiteettia normaalilämpötilan keskipitkän aikaluokan mitoituskuormasta.

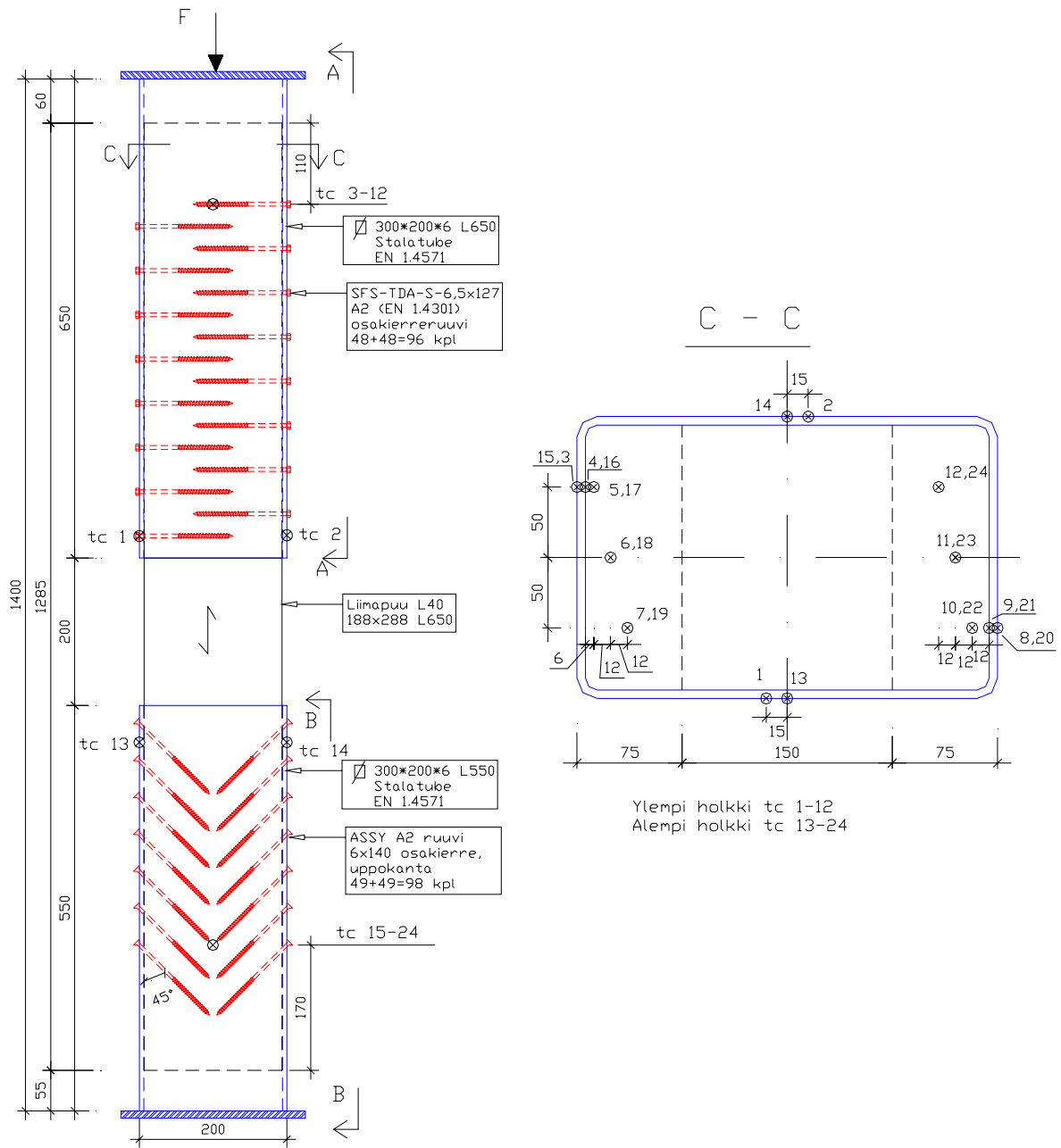
Keskipitkässä aikaluokassa liitoksen mitoituskapasiteetti (EN 1995:2004 + NA-ehdotus [13.4.2005]):

– $F_{R,d} = 343 \text{ kN}$ => Liitoksen kuormitus palotestissä: **$F_{fi, \text{test}} = 0,38 \cdot 343 \text{ kN} = 130 \text{ kN}$**

Liite D.3: Lämpötilojen mittauspisteiden paikat

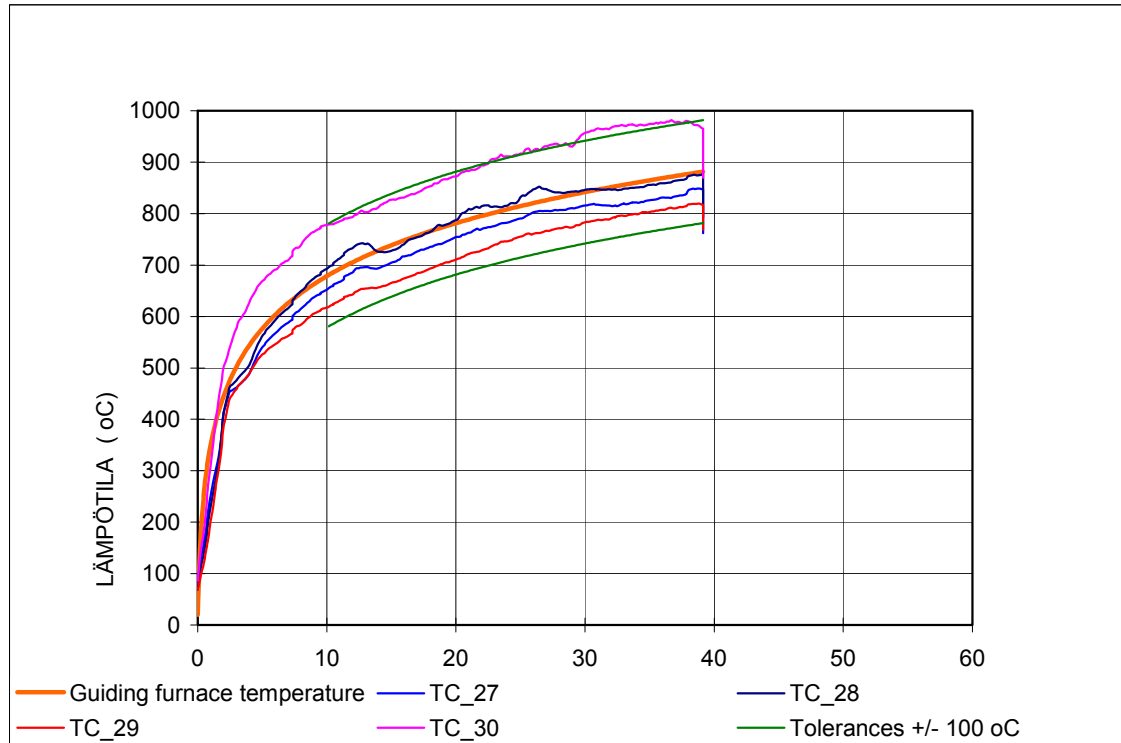


Kuva D.3. Holkkiiliitoksen lämpötilojen mittauspisteet, leikkaukset A-A ja B-B.

