

# Eriytetyn betonijulkisivun suunnitteluperusteita

Juha Ratvio

VTT Rakennustekniikka



ISBN 951-38-5292-X (nid.)

ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-5293-8 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.inf.vtt.fi/pdf/>)

Copyright © Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) 1998

#### JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

Statens tekniska forskningscentral (VTT), Bergsmansvägen 5, PB 2000, 02044 VTT  
tel. växel (09) 4561, fax 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 Rakennustekniikka, Rakennusmateriaalit ja -tuotteet sekä puutekniikka, Kemistintie 3, PL 1805, 02044 VTT,  
puh. vaihde (09) 4561, faksi (09) 456 7004

VTT Byggnadsteknik, Byggnadsmaterial och -produkter, träteknik, Kemistvägen 3, PB 1805, 02044 VTT,  
tel. växel (09) 4561, fax (09) 456 7004

VTT Building Technology, Building Materials and Products, Wood Technology,  
Kemistintie 3, P.O.Box 1805, 02044 VTT,  
phone internat. +358 9 4561, fax +358 9 456 7004

Toimitus Leena Ukssoski

Libella Painopalvelu Oy, ESPOO 1998

Ratvio, Juha. Eriytetyn betonijulkisivun suunnitteluperusteita [Design basis of split concrete facade constructions]. Espoo 1998, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1900. 37 s. + liitt. 17 s.

**UDK** 69.012.4:69.022.3:624.044

**Avainsanat** facades, concrete constructions, design criteria, deformations, vaulting, split concrete facades

## TIIVISTELMÄ

Julkaisussa käsitellään asuinkerrostalon eriytettyjen betonijulkisivurakenteiden (ulkolevy jännitetty tai teräsbetonia) ja myös perinteisen betonisandwich-elementin ulkolevyn pinnan muodonmuutoksia talon ensimmäisen käyttövuoden aikana, jolloin muutosten oletetaan olevan suurimmillaan. Rakenteiden muodonmuutosten todettiin noudattavan (varauksin) perinteisiä laskentakaavoja ja ohjeita ulkolevyn kaareutumisen ja pituudenmuutosten osalta. Ainakin jännitetyn levyn muodonmuutosten todettiin kuitenkin kasvavan vielä toisenakin käyttövuotena.

Eriytetyn betonirakenteen ulkopinnan kaareutumiseen vaikuttavat korostetusti julkisivujen oikea valmistustekniikka elementtitehtaalla ja levyjen oikea varastointi.

Eriytetylle betonijulkisivurakenteelle esitetään mm. kiinnikkeiden, saumojen ja asennustekniikan parannusehdotuksia rakenteen kilpailukyvyn parantamiseksi.

Ratvio, Juha. Eriytetyn betonijulkisivun suunnitteluperusteita [Design basis of split concrete facade constructions]. Espoo 1998, Technical Research Centre of Finland, VTT Tiedotteita – Meddelanden – Research Notes 1900. 37 p. + app. 17 p.

**UDC** 69.012.4:69.022.3:624.044

**Keywords** facades, concrete constructions, design criteria, deformations, vaulting, split concrete facades

## ABSTRACT

Face deformations of exterior cladding panels of split concrete facades (exterior panel prestressed or reinforced concrete panel) in residential buildings and also those made of traditional concrete sandwich elements are studied in this research during first working year, when the deformations are assumed to be maximum. These deformations comply (under reserve) with traditional calculation formulas and rools of the vaulting and length changes of exterior panel. These deformations of the prestressed panel are, however, still growing during the second working year.

The vaulting of the face of a split concrete facade can be reduced by the right manufacturing technology in element factory and the right storage.

For the split concrete facade proposals for example for fastenings, joints and assembly have been given to improve its competitiveness.

# ALKUSANAT

Tämä tutkimus kuului osana projektiin “Betonisten ei-kantavien julkisivuelementtien jäykistysvaikutus” ja se täydensi Rakennustuoteteollisuuden “Julksivu 2000” -hanketta.

Tässä tutkimuksessa mitattiin kahdessa kerrostalokohteessa eriytetyn betonijulkisivun ja vertailumateriaalina perinteisen sandwich-julkisivun muodonmuutoksia, joista tehtiin myös teoreettiset laskelmat. Eriytetyn julkisivurakenteen osalta etsittiin kehitysmahdollisuuksia erityisesti sen kiinnikkeiden ja asennustekniikan osalta.

Tätä tutkimusta rahoittivat TEKES ja VTT ja tämä raportti on tutkimuksen osaraportti 2.

Tutkimus toteutettiin VTT Rakennustekniikassa. Projektin tutkijana oli erikoistutkija Juha Ratvio. Tutkimuksen johtoryhmään kuuluivat toimitusjohtaja Jari Siniranta JS-Suunnittelu Oy:stä, toimitusjohtaja Raimo Lehtinen Teräspeikko Oy:stä, toimitusjohtaja Heikki Aapro Paramid Oy:stä, dipl.ins. Juha Seppänen YIT-Yhtymä Oy:stä, tekn. tri Ralf Lindberg TTKK:sta, tutk.-prof. Heikki Kukko, tekn. tri Matti Pajari ja erikoistutkija Juha Ratvio VTT Rakennustekniikasta ja tekn. tri Osmo Koskisto TEKESistä.

# SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ.....	3
ABSTRACT .....	4
ALKUSANAT .....	5
1 JOHDANTO .....	7
2 ERIYTETTY BETONIJULKISIVU .....	8
2.1 Eriytetty rakenne.....	8
2.2 Ulkomaiset eriytetyn betonijulkisivun rakenteet .....	9
2.3 Kotimaiset eriytetyn betonijulkisivun rakenteet.....	14
3 ERIYTETYN BETONIJULKISIVUN ASENNUSTEKNIikka.....	18
4 BETONIJULKISIVUJEN MITTAUKSET.....	20
4.1 Mittaukset eriytetystä betonijulkisivurakenteesta.....	20
4.2 Vertailumittaukset betonisandwich-julkisivurakenteesta.....	24
5 ERIYTETYN RAKENTEEN MUODONMUUTOSLASKELMAT.....	28
6 MITTAUSTULOSTEN VERTAILU MUODONMUUTOSLASKELMIIN.....	30
7 ERIYTETYN BETONIJULKISIVUN RAKENTEEN JA KIINNIKKEIDEN .... KEHITYSEHDOTUKSET .....	31
7.1 Julkisivurakenteen kehitysehdotukset .....	31
7.2 Kiinnikkeiden kehittämisehdotukset .....	32
8 YHTEENVETO .....	36
LÄHDELUETTELO .....	37

## LIITTEET

LIITE 1 Betonijulkisivujen mittaustulokset

LIITE 2 Sandwich-elementtien lämpötila- ja kosteusmittaukset

# 1 JOHDANTO

Eriytetty betonijulkisivu on viime vuosina tullut korvaamaan perinteistä sandwich-rakennetta merkittävien etujensa avulla. Eriytetyn julkisivurakenteen kehittämiseen on panostettu viime vuosina merkittävästi, ja tällä tekniikalla on toteutettu jo muutamia kohteita. Joustava eriytetty betonijulkisivurakenne, joka voi olla myös yhdistelmä rakenne, antaa uusia arkkitehtonisia ja valmistusteknisiä mahdollisuuksia. Tämän rakenteen osalta puuttui kuitenkin vielä suunnittelua palvelevaa perustietoa, jota tässä projektissa tutkittiin. Tässä projektissa keskityttiin betoniseen eriytettyyn julkisivuun. Yhdistelmä rakenteita eri materiaaleista ei tämän tutkimuksen koekohteissa ollut. Eriytettyä betonijulkisivua voidaan käyttää sekä uudis- että korjausrakennushankkeissa. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin vain uudisrakentamista.

## 2 ERIYTETTY BETONIJULKISIVU

### 2.1 ERIYTETTY RAKENNE

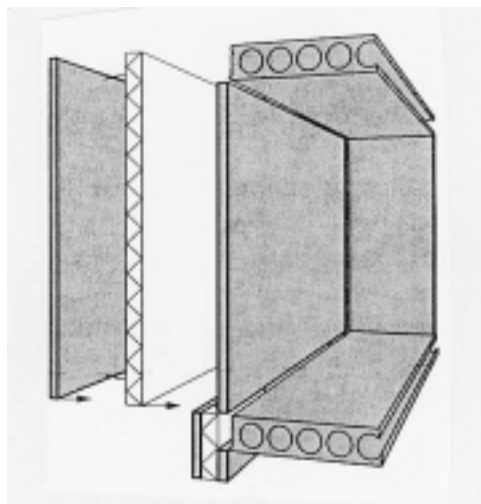
Eriytetty julkisivurakenne nykymuodossaan tuli käyttöön 1990-luvun alkupuolella, ensin Keski-Euroopassa ja myöhemmin Suomessakin. Eriyttämällä tarkoitetaan tässä yhteydessä sellaista ulkoseinän rakennustapaa, jossa seinä rakennetaan työmaalla kerroksittain siten, että vähintään sisä- ja ulkopinnan muodostavat levyt rakennetaan erikseen. Ulko- ja sisälevy eivät toimi yhdessä liittorakenteen tavoin /1/. Myös perinteinen kuorielementtirakenne on yksi eriytetyn julkisivurakenteen muoto.

Eriytetty rakenne voidaan toteuttaa kahdella eri tavalla. Yleensä seinärakenteen sisälevy asennetaan tai valetaan ensin ja julkisivu rakennetaan sen jälkeen. Tällöin julkisivu voidaan helposti toteuttaa käyttäen eri pintamateriaaleja. Tässä tutkimuksessa keskitytään tähän "sisälevy ensin" -rakenteeseen.

Eriytetyssä rakenteessa voidaan ulkolevy asentaa myös ensimmäiseksi, jolloin lämmöneriste ja sisäverhoilu voidaan toteuttaa suojatussa tilassa. Tällaista toteutusta on käytetty kuitenkin varsin harvoin.

Eriytettyä julkisivurakennetta, jossa ulko- ja sisälevy ovat eri materiaaleja, kutsutaan yhdistelmärakenteeksi.

Eriytetyn julkisivun periaate on kuvassa 1.



*Kuva 1. Eriytetty rakenne /1/.*

Eriytetyn betonijulkisivun etuina ja haittoina voidaan mainita seuraavat ominaisuudet:

Etuja ovat:



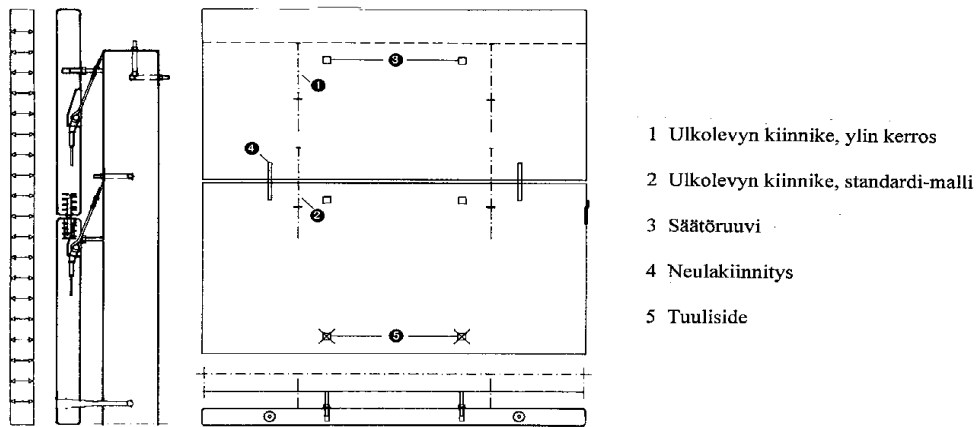
- Monissa tapauksissa ulkolevyelementtien saumajako ei ole riippuvainen kerrosten lattiatason sijainnista, mikä antaa uusia arkkitehtonisia vapauksia.
- Ulko- ja sisälevy rakenteellisesti erillään - rakenne pakkovoimista vapaa.
- Tarvittaessa tuulettuva rakenne; hyvä rakennusfysikaalinen toimivuus.
- Pienet mittatoleranssit ja elementtipainot - oma valmistusprosessi ulko- ja sisälevyillä.
- Yksinkertaiset muotit - oma valmistusprosessi ulko- ja sisälevyillä.
- Sisälevyn sisäpinta lähes maalivalmis - oma valmistusprosessi sisälevyillä.
- Pienet elementtipainot - elementtikoko voi olla suurempi.
- Pienistä toleransseista johtuen esim. puristettu kumiprofiilisauma mahdollinen (helppo asentaa ja vaihtaa sen käyttöään loputtua).
- Sauman tiiviysvaatimus ei tuulettuvan rakenteen takia niin ehdoton kuin sandwich-rakenteessa.
- Soveltuu erilaisista materiaaleista koostuvana hyvin erilaisten runkomateriaalien kanssa käytettäväksi ja julkisivujen pintojen yhdistelyyn.
- Ulkolevyn vaihto helpompaa kuin sandwich-rakenteella.
- Ulkolevy voidaan asentaa myös eri vaiheessa, vasta kun runko on valmis.
- Soveltuu sekä uudis- että korjausrakentamiseen.

Haittoja ovat:

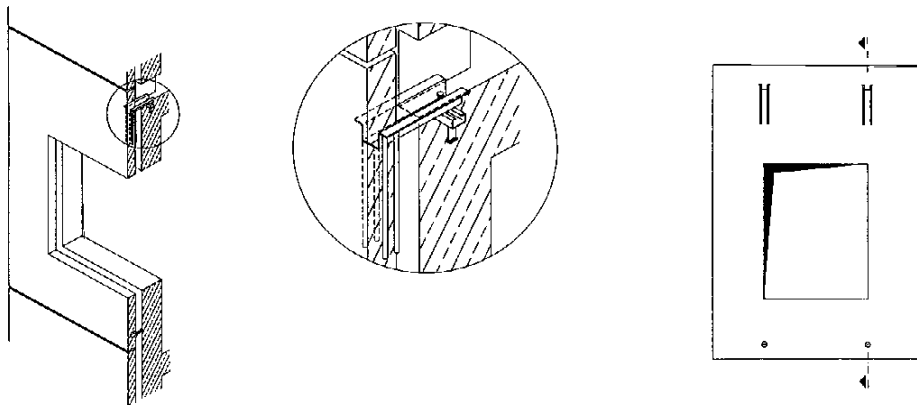
- Kokonaiskustannuksiltaan kalliimpi kuin perinteinen sandwich-rakenne; sisä- ja ulkolevyn käsittely ja asennus eri vaiheissa.
- Vaatii rungon valmistumisen vuodenajan huomioon ottamisen ja eristeen, kuorielementin asentamisen, ikkunoiden asentamisen sekä rakennuksen "vai-pan" sulkemisen yhteensovittamisen jo hankkeen alussa /2/.
- Paikalla rakentamisen mittatarkkuus ei ole samalla tasolla kuin elementtien mittatarkkuus ja ongelmia saattaa esiintyä siinä, että ulko- ja sisälevyn aukotukset eivät aina osu täsmälleen kohdakkain. Myös ulkolevyn suoruteen on kiinnitettävä erityistä huomiota sen suunnittelu- ja valmistusvaiheessa.
- Ulkolevyn kaikkiin suuntiin säädettävät kiinnikkeet melko kalliita (hinnat ovat tosin alentuneet).

## 2.2 ULKOMAISET ERIYTETYN BETONIJULKISIVUN RAKENTEET

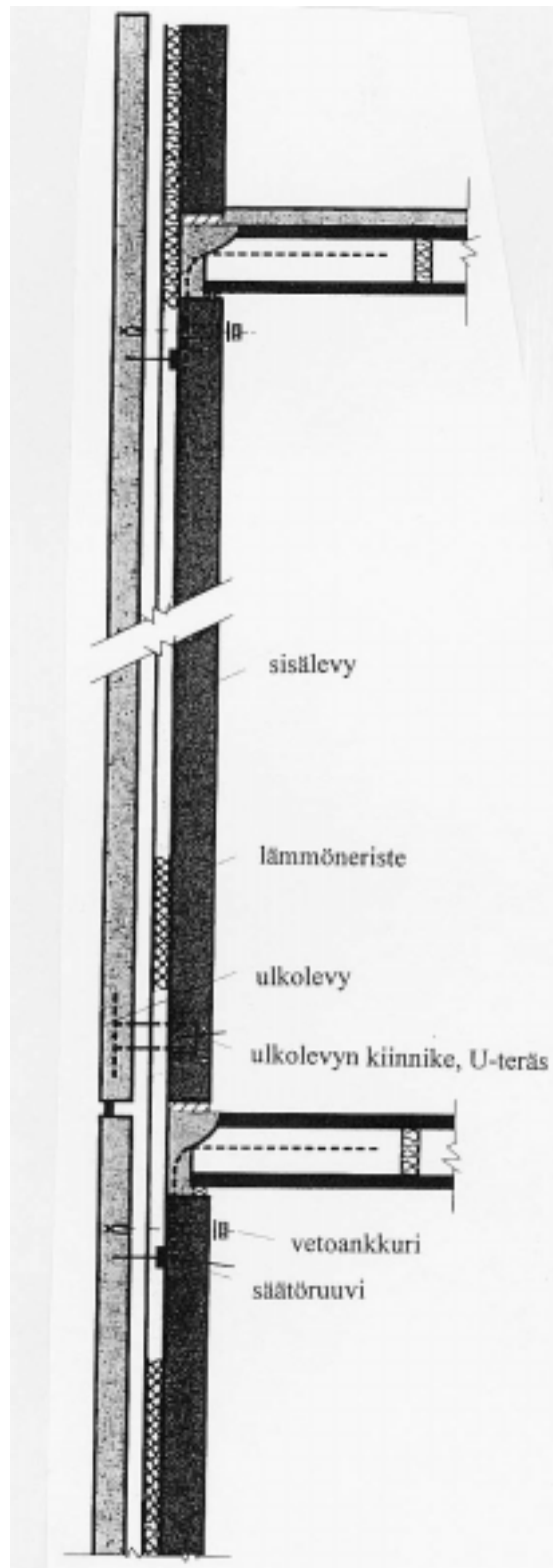
Ulkomaiset eriytetyt betonijulkisivut poikkeavat toisistaan lähinnä kiinnikkeiden osalta niin, että ulkolevyn pääkannatin on joko vinoside, esim. kuvat 2 ja 5, tai suora profiiliteräskannatin, kuvat 3 ja 4. Erityisesti Saksassa on jo pitkään kehitetty lukuisia erilaisia eriytetyn rakenteen kannattimia, jotka ovat monipuolisesti säädettäviä, ja niitä on sovellettu julkisivun kaikkiin eri osiin, kuva 4. Vinkokannattaja on helpompi säätää ja pienempi kylmäsilta, mutta se on kalliimpi kuin suora kiinnike. Pääkannattimen (-kannattimien) lisäksi tällaiseen ulkolevyn ripustusjärjestelmään kuuluvat ulkolevyn tuulisiteet.



