

Kari Hemmilä & Ismo Heimonen

# Suomalaisten ikkunoiden kestävyys



# Suomalaisten ikkunoiden kestävyys

Kari Hemmilä & Ismo Heimonen  
VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka

ISBN 951-38-6534-7 (nid.)  
ISSN 1235-0605 (nid.)

ISBN 951-38-6535-5 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)  
ISSN 1455-0865 (URL: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/>)

Copyright © VTT 2005

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

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

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

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

VTT Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, Lämpömiehenkuja 2, PL 1800, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 174

VTT Bygg och transport, Värmemansgränden 2, PB 1800, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 174

VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1800, FIN-02044 VTT, Finland  
phone internat. + 358 20 722 111, fax + 358 20 722 174

Toimitus Maini Manninen

Otamedia Oy, Espoo 2005

Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Suomalaisten ikkunoiden kestävyys [Durability of Finnish windows]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2285. 59 s. + liitt. 14 s.

**Avainsanat** glass planes, windows, insulating glass, low emissivity glass, breakage, Venetian blinds, durability, thermal stress

## Tiivistelmä

Ennen tutkimuksen aloittamista Suomessa rikkoutui vajaasta promillesta ikkunoita keskimäinen lasi tuntemattomasta syystä. Tunnusomaista rikkoutuneille ikkunoille oli, että ne olivat kolmilasisia, kaksipuitteisia niin sanottuja MSE-ikkunoita ja niissä oli tavallisesti selektiivilasi ja eristyslasissa täytekaasuna argonia. Kokemus on osoittanut, että mitä paremmin ne eristävät lämpöä ja mitä tummemmat sälekaihtimet niissä on, sitä suurempi on rikkoutumisen riski. Rikkoutuneiden lasien määrä on pieni, mutta niiden korjaamisesta on aiheutunut merkittävät kustannukset ikkunavalmistajille.

Rikkoutumisen yleistymiseen on johtanut lämmöneristävyydeltään aikaisempia parempien ikkunoiden käytön lisääntyminen. Suomalaisen ikkunan rakenne ja sälekaihtimien käyttö puitteiden välissä lisäävät osaltaan ikkunan laseihin kohdistuvia lämpörasituksia ja jännityksiä.

Toimistokiinteistössä tehdyissä mittauksissa havaittiin sisäpuitteen eristyslasissa korkeimmillaan jopa 80 °C:n lämpötiloja ja yli 35 °C:n lämpötilaeroja. Nämä arvot alkavat olla tavallisilla laseilla varustetun ikkunan kestävyuden kannalta ylärajoilla.

Ikkunoiden rikkoutuminen on aiheutunut useamman osatekijän summana, ja yksittäisen syyllisen nimeäminen on mahdotonta. Tämän vuoksi ei ole esitettävissä yksittäisiä menetelmiä ja ratkaisuja, joilla rikkoutuminen voidaan estää, eikä yksittäisten toimenpiteiden vaikutuksen suuruutta pystytä arvioimaan. Sen sijaan on tiedossa ne tekijät, joilla ikkunan lasiosan rasituksia voidaan pienentää. Rikkoutumisen estäminen onkin nähtävä kestävyystalkoina, joihin kaikilla osapuolilla on jotain annettavaa.

Teollisuus onkin projektin aikana kiitettävästi kiinnittänyt huomiota eri osatekijöihin ja työtapoihin, minkä tulokset on havaittavissa rikkoutuneiden lasien määrän pienentymisenä murto-osaan alkuperäisestä. Rikkoutumisten määrä aleni niin pieneksi, ettei alun perin suunniteltua tilastollista tutkimusta rikkoutumisen syiden selvittämisestä pystytty tekemään liian pienen havaintoaineiston vuoksi. Tämä on myös osoitus tässä tutkimuksessa esitettyjen keinojen toimivuudesta.

Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo. Suomalaisten ikkunoiden kestävyys [Durability of Finnish windows]. Espoo 2005. VTT Tiedotteita – Research Notes 2285. 59 p. + app. 14 p.

**Keywords** glass panes, windows, insulating glass, low emissivity glass, breakage, Venetian blinds, durability, thermal stress

## Abstract

About one insulating glass of one thousand windows broke spontaneously within two first years because of unknown reason before the start of this research. These Finnish type windows consist of one separate glass pane on outer sash and insulating glass on inner sash. It was also typical that there were Venetian blinds between those sashes and the insulating glass was equipped with low-emissivity glass and argon gas filling. The experience has shown that dark colour of Venetian blinds and good thermal insulation of windows increase the risk and number of glass breakage.

Although the percentage of broken windows was small, the repair costs window manufacturers had to pay were significant.

The reason for glass breakage becoming more common was the increased use of energy efficient windows. The Finnish window structure and Venetian blinds between sashes caused greater thermal and tension stresses of glass panes, too.

The measurements made in an office building showed that the maximum temperature of the middle pane of windows was 80 °C and the temperature difference between the centre and the edge of a pane was over 35 °C. These are on the upper limit of durability of a window equipped with normal float glass.

It is not possible to name only one reason why glass panes break. The cause of glass breakage is a sum of various kinds of reasons. Therefore there is not only one method and solution, which can prevent the breakage of glass pane neither the efficiency of separate methods can't be estimated. On the contrary, the methods that reduce the stresses of glass panes are known. The improvement of window pane resistance should be considered as a task where every party can give their own contribution.

The window and insulating glass manufacturers have paid a great attention to different matters and working methods, which have resulted to radical decrease of the number of broken windows. The reduction of breakage was so great that it was not possible to do a statistical analysis of the cause of breakage because of too small number of observations. This indicates the effectiveness of methods presented in this report.

# Alkusanat

Tämä julkaisu on tutkimuksen ”Suomalaisen ikkunan kestävyys” loppuraportti. Tutkimus kuului Tekesin teknologiaohjelmaan ”Tukista tuplasti”. Projektia ovat rahoittaneet Tekes, Suomen Tasolasi ry., Rakennustuoteteollisuus RT ry sekä Kalajoen Kaihdin Oy.

Johtoryhmään ovat osallistuneet johtava teknologia-asiantuntija Juha Vaajoensuu Teke-sistä, toiminnanjohtaja Mauri Riikonen Suomen Tasolasiyhdistys ry:stä, toimiala-päällikkö Juha Luhanka Rakennustuoteteollisuus RT ry:stä, tekninen johtaja Vesa Mäkelä Kalajoen Kaihdin Oy:stä sekä ryhmäpäällikkö Ismo Heimonen VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikasta.

Kiitämme rahoittajien edustajia heidän panoksestaan projektin tavoitteiden saavutta-misessa sekä Ari Mäkeä Skaala Oy:stä, Vesa Mäkelää Kalajoen Kaihdin Oy:stä ja Ahti Syrjäahoa Fenestra Oy:stä tutkimuksessa tarvittujen koekappaleiden valmistamisesta ja toimittamisesta.

# Sisällysluettelo

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
1. Johdanto.....	7
2. Suomalaisten ikkunoiden erityispiirteet.....	8
3. Lasin ominaisuuksia.....	10
3.1 Tasolasin tekniset ominaisuudet.....	10
3.2 Lasin lujuus.....	11
4. Ikkunaan kohdistuvat rasitukset.....	15
4.1 Lämpöjännitykset.....	15
4.2 Eristyslasin sisäinen paine.....	19
4.3 Muut jännityksiä aiheuttavat tekijät.....	20
4.4 Lasin rikkoutumistyyppit.....	21
5. Jännitystilän määrittäminen.....	27
5.1 Laskennalliset menetelmät.....	27
5.2 Kokeelliset menetelmät.....	29
6. Laboratoriokokeet.....	31
6.1 Lasin asennustapa puitteeseen.....	31
6.2 Sälekaihtimen vaikutus ikkunan lämmöneristävyyteen.....	34
6.3 Sälekaihtimien säteilytekniset ominaisuudet.....	35
7. Tutkimukset luonnonolosuhteissa.....	38
7.1 Tutkimuksen kiinteistö ja sen ikkunat.....	38
7.2 Mittausjärjestelyt.....	39
7.3 Mittaustulokset.....	41
7.4 Päätelmät mittauksista.....	54
8. Suomalaisten ikkunoiden rikkoutumisen estäminen.....	56
9. Yhteenveto.....	57
Lähdeluettelo.....	59
Liitteet A–F: Ohjeet eri toimijoille	



# 1. Johdanto

Suomalaisissa ikkunoissa on alettu käyttää eristyslaseissa selektiivilaseja ja täytekaasua energiankulutuksen pienentämiseksi. Tämä uuden teknologian soveltaminen on tuonut mukanaan eristyslasiin rikkoutumisongelman, jota tässä mittakaavassa ei ollut tavallisilla laseilla varustetuissa ikkunoissa.

Ennen tutkimusprojektin käynnistämistä selektiivilasilla varustettujen ikkunoiden osuus oli noin 20 % tuotannosta, mutta nykyisin lähes kaikki uusien rakennusten ikkunat ovat sellaisia, koska Suomen rakentamismääräyskokoelmassa olevia lämmöneristemääräyksiä kiristettiin lokakuussa 2003 siten, että ikkunoiden keskimääräisen lämmönläpäisykertoimen arvo saa olla enintään 1,4 W/m<sup>2</sup>K. Kiristyneiden lämmöneristemääräysten täyttäminen edellyttää selektiivilasin käyttöä ikkunoissa ja kiinteissä ikkunoissa lisäksi myös argonkaasua eristyslasiin kaasutilassa, mikäli ikkunoiden huonompaa lämmöneristävyttä ei kompensoida muilla vaatimustasoa paremmin lämpöä eristävillä rakennusosilla. Näin ollen hyvin lämpöä eristävien ikkunoiden ja ongelmien määrä tulevaisuudessa moninkertaistuu, mikäli rikkoutumisongelmaan ei keksitä ratkaisua.

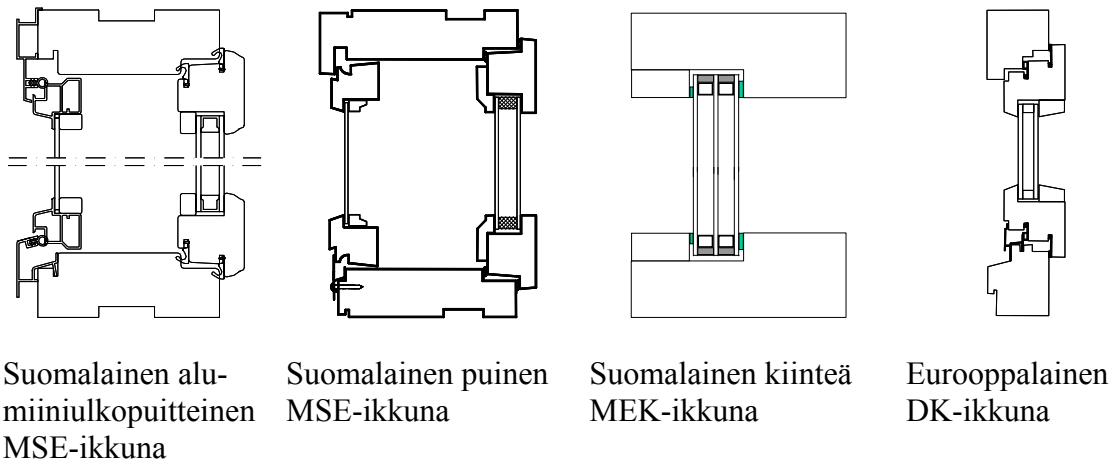
Suomessa on kesäisin rikkoutunut sälekaihtimilla varustettuja ikkunoita ja erityisesti kesällä 1999 rikkoutuneita oli poikkeuksellisen suuri määrä. Tyypillistä näille ikkunoille oli, että ne olivat MSE-tyyppisiä ja niissä oli selektiivilasi, eristyslasiin täytekaasuna joko argon tai krypton ja että puitteiden välissä oli sälekaihdin. Vuosina 1999 ja 2000 Suomessa rikkoutui arviolta 500–1 000 eristyslasiä vuosittain. Jos arvioidaan yhden lasin vaihtokustannuksiksi 150 €, aiheutui rikkoutumisista ikkuna- ja eristyslasi-tehtaille 75 000–150 000 €:n vuosikustannukset. Tämän tutkimuksen tarkoituksena on pienentää lasien rikkoutumisten määrää ja rikkoutumisista aiheutuvia turhia vaihtokustannuksia.

Projektin päätavoitteina oli selvittää suomalaisten ikkunoiden kestävyys ja toimivuuden kannalta ääri-ilmastot ja muut käyttöä rajoittavat tekijät. Projektissa selvitettiin muun muassa seuraavia tekijöitä: eristyslasiin rikkoutumisen syyt, rikkoutumismekanismit ja käyttöolosuhteiden rajat, sälekaihtimien pinnoitteiden vaikutus kestävyyteen sekä rakenteelliset mahdollisuudet pienentää ikkunoiden rikkoutumisherkkyttä.

Havaittujen rikkoutumisten syiden selvittäminen on tärkeää myös siksi, ettei sinänsä hyvä tuote leimaudu huonoksi sen vuoksi, että sitä käytetään väärissä olosuhteissa tai siinä on jokin rakenteellinen ongelma, joka voidaan korjata. Hyvänä esimerkkinä leimautumisesta on 1970-luvulla Suomessa eristyslasiin huonoista raaka-aineista ja puutteellisista valmistusmenetelmistä aiheutuneet kestävyysongelmat, joiden vuoksi lasit ”harmaantuivat” nopeasti. Tämän seurauksena vielä nykyäänkin on ihmisiä, jotka eivät osta eristyslasiin varustettuja ikkunoita taloonsa, vaikka eristyslasi-ikkunoilla on saavutettavissa parempi lämmöneristävyys ja niillä on muitakin hyviä ominaisuuksia.

## 2. Suomalaisen ikkunoiden erityispiirteet

Suomalaiset ikkunat poikkeavat keskieurooppalaisista ja yhdysvaltalaisista kahdessa suhteessa: Suomessa ikkunoissa on kolme lasia ja kaksi puitetta, eurooppalaisissa ikkunoissa on kaksi lasia ja yksi puitte tai ikkuna on kiinteä. Kolmesta lasista ja suomalaisista seinän paksuista lämmöneristeistä johtuen myös ikkunoiden karmisyyvyys on eurooppalaisia suurempi. Näiden molempien tekijöiden vuoksi suomalaisten ikkunoiden lämmöneristävyys on myös parempi.

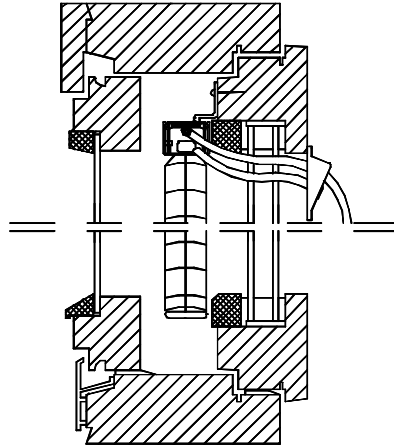


*Kuva 1. Tyypillisiä suomalaisia ja eurooppalaisia ikkunoita.*

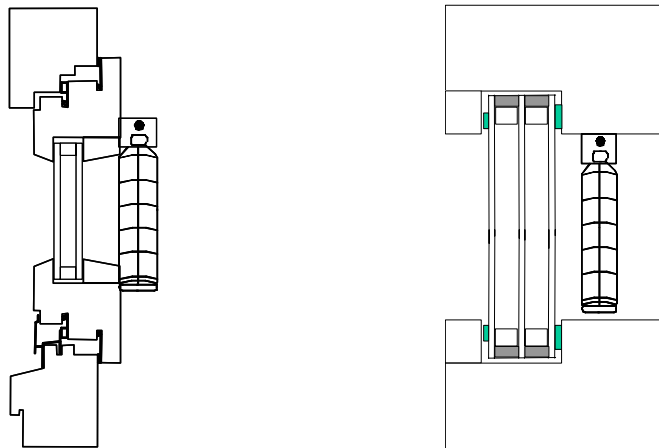
Keski-Euroopassa sälekaihtimet ovat paljon harvinaisempia kuin meillä Suomessa. Kaksilasiseen eristyslasi-ikkunaan sälekaihtimet asennetaan ikkunan sisäpinnalle. Toinen harvoin käytetty vaihtoehto on asentaa ikkunaan erikoiseristyslasi, jossa kaihtimet on asennettu kaasutilaan lasien väliin. Suomalaisessa kaksipuitteisessä ikkunassa sälekaihtimet asennetaan yleensä pöly- ja kosketussuojaan puitteiden väliin (kuva 2). Lämpötekniisesti tämä on paras paikka torjuttaessa auringon lämpösäteilyä, sillä kaihtimet on eristetty kahdella lasilla sisätiloista ja näin auringosta lämmenneet kaihtimet eivät lämmitä kovinkaan tehokkaasti sisätiloja. Yksipuitteisen ja kiinteän eristyslasi-ikkunan sisäpinnalla olevat kaihtimet ovat suoraan kosketuksissa sisäilmaan, jolloin kaihtimiin absorboitunut auringon säteily lämmittää tehokkaasti myös sisäilmaa.

Sälekaihtimet eivät aiheuta ainoastaan MSE-ikkunan eristyslasin rikkoutumisriskiä, vaan avattavan ja kiinteän (kuva 3) eristyslasi-ikkunan sisäpinnalla oleva sälekaihdin voi kuumentaa eristyslasin niin kuumaksi, että sisin lasi voi rikkoutua. Tästä rikkoutumisriskistä on useita varoituksia ulkomaisessa kirjallisuudessa ja lasivalmistajien verkkosivuilla. Ongelman välttämiseksi ohjeissa varoitetaan käyttämästä tummia kaihtimia ja esitetään 30–50 mm:n rakoa lasin ja kaihtimen väliin sekä samansuuruisia rakoa ikkunapielen ja kaihtimen väliin ikkunan ylä- ja alareunassa. Näillä raoilla varmistetaan riittävä ilmankierto lasin ja kaihtimen välissä ja estetään lasin liikalämpäminen.

Erityisesti varoitukset koskevat rakennuksia, joissa lasi voi olla osittain varjostettuna joko ympäristön, seinä- tai ikkunarakenteen vuoksi. Niihin tilanteisiin suositellaan joko kyseisen lasin käyttöä karkaistuna tai toisen lasityypin valintaa. Lisäksi jotkut lasivalmistajat varoittavat talviaikaan rakennettavissa rakennuksissa eristyslasi-ikkunoiden rikkoutumisriskistä, mikäli rakennus ei ole lämmitetty.



*Kuva 2. Sälekaihdin MSE-ikkunan puitteiden välissä.*



*Kuva 3. Sälekaihdin yksipuitteisen ja kiinteän ikkunan sisäpinnalla.*

### 3. Lasin ominaisuuksia

Lasi materiaalina on erittäin lujaa, mutta haurasta ja sen lujuusominaisuuksiin liittyy suuri hajonta. Lasin lujuusominaisuuksien erikoisuuksien ymmärtäminen auttaa ikkunoiden kestävyyyteen liittyvien tekijöiden selvittämisessä. Ikkunoiden kestävyyyteen vaikuttavat myös lämpötekniset ominaisuudet, kuten lämmönjohtavuus, auringonsäteilyn absorptiokerroin, lämpösäteilyn läpäisy ja pinnan emissiviteetti.

#### 3.1 Tasolasin tekniset ominaisuudet

Ohessa on esitetty ne lasin tekniset ominaisuudet, joilla on merkitystä lasin käytölle ikkunoissa kestävyuden ja lämmöneristävyuden kannalta. Seuraavassa luvussa tarkastellaan lähemmin lasien rikkoutumisen kannalta merkityksellistä lasin lujuutta.

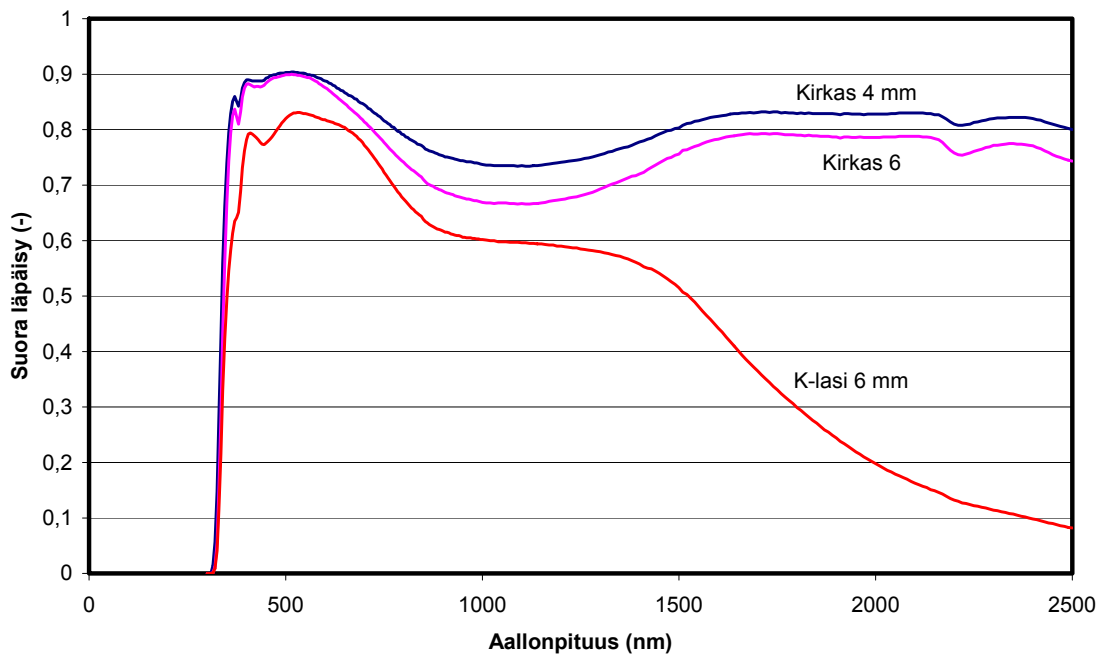
*Taulukko 1. Tasolasin teknisiä ominaisuuksia (Rainamo et al. 1999).*

<b>OMINAISUUS</b>	<b>Arvo</b>
Tiheys	2500 kg/m <sup>3</sup>
Puristuslujuus	~1000 MPa
Vetolujuus	20–100 MPa
Taivutusvetolujuus	20–100 MPa
Kimmokerroin	70000 MPa
Poissonsuhte	0,25
Lämmönjohtavuus	1 W/m K
Ominaislämpökapasiteetti	0,84 kJ/kg K
Lämpöpiteneiskerroin	5–9 x 10 <sup>-6</sup> 1/K
Pinnan emissiviteetti	0,837

Lasien auringonsäteilyn kannalta oleelliset ominaisuudet riippuvat lasin pinnoitteista ja seosaineista. Taulukossa 2 on tarkasteltu esimerkinomaisesti Pilkingtonin valmistamien tasolasien valo- ja aurinkoteknisiä ominaisuuksia. Nämä ominaisuudet ovat valmistaja-kohtaisia ja riippuvat myös lasin paksuudesta, kuten kuvasta 4 voidaan havaita. Tässä kuvassa esitetyt arvot perustuvat yhdysvaltalaisen ikkunoita luokittelevan järjestön, National Fenestration Rating Council (NFRC), tekemiin mittauksiin.

Taulukko 2. Pilkingtonin erilaisten 4 mm:n tasolasien valo- ja aurinkotekniset ominaisuudet.

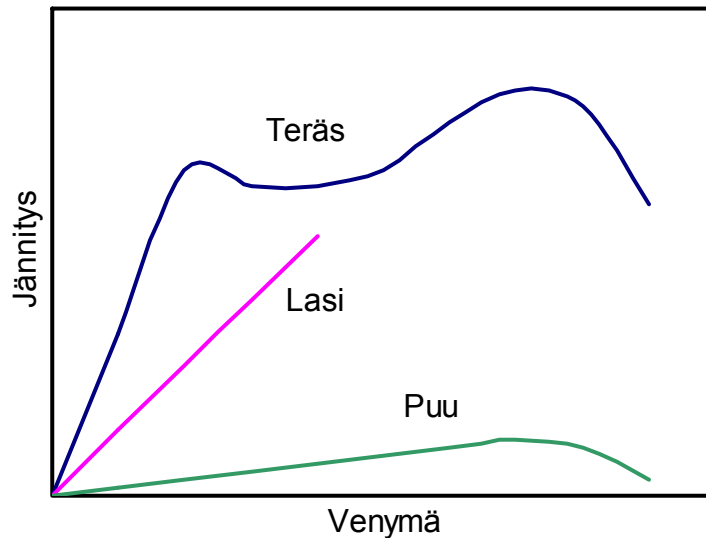
Lasityyppi	Lasityyppi	Valonläpäisy	Auringonsäteily	
			Absorptio	Läpäisy
Optifloat	kirkas float	90 %	10 %	83 %
Optiwhite	vähärautainen lasi	92 %	1 %	91 %
K-lasi	selektiivilasi	83 %	17 %	71 %
Optifloat harmaa	auringonsuojalasi	55 %	40 %	54 %
Optifloat vihreä	auringonsuojalasi	80 %	39 %	55 %
Optifloat pronssi	auringonsuojalasi	61 %	6 %	56 %



Kuva 4. Eräiden Pilkingtonin valmistamien lasien spektrinen läpäisy auringonsäteilyn aallonpituusalueella (NFRC).

### 3.2 Lasin lujuus

Lasi on kova ja hauras aine. Kun vetojännitys ylittää lasin lujuuden, lasi rikkoutuu yhtäkkiä palasiksi ja menettää kaiken kuormitettavuutensa. Metalleilla ja puulla jännityksen saavuttaessa lujuusrajan niihin alkaa muodostua pysyviä muodonmuutoksia, mutta ne säilyvät ehjinä ja lopullinen murtuminen tapahtuu suurien muodonmuutosten jälkeen (kuva 5).



Kuva 5. Lasin, puun ja teräksen jännitys-venymäkäyrä (Button 1993).

Lasin puristuslujuus on niin suuri vetolujuuteen verrattuna, että rikkoutumisen kannalta vain vetolujuudella on merkitystä. Lasin teoreettinen vetolujuus on atomien välisiin sidoksiin perustuen 21 000 MPa. Juuri vedetyistä lasikuiduista on mitattu jopa 5 000 MPa:n vetolujuuksia, ja lujitemuovissa lasikuitujen lujuus on noin 1 200 MPa. Tasolasin vetolujuus on kuitenkin yleensä alle 100 MPa (Button et al. 1993).

Tasolasin teoriaa huonompi vetolujuus johtuu lasissa olevista näkymättömän pienistä virheistä, Griffithin säröistä, jotka heikentävät atomien välisiä sidoksia. Näiden lisäksi lasin pinnassa on suurempia vikoja, kuten naarmuja ja lohkeamia. Lasin rikkoutuminen alkaa näistä vikakohdista, ja jännityksen kasvaessa tietyssä jännitystilassa särö alkaa kasvaa suurella nopeudella, jolloin lasi rikkoutuu. Näitä säröjä esiintyy erityisesti lasin reunoissa, ja niiden syntyyn vaikuttavat muun muassa lasin leikkaaminen ja käsittely. Lasin pinnalla oleva lika ja ilman kosteus heikentävät lasin atomien välisiä sidoksia ja mahdollistavat särön kasvun (lasin rikkoutumisen) alkuperäistä pienemmällä jännitystasolla. Samoin pitkä kuormitusaika ja dynaaminen kuormitus saavat säröt kasvamaan ja lasin rikkoutumaan hetkellisen kuormituksen lujuutta pienemmällä jännitystasolla.

TKK:ssa tutkittiin Tekesin rahoittamassa projektissa (Tenhunen 2003) lasin taivutusvetolujuutta 8 x 50 x 320 mm<sup>3</sup> -kokoisilla lasiprismoilla. Kokeita tehtiin kymmenellä rinnakkaisella näytteellä ja tutkittuja lasi- ja reunakäsittelytapauksia oli yhteensä kahdeksan. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

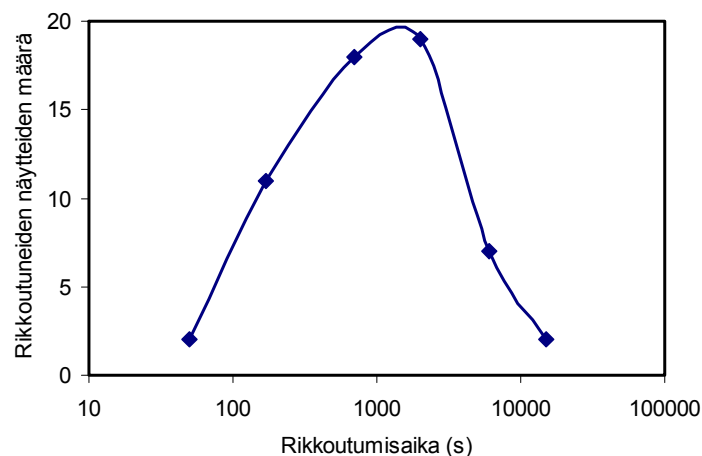
Kokeet tehtiin huonelämpötilassa ja lasit kuormitettiin rikki 15 s – 2 min aikana, joten lujuusarvot ovat hieman optimistisia ajatellen lasin lujuutta ikkunassa. Ikkunassa kuormittuminen on hitaampaa ja lämpötila on korkeampi, mitkä molemmat olosuhde-muutokset heikentävät lasin lujuutta. Taulukosta on havaittavissa, että muiden kuin kiil-

toreunahiottujen lasien lujuus on pienempi kuin leikkauksen jälkeen käsittelemättömien lasien lujuus. Toisaalta reunan hiomisella voidaan pienentää lujuusarvojen hajontaa, ja kiiltoreunahionnalla saavutetaan suurin lujuus näistä kahdesta. Lämpölujitettu ja lämpökarkaistu lasi kestää 2–3-kertaisesti sen, minkä tavallinen float-lasi.