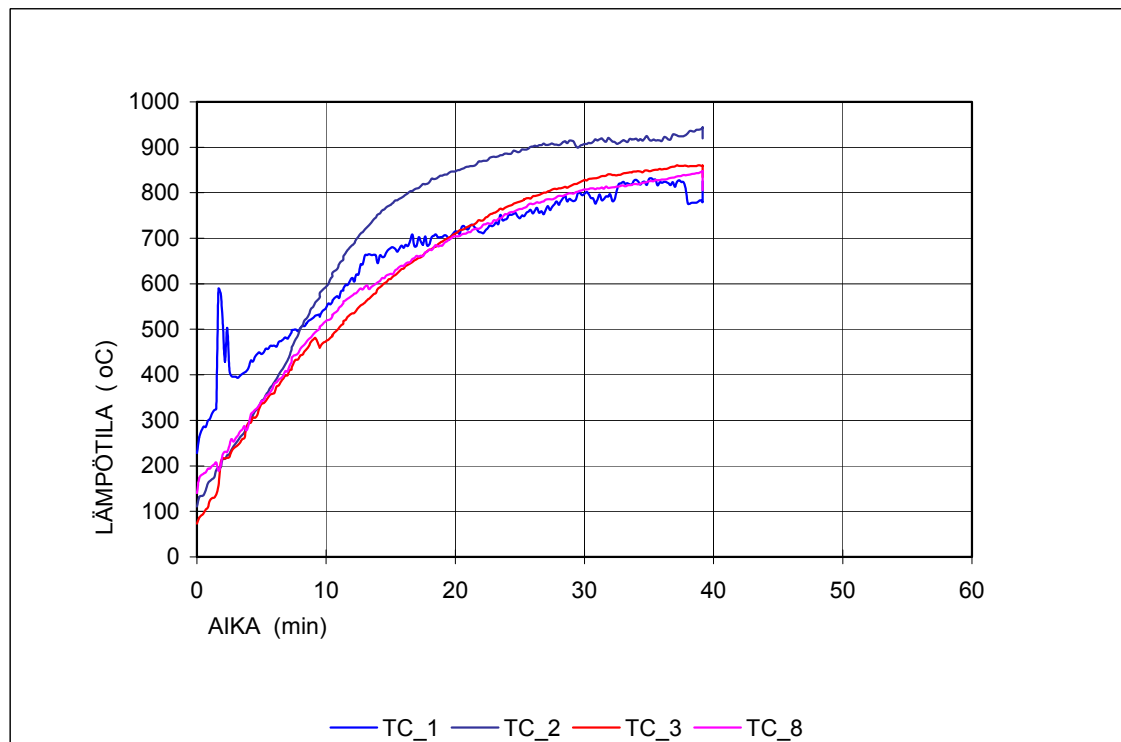


Kuva D.4. Holkkiliitoksen lämpötilojen mittauspisteet (10.8.2005).

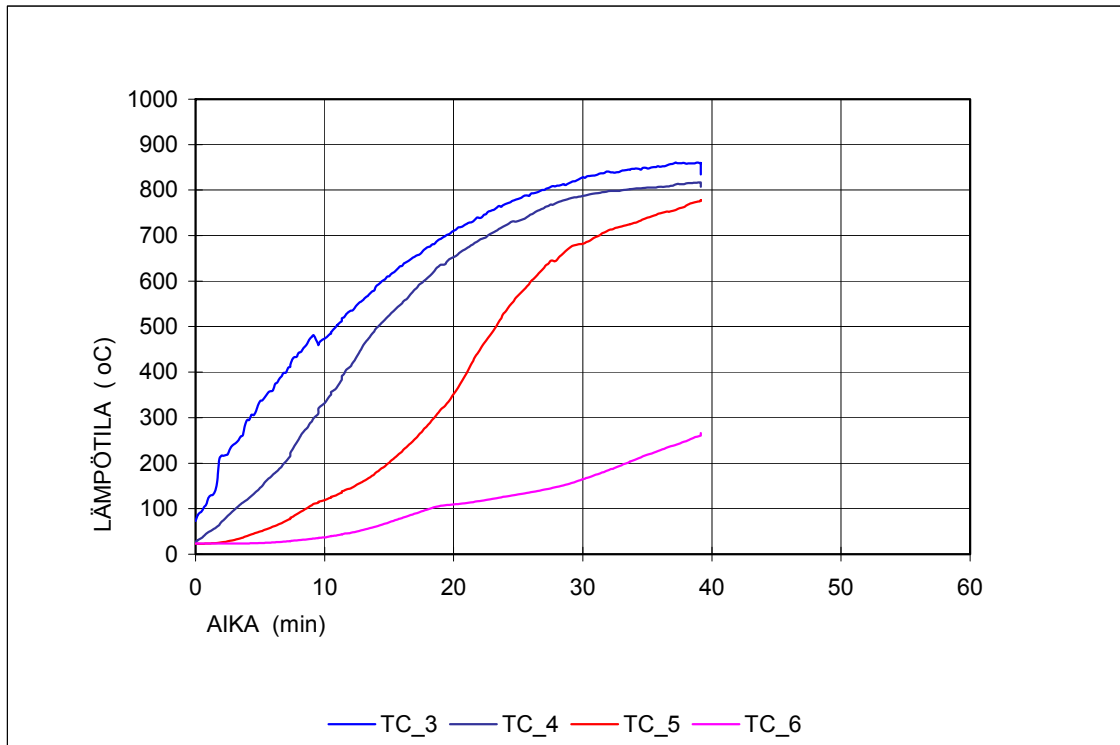
Liite D.4: Uunin ja koekappaleiden lämpötilat



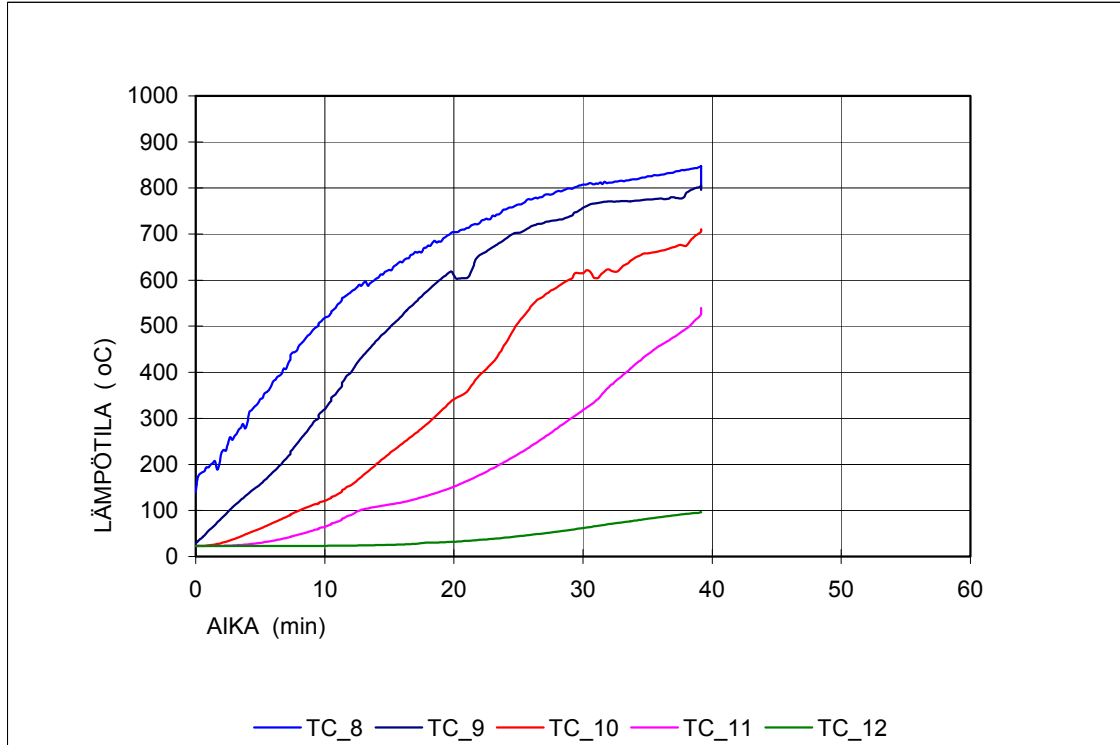
Kuva D.5. Uunin lämpötilat (tc27 ja tc28 vinoruuvatun holkin vieressä ja tc29 ja tc30 suoraruuvatus holkin vieressä).



