

**Tiina Ala-Outinen, Jukka Myllymäki, Djebar Baroudi  
& Tuuli Oksanen**

## **Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa**



# **Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa**

Tiina Ala-Outinen, Jukka Myllymäki, Djebbar Baroudi &  
Tuuli Oksanen

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka



ISBN 951-38-5914-2 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5915-0 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 2001

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT), Vuorimiehentie 5, PL 2000, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 4374

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 4374

Technical Research Centre of Finland (VTT), Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 4374

VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät,  
Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7004

VTT Bygg och transport, Konstruktioner och husteknik,  
Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7004

VTT Building and Transport, Structures and Building Services,  
Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 9 4561, fax + 358 9 456 7004

Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. [Stainless steel structures exposed to fire]. Espoo 2001. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2112. 53 s. + liitt. 9 s.

**Avainsanat** stainless steel, steel structures, fire safety, fire prevention, fire protection, construction, fire resistance, tests, sandwich structures, calculations, balconies

## Tiivistelmä

Tehdyn tutkimuksen tavoitteena oli hankkia valmiudet arvioida ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kevyiden metallirakenteiden ominaisuuksia palotilanteessa ja soveltaa saatua tietoa tuotteissa, joissa hyödynnetään ruostumattoman teräksen hyvät palonkesto-ominaisuudet ja korroosionkestävyys. Tuotteita, joihin hankittuja valmiuksia on sovellettu, ovat parvekerakenteet, sandwich-rakenteet, kattorakenteet, kennorakenteet ja hissinovet. Valittujen tuotesovellusten palonkestävyyttä on analysoitu sekä laskennallisesti että kokeellisesti.

Useista kerroksista koostuvan levyn lämpötilan laskentaan on projektissa kehitetty yksidimensionoinen elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä. Laskentamenetelmän avulla voidaan arvioida palosuojaukseen tarvittavien levyjen tai villan määrää. Menetelmällä voidaan arvioida rakenteen lämpötilakehitystä ilman, että joudutaan heti turvautumaan polttokokeisiin, ja näin voidaan laskennallisesti optimoida rakenteen toimintaa tulipalotilanteessa. Laskentamenetelmää on sovellettu sekä parvekelaattojen että hissinovien lämpötilakehityksen määrittämiseen.

Ruostumattoman teräksen pinnan laadun ja värin vaikutusta emissiviteetin arvoihin tutkittiin sekä RHS-putkille tehtyjen polttokokeiden (kuutiouunikoe) että kartiokalometrilakokeiden avulla. Ruostumattoman teräksen rezultoivan emissiviteetin arvot olivat merkittävästi alempia kuin rakenneteräkselle määritetyt arvot. Täyden mittakaavan kokeita tehtiin parveke-, sandwich-, katto- ja kennorakenteille. Parveke- ja kattorakennekokeissa tutkittiin osastoivuus- ja kantavuusvaatimusten mukaisuutta ja sandwich- ja kennorakenteilla pelkästään osastoivuusvaatimusten täyttymistä. Kerroslevyjen lämpötilakehityksen laskentaa verifioitiin sekä parvekekokeissa että kartiokalometrilakokeissa. Kartiokalometrilakokeissa varioitiin ohuiden teräslevyjen lukumäärän sekä materiaalin vaikutusta eristävyysominaisuuksiin. Saatujen kokeellisten tulosten vastaavuus laskennallisiin tuloksiin on hyvä. Laskennallisia valmiuksia voidaan hyödyntää jo tuotekehitysvaiheessa ja näin nopeuttaa optimaalisten ratkaisujen löytymistä.

Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebbar & Oksanen, Tuuli. Ruostumaton teräs tulipalolle altistetuissa rakenteissa. [Stainless steel structures exposed to fire]. Espoo 2001. Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 2112. 53 p. + app. 9 p.

**Keywords** stainless steel, steel structures, fire safety, fire prevention, fire protection, construction, fire resistance, tests, sandwich structures, calculations, balconies

## Abstract

The main purpose of research was to obtain knowledge to evaluate the features of lightweight stainless steel structures in fire explosion and apply the knowledge for products, which advantages the good fire and corrosion resistance. The knowledge was applied to the balconies, the sandwich-structures, the corrugated core sandwich and the lift doors. The fire resistance of considered products was analysed by calculations and tests.

One-dimensional finite element code has been written for the computation of temperature of layered structure. By the model the number of sheets and the thickness of insulation material can be estimated. The model enables to define the temperature in the structures so that the fire tests can be compensated and the structure can be optimized by the calculations. The model was applied to define the temperature evolution of the balcony slabs and the lift doors.

The emissivity of stainless steels was studied by the fire tests for RHS-tubes at furnace and by the cone calorimeter facility. The value of emissivity for stainless steel is lower than the values of carbon steel. The full-scale tests were carried out for the balconies, the sandwich-panels, the roofs and the corrugated core sandwich structure. In tests for the balconies and the roof structures the fire resistant and load-bearing features were considered and in tests for the sandwich panels and the corrugated core sandwich structures only the fire resistant feature was studied. The calculation of layered structures was verified in full-scale tests for balconies and in cone calorimeter tests. In cone calorimeter tests the number of stainless steel sheets and the material was varied to determine the feature of insulation. The correlation between the computational and test results is good. The computational completions can be utilised in the product development and so facilitate to find out the optimal solutions.

# Alkusanat

Tässä julkaisussa on esitetty yhteenveto tutkimushankkeessa *Kevyiden ruostumattomien teräsrakenteiden erikoiskuormitukset (RSTERIK)* tehdyistä tutkimuksista, jotka koskevat palokuormille alttiita rakenteita. Tutkimus liittyy *KENNO Kevyet levyt* -teknologiaohjelmaan ja se toteutettiin vuosina 1999–2001 VTT Rakennustekniikassa. Tutkimuksen ovat rahoittaneet Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Outokumpu Polarit Oy, Rannila Steel Oy, Finton Parvekejärjestelmät Oy, Kone Oyj, merivoimien esikunta, Stala Oy, Oy Ja-Ro Ab ja VTT Rakennustekniikka.

Tehdyn tutkimuksen tavoitteena oli hankkia valmiudet arvioida ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kevyiden metallirakenteiden ominaisuuksia palotilanteessa ja soveltaa saatua tietoa tuotteissa, joissa hyödynnetään ruostumattoman teräksen hyvät palonkesto-ominaisuudet ja korroosionkestävyys.

Tutkimushankkeen johtoryhmään ovat kuuluneet dipl.ins. Raimo Viherma, Outokumpu Polarit Oy, (puh.joht.); dipl.ins. Tom Warras, Tekes; dipl.ins. Jouko Lassila, Metalliteollisuuden Keskusliitto; ins. Simo Heikkilä, Rannila Steel Oy; dipl.ins. Sami Volanen, Finton Parvekejärjestelmät Oy; TkT Simo Mäkimattila, Kone Oyj (1.3.2000 alkaen); dipl.ins. Pekka Kannari, Merivoimien esikunta (1.3.2000 alkaen), dipl.ins. Esko Rautakorpi, Teräselementti Oy; dipl.ins. Pekka Yrjölä (1.3.2000 alkaen), Stala Oy; TkT Pentti Kujala, Teknillinen korkeakoulu ja tutkimusprofessori Matti Kokkala, VTT Rakennustekniikka. Tutkimuksen vastuullisena johtajana on toiminut tutkimusprofessori Tuija Vihavainen, VTT Rakennustekniikka, ja projektipäällikkönä dipl.ins. Tiina Ala-Outinen, VTT Rakennustekniikka. Projektiryhmään ovat kuuluneet VTT Rakennustekniikasta dipl.ins. Jukka Myllymäki, dipl.ins. Tuuli Oksanen ja dipl.ins. Djebar Baroudi. Raportin viimeistelystä on huolehtinut yo.merk. Erja Schlesier.

Kiitän tutkimustyön johto- ja projektiryhmän jäseniä, rahoittajia ja kaikkia työn suorittamiseen osallistuneita henkilöitä hyvin onnistuneesta yhteistyöstä.

Tiina Ala-Outinen

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	8
2. Palokuormille alttiit rakenteet.....	9
2.1 Kantavat rakenteet tulipalossa.....	9
2.2 Osastoivat rakenteet tulipalossa.....	9
2.3 Lämpötilakehityksen määrittäminen kerroslevyssä.....	10
2.4 Emissiviteetin määrittäminen.....	12
2.4.1 RHS-putkien emisiviteetti.....	12
2.4.2 Emissiviteetin määrittäminen kartiokalorimetrikokeiden perusteella.....	14
3. Parvekerakenteet.....	16
3.1 Parvekerakenteita koskevat vaatimukset.....	16
3.2 Kokeellinen vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen.....	17
3.2.1 Parvekkeiden polttokokeet.....	18
3.2.2 Parvekelaatan lämpötilakehityksen määrittäminen.....	19
3.2.3 Parvekkeen kantavien rakenteiden laskennallinen kestävyys.....	21
4. Ohutlevyrakenteet.....	24
4.1 Taipumien määrittäminen normaalilämpötilassa.....	24
4.2 Poikkileikkauksien rajajoikkuudet.....	25
4.3 Palotilamitoitus.....	26
4.4 Sandwich-rakenteen polttokoe.....	28
4.5 Kattorakenteen polttokoe.....	30
5. Kennorakenteet.....	34
5.1 Koekappale.....	34
5.2 Kennon polttokoe.....	35
5.3 Tulosten analysointi.....	36
6. Hissinivet.....	38
6.1 Eristeen toiminta laskennallisesti.....	38
6.2 Eristeen toiminta kartiokalorimetrikokeissa.....	40

7. Yhteenveto .....	48
Lähdeluettelo .....	51

#### LIITTEET

- Liite 1: Sandwich-elementin polttokoe-kappale ja mitatut taipumat
- Liite 2: Kattorakenteen polttokoejärjestely, mitatut taipumat ja lämpötilat
- Liite 3: Korrugoituytiminen kerroslevy
- Liite 4: Lämmönsiirtymisyhtälöt kerroslevyssä



# 1. Johdanto

Ruostumattoman teräksen tärkeimpiä ominaisuuksia on korroosionkestävyys, mutta sen esteettisyys, hyvät lujuusominaisuudet, hyvä muovattavuus ja muokkauslujittuminen tarjoavat lisäksi etuja, jotka lisäävät ruostumattoman teräksen soveltuvuutta moniin tarkoituksiin. Ruostumattoman teräksen hyviä palonkesto-ominaisuuksia ja sitkeyttä voidaan hyödyntää paloluokkavaatimusten mukaisissa rakenteissa.

Paloluokkavaatimusten mukaiset kantavat ja osastoivat rakenteet tulee suunnitella siten, että ihmisten ja omaisuuden pelastamiseksi on riittävästi aikaa ja toisaalta palon leviämisen estäminen ja sen sammuttaminen on mahdollista. Tuotteissa, joilta vaaditaan korroosion- ja palonkestävyyttä, ruostumattoman teräksen käytöllä voidaan saavuttaa etuja, jotka kompensoivat ruostumattoman teräksen rakenneterästä korkeamman hinnan. Hyvät palonkesto-ominaisuudet tarjoavat mahdollisuuksia erityisesti tuotteissa, joissa palosuojasta ei voida tai haluta käyttää esimerkiksi esteettisistä syistä tai helpon huollettavuuden takia.

Yleisimmin rakennuskohteissa käytetään austeniittista ruostumatonta terästä. Austeniittiset ruostumattomat teräkset menettävät lujuusominaisuutensa (myötöraja ja kimmokerroin) korkeissa lämpötiloissa suhteellisesti hitaammin kuin tavallinen rakenneteräs. Tehtyjen tutkimusten [1, 2, 19] perusteella onkin todettu, että ruostumatonta terästä voidaan tietyin edellytyksin käyttää kantavina rakenteina ilman palonsuojasta.

Osastoivien rakennusosien tulee olla sellaisia, että palon leviäminen osastosta toiseen estyy. Osastoivan rakenteen on säilytettävä tiiviytensä ja täytettävä eristävyytensä paloluokkavaatimuksen ilmoittaman ajan standardin ISO 834 [12] mukaisessa kokeessa. Osastoivan rakenteen eristävyysvaatimus rajaa rakenteen palon vastakkaisen pinnan lämpötilan nousun. Ruostumattomalla teräksellä on korkeissa lämpötiloissa paremman lujuuden lisäksi pienempi lämmönjohtavuus ja alhaisempi emissiokerroin kuin tavallisella rakenneteräksellä, ja näin ollen sen lämmöneristävyys on parempi.

Tehdyn tutkimuksen tavoitteena on hankkia valmiudet arvioida ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kevyiden metallirakenteiden ominaisuuksia palotilanteessa ja soveltaa saatua tietoa tuotteissa, joissa hyödynnetään ruostumattoman teräksen hyvät palonkesto-ominaisuudet ja korroosionkestävyys. Tuotesovellutukset, joissa hankittuja valmiuksia sovelletaan, ovat parvekerakenteet, sandwich-rakenteet, kattorakenteet, kennoteräksiset rakenteet ja hissinovet. Valittujen tuotesovellutusten palonkestävyyttä analysoidaan sekä laskennallisesti että kokeellisesti.

## 2. Palokuormille alttiit rakenteet

### 2.1 Kantavat rakenteet tulipalossa

Ruostumattomien terästen käyttö kuormaa kantavissa rakenteissa on lisääntynyt viime vuosina. Kantavilla rakenteilla palonkesto aika on murtorajatilan saavuttamiseen tarvittava aika. Perinteisesti kantavien ja osastoivien rakenteiden ja rakennusosien palomitoituksessa on palotilan lämpötilan oletettu noudattavan standardin ISO 834 [12] mukaista lämpötila-aikariippuvuutta. Palotilan lämpötila voidaan laskea myös ns. parametrista palomallia käyttäen. Malli ottaa huomioon aukkojen ja palokuorman määrän [7]. Rakenteen loppulämpötila määritetään lämpötila-analyysin perusteella. Suojaamattoman ohutseinämäisen poikkileikkauksen lämpötila lähestyy 30 minuutin palon jälkeen ympäröivän kaasun lämpötilaa, joka 30 minuutin standardipalon jälkeen on 842 °C.

Rakenteen siirtymillä ja jännitystilalla on hyvin vähän vaikutusta rakenteen lämmönsiirtymisominaisuuksiin. Poikkeuksen muodostavat teräs-betoni-liittorakenteet. Kiinteissä kappaleissa lämpö siirtyy pääasiassa johtumalla ja kaasuisissa säteilemällä ja kuljettumalla (konvektion avulla). Austeniittisten ruostumattomien terästen lujuusominaisuudet (myötöraja ja kimmokerroin) alenevat lämpötilan kohotessa hitaammin kuin tavallisilla rakenneteräksillä.

### 2.2 Osastoivat rakenteet tulipalossa

Rakennusten osastoinnin tarkoituksena on rajoittaa tulipalo sen syttymisosastoon ja estää savukaasujen leviäminen. Osastoivan rakenteen on säilytettävä tiiviytensä ja täytettävä eristävyytensä paloluokkavaatimuksen ilmoittaman ajan. Osastoivan rakenteen eristävyysvaatimus määritetään rajoittamalla rakenteen palon vastakkaisen pinnan lämpötilan nousua. Pinnan keskimääräinen lämpötilan nousu ei saa olla suurempi kuin 140 °C tai lämpötilan nousu ei saa olla missään kohdassa suurempi kuin 180 °C eikä pinnan lämpötila saa olla missään kohdassa suurempi kuin 220 °C alkulämpötilasta riippumatta. Osastoivan rakenteen tiiviydeltä edellytetään, etteivät savukaasut voi aiheuttaa palon leviämistä muihin osastoihin.

Vuonna 1997 uusitussa Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa E1 [21] on rakennuksen paloluokan mukaan annettu palomuurille vaatimukset käyttäen yhteiseurooppalaisia merkintöjä EI-M240...EI-M60. Merkintä EI-M tarkoittaa osastoivuuden säilymistä ja iskunkestävyyttä palotilanteessa. Ympäristöministeriön mukaan palomuurien iskunkestävyyttä testataan menetelmän EN 1363 [5] mukaan. Mainitussa CEN-standardissa iskukoe tehdään palokokeessa samalla tavoin kuin saksalaisessa normissa

DIN 4102-3 [9]. Palomuurin tulee säilyttää kantavuutensa ja osastoivuutensa kokeessa sekä ennen että jälkeen iskun, jonka aiheuttaa seinän keskelle 3 000 Nm iskuenergialla iskevä 200 kg painava lyijyhaulisäkki. Iskukoe tehdään kolme kertaa, kaksi kertaa silloin, kun muuria kuormittaa epäkeskeinen hyötykuorma ja kolmannen ja viimeisen kerran, kun muuria rasittaa vain omapaino. Aikaisempi E1 asetti palomuurille vain osastoivuusvaatimuksen, ja vaatimuksia on siis tältä osin tiukennettu. Teräsrakenteiset osastoitavat seinät ovat tyypillisesti sandwich-rakenteita, jotka koostuvat molemmin puolisista ohutlevyistä ja mineraalivillaytimestä.

## 2.3 Lämpötilakehityksen määrittäminen kerroslevyssä

Projektissa on kehitetty yksidimensioinen elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä, jonka avulla voidaan arvioida palosuojaukseen tarvittavien levyjen tai villan määrää. Ohjelman avulla määritetään laatan lämpötilojen aikariippuvuus. Laskennassa sekä ydinosa että pintarakenne jaetaan elementteihin, jolloin saadaan laskettua lämpötilajakautuma rakenteen eri osissa. Seuraavassa on esitetty lämpötilakehityksen määrittäminen parvekelaatassa (kuva 1).

Levyjen välisen ontelon läpi lämpö siirtyy vain säteilyn avulla:

$$q = \sigma \varepsilon_1 \varepsilon_2 (T_1^4 - T_2^4) \text{ [kW/m}^2\text{]} \quad (1)$$

missä  $\varepsilon_1$  ja  $\varepsilon_2$  ovat sisäpintojen emissiiviteetit ja  $T_1$  ja  $T_2$  niiden lämpötilat [K]

Palokaasun emissiiviteetti on laskettu käyttäen Beerin lain [11] perusteella saatavaa absorptiivisyyttä:

$$\alpha_\lambda = 1 - e^{-\kappa L} \text{ [-]} \quad (2)$$

missä  $L = 2/3 h$  laatan alapuolisen kaasupatjan paksuus [m]  $h$  on ikkuna-aukon korkeus [m] ja  $\kappa = 0,3 \text{ [m}^{-1}\text{]} [13]$

Kuljettumisen lämmönsiirtokerroin palokaasusta parvekelaatan alapintaan on laskettu ENV 1991-2-2 [7] yhtälöstä (C.19):

$$\alpha = 26 \left( \frac{1}{d} \right)^{0,4} \left( \frac{R}{A_w} \right)^{0,6} \text{ [W/mK]} \quad (3)$$

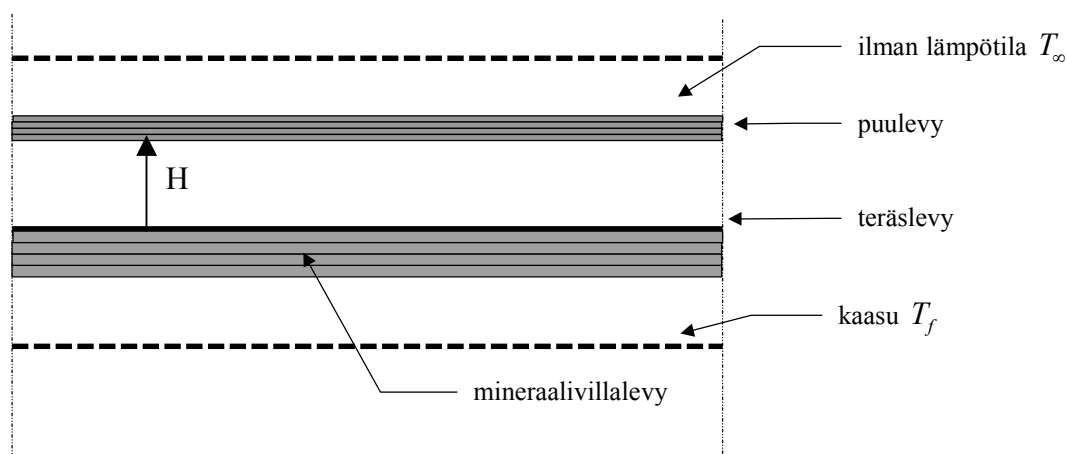
Missä  $A_w$  on ikkuna-aukon pinta-ala [m<sup>2</sup>],  $d$  on rakenteen sivumitta [m].

Palamisnopeus  $R$  lasketaan yhtälöstä:

$$R = 0,18(1 - e^{-0,036\eta})A_w h^{1/2} \text{ [kg/s]} \quad (4)$$

missä  $\eta = A_T / A_w h^{1/2}$  on aukkotekijän käänteisarvo,  $W$  on palotilan leveys [m],  $D$  on syvyys [m] ja  $h$  on ikkuna-aukon korkeus [m].

Laskennassa sekä mineraalivilla että puurakenne on jaettu elementteihin, jolloin saadaan laskettua lämpötilan jakautuma puurakenteen sisällä. Profiililevyt on oletettu suoriksi levyiksi (kuva 1). Laskelmissa on otettu huomioon teräslevyjen välinen säteily.



Kuva 1. Parvekelaatan yksidimensioinen elementtimalli.

Laskennassa käytetyt termisten ominaisuuksien lähtöarvot on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. FE-analyysissä käytetyt termiset ominaisuudet.