*Taulukko 3. Erilaisten ja eri tavoin käsiteltyjen lasiprismojen taivutusvetolujuus (Tenhunen 2003).*

Lasityyppi	Reunakäsittely	Lujuuskeskiarvo MPa	Keskiahajonta MPa
float	käsittelemätön	62	12
float	särmien hionta	48	6
float	raakareunahionta	52	4
float	kiiltoreunahionta	65	5
lämpölujitettu	raakareunahionta	147	10
lämpölujitettu	kiiltoreunahionta	164	9
lämpökarkaistu	raakareunahionta	185	12
lämpökarkaistu	kiiltoreunahionta	204	7

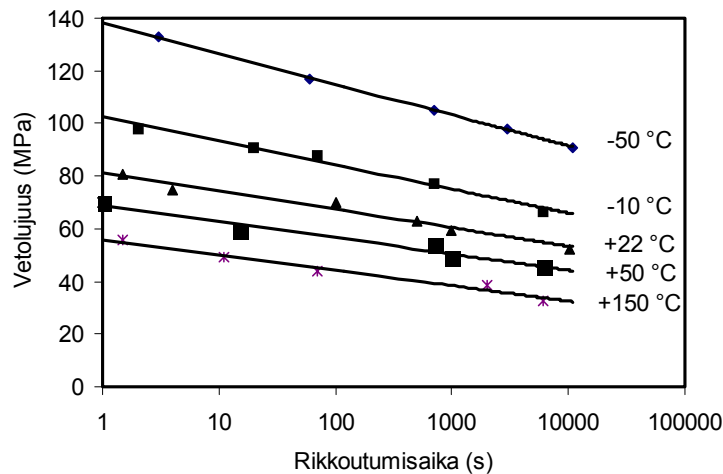
Rawsonin mukaan lasin lujuuteen vaikuttavat lasin koko, lasin rakennevikojen esiintyminen, kuormitus aika, dynaamisen kuormituksen aiheuttama väsyminen (Rawson 1980). Tämän lisäksi lujuuteen vaikuttavat myös lasiin valmistuksessa jääneet jännitykset.



*Kuva 6. Rikkoutumisaikojen hajonta (Rawson 1980).*

Kuvassa 6 on 60 lasisauvan kuormituskokeen tulokset. Kaikkia lasisauvoja on kuormitettu samalla voimalla. Käyrästä havaitaan, että kaikki ei ole mennyt rikki yhtä nopeasti, vaan todennäköisin rikkoutumisaika on 1 000 sekuntia. Vaihteluväli on kuitenkin laaja

muutamasta kymmenestä yli 10 000 sekuntiin. Kuvassa 7 on tulokset usealla eri kuormitustasolla ja useassa lämpötilassa tehdystä kokeesta. Kuvista voidaan nähdä, että lasin vetolujuudella on suuri hajonta ja lämpötilariippuvuus. Lisäksi on havaittavissa lujuusominaisuuksien aikariippuvuus.



Kuva 7. Rikkoutumisaajan ja vetolujuuden välinen riippuvuus eri lämpötiloissa (Rawson 1980).

Yksittäisen lasilevyn lujuutta ei voi ennustaa. Ainoa tapa selvittää lujuus on koe-kuormittaa riittävä määrä koekappaleita rikki ja määrittää tuloksista tilastollisesti lujuustaso, jonka lasi kestää tietyllä todennäköisyydellä. Kuormittaminen tulee tehdä samalla tavalla ja samalla nopeudella kuin lasi ikkunassa todellisuudessa kuormittuu. Alentamalla lasin jännityksiä, esimerkiksi lasin paksuuksia kasvattamalla, voidaan kestämissen todennäköisyyttä parantaa, mutta milloinkaan ei voida saavuttaa täyttä varmuutta lasin kestämisestä.

Lasin vikojen syntyä ei voida kokonaan estää, mitä suurempi lasilevy on, sitä suurempi on vikojen yhteismäärä. Lasin pinnassa olevat naarmut ja reunoihin käsittelyssä syntyneet vauriot heikentävät lasin lujuutta samoin kuin lasimateriaalissa luontaisesti olevat Griffitin säröt. Tämän vuoksi lasin käsittelyyn ja työstöön tulee kiinnittää huomiota.



## 4. Ikkunaan kohdistuvat rasitukset

Ikkunaan kohdistuu normaalissa käyttötilanteessa monia rasituksia, joita on listattu taulukossa 4. MSE-ikkunan eristyslasin kestävyys kannalta sälekaihtimella varustetussa ikkunassa lasien korkea lämpötila ja epätasainen lämpeneminen muodostavat päärasituksen. Toisaalta eristyslasin kestävyys ratkaisee eristyslasin jännitystila, joka on eri osatekijöiden aiheuttamien jännitysten summa. Toiset taulukossa listatuista jännityksiä aiheuttavista tekijöistä voivat vähentää kokonaisjännitystä. Esimerkiksi ilmanpaineen kasvaminen vähentää lasin sisältämän kaasun lämpenemisestä aiheutuvan paineen vaikutusta.

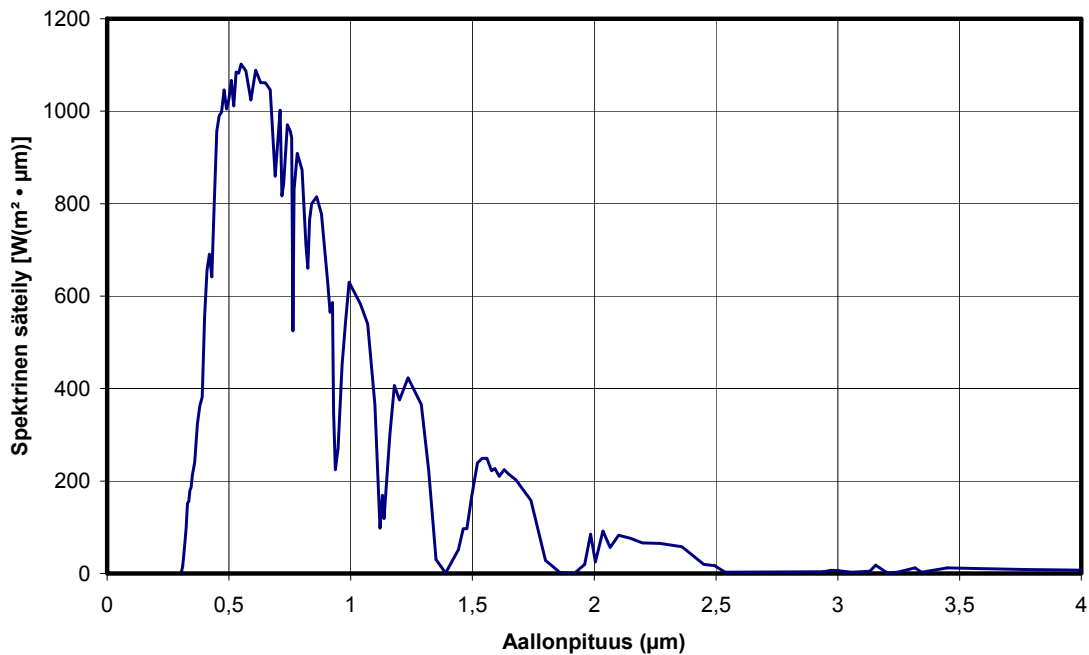
*Taulukko 4. Suomalaisen MSE-ikkunan eristyslasiin jännityksiä aiheuttavat tekijät ja keinot parantaa ikkunan kestävyyttä.*

<b>Rasituksiin vaikuttavat</b>	<b>Kestävyysvaikutukset</b>
Ikkunan koko	Lasien paksuudet
Ikkunan muoto	Lasien reunaviat
Lasien paksuudet	Kuormituksen kestoaika
Lasien etäisyys	Lasien lujuudet
Argonin poistuminen	Lasin lämpötila
Lasin jäännösjännitys	
Lämpötila	
Epätasainen lämpeneminen	
Lasien väliset lämpötilaerot	
Painovoima	
Tuulenpaine	
Ulkoinen ilmanpaine	
Estetyt lämpöliikkeet	
Puitteen kosteusliikkeet	
Epätasainen tuenta	
Puitteen kierous	

### 4.1 Lämpöjännitykset

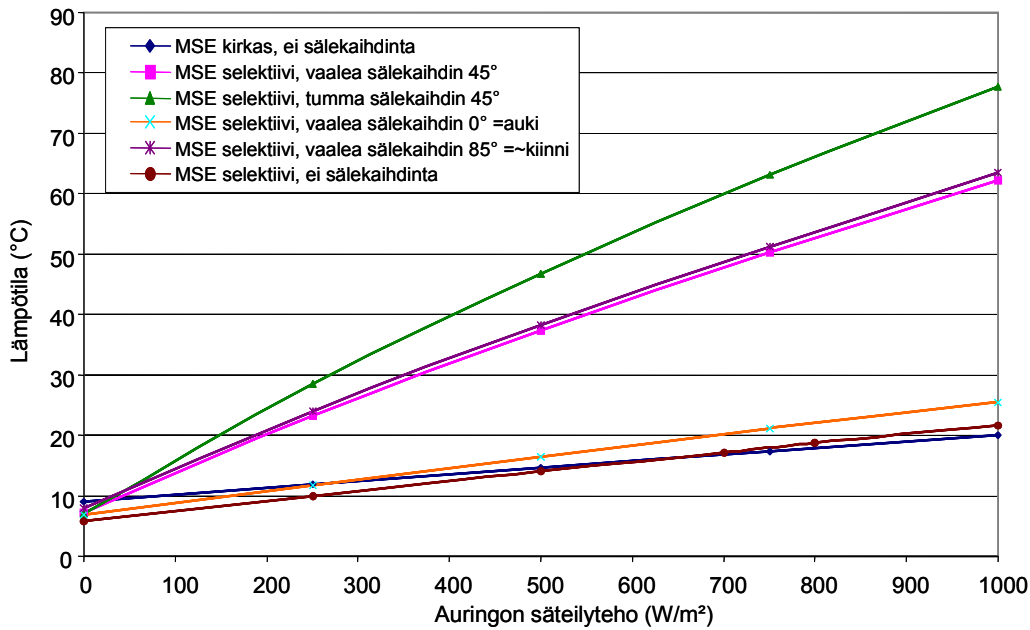
Maan pinnalle tulevasta auringon säteilyenergiasta on noin puolet ultraviolettia (280–380 nm) ja näkyvän valon alueella (380–700 nm) ja toinen puoli lyhytaaltoisen infrapunasäteilyn aallonpituudella (700–4 500 nm). Lasi läpäisee pääosin auringon säteilyn,

mutta pitkäaaltoinen lämpösäteily (>3 500 nm) absorboituu lasiin lähes täysin. Kuvassa 8 on esitetty maanpinnalle kohtisuoraa pintaa vasten tulevan auringonsäteilyn spektri. Käyrässä olevat kuopat aiheutuvat ilman sisältämien kaasujen absorptiosta. Kokonaissäteily kohtisuoralle pinnalle on enimmillään noin 1 350 W/m<sup>2</sup>. Tätä arvoa vähentää auringonsäteilyn kulku vinosti ilmakehän läpi, ilmassa oleva kosteus ja ilman epäpuhtaudet. Suomessa auringon säteilyteho aurinkoa vastaan olevalle kohtisuoralle pinnalle ylittää harvoin 1 000 W/m<sup>2</sup>.



*Kuva 8. Auringonsäteilyn spektrinen säteilyteho kohtisuoraa pintaa vasten maanpinnan tasolla.*

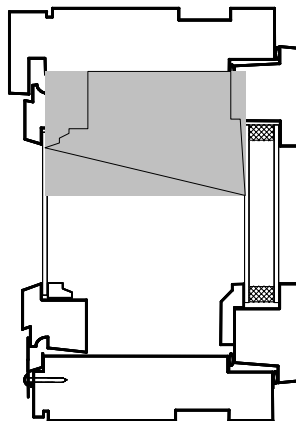
Yksittäiset lasit voivat tyypistä riippuen absorboida auringon säteilytehosta 1–50 %, joten aurinko voi lämmittää lasin hyvinkin kuumaksi. Lasi kestää huomattavan suuria lämpötiloja, jos se lämpenee kauttaaltaan tasalämpöiseksi. Mikäli lasi lämpenee epätasaisesti, siihen muodostuu epätasaisesta lämpölaajenemisesta aiheutuvia jännityksiä ja muodonmuutoksia. Näistä jännityksistä vetojännitykset ovat haitallisimpia, koska lasi kestää niitä huonoiten.



Kuva 9. WIS-ohjelmalla laskettu MSE-ikkunan keskilasin lämpötila eri säteilytehoilla.

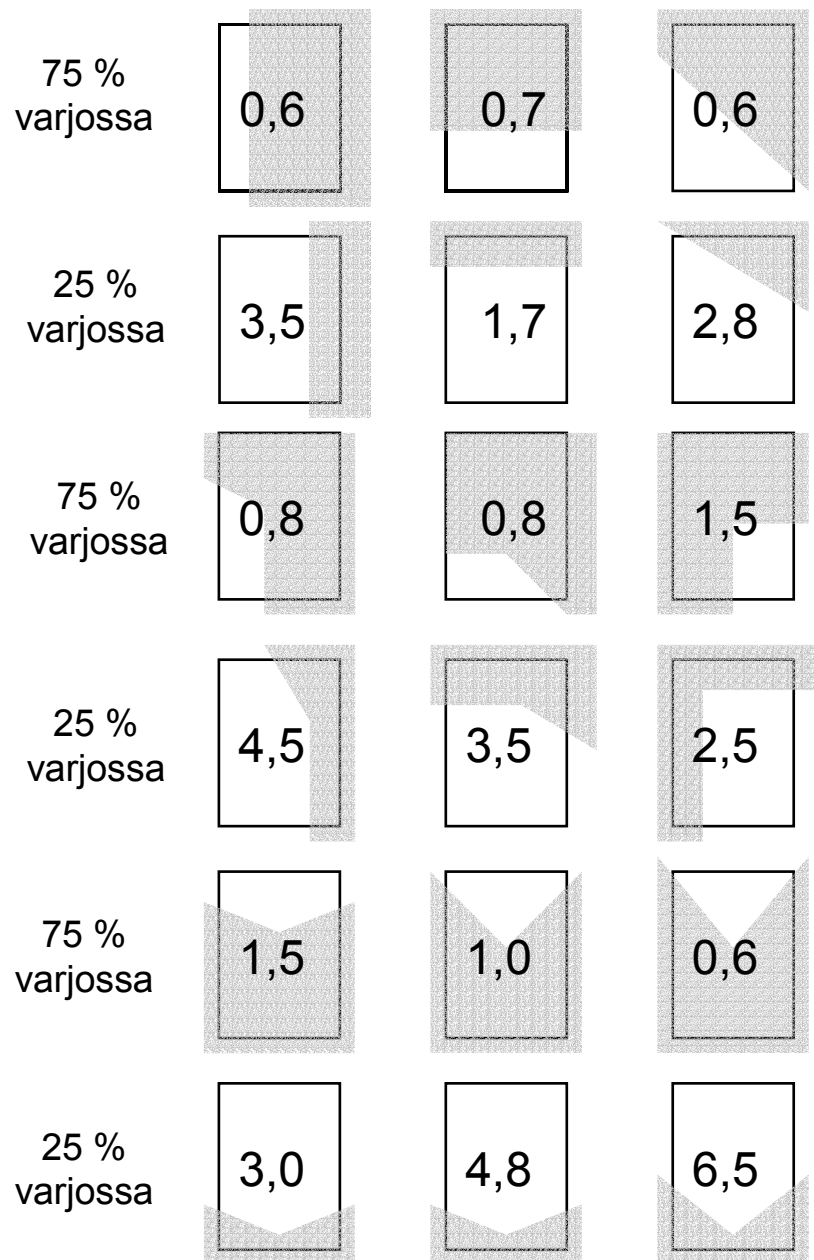
Lämpöjännitysten kannalta on oleellista ikkunan eri pintojen auringonsäteilyn absorptiot. Tärkeimmässä asemassa ovat lasit ja sälekaihdin. Oheisessa kuvassa 9 ovat WIS-ohjelmalla lasketun MSE-ikkunan keskilasin lämpötilat. Laskennassa ulkoilman lämpötilana käytettiin 0 °C ja sisäilman lämpötilana +20 °C. Tuloksista voidaan havaita, että kaihtimien värillä on suuri merkitys lämpötiloihin (kolme ylintä käyrää).

Lämpöjännitys on osittain tai kokonaan estettyä lämpölaajenemisesta aiheutuvaa liikettä, ja se syntyy ikkunaan, kun eristyslasin reunan ja lasin keskikohdan välille muodostuu lämpötilaero. Tällainen tilanne syntyy, kun eristyslasin reunat ovat varjossa ja aurinko paistaa lasin keskiosaan. Lämpöjännitystä lisää osaltaan eristyslasien eri lasikerrosten välinen lämpötilaero, jolloin eri lasikerrokset laajenevat eri tavalla.



Kuva 10. Syvän karmirakenteen aiheuttama varjostus.

Eristyslasin reuna-alueiden lämpenemistä hidastavat varjot, eristyslasin välilistan suuri lämmönjohtavuus ja eristyslasin upottaminen puitteen tai karmin sisään. Eristyslasin reunoihin varjoja aiheuttavat suomalaisten ikkunoiden syvät karmit ja paksut seinät (kuva 10). Vaikkakin aurinko paistaa Suomessa matalammalta kuin Keski-Euroopassa, varjostuksilla on kuitenkin merkitystä, kuten rakennuksessa tehdyistä mittauksista on havaittavissa (luku 7).



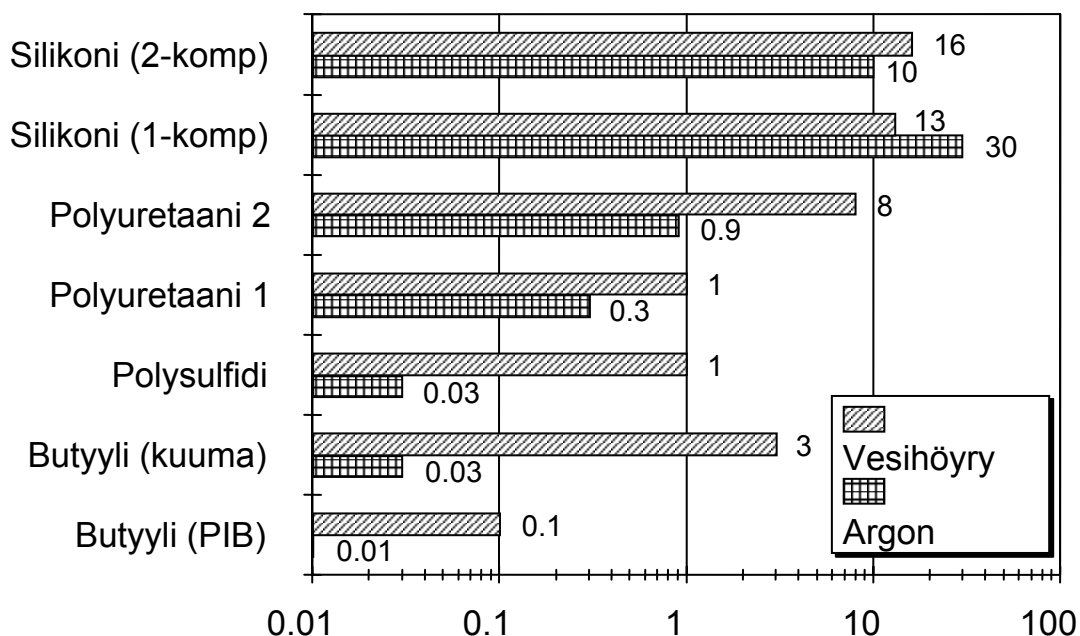
Kuva 11. Erityyppisistä varjostuksista aiheutuva jännitysten moninkertaistuminen verrattuna ikkunaan, jonka koko pintaan kohdistuu auringonsäteily (PPG Industries Inc 2002).

Julkaisussa (PPG Industries Inc 2002) on esitetty erilaisten yksi- ja kaksilasisten ikkunoiden maksimijännitysten yksinkertaistettu arviointimenetelmä. Samassa julkaisussa on esitetty eräiden varjostustyyppien vaikutus ikkunan lasin jännitystasoon verrattuna varjostamattomaan ikkunaan (kuva 11). Kuvassa olevien ikkunoiden sisällä on kerroin, jolla saadaan kussakin varjostustilanteessa ikkunalasien maksimijännitys kertomalla varjostamattoman ikkunan jännitys sillä. Kuvasta havaitaan, että pahin tilanne on silloin, kun ikkunan alareuna on varjossa. Tällainen tilanne voi syntyä, jos viereinen talo tai lähellä olevien puiden latvat varjostavat ikkunoiden alareunaa.

Alareunan varjostus on huomattavasti huonompi tilanne kuin yläreunan varjostus, sillä lämmin ilma noustessaan ylös lämmittää varjossa olevaa ikkunan yläosaa, mutta varjossa olevaa alaosa ei lämmitä muu kuin johtuminen lasissa ja karmissa.

## 4.2 Eristyslasin sisäinen paine

Lasin lämpöjännitykseen läheisessä yhteydessä oleva jännitystä aiheuttava kuormitus on eristyslasin sisällä olevan kaasun laajeneminen tai kutistuminen lämpötilan noustessa tai laskiessa tai ilmanpaineen vaihtelujen seurauksena esimerkiksi valmistus- ja rakennuspaikan korkeuserojen vuoksi. Rasituksena tämä painevaihtelu on yhtä merkittävässä roolissa kuin lasin epätasainen lämpeneminen, ja se voi jopa yksinään rikkoa esimerkiksi pakkaseen varastoidun eristyslasin.



Kuva 12. Vesihöyryn ja argonin diffuusionopeus eristyslasin massojen läpi (Unger 9/1991, Chemetal GmbH 1995).

Kuvassa 12 on esitetty argonin diffuusionopeus eristyslasin sisältä ja vesihöyryn diffuusionopeus eristyslasin sisälle. Tuloksista voidaan havaita, että näillä eri kaasuilla on satakertaiset nopeuserot joillakin saumausmassoilla. Nämä diffuusionopeudet voivat vaihdella materiaalikohtaisesti varsin laajasti, joten kuvan arvoja tulee pitää suuntaa-antavina. Näitä tietoja ei ole yleensä julkisesti saatavilla, koska massavalmistajat pitävät niitä yrityssalaisuuksina. Erilaiset diffuusionopeudet voivat aiheuttaa joko yli- tai alipainetta eristyslasien sisälle. Yhdysvaltalaisessa lehtiartikkelissa on viitteitä siitä, että ilmiöstä on joissain tapauksissa haittaa. Siinä kerrotaan argontäytteisten lasien räjähtämisestä sisäänpäin alipaineen vuoksi (Jaugelis 4/1999). Jotta laseja rikkovia alipaineita syntyisi, argonin diffuusionopeus tulee olla tavanomaista suurempi (yli 1 % vuodessa). Tämän tyyppisessä ongelmassa ratkaisevassa asemassa ovat argonin, typen, hapen ja vesihöyryn diffuusionopeudet sekä niiden keskinäiset erot.

Eristyslasin sisäiseen paineeseen vaikuttaa edellä mainittujen tekijöiden lisäksi lasien välinen etäisyys. Jos eristyslasi on suuri ja välilista on kapea, alle 10 mm, lasilevyt toimivat kalvomaisesti, painevaihtelut eivät ole kovin suuria. Jos eristyslasi on kohtuullisen pieni ja lasiväli suhteellisen suuri (15 mm tai enemmän), painevaihtelut voivat olla niin suuria, että ne yksinään riittävät rikkomaan eristyslasin. Kolmilasinen eristyslasi toimii kuin kaksilasinen, jonka lasiväli on kolmilasisen eristyslasin lasivälien summa, mikäli paineet kummassakin lasivälissä ovat samat. Tällöin keskimäinen lasi pysyy suorana ja pintojen lasit taipuvat.

### **4.3 Muut jännityksiä aiheuttavat tekijät**

Edellä mainittujen jännityksiä aiheuttavien tekijöiden lisäksi jännityksiä voi MSE-ikkunan eristyslasiin aiheuttaa muun muassa puitteen käyristyminen, joka voi aiheutua lukituksesta, saranoista kosteusliikkeistä tai puutavaran kieroutumisesta. Muita kuormituksia aiheuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi tuulenpaine, painovoima ja pistemäinen puristus, jonka voi aiheuttaa esimerkiksi lasituslistan kiinnitysnaulan koskettaminen lasiin tai puitteen ja lasin välissä oleva roska.

Nämä kuormitukset ovat luonteeltaan joko pitkäaikaisia (esimerkiksi painovoima ja puitteen käyristyminen) tai lyhytaikaisia (esimerkiksi tuulenpaine tai räjähdysten aiheuttama paineaalto). Lasi kestää lyhytaikaisia kuormituksia huomattavasti paremmin, joten lyhyt- ja pitkäaikaisten aiheuttamat rasitukset tulee tarkastella erikseen.

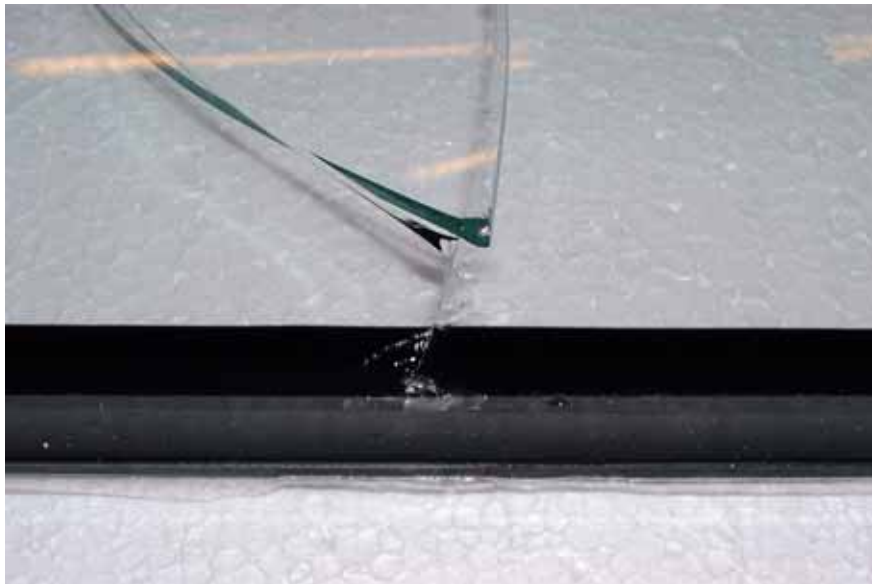
## 4.4 Lasin rikkoutumistyytit

Lasin suuren puristuslujuuden vuoksi lasi rikkoutuu aina siitä syystä, että vetojännitys ylittää paikallisesti lasin vetolujuuden. Seuraavassa tarkastellaan vain ei-karkaistun float-lasin rikkoutumisen aiheuttamia rikkoutumiskuvioita ja -syyt. Karkaistun lasin rikkoutumiskuviot ja -syyt ovat erilaisia kuin ei-karkaistulla lasilla.

Rikkoutumiseen on lähes poikkeuksetta jokin ulkopuolinen syy, mutta valmistuksen yhteydessä lasiin jääneet jännitykset edesauttavat rikkoutumista. Eristyslasin rikkoutuminen aiheutuu kuitenkin harvoin vain yhdestä kuormitustekijästä. Yleensä rikkoutuminen on usean kuormitustekijän summa, joista yksi tai kaksi tekijää on muita merkittävämmässä asemassa. Rikkoutumiskuvion perusteella voidaan kuitenkin tavallisesti päätellä, mikä on ollut rikkoutumisen pääsyy.