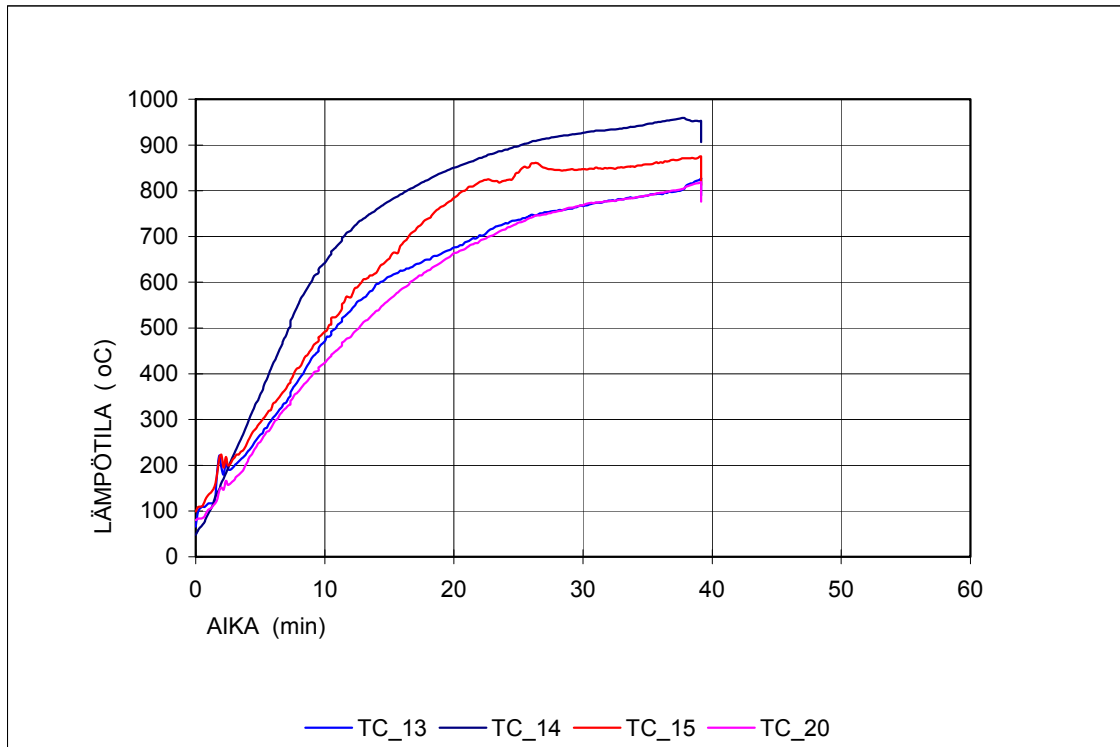
Kuva D.6. Teräslevyn lämpötilat suoraruuvatussa holkissa.



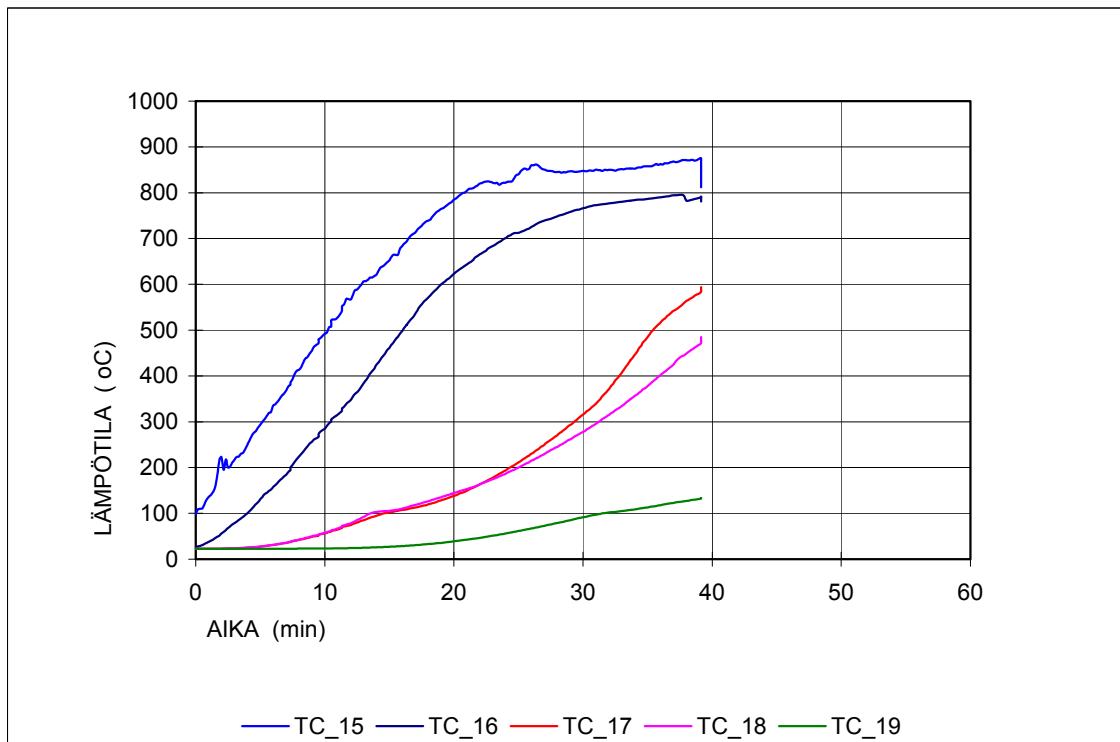
Kuva D.7. Teräslevyn ja puun lämpötilat suoraruuvatussa holkissa.



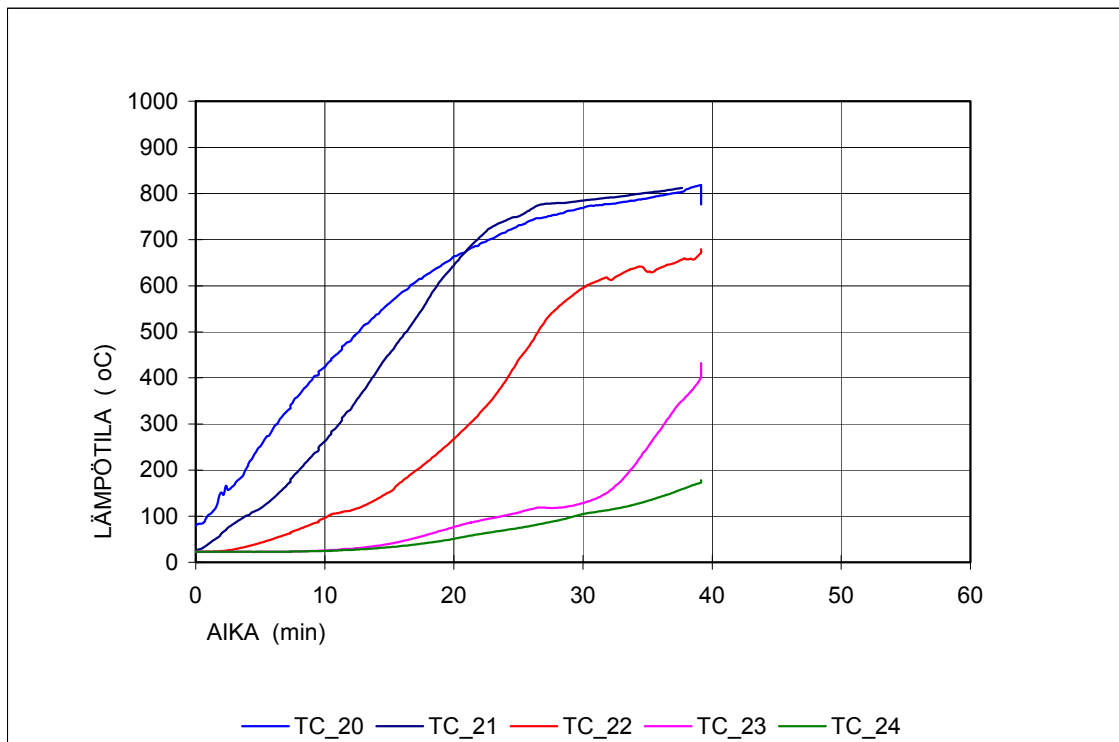
Kuva D.8. Teräslevyn ja puun lämpötilat suoraruuvatussa holkissa.



Kuva D.9. Teräslevyn lämpötilat vinoruuvatussa holkissa.