	Paksuus $d$ [mm]	Ominaislämpö- kapasiteetti $c_p$ [J/kg m <sup>3</sup> ]	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]	Emissiviteetti $\varepsilon$ -	Lämmön- johtavuus [W/mK]	Konvektio- kerroin [W/°C]
Teräsleivylevy	1	$400 + 0,6 \cdot T - 0,0001 \cdot T^2$	7900	0,7		
Villalevy	30	800	120	0,7	0,05...0,4	
Puulevy	28	1000	450	0,5	0,299	10

Puulevyn lämmönjohtavuudeksi on oletettu  $\lambda = 0,299$  W/mK. Puulevyn yläpinnalla olevan ilman lämpötilaksi on mitattu 14 °C. Laskelmissa käytetty kivivillan (PV-PAL) lämmönjohtavuus lasketaan kaavasta 5.

$$\lambda = \lambda_0 \left[ 1 + \frac{(T + T_{abs})}{T_{Lam}} \right]^p \quad [\text{W/mK}] \quad (5)$$

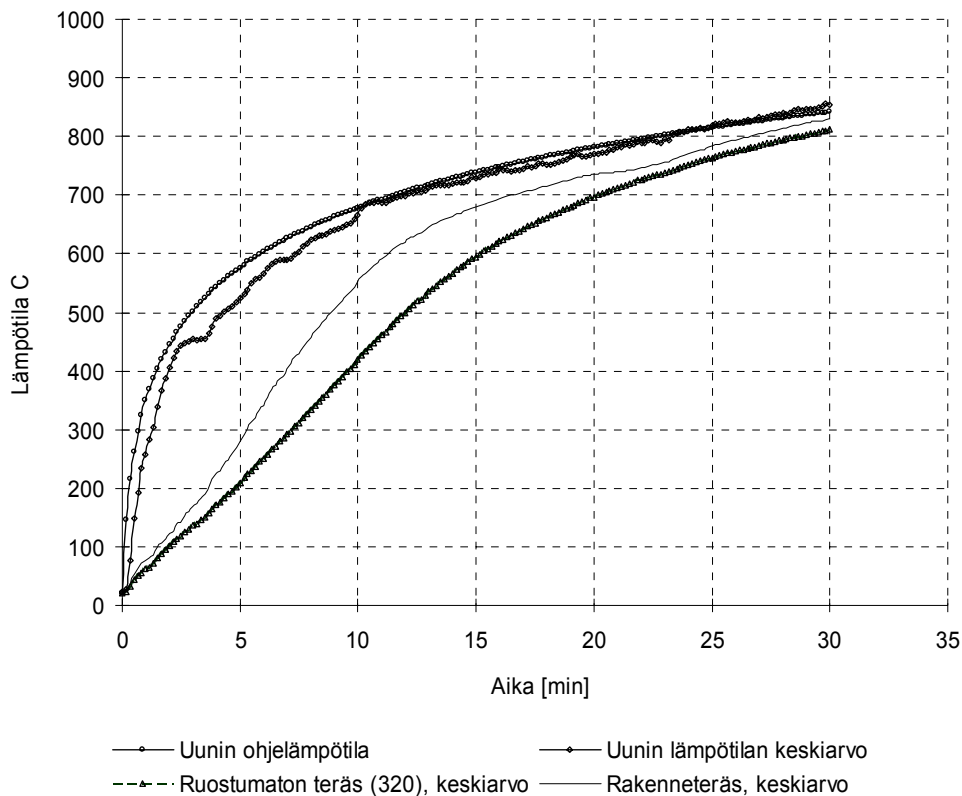
missä  $\lambda_0 = 0.0251$  [W/mK],  $p = 2.404$ ,  $T_{abs} = 273$  K ja  $T_{Lam} = 410$  K.

## 2.4 Emissiviteetin määrittäminen

Lämmön siirtyminen korkeissa lämpötiloissa tapahtuu pääasiassa säteilemällä ja kuljetumalla. Säteilemällä siirtyvä lämpömäärä kahden pinnan välillä riippuu pintojen välistä lämpötilaerosta, pintojen emissiviteetistä (emissio ja absorbtio) sekä pintojen asemasta toisiinsa nähden. Ruostumattoman teräksen pinnan laadun ja värin vaikutusta emissiviteetin arvoihin tutkittiin sekä RHS-putkille tehtyjen polttokokeiden (kuutiouuni) että kartiokalorimetrikokeiden avulla.

### 2.4.1 RHS-putkien emisiviteetti

RHS-putkille tehtiin kuutiouunissa polttokokeita, joissa mitattiin lämpötilakehitys putkissa. Palokäyrä noudatti standardipalokäyrää. Sekä RHS-putkista että palotilasta mitattiin lämpötilat ja näiden avulla määritettiin lämpötilan kehittyminen ja edelleen resultoivan emissiviteetin arvot. Resultoiva emissiviteetti ottaa pinnan lisäksi huomioon palotilan ominaisuudet. Laskenta tehtiin noudattaen Eurocode 3, osan 2.2. [7] lämpövuon laskentayhtälöitä. Kuljettumisen lämmönsiirtokertoimen arvona käytettiin vakiota  $\alpha_c = 25$  W/m<sup>2</sup>K. Samanaikaisesti polttokokeessa oli sekä ruostumattomasta teräksestä että rakenneteräksestä valmistetut RHS-putket (80 x 160 x 4). Seuraavassa kuvassa on esitetty lämpötilat ajan funktiona.



Kuva 2. Ruostumattoman teräksen ja rakenneteräksen (RHS 80 x 160 x 4) mitattujen lämpötilojen keskiarvot kuutiouunikokeessa.

Saatujen tulosten perusteella voidaan havaita, että ruostumattoman teräksen lämpötila kohoaa hitaammin kuin rakenneteräksen ja ero 15 minuutin standardipalon jälkeen on noin 90 °C. Resultoiva emissiiviteetti  $\epsilon_{\text{res}}$  laskettiin Eurocode 3, osan 2.2. [7] mukaisilla kaavoilla mitattujen lämpötilojen perusteella. Koe toistettiin kaksi kertaa ja toisessa kokeessa ruostumattoman teräksen pinnanlaatu poikkesi ensimmäisestä kokeesta, mutta tämä ei vaikuttanut emissiiviteetin arvoon. Rakenneteräksen lämpötilat poikkesivat toisessa kokeessa ensimmäisessä kokeesta mitatuista arvoista, vaikka materiaali oli täysin samanlainen. Kokeiden perusteella lasketut resultoivan emissiiviteetin  $\epsilon_{\text{res}}$  arvot on esitetty taulukossa 2. On huomattava, että kokeissa kaasunlämpötila mitattiin teräselementillä, jonka halkaisija oli 3 mm, kun se uuden standardin EN 1363-1 [5] mukaaan tulisi mitata levytermometrillä.

Taulukko 2. Resultoivan emissiviteetin  $\epsilon_{res}$  arvot määritettynä kuutiouunikokeiden perusteella.

	Koe 1	Koe 2
Ruostumaton teräs (Polarit 725)	$\epsilon_{res} = 0,21$	$\epsilon_{res} = 0,21$
Rakenneteräs (S355)	$\epsilon_{res} = 0,51$	$\epsilon_{res} = 0,56$

## 2.4.2 Emissiviteetin määrittäminen kartiokalorimetrikokeiden perusteella

Ruostumattoman teräksen emissiviteetin arvot määritettiin myös kartiokalorimetrikokeiden (kuva 20, luku 6.2) avulla. Koekappaletta (ohut foliolevy) lämmitettiin lämpövuolla, jonka suuruus vaihteli välillä 20–70 kW/m<sup>2</sup>. Lämpösäteilyn suuruus mitattiin 25 mm etäisyydellä folion kylmästä pinnasta ja folion pinnan lämpötilat mitattiin termoelementtien avulla. Näiden avulla pystytään määrittämään emissiviteetin suuruus lämpötilan funktiona taulukossa 3 esitetyllä tavalla. Kokeessa käytetyn materiaalin ominaisuudet (materiaalinro 1) on esitetty taulukossa 8 luvussa 6.2.

Taulukko 3. Kartiokalorimetrikokeen avulla määritetyt emissiviteetin arvot. Folion paksuus 0,1 mm.

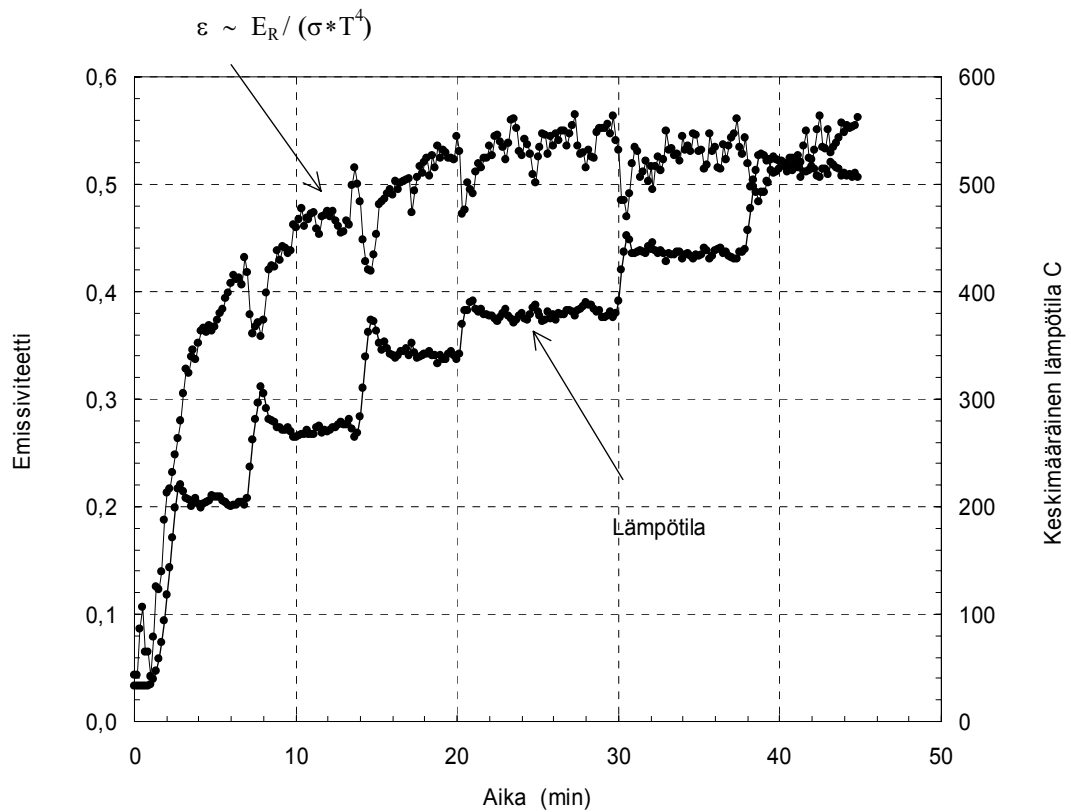
Pinnan keskimääräinen lämpötila $T_s$ [°C]	Kartiokalorimetrimetrin lämpövuovo [kW/m <sup>2</sup> ]	Mitattu lämpövuovo kylmällä puolella $E_r$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Mustan kappaleen arvioitu lämpösäteily $E_b = \sigma T^4$ [kW/m <sup>2</sup> ]	Emissiviteetin suuruus $\epsilon_m = E_r/E_b$
204	20	0,9	2,9	0,32
272	30	2,0	5,0	0,41
341	40	3,6	8,1	0,45
380	50	4,9	10,3	0,47
435	60	6,7	14,3	0,47
514	70	10,4	21,8	0,48

Lämpötilan kohoaminen aiheuttaa värimuutoksia materiaalissa ja värimuutokset vähentävät pinnan heijastusta ja nostavat emissiviteetin arvoja. Kartiokalorimetrikokeiden perusteella määritetyt emissiviteetin arvot lämpötilan funktiona on esitetty taulukossa 3 ja kuvassa 3.

Kartiokalorimetrikokeiden avulla määritettiin pinnan emissiviteetin arvot. Laskennallisesti rakenteen lämpötilakehitystä määritettäessä otetaan huomioon myös palotilan ominaisuudet. Eurocode 3:n osan 2.2 [7] mukaan palotilan huomioon ottavana emissiviteetin arvona käytetään yleensä arvoa  $\epsilon_f = 0,8$  ja resultoiva emissiviteetti

$\varepsilon_{res} = \varepsilon_f \varepsilon_m$ . Kartiokalorimetrikokeiden perusteella määritetyn resuloivan emissiviteetin  $\varepsilon_{res}$  arvot vaihtelivat siten välillä 0,26–0,38 lämpötilan mukaan.

Lähteessä [3] on esitetty yksityiskohtaisesti tehdyt kartiokalorimetrikokeet.



Kuva 3. Emissiviteetin arvot määritettynä kartiokalorimetrikokeiden perusteella.



### 3. Parvekerakenteet

Eräs ruostumattoman teräksen käyttökohde on itsekantavat parvekejärjestelmät, joita käytetään sekä uudis- että korjausrakentamisessa. Parvekkeiden rungossa ja välitasoissa ruostumattoman teräksen käyttö on perusteltua, sillä näin saadaan hyödynnettyä ruostumattoman teräksen hyvä korroosionkestävyys sekä hyvät palonkesto-ominaisuudet. Vanhojen rakennusten peruskorjauksen yhteydessä rakennuksiin voidaan asentaa uusia parvekkeita tai laajentaa vanhoja. Uudisrakennuksissa parvekkeet voidaan asentaa itsenäisesti muusta rakentamisaikataulusta riippumatta ja näin osaltaan nopeuttaa toteutus-aikataulua. Teräksestä valmistetut parvekkeet ovat keveytensä ansiosta helposti ja nopeasti asennettavissa.

Parvekerakenteiden toimintaa palotilanteessa on selvitetty sekä kokeellisesti että laskennallisesti. VTT Rakennustekniikan palolaboratoriossa on tehty parvekekokeita todellista palonkehitystä kuvaavassa julkisivulaitteessa.

#### 3.1 Parvekerakenteita koskevat vaatimukset

Suomessa kantavien parvekerakenteiden paloluokitus ja -mitoitus perustuu Rakentamismääräyskokoelman osassa E1 [21] asetettuihin vaatimuksiin. Osan E1 mukaan kantavan rakenteen mitoitus voi perustua joko standardipaloon tai oletetun palonkehityksen mukaisiin rasiin.

Kantavien rakenteiden luokkavaatimukset riippuvat rakennuksen paloluokasta ja käyttötavoista. Parvekkeiden palonkestävyysvaatimus on puolet parvekkeen sijaintikerroksen kantavien rakenteiden vaatimuksesta. Tämä tarkoittaa esimerkiksi 3–8-kerroksisella paloluokan P1 rakennuksella, jossa palokuorma on alle  $600 \text{ MJ/m}^2$ , luokan R60 vaatimusta kantaville rakenteille ja luokan R30 vaatimusta parvekerakenteelle. Lisäksi tällöin RakMk E1 taulukon 6.2.1 mukaan tulee kantavissa rakenteissa käyttää palamattomia rakennustarvikkeita.

Palon leviämisen estämiseksi osastosta toiseen parvekerakenteille ei ole annettu standardoituun lämpötilaan perustuvia osastoivuusvaatimuksia. RakMk osan E1 kohdassa 7.6.2 on esitetty yleisvaatimus, että parvekkeet on rakennettava niin, että palo ei leviä niiden kautta vaaraa aiheuttavalla tavalla.

Palon kehittymisen rajoittamiseksi parvekkeissa noudatetaan ulkoseinän ulkopintojen syttymisherkkyyss- ja palonlevittämisvaatimuksia. P1-luokan rakennuksessa tulee ulkoseinässä ja parvekkeessa pääosin käyttää palamattomia tai lähes palamattomia rakennustarvikkeita. Enintään kahdeksankerroksisessa P1-luokan rakennuksessa julkisivun ja

parvekkeen pinnan osa saa olla luokkaa 2/- eli esim. puuta, mikäli tällaisia osia ympäröivät rakenteet suojaavat pintaa palon leviämiseltä.

### 3.2 Kokeellinen vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen

Rakentamismääräyskokoelman osan E1 mukaan vaatimuksenmukaisuus osoitetaan kokeellisesti, laskennallisesti tai yhdistämällä koe- ja laskentatulokset. Paloluokkavaatimukseen perustuvassa mitoituksessa ja kokeissa käytetään standardin ISO 834 [12] mukaista lämpötila-aikakäyrää. Esimerkiksi palonkestävyysvaatimus R30 tarkoittaa sitä, että rakenne säilyttää kantavuutensa 30 minuutin ajan standardin EN 1363 [5] mukaisessa kokeessa, missä uunin lämpötila noudattaa standardin ISO 834 [12] mukaista aikälämpötilakäyrää. Parvekkeiden vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen standardin EN 1363 mukaisella kokeella voidaan käytännön syistä tehdä vain parvekerakenteen eri rakenneosille erikseen; esim. kuormitetun parvekelaatan koe horisontaaliuunissa ja kuormitetun pilarin koe pilariuunissa. Eurooppalainen standardi EN 1363 mukaisen kokeen tekemisestä parveke- ja porrasrakenteille on tällä hetkellä vasta valmisteilla työryhmässä.

Kun kantavien rakenteiden mitoitus perustuu oletettuun palonkehitykseen, RakMk osan E1 mukaan rakennusta pidetään riittävän paloturvallisena, mikäli yli kaksikerroksinen rakennus ei sorru palon eikä jäähtymisvaiheen aikana. Oletetun palonkehityksen tulee kattaa kyseisessä rakennuksessa todennäköisesti esiintyvät tilanteet. Mainittuja vaatimuksia on sovellettu parvekkeille siten, että ympäristöministeriö on myöntänyt parvekkeille tyyppihyväksyntöjä enintään 8-kerroksisiin rakennuksiin, kun rakenne on säilyttänyt kantavuutensa rakennuksen ulkopuolista paloa kuvaavassa polttokokeessa koko kokeen ajan, myös jäähtymisvaiheessa.

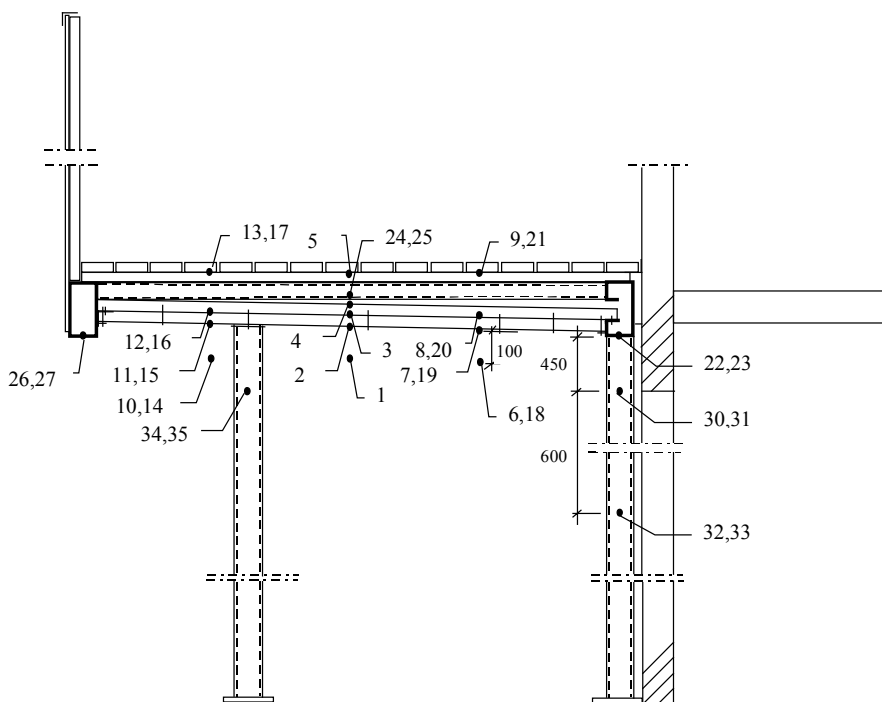
Rakennuksen ulkopuolista paloa kuvaavia ns. julkisivutestauslaitteistoja on Ruotsissa Statens Provningsanstaltissa (SP) ja VTT Rakennustekniikassa. Molemmat laitteistot perustuvat Lundin yliopistossa tehtyyn laitteistoon. Palotilan aukkotekijä, joka määrää happirajoitteisessa palossa palamisnopeuden, on molemmissa laitteistoissa  $0,079 \text{ m}^{1/2}$ . Palokuormana VTT:n laitteistossa käytetään 187 kg puuritolaita ja 115 kg lastulevyjä. Yhteensä palokuorman suuruus on  $480\text{--}617 \text{ MJ/m}^2$ , kun puun palamislämmöksi oletetaan  $14\text{--}18 \text{ MJ/m}^3$ . Ruotsin SP:n laitteiston palokuormana on 60 l heptaania ja palokuorma lattiapinta-alaa kohden on  $480 \text{ MJ/m}^2$ .

### 3.2.1 Parvekkeiden polttokokeet

Tutkimuksessa tehtiin parvekekokeita oletettua palonkehitystä kuvaavassa VTT:n julkisivulaitteessa. Kokeen läpäisyvaatimukset olivat samat kuin ruotsalaisessa Statens Provningsanstaltin SP BRAND 105 [17] menetelmässä. Koemenetelmän toistettavuus on hyvä, sillä erot eri kokeissa mitatuissa kaasunlämpötiloissa ovat olleet pieniä sekä palotilassa että parvekelaatan alapuolella.

Parvekkeen tuli säilyttää kantokykynsä eikä siitä saanut pudota suuria osia kokeen aikana. Parvekkeen puulattia, joka toimi myös kantavana rakenteena, ei saanut kokeen aikana syttyä, koska puurakenteiden syttyminen edistäisi palon leviämistä ja heikentäisi kantokykyä.

Parvekekokeissa mitattiin lämpötilakehitys palotilassa, parveketason ala- ja yläpuolella sekä itse rakenteessa. Parvekkeelle tehdyssä kokeessa mitattiin myös palotilan lämpötila 100 mm katon alapuolella. Kuvassa 4 on esitetty lämpötilan mittauspisteet parvekkeen polttokokeessa.



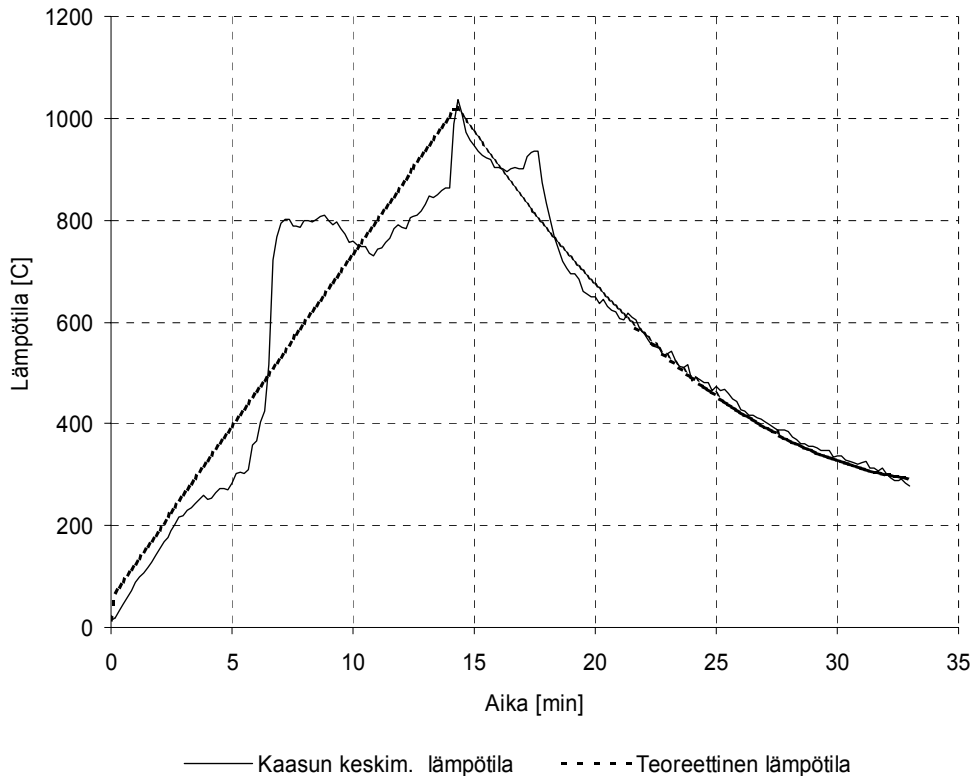
Kuva 4. Lämpötilan mittauspisteet parvekerakenteen polttokokeessa.

Parvekekokeessa mitattiin lämpötilakehitys parveketason alapuolella. Kuvassa 5 on mitattu käyrä verrattuna termisessä analyysissä käytettyyn koetuloksiin sovitettuun käyrään. Lämpötilakäyrä yhtälömuodossa voidaan esittää seuraavasti:

$$T = 47 + 1,128 \cdot t, \text{ kun } t \leq 860 \text{ s} \quad (6)$$

$$T = 2408 - 2,0146 \cdot t + 4,78 \cdot 10^{-4} \cdot t^2, \text{ kun } t > 860 \text{ s} \quad (7)$$

Kuvassa 5 esitetty käyrä vastaa tehtyä koetta, mutta ei ole sellaisenaan sovellettavissa yleisesti, sillä lämpötilakehitykseen vaikuttavat oleellisesti palokuorma ja aukkoteijät.