### Lasin reunan vetojännitystila

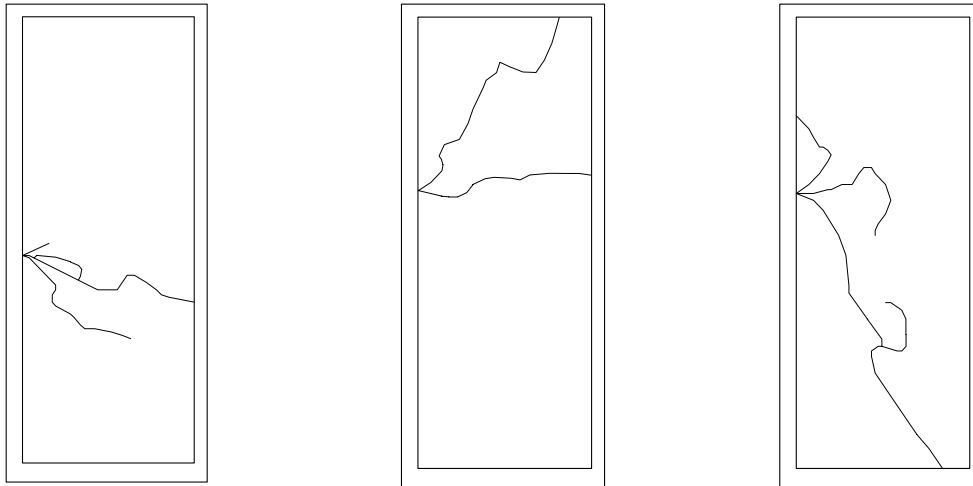
Lasin pinnan suuntainen vetojännitys ylittää lasin lujuuden lasin reunassa. Halkeama lähtee liikkeelle lasin reunassa olevasta viasta ja etenee suhteellisen hitaasti jännityshuippujen mukaisesti kaarrellaan lasin toiseen reunaan. Halkeama voi olla joko haarautumaton tai haarautunut muutamaosaan. Tyypillistä tämäntyyppiselle halkeamalle on, että se on alkukohdastaan kohtisuorassa lasin pintaa ja reunaa vastaan (kuva 13). Särön alkukohta sijaitsee tavallisesti lasin reunan keskikolmanneksessa (kuva 14).



*Kuva 13. Lasin pinnan suuntaisen jännityksen aiheuttama lasin rikkoutuminen. Halkeama on kohtisuorassa lasin pintaa ja reunaa vasten.*

Vetojännityksiä lasin reunaan voivat aiheuttaa muun muassa lasin epätasainen lämpeneminen, lämpötilaero eristyslasin eri lasilevyjen välillä, lasin epätasainen tuenta, lasiin kohdistuva vääntö ja painovoimasta aiheutuvat kuormitukset. Näistä tyypillisin rikkou-

tumista aiheuttava tekijä on eristyslasin keskikohdan lämpeneminen auringon paisteessa reunoja lämpimämmäksi. Tämä on ratkaisevassa asemassa erityisesti niissä ikkunoissa, joissa on sälekaihdin tai joita pestään hyvin harvoin. Ikkunan pintoihin kaupunkiolosuhteissa tarttuva lika on pääosin hienojakoista nokea ja pölyä, joka absorboi tehokkaasti auringon lämpösäteilyä.



*Kuva 14. Eräitä epätasaisen lämpenemisen aiheuttamia lasirikkoja. Tyypillistä näille on särön alkaminen pitkältä sivulta keskimmäisen kolmanneksen alueelta.*

Lämpöjännityksiä voi syntyä myös rakennusaikana, jos ikkunoita suojataan sisäpuolelta kolhuilta esimerkiksi rakennuslevyillä tai lämmöneristeillä. Tutkimuksen aikana havaittiin eräällä pientalotyömaalla kolmen MSE-ikkunan sisäpinnan lasin rikkoutuneen ilmeisesti tästä syystä. Eristyslasin sisäpinnassa oli 6 mm:n selektiivilasi ja ikkunan keskimmäisenä ja uloimpana lasina oli 4 mm:n float-lasi. Nämä paksummat lasit rikkoutuivat todennäköisesti ikkunan sisäpinnalla olevan suojauksen aiheuttamista lämpöjännityksistä. Toinen vaihtoehto on ikkunan sisäpinnan lasin likaantumisen johtuva lisään- tynyt auringonsäteilyn absorptio.

Voimakkaita lämpöjännityksiä aiheuttava tilanne on, jos ikkunan sälekaihdin nostetaan ikkunan puoliväliin. Tällöin ikkunan yläosa kuumenee kaihtimeen absorboituneesta auringon säteilystä alaosan pysyessä viileänä. Rikkoutumista voi tapahtua kaikkina vuodenaikoina, silloin kun aurinko paistaa esteettömästi. Eräässä kiinteistössä havaittiin ikkunan rikkoutuminen tammikuussa juuri tästä syystä.

#### Yli- tai alipaine eristyslasin sisällä

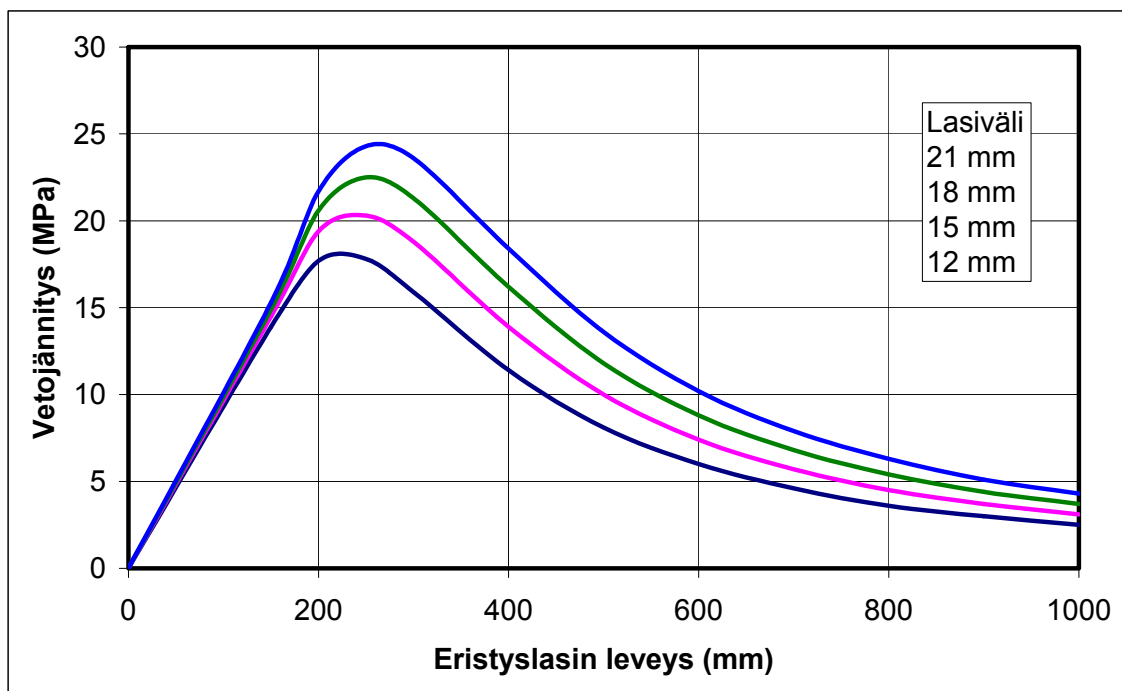
Ylipainetta eristyslasin sisälle voivat aiheuttaa eristyslasin käyttöpaikan ja valmistuspaikan välinen maantieteellinen korkeusero, matalapaine, käyttöhetken valmistushetkeä korkeampi ympäristölämpötila tai eristyslasin sisällä olevan täytekaasun hitaampi vuotaminen tiivistemassojen läpi lasista pois kuin ilman komponenttien tuleminen lasin sisälle.



Yli- tai alipaine aiheuttaa ikkunan räjähtämisen sirpaleiksi, kuten kuvasta 15 on havaittavissa. Ylipaineessa lasi pullistuu ulospäin ja alipaineessa sisäänpäin. Sirpaleet ovat puukkomaisen kapeita. Ne ovat suuntautuneet lasin nurkista keskustaa kohti.

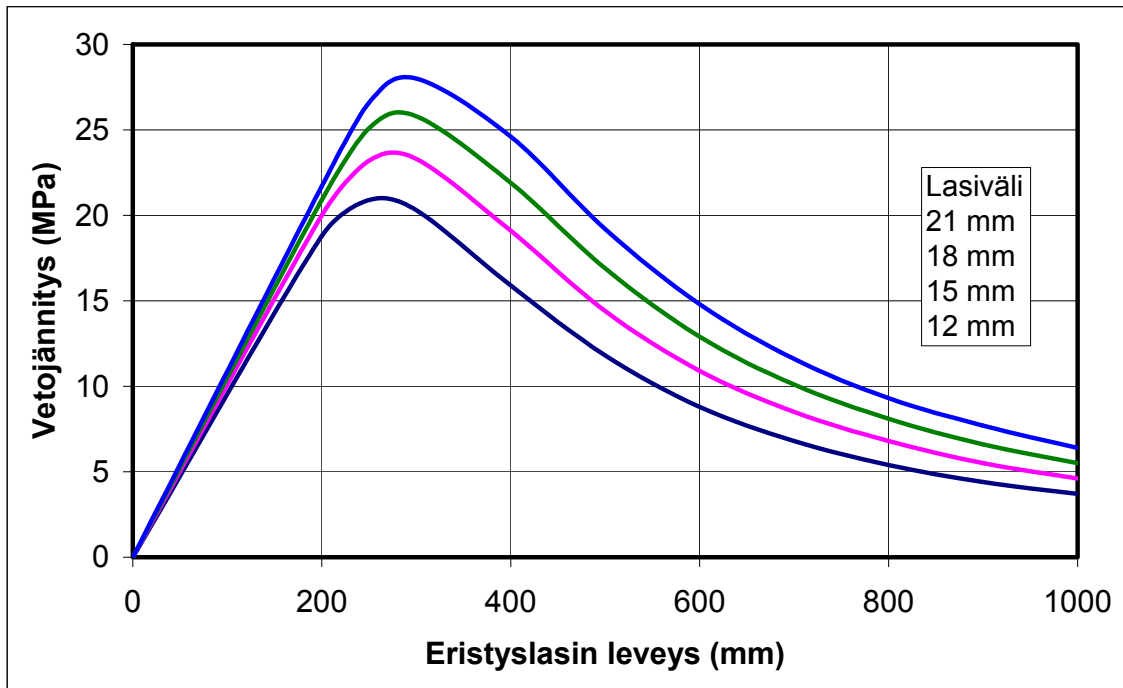


Kuva 15. Lasin sisäisen paineen aiheuttama rikkoutuminen.

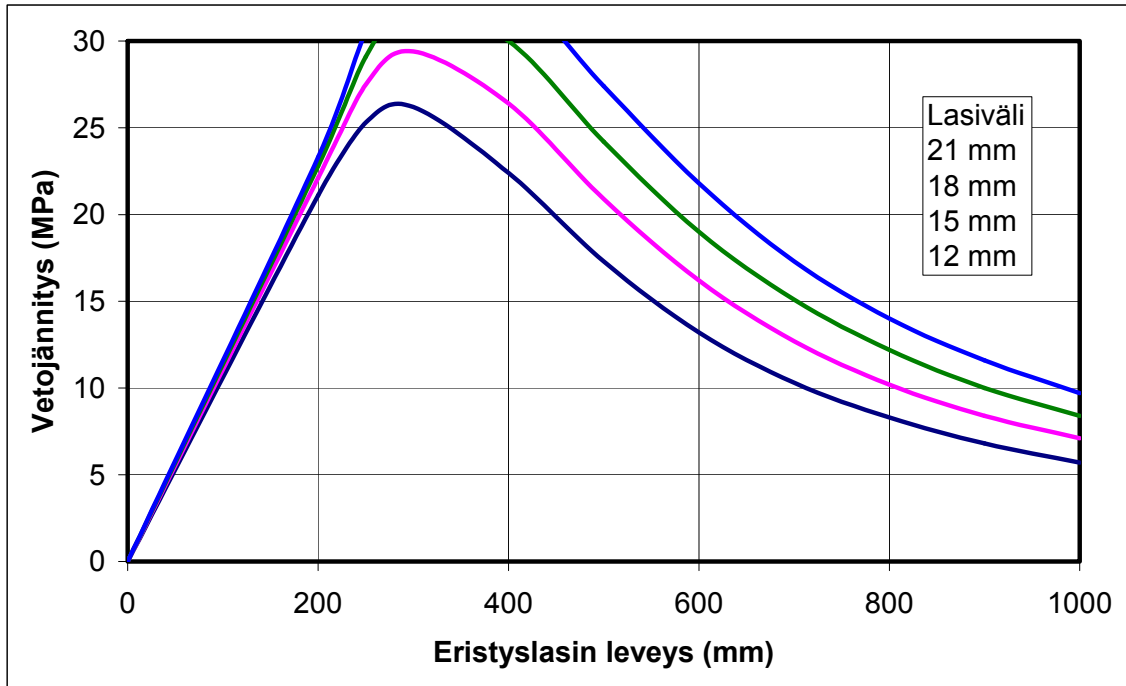


Kuva 16. Eristyslasin 2K3-xx-4 ohuemman lasin maksimivetojännitykset. Eristyslasin korkeus on 1 000 mm.

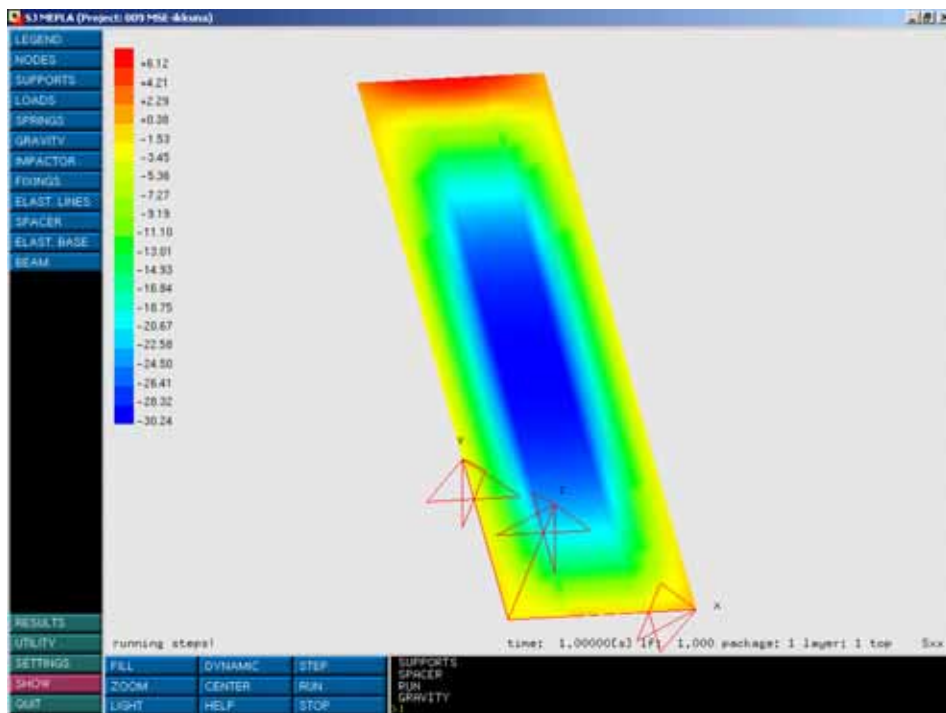
Kuvissa 16–18 on esitetty kaksilasisen eristyslasin maksimivetojännitykset laskettuna SJ MEPLA -ohjelmalla. Laskennassa on oletuksena, että eristyslasin lämpötila muuttuu valmistuksen 20 °C:sta 50 °C:seen. Lasien oletetaan olevan tasalämpöisiä. Kuvissa muuttujina ovat lasin leveys, lasiväli ja lasien paksuudet. Kuvista on havaittavissa, että suurimmat jännitykset tulevat silloin, kun lasiväli on suurin ja eristyslasissa on paksut eripaksuiset lasit.



Kuva 17. Eristyslasin 2K4-xx lasin maksimivetojännitykset. Eristyslasin korkeus on 1000 mm.



Kuva 18. Eristyslasin 2K4-xx-6 ohuemman lasin maksimivetojännitykset. Eristyslasin korkeus on 1 000 mm.



Kuva 19. SJ MEPLA -ohjelman tulostama lasin jännityskenttä.

Ikkunan koolla, muodolla, lasien välisellä etäisyydellä ja lasien paksuudella on merkitystä eristyslasin sisäisen ali- tai ylipaineen aiheuttamaan rikkoutumiseen. Näiden tekijöiden suhteen pätevät seuraavat tosiasiat:

- Ikkunan koon suhteen on tietty vaihteluväli, jolla jännitykset ja rikkoutumisriski ovat tavanomaista suurempia.
- Pitkänomainen ikkuna rikkoutuu helpommin kuin neliömäinen.
- Kolmilasinen eristyslasi rikkoutuu helpommin kuin kaksilasinen, koska kolmilasisen eristyslasin keskimmäinen lasi ei taivu, ja muodonmuutokset kohdistuvat suurempina pintalaseihin.
- Kaksilasisessa eristyslasissa molemmat pintalaset taipuvat, minkä vuoksi muodonmuutokset ja jännitykset ovat näin pienemmät.
- Jos eristyslasin lasit ovat paksuudeltaan erisuuruisia, ohuimpaan lasiin kohdistuvat suurimmat jännitykset ja muodonmuutokset.
- Mitä suurempi on lasien välinen etäisyys, sitä suuremmat ovat kaasunpaineen ja tilavuuden vaihtelut, ja sitä suuremmat muodonmuutokset ja jännitykset kohdistuvat eristyslaseihin.
- Ilma ja muut täytekaasut laajenevat lämmön vaikutuksesta samalla tavalla, ja muuten samanlaisissa eristyslaseissa kaasunpaineet ovat yhtä suuria täytekaasusta riippumatta.

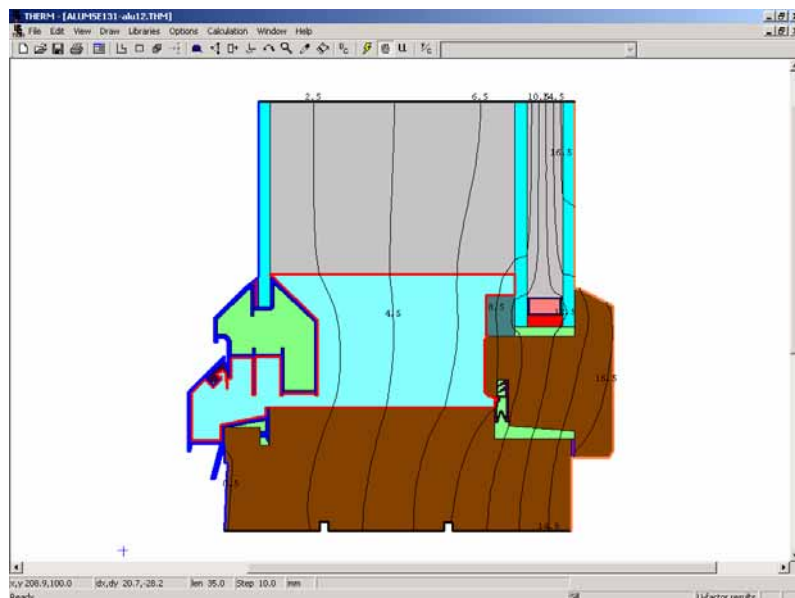
## 5. Jännitystilän määrittäminen

Ikkunan laseissa oleva jännitystila voidaan joko arvioida laskennallisesti tai määrittää optisesti mittaamalla. Seuraavassa on tarkasteltu muutamia eri menetelmiä, joita voidaan käyttää ikkunan jännitystilatarkasteluissa.

### 5.1 Laskennalliset menetelmät

Ikkunan lasi- ja karmiosan lämpötilojen laskentaan on tehty lukuisia ohjelmia. Näistä vanhimmat ovat kanadalainen FRAME, yhdysvaltalainen THERM ja eurooppalainen WIS. Muita ohjelmia ovat muun muassa saksalainen WINISO sekä ruotsalainen ajan suhteen muuttuvien lämpötilojen laskemiseen HEAT2 ja HEAT3. Näillä voidaan ratkaista ikkunan eri osien lämpötilat valituissa hetkellisissä olosuhteissa. WIS poikkeaa muista siinä, että sillä voidaan mallintaa myös ikkunaan liitetty kaihdin ja sen vaikutus lämpötilakenttään. Ohjelmilla ei kuitenkaan voida tarkastella tapauksia, joissa aurinko paistaa vain osaan ikkunan ulkopinnasta.

Ohjelmista FRAME, THERM, WINDOW, FRAME ja WIS ovat ilmaiseksi Internetin kautta ladattavissa. Muut ovat kaupallisia ohjelmia. Nämä kaikki ohjelmat ovat suhteellisen helppokäyttöisiä, ja niillä saadut tulokset eivät poikkea merkittävästi toisistaan.

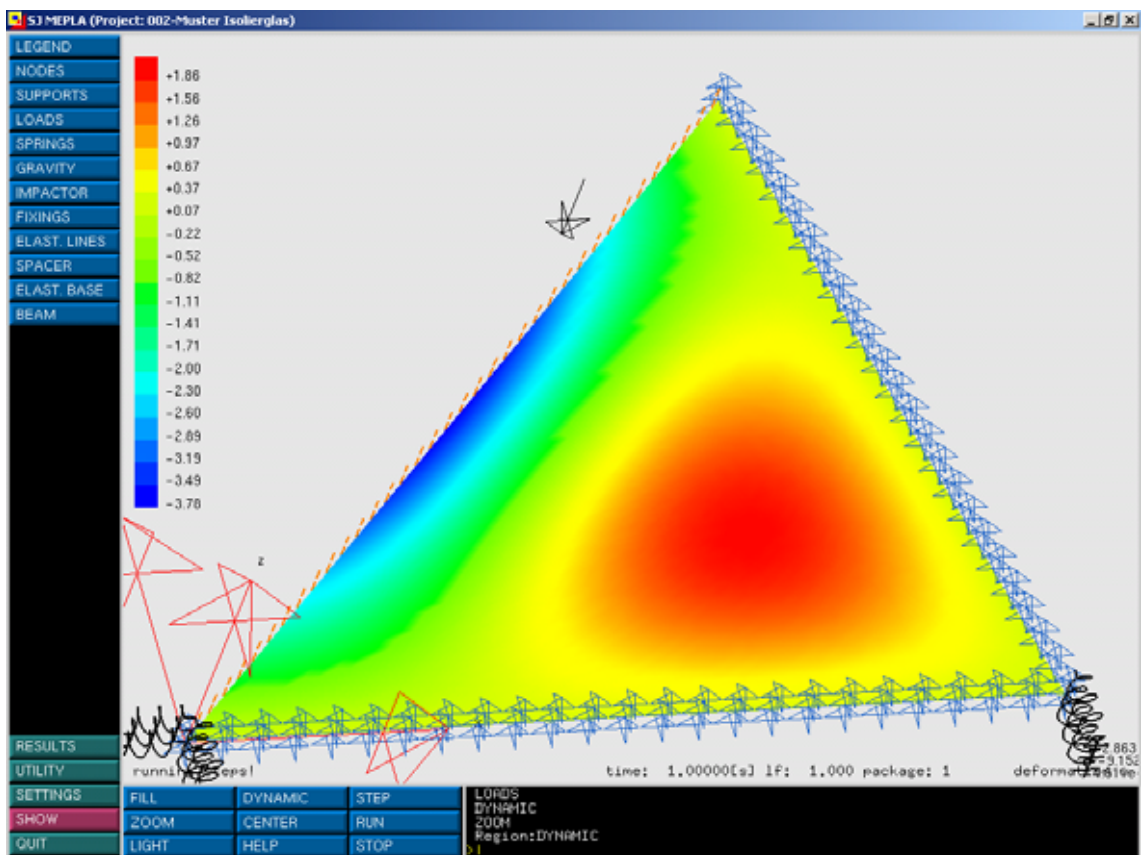


Kuva 20. Ohjelmalla THERM laskettu ikkunan poikkileikkauksen lämpötilakenttä.

Ikkunan jännityskentän laskemiseen ei ole kovinkaan monia valmisohjelmia tarjolla. Yksi mahdollisuus on mallintaa ongelma yleiskäyttöisille elementti- tai differenssimenetelmään perustuvilla laskentaohjelmilla. Yksi esimerkki tällaisista yleisohjelmista

on ANSYS. Ongelmakenttä on niin monimutkainen, että jännitysten laskeminen suljetussa muodossa ei ole mahdollista, vaan ratkaisussa pitää käyttää numeerisia menetelmiä. Suljetussa muodossa olevia ratkaisuja on käytetty menestyksellä lasin jännitysten arviointiin palotilanteessa, jossa voidaan keskittyä vain palon aiheuttamaan epätasaiseen lämpenemiseen ja siitä aiheutuvien lämpöjännitysten laskemiseen.

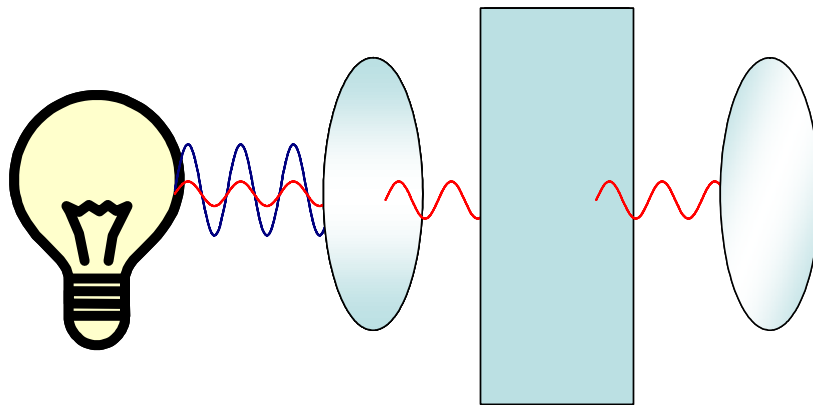
Saksalainen SJ-Software on kehittänyt monia ohjelmia ikkunoiden ja rakennusosien mitoitusta varten. Ohjelma SJ MEPLA on tarkoitettu monikerroksisten, erityisesti lasisten, sandwich-rakenteiden mitoitamiseen ja kuormitusten laskemiseen. Ohjelmalla voidaan tarkastella laminoitujen lasien ja eristyslasien jännityksiä, ja lasien reunat voivat olla pistemäisesti tuettuja, vapaasti tuettuja tai jäykästi kiinnitettyjä. Ohjelmalle annetaan lähtötietona kuormitukset, eri lasien lämpötilat sekä materiaali- ja geometriatiedot. Puutteena ohjelmassa on, että yksittäisten lasilevyjen keskikohdan ja reunan välisistä lämpötilaeroista aiheutuvia jännityksiä ei voida mallintaa. Sitä vastoin eristyslasin eri lasille voidaan antaa erilaiset lämpötilat, ja täytekaasun lämpenemisestä aiheutuva paineen kohoaminen otetaan huomioon.



Kuva 21. Ohjelman SJ MEPLA esimerkkitulostus kolmiomaisen eristyslasin jännityskentästä.

Jännitystilan laskentamenetelmien ongelmana on, ettei kaikkia aineominaisuuksia ja jännitystiloja aiheuttavia tekijöitä täysin tunneta eikä voida laskennassa ottaa huomioon, mistä johtuen tulokset ovat likimääräisiä ja soveltuvat lähinnä eri materiaalien, rakenteiden ja kuormitustapausten keskinäiseen vertailuun. Epävarmuutta laskentatuloksiin aiheutuu muun muassa siitä, ettei tunneta lasin jäännösjännityksiä, tiivisteiden ja saumaosien lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia eikä niiden virumista. Lisäksi avattavassa ikkunassa karmin, puitteen ja lasin välistä kiinnitystä ei voida pitää jäykkänä, vaan muodonmuutokset ovat mahdollisia, ja niihin vaikuttavat muun muassa ikkunan koko, tiivisteiden materiaali ja muoto, saranoiden määrä ja sijainti sekä ikkunalukkojen paikka, määrä ja puristusvoima.

## 5.2 Kokeelliset menetelmät



Kuva 22. Lasin jännitysten toteaminen valolähteen ja kahden polarisaatiosuotimen avulla jännitysoptiikkaa käyttäen.

Lasin jännitystä voidaan mitata jännitysoptiikan avulla. Yksinkertaisimmillaan jännitysoptinen mittalaite koostuu valolähteestä ja kahdesta polarisaatiosuodattimesta (kuva 22). Mittari perustuu siihen, että ensimmäinen polarisaatiosuodin leikkaa muut kuin suotimen ”hilan” suuntaiset valonsäteet pois ja tekee siitä yhdessä tasossa värähtelevää polarisoitunutta valoa. Jälkimmäinen suodin käännetään  $90^\circ$  kulmaan ensimmäiseen nähden, jolloin valo ei läpäise jälkimmäistä suodinta. Ainoastaan niissä kohdissa, joissa näytteessä on jännitystä, jälkimmäisessä suodattimessa näkyy valoa. Tämä johtuu siitä, että jännitys kiertää lasin ja muiden läpinäkyvien kappaleiden läpi tulleen valon polarisaatiotasoa, ja kierto on sitä suurempi, mitä suurempi on lasin jännitys. Jännitystila näkyy korkeuskäyrämaisina kuvioina, ja kuviot ovat sitä tiheämmässä, mitä suurempi on lasin jännitystila. Pelkällä kahdella polarisaatiosuodattimella ei voida kuitenkaan määrittää jännityksen suuruutta, vaan pelkästään todeta jännityksen olemassaolo.

Valolähde voi sijaita myös samalla puolella kuin polarisaatiosuodin, jolloin saadaan selville jännitystila lasin pinnassa. Kuvassa 23 on esitetty eräs tällainen manuaalinen

pintajännityksen mittari, jossa lasin jännitystila saadaan selville pyörittämällä polariisaatiosuodattimeen liitettyä asteikkolevyä.

