

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Rakennustekniikan koulutusohjelma  
Talonrakennustekniikka

Opinnäytetyö

Jouni Syrjälä

LASI RAKENNUSMATERIAALINA

Kuormitetut lasirakenteet

Työn ohjaaja  
Tampere 2008

DI Raimo Koreasalo

Jouni Syrjälä	Lasi rakennusmateriaalina Kuormitetut lasirakenteet
Opinnäytetyö	69 sivua
Työn ohjaaja	DI Raimo Koreasalo
Maaliskuu 2008	
Hakusana	Lasi, lasirakenteiden mitoitus

## TIIVISTELMÄ

Opinnäytetyöni käsittelee lasia rakennusmateriaalina. Työhön on sisällytetty lyhyelti lasin valmistuksen historiaa. Lasin koostumuksesta käsitellään materiaaliominaisuuksia ja lasin rakennetta. Lasipinnoitteet esitellään silmälläpitäen käyttömahdollisuuksia sekä pinnoitetyyppien ominaisuuksia. Eri valmistustekniikoilla ja käsittelyillä saadaan lasiraaka-aineesta lasijalosteita. Lasijalosteet lisäävät lasin käyttömahdollisuuksia erilaisissa kohteissa ja olosuhteissa. Lasijalosteista voidaan valmistaa monenlaisia tuotteita. Tuote voi olla valmistettu vain yhdestä lasijalosteesta tai se voi olla myös monen jalosteen yhdistelmä. Tärkeä rakennuslasituote on palonsuojalasit. Palonsuojalaseja käsitellään omassa luvussaan, jossa esitellään eri palonsuojalasuotteita ja niiden ominaisuuksia. Palotilanteessa esiintyvistä erilaisista rasituksista riippuen valitaan soveltuvimmat tuotteet. Nämä kriteerit on käsitelty rakenteiden palomääräyksissä. Lasin kestävyys -luvussa esitellään lasin kemiallista ja mekaanista kestävyyttä sekä kestävyyteen vaikuttavia tekijöitä. Lasin taivutus- ja vetolujuutta voidaan lisätä kemiallisella karkaisulla, lämpökarkaisulla ja lämpölujittamisella. Lasijalosteista valmistettujen tuotteiden kestävyyttä palo-, onnettomuus, sekä yleensä lasin rikkoutumistilanteessa voidaan lisätä erilaisilla komposiittirakenteilla. Lasi ja sähkömagneettinen säteily -osiossa käsitellään lämpösäteilyn vaikutusta lasiin ja eri keinoja säteilyn kulkuun vaikuttamiseksi. Lasirakenteiden suunnittelu -luvussa käsitellään lyhyesti lasirakenteiden suunnittelumääräyksiä Suomessa. Lasirakenteiden mitoitusta voidaan tehdä epälineaarilla laattateorialla ja lineaariseen laattamalliin perustuvalla mitoituksella. Lasirakenteiden mitoituksessa esitellään yleisesti käytössä olevien lasijalosteiden lujuusarvoja, lasilevyjen mitoitusohjeita, mitoitusteoriaa ja eri lasituotteiden mitoitusperiaatteita. Osiossa esitetään tuulikuormitetun lasilevyn mitoitus Marcuksen kaavalla sekä lasilevyn mitoittaminen värähtelylle.

Jouni Syrjälä                      Glass as a construction material  
Engineering Thesis                69 pages  
Thesis Supervisor                Raimo Koreasalo  
March 2008  
Keywords                          Glass, dimensioning of glass constructions