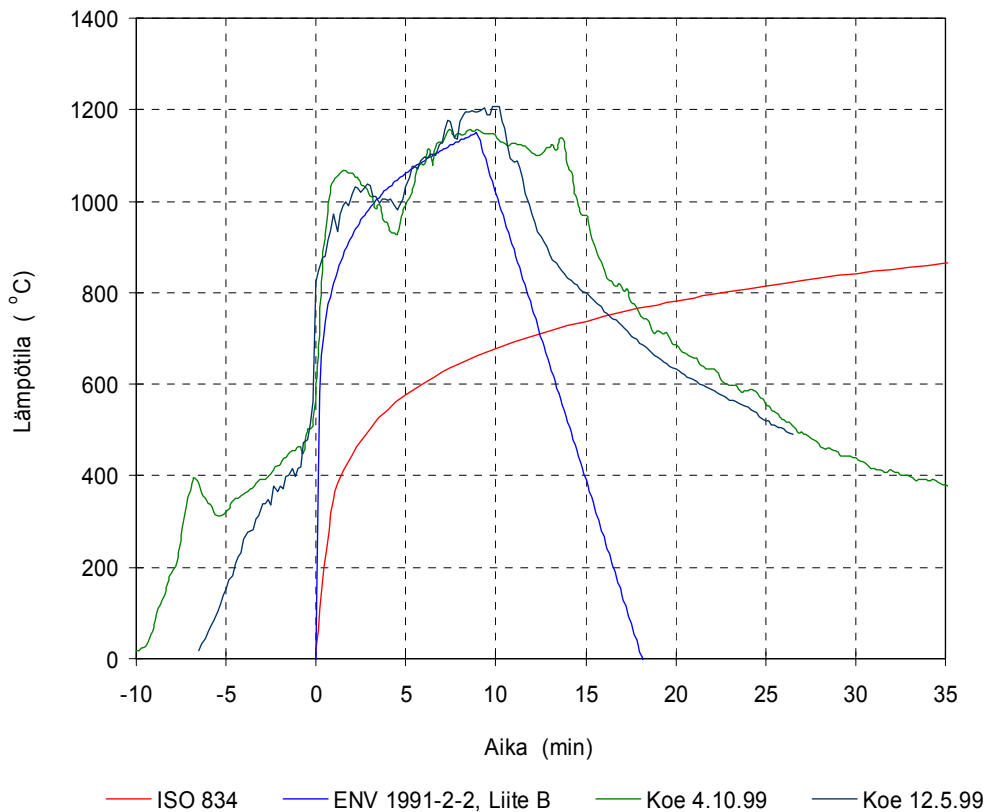


Kuva 5. Parvekkeen polttokokeessa mitattu lämpötilakäyrä sekä teoreettinen käyrä.

### 3.2.2 Parvekelaatan lämpötilakehityksen määrittäminen

Laskennallinen vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen oletetun palonkehityksen tapauksessa voidaan tehdä joko täysin laskennallisesti tai yhdistämällä koetulokset ja laskennalliset tulokset. Ensimmäisessä vaihtoehdossa joudutaan aluksi ratkaisemaan ikkuna-aukosta työntyvien palavien kaasujen lämpötila. Tämä voidaan tehdä numeerisen virtauslaskennan (CFD) ohjelmistoja käyttäen.

Koetulokset voidaan yhdistää laskentaan käyttämällä kokeista mitattua kaasun lämpötilaa. Voidaan myös käyttää palotilan kaasun lämpötilaa, koska koetulokset osoittivat, että kaasun lämpötila parvekelaatan alla on ikkuna-aukon kohdalla lähes sama kuin palotilassa alentuen parvekelaatan reunaa kohti. Kuvassa 6 kaasun mitattua lämpötilaa palotilassa on verrattu Eurocode 1, osan 2.2 [7] liitteessä B esitetyn parametrin palo- mallin antamaan kaasun lämpötilaan.



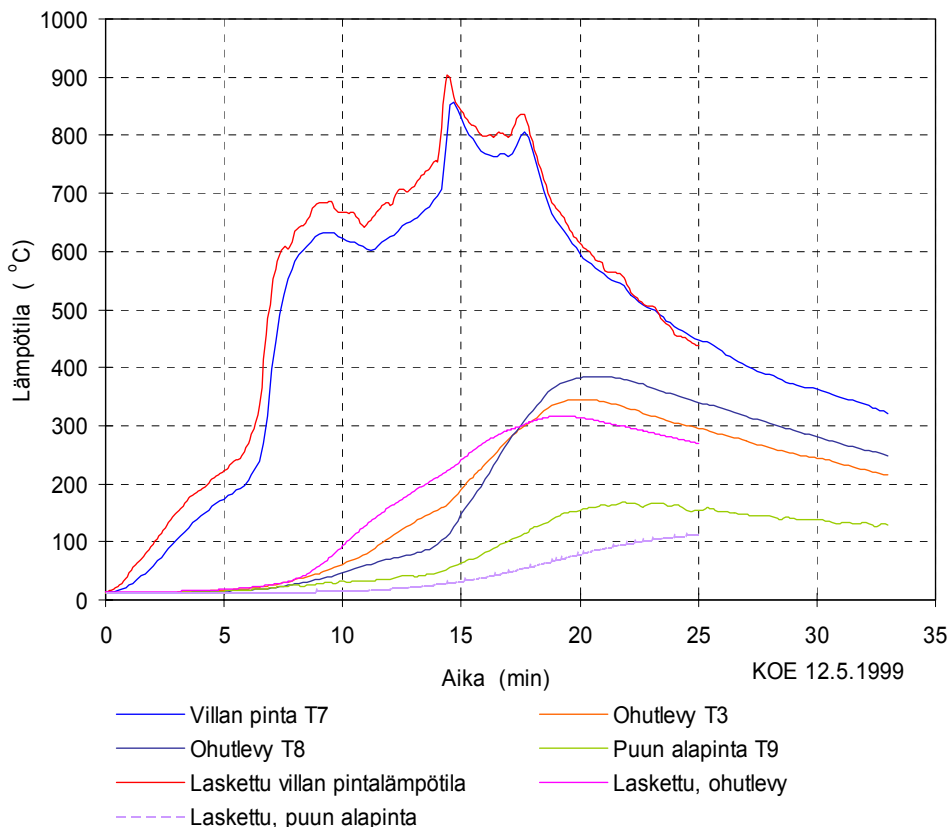
Kuva 6. Kokeissa mitatut palotilan kaasun lämpötilat verrattuna laskennallisiin lämpötiloihin. Aika lieskahduksen jälkeen. Palotilan kaasun lämpötila mitattu 100 mm katosta [18].

Parvekekokeissa mitatut lämpötilat parveketason alapuolella ovat korkeampia kuin ISO 834 mukaiset lämpötilat. Palotilan lämpötilankehitys voidaan riittävällä tarkkuudella määrittää Eurocode 1, osan 2.2 [7] parametrin palokäyrän mukaan, johon myös Suomen rakentamismääräyskokoelman B7 [24] parametrinen palokäyrä perustuu.

Lämpötilan laskeminen erilaisista levykerroksista koostuvassa parvekelaatassa ei onnistu teräsrakenteiden suunnitteluohjeissa annetuilla menetelmillä. Parvekelaatan lämpötilat on laskettu kohdassa 2.3 esitetyllä yksidimensioisella elementtimenetelmään perustuvalla laskentamenetelmällä, jolla voidaan arvioida palosuojaukseen tarvittavien

levyjen tai villan määrää. Ohjelman avulla määritetään parvekelaatan lämpötilojen aika-riippuvuus.

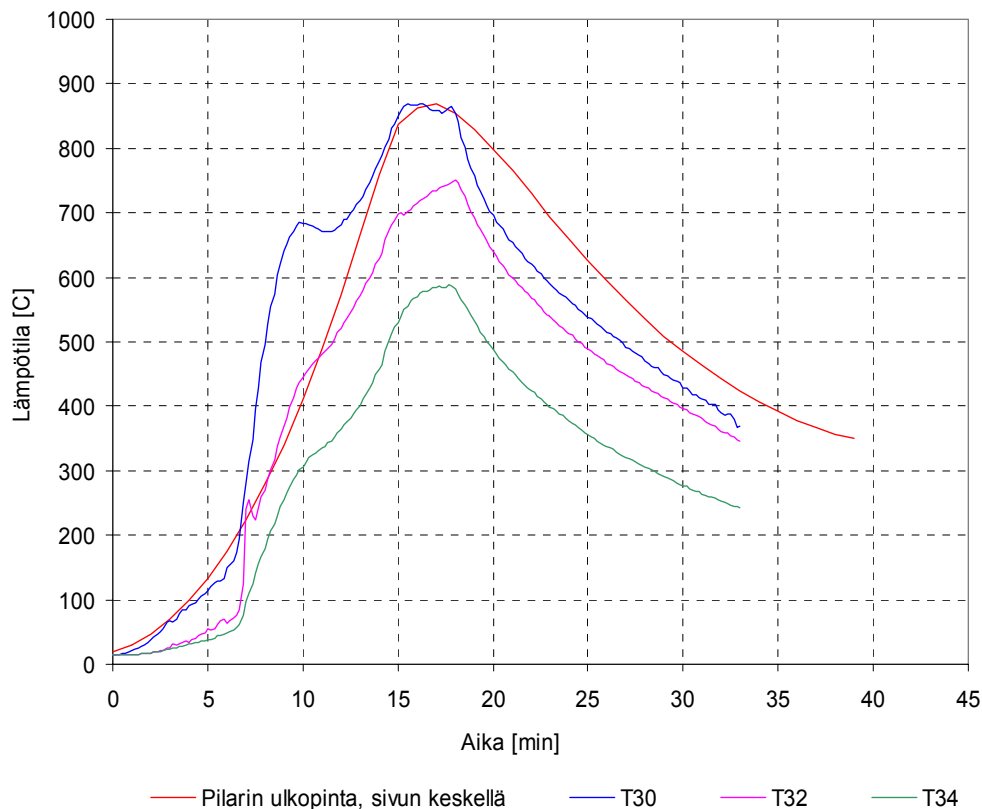
Kuvassa 7 on verrattu laskettuja ja kokeissa mitattuja lämpötiloja toisiinsa. Havaitaan, että laskennan antamat tulokset vastaavat melko tarkasti kokeissa mitattuja lämpötiloja, joten parvekelaatan yksidimensioisella lämpötila-analyysillä pystytään määrittämään laatan lämpötilakehitys ja näin laskemaan, mikä on laatan yläpinnan kriittinen lämpötila arvioitaessa puurtilöiden syttymistä.



Kuva 7. Parvekkeen osien lasketut ja mitatut lämpötilat [18].

### 3.2.3 Parvekkeen kantavien rakenteiden laskennallinen kestävyys

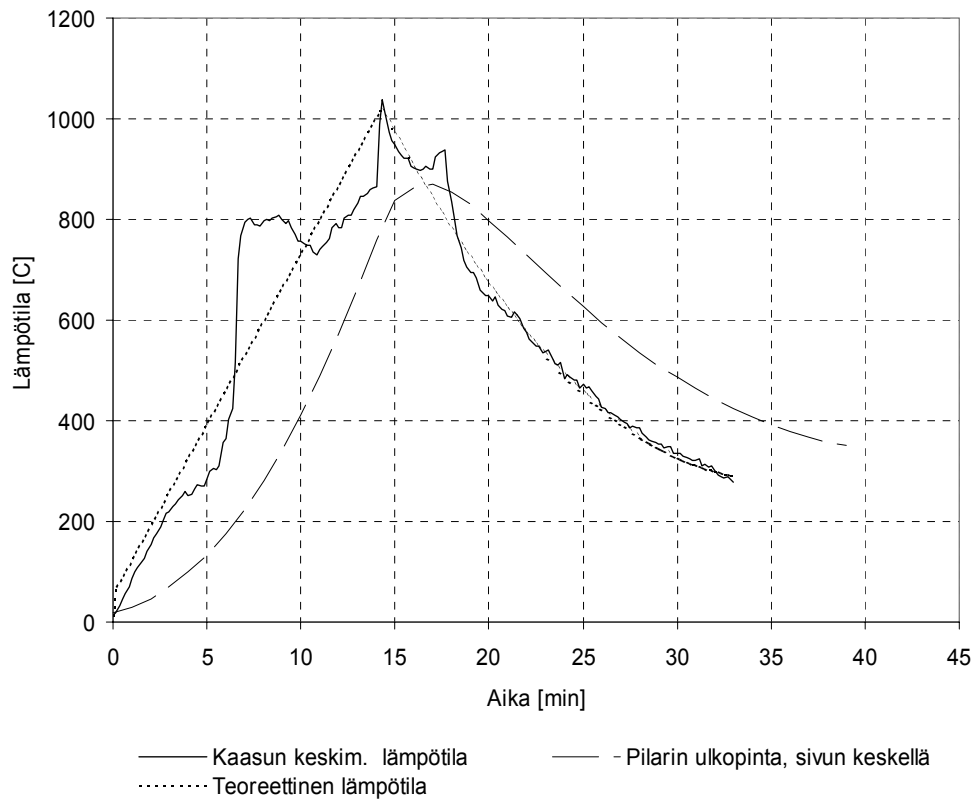
Pilareiden lämpötila ulkopuolisessa palossa riippuu merkittävästi pilarin paikasta ikkuna-aukkoon nähden ja siitä, onko pilari ikkuna-aukosta tulevien liekkien ympäröimä vai ei. Liekkien ympäröimän pilarin lämpötila voidaan laskea mitatun kaasunlämpötilan perusteella. Kuvassa 8 on verrattu mitattuja lämpötiloja laskennalliseen lämpötilaan parvekerakenteen pilarissa RHS 90 x 90 x 3, joka sijaitsee ikkuna-aukon edessä.



Kuva 8. Parvekekokeessa mitatut lämpötilat verrattuna laskennalliseen lämpötilaan. Termoelementit 30 ja 34 pilareiden yläpäässä ja termoelementti 32 pilarin keskellä.

Pilareiden lämpötilakehitystä on laskettu erilaisten lämpötilakäyrien avulla ja verrattu maksimilämpötiloja parvekkeen polttokokeen aikana mitattuihin lämpötiloihin. Lisäksi on määritetty pilareiden kestävyys. Kestävyyslaskelmissa lämpötilakehitys määritettiin sekä parvekekokeen mittaustuloksiin sovitetulla lämpötilakäyrällä (yhtälöt 6 ja 7) sekä standardipalokäyrän [12] mukaan. Rakenteen lämpötilakehitys määritettiin LIPA-ohjelmalla [14], joka soveltuu sekä liittorakenteiden että teräsrakenteiden palotekniseen mitoitukseen.

Verrattaessa pilareiden RHS 90 x 90 x 3 lämpötilakehitystä eri palokäyrien mukaan voidaan todeta, että maksimilämpötila, mikä pilarissa saavutetaan ISO 834 mukaisella palokäyrällä 30 minuutin paloajan jälkeen, on 824 °C ja parvekepalon mukaan laskettuna maksimilämpötila, joka pilarissa saavutetaan, on 870 °C (kuva 9).



Kuva 9. Pilarin ulkopinnan lämpötila parvekepalon mukaisella lämpötilakäyrällä.

Kestävyysanalyysissä määritetään rakenteen kestävyys k.o. ajanhetkenä. Poikkileikkauksen loppulämpötila riippuu poikkileikkauksen dimensioista ja materiaalin termisistä ominaisuuksista [8]. Laskentamenetelmä perustuu samanlaisiin yhtälöihin kuin ruostumattomien terästen normaalilämpötilamitoitus, mutta materiaalin mekaanisten ominaisuuksien (kimmokerroin ja myötöraja) arvoja redusoidaan korkeissa lämpötiloissa pienennyskertoimien avulla [23].



## 4. Ohutlevyrakenteet

Perinteisesti rullamuovattuja ohutlevyjä on valmistettu hiiliteräksistä, mutta viime vuosina on enenevässä määrin oltu kiinnostuneita ruostumattoman teräksen käytöstä ohutlevyissä. Ruostumattoman teräksen rullamuovaus on vaativampaa kuin rakenneteräksen, mikä johtuu sen voimakkaasta muokkauslujittumisesta ja takaisinjousta rullamuovausprosessissa. Levyjen katkaisussa materiaalin lujittuminen aiheuttaa rajoituksia levyn paksuuden suhteen.

Rullamuovatuissa ohutlevyissä levyn uumat voivat olla joko suoria tai jäykistettyjä paikallisen lommahduksen estämiseksi. Eurocode 3:n osassa 1.3 [9] annetaan ohjeet hiiliteräksistä valmistettujen ohutlevyjen mitoittamisesta ja Eurocode 3:n osassa 1.4 [10] ohjeet ruostumattomista teräksistä valmistettujen rakenteiden mitoittamisesta. Ohutlevyjen osalta eroavaisuudet rakenneteräksisten ja ruostumattomasta teräksestä valmistettujen rakenneosien välillä ovat taipumien määrittämisessä ja poikkileikkausluokkien raja-  
hoikkuuksien määrittelyssä.

### 4.1 Taipumien määrittäminen normaalilämpötilassa

Määritettäessä taipumia tulee ottaa huomioon ruostumattoman teräksen epälineaarinen materiaalmalli. Eurocode 3:n osan 1.4 [10] mukaan taipumat lasketaan käyttäen alkukimmokertoimen  $E$  sijaan sekanttikimmokerrointa ( $E_s$ ). Sekanttikimmokerroin määritetään seuraavasti:

$$E_s = \frac{E_{s1} + E_{s2}}{2} \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (8)$$

missä  $E_{s1}$  on vedetyn laipan jännitystä  $\sigma_1$  vastaava sekanttikimmokerroin ja  $E_{s2}$  on puristetun laipan jännitystä  $\sigma_2$  vastaava sekanttikimmokerroin.

Tarkasteltavan käyttörajatilan jännitykselle saadaan sekanttikimmokertoimen arvoksi

$$E_{si} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_i} \left( \frac{\sigma_i}{f_y} \right)^n}, \quad i=1,2 \text{ [N/mm}^2\text{]} \quad (9)$$

Kertoimen  $n$  arvot riippuvat materiaalista ja Eurocode 3, osa 1.4 antaa ohjeellisia arvoja eri lujuusluokkien ruostumattomille teräksille. Kertoimen arvot perustuvat suhteellisuusrajaan, joka vastaa 0,01 % pysyvää venymää, ja myötörajaan, joka vastaa 0,2 % pysyvää venymää.

Yksinkertaistaen Eurocode 3, osa 1.4 antaa mahdollisuuden jättää huomiotta sekanttikimmokertoimen vaihtelu palkin pituussuunnassa käyttämällä  $E_s$  minimiarvoa. Tämä vastaa maksimimomentin aiheuttamaa jännitystä.

Poikkileikkausluokan 4 tehollinen poikkileikkaus voidaan määrittää kahdella tavalla joko siten, että käytetään rakenneosan suurinta laskettua jännitystä laskettuna tehollisten poikkileikkausten mukaan (ottaen huomioon materiaaliosavarmuuskerroin) tai vaihtoehtoisesti tarkemmin, jolloin teholliset leveydet lasketaan käyttäen käyttörajatilan mukaan laskettuja jännityksiä rakenneosan puristetuissa osissa (otetaan huomioon puristettujen osien teholliset leveydet).

Tehollinen leveys määritetään pienennyskerroimen  $\rho$  avulla, joka lasketaan seuraavasti:

$$\rho = 1,0, \text{ kun } \bar{\lambda}_p \leq 0,673 \text{ ja} \quad (10)$$

$$\rho = (1,0 - 0,22 / \bar{\lambda}_p) / \bar{\lambda}_p, \text{ kun } \bar{\lambda}_p > 0,673$$

$$\bar{\lambda}_p = 1,052 \cdot \frac{b_p}{t} \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed,ser}}{E k_\sigma}}$$

Eli iteroimalla pystytään määrittämään maksimijännitys ja sitä vastaava sekanttikimmokertoimen arvo, jota edelleen käytetään taipumia määrittäessä.

## 4.2 Poikkileikkauksien rajahoikkeudet

Poikkileikkausluokkien rajahoikkeudet taivutuksessa on määritetty ruostumattomalle teräkselle Eurocode 3, osan 1.4 [10] mukaan alemmiksi kuin rakenneteräksellä (taulukko 4). Kuitenkin joidenkin koetulosten [15] perusteella voidaan olettaa, että mikäli rakenneteräksestä valmistettu rakenneosa kuuluu poikkileikkausluokkaan 1, niin vastaavan leveys-paksuus-suhteen omaava ruostumattomasta teräksestä valmistettu rakenne voidaan myös luokitella kuuluvaksi poikkileikkausluokkaan 1. Alhaisempiin poikkileikkausluokkarajoihin on päädytty, koska käytettävissä ei ole ollut koetuloksia.

Taulukko 4. Poikkileikkausluokkien rajahoikkeudet ENV 1993-1-4:n [10] mukaan.