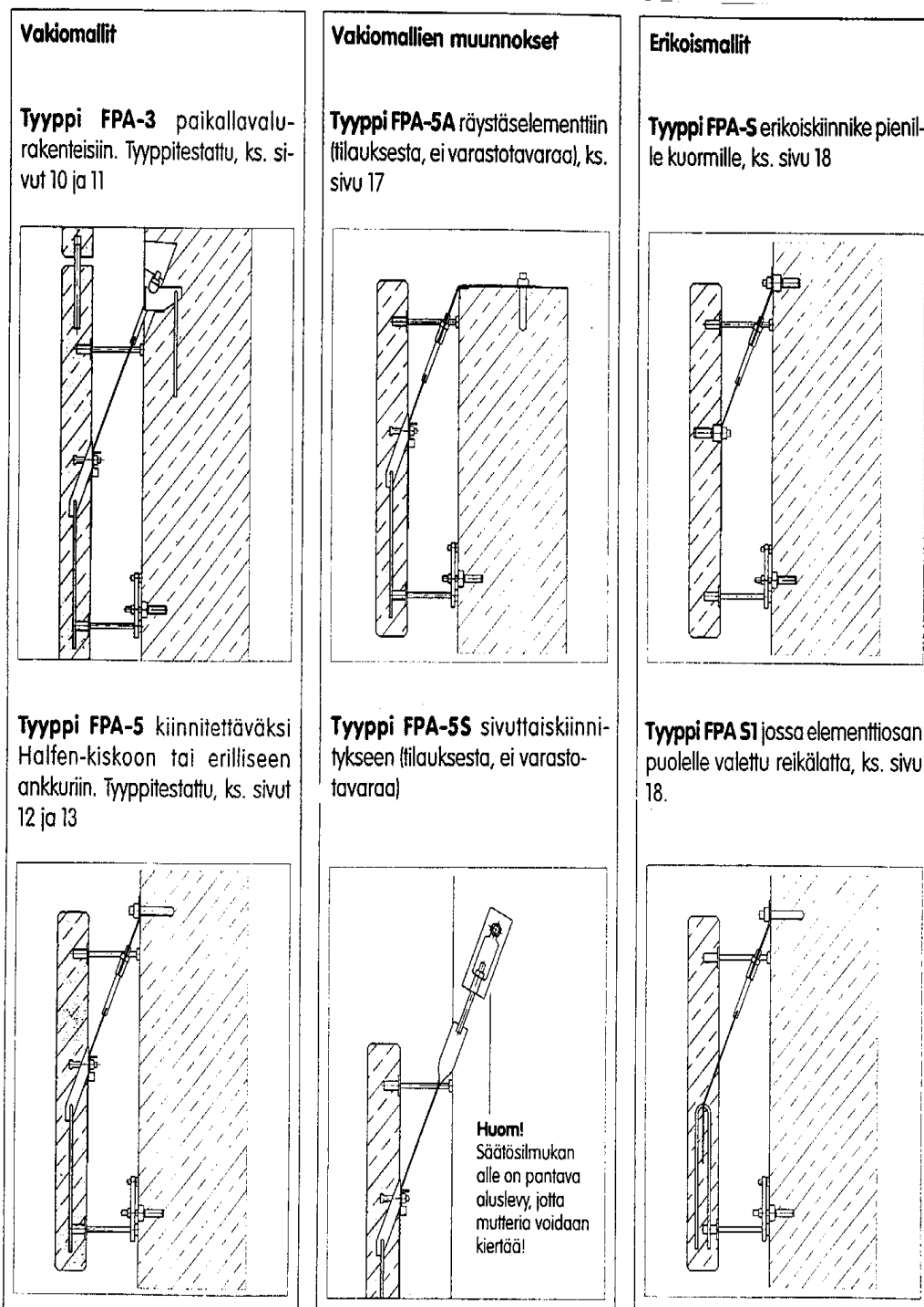
Kuva 2. Esimerkki saksalaisesta betoniulkolevyn ripustusjärjestelmästä /3/.



Kuva 3. Esimerkki 1 keskieurooppalaisesta ulkolevyn ripustusjärjestelmästä suoralla teräskannattimella /4/.



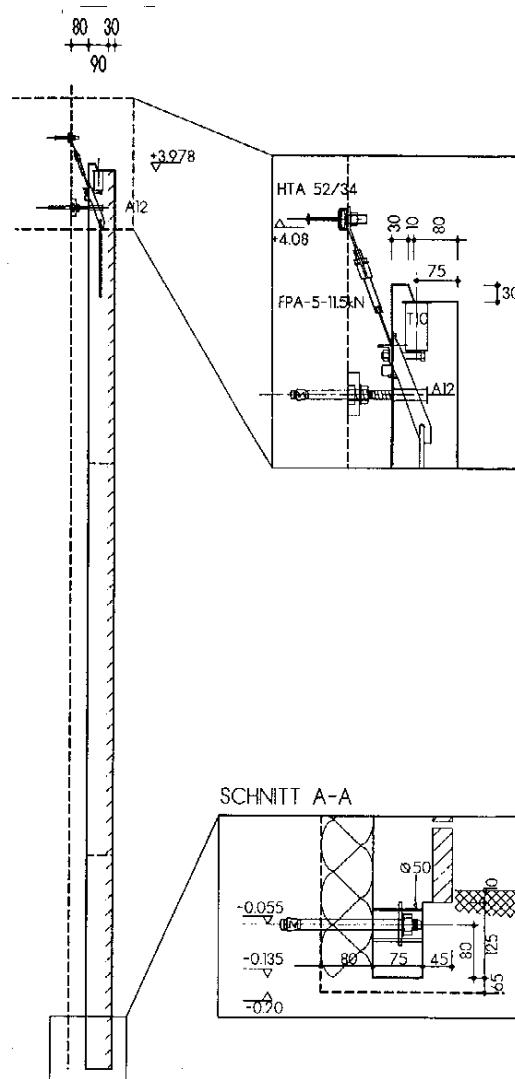
*Kuva 4. Esimerkki2 keskieurooppalaisesta ripustusjärjestelmästä suoralla kiinnikkeellä /5/.*



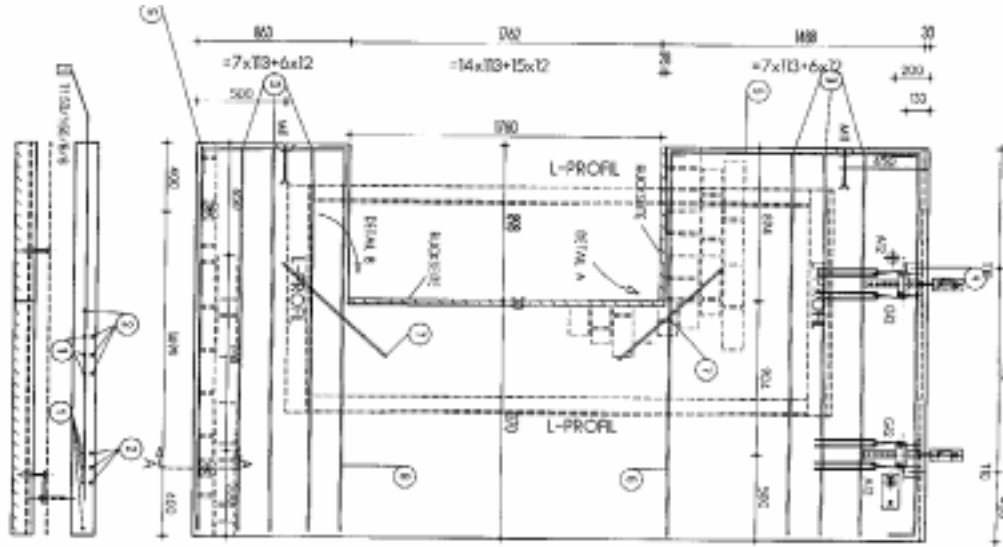
Kuva 5. Esimerkkejä saksalaisista ripustusjärjestelmistä /2/.

Aikaisemmin keskieurooppalaisissa eriytetyissä betonijulkisivuissa on käytetty tuuletusrakoa, mutta uusimmissa kohteissa on käytetty ko. rakennetta myös ilman tuuletusrakoa. Tällöin ulkoseinän paikalla valettu kantava sisälevy on noin 20 cm

paksu (noin 20 kerrosta korkeassa rakennuksessa) ja sen kautta ei juurikaan kulje vesihöyryä, kuva 6. Ko. rakenteen elementtikuva on kuvassa 7. Ulkomailla eriytetyn betonijulkisivun ulkolevy on yleensä teräsbetonilevy.



Kuva 6. Saksalainen uusi eriytetty betonijulkisivu ilman tuuletusrakoa.



Kuva 7. Saksalaisen eriytetyn betonijulkisivun ulkolevy.

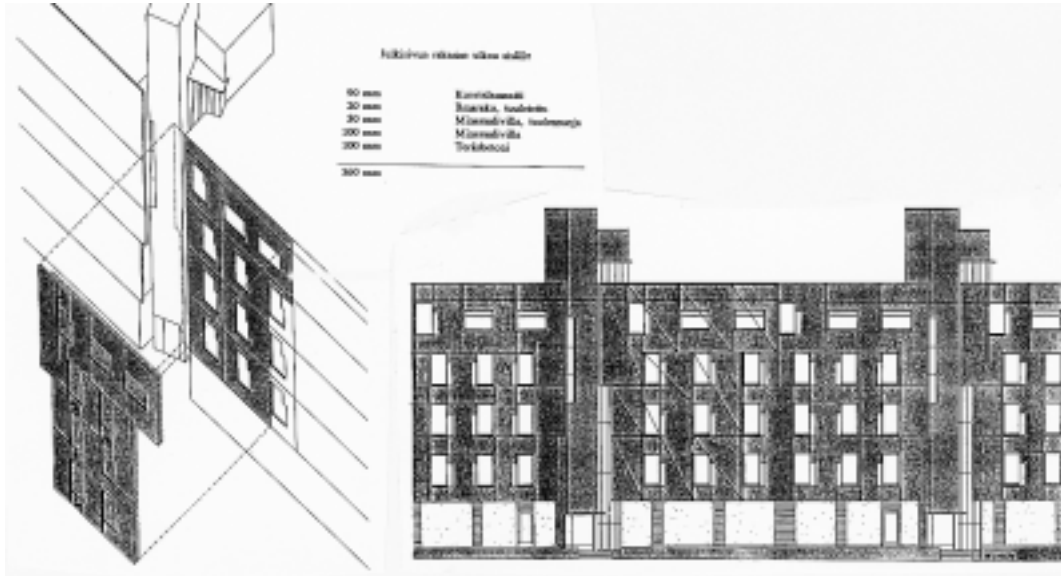
### 2.3 KOTIMAISET ERIYTETYN BETONIJULKISIVUN RAKENTEET

Perinteellisellä kuorielementtitekniikalla on Suomessa tehty eriytettyjä betonijulkisivurakenteita jo 1970-luvulta lähtien. Näiden rakenteiden suosio ei kasvanut kuitenkaan suureksi, koska sandwich-rakenne oli valtatekniikka.

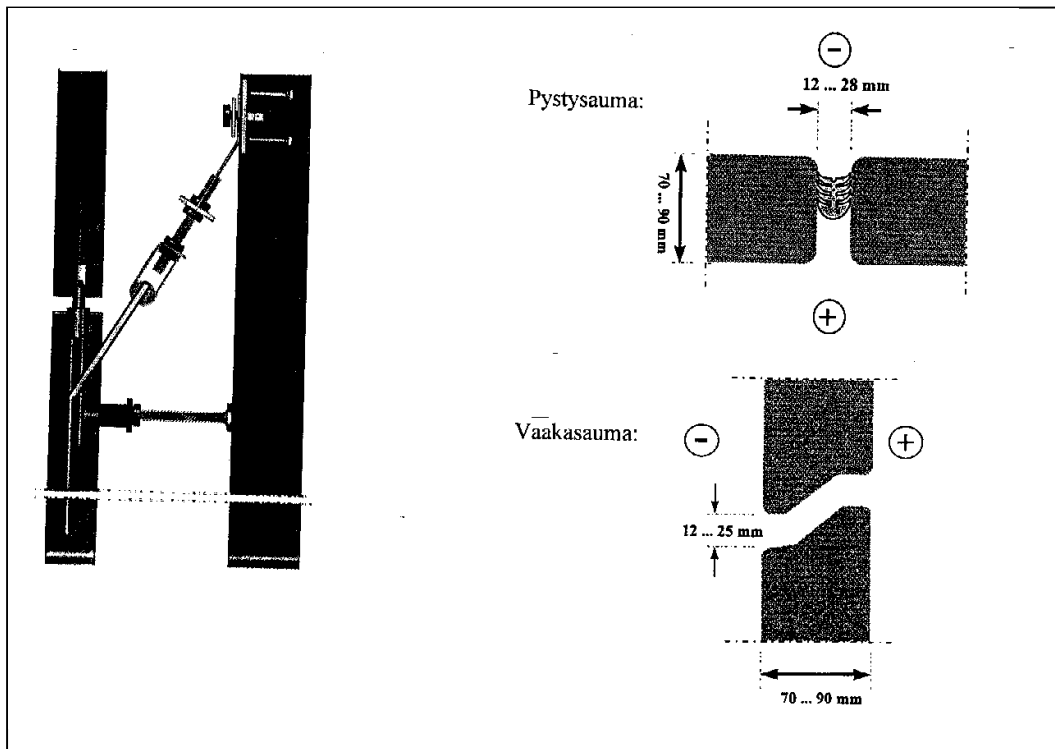
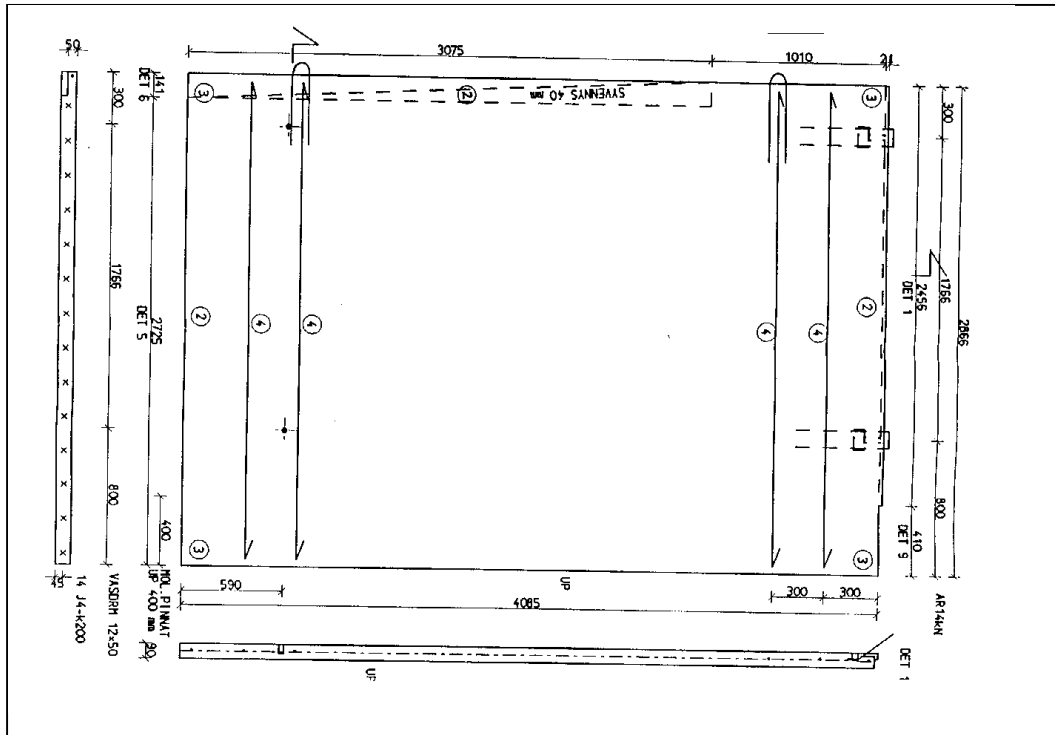
Erityisesti korjausrakentamisessa on viime vuosina käytetty eriytettynä betonijulkisivurakenteena betonipienlevyrakenteita, kuten betoniohutlevyä (tuotenimi Rati), muovibetoniohutlevyä (tuotenimi Steni), sellukuitubetonilevyä (tuotenimi Cemstone) ja jännitettyä betoniohutlevyä (tuotenimi Palazzo). Näitä pienlevyjä on käytetty myös uudisrakentamisessa. Nämä pienlevyt vaativat taakseen puu- tai metallirankarungon. Korjausrakentamisessa on käytetty myös teräsbetonisuurlevyjä.