Tämän manuaalisen mittarin lisäksi on automaattisia tietokoneohjattuja mittalaitteita, joilla koko lasin jännitykset voidaan selvittää samalla kertaa. Näitä käytetään muun muassa tasolasin valmistuslinjan yhteydessä lasin jäännösjännitysten mittaamiseen ja lasiesineiden jännitysten mittaamiseen. Nämä ovat rakenteeltaan sellaisia, että joko lasi liikkuu ja mittari pysyy paikallaan tai lasi pysyy paikallaan ja mittari liikkuu. Näin ollen ikkunan lasien mittaaminen näillä laitteilla edellyttää lasien irrottamista ikkunasta. Lisäksi eristyslasien eri kerrosten jännitystilojen mittaaminen on mahdotonta, jos tutkittava näyte sijaitsee valolähteen ja mittarin välissä.



*Kuva 23. Lasin pintajännityksen mittari (Strainoptic).*

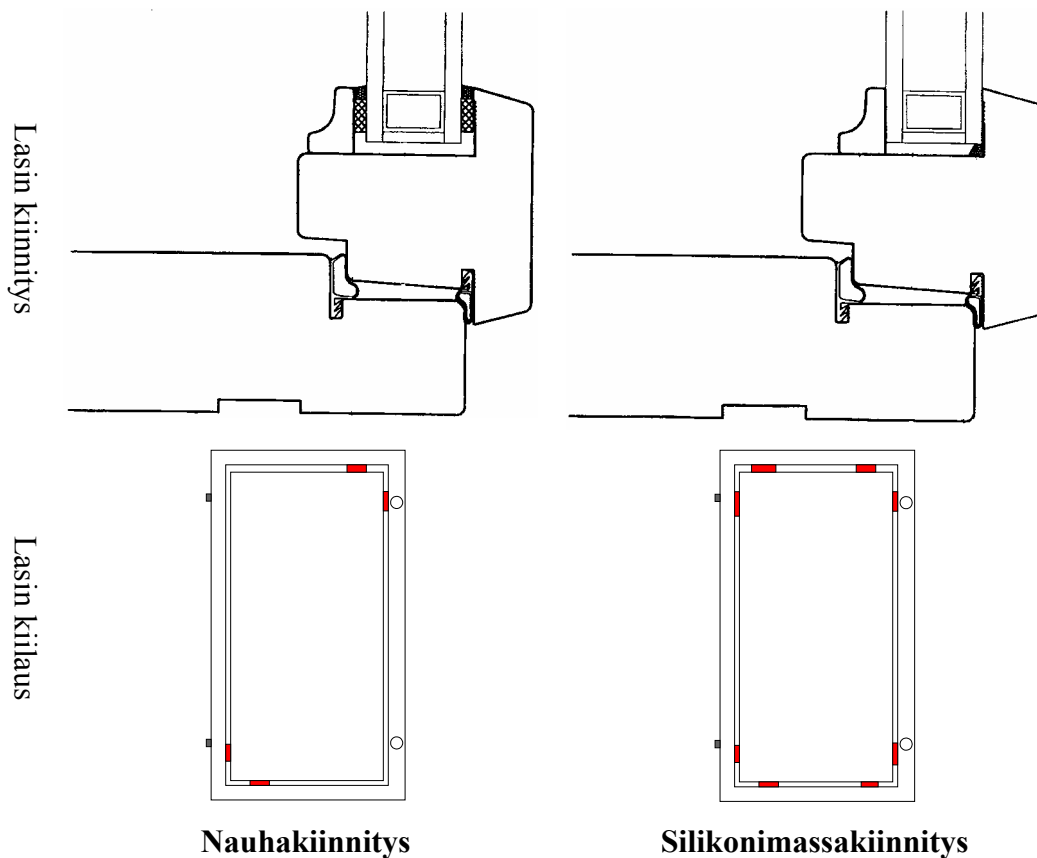


## 6. Laboriokokeet

Laboriokokeiden tarkoituksena oli mallintaa eristyslasin rikkoutumiseen vaikuttavia ilmiöitä ja mitata ikkunan kestävyuden kannalta oleellisia tekijöitä. Tutkittavia tekijöitä olivat: lasin asentamistavan vaikutus kestävyyteen, sälekaihtimien vaikutus ikkunan lämmöneristävyyteen ja sälekaihtimien säteilytekniset ominaisuudet.

### 6.1 Lasin asennustapa puitteeseen

Aikaisemmin eristyslasi kiinnitettiin puitteeseen siten, että puitteen ja lasin välissä oli suorakaiteen muotoinen umpisoluinen tiivistenauha (SFS 4003, 1983-06-01). Noin 10 vuotta sitten yleistyi lasitustapa, jossa lasi liimataan kiinni puitteeseen silikonimassalla eikä tässä lasitustavassa käytetä tiivistenauhoja (SFS 4003 EHD 1995-02-13). Tämän uuden menetelmän etuna on, että se jäykistää ikkunan puitteen liimaamalla puitteen kiinni eristyslasiin. Toisaalta haittana on, etteivät lasin ja puitteen erilaiset lämpö- ja kosteusliikkeet pääse vapaasti tapahtumaan, vaan niistä aiheutuu jännityksiä sekä lasiin että puitteeseen. Tästä uudesta lasitustavasta on esitetty paljon sellaisia arvailuja, että se on ollut osaltaan myötävaikuttamassa eristyslasien rikkoutumiseen.



Kuva 24. Koekappaleiden rakenne.

Kokeessa verrattiin nauhakiinnitteisten eristyslasien rikkoutumislujuutta silikonikiinnitteisiin verrattuna. Lisäksi tutkittiin, oliko lasien reunahionnalla vaikutusta kestävytyteen käsittelemättömiin lasihin verrattuna. Koetta varten valmistettiin yksi 960 mm x 560 mm -kokoinen ikkuna, jota varten valmistettiin 20 sisäpuitetta. Eristyslasin koko oli 428 mm x 828 mm. Ikkunan karmin yläosaan ja vastaaville kohdille sisäpuitteisiin oli porattu reikä eristyslasin paineistamista varten.

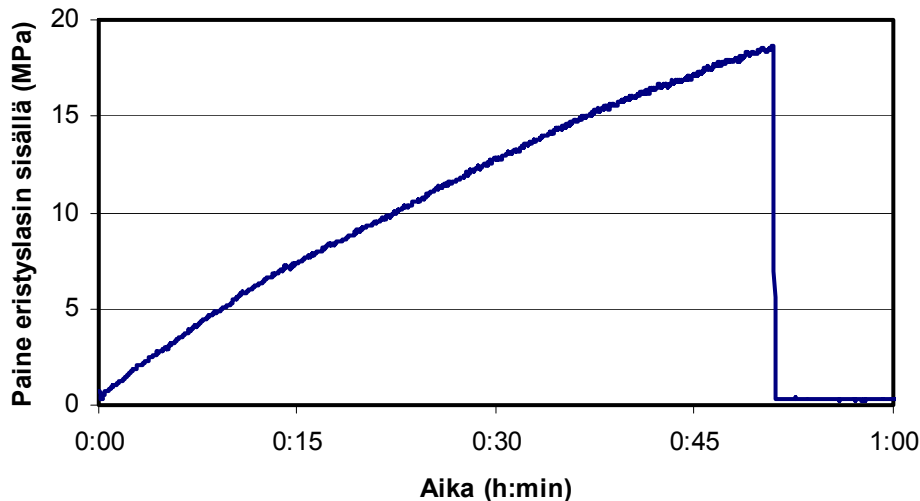
Koe tehtiin poraamalla reikä välilistaan ja kiinnittämällä reikään putki, jonka kautta eristyslasin lasien väliseen tilaan johdettiin ilmaa. Ilmaa johdettiin yhden sekunnin ajan, ja 29 sekuntia paineen annettiin olla vakiona. Näitä jaksoja toistettiin niin kauan, kunnes eristyslasi rikkoutui. Tavoitteena oli, että paine kasvoi noin 10 kPa/30 min. Kuvassa 26 on erään kokeen aikana mitattu lasin sisäisen paineen kasvun ja ajan välinen yhteys. Eristyslasin sisällä olevaa painetta rekisteröitiin paineanturin avulla, ja painetaso mitattiin tietokoneeseen liitetyllä mittauskortilla sekunnin välein. Kustakin lasista mitatun suurimman painearvon oletettiin olevan se paine, jolla lasi rikkoutui.



*Kuva 25. Eristyslasin tyypillinen rikkoutumiskuvio kokeessa.*

Koekappaleet olivat seuraavat:

- 5 kpl puitteita, joissa eristyslasi oli kiinnitetty silikonilla liimaamalla; lasin reunoja ei ollut hiottu
- 5 kpl puitteita, joissa eristyslasi oli kiinnitetty silikonilla liimaamalla; lasin reunat oli kevythiottu
- 5 kpl puitteita, joissa eristyslasi oli kiinnitetty tiivistenauhoilla; lasin reunoja ei ollut hiottu
- 5 kpl puitteita, joissa eristyslasi oli kiinnitetty tiivistenauhoilla; lasin reunat oli kevythiottu.



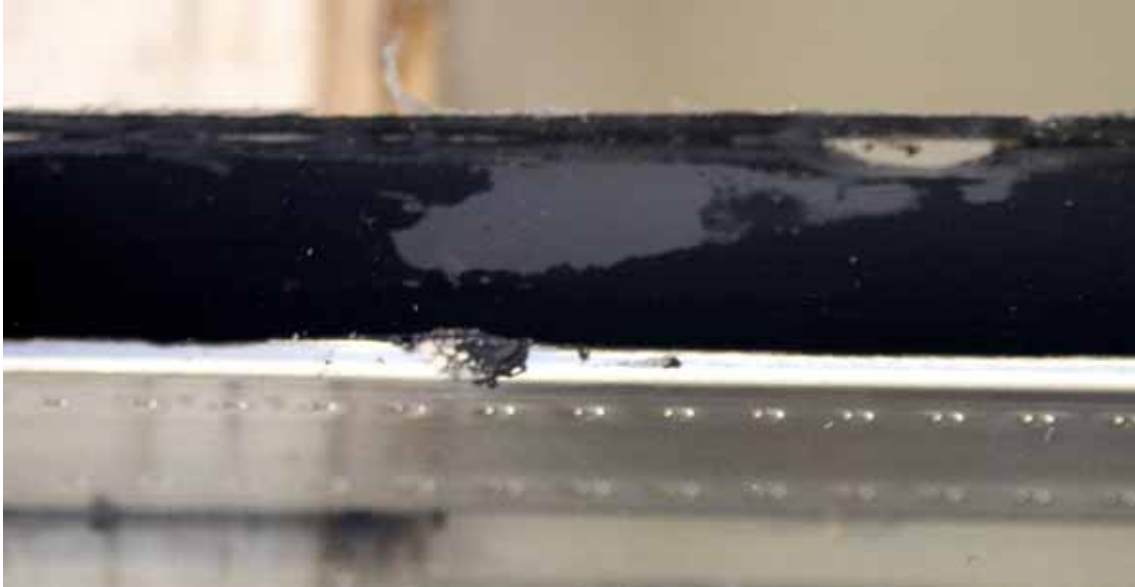
Kuva 26. Paineen kasvu kokeen aikana eristyslasin sisällä.

Kokeen tulokset on esitetty taulukossa 5. Yksi lasi rikkoutui ennen kokeen alkua, ja kahdessa lasissa petti välilistan ja lasin välinen kittaus (kuva 27). Nämä kaksi jälkimäistä tulosta on otettu huomioon keskimääräisen kuormituksen laskennassa, joskin ainakin 6 MPa:n tulos saattaa vääristää keskiarvoa.

Taulukko 5. Lasin rikkoutumisen aiheuttanut eristyslasin sisäinen paine (kPa). Lihavalla merkityissä painetasoissa koe päättyi eristyslasin reunakittauksen vuotoon. Yksi lasi rikkoutui koejärjestelyissä. Lisäksi on havainto rikkoutuneista laseista.

	Silikonikiinnitys				Nauhakiinnitys			
	hiottu		ei hiottu		hiottu		ei hiottu	
Näyte 1	19,0	sisä	16,7	sisä	10,0	keski	7,0	keski
Näyte 2	8,5	sisä	12,6	sisä	15,8	keski	15,0	sisä
Näyte 3	8,7	keski	<b>20,0</b>		8,5	keski	7,1	keski
Näyte 4	19,0	sisä	10,0	keski	11,4	keski	<b>6,0</b>	
Näyte 5	12,0	keski	14,9	sisä	12,0	keski	ei tulosta	
keskiarvo	13,4 kPa		14,8 kPa		11,5 kPa		8,8 kPa	
keskihajonta	5,3 kPa		3,8 kPa		2,7 kPa		4,2 kPa	

Taulukossa 5 on esitetty kokeiden tulokset. Niistä voidaan havaita, että yksittäisten kokeiden välillä on suuri hajonta. Kun hajonta on näin suurta jopa viiden rinnakkaisen näytteen välillä, kovin pitkälle meneviä johtopäätöksiä ei pidä mennä tekemään näin pienen koesarjan perusteella. Silikonikiinnitteisten lasien tulokset ovat samansuuntaisia kuin TTK:n tekemisen kokeiden tulokset (taulukko 3). Se, mitä tuloksista voidaan kuitenkin suurella todennäköisyydellä sanoa, on, että nauhakiinnitteisistä eristyslaseista rikkoutuu pääsääntöisesti ulkopuolteen puoleinen lasi.



*Kuva 27. Kokeessa pettänyt eristyslasiin reunakittaus.*

Silikonikiinnitteisissä eristyslaseissa sisäpinnan lasi rikkoutui yleisemmin kuin ulkopuitteen puoleinen lasi. Tämä selittynee eristyslasiin varsin jäykällä kiinnityksellä sisäpuoleeseen, jolloin sisäpinnan lasiin kohdistuu enemmän jännityksiä kuin ulkopuitteen puoleiseen lasiin.

Koe ei osoittanut reunahionnalla olevan kovinkaan suurta merkitystä kestävyysnäkökohtaan kuin TKK:ssa tehdyt kokeet. Käytännössä reunahionta aiheuttaa reunaan pieniä naarmuja (säröjä), jotka heikentävät lasin lujuutta täysin ehjäreunaiseen lasiin verrattuna. Toisaalta reunahionta parantaa lasin reunan käsittelykestävyyttä pienentämällä reunan lohkeamisriskiä ja sen myötä myös ikkunaan asennetun lasin lujuutta, vaikkei se tullutkaan esille suppeassa koesarjassa.

## **6.2 Sälekaihtimen vaikutus ikkunan lämmöneristävyyteen**

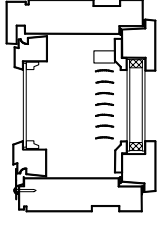
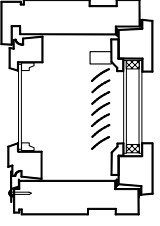
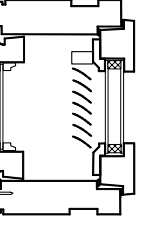
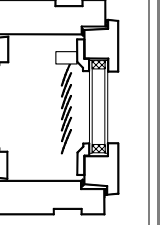
Selektiivilasilla ja argonkaasulla varustetun MSE-ikkunan lämmönläpäisykerroin (U-arvo) mitattiin VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan HOTBOX-laitteistolla. Ikkunan U-arvoksi saatiin ilman sälekaihdinta  $1,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Tämän jälkeen ikkunaan asennettiin aluksi valkoiseksi maalattu (numero 0150) sekä tämän jälkeen yläpinnaltaan kirkas ja alapinnaltaan harmaaksi maalattu kaihdin (numero 0000, kuva 32).

Taulukossa 6 esitetyistä tuloksista voidaan havaita, että ala-asennossa oleva kaihdin parantaa aina ikkunan lämmöneristävyyttä ja suljettuna hyöty on suurin. Suljettuna kaihdin toimii kuin lisälasi puitteiden välissä ja muodostaa ylimääräisen lämpöä eristävän kerroksen. Avattu kaihdin mahdollistaa ilmavirtaukset kaihtimen läpi sekä läm-

pösäteilyn sisä- ja ulkopuitteen lasien välillä, minkä vuoksi lämmöneristävyuden parannus on pienempi.

Kaihdin parantaa sitä enemmän ikkunan lämmöneristävyttä, mitä pienempi on pinnoitteen emissiviteetti pitkäaaltoisen lämpösäteilyn aallonpituusalueella (4–50 µm). Silmämääräisesti pinnoitteen emissiviteettiä ei pysty arvioimaan, koska oleellista ei ole näkyvän valon aallonpituus, vaan huonelämpöisten pintojen lähettämä pitkäaaltoinen lämpösäteily ja sen emissiviteetti. Lisäksi kaihtimet on usein ensin maalattu ja sen jälkeen lakattu pinnoitteen paremman kestävyuden saavuttamiseksi.

*Taulukko 6. Kaihtimen tyypin ja asennon vaikutus ikkunan lämmönläpäisykertoimeen ( $W/m^2K$ ). Ikkunan lämmönläpäisykerroin ilman sälekaihtimia on  $1,25 W/m^2K$ .*

KAIHTIMEN TYYPPI				
	AUKI	45 ° ALAS	45 ° YLÖS	KIINNI
VALKOINEN	1,19	1,19	1,19	1,14
KIRKAS	1,19	1,19	1,14	1,11

### 6.3 Sälekaihtimien säteilytekniset ominaisuudet

Sälekaihdin on tavallisesti alumiinipeltiä, joka on maalattu ja maalipinnan päällä on suojalakka estämässä maalin naarmuuntumista. Lyhytaaltoisen auringonsäteilyn absorptio kannalta maalipinnan ominaisuuksilla on suurempi merkitys kuin lakalla. Sitä vastoin ikkunan lämmöneristävyteen vaikuttavan lasipintojen välisen pitkäaaltoisen lämpösäteilyn kannalta säleen päällimmäisen pintakerroksen ominaisuuksilla on merkitystä. Vaikka lakka olisi paljaan, kiillotetun alumiinin pinnalla, lämmöneristysvaikutus on sama kuin muidenkin maalipintojen päällä olevalla lakkakerroksella.

Laajasta sälevalikoimasta valittiin 17 sälettä, joiden lyhyt- ja pitkäaaltoisen säteilyn ominaisuudet mitattiin. Säleistä mitattiin lyhytaaltoisen säteilyn heijastus Ocean Opticsin USB2000 -spektrometrillä. Mittarin mitta-alue on 200–1100 nm. Valonlähteenä mittauksissa oli halogeenilamppu. Pitkäaaltoisen lämpösäteilyn emissiviteetti mitattiin Emissiometer Mk II -mittarilla, jonka valmistajana on Sten Löfving Optical sensors.

Sälekaihtimille pätevät seuraavat säteilytekniset lainalaisuudet, joiden tietojen avulla mittaustuloksista laskettiin eri säleiden auringonsäteilyn absorptio.

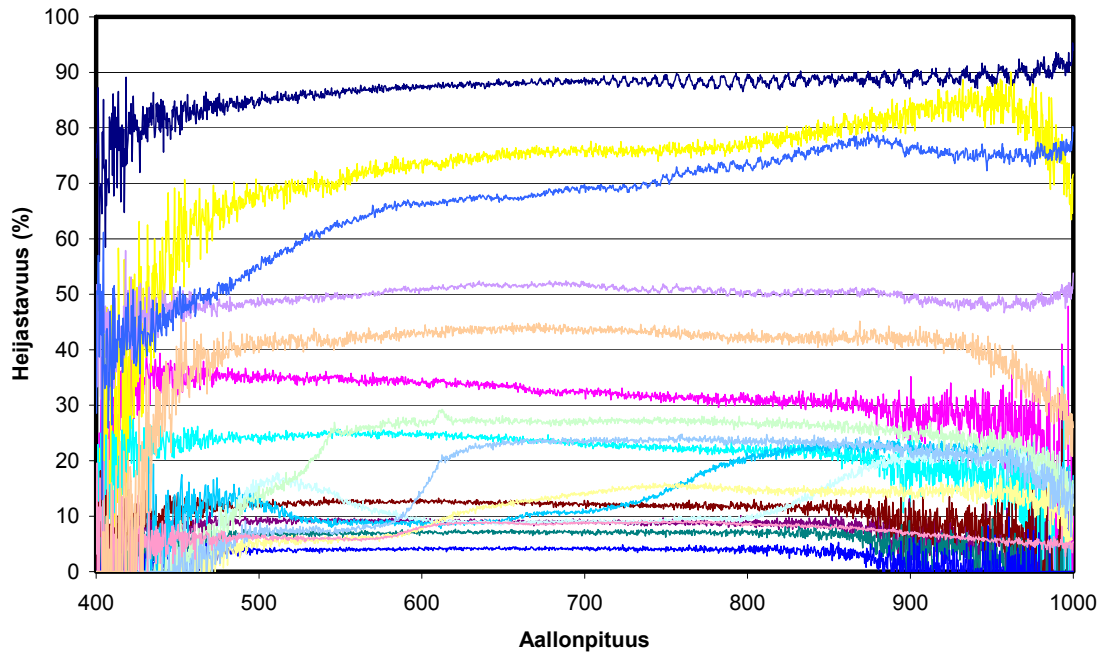
$$\text{heijastus} + \text{absorptio} + \text{läpäisy} = 1$$

$$\text{emissiviteetti} = \text{absorptio}$$

Tulokset on esitetty taulukossa 7 ja kuvassa 28 on esitetty kaikkien säleiden heijastuspektri aallonpituusvälillä 400–1 000 nm. Tuloksia tulee kuitenkin tulkita suuntaa-antavina, koska mittaukset tehtiin mittarilla, jonka mitta-alue on vain osa auringonsäteilyn spektristä. Lisäksi käytetty mittaustapa soveltui parhaiten kiiltäville näytteille, jotka eivät hajottaneet valoa heijastuskulman ulkopuolelle. Näin ollen matta- ja himmeäpintaisten näytteiden tuloksissa on eniten epävarmuutta.

*Taulukko 7. Sälekaihtimien mitatut lyhytaaltoisen ja pitkäaaltoisen säteilyn absorptiot. Matta- ja himmeäpintaisten säleiden arvoissa on epävarmuutta, minkä vuoksi niitä tulee tulkita suuntaa-antavina.*

Sälekaihdin			Absorptio	
Nro	Väri	Pintakäsittely	0,4–1 µm	4–50 µm
0000	alumiini, peilimäinen	lakattu	0,13	0,76
0150	valkoinen	maalattu, himmeä	0,69	0,85
713	alumiini, karhea lakattu	lakattu, karhea	0,27	0,84
0952	harmaa, vaalea	maalattu, kiiltävä	0,78	0,85
1601	harmaa, tumma	maalattu, kiiltävä	0,92	0,85
1650	harmaa, keskiharmaa	maalattu, himmeä	0,89	0,85
1858	musta	maalattu, himmeä	0,94	0,82
1898	musta	maalattu, matta	0,96	0,90
2300	sininen	maalattu, kiiltävä	0,85	0,89
3802	vihreä	maalattu, kiiltävä	0,87	0,91
4018	keltainen	maalattu, kiiltävä	0,77	0,91
5055	punainen, viininpunainen	maalattu, himmeä	0,88	0,84
5101	punainen	maalattu, kiiltävä	0,82	0,90
5457	pinkki	maalattu, himmeä	0,93	0,88
7000	alumiini, kirkas	lakattu	0,50	0,77
7010	harmaa, vaalea	maalattu	0,60	0,83
Energy	kulta	erikoispinnoite	0,33	0,09



*Kuva 28. Mitattujen sälekaihtimien spektriset heijastukset.*

Sälekaihtimien pinnoitteiden valintaa varten on mahdollista valmistaa mittari, jossa muutaman aallonpituusalueeltaan kapean säteilyanturin avulla mitataan säleen heijastus ja tulos redusoidaan auringonsäteilyn koko aallonpituusalueella olevaksi keskimääräiseksi auringonsäteilyn absorptioksi. Mittarin suunnittelun kannalta on oleellista valita säteilyantureiden aallonpituusalueet oikein ja sopiva säteilylähde, jonka säteilytaso pysyy vakiona, tai kehittää säteilyn mittausrutiini jokaista mittausta varten. Mittarin hintaan vaikuttaa ratkaisevasti valmistusmäärä. Tällaista yksinkertaista mittaria ei löytynyt valmiina.

## 7. Tutkimukset luonnonolosuhteissa

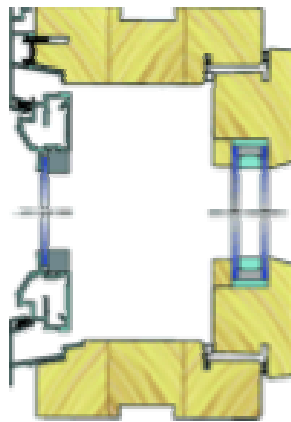
Erilaisilla sälekaihtimilla varustettujen ikkunoiden lämpötiloja mitattiin todellisissa luonnonolosuhteissa yhdessä kiinteistössä, jossa oli todettu aikaisemmin ikkunan eristyslasien itsestään rikkoutumisia. Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää ne kestävyyskannalta kriittiset olosuhteet ja tekijät, jotka myötävaikuttivat ikkunoiden rikkoutumiseen. Toisaalta mittaustietoa oli tarkoituksena hyödyntää laboratoriokokeiden suunnittelussa ja ikkunoiden kestävyyskannan teoreettisessa tarkastelussa.

Mittausten tarkoituksena oli selvittää ikkunan lasiosan lämpötilat ja muutosnopeudet sekä selvittää rikkoutumisen syyt. Lisäksi luonnonolosuhteissa tehtävillä mittauksilla selvitettiin erilaisten sälekaihtimien ja niiden asentojen vaikutusta ikkunoiden lämpenemiseen.

### 7.1 Tutkimuksen kiinteistö ja sen ikkunat

Tutkimuksessa mitattiin ikkunoihin kohdistuvia rasituksia yhdessä pääkaupunkiseudulla olevassa toimistokiinteistössä. Kiinteistössä on sisäilman nopea jäädytys, ja sisäilman lämpötila on ympäri vuoden 22–24 °C. Osa kiinteistön ikkunoista oli uusittu vuonna 1999. Vaihdettuja ikkunoita oli yli 150 kappaletta (yli 460 valoaukkoa), ja niistä ensimmäisenä vuonna meni rikki noin 20 eristyslasia. Seuraavina vuosina rikkoutui vain yksittäisiä ikkunoita.

Uudet ikkunat ovat MSE-tyyppisiä puu-alumiini-ikkunoita (kuva 29), joiden alumiiniosat on maalattu harmaaksi. Ikkunan sisäpuolteen eristyslasissa on selektiivilasi ja täytekaasuna argon. Ikkunoiden lämmönläpäisykerroin (U-arvo) 1,2 m x 1,2 m -kokoisella ikkunalla on 1,25 W/m<sup>2</sup>K. Ikkunoihin on asennettu harmaaksi maalatut sälekaihtimet sisä- ja ulkopuolteen väliin. Ikkunat ovat kolmiosaisia, ja näistä yksi osa on suuri ja kaksi pienempää (kuva 30).



Kuva 29. Ikkunoiden poikkileikkaus.



Ikkunoista rikkoutui keskimmäinen pinnoittamaton lasi, ja kahta poikkeusta lukuun ottamatta lasit rikkoutuivat suurista ikkunoista. Sisäpinnassa oleva selektiivilasi säilyi ehjänä.



*Kuva 30. Ikkunat koostuvat kolmesta rinnakkaisesta valoaukosta, ja kaksi tällaista ikkunaa on vierekkäin.*

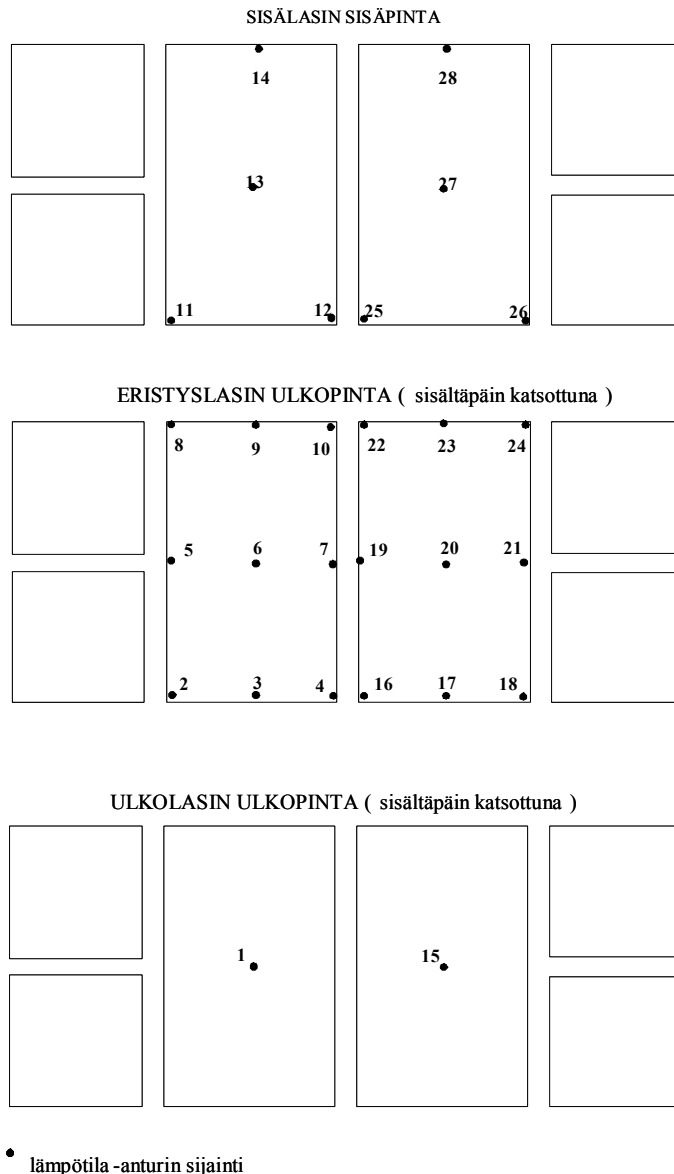
## 7.2 Mittausjärjestelyt

Lähtökohtana oli mitata lämpötiloja sekä kaakkois- että lounaisjulkisivuilta, koska ikkunoita on rikkoutunut juuri näiltä julkisivuilta. Tarkasteltavaksi valittiin rakennuksen nurkassa olevan huoneen ikkunat, koska tällöin olosuhteiden voitiin olettaa olevan mahdollisimman samanlaiset eri julkisivujen ikkunoille. Huoneessa ikkunat ovat sekä kaakkoon että lounaaseen.