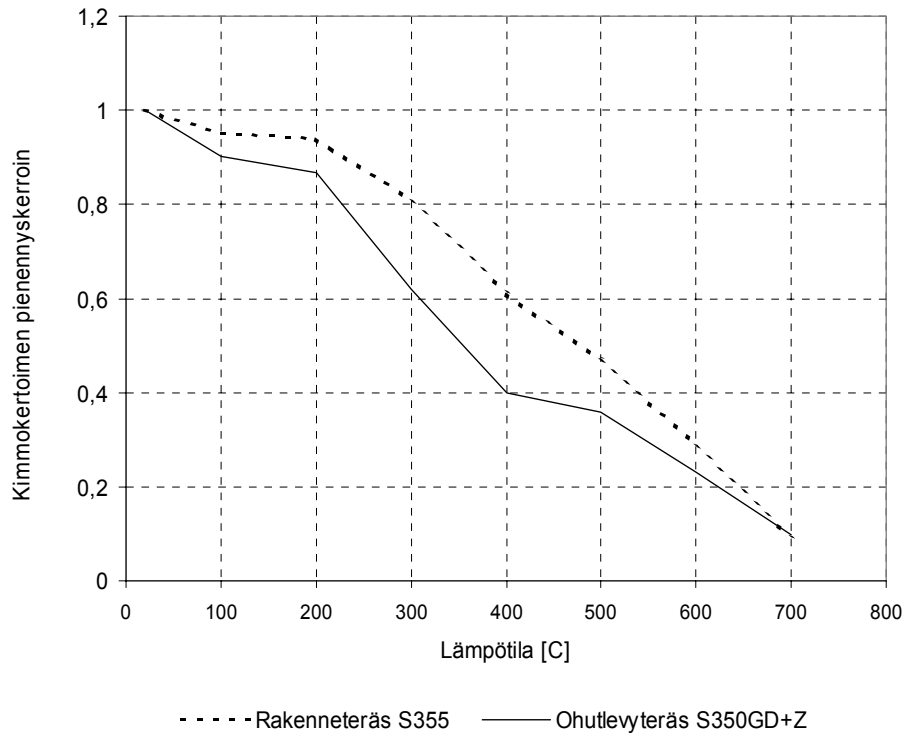
	1	2	3
Uuma	$\frac{d}{t_w} \leq 56,0\varepsilon$	$\frac{d}{t_w} \leq 58,2\varepsilon$	$\frac{d}{t_w} \leq 74,8\varepsilon$
Kahdelta reunalta tuetut laipat - valssatut putki- poikkileikkaukset	$\frac{b-3t}{t} \leq 25,7\varepsilon$	$\frac{b-3t}{t} \leq 26,7\varepsilon$	$\frac{b-3t}{t} \leq 30,7\varepsilon$
- muut	$\frac{b}{t_f} \leq 25,7\varepsilon$	$\frac{b}{t_f} \leq 26,7\varepsilon$	$\frac{b}{t_f} \leq 30,7\varepsilon$
Ulokkeelliset laipat - kylmämuokattu	$\frac{c}{t_f} \leq 10,0\varepsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq 10,4\varepsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq 11,9\varepsilon$
- hitsattu	$\frac{c}{t_f} \leq 9,0\varepsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq 9,4\varepsilon$	$\frac{c}{t_f} \leq 11,0\varepsilon$
Pyöreät putket	$\frac{d}{t} \leq 50,0\varepsilon^2$	$\frac{d}{t} \leq 70,0\varepsilon^2$	$\frac{d}{t} \leq 90,0\varepsilon^2$

$$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210000} \right]^{0,5}$$

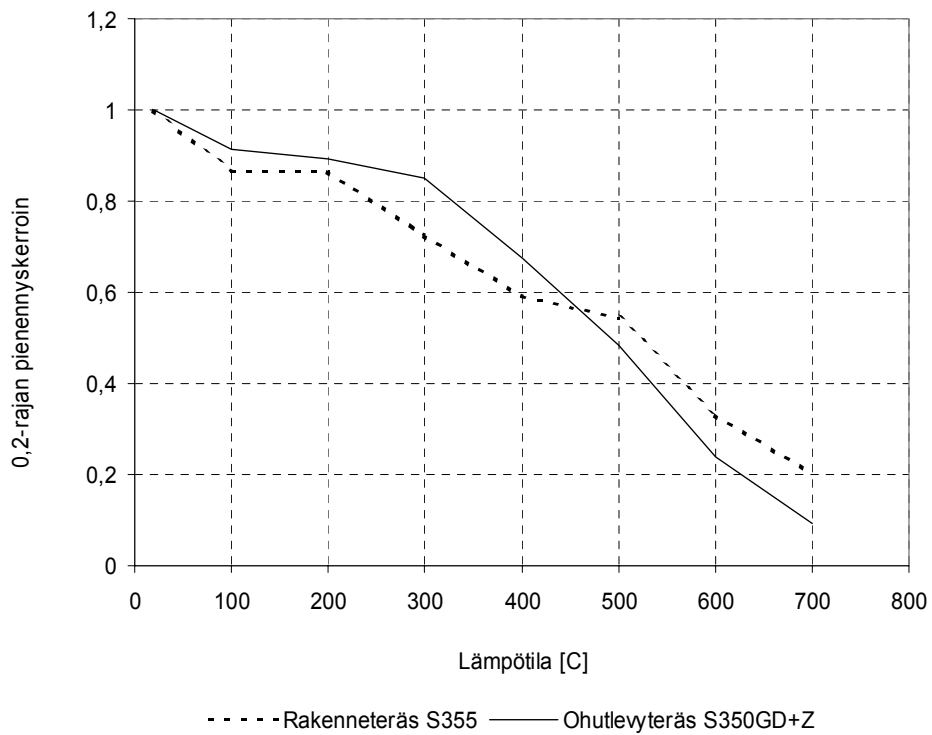
### 4.3 Palotilamitoitus

Ohutlevyjien kestävydestä palotilanteessa on melko vähän tietoa. Rakenteita, joissa ohutlevyjä käytetään sellaisenaan, eivät paloluokkavaatimukset yleensä koske. Paloluokkavaatimusten mukaiset rakenteet ovat useimmiten joko sandwich- tai liittorakenteita. Ruostumattomille ohutlevyteräksille ei ole tehty kuumavetokokeita, joten määrittäessä ruostumattomasta teräksestä valmistettujen ohutlevyjien lujuuden lämpötilariippuvuutta joudutaan käyttämään levyille (paksuus 4 tai 5 mm) määritettyjä pienennyskertoimia [1 ja 19].

Lähteessä [20] on esitetty tulokset ohutlevyteräkselle S350GD+Z (Z35) tehdyistä transienttikokeista. Maksimilämpötila, mikä kokeissa saavutettiin oli 750 °C. Kokeiden perusteella voidaan todeta, että rakenneterästen ja ohutlevyterästen mekaaniset ominaisuudet korkeissa lämpötiloissa poikkeavat toisistaan.



Kuva 10. Kimmokertoimen lämpötilariippuvuus ohutlevy- ja rakenneteräksillä [20].



Kuva 11. 0,2-rajan lämpötilariippuvuus ohutlevy- ja rakenneteräksillä [20].

Edellä esitetyn perusteella nähdään, että ohutlevyteräkset menettävät kimmokertoimensa nopeammin kuin tavalliset rakenneteräkset. Ohutlevyteräksen lujuusarvot ovat 450 °C:seen saakka korkeammat kuin rakenneteräksellä, mutta pienenevät sen jälkeen nopeammin. Kuvissa 10 ja 11 esitetyt pienennyskertoimet on määritetty transienttikokeiden perusteella [20].

#### 4.4 Sandwich-rakenteen polttokoe

Sandwichlevyllä eli kerroslevyllä tarkoitetaan rakennetta, jossa kahden pintalevyn välissä on suhteellisen kevyestä materiaalista valmistettu ydin. Tällaisella rakenteella saavutetaan suurempi taivutusjäykkyys kuin pelkästään pintalevyistä valmistetulla saman painoisella laatalla. Tyypillisesti kerroslevyn mittasuhteet on valittu siten, että ytimen paino on likimain sama kuin pintalevyjen paino yhteensä. Sandwich-rakenteiden ulkopintoina voidaan käyttää rullamuovattua ohutlevyä.

Lujuusopilliselta kannalta poikkeavat kerroslevypalkit ja -sauvat tavanomaisista palkkeista ja sauvoista siinä, että tekninen taivutusteoria ei näiden yhteydessä päde, sillä alun perin tasomaiset palkin ja sauvan poikkileikkaukset eivät kuormitetussa tilanteessa enää ole tasomaisia. Vastaavasti kerroslevylaattojen yhteydessä tekninen kuoriteoria ei enää päde. Tämä johtuu ydinaineen usein huomattavasta liukumasta. [28]

VTT Rakennustekniikan palolaboratoriossa tehtiin polttokoe sandwich-elementeistä kootulle seinälle, jonka leveys oli 3 170 mm ja paksuus 100 mm. Seinä koostui kolmesta vaakasuuntaisesta Rannila Panel 100 R50/RST-elementistä (leveydet 1 200, 1 200 ja 700 mm), joissa eristeenä toimiva ydin oli kivivillaa ja pintalevyt ruostumattomasta terästä, joiden nimellispaksuus oli 0,6 mm. Koekappaleen yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty tutkimusselostuksessa Test report n:o RTE 1007/00 [25]. Koekappale oli kuormittamaton ja kokeessa testattiin sekä osastoivuusvaatimusten täyttymistä että palomuureilta vaadittavaa iskunkestävyyttä. Koe suoritettiin n.s. vertikaaliuunissa.

Koe toteutettiin standardien ISO 834 [12] ja EN 1363 osien 1 ja 2 [4 ja 5] mukaan. Standardin ISO 834 mukaisessa kokeessa vaatimuksia esitetään koekappaleen koolle, liitosten toteutukselle ja kosteuspitoisuudelle. Koekappale oli asennettu kehään, joka kiinnitettiin vertikaaliuunin aukkoon (kuva 12). Aukon koko on 3 200 x 3 200 mm. Koko koekappaleen tulen puoleinen pinta-ala tulee olla alttiina palokuormitukselle. Lämpötilakehitys uunissa mitattiin termoelementeillä, jotka oli sijoitettu 100 mm päähän testattavasta kappaleesta. Lämpötilakehitys koekappaleessa mitattiin termoelementtien avulla, joiden sijainti koekappaleessa on määritetty standardin ISO 834 mukaan (ks. liite 1). Tiiviys mitataan puuvillavanun avulla, jolloin tarkistetaan, ovatko vuotokohdat sellaisia, että kuumat kaasut pääsevät virtaamaan läpi ja sytyttämään palavia materiaaleja.

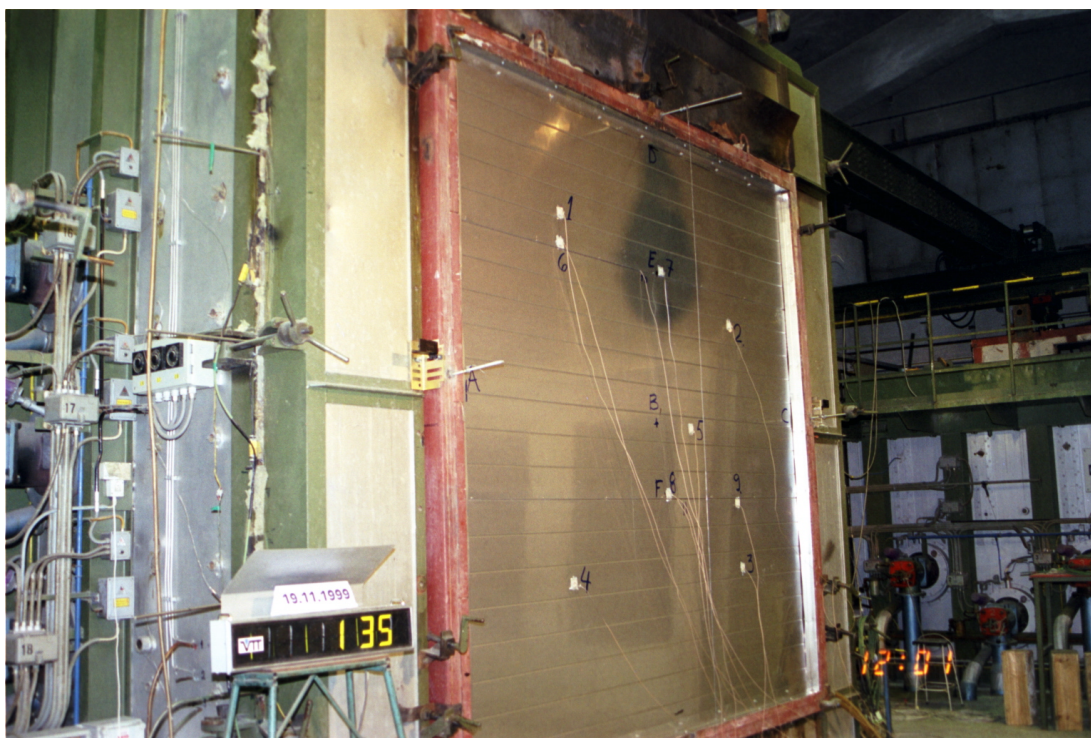
Kokeessa mitattiin myös rakenteen taipumat. Kriteerit kokeen hyväksyttävyydelle ovat riittävän eristävyys ja tiiviys vaatimusten täytyminen (ks. kohta 2.2).

Taulukko 5. Sandwich-elementin koetulokset verrattuna vaatimuksiin.

Ominaisuus	Kokeen kesto min				
<b>Eriste</b>	Koeaika Lämpötilan nousu				
Keskimääräinen lämpötilan nousu (vaatimus $\leq 140$ °C)	15 min 3 °C	30 min 21 °C	45 min 60 °C	60 min 112 °C	Iskun jälkeen 61 min 127 °C
Korkein lämpötilan nousu (vaatimus $\leq 180$ °C)	15 min 24 °C termoelementti 6	30 min 44 °C termoelementti 6	45 min 77 °C termoelementti 6	60 min 121 °C termoelementti 1	61 min 379 °C termoelementti 6
<b>Koekappale täytti eristävyysvaatimuksen</b>	<b>60 min</b>				
<b>Tiiviys</b>	15 min	30 min	45 min	60 min	Iskun jälkeen 60:10
Liekinmuodostuminen (vaatimus; ei jatkuvaa liekkiä 10 s ajan)	Ei liekkejä				Iskukappale seinän läpi
Puuvillavanukoe (vaatimus; ei syttymistä)	Koe suoritettiin 57 min kokeen aloituksen jälkeen. Puuvillavanu ei syttynyt.				Iskukoekappale seinän läpi, koe keskeytettiin, ei puuvillavanukoetta
<b>Koekappale täytti vaatimukset eristävyys ja tiiviys suhteen</b>	<b>60 min</b>				
<b>Savun muodostuminen</b> (Ei vaatimuksia)	15 min	30 min	45 min	60 min	Vähäisessä määrin savua
<b>Koekappale täytti vaatimukset</b>	<b>60 min</b>				
<b>Iskukoe</b>					
Ensimmäinen iskukoe: 60 min 10 s (vaatimus: eristävyys- ja tiiviysvaatimukset täyttyvät 2 minuuttia iskun jälkeen)	Eristävyys- ja tiiviysvaatimukset eivät täytyneet ensimmäisen iskun jälkeen.				
<b>Koekappale ei täyttänyt iskukokeen vaatimuksia</b>					

Palomuurin iskunkestävyyden vaatimuksen täyttymistä testataan kohtisuoraan heilurina 1,5 m korkeudelta pudotettavan lyijyhaulisäkin avulla, jonka massa on 200 kg ja säkin iskuenergia 3 000 Nm. Kun luokkavaatimuksen mukainen paloaika on saavutettu, viiden minuutin kuluttua suoritetaan kolme iskua. Mikäli rakenteella on kantavuusvaatimus, kahden ensimmäisen iskun aikana rakenteen tulee olla kuormitettu. Koetulosten yhteenveto on esitetty taulukossa 5.

Kuten taulukosta 5 nähdään, seinäpaneeli täytti eristävyys- ja tiiviysvaatimukset 60 minuutin palon ajan. Iskukokeen jälkeen eristävyys- ja tiiviysvaatimukset eivät täytyneet, sillä iskussa käytetty haulisäkki lävisti koekappaleen. Sandwich-elementin polttokoe-kappale ja kokeessa mitatut taipumat on esitetty liitteessä 1.



Kuva 12. Sandwich-elementin polttokoejärjestelyt vertikaaliuunissa.

## 4.5 Kattorakenteen polttokoe

Tutkittavalle kattorakenteelle asetettiin eristävyys- ja tiiviysvaatimusten lisäksi kantavuusvaatimus. Polttokokeet tehtiin kahdelle kattorakenteelle, jotka vastasivat muuten toisiaan, mutta ensimmäisessä kokeessa poimulevyn materiaali oli rakenneterästä S350 GD+Z (polyesteri-maalipinnoite) ja toisessa ruostumatonta terästä EN 1.4301. Kokei-

den avulla haluttiin selvittää eri tyyppisen teräksen vaikutusta rakenteen toimintaan tulipalotilanteessa.

Kattorakenne koostui kantavasta poimulevystä Rannila 113, jonka nimellinen ainepaksuus oli 0,8 mm, höyrynsulusta, 140 mm paksusta uritetusta kivivillalevystä, 20 mm paksusta kivivillalevystä ja kaksikerroksisesta kattohuovasta. Poimulevy oli asennettu siten, että leveämpi laippa oli ylöspäin. Koekappaleen kokonaisleveys oli 3 000 mm, pituus 5 500 mm ja korkeus 280 mm. Koekappaleiden yksityiskohtaisemmat tiedot on esitetty tutkimuseloituksissa Test report n:o RTE 3213/00 [26] ja Test report n:o RTE 3212/00 [27]. Kuormituksena molemmissa kokeissa oli tasainen kuorma, joka toteutettiin 20 kg:n painoisilla teräslaatoilla (200 x 200 mm), jotka oli sijoitettu tasaisesti kappaleen yläpinnalle ja vastasivat kuormitusta 0,9 kN/m<sup>2</sup>. Tämä kuorma vastaa palotilanteen lumikuormaa eli puolta normaalista Etelä-Suomen lumikuormasta, joka on määritelty Suomen rakentamismääräyskokoelman B1 mukaan [22]. Polttokokeet suoritettiin VTT Rakennustekniikan palolaboratoriossa n.s. horisontaaliuunissa

Koe toteutettiin standardien ISO 834 [12] ja EN 1365 osan 2 [4 ja 6] mukaan. Koekappale testattiin kolmiaukkoisena jatkuvana palkkina. Keskimäinen jänneväli oli 4 100 mm ja reunajännevälit olivat 650 mm. Koekappaleen pituussuuntainen liike välituilla oli estetty siten, että jokainen poimulevyn laippa oli kiinnitetty ruuveilla välitukeen. Välitukien siirtymä vaakasuunnassa oli estetty niiden päissä. Liitteessä 2 on esitetty koejärjestelyt ja termoelementtien sijainti koekappaleessa. Koetulosten yhteenvedot molemmista polttokokeista on esitetty taulukoissa 6 ja 7.



Taulukko 6. Kattorakenteen (rakenneteräs) koetulokset verrattuna vaatimuksiin.

Koetulokset				
Kriteeri				
<b>Kuormankantokyky</b> (jänneväli $L=4100$ mm, $d=113$ mm)	18 min	30 min	34 min	min
Taipuma laatan keskellä (kriteeri $\leq L^2/400d$ mm = 372 mm)	77 mm	333 mm	375 mm	419 mm
	taipumakriteeri ylitettiin 33 min kohdalla.			
Taipumanopeutta sovelletaan sen jälkeen, kun taipuma $L/30$ (= 137 mm) on ylitetty (kriteeri $\leq L^2/9000d$ mm/min = 16.5 mm/min)	19 mm/min	10 mm/min	14 mm/min	5 mm/min
	taipumanopeuskriteeri ylitettiin 17-27 min kuluessa, taipuma $L/30$ ylitettiin 20 min kohdalla.			
<b>Tiiviys</b>				
Liekin muodostuminen (kriteeri: ei jatkuvaa liekkiä 10 s ajan)	Jatkuva liekki			
<b>Eristävyys</b>	15 min	30 min	40 min	
Keskimääräinen lämpötilannousu (kriteeri: $\leq 140$ °C)	0 °C	2 °C	9 °C	
Korkein lämpötilannousu (kriteeri: $\leq 180$ °C)	0 °C	13 °C	18 °C	

Taulukko 7. Kattorakenteen (ruostumaton teräs) koetulokset verrattuna vaatimuksiin.

Koetulokset				
Kriteeri				
<b>Kuormankantokyky</b> (jänneväli $L=4100$ mm, $d=113$ mm)	30 min	56 min	60 min	67 min
Taipuma laatan keskellä (kriteeri $\leq L^2/400d$ mm = 372 mm)	5 mm	136 mm	173 mm	249 mm
	taipumakriteeriä ei ylitetty kokeen aikana.			
Taipumanopeutta sovelletaan sen jälkeen, kun taipuma $L/30$ (= 137 mm) on ylitetty (kriteeri $\leq L^2/9000d$ mm/min = 16.5 mm/min)	1 mm/min	10 mm/min	9 mm/min	13 mm/min
	taipumanopeuskriteeriä ei ylitetty kokeen aikana, taipuma $L/30$ ylitettiin 56 min kohdalla laatan keskellä.			
<b>Tiiviys</b>				
Liekin muodostuminen (kriteeri: ei jatkuvaa liekkiä 10 s ajan)			Jatkuva liekki koekpl ja uunin reunan välillä	
<b>Eristävyys</b>	30 min	60 min	67 min	
Keskimääräinen lämpötilannousu (kriteeri: $\leq 140$ °C)	2 °C	9 °C	14 °C	
Korkein lämpötilannousu (kriteeri: $\leq 180$ °C)	3 °C	12 °C	16 °C	

Erot eri teräsmateriaaleista valmistettujen kattorakenteiden välillä olivat merkittävät. Rakenneteräksestä valmistetun kattorakenteen kantavuusvaatimus täyttyi 33 minuutin ja osastoivuus- ja eristävyysvaatimus 40 minuutin ajan, kun taas ruostumattomasta teräksestä valmistetulla rakenteella vastaavat ajat olivat 67 minuuttia sekä kantavuuden että osastoivuuden ja eristävyuden suhteen.

## 5. Kennorakenteet

Kennorakenteet voivat olla joko eristettyjä tai ilman eristeitä. Kennorakenteita voidaan käyttää esimerkiksi laivarakenteissa, joilta edellytetään osastoivuusvaatimusten täyttymistä, kuten hyttirakenteiden osastoivina laipioina ja säänkestävinä kansirakenteina sekä palo-ovissa.

Vuonna 1994 Teknillisen korkeakoulun laivalaboratorio teetti VTT Rakennustekniikassa polttokokeita kerroslevyrakenteille [16]. Vuonna 1994 tehdyissä kokeissa testattiin rakenneteräksestä valmistetun kerroslevyn palonkestävyyttä sekä palosuojattuna että suojaamattomana. Tässä hankkeessa testattiin vastaavan ruostumattomasta teräksestä valmistetun kennon palonkestävyyssominaisuuksia ja verrattiin niitä aiemmin tehtyjen kokeiden tuloksiin. Ruostumattomasta teräksestä valmistetulle kennolle kokeet tehtiin pelkästään suojaamattomana.

Kuvassa 13 on esitetty ruostumattomasta teräksestä valmistettu kerroslevy ennen toisen pintalevyn asennusta. Liitteessä 3 on esitetty kerroslevyn periaatekuva ja mitat sekä termoelementtien sijainti koekappaleessa.



*Kuva 13. Ruostumattomasta teräksestä valmistettu kerroslevy ennen toisen pintalevyn asennusta.*

### 5.1 Koekappale

Koekappale valmistettiin Lappeenrannan teknillisessä korkeakoulussa. Kennon alalevyn päälle asetettiin irralliset särmätyt profiilit, jotka kiinnitettiin siltahitseillä alalevyyn. Siltahitsit olivat noin 7 mm pituisia ja ne tehtiin samoilla parametreilla kuin varsinainen

laserhitsaus. Kun kaikki profiilit oli silloitettu alalevyyn, suoritettiin varsinainen hitsaus siltahitsien yli, jolloin ne jäivät varsinaisen hitsin alle. Hitsaukset tehtiin irrallisten profiilien väliin siten, että hitsi liitti alalevyyn samalla kertaa kaksi profiilia. Tämän jälkeen asetettiin pintalevy profiilien päälle ja suoritettiin jälleen paikallisesti painaen pintalevyn silloitus profiileihin. Lopuksi tehtiin hitsaus pintalevyn siltahitsien ylitse.

Laserhitsaus tehtiin LTKK:n 6 kW hiilidioksidilaserilla (Rofin Sinar RS6000), laboratorion isossa työasemassa (työalue 11,7 x 2,7 x 1,2 m).

Hitsausparametrit olivat seuraavat:

- optiikka: fokusoiva peili
- fokuspituus: 200 mm
- teho työkappaleessa: 2,7 kW
- hitsausnopeus: 4 000 mm/min
- suojakaasu: helium 25 l/min

Koska osa termoelementeistä tuli saada koekappaleen sisälle, ne asennettiin särmättyihin levyihin ennen laserhitsausta.