Suomessa ja myös ulkomailla on käytössä myös useita erilaisia rankajärjestelmiä, joihin voidaan ripustaa rakenteen ulkopintaan joko betonisia tai jostain muusta materiaalista valmistettuja pienlevyjä.

Kehittyneitä eriytettyä betonijulkisivutekniikkaa edustaa asuinrakennuskohde KOy Ruusutorppa vuodelta 1996 Espoossa. Tämä rakennus oli toisena mittauskohteena tässä tutkimuksessa. Sen eriytetty julkisivurakenne on tehty osittain jännitetyistä betonilevyistä ja avosaumoin, kuvat 8 ja 9, ja osittain teräsbetonilevyistä, kuva 10. Tämä rakennus on ensimmäisiä tällä tekniikalla toteutettuja kohteita.

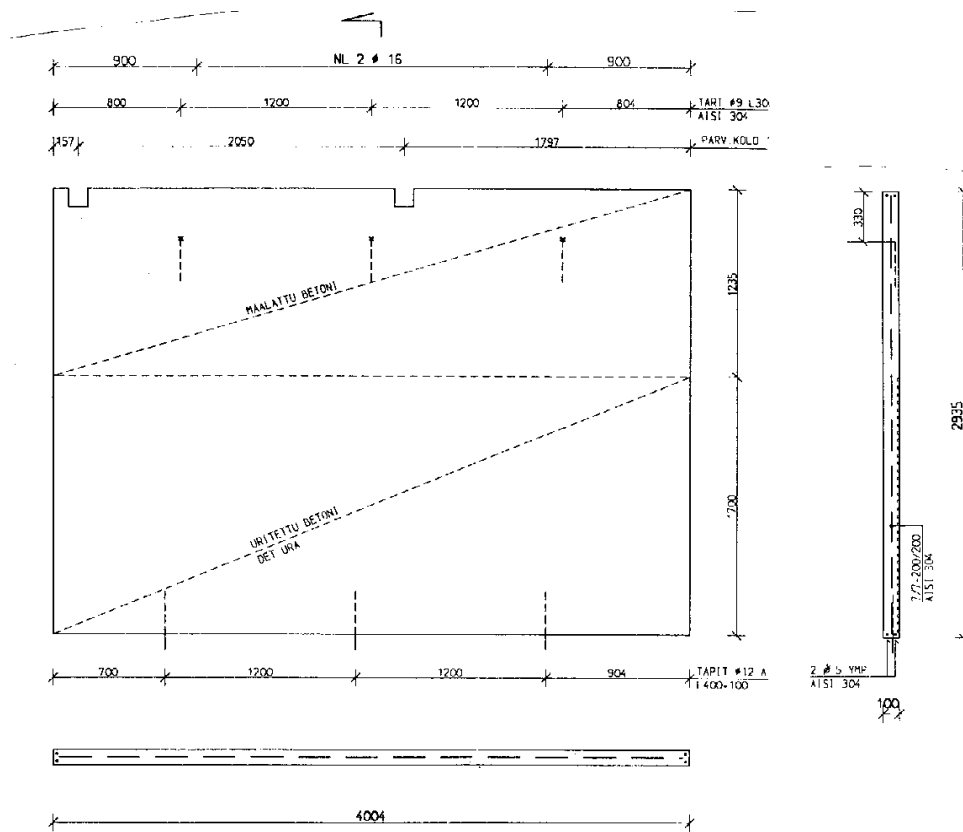


*Kuva 8. Eriytetty betonijulkisivurakenne, johon arkkitehti on varsin vapaasti voinut määritellä betoniulkolevyn saumojen paikat (KOy Ruusutorppa, Espoo).*



Kuva 9. Jännitetty ulkolevy ja sen kiinnitys sisälevyyn. Ulkolevyn jaotus ja aukotus on vapautettu sisälevystä riippumattomaksi.





Kuva 10. Eriytetyn betonijulkisivun teräsbetoniulkolevy; vain alin kerros (KOy Ruusutorppa, Espoo).

### 3 ERIYTETYN BETONIJULKISIVUN ASENNUSTEKNIikka

Eriytetyn betonijulkisivun asennustekniikkaa kotimaisissa toteutetuissa rakennuksissa tarkastellaan lähteessä /6/. Siinä selvitetään haastattelujen ja kirjallisuustutkimuksen pohjalta eriytetyn betonijulkisivun asennusprosessin eri vaiheiden (seinälevyjen kuljetuksen, varastoinnin, sisälevyelementin asennuksen, lämmöneristeen asennuksen, ulkolevyelementin asennuksen ja ikkunoiden asennuksen) ongelmat ja tehdään niille kehitysehdotuksia.

Tämän projektin yhteydessä tutustuttiin myös saksalaiseen eriytetyn betonijulkisivurakenteen asennustekniikkaan Potsdamissa. Tämä rakenne esiteltiin jo edellä kuvassa 6. Ko. seinärakenteen yläosa heti ulkolevyn asennuksen jälkeen on esitetty kuvassa 11 ja valmis seinärakenne näkyy kuvasta 12. Näistä kuvista näkyvät myös ulkolevyn ja lämmöneristeen asennuksessa tarvittavat asennustelineet rakennuksen ulkopuolella. Tuuletusrakoa ei jätetty ulkolevyn taakse tässä kohteessa. Ulkolevyn asennus rakennustelineen ja rakennuksen väliin on melko hankalaa. Ulkolevyn asennus vaati 3 - 4 henkilöä sujuakseen hyvin. Tämän ryhmän asennusnopeus oli yksi levy n. 20 minuutissa.

Suomessa ja Saksassa oli erityisesti seuraavia keskeisiä ja yhteisiä ongelmia eriytetyn betonijulkisivun asennuksessa:

- Sisä- ja ulkolevyn aukotukset eivät aina osu samoille kohdille; tällöin joudutaan tekemään rappauspaukkauksia tai pyydetään ikkunatehdasta muuttamaan ikkunan kokoa.
- Käyrästynyt ulkolevy on joskus tuottanut ongelmia asennusvaiheessa.
- Lämmöneristeiden kastumismahdollisuus melko suuri.

Näistä ensimmäiseen ongelmaan parannusehdotuksena on toleranssivaatimusten kiristäminen eriytetyn ulkoseinärakenteen (erityisesti sisälevyn) osalta. Lisäksi toteutus suunnitelmissa tulee esittää ulkoseinälevyjen (sisä- ja ulkolevyjen) asennusjärjestys niin, että erillisinä työvaiheina asennettavien sisä- ja ulkolevyjen toleranssien kumulatiivinen vaikutus saadaan samaan suuntaan. Tällöin riski esim. aukotusten ristikkäisyydelle pienenee.

Toisessa ongelmassa on kiinnitettävä erityistä huomiota jo suunnittelussa ja elementtitehtaalla valmistusvaiheessa siihen, ettei julkisivulevy käyristy asennustyötä haittaavasti. Käyristymistä voivat aiheuttaa mm. betonimassan erottuminen (epähomogeenisuus), pinnoitteen ja betonimassan erilaiset lämpö- ja kosteusliikkeet, liiallinen lämpökäsittely valmistusvaiheessa ja väärä varastointitapa.

Kolmanteen kohtaan esitetään julkisivun yläosan suojausta muovilla ja käytettäväksi lämmöneristettä, jonka pinnoite on hengittävä mutta kosteutta pitävä. Asennustyössä edetään niin, ettei suuria alueita lämmöneristeitä jää kosteudelle alttiiksi.



*Kuva 11. Saksalaisen eriytetyn betonijulkisivun ulkolevyn yläpään kiinnitys heti asennuksen jälkeen.*



*Kuva 12. Saksalainen eriytetty julkisivurakenne heti ulkolevyn asennuksen jälkeen. Tässä kohteessa ei julkisivussa ole tuuletusrakoa eikä avosaumojia.*

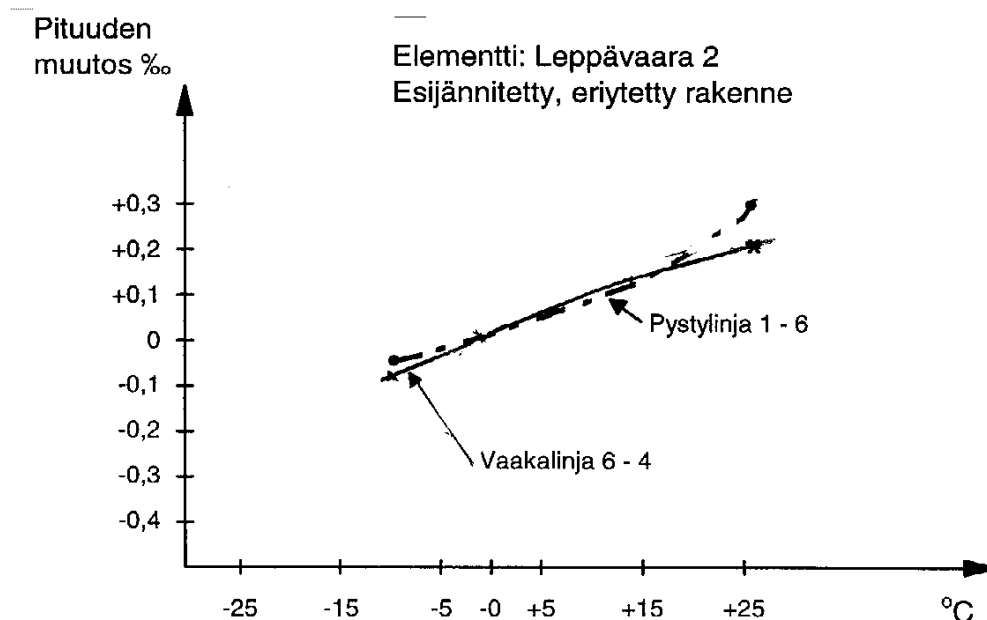
## 4 BETONIJULKISIVUJEN MITTAUKSET

### 4.1 MITTAUKSET ERIYTETYSTÄ BETONIJULKISIVURAKENTEESTA

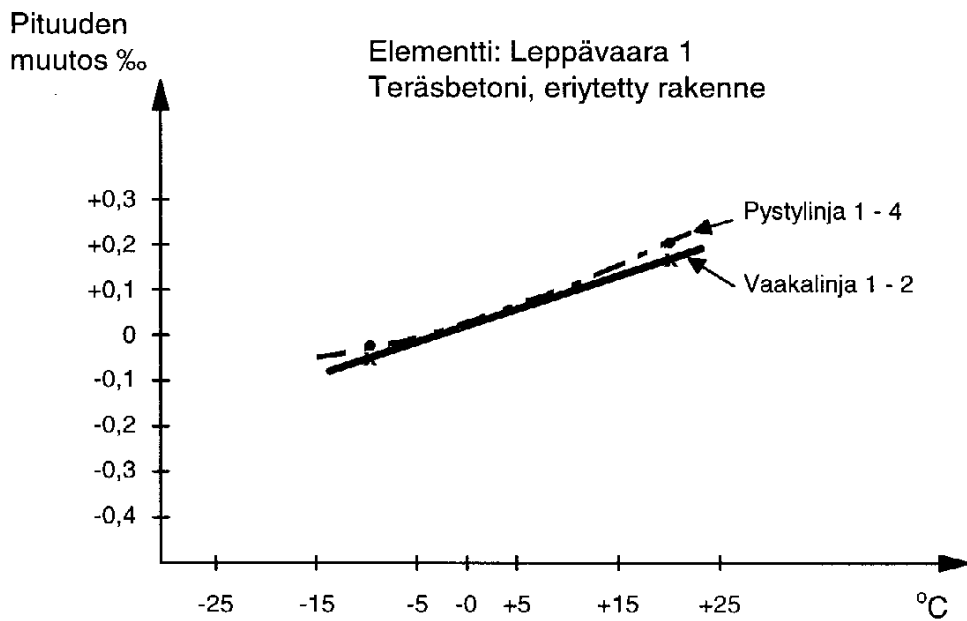
Tässä tutkimuksessa mitattiin KOy Ruusutorpassa Espoon Leppävaarassa asuin-kerrostalon ulkoseinästä yhden jännitetyn, kuva 9, ja yhden teräsbetonisen, kuva 10, eriytetyn betonijulkisivurakenteen muodonmuutoksia noin vuoden aikana. Ko. rakennus oli mittausten alkaessa vuoden 1996 lopulla puolen vuoden ikäinen. Tavoitteena oli tehdä mittaukset heti aivan uudessa rakennuksessa ja mieluummin jo elementtitehtaalta lähtien, mutta tähän ei ollut mahdollisuuksia tässä hankkeessa.

Tutkittavista julkisivuelementeistä oli jännitetty levy rakennuksen itäisellä ulkoseinällä ja teräsbetoninen levy pohjoisella ulkoseinällä. Levyjen ulkopintaan asennettiin kiinteät mittauspisteet, ks. liite 1, joiden avulla mitattiin levyn pituuden muutokset ja kaareutuminen. Samalla mitattiin ulkolämpötila ja ilman suhteellinen kosteus levyn edessä. Mittaukset tehtiin kolmessa vaiheessa: n. 0:n, +20:n ja -20:n °C lämpötiloissa, jotta saatiin selville näiden betonijulkisivujen pitkäaikaiset muodonmuutokset vuoden aikana. Lyhytaikaisia muodonmuutoksia voi tapahtua äkillisesti esimerkiksi kesällä lämpötilan laskiessa kylmän sateen (raekuuron) vaikutuksesta.

Kuvassa 13 on esitetty graafisesti osa liitteen 1 pituudenmuutostuloksista koskien em. jännitettyä levyä ja kuvassa 14 vastaavasti koskien em. teräsbetonista eriytettyä betonijulkisivurakennetta.



Kuva 13. Eriytetyn rakenteen jännitetyn ulkolevyn pituuden muutoksia eri lämpötiloissa mittausjakson aikana. Teoreettinen pituuden kokonaismuutos ko. lämpötilavälillä on noin 0,3 ‰.



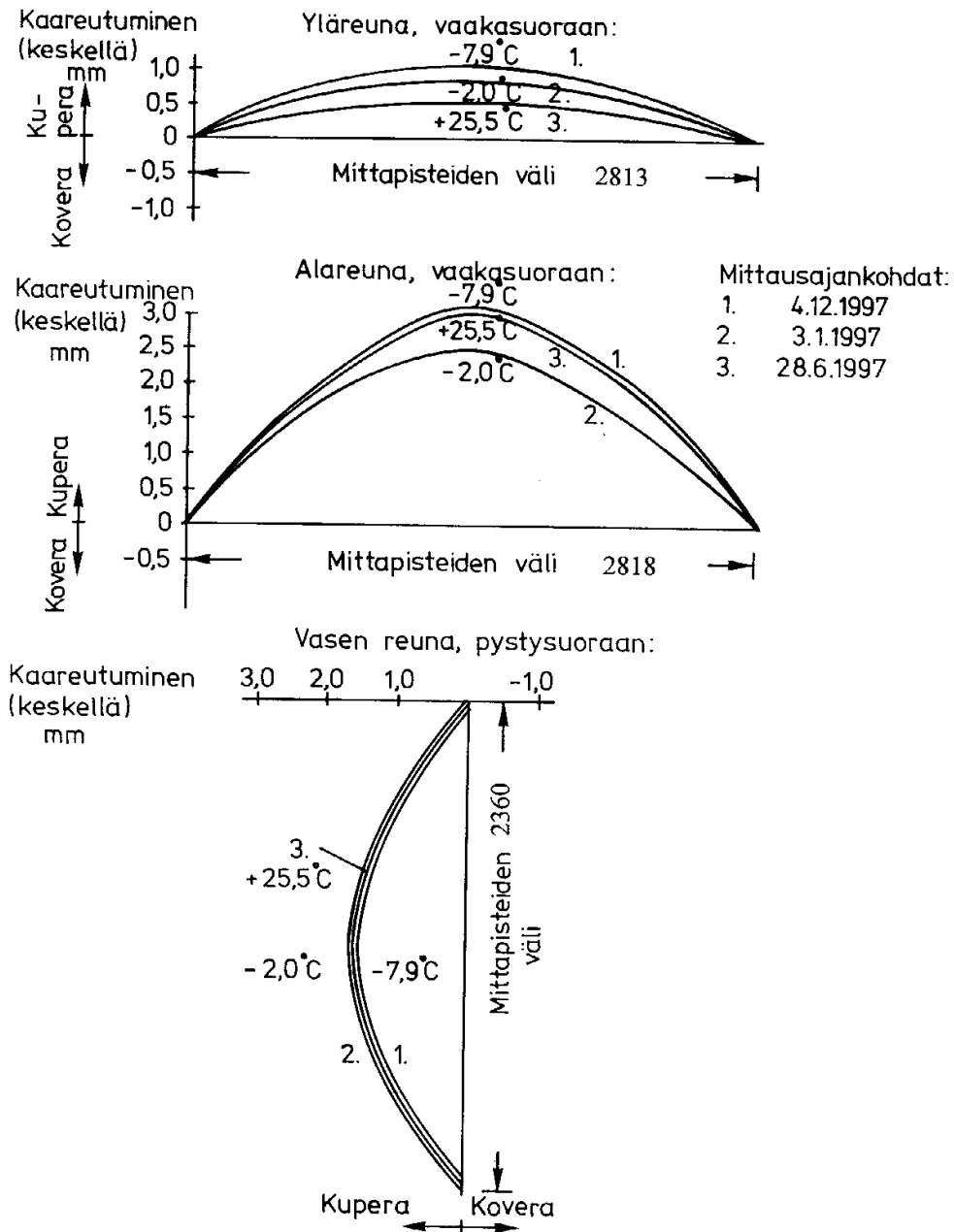
*Kuva 14. Eriytetyn rakenteen teräsbetonisen ulkolevyn pituuden muutoksia eri lämpötiloissa mittausjakson aikana. Teoreettinen pituuden kokonaisuutos ko. lämpötilavälillä on noin 0,3 %.*

Kuvissa 15 ja 16 on esitetty graafisesti mittauksissa olleiden eriytettyjen elementtien kaarevuuden muutoksia.