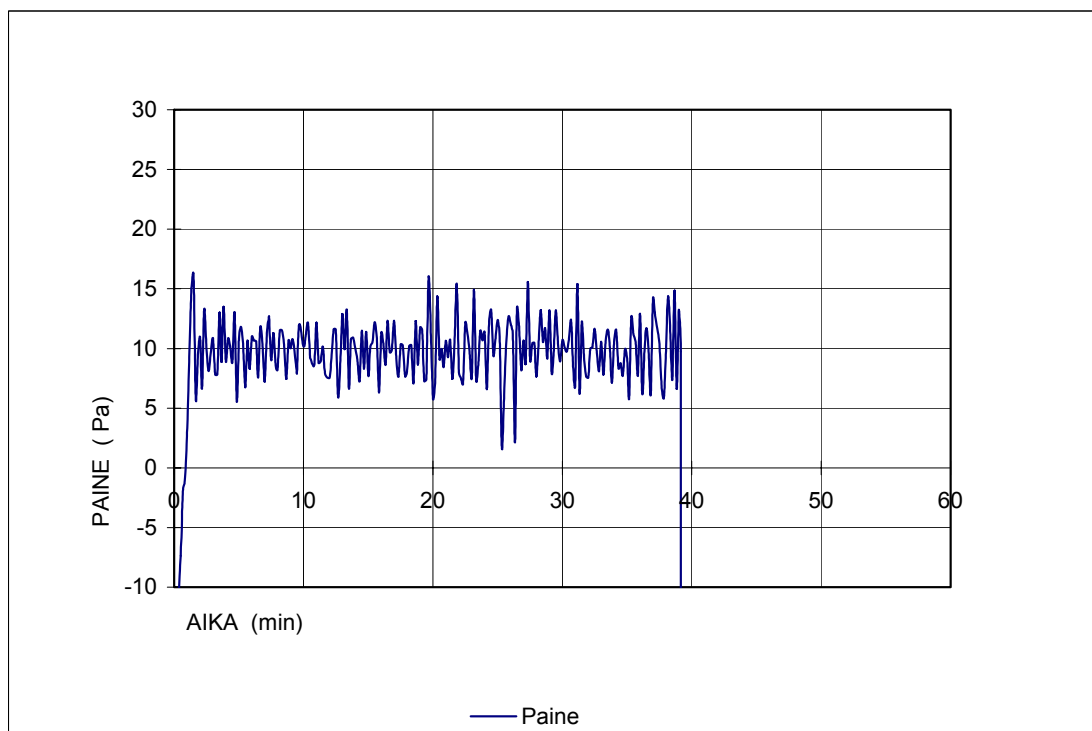


Kuva D.10. Teräslevyn ja puun lämpötilat vinoruuvatussa holkissa.



Kuva D.11. Teräslevyn ja puun lämpötilat vinoruuvatussa holkissa.

Liite D.5: Paine-ero uunin ja koehallin välillä



Kuva D.12. Paine-ero uunin ja koehallin välillä.

Liite D.6: Havainnot ja mitatut siirtymät

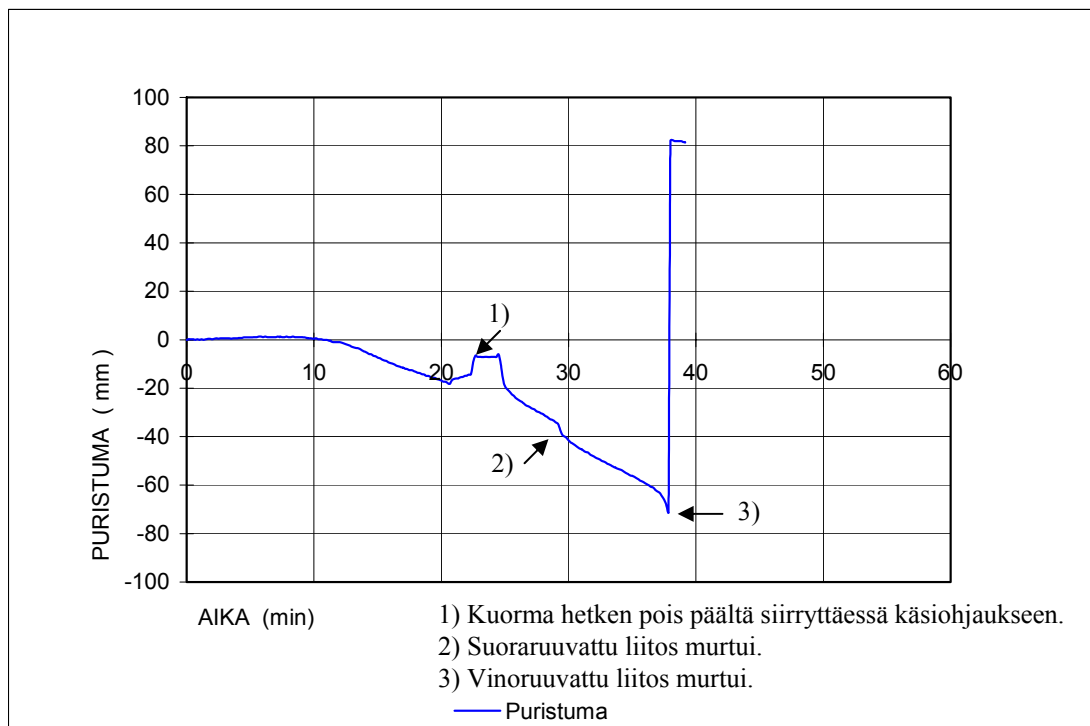
Holkkiliitokset liimapuussa

Koe 10.8.2005

Alkukuormitus $F = 130$ kN tehtiin kahteen kertaan. Liitosten yhteenlaskettu siirtymä oli alle 2 mm. Siirtymäanturin nollaus tehtiin koekuormituksen asettamisen jälkeen.

Koeaika [min:s]	Havainnot
0:00	Koe alkoi.
1:00	Pilarin pinta alkoi tummua.
1:50	Pinta syttyi.
22:00	Häiriö automaattisessa voimaohjauksessa, minkä vuoksi siirryttiin käsiohjaukseen, $F = 130$ kN.
29:10	Suoraruuviliitos murtui. Puristuma kasvoi nopeasti, kunnes holkki oli painunut kiinni pilarin päähän. Liitoksen ruuveja meni poikki.
31:10	Puristuma alkoi jälleen kasvaa tasaisesti.
n. 37:00	Vinoruuvien rei'istä kantojen vierestä alkoi tulla palavaa kaasua. Puristuma kasvoi.
37:40	Liitos ei kantanut enää kuormaa, joten koe lopetettiin. Hauras murtuminen. Vinoruuvit poikki kannan alta.

Koekappale jäi paikoilleen uuniin kokeen lopettamisen jälkeen, ja sitä alettiin sammuttaa.

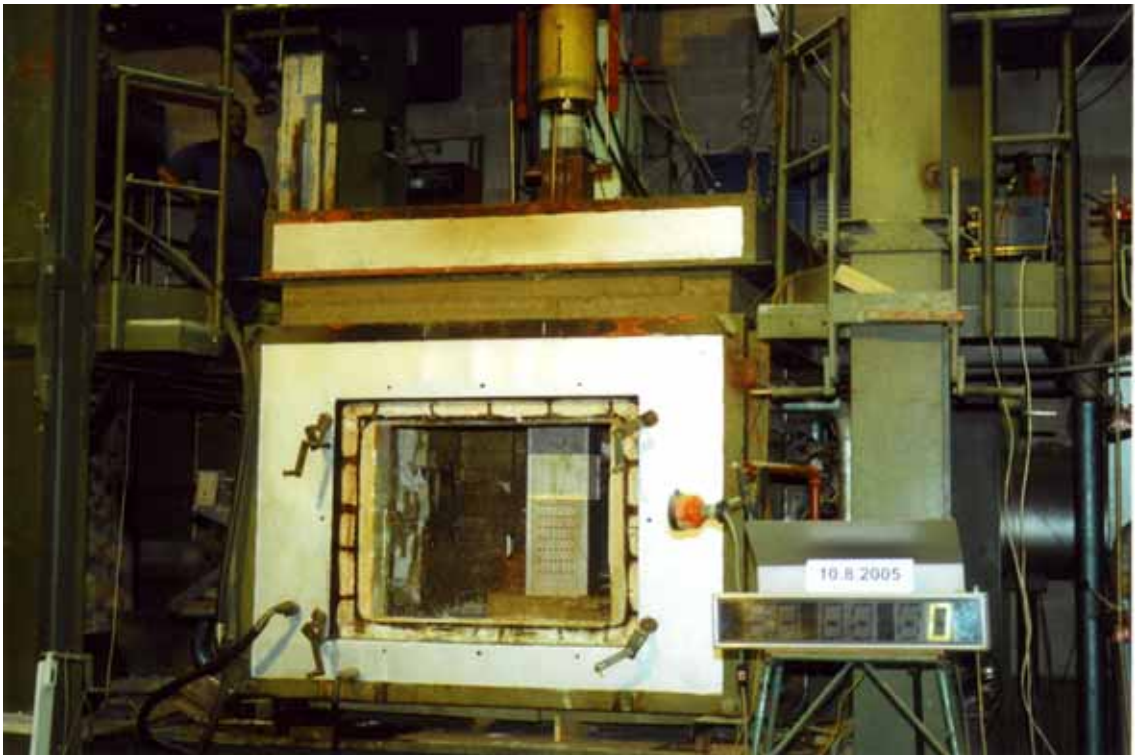


Kuva D.13. Pilarin päältä mitattu puristuma (sisältää molempien holkkien siirtymät).