## 5.2 Kennon polttokoe

Polttokoe tehtiin VTT Rakennustekniikan palolaboratoriossa n.s. kuutiouunissa. Kenno testattiin kuormittamattomana, eli tarkasteltiin kennon toimivuutta osastoivana rakenteena. Osastoivan rakenteen on säilytettävä tiiviytensä ja täytettävä eristävyytensä paloluokkavaatimuksen ilmoittaman ajan. Osastoivan rakenteen eristävyysvaatimus määritetään rajoittamalla rakenteen palon vastakkaisen pinnan lämpötilan nousua. Osastoivan rakenteen tiiviydeltä edellytetään, etteivät savukaasut voi aiheuttaa palon leviämistä muihin osastoihin. [21]

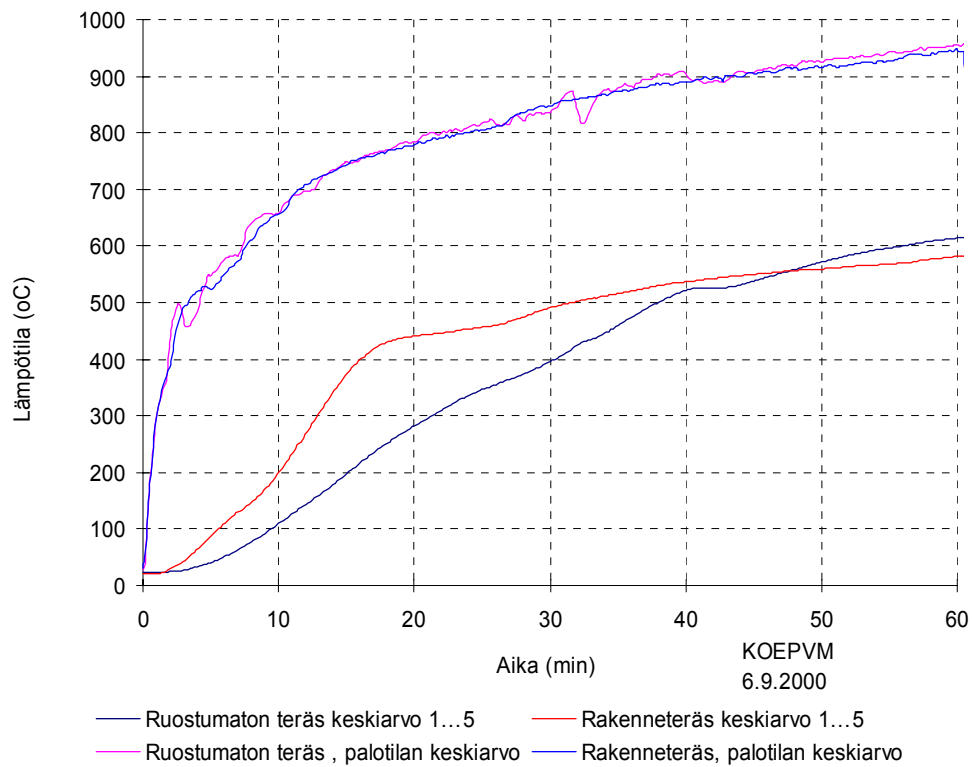
Kokeessa mitattiin lämpötilat palotilassa, kennon sisällä sekä sisä- ja ulkopinnoissa. Koekappale asetettiin tiiviisti kuutiouunin katoksi (kuva 14). Palotilan lämpötilan nousu noudatti standardipalokäyrää [12].



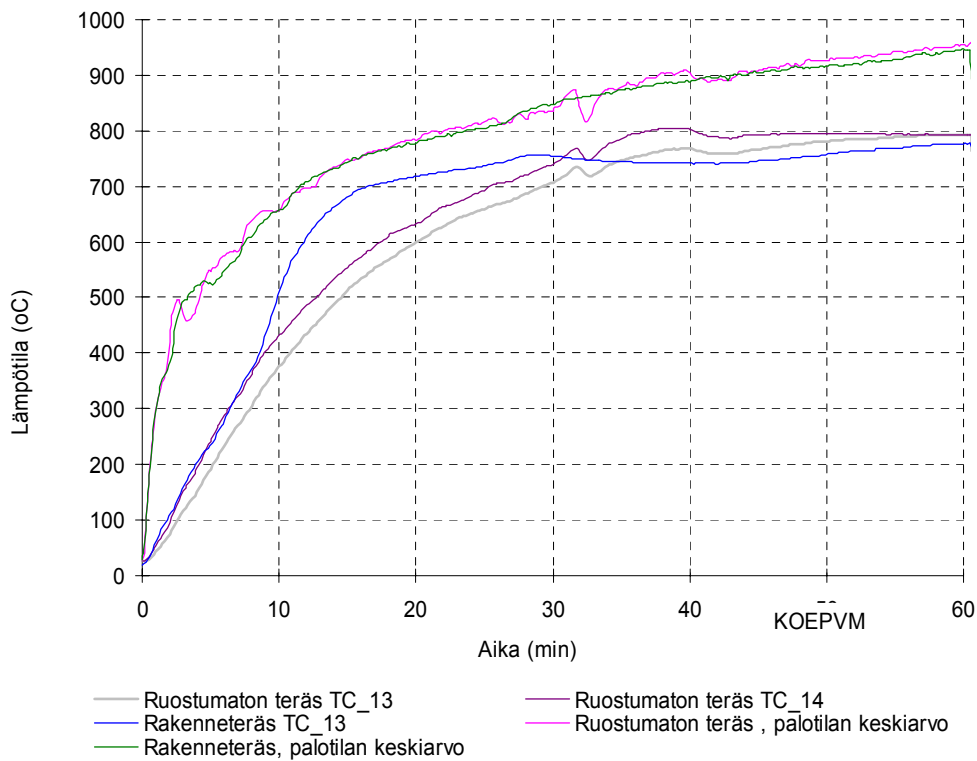
*Kuva 14. Koekappale asennettuna kuutiouuniin.*

### **5.3 Tulosten analysointi**

Seuraavassa on verrattu ruostumattomasta teräksestä ja rakenneteräksestä valmistetun teräskennon polttokokeessa mitattuja lämpötiloja. Termoelementit 1–5 sijaitsevat rakenteen yläpinnalla n.s. kylmällä puolella. Mittaustulosten perusteella voitiin havaita, että ruostumattomasta teräksestä valmistetun kerroslevyn ulkopinnan lämpötila kohosi kokeen alussa 40 minuutin ajan huomattavasti hitaammin kuin rakenneteräksestä valmistetun kerroslevyn lämpötila. Suurimmillaan ero mitatuissa lämpötiloissa oli noin 180 °C ( $t = 15$  min). 48 minuutin jälkeen rakenneteräskennon lämpötila oli alhaisempi ruostumattomasta teräksestä valmistettuun kennoon verrattuna (kuva 15). Seuraavassa kuvassa 16 on verrattu alapinnan lämpötilakehitystä. Havaitaan, että 8 minuutin jälkeen erot lämpötiloissa ovat merkittävät. Erot lämpötiloissa johtuvat ruostumattoman teräksen ja rakenneteräksen erilaisista termomekaanisista ominaisuuksista, erityisesti emissiivisyydestä, jonka vaikutus korostuu kennorakenteessa.



Kuva 15. Termoelementtien 1–5 (rakenteen yläpinta) lämpötilojen keskiarvo ruostumattomasta teräksestä ja rakenneteräksestä valmistetuissa kennossa.



Kuva 16. Palotilan puoleisen pinnan lämpötila ruostumattomasta teräksestä ja rakenneteräksestä valmistetuissa kennossa.

## 6. Hissinovat

Hissinovia käsittelevän osaprojektin tavoitteena oli kehittää ovirakenteessa käytettävää eristemateriaalia. Tarkasteltavien eristemateriaalien valinnan lähtökohtana oli optimoida hissinoven paksuutta, painoa, hintaa ja asennuksen helppoutta. Tarkasteltaviksi materiaaleiksi valittiin ohut, ruostumattomasta teräksestä valmistettu folio sekä kromialumiiniseoksesta valmistettu folio. Näiden materiaalien eristävyysominaisuuksia verrattiin perinteisesti käytettävään mineraalivillaeristeeseen.

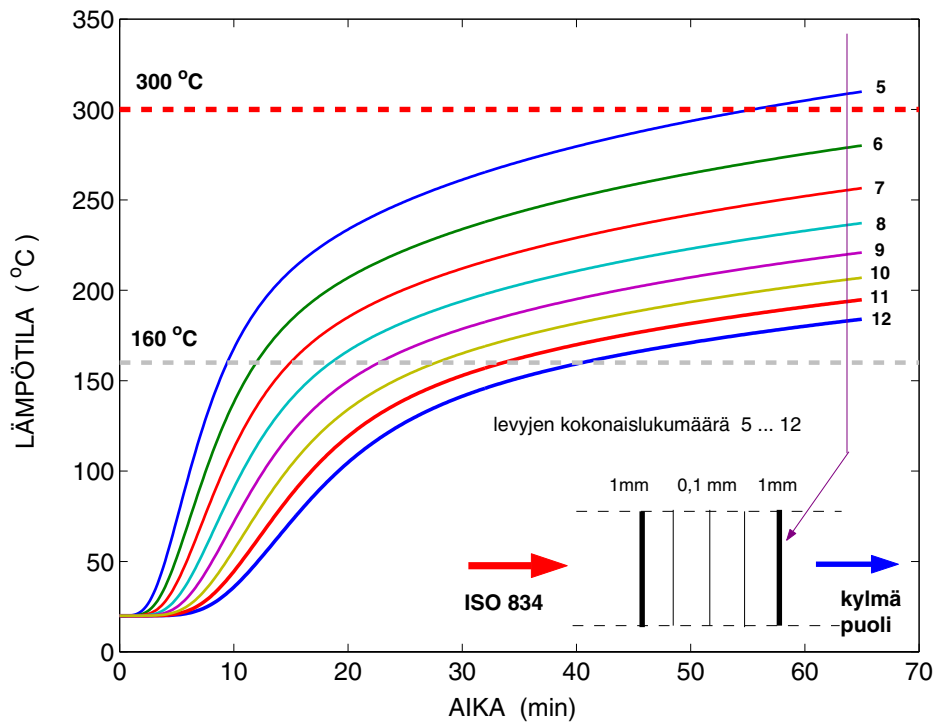
Ensimmäisessä vaiheessa selvitettiin laskennallisesti ohuista ruostumattomista teräsfolioista kasatun pakan eristävyysominaisuuksia. Laskentaa varten määritettiin kartiokalorimetrikokeiden avulla ruostumattoman teräksen pintojen emissiivisyysarvot (kohta 2.4.2). Kartiokalorimetrikokeiden avulla selvitettiin eri tyyppisten foliokombinaatioiden toimintaa. Lähteessä [3] on kuvattu yksityiskohtaisesti tehdyt analyysit ja kartiokalorimetrikokeet.

### 6.1 Eristeen toiminta laskennallisesti

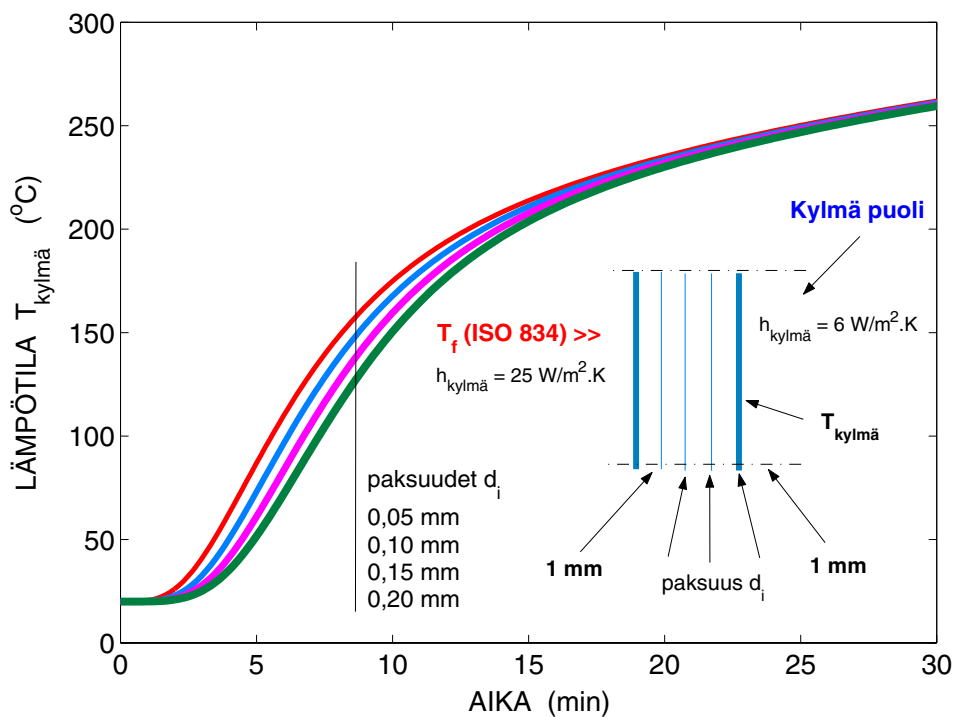
Lämmönsiirtymisen laskennassa käytettiin elementtimenetelmään perustuvaa yksidimensioista laskentamenetelmää. Levyjen välisen lämmönsiirtymisen oletettiin tapahtuvan säteilemällä ilman välityksellä. Kuljettuminen tulee ottaa huomioon metallilevyjen välisen ilmaraon ollessa suurempi kuin 12 mm [3].

Laskennallisesti määritettiin eristävyyskyky tapauksissa, joissa ruostumattomasta teräksestä valmistettujen folioiden lukumäärä vaihteli 5-12. Ulkopintojen levyjen paksuus oli 1 mm ja keskimäisten 0,1 mm. Laskennassa oletettiin, että eristettä kuumennettiin standardipalokäyrän mukaan toiselta puolelta ja toisen pinnan oletettiin olevan normaalilämpötilassa. Laskennan avulla määritettiin ulkopinnan lämpötilakehitys vastataten foliokerrosten lukumäärää (kuva 17). Liitteessä 4 on esitetty laskennassa käytetyt lämmönsiirtymistä kuvaavat yhtälöt. Kuvan 17 perusteella voidaan havaita, että 30 minuutin standardipalon jälkeen ero ulkopinnan lämpötiloissa on suurimmillaan 120 °C.

Laskennallisesti verrattiin myös levyjen paksuuden vaikutusta eristävyysominaisuuksiin (kuva 18). Lasketussa esimerkissä uloimpien levyjen paksuus on 1,0 mm ja keskimäisten kolmen levyn paksuus vaihteli välillä 0,05–0,2 mm. Vastaava vertailu tehtiin myös siten, että uloimpien levyjen paksuus oli 0,1 mm (kuva 19). Levyjen välinen etäisyys laskennassa oli 3 mm.

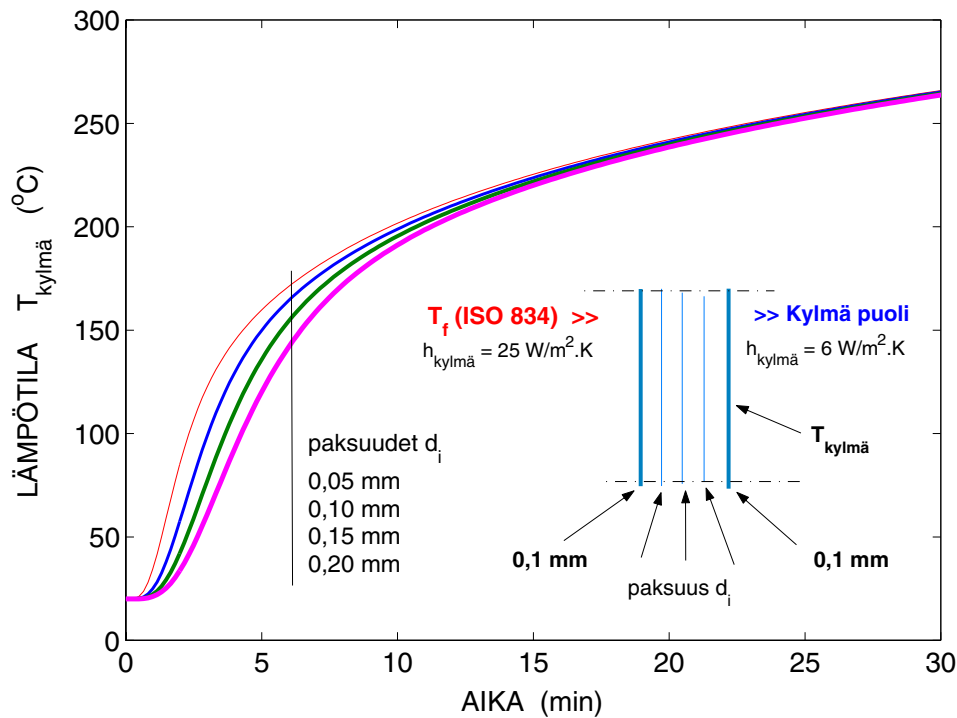


Kuva 17. Laskennallisesti määritetyt lämpötilat rakenteen yläpinnassa. Kerrosten lukumäärä 5–12. Uloimpien levyjen paksuudet 1 mm ja keskimmäisten 0,1 mm.



Kuva 18. Levyjen paksuuden vaikutus eristävyysominaisuuksiin. Pintalevyjen paksuus 1,0 mm ja keskimmäisten kolmen levyn paksuus 0,05–0,2 mm.





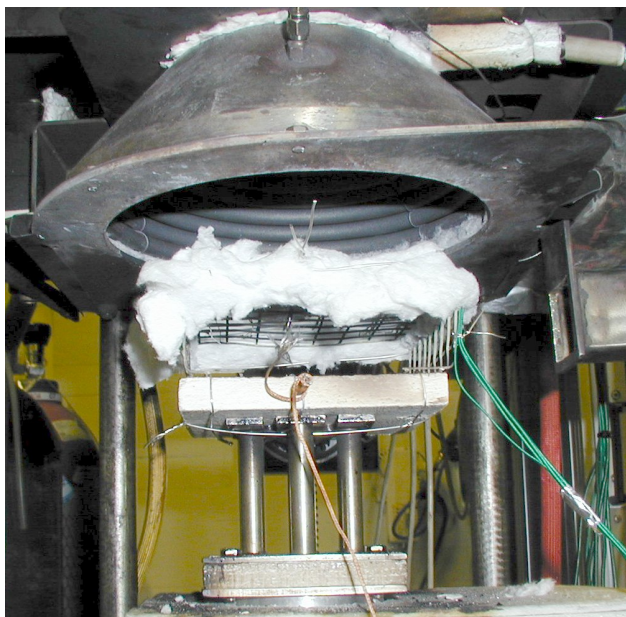
Kuva 19. Levyjen paksuuden vaikutus eristävyysominaisuuksiin. Pintalevyjen paksuus 0,1 mm ja keskimmäisten kolmen levyn paksuus 0,05–0,2 mm.

Kuvien 18 ja 19 perusteella voidaan havaita, että 5–10 minuutin jälkeen palon alkamisesta levyn paksuuden aiheuttama ero ulkopinnan lämpötiloissa on enimmillään noin 50 °C ja 15 minuutin standardipalon jälkeen levyn paksuuden vaikutus on hävinnyt miltei kokonaan.

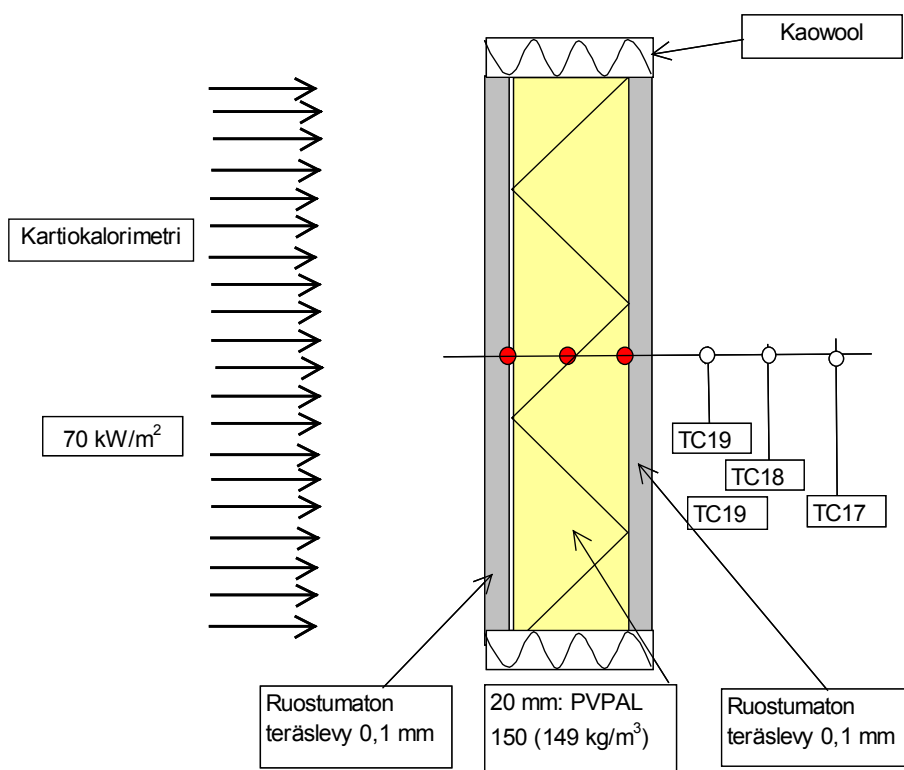
## 6.2 Eristeen toiminta kartiokalorimetrikokeissa

Kartiokalorimetrikokeiden avulla määritettiin yhdensuuntainen lämmönsiirtyminen. Rakenteen mekaanista toimintaa ja tiiviyyttä ei tarkasteltu. Kartiokalorimetrielaitteisto on esitetty kuvassa 20.