Mittausmenetelmänä kaikilla julkisivupinnoilla käytettiin mittalankoja (kaareutuminen), mittanauhaa (lämpölaajenemiskerroin tunnettu ja otettu huomioon tuloksissa) yhdistettynä tarkkuusmittalaitteeseen ja kiinteitä mittapisteitä.

Elementti: Leppävaara 2

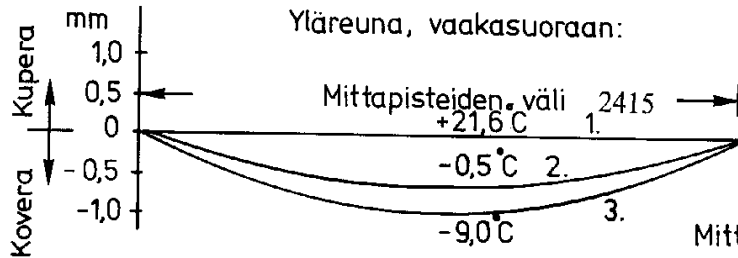
Jännitetty, eriytetty rakenne



Kuva 15. Eriytetyn jännitetyn ulkolevyn kaarevuuksia eri lämpötiloissa.

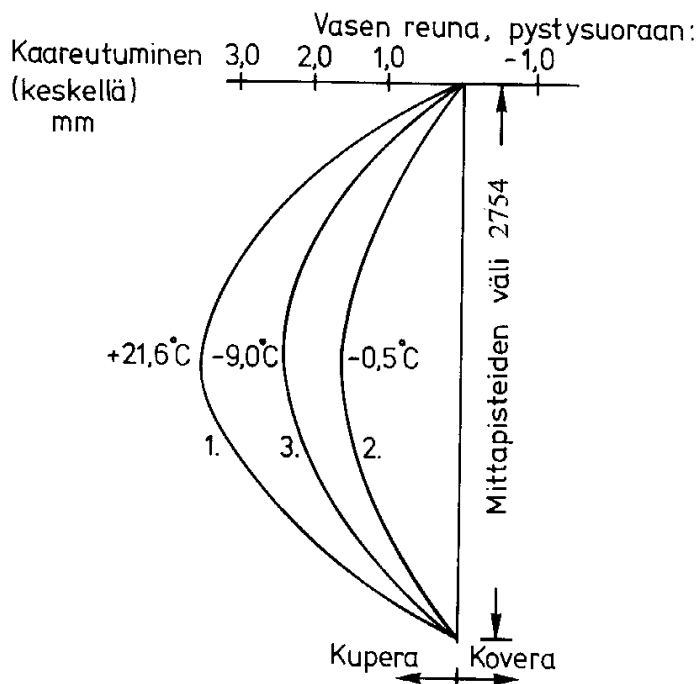
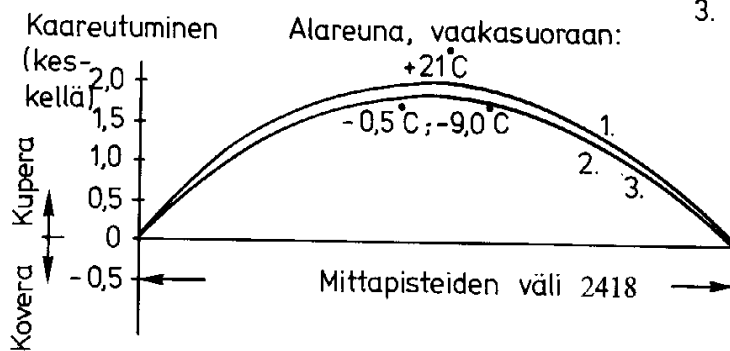
Elementti: Leppävaara 1

Kaareutuminen Teräsbetonia, eriytetty rakenne  
(keskellä)



Mittausajankohdat:

1. 28.6.1997
2. 27.12.1996
3. 20.3.1997



Kuva 16. Eriytetyn teräsbetonisen levyn kaarevuuksia eri lämpötiloissa.

## 4.2 VERTAILUMITTAUKSET BETONISANDWICH-JULKISIVURAKENTEESTA

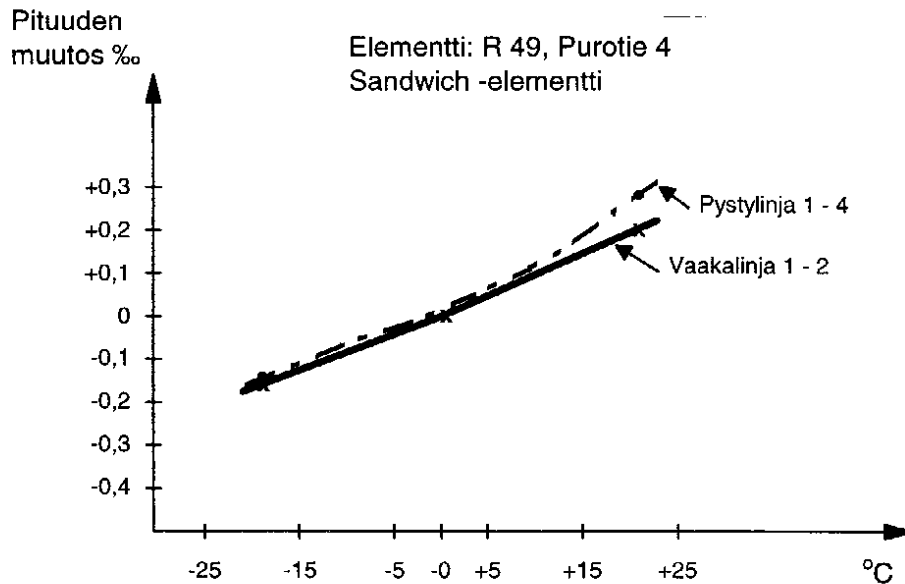
Tavanomaisesta betonisandwich-julkisivurakenteesta, kuvat 17 ja 18, kerättiin vertailevaa mittaustietoa tämän rakenteen muodonmuutoksista Helsingin Pitäjänmäeltä KOy Purotie 4:stä, keväällä 1997 valmistuneesta asuinkerrostalosta. Rakennuksen lämmitys oli aloitettu vuoden 1997 alussa ja sisätyöt jatkuivat huhtikuuhun 1997 asti. Mittauksia tehtiin kolmesta (kaksi kaakkoon ja yksi koilliseen) julkisivuelementistä. Mittaukset aloitettiin jo talvella 1997 ja ne tehtiin kuten KOy Ruusutorpassakin. Tämän lisäksi tehtiin yhdestä julkisivuelementistä Demec-mittalaitteella pituudenmuutosmittaukset vuorokauden aikana neljän tunnin välein keväällä 1997, kun vuorokautinen lämpötilanvaihtelu oli laajaa ja 0 °C:n molemmin puolin. Näin saatiin kuva lämpötilaerojen aiheuttamista muodonmuutoksista ko. ulkolevyyn yhden vuorokauden aikana, liite 1 s. Pituuden maksimimuutos oli tällöin 0,28 %, mikä 3 m:n pituisessa elementissä merkitsee 0,84 mm:ä.

Teknillisen korkeakoulun talonrakennustekniikan laboratorio teki samanaikaisesti toiseen tutkimusprojektiin lämpötila- ja kosteusmittauksia Purotien kohteen samoista kahdesta kaakkoon sijainneesta julkisivuelementistä, liite 2. Näistä tuloksista voi todeta rakennekosteuden poistumisen julkisivuelementin kautta rakennuksen ensimmäisen lämmityskauden aikana. Tuuletusurattomassa rakenteessa ulkoseinärakenteen kuivuminen kestää jopa useita vuosia, uritetulla lämmöneristeellä tai tuuletusraon kanssa vastaavasti vähemmän aikaa. Tällä vaihtelulla on ulkolevyn muodonmuutoksiin rakenteen kutistumisen merkitystä korostava vaikutus. KOy Ruusutorpassa kosteuden poistuminen oli mittausten alkaessa jo osittain ohi, ja siellä ulkoseinän muodonmuutokset aiheutuivat selkeämmin lämpötilamuutosten vaikutuksesta. Julkisivurakenteen tuuletusraolla on tähän myös vaikutusta.





Kuvassa 19 on esitetty graafisesti osa liitteen 1 pituudenmuutostuloksista em. betonisandwich-julkisivurakenteelle. Muissa mittauksissa saatiin suuruusluokaltaan vastaavia tuloksia.

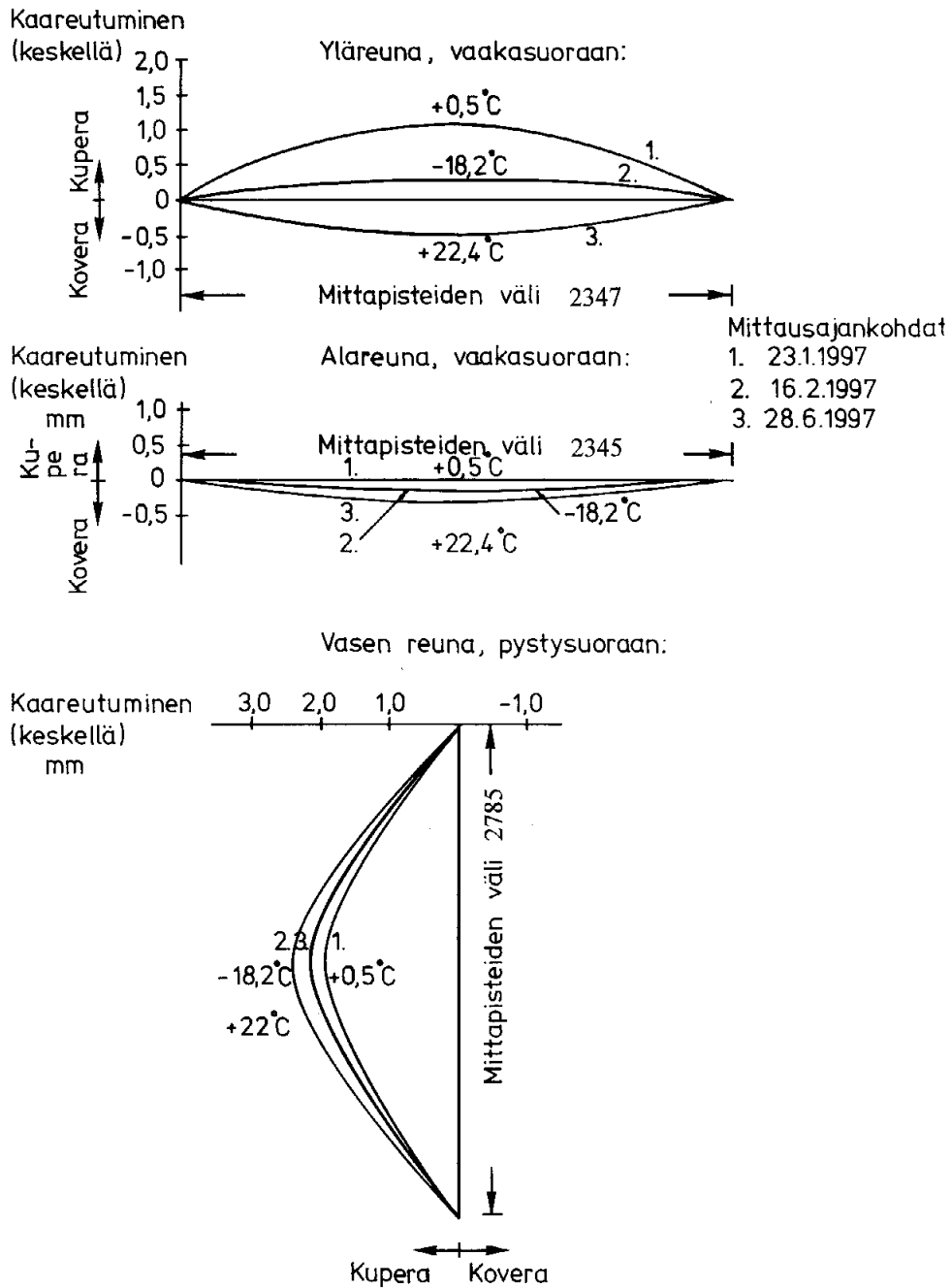


Kuva 19. Betonisandwich-rakenteen ulkolevyn pituuden muutoksia eri lämpötiloissa mittausjakson aikana. Teoreettinen pituuden kokonaismuutos ko. lämpötilavälillä on noin 0,4 %.

Kuvassa 20 on esitetty graafisesti betonisandwich-rakenteen ulkolevyn kaareutumisen muutoksia.

Elementti: Purotie 4, R49

Sandwich-rakenne



Kuva 20. Betonisandwich-rakenteen ulkolevyn kaareutuminen eri lämpötiloissa.

## 5 ERIYTETYN RAKENTEEN MUODONMUUTOSLASKELMAT

Eriytetyssä rakenteessa ulkolevy pääsee liikkumaan varsin vapaasti, kun käytetään ns. keskitettyjä kiinnikkeitä, verrattuna sandwich-elementin ansassiteisiin. Kun ulkolevyn kaareutumista ei ole estetty kiinnikkeillä, ei esimerkiksi lämpötilaeroista aiheutuva kaareutuminen muodosta rakenteeseen jännityksiä. Rakenteen keskeisillä jännelangoilla tai teräsverkolla ei ole tällöin olennaista vaikutusta kaareutumiseen.

Seuraavassa on laskettu ns. pakkovoimista tarkasteltavaan ulkolevyyn aiheutuvia muodonmuutoksia. Tällöin on oletettu, että ko. julkisivulevyt eivät ole käyristyneet jo valmistusvaiheessa elementtitehtaalla esimerkiksi liiallisen lämpökäsittelyn tai väärän varastoinnin takia.

Jos levyn jännelangat eivät ole levyn poikkileikkauksessa keskeisesti, ne aiheuttavat levyn käyristymistä. Betonin pitkäaikainen muodonmuutosviruma ei ole mukana laskelmissa.

Laskelmassa on tarkasteltu esimerkinomaisesti 3 000 mm pitkää ja 90 mm paksua (koekohteessa) julkisivulevyä, joka on homogeenista betonia ja jossa ei ole erillistä pinnoitetta (kuten mitatuissakin kohteissa).

### Levyjen pituudenmuutokset

Lämpölaajeneminen:

$$\Delta l = \alpha l_o \Delta T, \text{ missä}$$

$$\alpha = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$$

$$l_o = 3\,000 \text{ mm}$$

$$\Delta T = 60 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\Rightarrow \Delta l = 1,8 \text{ mm}$$

Kutistuminen:

$$\epsilon_{cs} = k_{sh} \epsilon_{cso}, \text{ missä}$$

$$\epsilon_{cso} = 0,25 \text{ } \text{‰}, \text{ kun suhteellinen kosteus on } 70 \text{ } \%$$

$$0,45 \text{ } \text{‰}, \text{ kun suhteellinen kosteus on } 40 \text{ } \%$$

$$\Rightarrow h_e = 87,3 \Rightarrow k_{sh} = 1,00, \text{ jos } l = 3\,000 \text{ mm} \Rightarrow \text{kutistuma on } 0,00045 \times 3\,000 \text{ mm} = 1,35 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow \text{Max. pituudenmuutos on } 1,8 \text{ mm} + 1,35 \text{ mm} = 3,15 \text{ mm.}$$

## Kaareutuminen

Ulkolevyn kaareutuminen kuivumiskutistumaerosta levyn eri pinnoissa on lähellä nolaa, kun levyn materiaali on homogeenista eikä käytetä pinnoitteita, kuten klinkkerilaatoitusta (näin oli mitattavissa kohteissa).