Liite D.7: Valokuvat



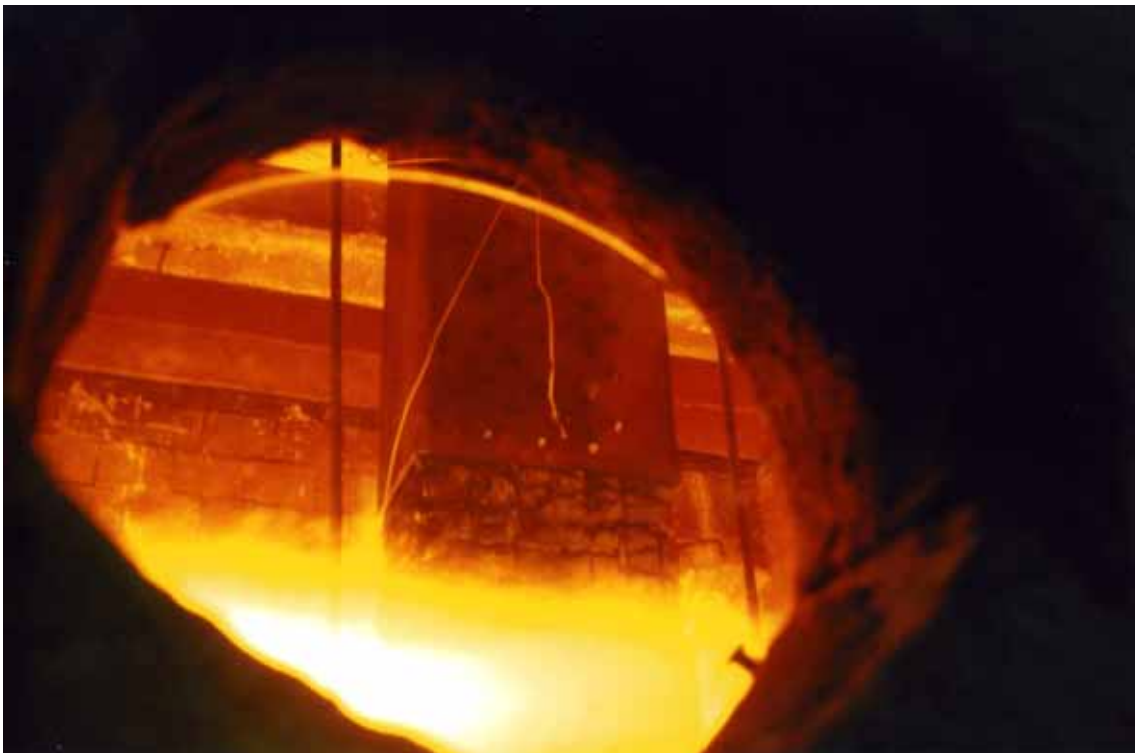
Kuva D.14. Koekappale K-uunissa ennen koetta.



Kuva D.15. Koejärjestely.



Kuva D.16. Koeaika 20 s.



Kuva D.17. Koeaika 14 min.



Kuva D.18. Koeaika 26 min.



Kuva D.19. Koeaika 34 min. Suoraruuvauksen ruuveja murtunut poikki.



Kuva D.20. Koeaika 37 min.



Kuva D.21. Koekappale kokeen jälkeen.

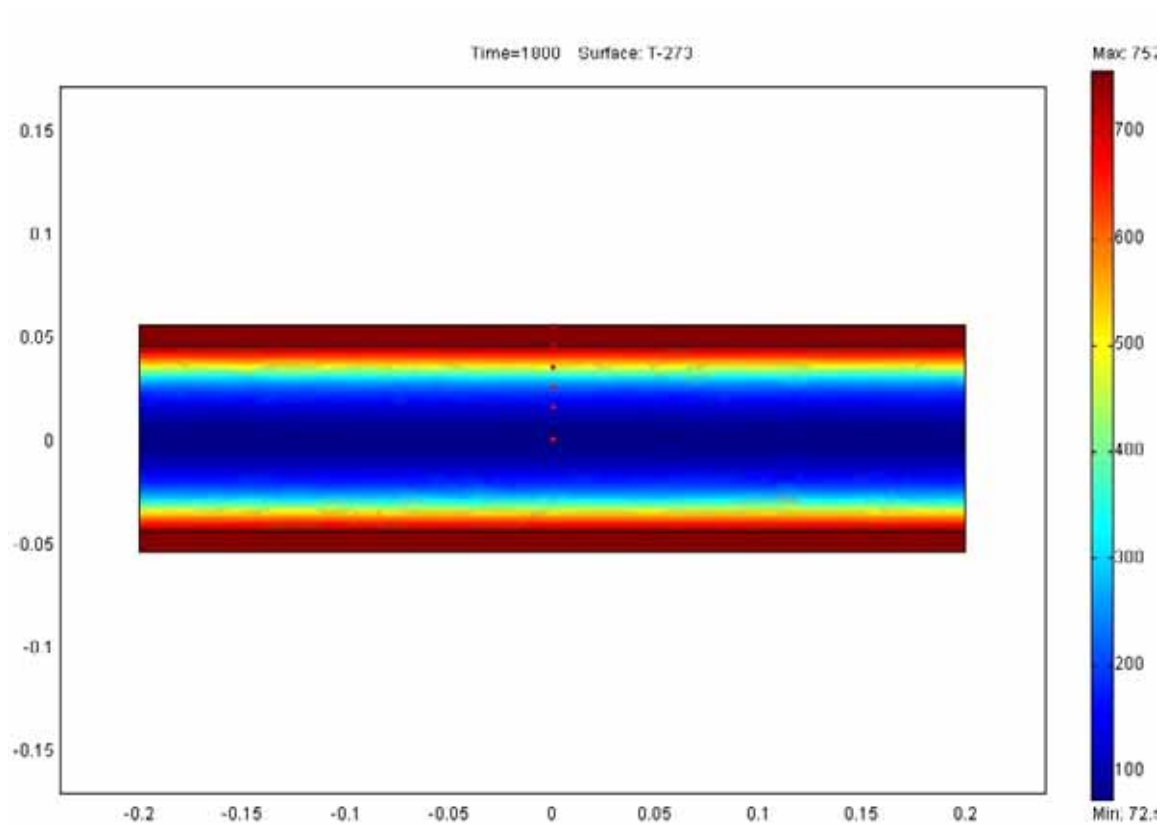


Kuva D.22. Koekappaleen sivu uunin aukon puolelta (vas.) ja uunin aukon vastakkaiselta puolelta (oik.).

Liite E: Liitoksen lämpötilanlaskenta

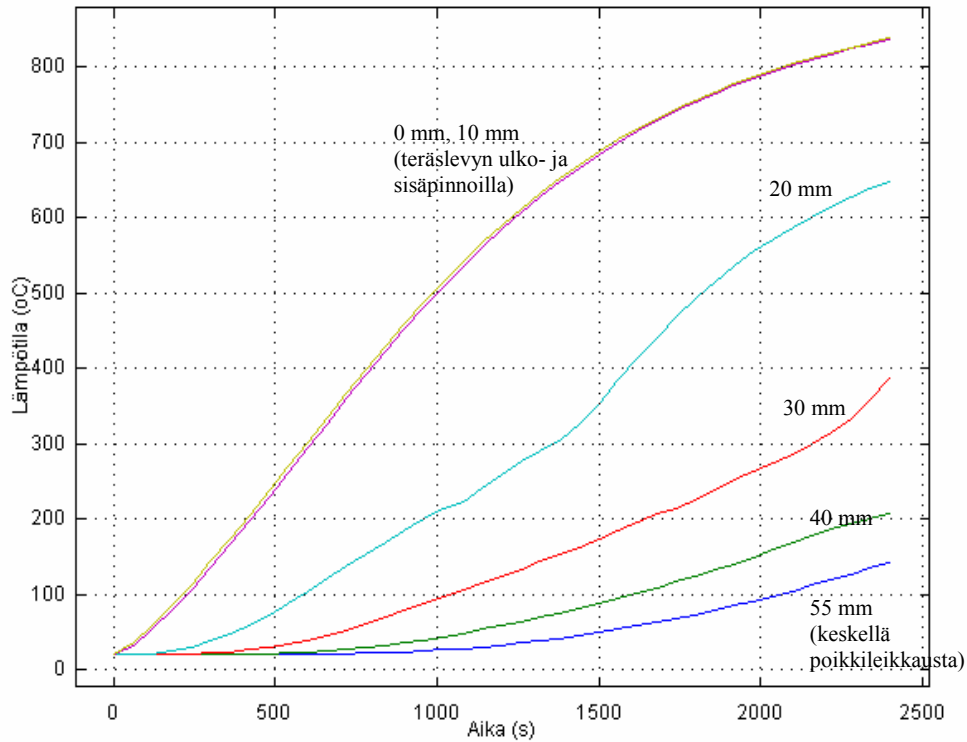
Liite E.1. Lasketut lämpötilat rakenteessa, jossa teräslevyt puupalkin päällä