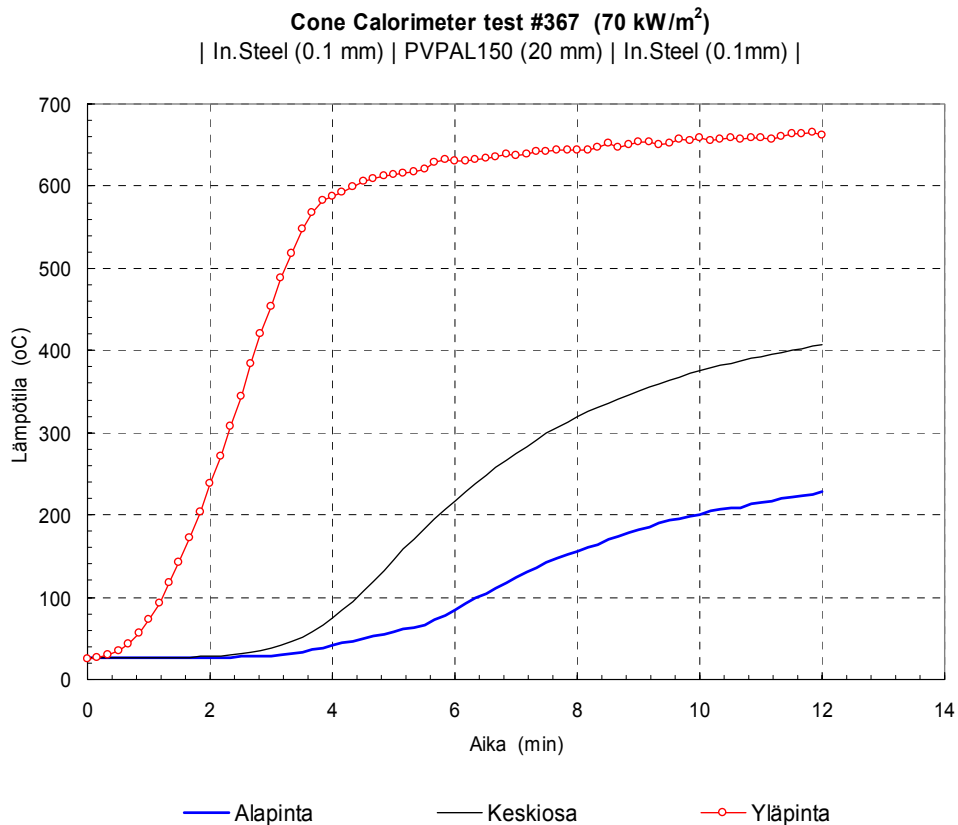
Osaprojektissa testattiin myös mineraalivillaeristeen toimintaa kartiokalorimetrikokeessa. Kuvassa 21 on esitetty mineraalivillalle tehdyn kokeen periaatekuva ja mitatut lämpötilat rakenteen eri osissa on esitetty kuvassa 22.



Kuva 20. Kartiokalometrilaitteisto.

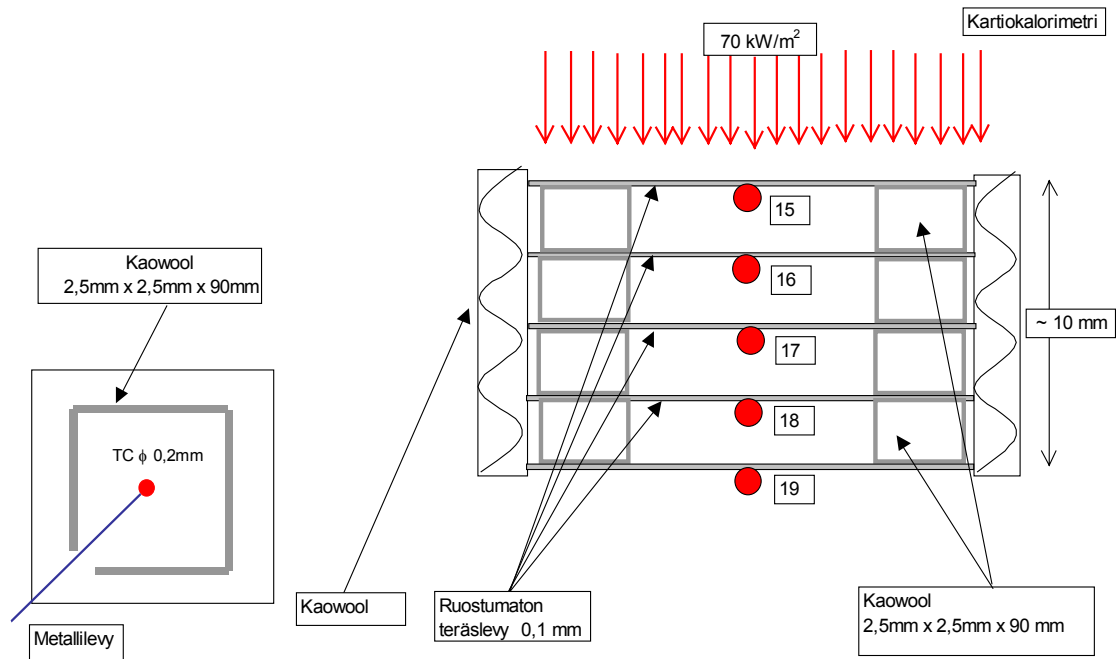


Kuva 21. Kartiokalometrikoje mineraalivillaeristeelle.



*Kuva 22. Mineraalivillan kartiokalorimetrikokeessa mitatut lämpötilat.*

Vastaava koe tehtiin eristeelle, joka koostui useasta ohuesta metallilevystä ( $t = 0,1$  mm), joiden välissä on 2–3 mm ilma-eristystä. Koekappaleen koko oli 100 x 100 mm. Koekappaleen yläpintaan kohdistuu lämpövuoto ( $70 \text{ kW/m}^2$ ) ja lämpö siirtyy kappaleen läpi. Kokeen avulla selvitetään koekappaleen eristävyyskykyä. Kuvassa 23 on kokeen periaatekuva, kun folioita on 5 kappaletta.



Kuva 23. Periaatekuva kartiokalorimetrikokeesta

Kartiokalorimetrikokeita tehtiin yhteensä 12 kappaletta. Taulukoissa 8 ja 9 on esitetty käytettyjen metallifolioiden tiedot.

Taulukko 8. Kartiokalorimetrikokeissa käytettyjen folioiden ominaisuudet.

Materiaali numero	Materiaalityyppi	Paksuus (mm)	Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	Huom.
1	Ruostumaton kylmämuokattu levy	0,1	7920	Kemiallinen analyysi taulukon 9 mukaan. SS 14233/utg4 Stål 2331-43
2	Kromialumiini levy Muotoprofiili	< 0,1	≈ 7100	Kemiallinen analyysi taulukon 10 mukaan. DIN/SEW 17470
3	Kromialumiinilevy Suora levy.	≈ 0,13	≈ 7100	Kemiallinen analyysi taulukon 10 mukaan. DIN/SEW 17470

Taulukko 9. Ruostumattoman 0,1 mm paksun foliolevyn kemiallinen koostumus.

Cast	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
890758	0,104	0,81	1,13	0,030	0,0002	17,04	7,10	0,019

Taulukko 10. Kromialumiinilevyn materiaalin kemiallinen koostumus.

Cast	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Co
-	0,05	0,06	0,4	-	-	25	7,10	0,3

Kartiokalomitrikokeiden kuvaukset on esitetty taulukossa 11. Ensimmäinen koe tehtiin mineraalivillaeristeelle. Muissa kokeissa metallilevyjen lukumäärä, materiaali ja paksuus vaihteli. Kaikkien koekappaleiden koko oli 100 x 100 mm ja kartiokalomitrimin lämpövuoto oli 70 kW/m<sup>2</sup>.

Taulukko 11. Kartiokalomitrikokeiden kuvaus.

Koe-nro	Koekappaleen kuvaus	Levyjen lkm	Koko eristeen paksuus [mm]	Materiaali	Mitattu maksimi-lämpötila [°C]	Mitattu minimi-lämpötila [°C]	Aika [min]
1	0,1 mm levy molemmin puolin 20 mm mineraalivilla	2	20	Mat.nro 1 taul. 8 PVPAL15 0,149 kg/m <sup>3</sup> .	229	665	12
2	0,1 mm levy molemmin puolin 2 kpl 0,1 mm levyjä välissä 1,2 mm ilmarako (toteutettu metallilangan avulla)	4	5	Mat.nro 1 taul. 8	381	609	6
3	0,1 mm levy molemmin puolin 3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 2,5 mm ilmarako	5	10	Mat.nro 1 taul. 8	286 286	671 691	8 12
4	0,7mm levy molemmin puolin 3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 2,5 mm ilmarako	5	12	Normaali teräs ? Mat.nro 1 taul. 8	418	745	14
5	0,1 mm levy molemmin puolin	5	3	Mat.nro 1 taul. 8	422	600	10
	3 kpl 0,1 mm muotoprofiilia välissä ei ilmarakoa			Mat.nro 2 taul. 8			-

6	0,1 mm levy molemmin puolin 9 kpl 0,1 mm muotoprofilia välissä ei ilmarakoa	11	10	Mat.nro 1 taul. 8 Mat.nro 2 taul. 8	382	620	16
7	0,1 mm levy molemmin puolin 3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 2,5 mm ilmarako	5	10	Mat.nro 1 taul. 8 Mat.nro 3 taul. 8	445	600	8
8	0,1 mm levy molemmin puolin 3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 2,5 mm ilmarako Koekpl pystysuunnassa	5	10	Mat.nro 1 taul. 8	256	625	10
9	0,1 mm levy molemmin puolin 3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 1,0 mm ilmarako, (toteutettu kalottien avulla)	5	≈ 5,5	Mat.nro 1 taul. 8	≈ 343 350	507 519	10 18
10	0,1 mm levy molemmin puolin	10	≈ 10	Mat.nro 1 taul. 8	≈ 350	695	14
	8 kpl 0,1 mm levyjä välissä 1,0 mm ilmarako						
11	0,1 mm levy molemmin puolin	5	≈ 5	Mat.nro 1 taul. 8	≈ 400	600	10
	3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 1,2 mm ilmarako						
12	0,1 mm levy molemmin puolin	5	≈ 5	Mat.nro 1 taul. 8	≈ 475	-	13
	3 kpl 0,1 mm levyjä välissä 1,2 mm ilmarako Kokeen 12 jälkeen kpl jäädytetty ja kuumennettu uudestaan						

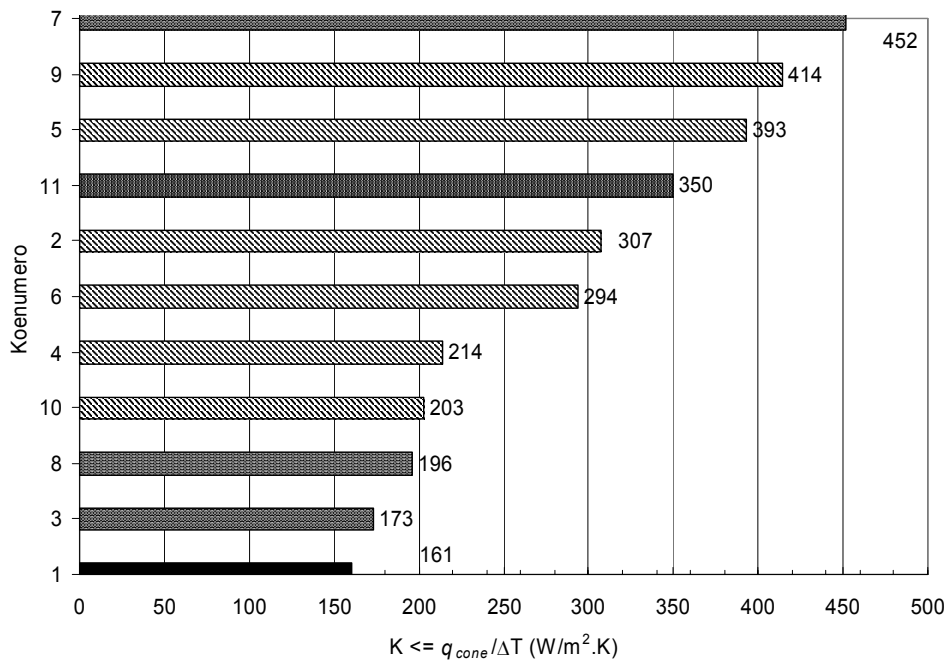
Kokeissa mitattiin molempien pintojen lämpötilat  $T_{hot}$  ja  $T_{cold}$ . Kartiokalorimetrin lähettämä lämpövuoto on  $q_{cone}$  ja lämpövuon hävikki  $q_{losses}$ . Lämpövuon hävikkiä ei tun-

neta, mutta koska sen suuruus on merkittävästi pienempi kuin kartiokalorimetrin lähettämä lämpövuoto, tehollinen lämmönjohtavuus voidaan määritellä seuraavasti:

$$K \leq \frac{q_{cone}}{T_{hot} - T_{cold}} \quad [\text{W/m}^2\text{K}] \quad (11)$$

jossa oletetaan, että  $T_{hot} > T_{cold}$  ja  $q_{cone} \gg q_{losses}$ .

Seuraavassa kuvassa 24 on esitetty tehollisen lämmönjohtavuuden arvot eri kokeissa.



Kuva 24. Tehollisen lämmönjohtavuuden  $K$  [W/m<sup>2</sup>K] arvot eri kartiokalorimetrikokeissa.

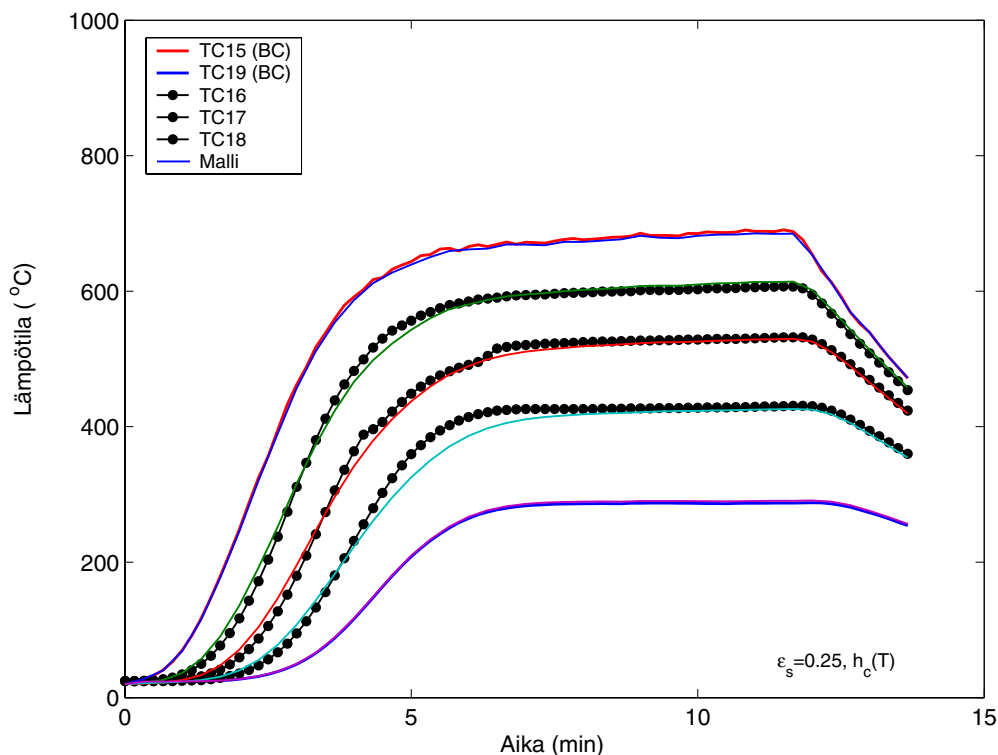
Eristävyysominaisuus on sitä parempi, mitä alhaisempi arvo tehollisella lämmönjohtavuudella  $K$  on. Kuvassa 24 koenumero 1 on mineraalivillalle tehty referenssikoe. Parhaimmat eristävyysarvot ovat koekappaleella, jossa pintalevyinä on 0,1 mm paksut levyt ja välissä kolme 0,1 mm paksuista ruostumattomasta teräksestä valmistettua levyä. Levyjen välissä on 2,5 mm ilmarako ja koekappaleen kokonaispaksuus on 10 mm. Kokeessa 8 on vastaava rakenne, mutta koekappale oli vertikaalisuunnassa, kun se kokeessa 3 oli horisontaalisuunnassa.

Kokeessa 10 on 0,1 mm paksut pintalevyt ja välissä seitsemän kappaletta 0,1 mm paksuisia levyjä, joiden välissä on 1 mm ilmarako. Eristeen kokonaispaksuus on 10 mm. Kokeessa 4 pintalevyjen paksuus on 0,7 mm ja välissä on kolme 0,1 mm paksuista le-

vyä eristeen kokonaispaksuuden ollessa 12 mm. Kaikissa edellä esitettyissä kokeissa materiaali on ruostumatonta terästä.

Levyjen materiaalien vaikutus on myös merkittävä, sillä huonoin eristävyysominaisuus oli kokeessa 7, joka vastasi muuten koetta 3, mutta välissä olevat levyt oli valmistettu kromialumiinista. Kokeessa 9 taas alhaiseen eristävyysarvoon vaikutti se, että levyjen välinen ilmarako oli toteutettu levyyn painettujen kalottien avulla, ja näin ollen levyt olivat kosketuksissa toisiinsa kokeen vastatessa muuten koetta 3. Kokeessa 2 ilmarako oli toteutettu metallilangan avulla ja ilmaraon suuruus oli vain 1,2 mm. Kartiokalorimetrikokeet on kuvattu yksityiskohtaisesti lähteessä [3].

Kartiokalorimetrikokeiden tuloksia analysoitiin laskennallisesti. Kartiokalorimetrikokeissa saatujen tulosten vastaavuus laskennallisiin tuloksiin on hyvä. Kuvassa 25 on verrattu laskennallisia ja kokeissa mitattuja tuloksia toisiinsa, kun levyjen lukumäärä on 5 (pintalevyjen lisäksi kolme levyä välissä). Levyjen välisenä emissiviteettinä käytettiin laskennassa arvoa  $\varepsilon_s = 0,25$ .



Kuva 25. Laskennallisesti ja kokeellisesti määritettyjen lämpötilojen vertailu (folioitten lukumäärä 5).



## 7. Yhteenveto

Tehdyn tutkimuksen tavoitteena oli hankkia valmiudet arvioida ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kevyiden metallirakenteiden ominaisuuksia palotilanteessa ja soveltaa saatua tietoa tuotteissa, joissa hyödynnetään ruostumattoman teräksen hyvät palonkesto-ominaisuudet ja korroosionkestävyys. Tuotteita, joihin hankittuja valmiuksia on sovellettu, ovat parvekerakenteet, sandwich-rakenteet, kattorakenteet, kennorakenteet ja hissinovet. Valittujen tuotesovellutusten palonkestävyyttä on analysoitu sekä laskennallisesti että kokeellisesti.

Kerroslevyn lämpötilan laskentaan on kehitetty projektissa yksidimensioinen elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä, jolla voidaan arvioida palosuojaukseen tarvittavien levyjen tai villan määrää. Ohjelman avulla määritetään kerroslevyn lämpötilojen aikariippuvuus. Laskentamenetelmän avulla voidaan arvioida rakenteen lämpötilakehitystä ilman, että joudutaan heti turvautumaan polttokokeisiin, ja näin voidaan laskennallisesti optimoida rakenteen toimintaa tulipalotilanteessa. Laskentamenetelmää on sovellettu sekä parvekelaattojen että hissinovien lämpötilakehityksen määrittämiseen.

Laskettaessa rakenteiden lämpötilakehitystä tulee tuntee materiaalien termiset ominaisuudet. Säteilemällä siirtyvä lämpömäärä kahden pinnan välillä riippuu pintojen välisestä lämpötilaerosta, pintojen emissiviteetistä (emissio ja absorptio) sekä pintojen asemasta toisiinsa nähden. Ruostumattoman teräksen pinnan laadun ja värin vaikutusta emissiviteetin arvoihin tutkittiin sekä RHS-putkille kuutiouunissa tehtyjen polttokokeiden että kartiokalorimetrikokeiden avulla. Uunikokeiden laskennassa käytettävä rezultoiva emissiviteetti ottaa pinnan lisäksi huomioon palotilan ominaisuudet. Saatujen tulosten perustella havaittiin, että ruostumattoman teräksen lämpötila kohoaa hitaammin kuin rakenneteräksen ja ero 15 minuutin standardipalon jälkeen on noin 90 °C. Resultoiva emissiviteetti laskettiin Eurocode 3, osan 2.2. [7] mukaisilla kaavoilla termoelementtien mitattujen lämpötilojen perusteella. Ruostumattoman teräksen rezultoivan emissiviteetin arvot olivat merkittävästi alempia kuin rakenneteräksen arvot.

Parvekkeiden vaatimustenmukaisuus osoitettiin sekä kokeellisesti että laskennallisesti. Laskennallinen vaatimuksenmukaisuuden osoittaminen oletetun palonkehityksen tapauksessa voidaan tehdä joko täysin laskennallisesti tai yhdistämällä koe- ja laskennalliset tulokset. Ensimmäisessä vaihtoehdossa joudutaan aluksi ratkaisemaan ikkuna-aukosta työntyvien palavien kaasujen lämpötila. Koetulokset voidaan yhdistää laskentaan käyttämällä kokeista mitattua kaasunlämpötilaa. Voidaan myös käyttää palotilan kaasunlämpötilaa, koska koetulokset osoittivat, että kaasunlämpötila parvekelaatan alla on ikkuna-aukon kohdalla lähes sama kuin palotilassa alentuen parvekelaatan reunaa kohti.

Parvekkeiden polttokokeet tehtiin oletettua palonkehitystä kuvaavassa VTT:n julkisilvulaitteessa. Erot eri kokeissa mitatuissa kaasunlämpötiloissa ovat pieniä sekä palotilassa että parvekelaatan alapuolella, joten koemenetelmän toistettavuus on hyvä. Parvekkokeissa mitatut lämpötilat parveketason alapuolella ovat korkeampia kuin ISO 834 [12] mukaiset lämpötilat. Palotilan lämpötilankehitys voidaan riittävällä tarkkuudella määrittää Eurocode 1, osan 2.2 [7] parametrinen palokäyrän mukaan, johon myös Suomen rakentamismääräyskokoelman B7 [24] parametrinen palokäyrä perustuu. Parvekkeen kantavat rakenteet voidaan mitoittaa tämän palokäyrän mukaan, jolloin kestävyysarvot ovat varmalla puolella. Parvekelaatan yksidimensioisella lämpötila-analyysillä pystytään määrittämään laatan lämpötilakehitys ja näin laskemaan, mikä on kriittinen laatan yläpinnan lämpötila arvioitaessa puurutilöiden syttymistä.

Osastoivan sandwich-rakenteen palonkestävyyttä testattiin ISO 834 [12] ja EN 1363 osien 1 ja 2 [4 ja 5] mukaan. Seinäpaneeli täytti eristävyys- ja tiiviysvaatimukset 60 minuutin palon ajan, mutta iskukokeessa käytettävä haulisäkki lävisti koekappaleen. Kokeessa mitattiin koekappaleen taipumat ja lämpötilakehitys koekappaleen eri kohdissa.

Kattorakenteille tehdyillä kokeilla selvitettiin ruostumattoman teräksen ja rakenneteräksen toiminnan eroja kantavissa ja osastoivissa ohutlevyrakenteissa. Erot eri teräsmateriaaleista valmistettujen kattorakenteiden välillä olivat merkittävät. Rakenneteräksestä valmistetun kattorakenteen kantavuusvaatimus täyttyi 33 minuutin ja osastoivuus- ja eristävyysvaatimus 40 minuutin ajan, kun taas ruostumattomasta teräksestä valmistetuilla rakenteella vastaavat ajat olivat 67 minuuttia sekä kantavuuden että osastoivuuden ja eristävyysvaatimusten suhteen.

Kennorakenteita voidaan soveltaa esimerkiksi laivarakenteissa, joilta edellytetään osastoivuusvaatimusten täyttymistä. Ruostumattomasta teräksestä valmistetun kennon palonkestävyyssominaisuuksia verrattiin rakenneteräksestä valmistetulle kennolle aiemmin tehtyjen kokeiden tuloksiin. Mittaustulosten perusteella voitiin havaita, että ruostumattomasta teräksestä valmistetun kennolevyn ulkopinnan lämpötila kohosi kokeen alussa 40 minuutin ajan huomattavasti hitaammin kuin rakenneteräksestä valmistetun kennolevyn lämpötila. Suurimmillaan ero mitatuissa lämpötiloissa oli noin 180 °C ( $t = 15$  min). Erot lämpötiloissa johtuvat ruostumattoman teräksen ja rakenneteräksen erilaisista termomekaanisista ominaisuuksista, erityisesti emissiivisyydestä, jonka vaikutus korostuu kennorakenteessa.