Lämpötilaeroksi ulkolevyn eri pinnoissa on oletettu 25 °C.

$$\Rightarrow \Delta l = 0,75 \text{ mm.}$$

$$\Rightarrow a = \epsilon L^2/8d = 3,13 \text{ mm, missä}$$

a = kaareutuminen

L = elementin pituus (3 000 mm)

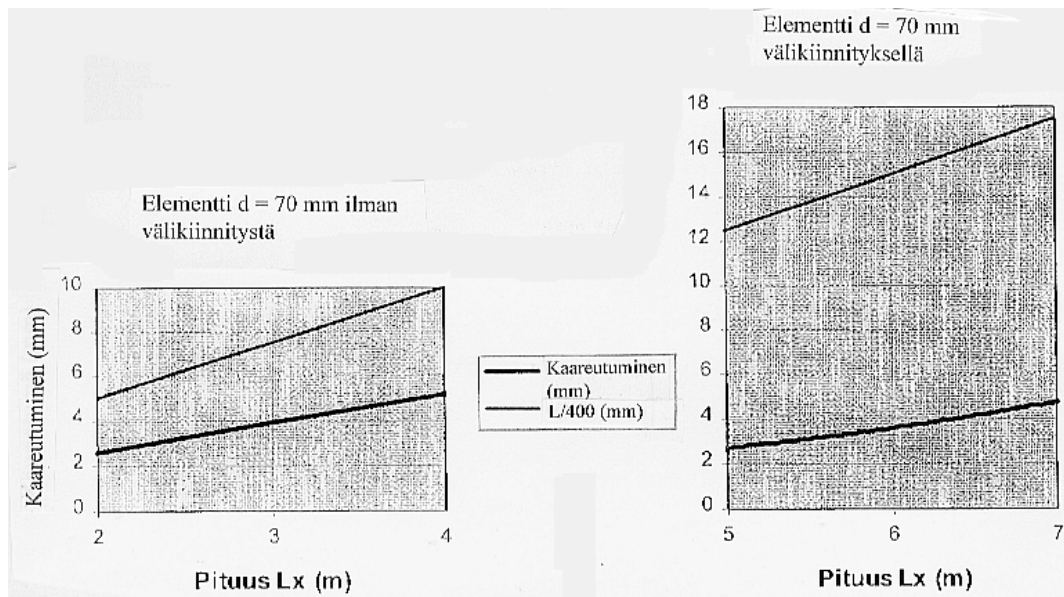
d = elementin paksuus (90 mm)

$$\epsilon = \epsilon_t + \epsilon_s$$

$\epsilon_t$  = muodonmuutos lämpötilaeroista eri pintojen välillä

$\epsilon_s$  = kutistumaero eri pintojen välillä.

Kuvassa 21 on esitetty jännitetyn ulkolevyn teoreettinen kaareutuminen valmistajalta saatujen tietojen perusteella, kun levyn paksuus  $d = 70 \text{ mm}$ . Pitkät ( $> 4 \text{ m}$ ) julkisivulevyt tuetaan välikiinnityksellä.



Kuva 21. Jännitetyn ulkolevyn ( $d = 70 \text{ mm}$ ) kaareutumisen arviointi, a) ilman välikiinnitystä, b) välikiinnityksellä.

## 6 MITTAUSTULOSTEN VERTAILU MUODONMUUTOSLASKELMIIN

Tarkasteltujen julkisivulevyjen pituudenmuutokset ovat edellisen kohdan kuvien perusteella lähes lineaarisia, ja eri rakenteiden erot ovat varsin pienet sekä vaakaeittä pystysuunnassa. Tulokset noudattavat kohdassa 5 esitettyjä levyjen pituudenmuutosten peruskaavoja.

Levyjen kaareutumisesta voidaan todeta seuraavia erityisominaisuuksia:

1. Eriytetty jännitetty levy
  - Kaareutuminen on pystysuunnassa lähes vakio.
  - Kaareutuminen noudattaa kuvan 21 arvoja (on kuitenkin otettava huomioon tämän luvun lopputeksti).
2. Eriytetty teräsbetonilevy
  - Kaareutuminen pystysuunnassa kasvaa ajan funktiona (elementti tuettu alareunasta; omapaino vaikuttaa kasvattaen kaareutumista).
  - Noudattaa sivulla 29 kaareutumisen laskennalle annettua kaavaa vaakasuunnassa.
3. Betonisandwich-rakenne
  - Kaareutuminen muuttuu ajan funktiona vaakasuunnassa (rakennekosteus poistui tässä kohteessa mittausten aikana).
  - Kaareutuminen pysyy lähes vakiona pystysuunnassa (sideansaat estävät kaareutumista tehokkaasti tässä suunnassa).
  - Kaareutuminen vaakasuunnassa on sivun 29 kaavalla laskettua pienempää, 20 - 30 % (rakennekosteuden poistuminen mitatussa elementissä vaikuttamassa).

Tuloksia tarkasteltaessa on otettava huomioon, että mittauksissa oli vain yksi jännitetty ja teräsbetoninen eriytetty rakenne. Käytetyllä mittausmenetelmällä ei saatu selville ulkolevyn liikettä kantavan sisälevyn suhteen, vaan ulkolevyn kaareutuminen ja sen muutokset. Muodonmuutosten mittausjakso oli noin yksi vuosi, eli muodonmuutoksista tätä pidemmältä ajanjaksolta ei nyt saatu tietoa. Eriytetyn jännitetyn levyn mittauksissa ei päästy kovinkaan alhaisiin lämpötiloihin (vain -9,4 °C). Huomattavasti alhaisempi lämpötila voisi tuoda muutoksia tämän rakenteen muodonmuutoksiin.

Projektin lopulla tehtiin vielä mittaus eriytetyn jännitetyn levyn osalta -7,9 °C lämpötilassa ja ilman kosteuden ollessa saman kuin edellisessä mittauksessa lähes samassa lämpötilassa noin puoli vuotta aikaisemmin. Tällöin voitiin todeta sekä tämän rakenteen pituuden että kaarevuuden jatkaneen kasvuaan, eli mittaukset vielä pidemmältäkin ajanjaksolta (2 - 3 vuotta) toisivat lisätietoa ko. rakenteen käyttäytymisestä. Koska jännitetyn levyn takana oli avoin tuuletusrako ja sen vaakasaumat olivat avoimet, rakennekosteus on päässyt jo varsin hyvin poistumaan. Tällöin syy näihin muodonmuutoksiin löytynee ulkolevyn esijännityksestä.

# 7 ERIYTETYN BETONIJULKISIVUN RAKENTEEN JA KIINNIKKEIDEN KEHITYSEHDOTUKSET

## 7.1 JULKISIVURAKENTEEN KEHITYSEHDOTUKSET

Edellä luvussa 2 on esitelty nykyiset eriytetyt betonijulkisivuratkaisut erityisesti, kun rakenteen sisälevy tehdään ensin. Samoin niiden ongelmia on tullut esiin jo edelläkin. Kuvan 9 esijännitetyn eriytetyt betonijulkisivun merkittäviä ongelmia tai rajoitettuja ominaisuuksia ovat:

- ulkopinnan profiloinnin ja erilaisten ulkopintavaihtoehtojen rajoitetut mahdollisuudet jännitetyn rakenteen vuoksi,
- avosaumojen toimivuus Suomessa erityisesti talviolosuhteissa, kun lumi tuiskuaa ja kasautuu julkisivulevyn taakse tuuletusrakoon erityisesti rakennuksen alimpaan kerrokseen,
- kallis kokonaishinta,
- kalliit (hintakehitys ollut laskeva) ja elementin asentamisessa työläät kiinnikkeet; asennustekniikkaan liittyvät muut rakenteista aiheutuvat ongelmat on käsitelty jo kohdassa 3,
- lämmöneristeiden kastumismahdollisuus suuri asennustyön aikana työmaalla,
- purkutekniikkaakin on kehitettävä ja otettava huomioon uudisrakenteen suunnittelussa,
- tarvitaan selkeät suunnitteluohjeet (digitaalisessakin muodossa),
- toleranssiongelmat sisä- ja ulkolevyn erilaisesta valmistustekniikasta johtuen,
- ulkolevyn kaareutumisen estämisen merkitys korostuu kaikissa vaiheissa.

Seuraavassa esitetään näihin ongelmiin ratkaisumahdollisuuksia. Kiinnikkeiden kehitysmahdollisuuksia tarkastellaan erityisesti kohdassa 7.2.

Esijännitystekniikka rajoittaa ulkolevyn erilaisia ulkopintaratkaisuja erityisesti, jos elementtisarjat ovat lyhyitä. Jos tarvitaan voimakkaasti profiloitua julkisivua, on teräsbetoninen ulkolevy parempi, joskin tällöin levyn pituus jää lyhyemmäksi ja ulkopinnan halkeiluriski on hieman suurempi. Betonin lujuuden teräsbetonisesakin ulkolevyssä on säilyvyyden kannalta tarpeen olla varsin korkea, kuten K40 - K45.

Avosaumat ovat ulkoseinärakenteen tuuletuksen kannalta edullisia, jos huolehditaan siitä, ettei niiden kautta keräänny ulkolevyn taakse erityisesti alimpaan kerrokseen talvella vaakasuoraan pyryttävää lunta. Tämän voi estää asentamalla avoimeen vaakasaumaan muovi- tai metalliverkko (ruostumaton), joka estää lumihiuutaleiden kulun ulkolevyn taakse. Tuuletusrakoa ulkolevyn takana ei välttämättä tarvita, jos rakenteen betoninen sisälevy on niin massiivinen, esim. 20 cm:n paksuinen, ettei sen läpi kulkeudu haitallisesti kosteutta rakennekosteuden poistuttua.

Eriytetyn rakenteen kallis kokonaishinta on hinta sen arkkitehtonisista eduista (vapaasaumojen sijoittelusta). Tätä hintaa voidaan jossain määrin pienentää erityisesti nopeuttamalla ulkolevyn asennusta.

Lämmöneristeiden kastumisen estämiseen on esitetty parannusmahdollisuuksia jo luvussa 3.

Eriytetty betonijulkisivu on periaatteessa purettavissa silloin, kun siinä on käytetty säädettäviä pulttitekniikkaan perustuvia kiinnikkeitä. Tällä on merkitystä ulkolevyn uusimisen tullessa ajankohtaiseksi tai koko rakennusta purettaessa. Purettavuuskysymykset tulee ottaa mukaan myös tämän rakenteen suunnitteluohjeisiin.

Suunnitteluohjeita tälle rakenteelle laaditaan parhaillaan. Yhtenäiset suunnitteluohjeet ovat välttämättömät eriytetyn betonijulkisivun laajamittaiselle käytölle. Nämä ohjeet tarvitaan myös digitaalisessa muodossa.

Ulko- ja sisälevyjen toleranssiongelmiin vähentämiseksi sisälevyn toleransseja voidaan kiristää hyvin lähelle ulkolevyn vastaavia arvoja.

Ulkolevyn kaareutumisen estämisessä tärkeitä kohtia ovat erityisesti:

- Ulkolevyn valmistusvaiheessa ei saa käyttää liiallista lämpökäsittelyä ja lämpötilaeron levyn eri pinnoissa tulee olla mahdollisimman pieni.
- Betonimassan tulee olla mahdollisimman vähän kutistuvaa ja mahdollisimman homogeenista (ei saa erottua haitallisesti valuvaiheessa).
- Betonin lujuusluokan tulee olla mahdollisimman korkea, esim. K40 - K45.
- Mahdollisen pinnoitteen ja betonin erilaiset lämpö- ja kosteusliikkeet on otettava huomioon jo elementin suunnitteluvaiheessa.
- Elementin suunnittelijan on esitettävä ulkolevyn oikeat tukemistavat tehtaan varastointivaiheita, kuljetuksia ja työmaita varten. Tämä korostuu erityisesti pitkien ja profiloitujen elementtien kohdalla.
- Vältetään ylipitkiä ja -korkeita ulkolevyjä. Ulkolevyn paksuudella on olennainen merkitys sen jäykkyyteen.
- Vaakavaluna tehtävä elementti on nostettava ylös kääntömuotilla.
- Valitaan sellaiset ulkolevyn kiinnikkeet, että haitalliset pakkovoimat pääsevät purkautumaan.
- Jos käytetään esijännitystekniikkaa, on jännelankojen oltava rakenteen poikki-leikkauksessa keskeisesti ja symmetrisesti.

## 7.2 KIINNIKKEIDEN KEHITTÄMISEHDOTUKSET

Tässä yhteydessä tarkastellaan vain sellaista eriytettyä betonijulkisivua, jossa rakenteen sisälevy asennetaan ensin. Jos tavoitellaan vain mahdollisimman halpaa kiinnikettä, on esimerkiksi kuvan 4 suora kiinniketyyppi tällainen. Sen säädettä-

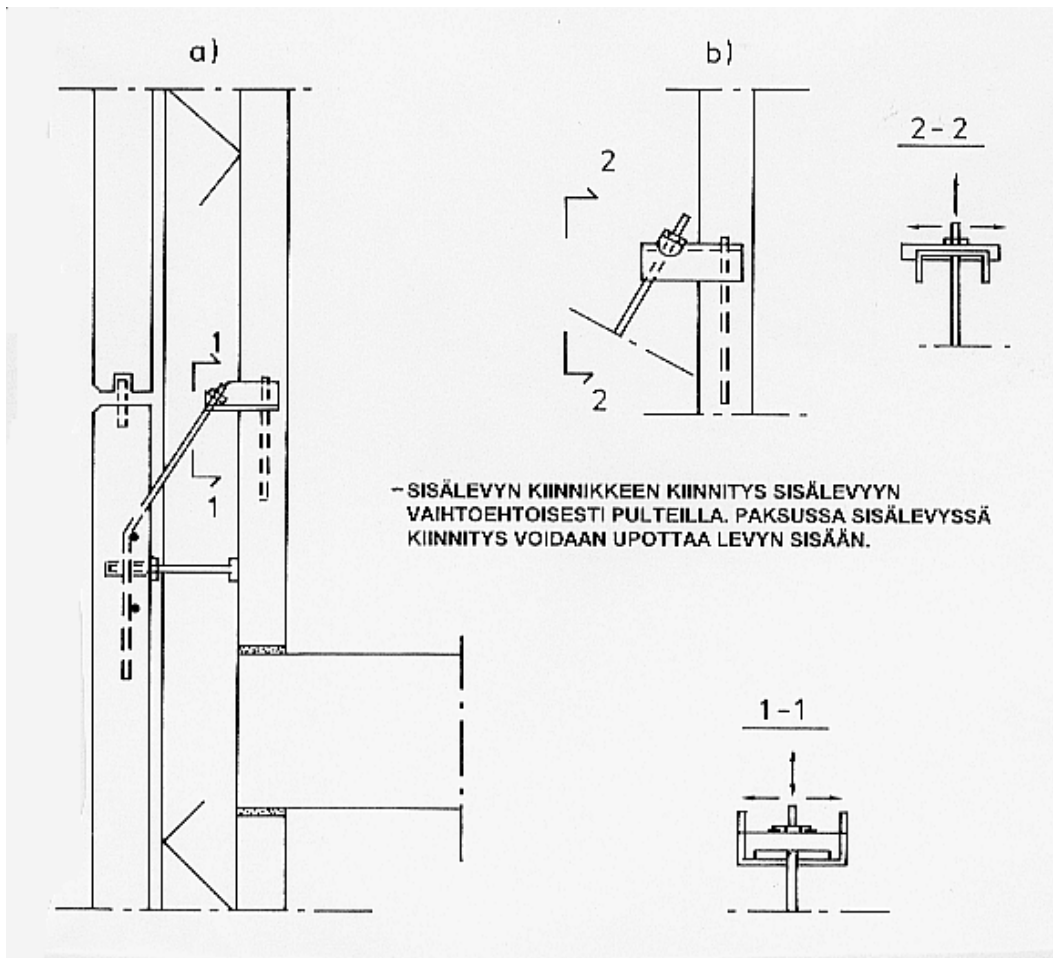


vyys on kuitenkin palasäätöineen rajallinen ja melko hankala. Niinpä seuraavassa tarkastellaan kehittämismahdollisuuksia diagonaalisiteen osalta.

Eriytettyjen betonijulkisivujen ulkolevyn kiinnikkeitä on kehitetty viime vuosina erityisesti Saksassa ja Suomessa. Saksassa tähän kehitystyöhön on panostettu voimakkaasti jo monia vuosia ja saksalaisilla yrityksillä on useita eri malleja tyyppihyväksyttynä suunnitteluohjeineen /3, 4/. Näiden kiinnikkeiden tulee olla helposti ja joka suuntaan säädettäviä, korroosion kestäviä, elementtituotantoon hyvin soveltuvia, pakkovoimien purkautumisen sallivia ja myös hinnaltaan edullisia. Aikaisemmat kiinnikeversiot olivat usein varsin hankalasti tai puutteellisesti säädettäviä ja kalliita. Parhaimmat kiinnikkeet ovat jo nyt varsin yksinkertaisia ja niiden hinnatkin ovat tällöin tulleet alaspäin. Kun pidetään kiinni edellä mainituista tämän tyyppisten kiinnikkeiden vaatimuksista, on näiden kiinnikkeiden kehittäminen lähinnä yksityiskohtien hiomista ja erikoistapausten huomioonottamista. Seuraavassa on esitetty kaksi kiinniketyyppiä, jotka yksityiskohdissaan poikkeavat aikaisemmin esitetyistä. Niiden käyttöperiaatteet ovat samat kuin esim. kuvan 5 kiinnikkeillä. Molempia tyyppisiä voidaan käyttää joko niin, että sisälevyyn ei tule valuvaiheessa ulkonevaa kiinnitysosaa (helpottaa patterimuotivalmistusta), tai että sellainen asennetaan vaakavalussa. Kiinnikkeen materiaali on ruostumaton teräs lämmöneristetilaan tai ilmarakoon jääviltä osin sekä ulkolevyssä. Betonin sisään (sisälevy) jäävissä kiinnikeosissa voidaan käyttää pinnoitettua terästä (esimerkiksi passivoitu sinkkipinnoitus voisi olla edullinen) tai jopa tavallista terästäkin.