RST-levy 10 mm – kuiva puu – RST-levy 10 mm



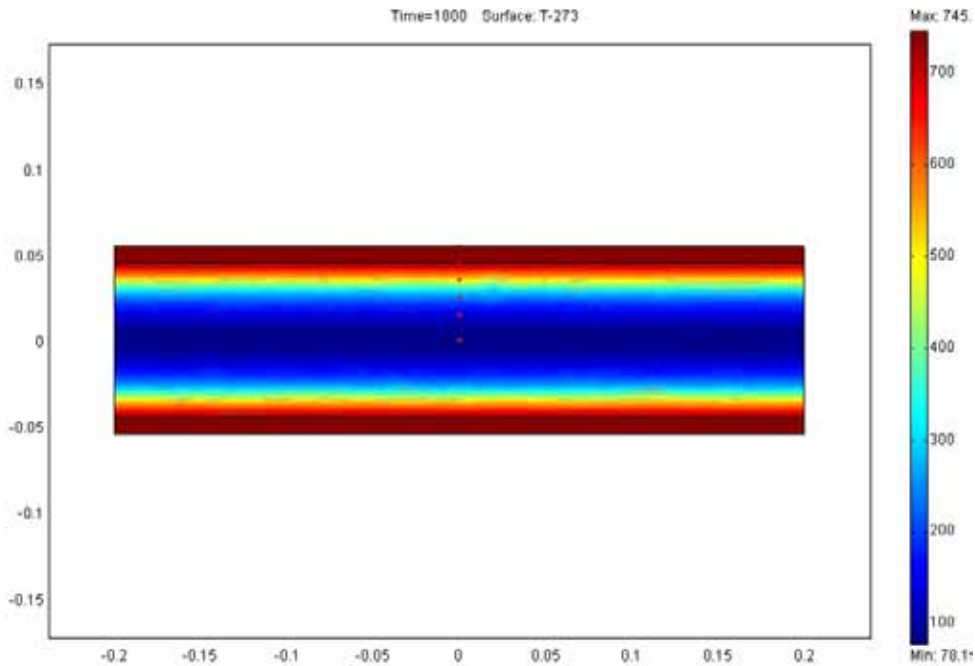
Kuva E.1. Lämpötilajakauma (°C) ajanhetkellä $t = 1\,800\text{ s}$ (30 min). Kuvan E.2 käyriä vastaavat pisteet merkitty punaisella.

rst-kuiva puu-rst: lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta



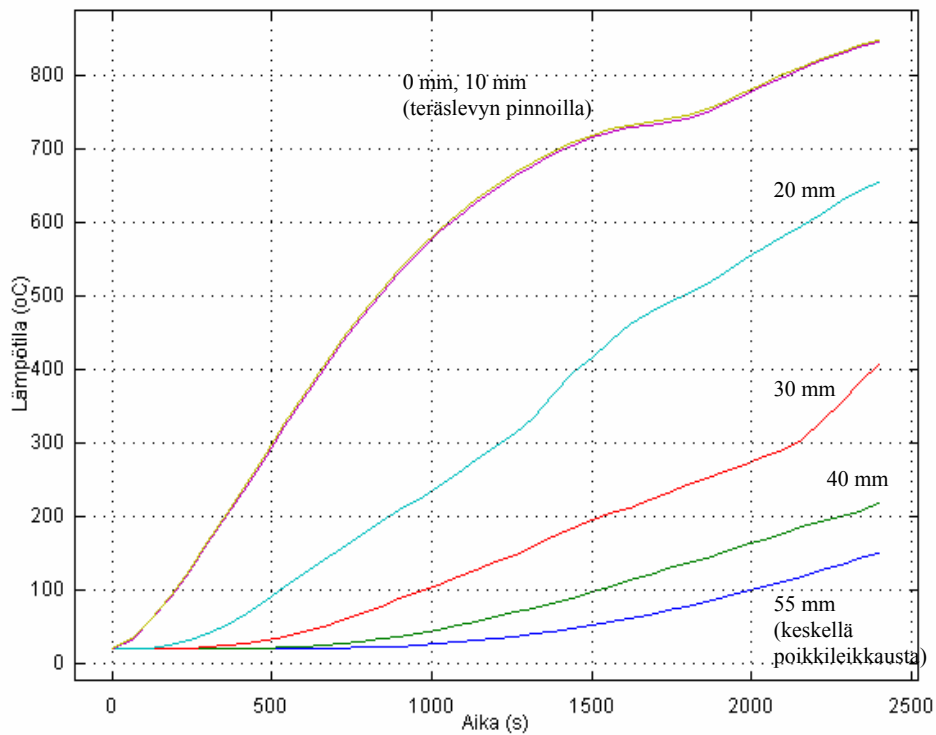
Kuva E.2. Puun ja teräksen lämpötilat (°C) eri etäisyyksillä palavasta pinnasta. Mittauspisteet esitetty kuvassa E.1.

S355-levy 10 mm – kuiva puu – S355-levy 10 mm



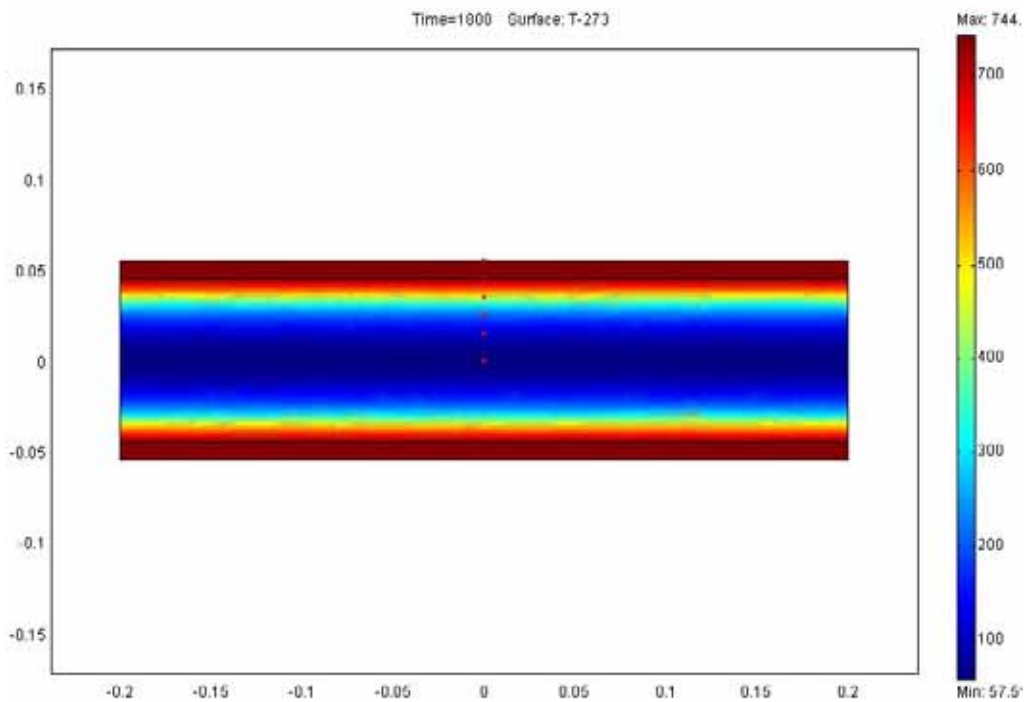
Kuva E.3. Lämpötilajakauma (°C) ajanhetkellä $t = 1\ 800\ s$ (30 min). Kuvan E.4 käyriä vastaavat pisteet merkitty punaisella.