Hissinovia käsittelevän osaprojektin tavoitteena oli kehittää ovirakenteessa käytettävää eristemateriaalia. Tarkasteltavien eristemateriaalien valinnan lähtökohtana oli optimoida hissinoven paksuutta, painoa, hintaa ja asennuksen helppoutta. Tarkasteltaviksi materiaaleiksi valittiin ohut, ruostumattomasta teräksestä valmistettu folio sekä kromialumii-

niseoksesta valmistettu folio. Näiden materiaalien eristävyysominaisuuksia verrattiin perinteisesti käytettävään mineraalivillaeristeeseen. Laskennallisesti selvitettiin ohuista ruostumattomasta teräsfolioista kootun eristeen eristävyysominaisuuksia. Kartiokalorimetrikokeita tehtiin 12 kappaletta, ja saatujen kokeellisten tulosten vastaavuus laskennallisiin tuloksiin on hyvä. Kokeiden perusteella voidaan todeta, että parhaat eristävyysominaisuudet saavutetaan, kun folioitten välinen ilmarako on riittävän suuri eivätkä foliot ole kosketuksissa toisiinsa. Ruostumattoman teräksen eristävyysominaisuudet ovat merkittävästi paremmat kuin kromialumiinimateriaalilla.

## Lähdeluettelo

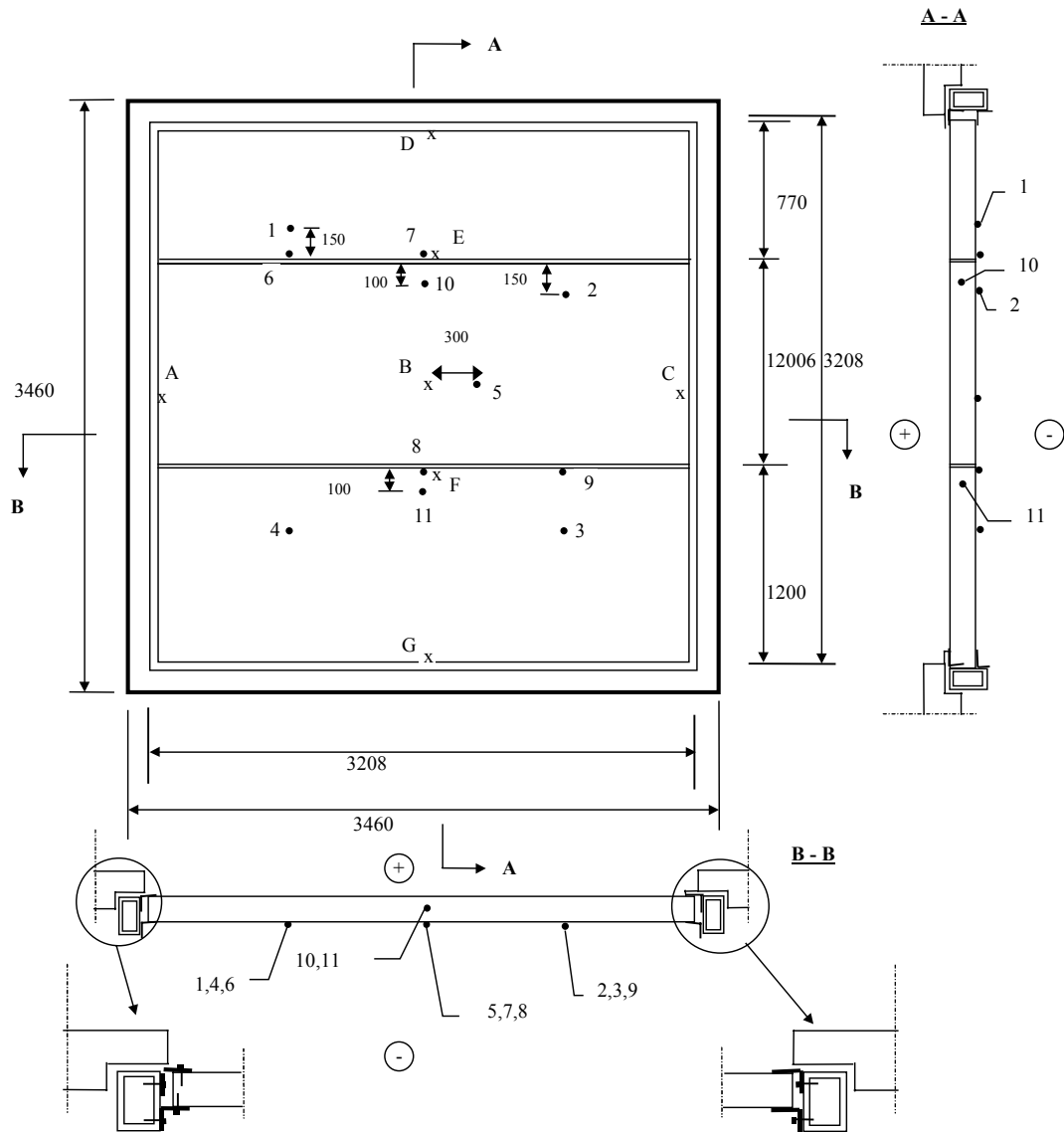
- [1] Ala-Outinen, T. 1996. Fire resistance of austenitic stainless steels Polarit 725 (EN 1.4301) and Polarit 761 (EN 1.4571). Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 34 s. + liitt. 30 s. (VTT Tiedotteita 1760)
- [2] Ala-Outinen, T. & Oksanen, T. 1997. Stainless steel compression members exposed to fire. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus. 41 s. + liitt. 17 s. (VTT Tiedotteita 1864)
- [3] Baroudi, D. 2001. Effective Thermal Insulation Properties of Metallic Insulation System build up by thin metallic sheets with layers of air cavities. Report on Cone Calorimeter Tests & Modelling. Research Report Nro RTE1295/01. 64 s. + liitt. 3p.
- [4] EN 1363-1. 1999. Fire Resistance Tests, Part 1: General Requirements. 1999-02-18. CEN/TC 127. 49 s.
- [5] EN 1363-2. 1999. Fire Resistance Tests, Part 2: Alternative and Additional procedures. 1999-02-18. CEN/TC 127. 16 s.
- [6] EN 1365-2. 1999. Fire Resistance Tests for load-bearing Elements - Part 2: Floors and roofs. 1999-02-18. CEN/TC 127. 24 s.
- [7] ENV 1991-2-2. 1994. Eurocode 1: Basis of design and actions on structures, Part 2.2: Actions on structures exposed to fire. Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 55 s.
- [8] ENV 1993-1-2. 1995. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.2: Structural fire design. Brussels: European Committee for Standardization (CEN). 64 s.
- [9] ENV 1993-1-3. 1993. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.3: Cold-formed thin gauge members and sheeting. Brussels: European Committee for Standardization (CEN) 55 s.
- [10] ENV 1993-1-4. 1996. Eurocode 3: Design of steel structures, Part 1.4: General rules, Supplementary rules for stainless steels. Brussels: European Committee for Standardization (CEN) 55 s.
- [11] Incropera, F. & DeWitt, D. 1996. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. New York: John Wiley & Sons. 886 s.

- [12] ISO 834. 1975. Fire resistance tests. Element of building construction. Switzerland: International Organization of standardization. 16 s.
- [13] Law, M. & O'Brien, T. 1981. Fire and steel construction, Fire safety of bare external structural steel. Constrado. 88 s.
- [14] LIPA. 1990. Liittorakenteiden palotekninen mitoitusohjelma. Espoo: Subnic Oy. 4 s.
- [15] Little, G. H. 1982. Collapse Behaviour of Aluminium Plates. International Journal of Mechanical Science. Vol. 24, No.1, s. 37-45.
- [16] Metalliset kerroslevyrakenteet, palonkestävyysskoe 4.11.1994. VTT Rakennustekniikka & Teknillinen korkeakoulu, laivalaboratorio.
- [17] Metodsbeskrivning SP A4 105, Statens Provningsanstalt. SP FIRE 105. External wall assemblies and facade claddings. 1985-07-18. Swedish National Testing and Research Institute. Appendix A.
- [18] Myllymäki, J., Oksanen, T.; Baroudi, D. & Ala-Outinen, T. 2000. Real scale fire experiments of lightweight steel balconies. Kesti, J. (toim.) Viidennet teräsrakenteiden tutkimus- ja kehityspäivät, 18.-19.1.2000. Espoo:Teknillinen korkeakoulu. S. 138-145
- [19] Outinen, J. & Mäkeläinen, P. 1997. Mechanical properties of austenitic stainless steel Polarit 725 (EN 1.4301) at elevated temperatures. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Teräsrakennetekniikka, Julkaisu 1. 20 s.
- [20] Outinen, J. 1999. Mechanical properties of Structural Steels at Elevated Temperatures. Espoo: Teknillinen korkeakoulu, Teräsrakennetekniikka, Licentiate Thesis. 78 s + liitt. 23 s.
- [21] Rakenteellinen paloturvallisuus. Ohjeet. 1997. Suomen rakentamismääräyskokoelma E1. Helsinki: ympäristöministeriö. 29 s.
- [22] Rakenteiden varmuus ja kuormitukset. Määräykset 1998. Suomen rakentamismääräyskokoelma B1. Helsinki: ympäristöministeriö. 11 s.
- [23] Teräsnormikortti n:o 10/1999. 1999. Austeniittisestä ruostumattomasta teräksestä valmistettujen rakenteiden palotekninen mitoitus. Teräsrakenneyhdistys r.y. (TRY). 8 s.

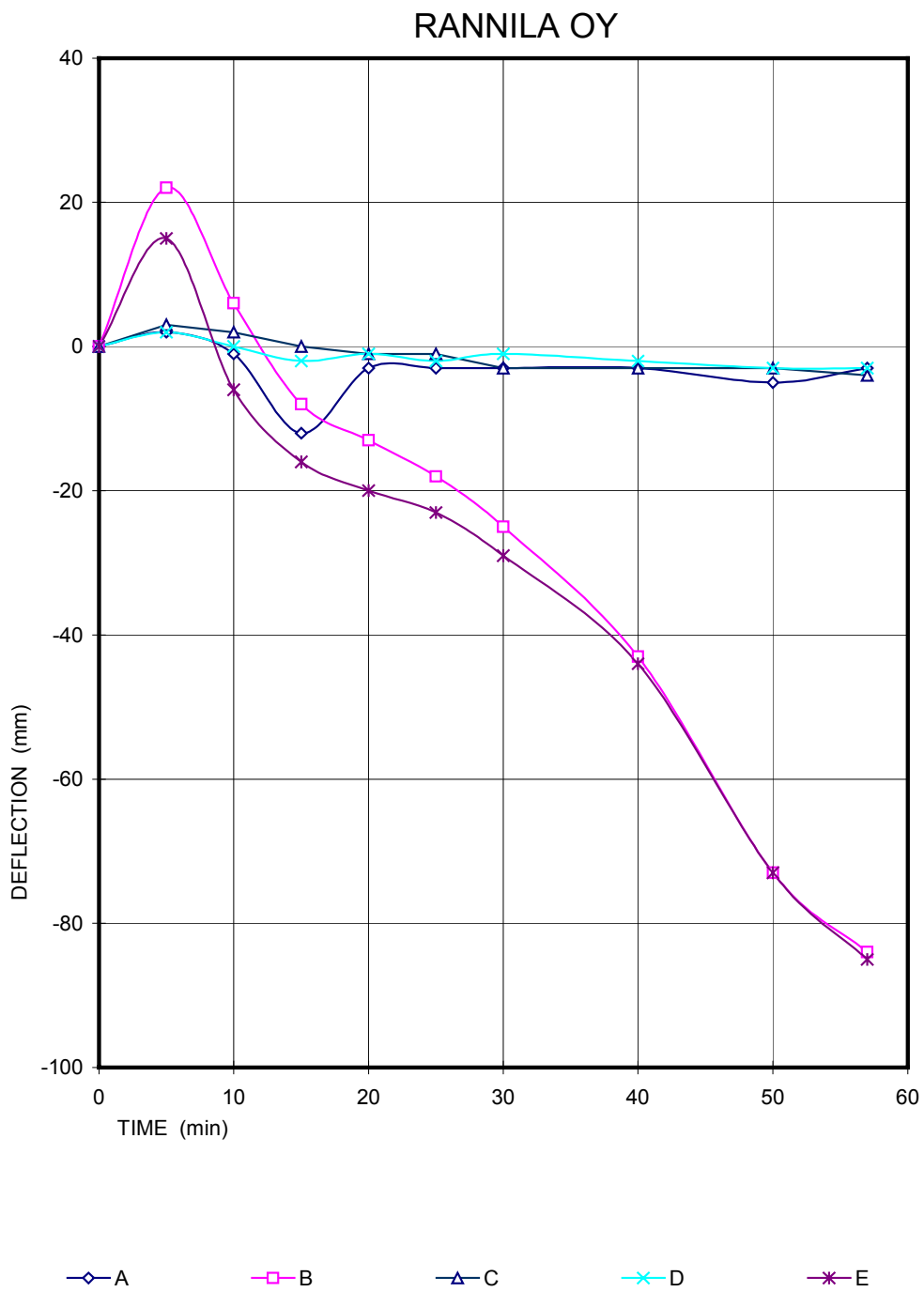
- [24] Teräsrakenteet. Ohjeet. 1988. Suomen rakentamismääräyskokoelma B7. Helsinki: ympäristöministeriö. 39 s.
- [25] Fire resistance test on a non-loading bearing, separating stainless sandwich wall with an insulation of rock wool. 2000. Test report n:o RTE 1007/00. VTT Rakennustekniikka. 4 s. + liitt. 19 s.
- [26] Fire resistance test on a loadbearing separating roof construction of Rannila 113 steel sheet deck profiles. 2000. Test report no RTE 3213/00. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 4 s. + liitt. 19 s.
- [27] Fire resistance test on a loadbearing separating roof construction of Rannila 113 stainless steel sheet deck profiles. 2000. Test report no RTE 3212/00. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. 4 s. + liitt. 22 s.
- [28] Ulv Mai, H. 1984. Kevytrakennetekniikka. 829 B. Espoo: Otakustantamo. 491 s.

# Liite 1: Sandwich-elementin polttokoe-kappale ja mitatut taipumat

Iskukuormitus pisteessä B.



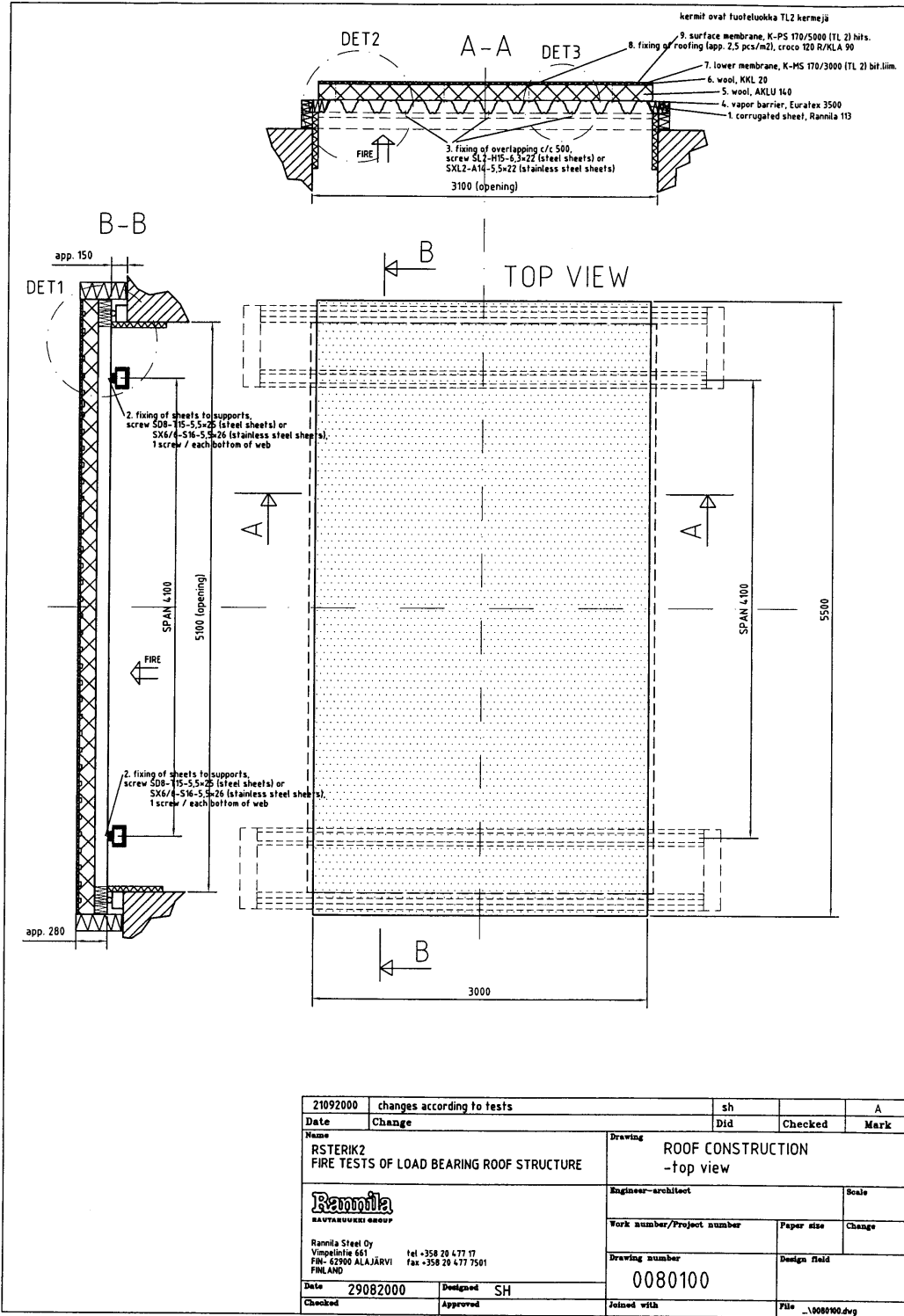
Lämpötilan mittauspisteet 1–9 koekappaleen pinnalla, mittauspisteet 10 ja 11 eristeen keskellä. Taipuman mittauspisteet A–G.



*Kuva 1. Sandwich-elementin taipumat. A–C, koekappaleen keskellä ja D–E koekappaleen yläosassa.*

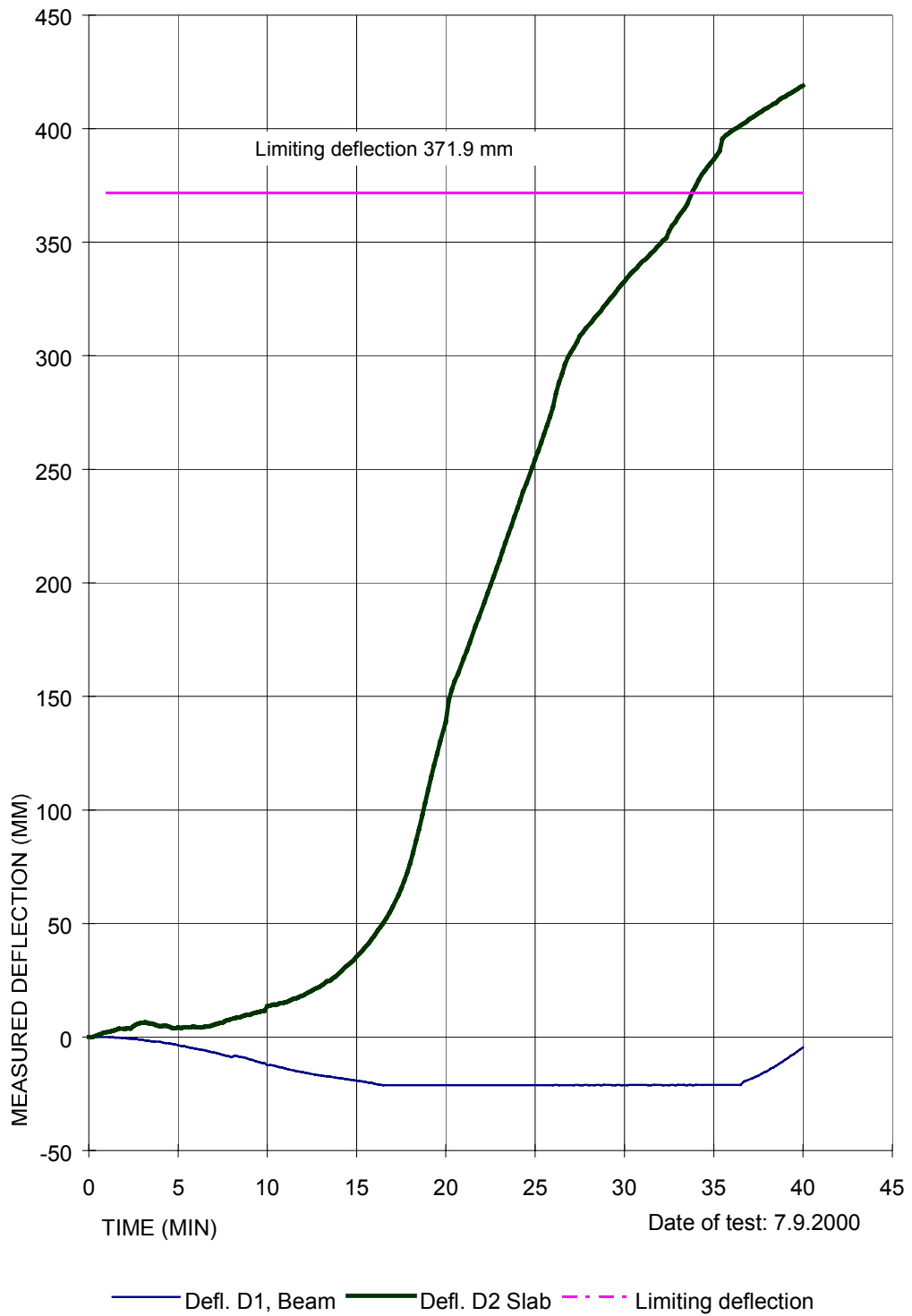


## Liite 2: Kattorakenteen polttokoejärjestely, mitatut taipumat ja lämpötilat



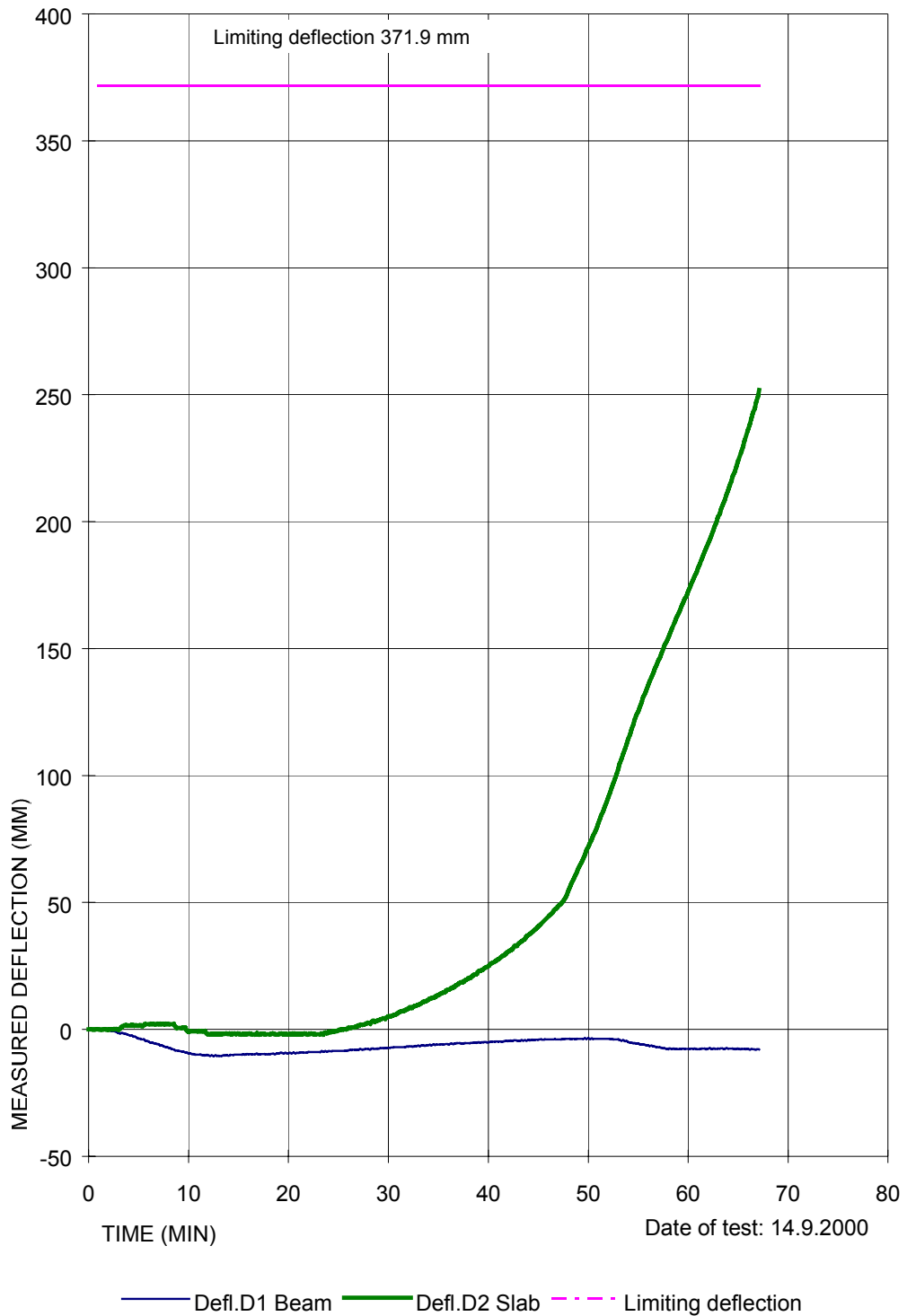
Kuva 1. Kattorakenteen polttokoejärjestely.