### **Kiinnike 1**

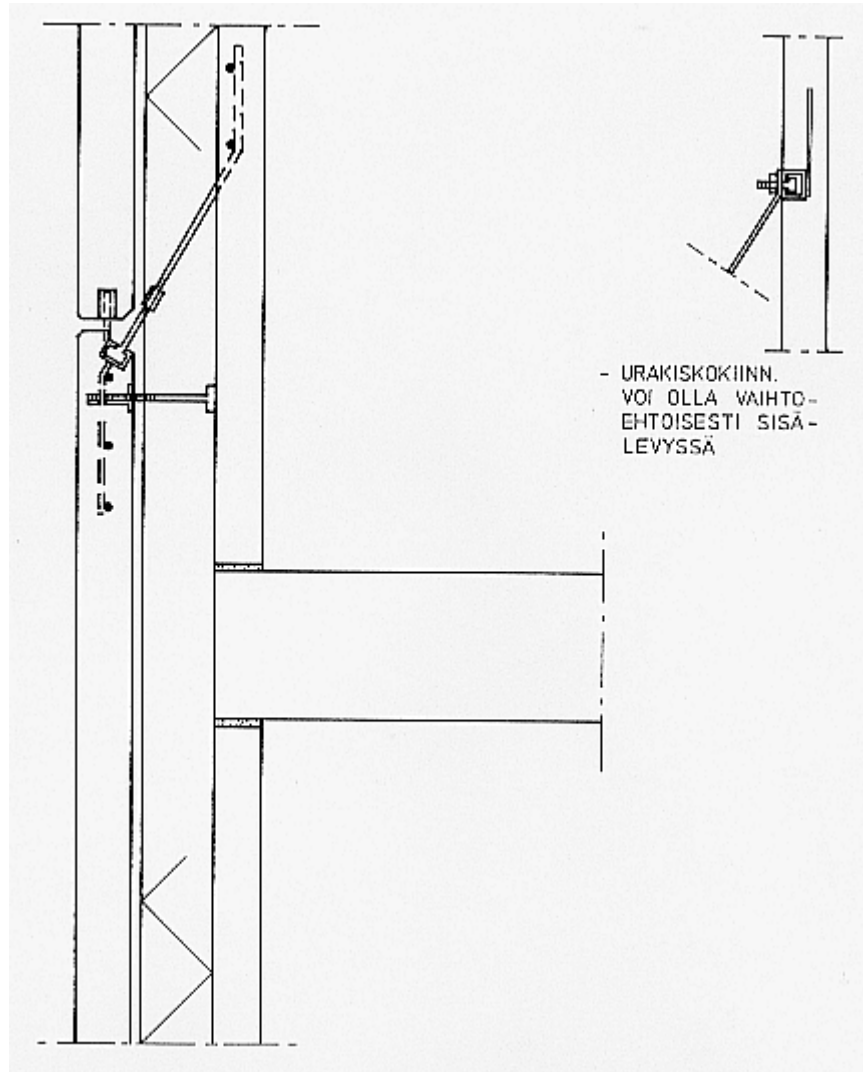
Tässä kiinniketyypissä on mahdollisimman yksinkertainen diagonaaliside ulkolevyssä. Sisälevyyn tulevasta kiinnikkeestä on esitetty kaksi eri versiota, kuva 22. Sisälevyn kiinnike voidaan tarvittaessa pultata sisälevyyn valussa tulevaan urakiskoon, jolloin sisälevy voidaan valmistaa patterimuotissakin. Tuulisiiteinä ja ulkolevyn ylä- ja alareunan siteinä käytetään tavanomaisia kiinnikkeitä. Kiinnikkeiden sijainti ja kappalemäärät seinärakenteessa eivät poikkea tavanomaisesta.



Kuva 22. Kiinnike 1. Sisälevyn kiinnikkeessä vaihtoehdot a) ja b).

## Kiinnike 2

Tässäkin kiinnikkeessä on tavoiteltu yksinkertaista rakennetta ja helppoa säädettävyyttä joka suuntaan. Muhvikiinnitys on nopea työmaalla. Siihen on merkittävä minimikiristysmäärä. Tuulisteet ovat tavanomaisia kaupallisia tuotteita. Kiinnikkeiden sijainti ja kappalemäärät määräytyvät kuten muillakin vastaavilla kiinnikkeillä, kuva 23.



*Kuva 23. Kiinnike 2.*

## 8 YHTEENVETO

Tässä tutkimuksessa tarkasteltujen asuinkerrostalon eriytettyjen betonijulkisivurakenteiden (ulkolevy jännitetty tai teräsbetonia) voitiin todeta noudattavan (varauksin) perinteisiä laskentakaavoja ja ohjeita ulkolevyn kaareutumisen ja pituudenmuutosten osalta niiden ensimmäisen käyttövuoden aikana (tavanomaisissa olosuhteissa), jolloin niiden muodonmuutokset ovat yleensä suurimmillaan. Näiden muodonmuutosten todettiin kasvavan merkittävästi ainakin jännitetyn levyn osalta vielä toisenakin käyttövuotena. Mitatut muodonmuutokset eivät vielä näkyneet haitallisesti ko. julkisivujen ulkopinnoissa.

Eriytetyn betonirakenteen ulkopinnan kaareutumiseen vaikuttavat korostetusti julkisivulevyjen oikea valmistustekniikka elementtitehtaalla ja levyjen oikea varastointi, joista on annettu ohjeita.

Eriytettyjä betonijulkisivurakenteita (sisälevy ensin asennettuna) on käytetty sekä Suomessa että ulkomailla. Tätä rakennetta on kehitetty erityisesti sen kiinnikkeiden osalta jo useiden vuosien aikana erityisesti Keski-Euroopassa. Tässäkin yhteydessä on esitetty parannusehdotuksia kiinnikkeille erityisesti niiden hinnan pienentämiseksi ja asennustyön nopeuttamiseksi hyvän säädettävyyden silti säilyessä. Samoin on annettu ohjeita eriytetyn rakenteen ulkolevyn saumoista ja niiden kehittämisestä entistä toimivammiksi.

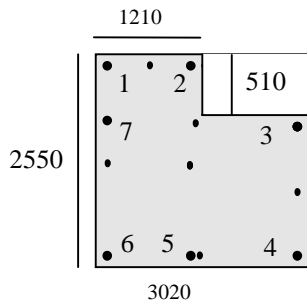
Eriytetyn betonijulkisivurakenteen jatkokehitystyön kannalta olisi tärkeää tehdä vielä laajempia mittauksia kuin nyt tehtiin ko. rakenteen muodonmuutoksista, eli mittaukset tulisi aloittaa heti elementin valmistuksen jälkeen ja seuranta jatkuisi siitä noin kaksi vuotta eteenpäin. Mitattavia elementtejä tulisi olla useita, erikokoisia (3 - 6 kpl/tyyppi) ja erilaisilla usein käytetyillä pinnoitteilla. Tärkeitä kehittämisalueita ovat myös eriytetyn betonijulkisivun asennustyön nopeuttaminen (olennainen vaikutus hintakilpailukykyyn) ja suunnittelu-, valmistus- ja asennustyöohjeen tekeminen.

## LÄHDELUETTELO

1. Valmisosarakentaminen 1. Osa D. Betonijulkisivut. Rakennustuoteteollisuus ry. Lahti 1995. 108 s.
2. Kokemukset eriytetyistä julkisivuista. Julkisivu 2000 -tutkimushanke, osaraportti A2. JS-Suunnittelu Oy/RTT ry, Helsinki 1996. 13 s. + liitt. 9 s.
3. Facing Panel Anchor Systems, Product Information, Deha Ankersysteme GmbH & Co. Saksa 1997. 6 s.
4. Facing Panel Anchorage Systems, Guidelines for Design and Installation, Deha Ankersysteme Gmgh & Co. Saksa 1997. 59 s.
5. FIP - Handbuch für Planung und Entwurf von Fertigteilbauten. FIP, 1996.
6. Eriytetyt julkisivut: Asennustekniikka. Julkisivu 2000 -hanke, osaraportti D1. Nurminen Pro Ky/RTT ry. Helsinki 1997. 14 s.

# BETONIJULKISIVUJEN MITTAUSTULOKSET

PITKÄAIKAISMITTAUS  
Leppävaara 2



Mitan lämpölaaj.k:  $11,5 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  +20°C  
 $11,0 \cdot 10^{-6} \text{ 1/}^\circ\text{C}$  -20°C

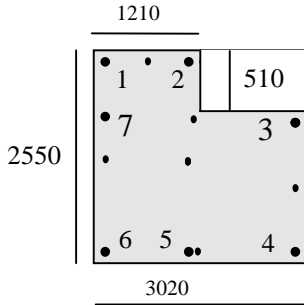
- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila°C	Mitt.kohta	Pituus (mm)	Mitt.kohta/Suoruus (mm)			
3.1.1997	-2,0 (3 h)	1-2	800 + 143,0 + 69,5	1/29,5	1-2/29,1	2/29,7	
		3-7	2600 + 143,0 + 70,2	3/29,7	3-7/26,0	7/29,4	
		4-6	2600 + 143,0 + 75,6	4/29,3	4-6/26,7	6/29,0	
		1-6	2100 + 143,0 + 117,5	1/30,0	1-6/27,9	6/29,2	
		2-5	2100 + 143,0 + 109,5	2/29,7	2-5/27,3	5/29,3	
		3-4	1600 + 143,0 + 104,4	3/29,7	3-4/26,9	4/28,6	
20.3.1997	-9,4 80 %	1-2	800 + 143,0 + 69,4	1/29,4	1-2/28,6	2/29,6	
		3-7	2600 + 143,0 + 70,2	1) 3/	3-7/	7/	
		4-6	2600 + 143,0 + 75,6	4/	4-6/	6/	
		1-6	2100 + 143,0 + 117,6	1/	1-6/	6/	
		2-5	2100 + 143,0 + 109,4	2/29,6	2-5/27,0	5/29,1	
		3-4	1600 + 143,0 + 104,4	3/	3-4/	4/	
3.1.1997	-2,0	1-2	1012,5	Ero -2,0°C... -9,4°C	1-2	+0,5	Ero -2,0°C... -9,4°C
		3-7	2813,2		3-7	+3,6	
		4-6	2818,6		4-6	+2,5	
		1-6	2360,5		1-6	+1,7	
		2-5	2352,5		2-5	+2,2	
		3-4	1847,4		3-4	+2,2	
20.3.1997	-9,4 80 %	1-2	1012,3	-0,2	1-2	+0,9	+0,4
		3-7	2813,0	-0,2	3-7		
		4-6	2818,4	-0,2	4-6		
		1-6	2360,4	-0,1	1-6		
		2-5	2352,2	-0,3	2-5	+2,4	+0,2
		3-4	1847,3	-0,1	3-4		

1) Kaikkia mittauksia ei tehty, koska aurinko alkoi lämmittää betonipintaa.

- kovera  
+ kupera

PITKÄAIKAISMITTAUS  
Leppävaara 2

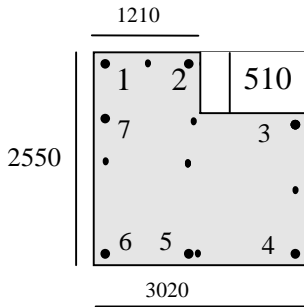


- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila°C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
3.1.1997	-2,0 (3 h)	1-2	800 + 143,0 + 69,5		1/29,5	1-2/29,1	2/29,7
		3-7	2600 + 143,0 + 70,2		3/29,7	3-7/26,0	7/29,4
		4-6	2600 + 143,0 + 75,6		4/29,3	4-6/26,7	6/29,0
		1-6	2100 + 143,0 + 117,5		1/30,0	1-6/27,9	6/29,2
		2-5	2100 + 143,0 + 109,5		2/29,7	2-5/27,3	5/29,3
		3-4	1600 + 143,0 + 104,4		3/29,7	3-4/26,9	4/28,6
28.6.1997	+25,5	1-2	800 + 143,0 + 69,3		1/29,4	1-2/28,9	2/30,0
	42 %	3-7	2600 + 143,0 + 70,2		3/29,4	3-7/26,3	7/29,5
		4-6	2600 + 143,0 + 75,3		4/29,1	4-6/26,1	6/29,1
		1-6	2100 + 143,0 + 117,5		1/29,6	1-6/27,8	6/29,2
		2-5	2100 + 143,0 + 109,7		2/30,0	2-5/27,1	5/29,8
		3-4	1600 + 143,0 + 104,2		3/29,4	3-4/26,9	4/28,8
3.1.1997	-2,0	1-2	1012,5	Ero -2,0°C... +25,5°C	1-2	+0,5	Ero -2,0°C... +25,5°C
		3-7	2813,2		3-7	+3,6	
		4-6	2818,6		4-6	+2,5	
		1-6	2360,5		1-6	+1,7	
		2-5	2352,5		2-5	+2,2	
		3-4	1847,4		3-4	+2,2	
28.6.1997	+25,5	1-2	1012,6	+0,1	1-2	+0,8	+0,3
	42 %	3-7	2814,1	+0,9	3-7	+3,2	-0,4
		4-6	2819,2	+0,6	4-6	+3,0	+0,5
		1-6	2361,2	+0,7	1-6	+1,6	-0,1
		2-5	2353,4	+0,9	2-5	+2,8	+0,6
		3-4	1847,8	+0,4	3-4	+2,2	0



PITKÄAIKAISMITTAUS  
Leppävaara 2

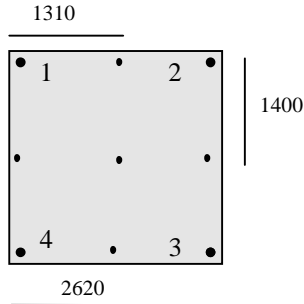


- Lyöntiankkuri  
Suoruuuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila °C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
3.1.1997	-2,0 (3 h)	1-2	800 + 143,0 + 69,5		1/29,5	1-2/29,1	2/29,7
		3-7	2600 + 143,0 + 70,2		3/29,7	3-7/26,0	7/29,4
		4-6	2600 + 143,0 + 75,6		4/29,3	4-6/26,7	6/29,0
		1-6	2100 + 143,0 + 117,5		1/30,0	1-6/27,9	6/29,2
		2-5	2100 + 143,0 + 109,5		2/29,7	2-5/27,3	5/29,3
		3-4	1600 + 143,0 + 104,4		3/29,7	3-4/26,9	4/28,6
4.12.1997	-7,9 86 %	1-2	800 + 143,0 + 69,2		1/29,2	1-2/28,1	2/29,2
		3-7	2600 + 143,0 + 69,8		3/28,7	3-7/25,7	7/29,3
		4-6	2600 + 143,0 + 75,2		4/28,9	4-6/25,9	6/29,1
		1-6	2100 + 143,0 + 117,3		1/29,4	1-6/27,6	6/28,9
		2-5	2100 + 143,0 + 109,4		2/29,2	2-5/26,5	5/28,8
		3-4	1600 + 143,0 + 104,0		3/28,7	3-4/26,5	4/28,5
3.1.1997	-2,0	1-2	1012,5	Ero -2,0°C... -7,9°C	1-2	+0,5	Ero -2,0°C... -7,9°C
		3-7	2813,2		3-7	+3,6	
		4-6	2818,6		4-6	+2,5	
		1-6	2360,5		1-6	+1,7	
		2-5	2352,5		2-5	+2,2	
		3-4	1847,4		3-4	+2,2	
4.12.1997	-7,9 86 %	1-2	1012,1	-0,4	1-2	+1,1	+0,7
		3-7	2812,6	-0,6	3-7	+3,3	-0,3
		4-6	2818,0	-0,6	4-6	+3,1	+0,6
		1-6	2360,2	-0,3	1-6	+1,6	-0,1
		2-5	2352,3	-0,2	2-5	+2,5	+0,3
		3-4	1846,9	-0,5	3-4	+2,1	-0,1

1) Kaikkia mittauksia ei tehty, koska aurinko alkoi lämmittää betonipintaa.