S355-kuiva puu-S355: lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta



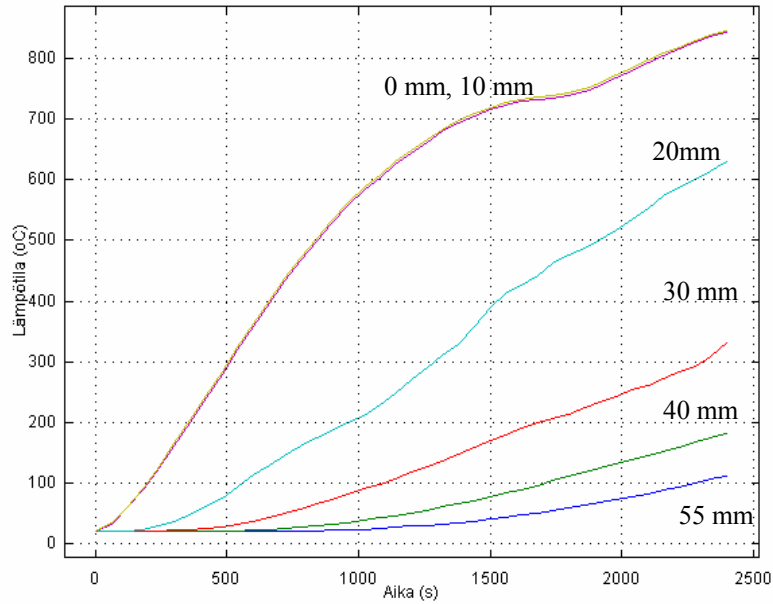
Kuva E.4. Puun ja teräksen lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta. Mittauspisteet esitetty kuvassa E.3.

S355-levy 10 mm – puu 10 % – S355-levy 10 mm



Kuva E.5. Lämpötilajakauma ajanhetkellä $t = 1\ 800\ s$ (30 min). Kuvan E.6 käyriä vastaavat pisteet merkitty punaisella.

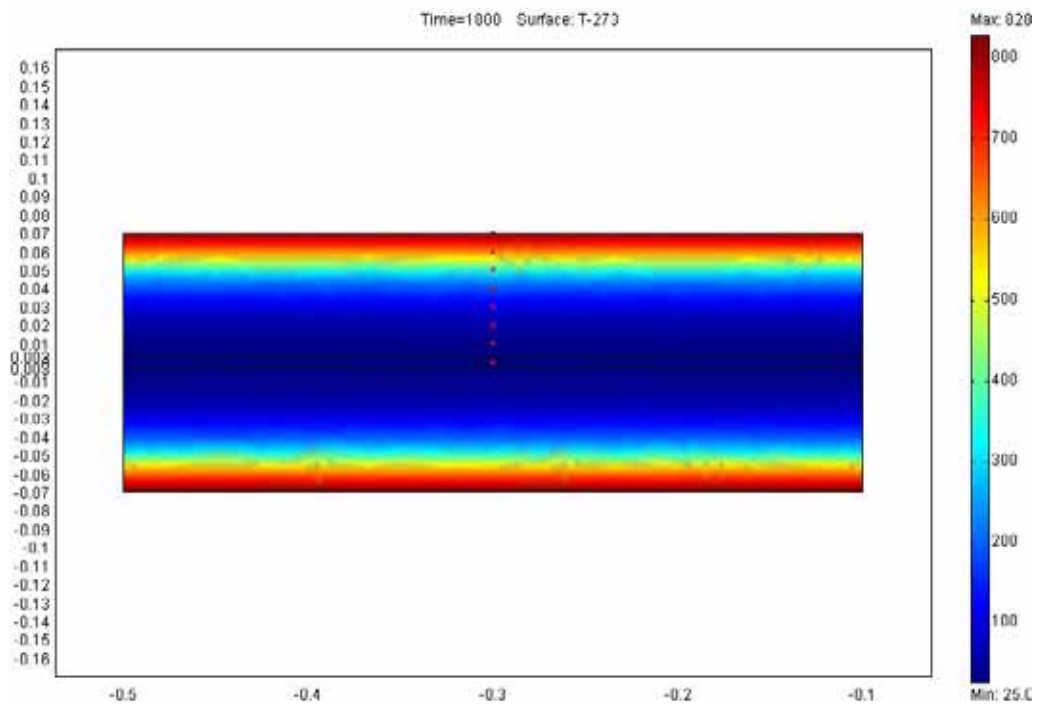
S355-puu10%-S355: lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta



Kuva E.6. Puun ja teräksen lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta. Mittauspisteet esitetty kuvassa E.5.

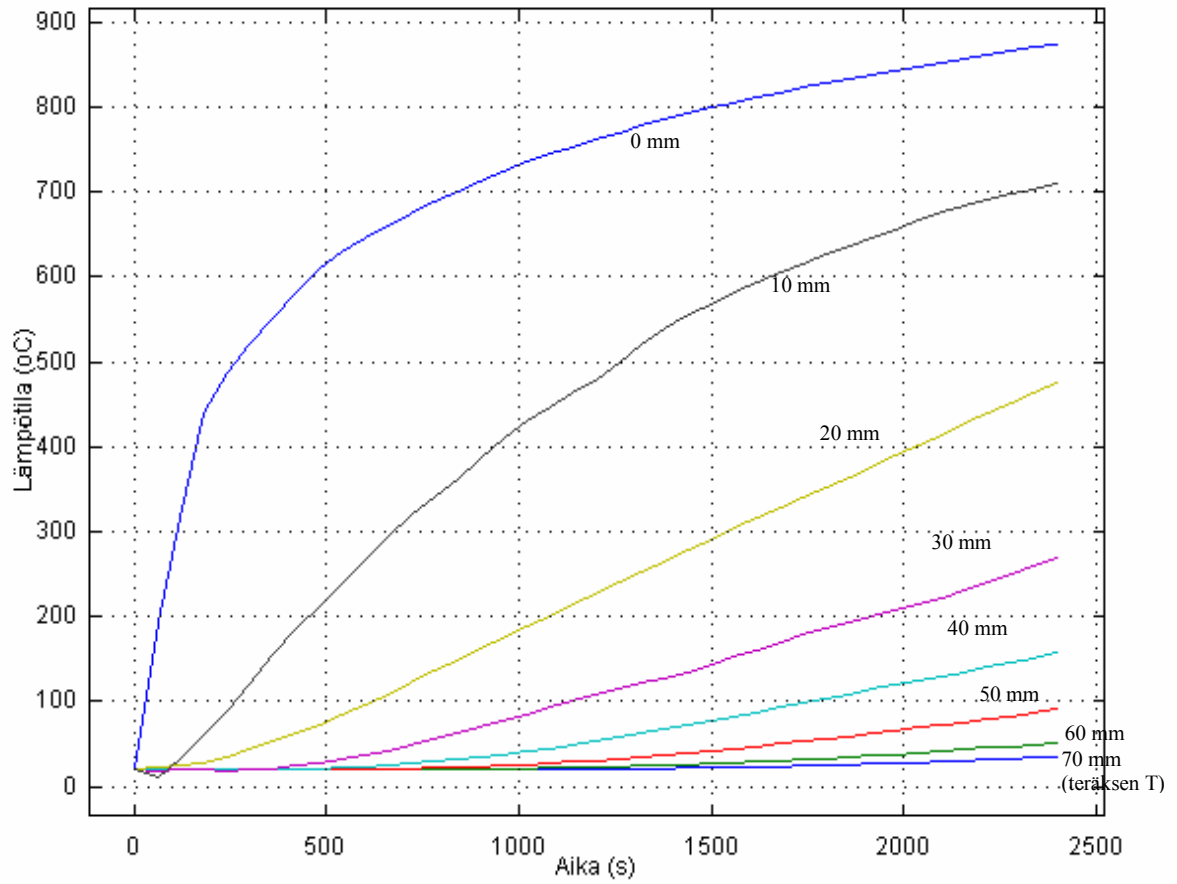
Liite E.2. Lasketut lämpötilat rakenteessa, jossa teräslevyt puupalkin sisällä