# RANNILA



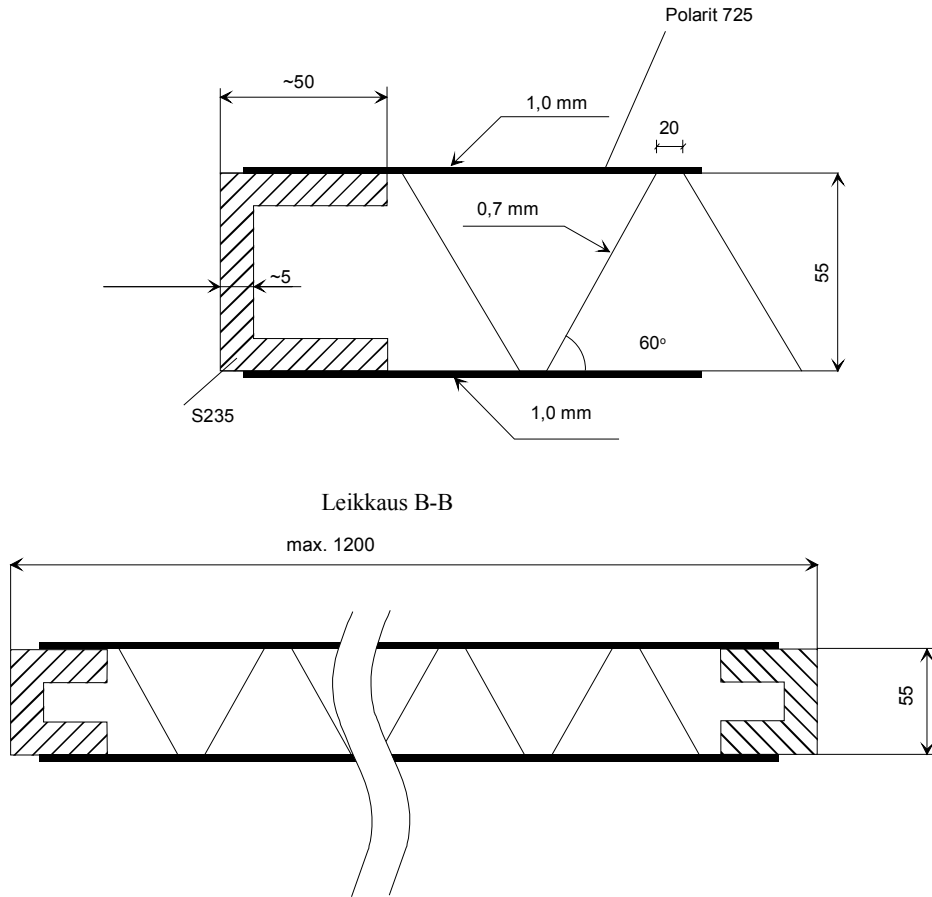
Kuva 2. Mitatut taipumat palkkituilla ja laatan keskellä (rakenneteräs).

# RANNILA



Kuva 3. Mitatut taipumat palkkituilla ja laatan keskellä (ruostumaton teräs).

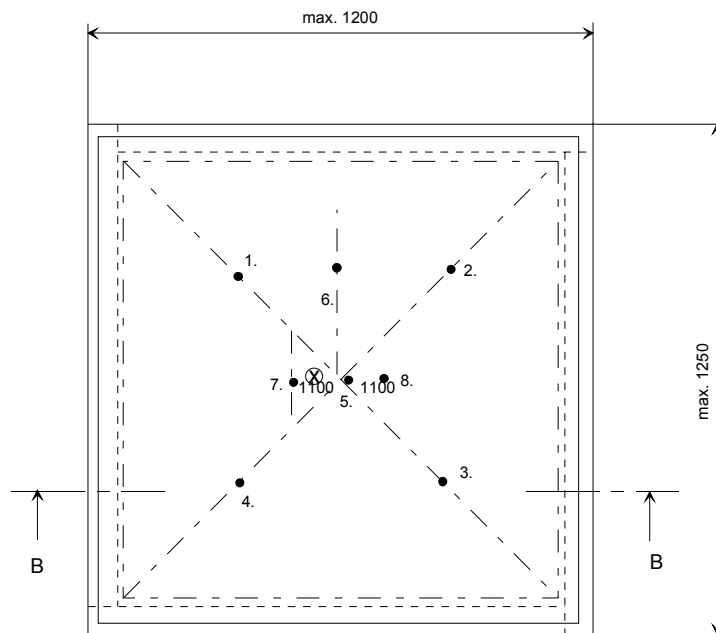
# Liite 3: Korrugoituytiminen kerroslevy



Leikkaus B-B

max. 1200

Reunavahvistukset levyjen välissä



Katsottuna alhaalta

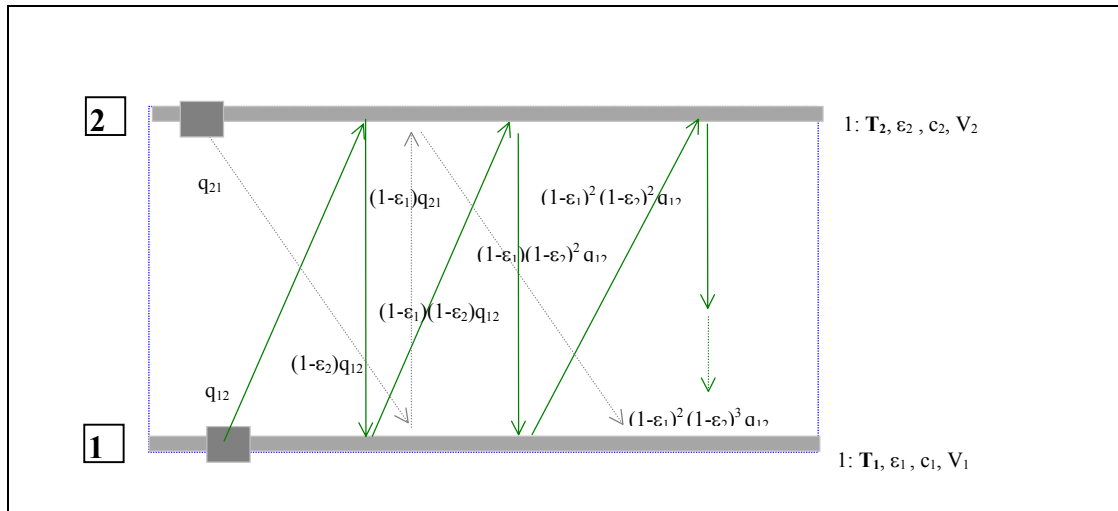
## Liite 4: Lämmönsiirtymisyhtälöt kerroslevyssä

### SÄTEILYN MONINKERTAINEN HEIJASTUMINEN KAHDEN METALLILEVYN TAPAUKSESSA

Energiatasapainoyhtälöiden johtaminen (alkuarvo-ongelma aikaintegroitu)

$$\rho_1 c_1 V_1 \dot{T}_1(t) = q_{1,net}(t) A_1 \quad \text{with } T_1(0) = T_1^0$$

$$\rho_2 c_2 V_2 \dot{T}_2(t) = q_{2,net}(t) A_2 \quad \text{with } T_2(0) = T_2^0$$



Levy 1 lähettää lämpösäteilyä  $q_{12}$ , mikä heijastuu päättymättömästi levyjen 1 ja 2 välillä. Vastaavasti levy 2 lähettää lämpösäteilyä  $q_{21}$ , mikä myös heijastuu päättymättömästi levyjen 1 ja 2 välillä.

Levystä lähtevä lämpösäteily määritetään seuraavasti:

$$q_{12} = \epsilon_1 \sigma T_1^4$$

$$q_{21} = \epsilon_2 \sigma T_2^4$$

Määritetään yhtälöt, jotka tarvitaan kahden levyn välisen säteilyn ratkaisemiseksi yksidimensioisena ongelmana. Tätä tarkoitusta varten tulee määrittää energiatasapaino. Tar-

kastellaan levystä 1 lähtevää säteilyä  $q_{12}$ . Useiden  $q_{12}$  :n aiheuttamien heijastumien levystä 2 jälkeen levy 1 absorboi energiavuon

$$\varepsilon_1 \sum_{n=0,1,2,3,\dots}^{\infty} (1 - \varepsilon_1)^n \cdot (1 - \varepsilon_2)^{n+1} q_{12}$$

Tarkastellaan nyt levystä 2 lähtevää säteilyä  $q_{21}$ , joka heijastuu levystä 1. Vastaavasti levy 1 absorboi energiavuon

$$\varepsilon_1 \sum_{n=0,1,2,3,\dots}^{\infty} (1 - \varepsilon_1)^n \cdot (1 - \varepsilon_2)^n q_{21}$$

Tehdään seuraavat johtopäätökset. Levyn 1 absorboima energian kokonaismäärä lämpövuosta  $q_{12}$  ja  $q_{21}$  on

$$q_1^{netto} = \varepsilon_1 \cdot \left( -\sigma T_1^4 + \Sigma_{12}^1 q_{12} + \Sigma_{21}^1 q_{21} \right) = \varepsilon_1 \Sigma_{21}^1 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 (1 - \varepsilon_1 \Sigma_{12}^1) \sigma T_1^4 \Rightarrow$$

$$q_1^{netto} = \sigma \varepsilon_1 \left( \varepsilon_{21}^{(1)} T_2^4 - \varepsilon_{12}^{(1)} T_1^4 \right)$$

missä emissiviteettien resultantit levyssä 1 ovat

$$\varepsilon_{21}^{(1)} = \Sigma_{21}^1 \varepsilon_2 \quad ja \quad \varepsilon_{12}^{(1)} = 1 - \varepsilon_1 \Sigma_{12}^1$$

Vastaavasti levyn 2 energiavuon kokonaismäärä on

$$q_2^{netto} = \varepsilon_2 \cdot \left( -\sigma T_2^4 + \Sigma_{21}^2 q_{21} + \Sigma_{12}^2 q_{12} \right) = \varepsilon_2 \Sigma_{12}^2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_2 \Sigma_{21}^2) \sigma T_2^4 \Rightarrow$$

$$q_2^{netto} = \varepsilon_2 \sigma \left( \varepsilon_{12}^{(2)} T_1^4 - \varepsilon_{21}^{(2)} T_2^4 \right)$$

$$\varepsilon_{12}^{(2)} = \Sigma_{12}^2 \varepsilon_1 \quad and \quad \varepsilon_{21}^{(2)} = 1 - \varepsilon_2 \Sigma_{21}^2$$

missä emissiviteettien resultantit levyssä 2 ovat

$$\varepsilon_{12}^{(2)} = \Sigma_{12}^2 \varepsilon_1 \quad and \quad \varepsilon_{21}^{(2)} = 1 - \varepsilon_2 \Sigma_{21}^2$$

$\Sigma$ - emissivisyydet ovat

$$\Sigma_{12}^1 = \sum_{n=0,1,2,3,\dots}^{\infty} (I - \varepsilon_1)^n \cdot (I - \varepsilon_2)^{n+1} = \frac{I - \varepsilon_2}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)}$$

$$\Sigma_{12}^2 = \Sigma_{21}^1 = \sum_{n=0,1,2,3,\dots}^{\infty} (I - \varepsilon_1)^n \cdot (I - \varepsilon_2)^n = \frac{I}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)}$$

$$\Sigma_{21}^2 = \sum_{n=0,1,2,3,\dots}^{\infty} (I - \varepsilon_1)^n \cdot (I - \varepsilon_2)^n = \frac{I - \varepsilon_1}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)}$$

Kokonaislämpövuoto levyyn 1 on

$$q_1^{netto} = -\varepsilon_1 \sigma T_1^4 + \varepsilon_1 \frac{I - \varepsilon_2}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)} q_{12} + \frac{\varepsilon_1}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)} q_{21} \quad \text{or}$$

$$q_1^{netto} = \sigma \varepsilon_1 \left( \varepsilon_{21}^{(1)} T_2^4 - \varepsilon_{12}^{(1)} T_1^4 \right) = \sigma \varepsilon_1 \left( \frac{\varepsilon_2}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)} T_2^4 - \left( 1 - \frac{I - \varepsilon_2}{I - (I - \varepsilon_1)(I - \varepsilon_2)} \right) T_1^4 \right)$$

$$\rho_1 c_1 \frac{V_1}{A_1} \dot{T}_1(t) = \varepsilon_1 \Sigma_{21}^1 \varepsilon_2 \sigma T_2^4 - \varepsilon_1 (1 - \varepsilon_1 \Sigma_{12}^1) \sigma T_1^4 + h_f (T_f - T_1) + \sigma \varepsilon_f (T_f^4 - T_1^4)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{V_2}{A_2} \dot{T}_2(t) = \varepsilon_2 \Sigma_{12}^2 \varepsilon_1 \sigma T_1^4 - \varepsilon_2 (1 - \varepsilon_2 \Sigma_{21}^2) \sigma T_2^4 - h_{amb} (T_2 - T_{amb}) - \sigma \varepsilon_{amb} (T_2^4 - T_{amb}^4)$$

Nämä yhtälöt voidaan kirjoittaa kompaktimpaan muotoon seuraavasti:

$$\rho_1 c_1 \frac{V_1}{A_1} \dot{T}_1(t) = \varepsilon_1 \sigma \left( \varepsilon_{21}^{(1)} T_2^4 - \varepsilon_{12}^{(1)} T_1^4 \right) + h_f (T_f - T_1) + \sigma \varepsilon_f (T_f^4 - T_1^4)$$

$$\rho_2 c_2 \frac{V_2}{A_2} \dot{T}_2(t) = \varepsilon_2 \sigma \left( \varepsilon_{12}^{(2)} T_1^4 - \varepsilon_{21}^{(2)} T_2^4 \right) - h_{amb} (T_2 - T_{amb}) - \sigma \varepsilon_{amb} (T_2^4 - T_{amb}^4)$$



Tekijä(t) Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djebar & Oksanen, Tuuli			
Nimeke <b>Ruostumaton teräs tulipalolle altistetussa rakenteissa</b>			
Tiivistelmä <p>Tehdyn tutkimuksen tavoitteena oli hankkia valmiudet arvioida ruostumattomasta teräksestä valmistettujen kevyiden metallirakenteiden ominaisuuksia palotilanteessa ja soveltaa saatua tietoa tuotteissa, joissa hyödynnetään ruostumattoman teräksen hyvät palonkesto-ominaisuudet ja korroosionkestävyys. Tuotteita, joihin hankittuja valmiuksia on sovellettu, ovat parvekerakenteet, sandwich-rakenteet, kattorakenteet, kennorakenteet ja hissinovet. Valittujen tuotesovellusten palonkestävyyttä on analysoitu sekä laskennallisesti että kokeellisesti.</p> <p>Useista kerroksista koostuvan levyn lämpötilan laskentaan on projektissa kehitetty yksi-dimensioinen elementtimenetelmään perustuva laskentamenetelmä. Laskentamenetelmän avulla voidaan arvioida palosuojaukseen tarvittavien levyjen tai villan määrää. Menetelmällä voidaan arvioida rakenteen lämpötilakehitystä ilman, että joudutaan heti turvautumaan polttokokeisiin, ja näin voidaan laskennallisesti optimoida rakenteen toimintaa tulipalotilanteessa. Laskentamenetelmää on sovellettu sekä parvekelaattojen että hissinovien lämpötilakehityksen määrittämiseen.</p> <p>Ruostumattoman teräksen pinnan laadun ja värin vaikutusta emissiviteetin arvoihin tutkittiin sekä RHS-putkille tehtyjen polttokokeiden (kuutiounikoe) että kartiokalorimetrikokeiden avulla. Ruostumattoman teräksen resultoivan emissiviteetin arvot olivat merkittävästi alempia kuin rakenneteräkselle määritetyt arvot. Täyden mittakaavan kokeita tehtiin parveke-, sandwich-, katto- ja kennorakenteille. Parveke- ja kattorakennekokeissa tutkittiin osastoivuus- ja kantavuusvaatimusten mukaisuutta ja sandwich- ja kennorakenteilla pelkästään osastoivuusvaatimusten täyttymistä. Kerroslevyjen lämpötilakehityksen laskentaa verifioitiin sekä parvekekokeissa että kartiokalorimetrikokeissa. Kartiokalorimetrikokeissa varioitiin ohuiden teräslevyjen lukumäärän sekä materiaalin vaikutusta eristävyysominaisuuksiin. Saatujen kokeellisten tulosten vastaavuus laskennallisiin tuloksiin on hyvä. Laskennallisia valmiuksia voidaan hyödyntää jo tuotekehitysvaiheessa ja näin nopeuttaa optimaalisten ratkaisujen löytymistä.</p>			
Avainsanat stainless steel, steel structures, fire safety, fire prevention, fire protection, construction, fire resistance, tests, sandwich structures, calculations, balconies			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Rakenne- ja talotekniikkajärjestelmät, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT			
ISBN 951-38-5914-2 (nid.) 951-38-5915-0 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Projektinumero R0SU00410	
Julkaisuaika Lokakuu 2001	Kieli suomi, engl. tiiv.	Sivuja 53 s. + liitt. 9 s.	Hinta B
Projektin nimi KENNO Kevyet levyt, Kevyiden ruostumattomien teräs-rakenteiden erikoiskuormitukset (RSTERIK)		Toimeksiantaja(t) Teknologian kehittämiskeskus (Tekes), Outokumpu Polarit Oy, Rannila Steel Oy, Finton Parvekejärjestelmät Oy, Kone Oyj, Merivoimien esikunta, Stala Oy, Oy Ja-Ro Ab, VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. (09) 456 4404 Faksi (09) 456 4374	



Published by



Vuorimiehentie 5, P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. +358 9 4561  
Fax +358 9 456 4374

Series title, number and  
report code of publication

VTT Research Notes 2112  
VTT-TIED-2112

Author(s) Ala-Outinen, Tiina, Myllymäki, Jukka, Baroudi, Djelbar & Oksanen, Tuuli			
Title <b>Stainless steel structures exposed to fire</b>			
Abstract <p>The main purpose of research was to obtain knowledge to evaluate the features of lightweight stainless steel structures in fire explosion and apply the knowledge for products, which advantages the good fire and corrosion resistance. The knowledge was applied to the balconies, the sandwich-structures, the corrugated core sandwich and the lift doors. The fire resistance of considered products was analysed by calculations and tests.</p> <p>One-dimensional finite element code has been written for the computation of temperature of layered structure. By the model the number of sheets and the thickness of insulation material can be estimated. The model enables to define the temperature in the structures so that the fire tests can be compensated and the structure can be optimized by the calculations. The model was applied to define the temperature evolution of the balcony slabs and the lift doors.</p> <p>The emissivity of stainless steels was studied by the fire tests for RHS-tubes at furnace and by the cone calorimeter facility. The value of emissivity for stainless steel is lower than the values of carbon steel. The full-scale tests were carried out for the balconies, the sandwich-panels, the roofs and the corrugated core sandwich structure. In tests for the balconies and the roof structures the fire resistant and load-bearing features were considered and in tests for the sandwich panels and the corrugated core sandwich structures only the fire resistant feature was studied. The calculation of layered structures was verified in full-scale tests for balconies and in cone calorimeter tests. In cone calorimeter tests the number of stainless steel sheets and the material was varied to determinate the feature of insulation. The correlation between the computational and test results is good. The computational completions can be utilised in the product development and so facilitate to find out the optimal solutions.</p>			
Keywords stainless steel, steel structures, fire safety, fire prevention, fire protection, construction, fire resistance, tests, sandwich structures, calculations, balconies			
Activity unit VTT Building and Transport, Structures and Building Services, Kemistintie 3, P.O.Box 1805, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-5914-2 (soft back ed.) 951-38-5915-0 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Project number R0SU00410	
Date October 2001	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 53 p. + app. 9 p	Price B
Name of project KENNO Kevyet levyt, Kevyiden ruostumattomien teräsrakenteiden erikoiskuormitukset (RSTERIK)		Commissioned by Technology Development Centre of Finland (Tekes), Outokumpu Polarit Oy, Rannila Steel Oy, Finton Parve- kejärjestelmät Oy, Kone Oyj, Merivoimien esikunta, Stala Oy, Oy Ja-Ro Ab, VTT Building and Transport	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1235-0605 (soft back ed.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.inf.vtt.fi/pdf/">http://www.inf.vtt.fi/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 9 456 4404 Fax +358 9 456 4374	