Mittaukset tehtiin siten, että kummaltakin julkisivulta mitattiin isojen ikkunoiden lämpötilat kuvan 31 osoittamista kohdista. Mittauksen ideana oli, että vierekkäisistä ikkunoista toinen toimi vertailuikkunana ja toiseen tehtiin muutoksia, joiden vaikutus saatiin selville vertaamalla näiden kahden ikkunan mittaustuloksia. Tämän lisäksi mitattiin sisä- ja ulkoilman lämpötilat sekä auringon säteilytehot kummallekin julkisivulle. Mittaukset tehtiin vuoden 2003 kesäkuun alusta lokakuun loppuun.

Yhteensä lämpötiloja mitattiin 58 kohdasta ja auringon säteilyteho 2 julkisivulta. Mittaukset tehtiin 10 minuutin välein käyttäen kahta Datataker 500 -mittalaitetta, jotka rekis-

teröivät tiedot sähköisessä muodossa. Mittaustulokset piirrettiin kuviksi Excel-ohjelmalla. Lämpötila-antureina mittaauksessa käytettiin 0,2 mm:n läpimittaisia kupari-konstantaani-termopareja, jotka liimattiin lakalla lasin pintaan keskelle lasia ja lasitus-listan alle lasin reunaan. Lämpötila-anturien sijainti ja numerointi on esitetty kuvassa 31. Molempien julkisivujen ikkunoissa lämpötila-anturit sijaitsivat samalla tavalla. Auringon säteilytehot mitattiin pyranometrillä, jonka lukemat rekisteröitiin samalla tavalla sähköisesti mittalaitteella.



*Kuva 31. Lämpötila-anturien sijainti tutkituissa ikkunoissa.*

Kiinteistössä on alkuperäisinä sälekaihtimina harmaaksi maalatut kaihtimet, jotka on merkitty koodilla 7010 kuvassa 32. Tätä harmaata kaihdinta pidettiin vertailutapauksena, ja muilla kaihtimilla pyrittiin vähentämään ikkunaan kohdistuvaa lämpörasitusta.



*Kuva 32. Tutkitut kaihdintyyppit; valkoinen, maalattu harmaa (alkuperäinen), metallipintainen himmeäksi harjattu sekä yläpinnaltaan peilimäinen ja alapinnaltaan harmaaksi maalattu.*

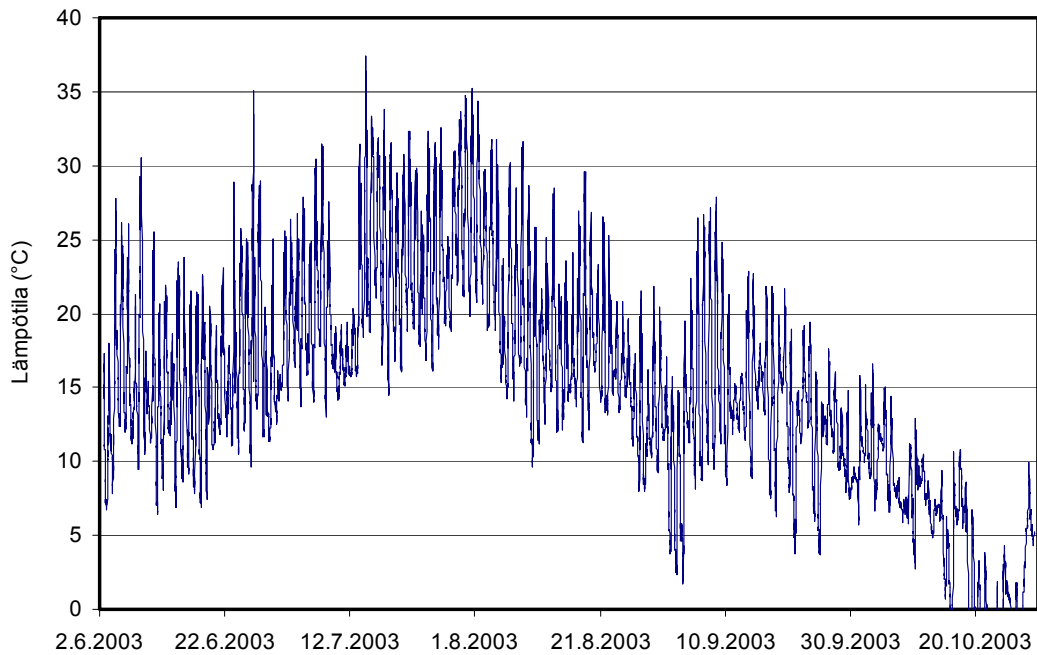
### **7.3 Mittaustulokset**

Kuvassa 33 on esitetty ulkoilman lämpötila mittausjakson aikana. Mittausanturi oli suojattu suoralta auringonsäteilyltä, mutta tulosten päivälukemissa voi olla enimmillään 5 °C todellista suurempi lämpötila, mikä johtuu anturin sijainnista rakennuksen ulkoseinän lähellä. Aurinko lämmitti ulkoseinän lähellä olevaa ilmaa todellista ulkoilman lämpötilaa korkeammaksi. Ikkunoiden kannalta tämä vastaa todellisuutta, sillä sama seinän pinnalla oleva ulkoilma vaikutti myös ikkunoiden lämpörasituksiin.

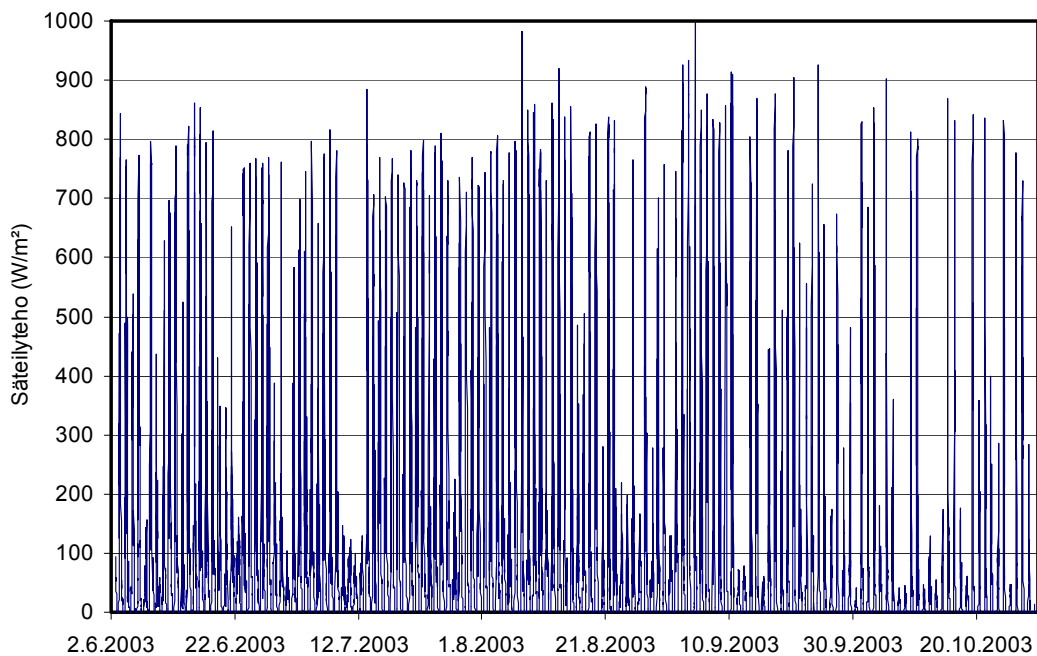
Kuvasta voidaan havaita, että vuorokautinen ulkoilman lämpötilan vaihtelu oli suurimmillaan noin 20 °C. Suurimmat lämpötilat kesällä olivat noin 35 °C ja mittausjakson lopussa ulkolämpötila meni pakkasen puolelle. Toinen merkittävä havainto on, että peräkkäisten päivien maksimilämpötiloissa voi olla jopa 10 °C:n eroja, mitkä johtuvat aurinkoisten ja pilvisten päivien vuorottelusta.

Kuvissa 34 ja 35 on esitetty molemmilta julkisivuilta mitatut auringon säteilytehot pystysuorille pinnoille. Mittaustuloksista on havaittavissa, että maksimisäteilytehoissa ei ole kovin suuria eroja eri vuodenaikoina. Tämä selittyy auringon korkeuskulman pienentymisenä syyskaudella, mikä kompensoi auringon säteilytehon pienenemisen ilmakehässä kuljetun matkan kasvaessa syksyllä. Toinen tekijä, joka kasvattaa syyskaudella mitattuja säteilytehoja, on ilman sisältämän kosteuden määrän ja sen aiheuttaman absorption pieneneminen ilmojen viilentyessä. Suurimmat mitatut säteilytehot olivat

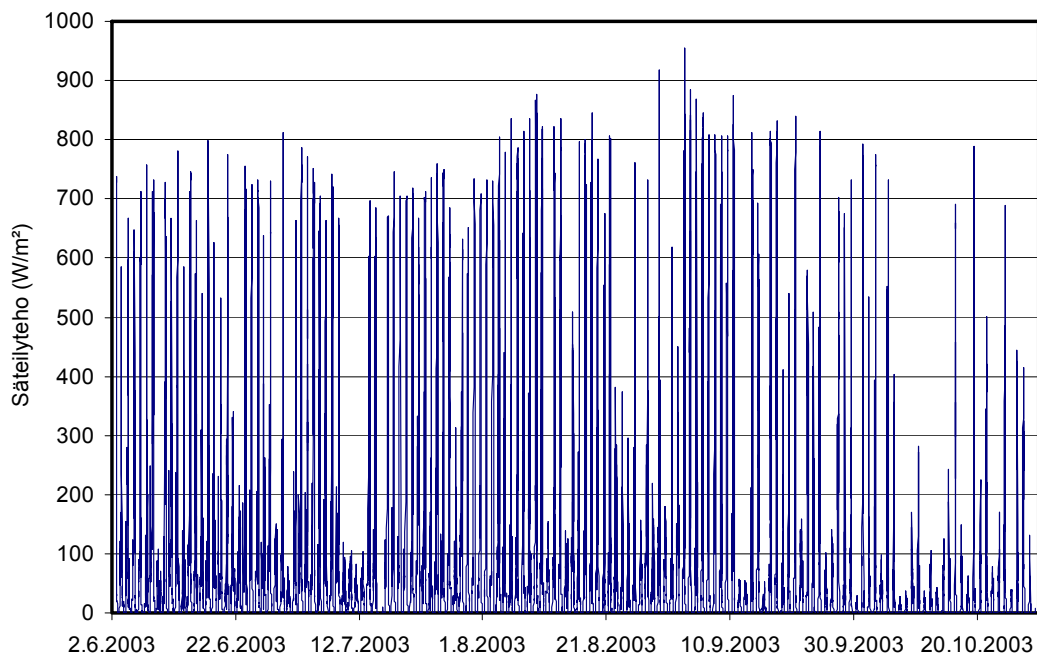
1 000 W/m<sup>2</sup> ja sateisina päivinä säteilyteho jäi alle 100 W/m<sup>2</sup>. Kaakkoisjulkisivulla säteilytehot olivat hieman suuremmat kuin koillisjulkisivulla.



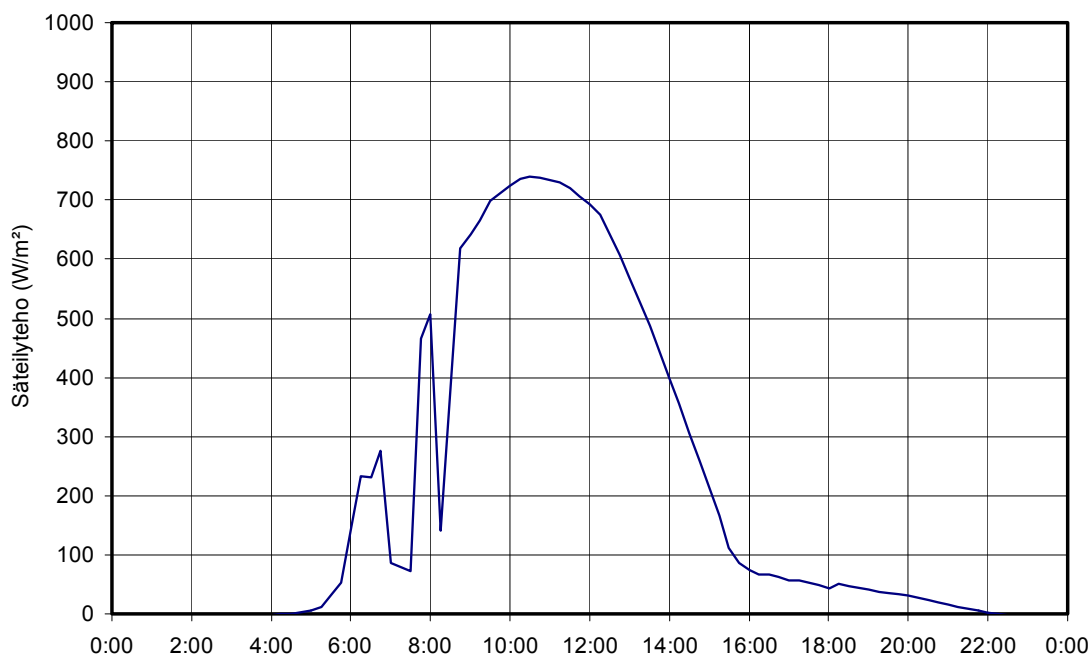
*Kuva 33. Ulkoilman lämpötila mittausjakson aikana.*



*Kuva 34. Auringon säteilyteho kaakkoisjulkisivulle mittausjakson aikana.*



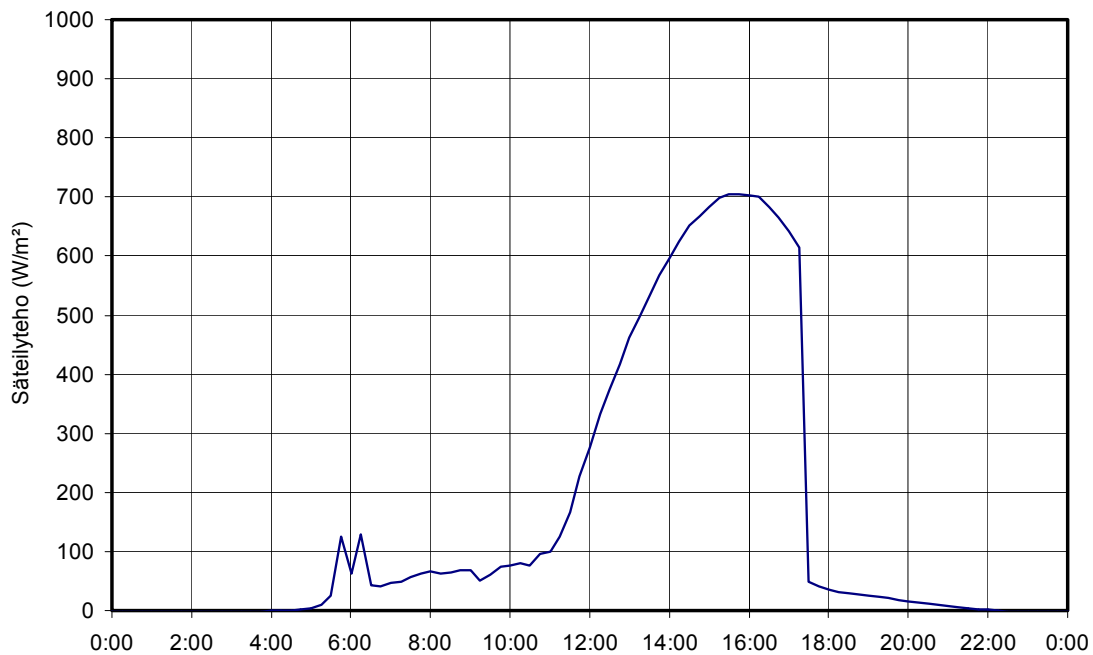
*Kuva 35. Auringon säteilyteho lounaisjulkisivulle mittausjakson aikana.*



*Kuva 36. Auringon säteilyteho 18.7.2003 kaakkoisjulkisivulle.*

Kuvissa 36 ja 37 on esitetty kummallekin julkisivulle kohdistuva auringon säteilyteho yhden vuorokauden mittaiselta ajalta. Kaakkoisjulkisivun käyrässä olevat kuopat aiheutuivat puiden aiheuttamista varjoista. Lounaisjulkisivulla aamulla esiintyvät pienet piikit johtuivat heijastuksista rakennuksen muista osista ja illalla oleva jyrkkä säteilytehon

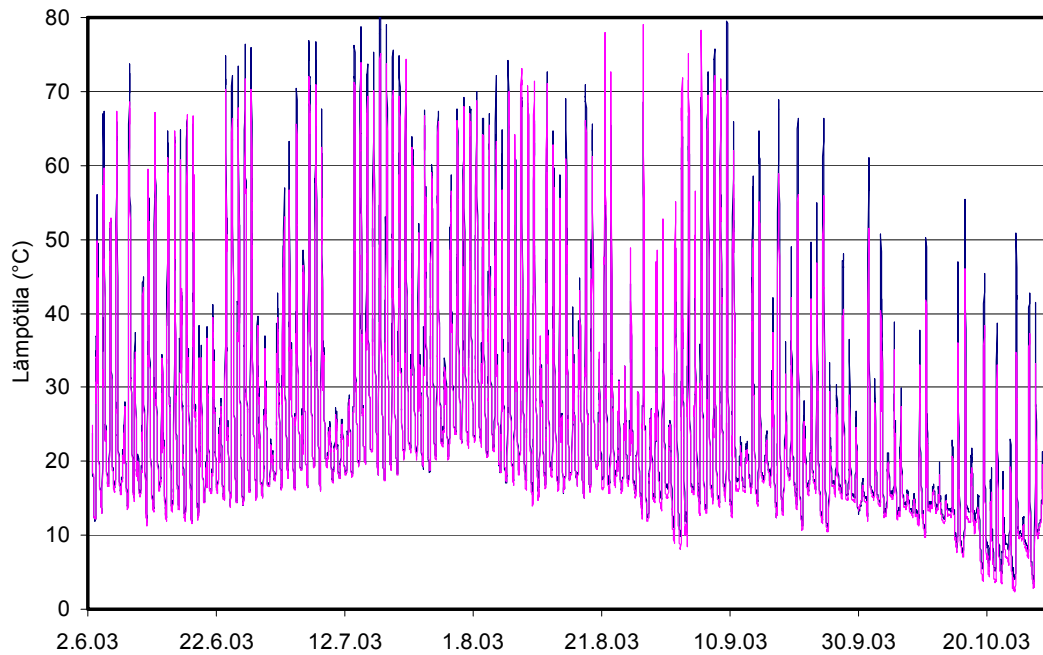
lasku johtui rakennuksen osan varjostuksesta. Muuten käyrien pyöreästä muodosta voidaan päätellä, että tarkasteltu päivä oli pilvetön.



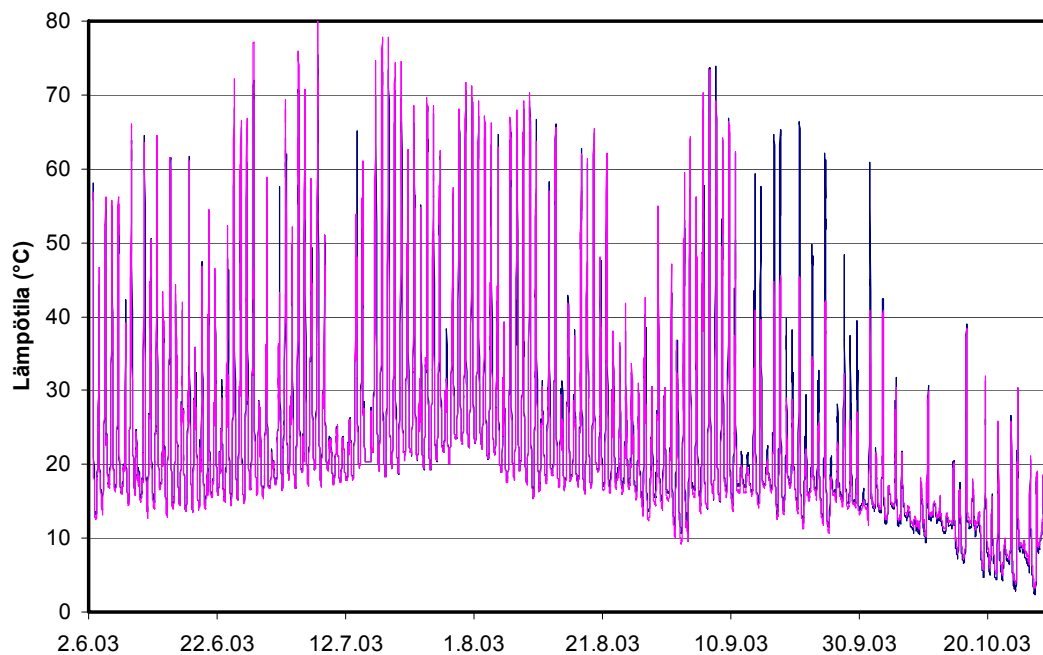
*Kuva 37. Auringon säteilyteho 18.7.2003 lounaisjulkisivulle.*

Ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohta oli ikkunoiden lämpimin kohta, ja sen lämpötila nousi korkeimmillaan noin 80 °C:seen (kuvat 40 ja 41). Merkille pantavaa on, että kummallakaan julkisivulla ikkunasta ei mitattu suurimpia lämpötiloja heinäkuun puolesta välistä alkaneen kolmen viikon hellejakson aikana. Syy tähän on, että hellejakson aikana ilma sisälsi enemmän kosteutta kuin viileämpänä aikana. Ilmassa oleva kosteus absorboi auringon säteilyä, jolloin pinnalle tulevan säteilyn määrä pienenee.

Kuvista voidaan havaita, että ikkunan rasitusten ja kestävyyskannalta koko kesä aina syyskuun puoleen väliin on merkityksellistä, ja syyskausi on jopa rasittavampi kuin kesä, sillä syksyllä vuorokautiset lämpötilavaihtelut voivat olla jopa 70 °C. Lisäksi syksyllä auringonsäteily ajoittuu lyhyemmälle ajalle ja näin ollen lämpeneminen ja jäähtyminen on nopeampaa kuin keskikesällä.



*Kuva 38. Kaakkoisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat.*



*Kuva 39. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat.*

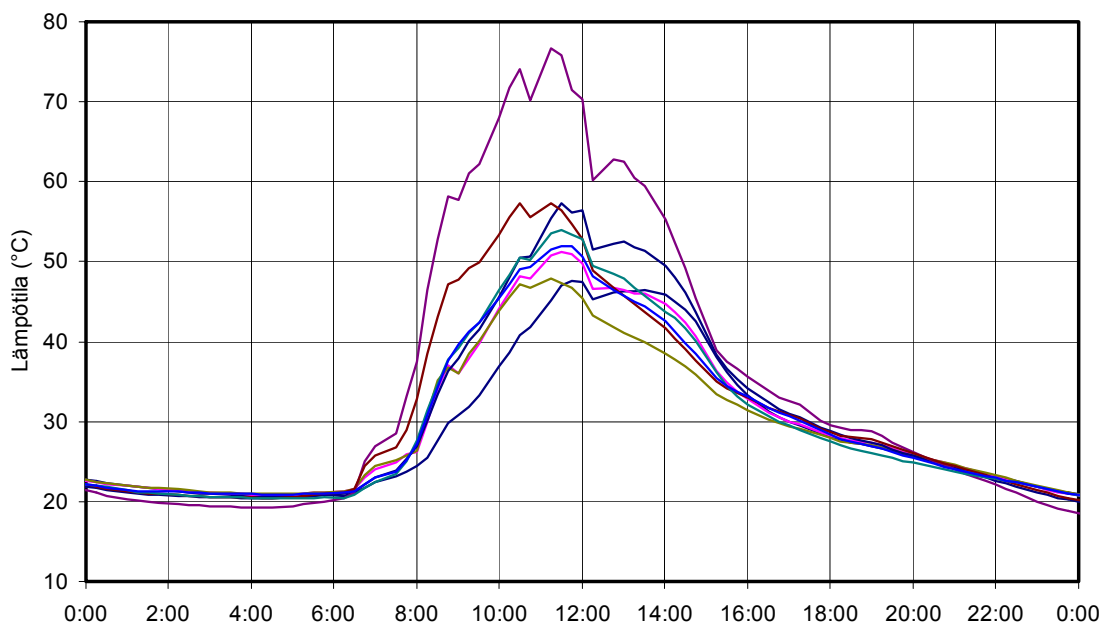
Kuvissa 40–44 on esitetty ikkunan keskimmäisen lasin 9 eri lämpötilan mittauspisteen lämpötilat yhden vuorokauden aikana. Kuvista voidaan havaita, että auringolla on suurin vaikutus lämpötiloihin. Esimerkiksi kuvien 40 ja 41 lämpötilakäyrissä näkyvät kuo-pat johtuvat hetkellisistä pilvistä, ja kuvan 42 huomattavan matala lämpötilataso ja pie-net lämpötilaerot johtuvat pilvisestä ja sateisesta päivästä. Kuvissa korkeimmat lämpöti-

lat mitattiin eristyslasin keskeltä ja matalimmat lämpötilat eristyslasin alanurkista. Sisäpinnan lasin lämpötilat vaihtelivat koko tutkimusjakson aikana 20–35 °C:n välillä. Sisäpinnan lasin pieni lämpötilavaihtelu selittyy selektiivilasilla, argon-täytekaasulla ja ilmastoidulla huonetilalla.

Suurimmat lämpötilaerot keskimmäisen lasin alanurkan ja keskustan välillä olivat yli 30 °C ja suurin lämpötilan nousunopeus lasin keskellä oli yli 30 °C/h ja suurin jäähtymisnopeus oli yli 20 °C/h.

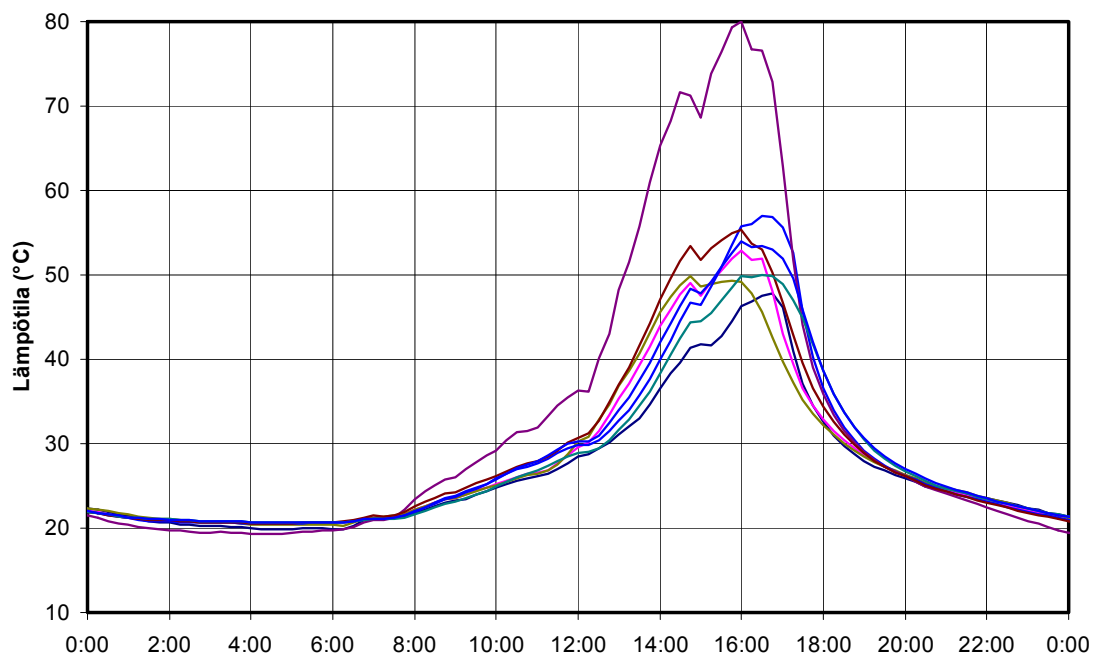
Eristyslasin kestävyys kannalta on merkitystä suurimmalla lämpötilalla, lämpötilaerolla ja lämpenemisnopeudella. Lasin korkea lämpötila vaikuttaa lujuusominaisuuksiin heikentävästi, kaasun lämpeneminen eristyslasin sisällä nostaa painetta ja aiheuttaa jännityksiä lasiin sekä eristyslasin eri lasilevyjen erilaiset lämpötilat aiheuttavat jännityksiä laseihin.