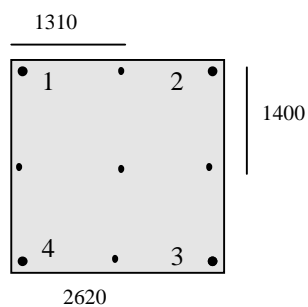
PITKÄAIKAISMITTAUS  
Leppävaara 1



- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila°C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
27.12.1996	-0,5	1-2	2200 + 143,0 + 72,5		1/27,0	1-2/27,9	2/26,7
		3-4	2200 + 143,0 + 75,5		3/30,3	3-4/26,4	4/26,2
		1-4	2500 + 143,0 + 111,1		1/27,5	1-4/25,1	4/26,0
		2-3	2500 + 143,0 + 116,2		2/26,7	2-3/24,8	3/28,8
					2/26,7	2-4/23,0	4/26,1
20.3.1997	-9,0	1-2	2200 + 143,0 + 72,6		1/26,6	1-2/27,1	2/26,2
	82 %	3-4	2200 + 143,0 + 75,5		3/28,1	3-4/25,1	4/25,9
		1-4	2500 + 143,0 + 111,3		1/27,4	1-4/24,2	4/25,5
		2-3	2500 + 143,0 + 116,2		2/26,2	2-3/23,9	3/28,3
					2/26,2	2-4/22,0	4/26,2
27.12.1996	-0,5	1-2	2415,5	Ero -0,5°C... -9,0°C	1-2	-1,1	Ero -0,5°C... -9,0°C
		3-4	2418,5		3-4	+1,9	
		1-4	2754,1		1-4	+1,7	
		2-3	2759,2		2-3	+3,0	
					2-4	+3,4	
20.3.1997	-9,0		2415,4	-0,1	1-2	-0,7	-0,4
	82 %		2418,3	-0,2	3-4	+1,9	0
			2754,0	-0,1	1-4	+2,3	+0,6
			2758,9	-0,3	2-3	+3,4	+0,4
					2-4	+4,2	+0,8

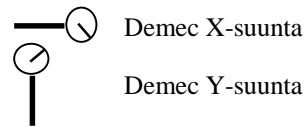
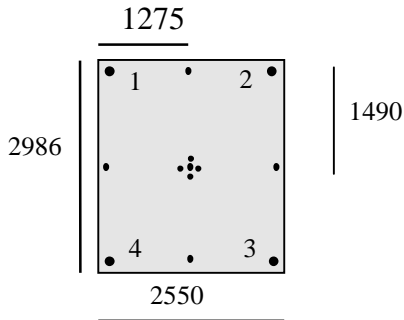
PITKÄAIKAISMITTAUS  
Leppävaara 1



- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila°C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
27.12.1996	-0,5	1-2	2200 + 143,0 + 72,5		1/27,0	1-2/27,9	2/26,7
		3-4	2200 + 143,0 + 75,5		3/30,3	3-4/26,4	4/26,2
		1-4	2500 + 143,0 + 111,1		1/27,5	1-4/25,1	4/26,0
		2-3	2500 + 143,0 + 116,2		2/26,7	2-3/24,8	3/28,8
					2/26,7	2-4/23,0	4/26,1
28.6.1997	21,6	1-2	2200 + 143,0 + 72,3		1/26,6	1-2/26,7	2/26,8
Kost.	44 %	3-4	2200 + 143,0 + 75,4		3/27,1	3-4/24,7	4/26,2
		1-4	2500 + 143,0 + 111,0		1/26,8	1-4/23,2	4/26,6
		2-3	2500 + 143,0 + 116,0		2/26,8	2-3/23,8	3/27,6
					2/26,8	2-4/20,7	4/26,2
27.12.1996	-0,5	1-2	2415,5	Ero -0,5°C... +21,6°C	1-2	-1,1	Ero -0,5°C... +21,6°C
		3-4	2418,5		3-4	+1,9	
		1-4	2754,1		1-4	+1,7	
		2-3	2759,2		2-3	+3,0	
					2-4	+3,4	
28.6.1997	21,6	1-2	2415,9	+0,4	1-2	0,0	+1,1
	44 %	3-4	2419,0	+0,5	3-4	+2,0	+0,1
		1-4	2754,7	+0,6	1-4	+3,5	+1,8
		2-3	2759,7	+0,5	2-3	+3,4	+0,4
					2-4	+5,8	+2,4

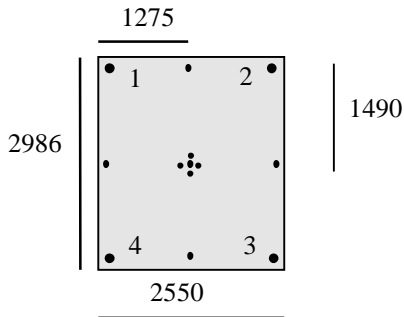
PITKÄAIKAISMITTAUS  
Pitäjänmäki 1 (R-49) Purotie 5



- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohhta
- Demec-nastat

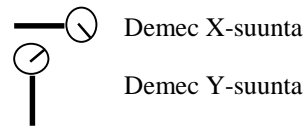
Mittauspäivä	Lämpötila °C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
23.1.1997	+0,5	1-2	2100 + 143,0 + 104,7		1/29,2	1-2/29,0	2/31,4
Kost.	n. 100 %	3-4	2100 + 143,0 + 102,8		3/29,1	3-4/30,0	4/30,9
Demec vert.	12,025	1-4	2700 + 103,8 - 18,4		1/28,9	1-4/27,9	4/30,6
Demec X	10,095	2-3	2700 + 103,8 - 14,4		2/31,4	2-3/28,3	3/29,6
Demec Y	11,175				2/31,4	2-4/30,4	4/30,4
16.2.1997	-18,2	1-2	2100 + 143,0 + 104,8		1/28,7	1-2/29,4	2/31,1
Kost.	65 %	3-4	2100 + 143,0 + 102,8		3/30,4	3-4/30,3	4/29,9
Demec vert.	12,025	1-4	2700 + 103,8 - 18,2		1/29,6	1-4/27,5	4/30,0
Demec X		2-3	2700 + 103,8 - 14,3		2/31,1	2-3/28,1	3/29,7
Demec Y					2/31,1	2-4/30,6	4/30,1
23.1.1997	+0,5	1-2	2347,7	Ero +0,5°C... -18,2°C	1-2	+1,3	Ero +0,5°C... -18,2°C
	n. 100 %	3-4	2345,8		3-4	0	
		1-4	2785,4		1-4	+1,9	
		2-3	2789,4		2-3	+2,2	
					2-4	+0,5	
16.2.1997	-18,2	1-2	2347,3	-0,4	1-2	+0,5	-0,8
	65 %	3-4	2345,3	-0,5	3-4	-0,2	-0,2
		1-4	2785,0	-0,4	1-4	+2,3	+0,4
		2-3	2788,9	-0,5	2-3	+2,3	+0,1
					2-4	0	-0,5

PITKÄAIKAISMITTAUS  
Pitäjänmäki 1 (R-49) Purotie 5



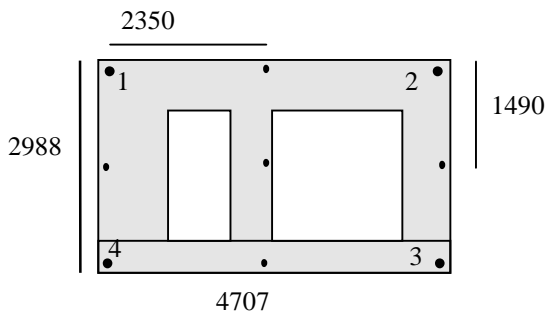
Mitan lämpölaaj.k:  $11,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$   $+20^\circ\text{C}$   
 $11,0 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$   $-20^\circ\text{C}$

- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohhta
- Demec-nastat



Mittauspäivä	Lämpötila $^\circ\text{C}$	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
23.1.1997	+0,5	1-2	2100 + 143,0 + 104,7		1/29,2	1-2/29,0	2/31,4
Kost.	n. 100 %	3-4	2100 + 143,0 + 102,8		3/29,1	3-4/30,0	4/30,9
Demec vert.	12,025	1-4	2700 + 103,8 - 18,4		1/28,9	1-4/27,9	4/30,6
Demec X	(10,095)	2-3	2700 + 103,8 - 14,4		2/31,4	2-3/28,3	3/29,6
Demec Y	11,175				2/31,4	2-4/30,4	4/30,4
28.6.1997	+22,4	1-2	2100 + 143,0 + 104,6		1/28,9	1-2/30,8	2/31,8
Kost.	48 %	3-4	2100 + 143,0 + 102,9		3/30,1	3-4/31,7	4/30,2
Demec vert.	12,025	1-4	2700 + 103,8 - 18,3		1/30,1	1-4/27,8	4/29,6
Demec X		2-3	2700 + 103,8 - 15,0 ?		2/31,8	2-3/28,5	3/30,3
Demec Y					2/31,8	2-4/32,4	4/30,4
23.1.1997	+0,5	1-2	2347,7	Ero +0,5 $^\circ\text{C}$ ... +22,4 $^\circ\text{C}$	1-2	+1,3	Ero +0,5 $^\circ\text{C}$ ... +22,4 $^\circ\text{C}$
	n. 100 %	3-4	2345,8		3-4	0	
		1-4	2785,4		1-4	+1,9	
		2-3	2789,4		2-3	+2,2	
					2-4	+0,5	
28.6.1997	+22,4	1-2	2348,2	+0,5	1-2	-0,5	-1,8
	48 %	3-4	2346,5	+0,7	3-4	-1,6	-1,6
		1-4	2786,2	+0,8	1-4	+2,1	-0,1
		2-3	2789,5	+0,1	2-3	+2,6	+0,4
					2-4	-1,3	-0,8

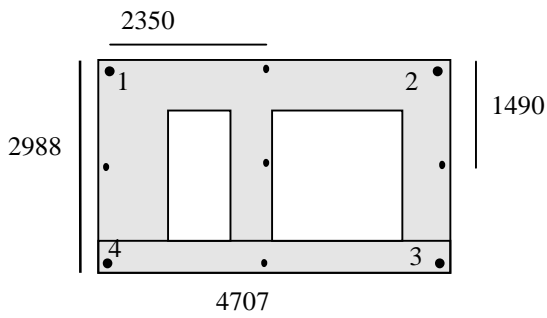
PITKÄAIKAISMITTAUS  
Pitäjänmäki 2 (R-50)



- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila°C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
23.1.1997	+0,5	1-2	4300 + 143,0 + 68,8		1/30,3	1-2/33,5	2/31,7
Kost.	n. 100 %	3-4	4300 + 143,0 + 74,5		3/30,5	3-4/31,7	4/28,9
		1-4	2700 + 103,8 - 21,1		1/30,7	1-4/28,6	4/29,0
		2-3	2700 + 103,8 - 16,4		2/31,7	2-3/27,7	3/30,3
					2/31,7	2-4/33,0	4/28,6
15.2.1997	-18,0	1-2	4300 + 143,0 + 68,4		1/29,9	1-2/33,6	2/31,4
Kost.	83 %	3-4	4300 + 143,0 + 74,2		3/29,6	3-4/31,5	4/28,8
		1-4	2700 + 103,8 - 21,5		1/30,3	1-4/29,3	4/28,7
		2-3	2700 + 103,8 - 17,0		2/31,4	2-3/28,2	3/29,1
				2/31,4	2-4/33,2	4/29,0	
23.1.1997	+0,5	1-2	4511,8	Ero +0,5°C... -18,0°C	1-2	-2,5	Ero +0,5°C... -18,0°C
n. 100 %	3-4	4517,5	3-4		-2,0		
	1-4	2782,7	1-4		+1,3		
	2-3	2787,4	2-3		+3,3		
			2-4		-2,9		
15.2.1997	-18,0		4510,5	-1,3	1-2	-3,0	-0,5
83 %			4516,3	-1,2	3-4	-2,3	-0,3
			2781,7	-1,0	1-4	+0,2	-1,1
			2786,2	-1,2	2-3	+2,1	-1,2
					2-4	-3,0	-0,1

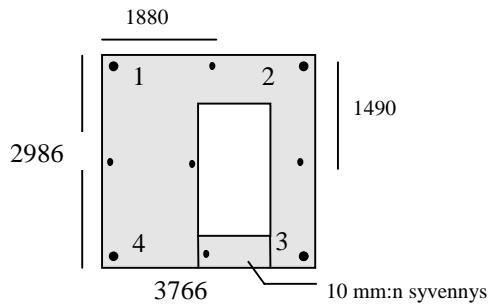
PITKÄAIKAISMITTAUS  
Pitäjänmäki 2 (R-50)



- Lyöntiankkuri
- Suoruuden mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila °C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
23.1.1997	+0,5	1-2	4300 + 143,0 + 68,8		1/30,3	1-2/33,5	2/31,7
Kost.	n. 100 %	3-4	4300 + 143,0 + 74,5		3/30,5	3-4/31,7	4/28,9
		1-4	2700 + 103,8 - 21,1		1/30,7	1-4/28,6	4/29,0
		2-3	2700 + 103,8 - 16,4		2/31,7	2-3/27,7	3/30,3
					2/31,7	2-4/33,0	4/28,6
28.6.1997	+23,5	1-2	4300 + 143,0 + 67,8		1/30,0	1-2/33,2	2/30,7
Kost.	48 %	3-4	4300 + 143,0 + 73,2		3/29,7	3-4/30,3	4/29,3
		1-4	2700 + 103,8 - 21,4		1/30,3	1-4/28,9	4/29,1
		2-3	2700 + 103,8 - 16,5		2/30,7	2-3/27,8	3/29,2
					2/30,7	2-4/31,9	4/29,0
23.1.1997	+0,5	1-2	4511,8	Ero +0,5°C... +23,5 °C	1-2	-2,5	Ero +0,5°C... +23,5 °C
n. 100 %	3-4	4517,5	3-4		-2,0		
	1-4	2782,7	1-4		+1,3		
	2-3	2787,4	2-3		+3,3		
			2-4		-2,9		
28.7.1997	+23,5		4512,0	+0,2	1-2	-2,9	-0,4
48 %			4517,4	-0,1	3-4	-0,8	+1,2
			2783,1	+0,4	1-4	+0,8	-0,5
			2788,0	+0,6	2-3	+2,2	-1,1
					2-4	-2,1	+0,8

PITKÄAIKAISMITTAUS  
Pitäjänmäki 3 (R-5)

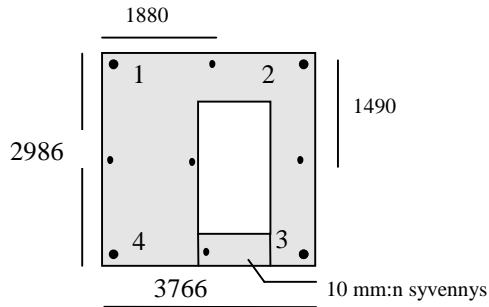


- Lyöntiankkuri
- Suoruu den mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila °C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
23.1.1997	+0,5	1-2	3300 + 143,0 + 82,8		1/29,4	1-2/28,7	2/30,0
Kost.	n. 100 %	3-4	3300 + 143,0 + 92,0		3/30,2	3-4/39,6	4/29,9
		1-4	2700 + 103,8 - 20,9		1/31,3	1-4/31,4	4/29,7
		2-3	2700 + 103,8 - 21,4		2/30,0	2-3/28,6	3/29,5
					2/30,0	2-4/29,1	4/30,5
15.2.1997	-17,2	1-2	3300 + 143,0 + 82,6		1/29,6	1-2/29,4	2/29,8
Kost.	n. 88 %	3-4	3300 + 143,0 + 91,7		3/30,3	3-4/39,1	4/29,8
		1-4	2700 + 103,8 - 20,8		1/30,1	1-4/30,9	4/30,2
		2-3	2700 + 103,8 - 21,4		2/29,8	2-3/28,5	3/29,6
					2/29,8	2-4/28,8	4/30,9
23.1.1997	+0,5	1-2	3525,8	Ero +0,5°C... -17,2°C	1-2	+1,0	Ero +0,5°C... -17,2°C
n. 100 %	3-4	3535,0	3-4		-9,6		
	1-4	2782,9	1-4		-0,8		
	2-3	2782,4	2-3		+1,2		
			2-4		+1,2		
15.2.1997	-17,2	1-2	3524,9	-0,9	1-2	+0,3	-0,7
n. 88 %	3-4	3534,0	-1,0	3-4	-9,1	-0,5	
	1-4	2782,4	-0,5	1-4	-0,9	-0,1	
	2-3	2781,8	-0,6	2-3	+1,2	0	
				2-4	+1,6	+0,4	



PITKÄAIKAISMITTAUS  
Pitäjänmäki 3 (R-5)



- Lyöntiankkuri
- Suoruu den mittauskohta

Mittauspäivä	Lämpötila °C	Mitt.kohta	Pituus (mm)		Mitt.kohta/Suoruus (mm)		
23.1.1997	+0,5	1-2	3300 + 143,0 + 82,8		1/29,4	1-2/28,7	2/30,0
Kost.	n. 100 %	3-4	3300 + 143,0 + 92,0		3/30,2	3-4/39,6	4/29,9
		1-4	2700 + 103,8 - 20,9		1/31,3	1-4/31,4	4/29,7
		2-3	2700 + 103,8 - 21,4		2/30,0	2-3/28,6	3/29,5
					2/30,0	2-4/29,1	4/30,5
28.6.1997	+24,3	1-2	3300 + 143,0 + 82,2		1/29,3	1-2/29,4	2/30,1
Kost.	48 %	3-4	3300 + 143,0 + 91,2		3/29,8	3-4/40,7	4/29,8
		1-4	2700 + 103,8 - 21,3		1/30,5	1-4/30,4	4/29,8
		2-3	2700 + 103,8 - 21,9		2/30,1	2-3/28,2	3/29,1
					2/30,1	2-4/28,7	4/30,1
23.1.1997	+0,5	1-2	3525,8	Ero +0,5°C... +24,3°C	1-2	+1,0	Ero +0,5°C... +24,3°C
n. 100 %	3-4	3535,0	3-4		-9,6		
	1-4	2782,9	1-4		-0,8		
	2-3	2782,4	2-3		+1,2		
			2-4		+1,2		
28.6.1997	+24,3		3526,1	+0,3	1-2	+0,3	-0,7
48 %			3535,1	+0,1	3-4	-10,9	-1,3
			2783,3	+0,4	1-4	-0,3	+0,5
			2782,7	+0,3	2-3	+1,4	+0,2
					2-4	+1,4	+0,2

SANDWICH-ELEMENTTIEN LÄMPÖTILA- JA  
KOSTEUSMITTAUKSET

LIITE 2

## TRT JULKAISU 70 SANDWICH -ULKOSEINÄRAKENTEIDEN KOSTEUSTEKNINEN KÄYTTÄYTYMINEN

*Teppo Lehtinen Martti Viljanen*

Tutkimus sisältää teoreettisen osan, kenttämittaukset sekä laboratoriokokeet betonisten sandwich-ulkoseinäarakenteiden kosteusteknisestä käyttäytymisestä. Tutkimus rajattiin rakenteisiin, joissa lämmöneristeenä käytetään mineraalivillaa. Tarkasteltavan seinäelementin lämmöneristeen nimellispaksuus tuuletusurallisessa tapauksessa oli 145 mm ja tuuletusurattomassa tapauksessa 140 mm. Rakennuksen korkeussuuntaisten tuuletusurien nimellimitat olivat 30x20 mm<sup>2</sup> vuorivillan osalta ja 40x25 mm<sup>2</sup> lasivillan osalta. Ko. korkeussuuntaiset tuuletusurat jyrkettiin mineraalivillalevyjen valmistuksen yhteydessä. Muut tuuletusurat, kuten vaakasuuntaiset kokoojakanavat seinäelementtien ylä- ja alapäässä, tehtiin veitsellä leikkaamalla seinäelementtien valmistuksen yhteydessä.