kuiva puu – rst-levy 6 mm – kuiva puu



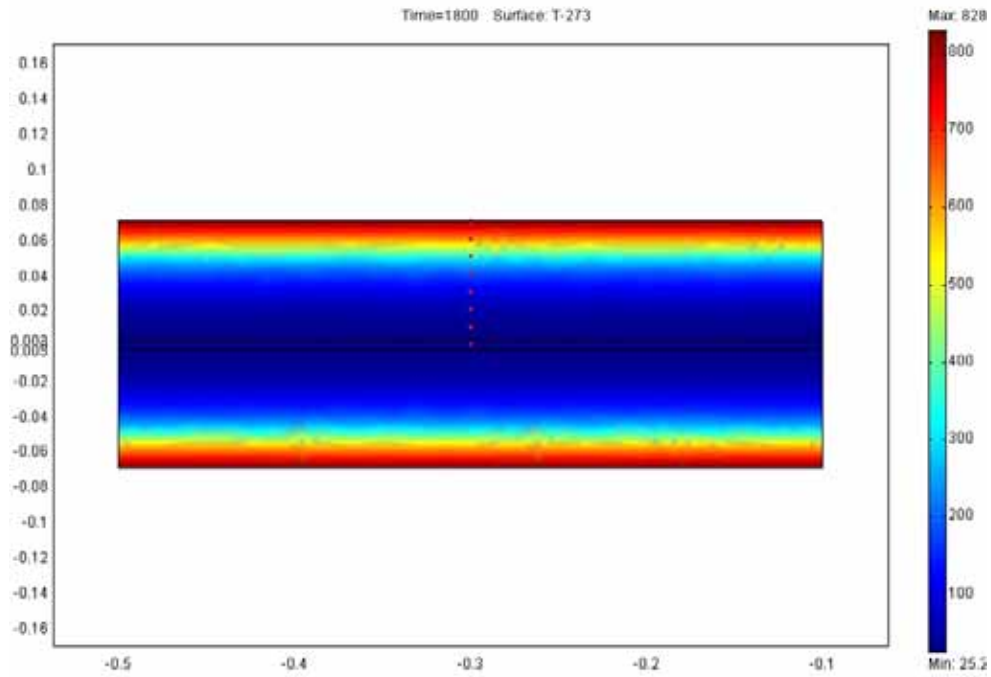
Kuva E.7. Lämpötilajakauma ajanhetkellä $t = 1\ 800\ s$ (30 min). Kuvan E.8 käyriä vastaavat pisteet merkitty punaisella.

Lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta (eps_surface = 0.5)



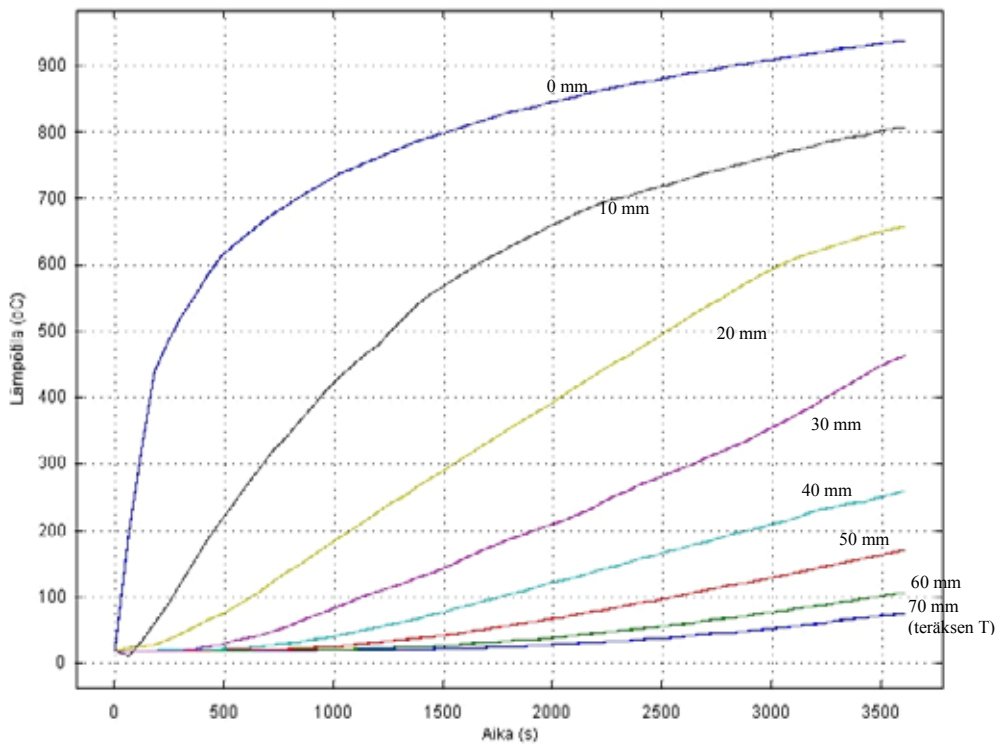
Kuva E.8. Puun ja teräksen lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta. Mittauspisteet esitetty kuvassa E.7.

kuiva puu – S355-levy 6 mm – kuiva puu



Kuva E.9. Lämpötilajakauma ajanhetkellä $t = 1\ 800\ s$ (30 min). Kuvan E.8 käyriä vastaavat pisteet merkitty punaisella.

Lämpötilat eri etäisyyksillä palavasta pinnasta (eps_surface = 0.5)



Kuva E.10. Puun ja teräksen lämpötilat ($^{\circ}C$) eri etäisyyksillä palavasta pinnasta. Mittauspisteet esitetty kuvassa E.7.

VTT WORKING PAPERS

VTT RAKENNUS- JA YHDYSKUNTATEKNIikka – VTT BYGG OCH TRANSPORT – VTT BUILDING AND TRANSPORT

- 4 Hietaniemi, Jukka, Hostikka, Simo & Vaari, Jukka. FDS simulation of fire spread – comparison of model results with experimental data. 2004. 46 p. + app. 6 p.
- 6 Viitanen, Hannu. Betonin ja siihen liittyvien materiaalien homehtumisen kriittiset olosuhteet – betonin homeenkesto. 2004. 25 s.
- 7 Gerlander, Riitta & Koivu, Tapio. Asiantuntijapalvelu yritysten innovaatiojohtamisen kehittämiseksi Piilaakson osaamiseen tukeutuen. IMIT SV -hankkeen loppuraportti. 2004. 25 s. + liitt. 11 s.
- 11 Lakka, Antti. Rakennustyömaan tuottavuus. 2004. 26 s. + liitt. 15 s.
- 14 Koivu, Tapio, Tukiainen, Sampo, Nummelin, Johanna, Atkin, Brian & Tainio, Risto. Institutional complexity affecting the outcomes of global projects. 2004. 59 p. + app. 2 p.
- 15 Rönty, Vesa, Keski-Rahkonen, Olavi & Hassinen, Jukka-Pekka. Reliability of sprinkler systems. Exploration and analysis of data from nuclear and non-nuclear installations. 2004. 89 p. + app. 9 p.
- 18 Nyssönen, Teemu, Rajakko, Jaana & Keski-Rahkonen, Olavi. On the reliability of fire detection and alarm systems. Exploration and analysis of data from nuclear and non-nuclear installations. 2005. 62 p. + app. 6 p.
- 19 Tillander, Kati, Korhonen, Timo & Keski-Rahkonen, Olavi. Pelastustoimen määräiset seurantamittarit. 2005. 123 s. + liitt. 5 s.
- 20 Simo Hostikka & Johan Mangs. MASIFIRE – Map Based Simulation of Fires in Forest-Urban Interface. Reference and user's guide for version 1.0. 2005. 52 p. + app. 2 p.
- 21 Korttesmaa, Markku & Kevarinmäki, Ari. Massiivipuu maalarakentamisessa. Suunnitteluohje. 2005. 76 s. + liitt. 6 s.
- 22 Ojanen, Tuomo & Ahonen, Jarkko. Moisture performance properties of exterior sheathing products made of spruce plywood or OSB. 2005. 52 p. + app. 12 p.
- 27 Kevarinmäki, Ari. Konenaulojen ulosvetolujuus. 2005. 24 s. + liitt. 12 s.
- 29 Oksanen, Tuuli, Kevarinmäki, Ari, Yli-Koski, Rainer & Kaitila, Olli. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten palonkestävyys. 2005. 104 s. + liitt. 108 s.
- 31 Hietaniemi, Jukka. A Probabilistic Approach to Wood Charring Rate. 2005. 53 p.
- 32 Korhonen, Timo & Hietaniemi, Jukka. Fire Safety of Wooden Façades in Residential Suburb Multi-Storey Buildings. 2005. 66 p. + app. 40 p.
- 37 Hietaniemi, Jukka & Rinne, Tuomo. Tulipalojen yksittäispäästöt ilmaan: laskennallinen lähestymistapa. 2005. 78 s.
- 38 Kevarinmäki, Ari, Oksanen, Tuuli & Yli-Koski, Rainer. Ruostumattomasta teräksestä valmistettujen puurakenteiden liitosten suunnittelu. Yleiset ohjeet ja palomitoitus. 2005. 51 s. + liitt. 12 s.