Kuvista on myös havaittavissa auringon kiertymisestä johtuvat matalimpien lämpötilojen maksimiarvojen aikaerot, jotka ovat hieman yli 1 tunti. Aurinko valaisee ensin sisältä päin katsoen ikkunan oikean reunan ja viimeiseksi se valaisee ikkunan vasemman reunan.

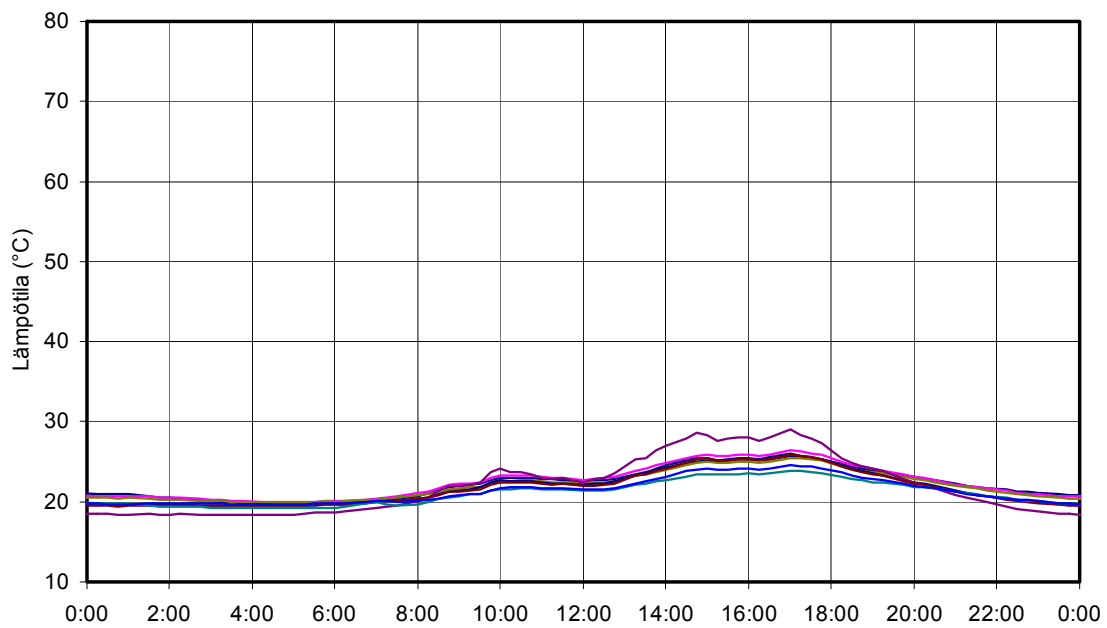


*Kuva 40. Ikkunan keskimmäisen lasin lämpötilat kaakkoissivulla 7.7. Kaihtimen säleet olivat vaaka-asennossa.*

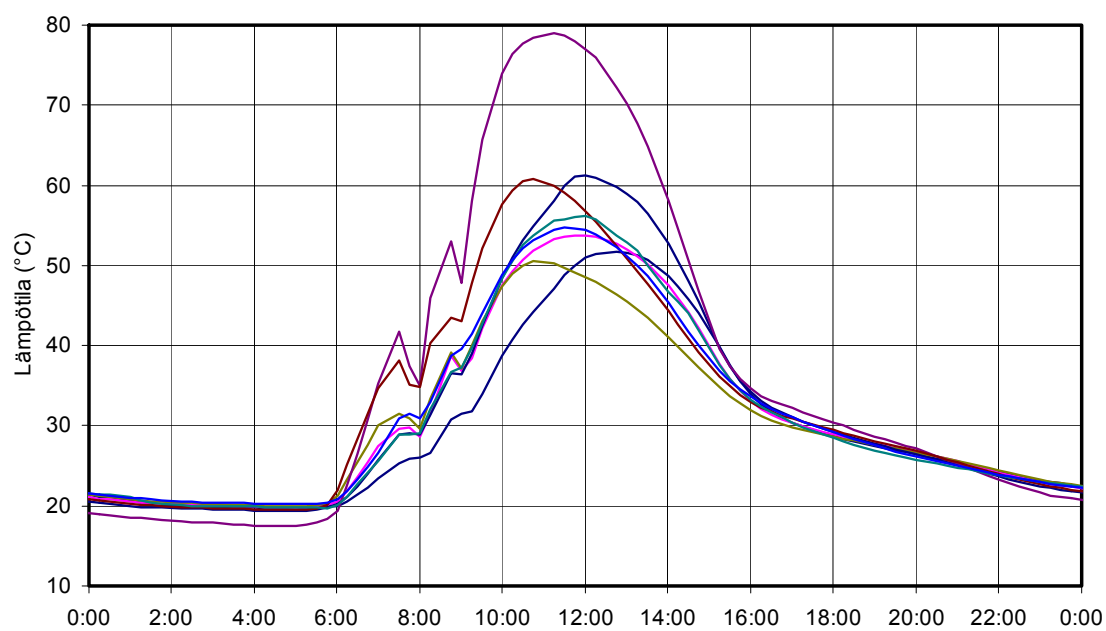




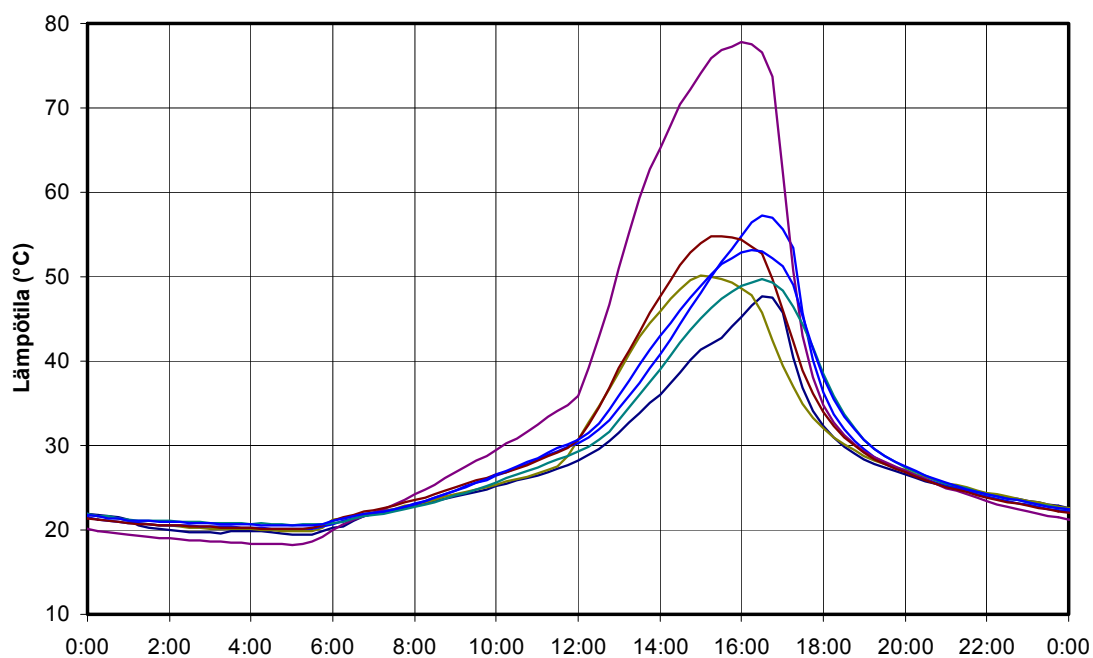
Kuva 41. Ikkunan keskimmäisen lasin lämpötilat lounaissivulla 7.7. Kaihtimen säleät olivat vaaka-asennossa.



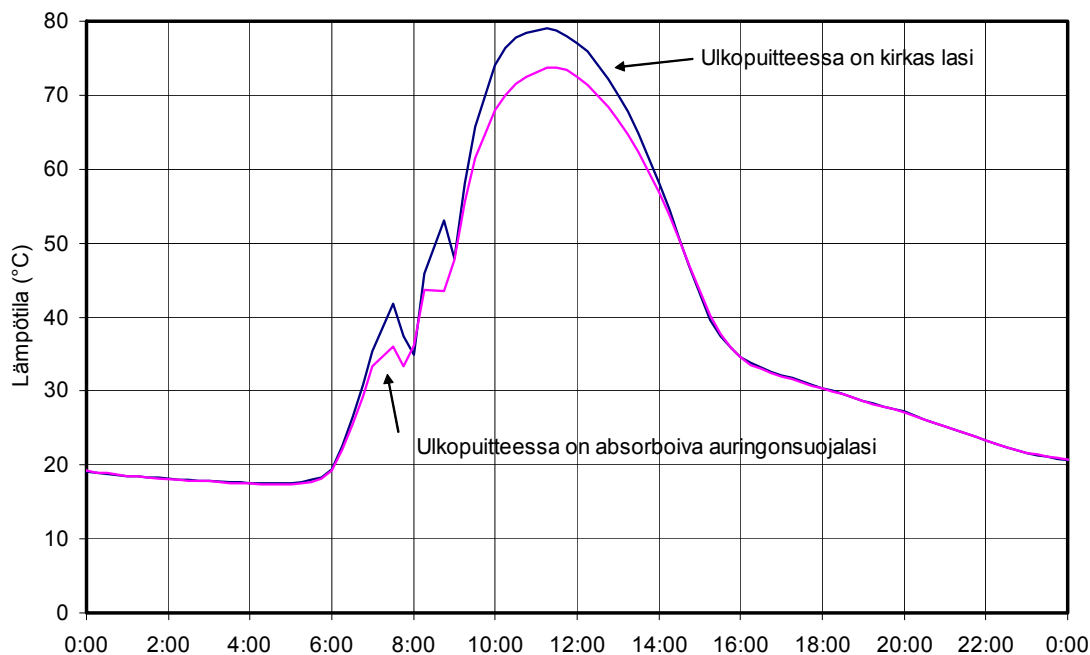
Kuva 42. Ikkunan keskimmäisen lasin lämpötilat kaakkoissivulla 12.7. Kaihtimen säleät olivat vaaka-asennossa. Päivä oli sateinen.



*Kuva 43. Ikkunan keskimmäisen lasin lämpötilat kaakkoissivulla 18.7. Kaihtimen säleät ovat vaaka-asennossa.*



*Kuva 44. Ikkunan keskimmäisen lasin lämpötilat lounaissivulla 18.7. Kaihtimen säleät ovat vaaka-asennossa.*



Kuva 45. Kaakkoisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 18.7. Toisessa ikkunassa oli uloimpana lasina harmaa absorboiva auringonsuojalasi ja toisessa kirkas tasolasi ulko-puitteessa. Kaihtimet olivat vaaka-asennossa.

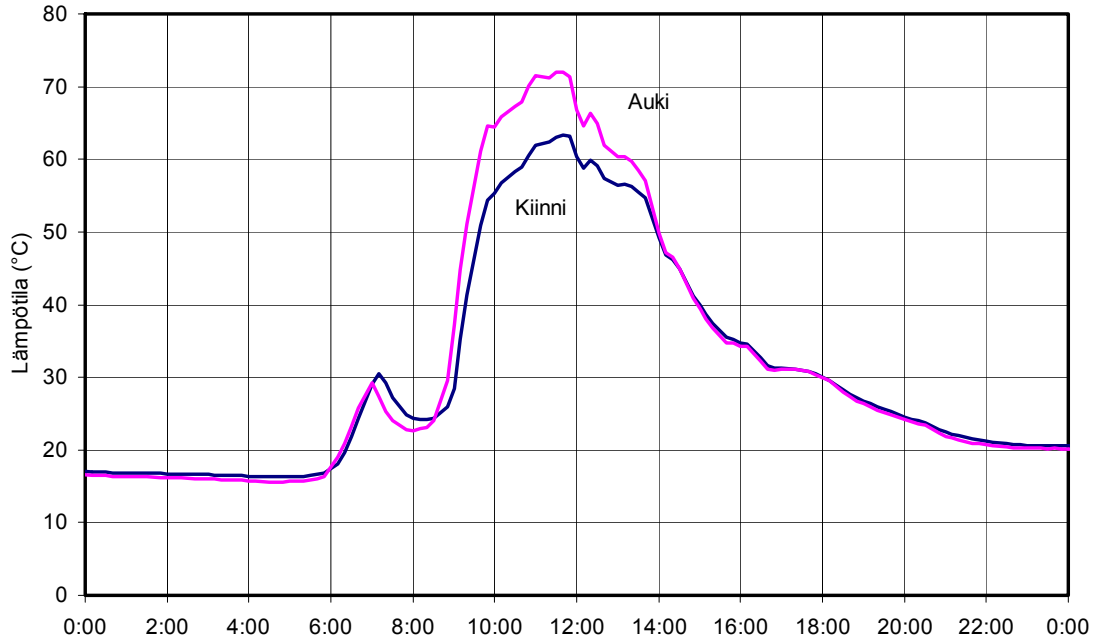
Yksi tapa vähentää sisälle tulevaa auringonsäteilyä on käyttää ikkunan uloimmissa lasissa absorboivaa auringonsuojalasia. Rinnakkaisista ikkunoista toiseen vaihdettiin harmaa absorboiva auringonsuojalasi. Lasi toimii siten, että se absorboi auringon lyhytaaltoista lämpösäteilyä, mikä lämmittää lasia. Lasi säteilee lämpöä pitkäaaltoisena lämpösäteilyä sekä ulos että sisälle päin. Lisäksi lämpöä johtuu lasien välisen tilan ilmaan ja ulkoilmaan.

Kuvassa 45 on esitetty rinnakkaisten ikkunoiden keskimmäisten lasien keskikohdan lämpötilat. Tuloksista havaitaan, että auringonsuojalasisissa saavutettu hyöty on pieni. Tämä ulko-puitteen lasi lämpenee maksimissaan noin 20 °C kirkasta lasia lämpimämmäksi, ja lasi lämmittää puitteiden välisen ilmatilan ja sitä kautta keskimmäisen lasin lähelle samaa tasoa kuin kirkkaalla lasilla varustetussa ikkunassa.

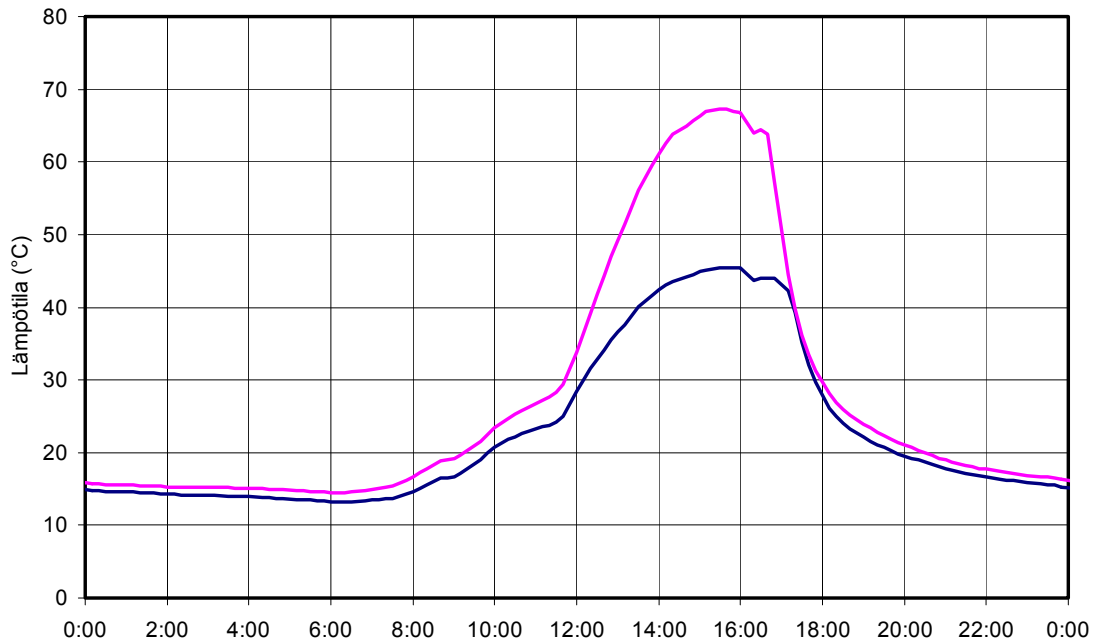
Kuvassa 46 on vierekkäisten ikkunoiden lämpötilat. Toisessa alkuperäinen harmaa kaihdin on auki vaaka-asennossa ja toisessa kiinni. Tuloksista havaitaan, että auki olevat kaihtimet lämmittävät keskimmäistä lasia jopa 10 °C lämpimämmäksi kuin kiinni olevat kaihtimet.

Kuvassa 47 on lämpötilat vierekkäisistä ikkunoista. Toisessa alkuperäinen sälekaihdin on vaaka-asennossa ja toisessa nostettuna ylös. Ero keskimmäisen lasin maksimilämpötiloissa on noin 20 °C. Sama lämpötilaero saavutetaan kiiltävällä kaihtimella, jos kaih-

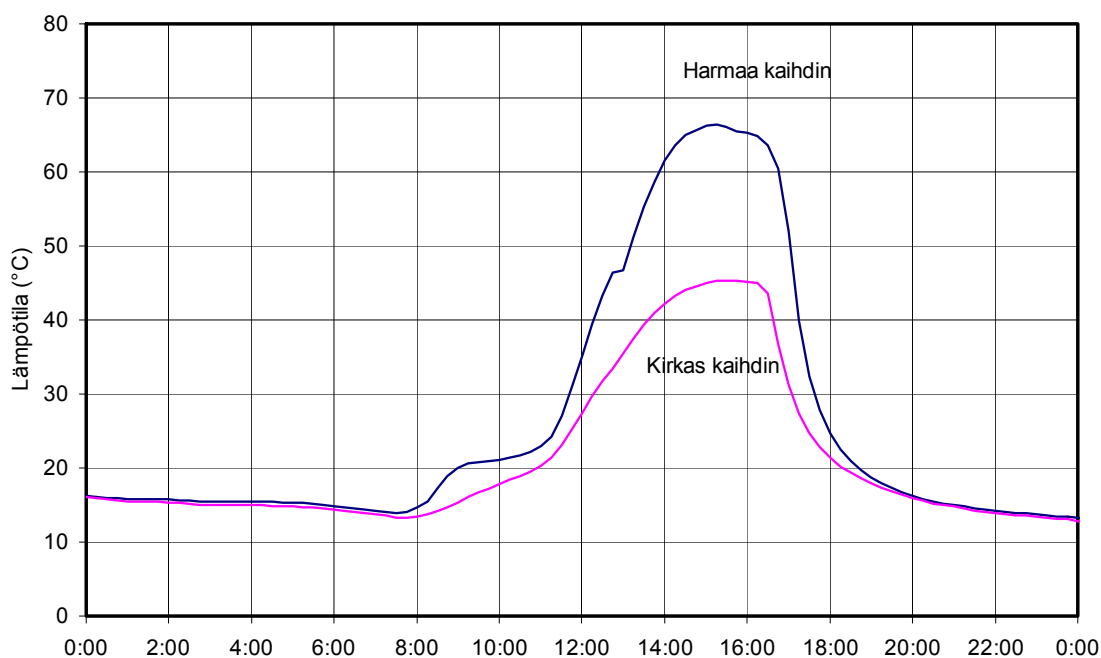
timet pidetään kiinni (kuva 48). Toisaalta avattu harmaa ja kiiltävä kaihdin nostavat keskimmäisen lasin lämpötilan samalle tasolle (kuva 49). Ainoa ero on, että kiiltävässä kaihtimessa lämpötilahuippu on kapeampi.



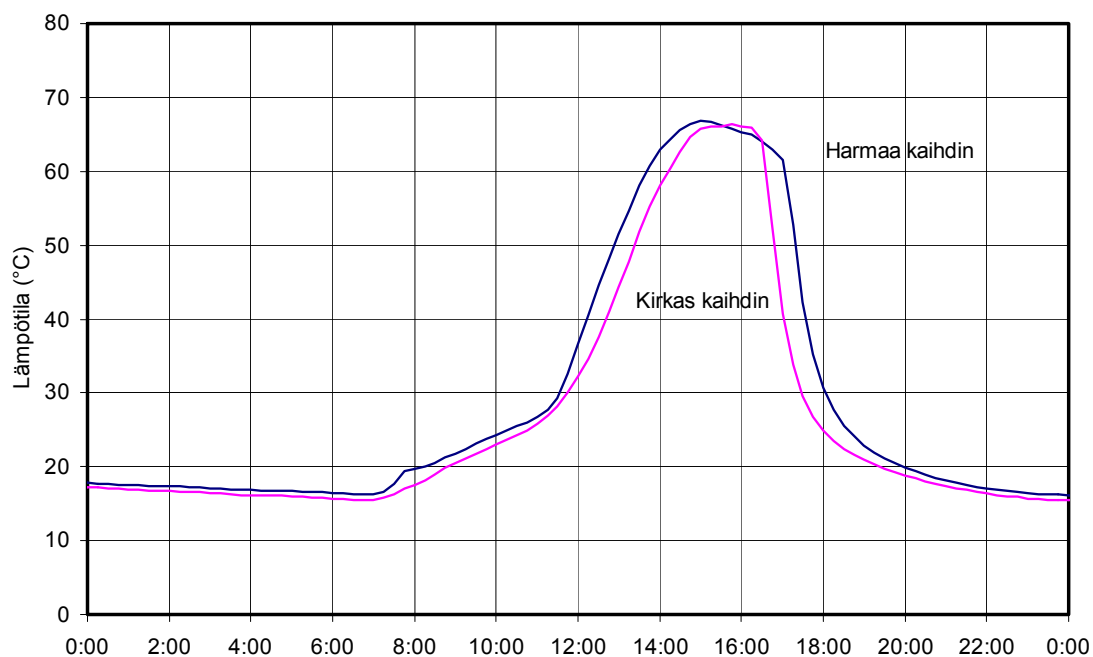
Kuva 46. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 24.7. Toisessa ikkunassa alkuperäinen kaihdin oli vaaka-asennossa ja toisessa kiinni.



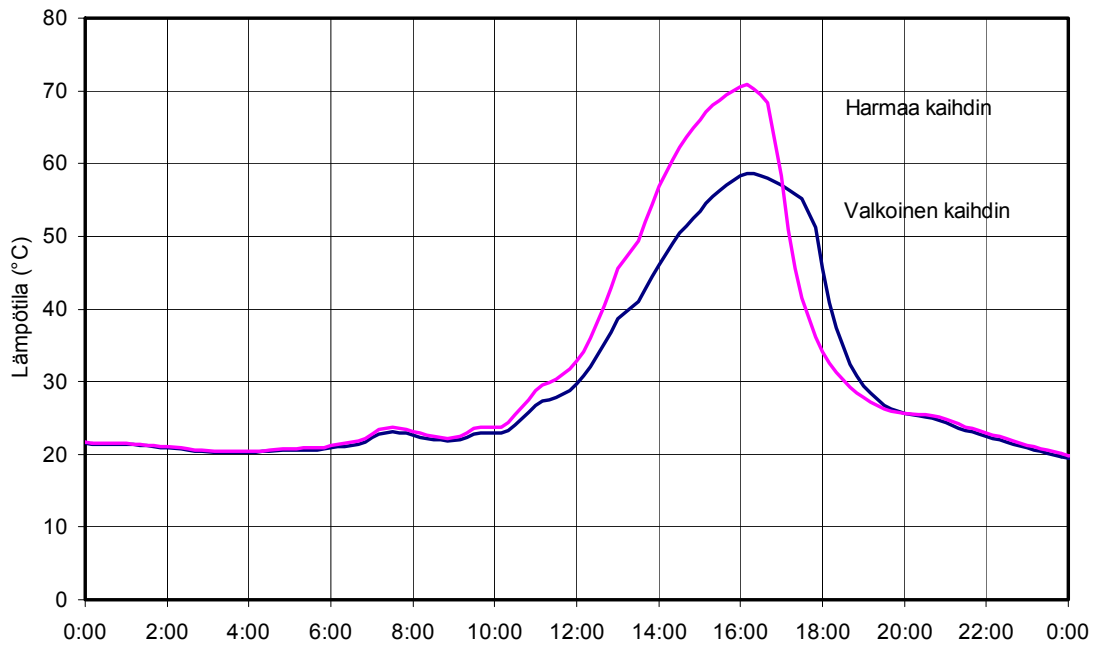
Kuva 47. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 28.8. Toisessa ikkunassa alkuperäinen kaihdin oli vaaka-asennossa ja toisessa ylhäällä.



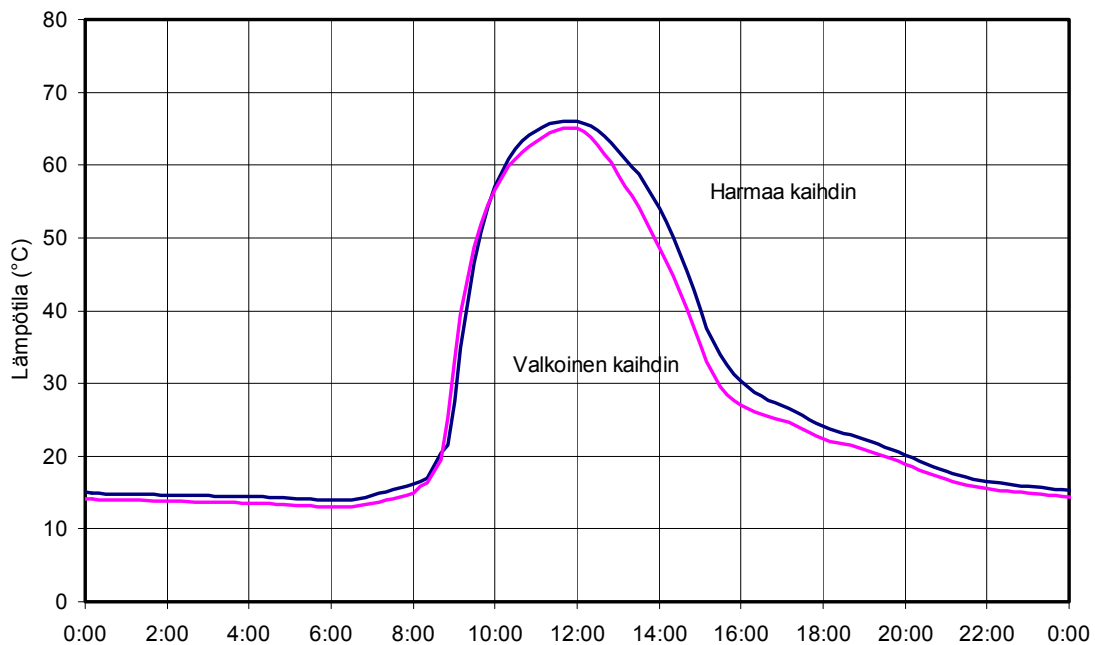
Kuva 48. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 20.9. Toisessa ikkunassa on alkuperäinen harmaa kaihdin ja toisessa yläpinnaltaan peilimäinen ja alapinnaltaan harmaaksi maalattu kaihdin. Kaihtimet olivat kiinni.



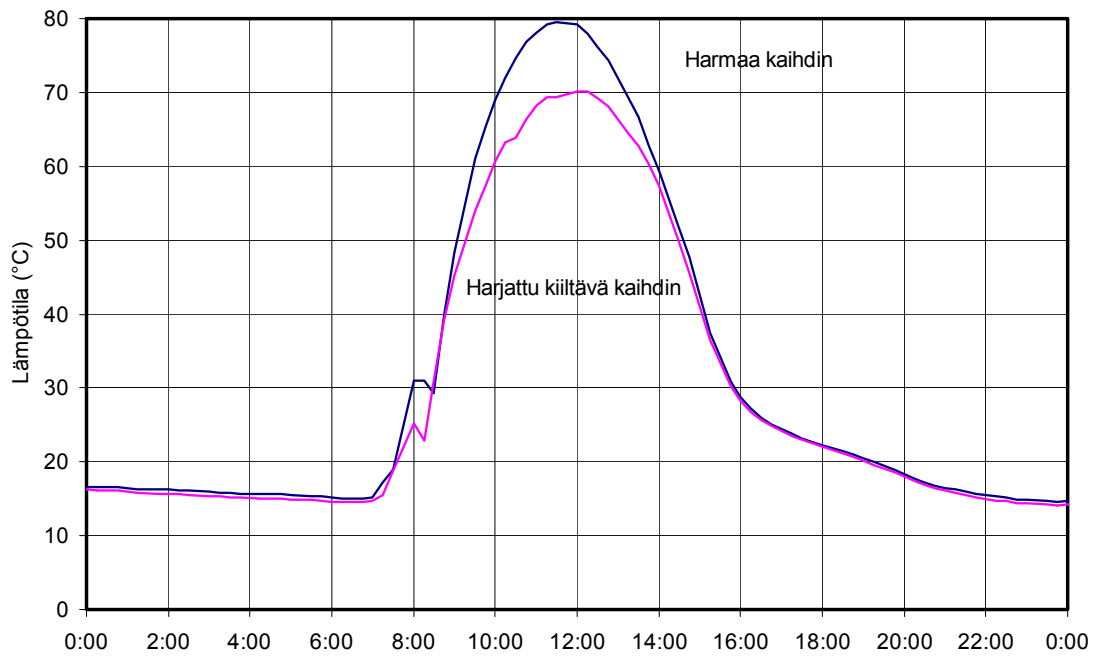
Kuva 49. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 9.9. Toisessa ikkunassa on alkuperäinen harmaa kaihdin ja toisessa yläpinnaltaan peilimäinen ja alapinnaltaan harmaaksi maalattu kaihdin. Kaihtimet olivat auki.