Tuuletuksen kannalta, sandwich-rakenteet voidaan jakaa kahteen luokkaan. Tuuletusurattomissa rakenteissa ei lämmöneristekerroksessa ole avoimia virtauskanavia rakenteen tuulettamiseksi. Tällöin kosteus poistuu rakenteesta diffuusiolla ulkokuoren läpi. Tuuletuksissa rakenteissa kosteus poistuu diffuusion lisäksi ilmapvirtausten mukana ilmapvirtauskanavien ja tuuletusaukkojen kautta nopeuttaen rakenteen kuivumista. Tuuletus voi tapahtua joko käyttämällä yhtenäistä tuuletusrakoa ulkokuoren ja lämmöneristekerroksen välissä tai tuuletusuria. Tuuletusurien tapauksessa lämmöneristekerroksessa on pysty- ja vaakaurat, jotka yhtyvät elementtien saumojen kautta ulkoilmaan muodostaen tuuletuskanaviston.

Teoreettisessa osassa esitetään yksinkertaistettu käsinlaskentamalli sandwich-rakenteen tuuletusurien lämpö- ja kosteusteknisen toiminnan arvioimiseksi. Numeerisissa tarkasteluissa käsitellään esimerkkien avulla sandwich-ulkoseinän kuivumista ilman tuuletusuria, erityyppisten tuuletusuravaihtoehtojen vaikutusta rakenteen kosteudenpoistokykyyn sekä tuuletusurien virtausteknistä käyttäytymistä eri julkisivun osissa. Lisäksi tarkasteltiin tulo- ja poistoilma-aukkojen dimensioiden virtausteknistä merkitystä tuuletuksen kannalta. Laboratoriomittauksissa testattiin tuuletusurallisten ja tuuletusurattomien lämmöneristekerrosten virtausteknistä käyttäytymistä. Tuuletusurattoman lämmöneristekerroksen tapauksessa ilmapvirtaukset lämmöneristekerroksessa ovat lähes nolla käytännössä esiintyvillä ilmanpaine-eroilla. Tuuletusurallisessa tapauksessa rakenteen virtaustekninen käyttäytyminen riippuu tuuletusurien tehollisista hydraulisista halkaisijoista tuuletusjärjestelmä eri osissa sekä ilmanpaineroista tuuletusaukkojen välillä.

Virtauskokeissa mitattiin mineraalivillan painuman, valupurseiden ja tuuletusurien jyrkinnän yhteydessä uraan jääneen ylimääräisen mineraalivillan vaikutusta urien hydrauliseen halkaisijaan. Kahdessa testatussa koekappaleessa oli kummassakin toinen kahdesta tuuletusraosta ahtautunut. Lisäksi lämmöneristekerros painuu muutamia millimetrejä elementin valmistuksen yhteydessä. Toisen koekappaleen urien nimellimittojen mukainen hydraulinen halkaisija oli  $d_h=24.0$  mm ja mitattujen ilmapvirtojen mukainen hydraulinen halkaisija avoimen uran tapauksessa  $d_h=18.0$  mm ja ahtautuneen uran tapauksessa  $d_h=13.7$  mm. Koekappaleen, jonka urien nimellimittojen mukainen hydraulinen halkaisija oli  $d_h=30.8$  mm, avoimen uran hydraulinen halkaisija oli  $d_h=19.0$  mm ja ahtautuneen uran  $d_h=13.5$

mm. Edellisessä tapauksessa ahtautuneen uran päässä oli valupurse ja jälkimmäisessä tapauksessa urassa oli mineraalivillahahtuvaa. Mittausten mukaan avoimien tuuletusurien tilavuusilmavirrat olivat noin kaksinkertaisia verrattuna ahtautuneisiin uriin 5 Pa ilmanpaine-erolla. Mikäli ko. ahtautumia esiintyy julkisivuelementeissä niin elementtien tuuletus on epätasaista. Mitattuja hydraulisia halkaisijoita käytettiin numeerissa laskentaesimerkeissä.

Tuuletetuissa rakenteiden tuuletuskanaviston ilmanvaihtuvuuteen vaikuttavat kanaviston rakenteen ja sijainnin sekä ilmanpaine-erojen lisäksi tulo- ja poistoilma-aukkojen järjestelyt. Tulo- ja poistoilma-aukkojen dimensioiden merkitys korostuu vaikuttavien ilmanpainerojen ollessa pieniä. Numeeristen tarkastelujen perusteella järjestämällä tuuletus yhtenäisten tuuletusaukkojen kautta tuuletuskanaviston ilmanvaihtuvuus on moninkertainen. Tuuletusaukon ollessa yhtenäinen 5 mm rako tuuletusraon ilmanvaihtuvuus oli 5 Pa ilmanpaine-erolla 15-20 kertainen verrattuna eri tuuletusputkiratkaisuihin.

Tuuletusurattoman rakenteen kuivuminen alkaa sisäkuoren kuivumisella ulos- ja sisäänpäin. Sisäkuoren ja lämmöneristeen kuivuminen ulospäin lisäsi ulkokuoren ja uloimman mineraalivillakerroksen kosteutta tarkastellun laskentajakson 1/97-5/97 aikana noin 0.5 kg·m<sup>-2</sup>. Laskentatulosten mukaiset kosteusjakaumat vastasivat toukokuussa kenttäkohteessa mitattuja kosteusjakaumia. Mikäli rakenteeseen kulkeutuu vettä rakennustyön aikana, kuivumisaika muodostuu huomattavasti pitemmäksi kuin pelkästään elementin valmistuksessa betonikuoriin kemiallisesti sitoutumattoman veden kuivumiseen kuluva aika. Kuivumisaikaa pidentää lisäksi sisäkuoren aikainen pinnoittaminen.

Tuuletusurallisen rakenteen teoreettisten tarkasteluissa ulkoilman lämpötilaksi oletettiin -10°C ja ulkoilman suhteelliseksi kosteudeksi 90 RH%. Suurin kosteudenpoisto saavutettiin virtausnopeudella 0.2 m·s<sup>-1</sup> tapauksissa, joissa tuuletus oli järjestetty kerroksittain ja ulkokuorta vasten sijoitetut tuuletusurat olivat joko 15x30 k100 tai 25x50 k200. Lämmöneristävyuden kannalta laskettujen tuuletusuravaihtojen tehollinen vaikutus seinärakenteen lämmöneristävyyteen vastasi ko. tapauksissa alle 5 mm lämmöneristekerrosta. Kosteudenpoisto oli virtausnopeudella 0.2 m·s<sup>-1</sup> tasolla 2 g·d<sup>-1</sup> laskettuna korkeussuunnassa yhden kerroksen matkalta ja leveyssuunnassa yhtä seinämetriä kohden. Vastaava kosteudenpoisto saavutettiin pienemällä virtausnopeudella 0.05 m·s<sup>-1</sup> sijoittamalla tuuletusura lämmöneristeen sisään siten, että ulkokuoren ja uran väliin jää 10 mm. Urakoko oli tällöin 15x30 mm<sup>2</sup> ja urajako k100. Käyttämällä ko. 10 mm mineraalivillakaistaa voidaan tuuletusta parantaa, koska tällöin jo ¼ -ilmanvaihtuvuudella saavutetaan vastaava kosteudenpoisto kuin tuuletusraon sijaitessa ulkokuorta vasten.

Tuuletuksen sandwich -rakenteen kuivumista tehostava vaikutus ilmeni kiistatta teoreettisten tarkastelujen lisäksi laboratoriokokeessa kosteudenläpäisevyyslaitteistolla. Kokeen perusteella jo 0.05 m·s<sup>-1</sup> keskimääräisellä virtausnopeudella tuuletusurassa on merkitystä rakenteen kuivumisnopeuden kannalta. Tilanteessa, jossa vertailtiin tuuletettua ja tuulettamatonta rakennetta samanaikaisesti, tuulettettu rakenteen lämmöneristeen ja ulkokuoren väliset mittauspistekohdat alkoivat kuivua heti, kun tuuletus käynnistettiin. Kymmenessä päivässä lämmöneristeen ja ulkokuoren liitoskohdan ilman suhteellinen kosteus aleni tasolta 95 RH% tasolle 85 RH%, kun tuuletusurattoman rakenteen vastaavien kohtien ilman suhteellinen kosteus oli nouseva.

Kentämittaukset tehtiin Helsingin alueelle tutkimuksen aikana rakennetussa kuusikerroksisessa asuintalossa. Jatkuvat mittaukset kohdistuivat kaakkoisjulkisivuun. Rakennuksen ulkoseinät asennettiin marraskuussa 1996, vesikatto valmistui joulukuussa 1996, lämmitys kytkettiin päälle tammikuun alussa 1997 ja seinäelementit saumattiin toukokuussa 1997. Mittaukset kestivät noin yhden vuoden ajan 11/96-11/97 alkaen ulkoseinäelementtien asennuksen jälkeen. Kesä 1997 oli keskimääräistä lämpimämpi. Betonisen ulkuoren ja lämmöneristeen liittymäkohdan ilman suhteellista kosteutta ja lämpötilaa mitattiin kolmella seinäelementtilinjalla. Kahdessa seinälinjoista käytettiin uritettua lämmöneristettä ja yhdessä urittamatonta. Mittauspisteitä ulkoseinässä oli yhteensä seitsemän.

Rakennetarkastuksessa seinälinjojen tuuletusputkien avonaisuus testattiin pistokokein teräspuikolla sekä avaamalla yhden elementin ylä- ja alavaakasauama. Testatut tuuletusputket olivat useimmiten osittain tukossa. Ikkunoiden yläpielien tuuletusputkissa oli betonia. Avatuissa vaakasaumoissa tuuletusputket päät olivat työntyneet saumaprofiilinauhaan asti ulottuvaan elementtien väliseen mineraalivillakaistaan. Mineraalivillakaista oli puristuksissa ulkokuorten välissä. Seinälinjojen yläpäässä olevista, yläpohjan ilmatilaan johtavista tuuletusputkista suurin osa oli jäänyt puhalluslämmöneristeen sisälle. Ylimpien seinäelementtien yläpohjan lämmöneristeseen rajoittuvat tuuletusraot olivat pääosin tukossa polyuretaanivaahdosta, jota oli käytetty yläpohjan kuorielementin ja ylimmän seinäelementin välisessä saumassa. Rakennetarkastus osoitti, että nykyinen tuuletusjärjestelmä on rakenneyksityiskohdiltaan sellainen, ettei se yksinään takaa tuuletuksen onnistumista, vaan järjestelmässä on riski elementtien valmistus- ja asennusaikaisille virheille. Siten kentämittaustulokset eivät vastaa uritus- tekniikalla tuuletetun rakenteen kuivumista.

Seinäelementtien valmistuksen jälkeen valun yhteydessä otettujen betonikoe-kappaleiden kosteuspitoisuus oli seinäelementtien asennuksen alkamisajankohtana 5 p-%. Ulkoseinien asennus ajoittui loppusyksyyn, jolloin sadevettä kulkeutui rakenteisiin lisäten niiden kosteutta. Jatkuvien mittausten perusteella tarkasteltujen ulkoseinälinjojen mittauspisteet eivät kuivuneet hygroskooppiselle kosteusalueella talven ja kevään aikana. Seinistä kolmesta kohtaa otettujen näytepalojen perusteella ulkokuoren kosteuspitoisuuden vaihtelu oli toukokuussa noin 3-6 p% siten, että kuoren ulko-osat olivat kuivia verrattuna lämmöneristettä vastaan olevaan kuoren osaan. Lämmöneristeen kosteudet olivat 1.8-3.1 p-% ohuessa noin 5 mm kaistassa ulkokuorta vasten. Lämmöneristeen kosteudet pienenevät rakenteen sisäosiin mentäessä. Sisäkuoresta 40 mm ulospäin olleen mineraalivillakerroksen kosteus oli 0.5-0.7 p-%.

Hygroskooppiselle kosteusalueelle kuivuivat ensimmäiseksi ikkuna-aukkojen yläpuoliset mittauspisteet huhti-toukokuussa 1997. Ko. mittauspisteiden etäisyys tuuletusaukkoihin oli pieni ja niiden ilman kosteuspitoisuuksien vaihtelu seurasi tehtyjen tarkastelujen perusteella kesällä 1997 ulkoilman kosteusvaihteluita ko. tuuletusaukkojen toimiessa pääasiallisesti tuloilma-aukkoina johtuen tuulen aiheuttamasta staattisesta paineesta ikkunasyvennykseen.

Kesällä 1997 mittauspisteet kuivuivat hygroskooppiselle kosteusalueelle lukuun ottamatta ylintä elementtiä tuuletusurallisessa seinälinjassa, jossa tuuletusaukkojen määrä oli pieni suhteessa yhtenäiseen, ikkuna-aukottomaan seinäpinta-alaan. Ko. linjan kuivuminen oli hitaampaan kuin seinälinjan, jossa lämmöneristeessä ei ollut tuuletusuria, mutta, jonka seinän aukkopinta-ala oli 30% ja tuuletusaukkojen määrä elementtiä kohden kolminkertainen. Muiden mittauspisteiden ilman suhteelliset kosteudet vaihtelivat elokuussa 1997 välillä 35-98%.

Alimmat suhteelliset kosteudet olivat mittauslinjalla, jossa aukkojen osuus seinäpinta-alasta sekä tuuletusaukkojen määrä oli suurin. Ko. seinälinjalla oli tehdyn pistokokeen perusteella myös avoimia tuuletusaukkoja suhteellisesti enemmän kuin kahdella muulla seinälinjalla.

Tuuletuksen tehostamista testattiin avaamalla yhden elementin ala- ja ylävaaka-sauma poistamatta kuitenkaan ulkokuorten välissä olevaa mineraalivillakaistaa. Jo saumakitin ja saumanauhan poistaminen tehosti tuuletusta siten, että ko. elementin mittauspisteen ilman suhteelliset kosteudet laskivat pidemmän aikavälin tarkastelussa noin 10 RH% tasolta 90 RH% tasolle 80 RH%.

Syksyllä 1997 kaikkien seinälinjojen mittauspisteiden ilman suhteelliset kosteudet alkoivat kasvaa siten, että syyskuun lopussa kolmen mittauspisteen kosteudet ylittivät hygroskooppisen alueen. Seinälinjalla, jonka aukkopinta-ala ja avointen tuuletusaukkojen määrä on suurin, kosteudet olivat marraskuun alussa 1997 tasolla 85RH% yhtenäisen seinäalueen mittauskohdissa. Marraskuussa 1997 rakennuksen pohjoisesta otettujen näytteiden perusteella ulkokuoren betonin kosteuspitoisuudet olivat yli 5 p-%. Ulkokuorta vasten olevan ohuen mineraalivillakerroksen kosteus oli 7.5 p-%. Mineraalivillakerroksen kosteus oli keskimäärin noin 1.4 p-%. Kenttämittausten kesto, noin yksi vuosi, on ko. toteutetun seinärakenteen tapauksessa liian lyhyt aika rakenteen pitkäaikaisen kosteusteknisen käyttäytymisen arvioimiseksi.

Tutkimuksen perusteella tuuletus tehostaa kiistatta sandwich-ulkoseinien kuivumista. Aina on lisäksi hyödyllistä minimoida lisäkosteuden kulkeutuminen rakenteeseen rakennustyön aikana huolellisella sääsuojauksella. Kenttämittaustapauksessa, jossa tuuletusputket mittauslinjoilla olivat suurimmalta osin tukossa, kuivuminen oli nopeinta ikkunallisissa elementeissä, joissa oli vähiten yhtenäistä seinäpinta-alaa ja eniten avonaisia tuuletusaukkoja. Täten ikkunattomissa elementeissä, joissa on enemmän kuivuvaa rakennekosteutta, toimiva tuuletusjärjestelmä korostuu.

Kehitettäviä tuuletusjärjestelmävaihtoehtoja valittaessa voidaan eri vaihtoehtoja verrata keskenään laskennallisen kosteudenpoiston perusteella. Kehitettäväksi järjestelmiksi valitaan ne vaihtoehdot, jotka antavat pienimmillä ilmavirtauksilla riittävän kosteudenpoiston. Tällä valintamenettelyllä voidaan lisätä tuuletusjärjestelmän toimintavarmuutta eri tyyppisten rakennusten ja rakennuspaikkojen tapauksissa. Tutkimuksen laskentaesimerkkien perusteella tuuletus on tehokkainta käytettäessä yhtenäistä tuuletusrakoa. Tuuletusurien tapauksessa parhaan tuloksen antaa noin 10 mm mineraalivillakaistan käyttö ulkokuoren ja tuuletusurien välissä.

Rakenneyksityiskohdat ja -liitokset tulee suunnitella siten, että tuuletuskanavisto voidaan toteuttaa nykyistä luotettavammin. Tällöin kehitys tulee suunnata myös elementtien valmistuksen ja työmaatekniikan kehittämiseen. Luotettavasti toimiva tuuletusjärjestelmä lisää sandwich -ulkoseinärakenteen käyttöikä.