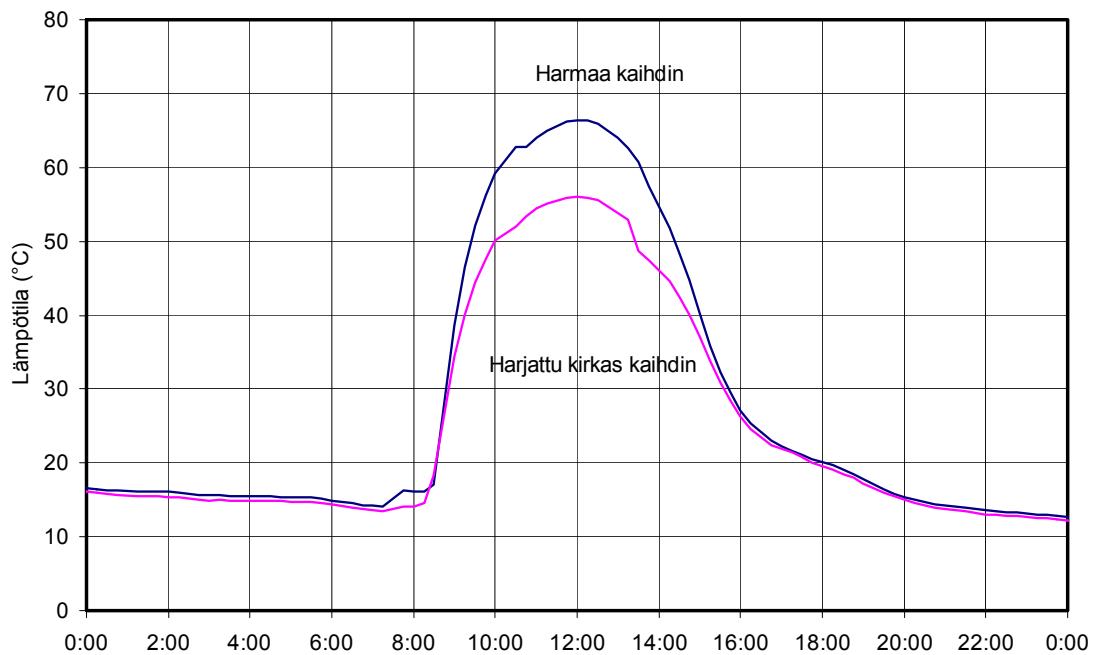
Kuva 50. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 23.6. Toisessa ikkunassa oli harmaa alkuperäinen kaihdin ja toisessa valkoinen maalattu kaihdin. Molemmat kaihtimet oli suljettu.



Kuva 51. Lounaisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 28.8. Toisessa ikkunassa oli harmaa alkuperäinen kaihdin ja toisessa valkoinen maalattu kaihdin. Molemmat kaihtimet oli käännetty vaaka-asentoon.



Kuva 52. Kaakkoisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 9.9. Toisessa ikkunassa on alkuperäinen harmaa kaihdin ja toisessa harjattu alumiinipintainen kaihdin. Kaihtimet olivat auki.



Kuva 53. Kaakkoisjulkisivun ikkunoiden keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilat 20.9. Toisessa ikkunassa on alkuperäinen harmaa kaihdin ja toisessa harjattu alumiinipintainen kaihdin. Kaihtimet olivat kiinni.

Valkoisella kaihtimella saavutettava hyöty on noin 10 °C, kun kaihdin on kiinni. Samoin lämpeneminen on valkoisella kaihtimella hitaampaa. Jos kaihdin on kiinni, hyöty alkuperäiseen harmaaseen kaihtimeen verrattuna on olematon. Myöskään lämpenemistä tai jäähtymisnopeuksissa ei ole eroja (kuvat 50 ja 51).

Kuvien 52 ja 53 perusteella harjatulta alumiinipinnalta näyttävällä kaihtimella ja alkupe-  
räisellä harmaalla kaihtimella näyttää olevan eroa 10 °C sekä avoimilla kaihtimilla että suljetuilla kaihtimilla. Harjattu säleen pinta säteilee ilmeisesti tehokkaammin lämpöä ulospäin myös avatuissa kaihtimissa.

## 7.4 Päätelmät mittauksista

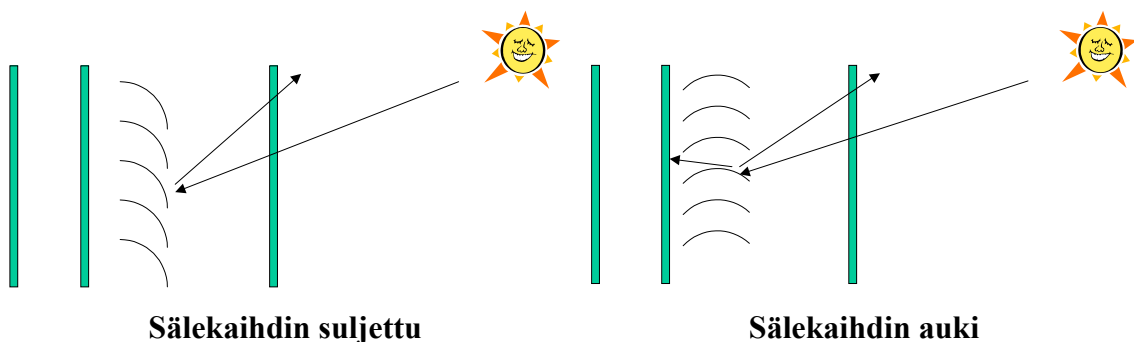
Kesällä 2003 oli noin kolmen viikon hellejakso heinäkuun puolivälistä elokuun alkuun. Vaikka helteen aikana korkeimmat päivälämpötilat olivatkin noin 30 °C, ikkunoista mitattiin korkeampia lämpötiloja ennen tätä jaksoa ja jakson jälkeen. Syynä tähän on ilman tavallista suurempi kosteuspitoisuus helteen aikana. Toisaalta aurinko paistaa keväeseen ja syksyyn verrattuna korkeammalta keskikesällä. Näistä molemmista syistä johtuen on tavallista, että ikkunoista mitataan suurimpia lämpötiloja keväällä sekä loppukesällä ja alkusyksyllä. Näihin ajankohtiin yhdistyvät tavallisesti myös viileät yöt, minkä vuoksi silloin mitataan tavallisesti myös suurimmat vuorokautiset lämpötilaerot ja suurimmat lämpötilanmuutosnopeudet. Mittaustulosten perusteella voitiin havaita seuraavaa:

- Säätilastojen ilmaston mittaustiedot eivät ole tarpeeksi tarkkoja, jotta ikkunoiden lämpötiloja voisi laskennallisesti määrittää riittävällä tarkkuudella. Laskelmia varten tarvitaan samanaikaiset lämpötila- ja auringon säteilytehotiedot mielellään 15 minuutin välein mitattuna.
- Pienetkin ympäristön varjostukset, kuten yksittäiset puut, näkyvät lämpötila-arvoissa.
- Absorboivan auringonsuojalasin käytöllä ulkopuitteessa ei saavuteta kuin pieni hyöty, koska absorboiva lasi lämpenee enemmän kirkkaaseen float-lasiin verrattuna ja lämmennyt lasi lämmittää puitteiden välisen ilmatilan.
- Korkein lämpötila oli ikkunan keskimmäisen lasin keskellä.
- Alanurkat olivat viileimmät kohdat keskimmäisessä lasissa.
- Keskimmäisen lasin suurin lämpötilaero keskikohdan ja nurkan välillä oli yli 35 °C.
- Keskimmäisen lasin suurin mitattu lämpötila oli 80 °C.
- Keskimmäisen lasin suurin lämpenemisnopeus oli yli 30 °C/h.



- Keskimmäisen lasin suurin jäähtymisnopeus on noin 20 °C/h.
- Keskimmäisen lasin suurimmat lämpötilat jäävät tasolle 50 °C, kun kaihdin on ylhäällä.
- Lasin lämpenemisen kannalta olennaisinta on säteilyteho eikä korkea ulkoilman lämpötila. Korkeimmat lämpötilat voivat esiintyä jopa syyskuussa.
- Auringonsuojalasista on vain vähän hyötyä lämpötilojen alentamiseksi.
- Heijastavista ja vaaleista kaihtimista on suurin hyöty, kun ne ovat kiinni.
- Vaakasuorassa asennossa olevat kaihtimet lämmittävät keskimmäistä lasia enemmän kuin kiinniasennossa olevat.
- Kiinniasennossa oleva valkoinen kaihdin alentaa keskimmäisen lasin keskikohdan lämpötilaa noin 10 °C ja heijastava kaihdin noin 20 °C.

Mittauksissa havaittiin sälekaihtimien estävän parhaiten eristyslasin lämpenemistä silloin, kun säleet ovat kiinni. Tällöin kaihtimet heijastavat parhaiten lämpöä takaisin ulos. Kaihtimien ollessa vaaka-asennossa osa säteilystä heijastuu ulos, osa sisälle ja osa absorboituu kaihtimiin (kuva 54). Paras tulos saavutettiin kirkkaalla metallipintaisella kaihtimella, mutta hyödyn saaminen edellytti säleiden kääntämistä kiinniasentoon.



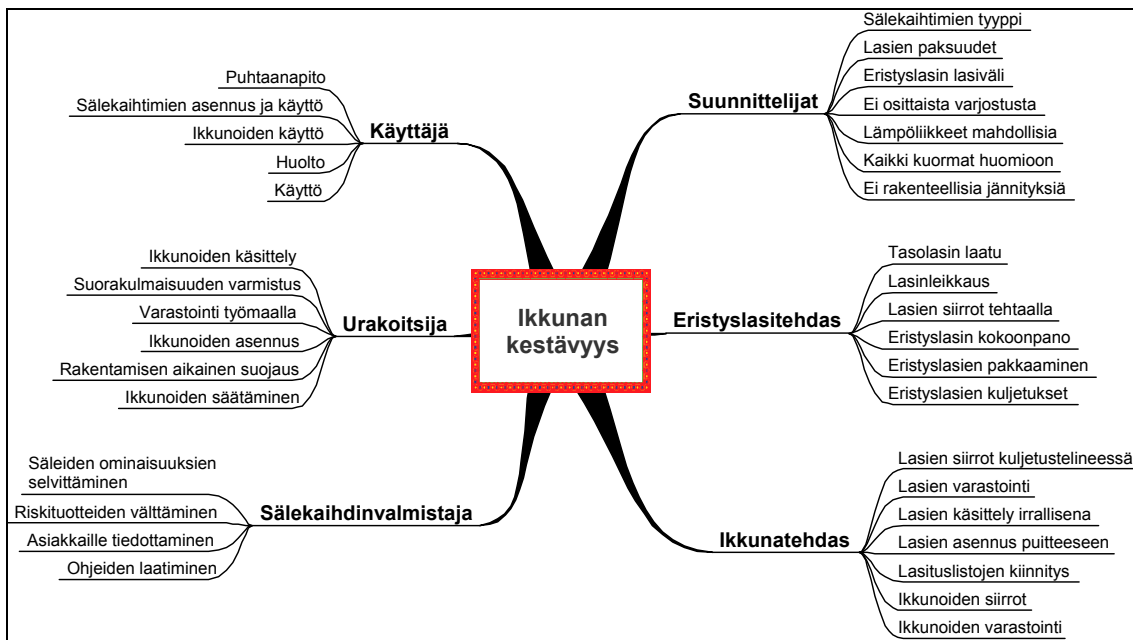
Kuva 54. Auringon säteilyn heijastuminen avoimesta ja suljetusta kaihtimesta.

## 8. Suomalaisen ikkunoiden rikkoutumisen estäminen

Miksi ikkunat rikkoutuvat itsestään? Rikkoutumiseen on kaksi syytä. Lasin lujuus heikenee, kun lämpötila kasvaa. Toisaalta ikkunan jännitystila kasvaa ikkunan lämmitessä ja lämpöjännitykset ovat luonteeltaan pitkäaikaisia, joita lasi kestää heikommin kuin lyhytaikaisia jännityksiä.

Ikkunoiden rikkoutumiselle ei löytynyt vain yhtä syytä, vaan rikkoutuminen on usean osatekijän summa. Kysymys on siitä, että kaikista osatekijöistä aiheutuu osaltaan lisää jännityksiä lasiin ja jossain vaiheessa lasin kestävyys ylittyy. Jännitysten pitäminen sallitulla tasolla edellyttää kaikilta osapuolilta kestävyystalkoita, joiden avulla rikkoutumismäärät saadaan pidettyä pieninä. Uhraukset eri toimijoilta ovat pieniä, ja saattaa olla niinkin, että asioita miettimällä uudelleen ja toimintatapoja muuttamalla voidaan saavuttaa jopa kustannussäästöjä. Raportissa (SIGMA TR-3401-96) on yksityiskohtaiset ohjeet eristyslasivalmistajille, joita noudattamalla rikkoutumisriskejä voidaan vähentää.

Oheisessa kuvassa on listattu eri organisaatiot tai henkilöt ja kohteet, joihin tulee kiinnittää huomiota ikkunan kestävyuden parantamiseksi eri vaiheissa. Nämä ohjeet on esitetty tarkemmin liitteissä A–E.



Kuva 55. Ikkunoiden rikkoutumiseen vaikuttaminen eri vaiheissa.

Eristyslasi- ja ikkunateollisuus on jo projektin aikana kiinnittänyt huomiota rikkoutumisriskiä aiheuttavien tekijöiden ehkäisyyn ja onnistunut vähentämään vuosittain rikkoutuvien ikkunoiden määrän useasta sadasta muutamaan kymmeneen.

## 9. Yhteenveto

Suomessa rikkoutui ennen tutkimuksen aloittamista vajaa promille ikkunoista tuntemattomasta syystä. Määrä on ollut pieni, mutta rikkoutuneiden lasien korjaamisesta on aiheutunut merkittävät kustannukset ikkunavalmistajille. Ikkunoiden rikkoutuminen on ollut useamman osatekijän summa, ja yksittäisen syyllisen nimeäminen on mahdotonta eikä se ole tarpeenkaan. Rikkoutumisen estäminen on nähtävä kestävyystalkoina, joihin kaikilla osapuolilla on jotain annettavaa.

Teollisuus onkin projektin aikana kiitettävästi kiinnittänyt huomiota eri osatekijöihin ja työtapoihin, ja tulokset ovat havaittavissa rikkoutuneiden lasien määrän pienentymisenä murto-osaan alkuperäisestä. Rikkoutumisten määrä pieneni niin pieneksi, ettei alun perin suunniteltua tilastollista tutkimusta rikkoutumisen syiden selvittämisestä pystytty tekemään liian pienen havaintoaineiston vuoksi. Tämä on myös osoitus esitettyjen keinojen toimivuudesta.

Lähes poikkeuksetta rikkoutuneissa ikkunoissa oli sälekaihtimet, mutta Suomessa ne kuuluvat oleellisena osana ikkunaan, minkä vuoksi kaihtimia ei voi pitää ikkunan rikkoutumisen vikana. Rikkoutumisen kannalta ikkunassa olevat sälekaihtimet ovat ratkaisevassa roolissa. Sälekaihtimet absorboivat auringon lämpösäteilyä siinä määrin, että ikkunan lasien reunan ja keskiosan välinen lämpötila voi nousta niin suureksi, että lasi rikkoutuu epätasaisen lämpenemisen aiheuttamasta lämpöjännityksestä. Merkittävänä lisänä jännityksiin on eristyslasin sisällä olevan kaasun paineen kasvu lasien lämmitessä.

Eristyslasin rikkoutuminen ikkunoissa onkin usean osatekijän summa. Tavallisilla lasilla ja sälekaihtimella varustetussa MSE-ikkunassa lämpötilat eivät nouse niin korkeiksi, että lasit rikkoutuisivat, mutta selektiivilasien ja täytekaasujen käyttö nostaa lämpötiloja ja rikkoutumisriskiä. Ikkunoiden kestävyys heikkenee, jos lasiosan lämmöneristävyys paranee, ja karmiosan lämmöneristävyys on oleellisesti lasiosan lämmöneristävyyttä huonompi. Jos tulevaisuudessa ikkunoiden lämmöneristävyudet vielä paranevat nykyisestä, eristyslasien rikkoutumisriski edelleen kasvaa.

Lasi materiaalina on erittäin lujaa mutta haurasta, ja sen lujuusominaisuuksiin liittyy suuri hajonta. Täysin virheettömän lasin vetolujuus on kirjallisuuden mukaan 70–80 MPa, ja kun lasi leikataan ruuduiksi, sen vetolujuus on tasolla 20–30 MPa. Tässä on avain kestävyuden parantamiseen. Jos lasin huolellisella käsittelyllä ja kunnossa olevilla leikkausvälineillä lasin vetolujuutta voidaan parantaa esimerkiksi 10 MPa, tällä on aivan eri merkitys kuin jollain ikkunan rakenteellisella parantamisella saavutettavalla 1–2 MPa:n jännityksen pienentymisellä. Kaikki halvat ja helpot menetelmät, joilla voidaan parantaa ikkunoiden kestävyyttä, tulee kuitenkin myös käyttää. Esimerkkeinä näistä

ovat muun muassa tummien sälekaihtimien sekä tummien puitteiden ja karmien välttäminen. Myös lasinkäsittelyn huolellisuudella parannetaan ikkunoiden kestävyyttä.

Eräs lasin reunavikoja vähentävä ja lasin lujuutta parantava tekijä on särmien hionta lasin leikkauksen jälkeen. Vaikkakin lasin reunaionta aiheuttaa reunaan pieniä naarmuja (säröjä), jotka heikentävät lasin lujuutta täysin ehjäreunaiseen lasiin verrattuna, se kuitenkin parantaa lasin reunan käsittelynkestävyyttä pienentämällä reunan lohkeamisriskiä ja sen myötä parantaa ikkunaan asennetun lasin lujuutta. Särmien hionta tulee kuitenkin tehdä mahdollisimman hienorakeista hionta-ainetta käyttäen, sillä karkea hionta-aine tekee särmiin syviä uurteita, jotka voivat olla rikkoutumisen alkusäröjä.

Toimistokiinteistössä tehdyissä mittauksissa mitattiin sisäpuitteen eristyslasista korkeimmillaan jopa 80 °C:n lämpötiloja ja yli 35 °C:n lämpötilaeroja. Nämä arvot alkavat olla tavallisilla laseilla varustetun ikkunan kestävyuden kannalta ylärajoilla. Ikkunan lämmöneristävyyden parantaminen nykyisestä 1,1–1,2 W/m<sup>2</sup>K U-arvotasosta merkittävästi paremmaksi voi tuoda uudelleen rikkoutumisongelman esille. Tällöin rikkoutumista ei voida enää vähentää yhtä helposti työtekniikoita kehittämällä, koska tämä keino on jo osittain käytetty.

## Lähdeluettelo

Button, D. et al. 1993. Glass in building. A guide to a modern architectural glass. Oxford: Pilkington. ISBN 7506-0590-1.

Chemetal GmbH. 1995. Gas-filled Insulating Glass Units. 9 s.

Jaugelis, Al. 4/1999. Kaboon, There Goes Another Argon-Filled IG Unit. USGlass.

PPG Industries Inc. 2002. Thermal Stress Update. Glass Technical Document, TD#109. PPG Industries Inc. 26 s.

Rainamo, M. & Riikonen, M. 1999. Lasirakentajan käsikirja. Tampere: Enterpress. 152 s. ISBN 951-98229-0-9.

Rawson, H. 1980. Properties and Application of Glass. Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company. 318 s. ISBN 0-444-41922-5.

SFS 4003 EHD, 1995-02-13. Puuikkunan lasitus eristyslasilla. 7 s.

SFS 4003, RT 41-10208. 1983-06-01. Puuikkunan lasitus umpiolasilla. 4 s.

SIGMA TR-3401-96. 1996. Preventing glass breakage during IG design, manufacture, transport, installation and use. SIGMA. 10 s.

Tenhunen, O. 2003. Metallilasirakenteisen kaksoisjulkisivun materiaalien soveltamiskriteerit. Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan julkaisuja 28. Espoo. 104 s. + liitt. 5 s. ISBN 951-22-6780-2.

Unger, G. Gaspermeation von Isoliergläsern. Glaswelt. 9/1991. S. 66–76.

# Liite A: Ohjeet suunnittelijoille

## Sälekaihtimien tyyppi

Rikkoutumisriskin pienentämiseksi MSE-ikkunoissa pitää käyttää puitteiden välissä sellaisia sälekaihtimia, jotka absorboivat mahdollisimman vähän ja heijastavat mahdollisimman paljon auringonsäteilyä. Hyviä kaihdinmateriaaleja ovat alumiiniset valkoiseksi maalatut ja kirkkaat metallipintaiset kaihtimet.

## Lasien paksuus

Ikkunan kestävyys kannalta on edullista, jos eristyslasin kaikki lasit ovat samanklaisia, mutta turvallisuus- tai ääneneristysvaatimukset estävät sen joskus.

## Eristyslasin lasiväli

MSE-ikkunan eristyslasin lasivälin kasvattaminen lisää lasien sisällä olevan kaasun määrää ja lasien lämmitessä tapahtuvaa paineen kasvua, mikä kasvattaa lasien jännityksiä. Eristyslasin lasiväli 12–15 mm ei tavallisesti aiheuta ongelmia, mikäli muut rasitus-tekijät on otettu huomioon.

## Varautuminen lämpöliikkeisiin

Lasien ja puitteen lämpöliikkeiden tulee olla mahdollisia, sillä estetyt lämpöliikkeet lisäävät eristyslasin jännityksiä ja rikkoutumisen riskiä. MSE-ikkunassa puisen sisäpuitteen jäykkyys varsinkin suurissa ikkunoissa on suhteellisen pieni eristyslasiin verrattuna, minkä vuoksi eristyslasia ei välttämättä tarvitse kiinnittää joustavasti puitteeseen.

## Kaikkien kuormitustekijöiden ottaminen huomioon

Suurissa ikkunoissa on monia tekijöitä, jotka aiheuttavat jännityksiä eristyslasiin. Eristyslasin jännitykset aiheutuvat näiden kaikkien kuormitustekijöiden yhteisvaikutuksesta. Vaikka ikkunan rikkoutumisen kannalta sälekaihtimien aiheuttama lämpörasitus on merkittävässä asemassa, myös muilla kuormituksilla, kuten painovoimalla, tuulella, lukkojen ja saranoiden aiheuttamilla pistemäisillä voimilla, on vaikutusta.

## Rakenteellisten jännitysten välttäminen

Lukkojen ja saranoiden sijoituksella on vaikutusta ikkunan jännitystasoon. Edellä mainittujen tekijöiden määrä ja sijoitus vaikuttavat jännitystasoon.

## Osittaisten varjostusten välttäminen

Rakennuksen osat tulee suunnitella siten, että julkisivussa ei ole rakennelmia tai ulokeita, jotka varjostavat ikkunaa osittain. Erityisen haitallisia ovat osat, jotka varjostavat ikkunan alareunan kapealta alueelta.

## Ohjeet suunnittelijoille

TOIMEN- PIDE	KOHDE	SUORITUSOHJEET
Ikkunoiden valinta	Sälekaihti- men tyyppi	<ul style="list-style-type: none"><li>- valitaan sälekaihtimet, jotka absorboivat mahdollisimman ja heijastavat mahdollisimman paljon auringonsäteilyä</li><li>- hyviä kaihdinmateriaaleja ovat alumiiniset valkoiseksi maalatut ja kirkkaat metallipintaiset kaihtimet</li></ul>
	Lasien paksuudet	<ul style="list-style-type: none"><li>- kestävyuden kannalta on edullista, jos eristyslasin kaikki lasit ovat yhtä paksuja</li><li>- turvallisuus- tai ääneneristysvaatimusten takia voi olla tarpeen käyttää paksuudeltaan erilasia laseja</li></ul>
	Eristyslasin lasiväli	<ul style="list-style-type: none"><li>- lasivälin kasvattaminen kasvattaa rikkoutumisriskiä</li><li>- 12–15 mm:n lasiväli ei tavallisesti aiheuta ongelmia</li></ul>
	Lämpö- liikkeet	<ul style="list-style-type: none"><li>- estetyt lämpöliikkeet lisäävät eristyslasin jännityksiä ja rikkoutumisen riskiä</li><li>- MSE-ikkunassa puisen sisäpuutteen jäykkyys varsinkin suurissa ikkunoissa on suhteellisen pieni eristyslasiin verrattuna, minkä vuoksi eristyslasia ei välttämättä tarvitse kiinnittää joustavasti puutteeseen</li></ul>
	Kuormi- tukset	<ul style="list-style-type: none"><li>- ikkunan rikkoutumisen kannalta sälekaihtimien aiheuttama lämpörasitus on merkittävässä asemassa</li><li>- myös muilla kuormituksilla, kuten painovoimalla, tuulella, lukkojen ja saranoiden aiheuttamilla piste- mäisillä voimilla, on vaikutusta</li></ul>
	Rakenteel- iset jänni- tykset	<ul style="list-style-type: none"><li>- lukkojen ja saranoiden sijoituksella on vaikutusta ikkunan jännitystasoon</li><li>- määrä ja sijainti ratkaisevat</li></ul>
Rakennus- suunnittelu	Osittainen varjostus	<ul style="list-style-type: none"><li>- julkisivussa olevat ulokkeet ja rakennelmat varjostavat ikkunaa osittain, mistä voi aiheutua lasin jännitystilan kohoaminen</li><li>- erityisen haitallisia ovat osat, jotka varjostavat ikkunan alareunan</li></ul>

# Liite B: Ohjeet eristyslasivalmistajille

## Tasolasin laatu

Nykyisin tasolasin laatu on hyvää float-valmistusmenetelmän vuoksi. Ajoittain voivat lasissa olla kuitenkin ongelmana valmistuksessa syntyneet poikkeuksellisen suuret jäännösjännitykset, jotka ilmenevät lasilevyjen aaltoiluna tai siten, että lasi ei leikkauksessa suoriin tavoin. Suuria jäännösjännityksiä sisältävän lasin käyttö eristyslasissa ei ole suositeltavaa, koska nämä jännitykset kasvattavat eristyslasin rikkoutumisriskiä.

## Lasinleikkaus

Lasin leikkaamiseen tulee käyttää teräviä työvälineitä, joilla saadaan leikkausjäljestä siisti. Tylsät terät tekevät leikkauspintaan lohkeamia, jotka heikentävät lasin lujuutta.

Lasin leikattujen reunojen terävien särmien hionta vähentää lohkeamisen vaaraa ja siten parantaa lasien kestävyttä. Särmien hionta tulee kuitenkin tehdä mahdollisimman hienorakeista hionta-ainetta käyttäen, sillä karkea hionta-aine tekee särmiin syviä uurteita, jotka voivat olla rikkoutumisen alkusäröjä samalla tavoin kuin lohkeamat.

## Lasien siirrot tehtaalla

Lasien siirtely tehtaalla työpisteestä toiseen voi aiheuttaa lasin särmiin lohkeamia. Erittäin lasien nostot ja laskut sekä siirtäminen nauhakuljettimilla tai liukurullien päällä syrjäillä ovat kestävyden kannalta kriittisiä vaiheita. Lasin kanssa kosketuksiin joutuvien pintojen tulee olla puhtaita. Erittäin haitallisia ovat hiekanjyvät ja lasinsirut, jotka voivat naarmuttaa lasinpintaa sekä jäädessään telineen ja lasin reunan väliin aiheuttaa lohkeamia särmiin.

## Eristyslasin kokoonpano

Eristyslasin kokoonpanolämpötilalla ja ilmanpaineella on merkitystä elementin sisälle muodostuvan paineen suuruuteen. Matala valmistuslämpötila ja korkeapaine kasvattavat auringonpaisteessa olevan ikkunan eristyslasin painetta ja lisäävät rikkoutumisriskiä.

Ilmanpaine ja valmistuslämpötila tulee ottaa huomioon myös silloin, kun eristyslasit tai ikkunat kuljetetaan merenpinnasta korkealla sijaitsevan paikan kautta tai ikkunat asennetaan maantieteellisesti korkealla sijaitsevaan rakennukseen.

Eristyslasin kokoonpanossa käytettävät saumaussmassat tulee valita siten, että niiden kaasunläpäisevyys on mahdollisimman pieni ja että argonin ja muiden ilman komponenttien läpäisevyys on mahdollisimman samansuuruinen. Jos argonin poistuminen lasista on huomattavan nopeaa verrattuna muiden kaasujen tulemiseen elementin sisälle,



lasiin muodostuu alipaine, joka saattaa rikkoa lasin. Lämpösuhteiden ollessa päinvastaisten lasin sisälle muodostuu ylipaine.

### **Eristyslasin pakkaaminen**

Eristyslasit pakataan yleensä hieman vinoon asentoon kuljetustelineeseen, jolla ne kuljetetaan ikkunatehtaalle. Lasit tulee asentaa siten, että elementtien kaikki lasit ovat kannattuja, muussa tapauksessa saumaussmassoihin voi syntyä leikkausmuodonmuutoksia. Kuljetustelineen tulee olla puhdas siten, että lasien ja telineen välissä ei ole lasin- eikä kivensiruja. Lasit tulee sitoa siten, etteivät ne liiku kuljetustelineessä nostojen ja kuljetuksen aikana. Toisaalta sitominen ei saa olla niin tiukkaa, että lasin särmät rikkoutuvat.

### **Eristyslasin kuljetus ikkunatehtaalle**

Eristyslasien kuljetuksessa ja siirroissa tulee välttää voimakkaita tärähdyksiä ja reunoihin syntyviä kolhuja.

Erityisen kovilla pakkasilla on mahdollista, että lämmittämättömässä tilassa kuljetettuja lasista osa rikkoutuu, mikä johtuu elementin sisällä olevan kaasun paineen pienene- misestä lämpötilanlaskun vuoksi.

## Ohjeet eristyslasivalmistajille

<b>TOIMEN- PIDE</b>	<b>KOHDE</b>	<b>SUORITUSOHJEET</b>
Lasin laadun- tarkastus	Laadun- tarkastus	- varmistetaan, että lasissa ei ole suuria jäännös- jännityksiä
Lasin käsittely	Leikkaa- minen	- käytetään teräviä ja kunnossa olevia leikkausteriä - lasin reunan särmien hiomisella voidaan vähentää särmien vaurioitumista lasin siirtojen aikana
	Siirtäminen	- siirtorullat ja nauhakuljettimet, joiden päällä lasi kul- kee syrjällään, tulee pitää puhtaina - puhdistus tulee tehdä säännöllisesti
Eristyslasin valmistaminen	Kokoonpano	- valmistustilan olosuhteiden tulee olla sellaisia, että elementin sisälle ei muodostu poikkeuksellisen suurta yli- tai alipainetta - saumaussmassojen tulee olla sellaisia, että niiden kaa- sunläpäisevyys on mahdollisimman pieni ja kaikkien ilman komponenttien läpäisy yhtä suuri
Eristyslasien toimittaminen asiakkaille	Pakkaa- minen	- eristyslasien tulee olla kuljetustelineessä koko pak- suudeltaan kannatettuja - telineestä tulee puhdistaa roskat pois lasien alta - lasit tulee kiinnittää telineeseen niin, etteivät ne liiku kuljetuksen aikana - kiinnitystä ei saa tehdä niin lujaa, että lasin särmät rikkoutuvat
	Kuljetus ikkuna- tehtaalle	- kuljetuksessa tulee välttää voimakkaita tärähdyksiä ja lasin reunojen vaurioitumista - kovilla pakkasilla kuljetus lämmittämättömässä tilassa voi rikkoa laseja

# Liite C: Ohjeet ikkunavalmistajille

## **Siirrot kuljetustelineessä**

Eristyslasien kuljetuksessa ja siirroissa tulee välttää voimakkaita tärähdyksiä ja reunoihin syntyviä kolhuja. Lasit tulee sitoa siten, etteivät ne liiku kuljetustelineessä nostojen ja kuljetuksen aikana.

## **Varastointi**

Eristyksen kovilla pakkasilla on mahdollista, että lämmittämättömässä tilassa säilytetyistä lasista osa rikkoutuu, mikä johtuu elementin sisällä olevan kaasun paineen pieneneemisestä lämpötilanlaskun vuoksi. Toisaalta hyvin lämpimään varastointi pitkäaikaisesti ei myöskään ole suositeltavaa, koska se nostaa lasin täytekaasun painetta ja rasittaa eristyslasin saumaosia. Varastointi normaalissa huonelämpötilassa on optimaalinen säilytysolosuhde.

## **Käsittely irrallisena**

Eristyslasielementit tulee siirtää aina nostamalla. Niitä ei saa liu'uttaa mitään pintaa pitkin edes lyhyitäkin matkoja. Kaikissa siirroissa on vältettävä kolhimasta lasin reunoja.

## **Asennus puitteeseen**

Eristyslasit asennetaan ja kiilataan puitteeseen standardin SFS 4003 tai SFS 4003 EHD mukaisesti. Jos asennuskiilat eivät mahdu elementin ja puitteen väliin, rakoa ei saa levittää kankeamalla eristyslasin reunaan vasten. Asennuskiilojen leveys tulee olla sama kuin eristyslasielementin kokonaispaksuus, jotta vältetään lasin leikkautuminen irti elementistä.

Jos elementtiä pitää liu'uttaa sivusuunnassa puitteessa kiilojen paikalleen saamiseksi, on suositeltavampaa käyttää imukuppikahvoja lasin siirtämiseen kuin kammata lasia. Jos lasia kammetaan, työssä ei saa käyttää metallisia välineitä, vaan niiden tulee olla valmistettu muovista.

Elementtejä, joiden särmissä on suuria lohkeamia, ei pitäisi asentaa puitteeseen, koska on todennäköistä, että ne rikkoutuvat käyttötilanteessa.

## **Lasilistojen kiinnitys**

Lasilistoja kiinnitettäessä on huolehdittava, etteivät kiinnitysnaulat tule liian lähelle tai ota kiinni lasin särmään. Edellä mainituissa tapauksissa lasiin voi syntyä lohkeamia tai kiinnitysnaula voi aiheuttaa pistemäisen jännityshuipun, joka voi yhdessä muiden rasitusten kanssa rikkoa lasin.

## Ohjeet ikkunavalmistajille

<b>TOIMEN- PIDE</b>	<b>KOHDE</b>	<b>SUORITUSOHJEET</b>
Lasien käsittely	Siirtäminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- käsiteltävä varovasti</li><li>- siirrot tehtävä nostamalla, kantamalla tai kärryssä työntämällä</li><li>- liu'uttaminen lattiaa tai muuta pitkin on kielletty</li><li>- vältettävä iskuja ja voimakkaita tärähdyksiä</li><li>- eristyslasin reunan kolhiintuminen tulee estää</li></ul>
Varastointi	Suojaaminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- eristyslasit tulee suojata työmaalla liialta kosteudelta, lämmöltä ja pakkaselta</li></ul>
Ikkunoiden kokoonpano	Lasin asentaminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- asennus ja kiilaus tehdään standardin SFS 4003 tai SFS 4003 EHD mukaisesti</li><li>- lasin ja puitteen välissä oltava riittävästi tilaa asennuskiiloille</li><li>- asennuskiilojen tulee olla koko lasin paksuuden alueella</li><li>- elementin ja puitteen välisen raon säätäminen kankeamalla lasin reunasta ei ole suositeltavaa, ja erityisesti kankeaminen metallisella työkalulla on ehdottomasti kiellettyä</li><li>- elementtejä, joiden särmissä on suuria lohkeamia, ei pitäisi asentaa ikkunaan</li></ul>
	Lasituslistojen asentaminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- huolehdittava, etteivät lasituslistojen kiinnitysnaulat tule liian lähelle lasin pintaa tai ota kiinni lasin pintaan</li></ul>

## **Liite D: Ohjeet kaihdinvalmistajille**

### **Säleiden ominaisuuksien selvittäminen**

Kaihtimien lämpeneminen MSE-ikkunan sisällä on merkittävä tekijä, joka aiheuttaa lasien rikkoutumista. Ikkunan väliin tulevat säleet ovat yleensä alumiinia, ja ne on tavallisesti maalattu ja lakattu pinnaltaan. Lämpenemiseen vaikuttavat säleen pinnoitteen auringonsäteilyn absorptio-ominaisuudet, ja näiden tekijöiden tunteminen on oleellista ikkunan kestävyuden kannalta.

### **Riskituotteiden välttäminen**

Ikkunan kestävyuden kannalta erityisen ongelmallisia sälekaihtimia ovat mustat ja muut tumasävyiset kaihtimet. Näitä ei pitäisi asentaa MSE-ikkunan sisälle, koska lasien rikkoutumisvaara on suuri tällaisissa ikkunoissa.

### **Asiakkaille tiedottaminen**

Asiakkaille tulee tiedottaa, että tummiin sälekaihtimiin liittyy ikkunoiden rikkoutumisvaara. Lisäksi asiakkaita tulee ohjata valitsemaan riskittömämpiä sälekaihtimia, jos he ovat tietämättömyyttään valinneet tummasävyiset kaihtimet.

### **Hoito-ohjeiden laatiminen**

Kaihtimien likaantuminen vähentää auringonsäteilyn heijastumista ja lisää absorptiota, minkä vuoksi likaiset kaihtimet lämpenevät enemmän kuin puhtaat. Ikkunan kestävyuden kannalta on oleellista ohjeistaa sälekaihtimien puhdistus. Ohjeista tulee käydä ilmi puhdistusvälineet ja -aineet sekä puhdistusmenetelmä ja -tiheys.

## Ohjeet kaihdinvalmistajille

<b>TOIMEN- PIDE</b>	<b>KOHDE</b>	<b>SUORITUSOHJEET</b>
Tiedon hankinta	Säleiden ominais- suudet	- hankitaan tietoa säleiden lämpöteknisistä ominaisuuksista, kuten auringonsäteilyn absorptio ja heijastus
	Riskituotteet	- tiedostetaan riskituotteet, kuten tummat ja mustat säleet - ei asenneta riskituotteita MSE-ikkunoihin
Tiedotus	Asiakkaiden valistaminen	- tiedotetaan asiakkaille MSE-ikkunaan sopivista ja sopimattomista sälekaihdinmalleista
	Asiakkaiden opastaminen	- opastetaan asiakkaat valitsemaan riskittömämpiä kaihdinmalleja, jos he valitsevat tietämättömyyttään esimerkiksi tummasävyiset kaihtimet MSE-ikkunoihin
Huolto	Hoito- ohjeiden laatiminen	- ohjeistetaan kaihtimien puhdistus, joka sisältää ohjeet työmenetelmistä, tarvikkeista ja aineista

# Liite E: Ohjeet ikkunoiden asentajille

## Ikkunoiden käsittely

Ikkunoita on käsiteltävä varovasti. Iskuja ja voimakkaita tärähdyksiä on vältettävä siirreltäessä ikkunoita. Siirrot tulee tehdä nostamalla, kantamalla tai kärryssä työntämällä. Liu'uttaminen lattiaa pitkin on kiellettyä.

## Ikkunan suorakulmaisuuuden ja osien yhteensopivuuden varmistus

Ennen kuin ikkunat kiinnitetään seinään, tulee varmistua ikkunoiden karmien ja puitteiden suorakulmaisuuudesta sekä puitteen sopivuudesta karmin aukkoon.

On huomattava, että karmin ristimittojen yhtäsuuruus ei takaa kulmien suorakulmaisutta muuta kuin silloin, kun karmin vastakkaiset sivut ovat samannomiset. Suorakulmaisuus varmistetaan mittaamalla tarvittaessa karmin sivujen pituudet ja ristimitat.

## Varastointi työmaalla

Työmaalle tuodut asentamista odottavat ikkunat tulee suojata liialta kosteudelta, lämmöltä ja pakkaselta. Voimakas kosteusrasitus voi vaurioittaa puuosien pinnoitteita ja käyristää puuosia, mistä seuraa jännityksiä lasihin. Suora auringonpaiste voi kuumentaa suojapeitteen alle varastoidut lasit niin kuumiksi, että eristyslaseja voi rikkoutua. Tämän vuoksi ikkunat tulee varastoida varjoisaan paikkaan. Toisaalta kova pakkanen voi aiheuttaa eristyslasin sisälle niin suuren alipaineen, että lasi voi rikkoutua.

## Rakentamisen aikainen suojaus

Rakentamisen aikana rakennukseen asennetut ikkunat tulee suojata kolhuilta siten, että ikkunan sisäpinnalla ei ole hyvin lämpöä eristävää materiaalia, kuten lämmöneristelevyjä. Ikkunan ulkopintaan kohdistuva auringonpaiste nostaa sisäpinnaltaan lämmöneristetyn ikkunan lämpötilan haitallisen korkeaksi, mistä voi olla seurauksena lasin rikkoutuminen.

## Ikkunan säätäminen

Ikkunat tulee säätää siten, että avautuminen ja sulkeutuminen on esteetöntä. Mahdollinen takertelu aiheuttaa puitteeseen ja lasiin kiertojännityksiä, jotka voivat rikkoa lasin välittömästi tai aiheuttaa reunaan särön, joka kasvaa aikaa myöten ja rikkoo lasin.

Säätämisessä tulee kiinnittää huomiota käyntiväleihin, tiivisteväleihin ja lukkojen sulkuvoimaan. Liian pienet tiivistevälit ja liian suuri lukkojen sulkuvoima aiheuttavat puitteen käyristymistä, mikä osaltaan voi aiheuttaa lasien rikkoutumisen. Saranoita säädettäessä tulee muistaa painaa pulttisaranoiden tapit takaisin paikoilleen säätämisen jälkeen.

## Ohjeet ikkunoiden asentajille

<b>TOIMEN- PIDE</b>	<b>KOHDE</b>	<b>SUORITUSOHJEET</b>
Ikkunoiden käsittely	Siirtäminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- käsiteltävä varovasti</li><li>- vältettävä iskuja ja voimakkaita tärähdyksiä</li><li>- siirrot tehtävä nostamalla, kantamalla tai kärryssä työntämällä</li><li>- liu'uttaminen lattiaa pitkin on kielletty</li></ul>
Tarkistusmittaukset	Osien yhteen-sopivuuden varmistus	<ul style="list-style-type: none"><li>- tarkistetaan, että puitteet sopivat karmiaukkoihin</li><li>- tarkistetaan käyntivälit</li></ul>
	Suorakul- maisuu- den varmistus	<ul style="list-style-type: none"><li>- mitataan ristimitat karmista</li><li>- mitataan tarvittaessa karmin vastakkaisten sivujen pituudet</li></ul>
Varastointi	Suojaaminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- ikkunat tulee suojata työmaalla liialta kosteudelta, lämmöltä ja pakkaselta</li></ul>
Suojaaminen rakennuksessa	Suojaaminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- asennetut ikkunat tulee suojata kolhuilta muun rakentamisen aikana</li><li>- suojaamisessa ei saa käyttää lämmöneristelevyjä</li></ul>
Käyttöönotto	Säätäminen	<ul style="list-style-type: none"><li>- ikkunat tulee säätää siten, että avautuminen ja sulkeutuminen on esteetöntä</li><li>- ikkunoiden toiminta säädetään lukkoja ja saranoita säätämällä</li></ul>



# Liite F: Ohjeet ikkunan käyttäjille

## Käyttö

Ikkunoita ei saa avata ”väkisin”. Jos ikkuna on turvonnut siten, että puite ottaa joltain sivulta kiinni, voimallinen avaaminen kiertää puitetta ja se voi aiheuttaa lasin säröytymisen tai rikkoutumisen. Ikkunat suljetaan siten, että puitteet painetaan tasaisesti kiinni välttämällä puitteen kiertymistä. Suljettaessa ikkunan kaikki yksittäiset lukot tulee lukita, sillä muussa tapauksessa puite voi aikaa myöten kiertyä tai tuulenpuuska voi käyristää puitetta. Tällä on merkitystä lasin rasituksiin ja kestävyYTEEN.

## Sälekaihtimien asennus ja käyttö

Jos ikkunaan asennetaan sälekaihtimet, tulee valita vaaleanväriset tai metallipintaiset säleät lämpörasitusten vähentämiseksi. Asennuksessa reikiä porattaessa ja kannakkeita kiinnitettäessä tulee varoa vaurioittamasta lasin reunaa. Sälekaihtimen kannakkeet on suositeltavampaa kiinnittää ruuveilla kuin nautoilla, koska naulaaminen voi aiheuttaa lasiin taivutusjäännityksiä.

Sälekaihtimia ei pidä nostaa puolittain ylös aurinkoisella säällä, koska ikkunan ylä- ja alareunan välille muodostuu suuri lämpötilaero, mikä voi rikkoa lasin. Rikkoutuminen on mahdollista jopa talviaikaan.

## Huolto

Huollon tarkoituksena on varmistaa ikkunan ominaisuuksien ja toimintakunnon säilyminen vuodesta toiseen hyvänä. Huollolla ei ole kuitenkaan tarkoitus parantaa joitain yksittäisiä ominaisuuksia. Huolto on suunniteltua ja säännöllistä toimintaa. Huolto sisältää pintojen pesun, käyntivälien säätämisen, vaurioituneiden osien (esimerkiksi tiivistysten) korjaamisen sekä lukkojen ja saranoiden voitelun.

Pesun päätarkoituksena on pitää lasiosat läpinäkyvinä ja estää lian piintyminen kiinni maalattuihin pintoihin. Ikkunoiden pesutarve riippuu merkittävästi ulkoilmassa olevista epäpuhtauksista ja rakennuksen tyypistä. Kaupunki-ilmastossa ikkunat likaantuvat huomattavasti nopeammin kuin maaseudulla, ja räystäättömässä kerrostalossa nopeammin kuin pitkällä räystäällä varustetussa pientalossa. Ikkunat tulisi pestä vähintään kerran vuodessa ja kaupunki-ilmastossa kaksi kertaa vuodessa.

Ikkunoiden lämpörasituksen kannalta on myös oleellista puhdistaa sekä lasi- että karmi- ja puitepinnat samoin kuin ikkunassa mahdollisesti varusteena oleva sälekaihdin riittävästi usein. Pinnoilla oleva lika on tavallisesti hienojakoista pölyä ja nokea, jotka molemmat absorboivat tehokkaasti auringon lämpösäteilyä. Tämä lika lisää siten ikkunan rik-

koutumisriskiä. Puhdistus on kuitenkin tehtävä siten, ettei naarmuteta lasia, mikä myös lisää rikkoutumisriskiä.

#### Karmi- ja puitepintojen puhdistus

Ulkopuolen maalatut pinnat on hyvä pestä kerran vuodessa laimealla, neutraalilla pesuliuoksella, jotta vähennetään lian piintymistä maalipintaan kiinni. Puhdistukseen ei saa käyttää liuottimia, syövyttäviä eikä hankaavia aineita, sillä nämä saattavat vaurioittaa maalipintaa. Samoin on hyvä puhdistaa muutkin karmin ja puitteiden pinnat samalla tavoin laimeaan pesuliuokseen kostutetulla rievulla pyyhkimällä.

#### Lasipintojen puhdistus

Ikkunoita pestäessä on käytettävä ikkunoiden pesuun tarkoitettuja pesuaineita ja välineitä. Puhdistuksessa ei saa käyttää hankaavia aineita tai välineitä. Pesuvälineiden tulee olla puhtaita ja vesi vaihdettava riittävän usein, sillä rievussa tai lastassa olevat hiekanjyvät naarmuttavat lasipintaa.

#### Sälekaihtimien puhdistus

Sälekaihtimet imuroidaan harjasuuttimen avulla ja mikäli lika on piintynyt kiinni, säleet voidaan imuroinnin jälkeen pyyhkiä varovasti puhtaaseen veteen kostutulla rievulla. Riepu on huuhdottava tai vaihdettava usein, jotta estetään liassa olevia hiekanjyviä vaurioittamasta säleiden maali- ja lakkapintaa.

#### Tiivisteiden vaihto

Tiivisteiden kuntoa tulee seurata, koska vaurioituneet tiivisteet heikentävät ikkunan ilmanpitävyyttä, pölytiiviyttä ja ääneneristävyyttä. Vaurioituneet tiivisteet korvataan materiaaliltaan ja kooltaan samanlaisilla. Tiivisteiden kuntoa tarkkaillaan esimerkiksi pesujen yhteydessä.

#### Käynti- ja tiivistevälien säätö

Ikkunan puitteiden ja karmin välinen rako, käyntiväli, säädetään joka puolelta samansuuruisiksi, millä varmistetaan ikkunan moitteeton käynti ja hyvä tiiviys. Tiivisteväli tulee olla sellainen, että tiiviste puristuu riittävästi ja tiivistää hyvin karmin ja puitteen välisen raon. Jos tiivisteväli on liian pieni, puitteeseen aiheutuu käyrityksiä lukkojen ja saranoiden kohdalle. Lisäksi ikkunan sulku- ja avausvoimat kasvavat. Ikkunan käynti- ja tiivistevälien säätö tehdään lukkoja ja saranoita säätämällä.

## Ohjeet ikkunan käyttäjille

TOIMEN- PIDE	KOHDE	SUORITUSOHJEET
Käyttö	Avaaminen	- ikkunoita ei saa avata ”väkisin”; voi aiheuttaa lasin säröytymisen tai rikkoutumisen
	Sulkeminen	- puitteet painetaan tasaisesti kiinni välttämällä puitteen kiertymistä - ikkunan kaikki yksittäiset lukot tulee lukita
Lisävarusteiden asennus	Sälekaihdin	- valitaan vain vaaleita tai metallipintaisia säleitä - asennuksessa varottava vaurioittamasta lasin reunaa - sälekaihtimen kannakkeet on suositeltavampaa kiinnittää ruuveilla nauhojen asemesta - sälekaihdinta ei nosteta puolittain ylös auringonpaisteella
Puhdistus	Lasit	- käytettävä ikkunanpesuun tarkoitettuja pesuaineita ja -välineitä - pesuvälineiden tulee olla puhtaita - pesuvesi vaihdetaan riittävän usein - lasit pestään 1–2 kertaa vuodessa - ei saa käyttää syövyttäviä tai hankaavia aineita
	Karmipinnat	- pesuvälineiden tulee olla puhtaita - ei saa käyttää syövyttäviä tai hankaavia aineita - pestään kerran vuodessa
	Sälekaihdin	- säleet imuroidaan harjasuuttimella puhtaaksi - tarvittaessa säleet pyyhitään puhtaaksi veteen kostutetulla puhtaalla rievulla - puhdistetaan kerran vuodessa, mieluiten keväällä
Muu huolto	Tiivisteet	- tarkastetaan vuosittain esimerkiksi pesun yhteydessä - vaihdetaan vioittuneet tiivisteet
	Käyntivälit	- säädetään ikkunoiden käyntivälit siten, että ikkunat toimivat herkästi - säädetään puitteiden tiivistevälit sellaisiksi, että tiivisteet puristuvat karmia vasten kohtuullisella voimalla, mutta ei kuitenkaan niin voimakkaasti, että puite taipuu saranoiden ja lukkojen kohdalta
	Lukot	- voidellaan säännöllisesti - säädetään tarvittaessa
	Saranat	- voidellaan säännöllisesti - säädetään tarvittaessa oikean käyntivälin saamiseksi

Tekijä(t) Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo			
Nimeke <b>Suomalaisten ikkunoiden kestävyys</b>			
Tiivistelmä <p>Ennen tutkimuksen aloittamista Suomessa rikkoutui vajaasta promillesta ikkunoita keskimäinen lasi tuntemattomasta syystä. Tunnusomaista rikkoutuneille ikkunoille oli, että ne olivat kolmilasisia, kaksipuitteisia niin sanottuja MSE-ikkunoita ja niissä oli tavallisesti selektiivilasi ja eristyslasissa täytekaasuna argonia.</p> <p>Rikkoutumisen yleistymiseen on johtanut lämmöneristävyydeltään aikaisempia parempien ikkunoiden käytön lisääntyminen. Suomalaisen ikkunan rakenne ja sälekaihtimien käyttö puitteiden välissä lisäävät osaltaan ikkunan lasihin kohdistuvia lämpörasituksia ja jännityksiä.</p> <p>Ikkunoiden rikkoutuminen on aiheutunut useamman osatekijän summana, ja yksittäisen syyllisen nimeäminen on mahdotonta. Tämän vuoksi ei ole esitettävissä yksittäisiä menetelmiä ja ratkaisuja, joilla rikkoutuminen voidaan estää, eikä yksittäisten toimenpiteiden vaikutuksen suuruutta pystytä arvioimaan. Sen sijaan on tiedossa ne tekijät, joilla ikkunan lasiosan rasituksia voidaan pienentää.</p> <p>Rikkoutumisen estäminen onkin nähtävä kestävyystalkoina, joihin kaikilla osapuolilla on jotain annettavaa. Teollisuus onkin projektin aikana kiitettävästi kiinnittänyt huomiota eri osatekijöihin ja työtapoihin, minkä tulokset on havaittavissa rikkoutuneiden lasien määrän pienentymisenä murto-osaan alkuperäisestä.</p>			
Avainsanat glass planes, windows, insulating glass, low emissivity glass, breakage, Venetian blinds, durability, thermal stress			
Toimintayksikkö VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, Lämpömiehenkuja 2, PL 1800, 02044 VTT			
ISBN 951-38-6534-7 (nid.) 951-38-6535-5 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Projektinumero R5SU01127	
Julkaisuaika Maaliskuu 2005	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 59 s. + liitt. 14 s.	Hinta B
Projektin nimi Suomalaisen ikkunan kestävyys		Toimeksiantaja(t) Tekes, ikkuna- ja eristyslasivalmistajat, Kalajoen kaihdiin Oy	
Avainnimeke ja ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (nid.) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Myynti: VTT Tietopalvelu PL 2000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374	

Author(s) Hemmilä, Kari & Heimonen, Ismo			
Title <b>Durability of Finnish windows</b>			
Abstract <p>About one insulating glass of one thousand windows broke spontaneously within two first years because of unknown reason before the start of this research. These Finnish type windows consist of one separate glass pane on outer sash and insulating glass on inner sash. It was also typical that there were Venetian blinds between those sashes and the insulating glass was equipped with low-emissivity glass and argon gas filling.</p> <p>The reason for glass breakage becoming more common was the increased use of energy efficient windows. The Finnish window structure and Venetian blinds between sashes caused greater thermal and tension stresses of glass panes, too.</p> <p>It is not possible to name only one reason why glass panes break. The cause of glass breakage is a sum of various kinds of reasons. Therefore there is not only one method and solution, which can prevent the breakage of glass pane neither the efficiency of separate methods can't be estimated. On the contrary, the methods that reduce the stresses of glass panes are known. The improvement of window pane resistance should be considered as a task where every party can give their own contribution.</p> <p>The window and insulating glass manufacturers have paid a great attention to different matters and working methods, which have resulted to radical decrease of the number of broken windows.</p>			
Keywords glass planes, windows, insulating glass, low emissivity glass, breakage, Venetian blinds, durability, thermal stress			
Activity unit VTT Building and Transport, Lämpömiehenkuja 3, P.O.Box 1800, FIN-02044 VTT, Finland			
ISBN 951-38-6534-7 (soft back ed.) 951-38-6535-5 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Project number R5SU01127	
Date March 2005	Language Finnish, Engl. abstr.	Pages 59 p. + app. 14 p.	Price B
Name of project Suomalaisen ikkunan kestävyys		Commissioned by Tekes, ikkuna- ja eristyslasivalmistajat, Kalajoen kaihdin Oy	
Series title and ISSN VTT Tiedotteita – Research Notes 1235-0605 (soft back edition) 1455-0865 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/inf/pdf/">http://www.vtt.fi/inf/pdf/</a> )		Sold by VTT Information Service P.O.Box 2000, FIN-02044 VTT, Finland Phone internat. +358 20 722 4404 Fax +20 722 4374	

Ikkunoiden lämmöneristävyyden parantuminen johti joissain ikkunoissa eristyslasin rikkoutumiseen, jos ikkunoissa oli sälekaihtimet. Kysymys on pienestä prosenttiosuudesta vuosittain valmistettavista ikkunoista, mutta ikkunoiden korjauskustannukset ovat kuitenkin merkittävät.

Tässä julkaisussa on käsitelty rikkoutumiseen johtaneita syitä, lasin kestävyteen vaikuttavia tekijöitä ja ikkunoiden kestävyuden parantamismahdollisuuksia. Osoituksena parantamismenetelmien tehokkuudesta on, että eristyslasi- ja ikkunavalmistajat ovat saaneet tutkimuksen ohjeita noudattamalla rikkoutuneiden lasien osuuden putoamaan murto-osaan alkuperäisestä.

---

Tätä julkaisua myy  
VTT TIETOPALVELU  
PL 2000  
02044 VTT  
Puh. 020 722 4404  
Faksi 020 722 4374

Denna publikation säljs av  
VTT INFORMATIONSTJÄNST  
PB 2000  
02044 VTT  
Tel. 020 722 4404  
Fax 020 722 4374

This publication is available from  
VTT INFORMATION SERVICE  
P.O.Box 2000  
FIN-02044 VTT, Finland  
Phone internat. + 358 20 722 4404  
Fax + 358 20 722 4374

---