## **ABSTRACT**

Work deal with glass as construction supply. Work includes shortly history of glass producing. Composition of glass handling about material features and molecule structure of glass. Glass coating will demonstrate keeping eye on using possibilities and feature of coating types. With different producing techniques and treatments for basic material of glass can be make upgraded product. Upgraded glass product will increase using possibilities in different destinations and circumstances. Using upgraded glass product, can be manufacture many kinds glass products. Glass product can be making of single upgraded glass product or it can be combination of many upgraded glass product types. Important glass product in building is fire protecting glasses. Fire protecting glasses handle in own chapter, where will present different types of fire protecting glasses and features of fire protecting glasses. In fire situation is different stresses and this should be notice when choosing most suitable glass products. These criterions can be found from fire regulations. In strength of glass chapter will demonstrate chemical and mechanical durability and factor witch affects of strength. Bending and stretch strength can be increase with tempering, hardening in salt bath and with thermal treatment. Glass product witch have make of upgraded glass products will withstand in fire situation, accident actions and general glass fragmentation, when using different multilayer constructions. In chapter glass and electromagnetic wave deal with effecting of thermal radiation to glass and different methods, how to influence passage of the radiation. Designing of glass structure include designing of glass constructions in Finland. Dimensioning of glass structure can do with non-linear plate theory and with linear plate models. In chapter dimensioning of glass constructions will present strength values, designing instructions of glass plate, theory of dimensioning and designing theories of different glass product. Chapter concerns generally used upgraded glass product and it will present dimensioning of glass plate witch is stressed by wind. Dimensioning is based in Marcus equation. In addition to chapter present glass plate dimensioning against vibration, witch is cause by wind.

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

1	JOHDANTO .....	6
2	LASINVALMISTAMISEN HISTORIA.....	7
2.1	Ikkunalasin valmistus .....	8
2.2	Ikkunalasin valmistusmenetelmiä .....	9
2.3	Lasivalmistuksen teollistuminen .....	11
3	LASIN KOOSTUMUS .....	12
3.1	Lasin kemiallinen rakenne ja luonne.....	12
3.2	Lasin käsittelyt taivutus- ja vetolujuuden kasvattamiseksi.....	15
4	LASIPINNOITTEET .....	18
4.1	Matalaemissiiviset pinnoitteet .....	19
4.2	Maalipinnoitteet.....	20
5	LASIJALOSTEET .....	21
5.1	Float-lasi .....	21
5.2	Valssattu ja vedetty tasolasi.....	21
5.3	Karkaistu lasi .....	22
5.4	Lämpölujitettu lasi.....	23
6	LASITUOTTEET .....	24
6.1	U-profiili (Profiililasi, lasilankku).....	24
6.2	Lankalasi.....	25
6.3	Laminoitu lasi .....	26
6.4	Kuviolasi.....	27
6.5	Eristyslaselementti (Umpiolasi) .....	28
6.6	Lasitiilet.....	30
7	LASIRAKENTEIDEN KANNATUSMENETELMIÄ.....	31
7.1	Listalasisitus .....	31
7.2	Pistekiinnitetty lasi .....	32
7.3	Structural glazing eli SG-lasisitus .....	33
8	PALONSUOJALASIT .....	33

8.1	Lasirakenteen kantavuus palotilanteessa .....	34
8.2	Lasirakenteen tiiviys.....	34
8.3	Lasirakenteen eristävyys .....	35
9	LASIN KESTÄVYYS.....	36
9.1	Lasin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä .....	36
9.2	Reunojen käsittelyn vaikutus lasin lujuuteen .....	37
9.3	Lasin lämmönkestävyys .....	38
9.4	Lasin pinnan kestävyys.....	39
10	LASI JA SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY.....	40
10.1	Sähkömagneettisen säteilyn läpäisyä pienentävät tuotteet .....	41
11	LASIRAKENTEIDEN SUUNNITTELMÄÄRÄYKSET .....	43
12	LASIRAKENTEIDEN MITOITUS .....	44
12.1	Lasin materiaaliominaisuuksia .....	44
12.2	Lasirakenteiden mitoitusohjeet.....	45
12.3	Lasin taivutuskestävyys.....	48
12.4	Lasin taivutusvetolujuus.....	49
12.5	Kuormitusajan vaikutus lasilevyn kestävyys.....	50
12.6	Lasilevyn pinta-alan vaikutus kestävyys.....	51
12.7	Lämmön aiheuttama vetojännitys.....	51
12.8	Laminoidun lasin mitoitus .....	53
12.9	Eristyslaseielementin mitoitus.....	54
12.10	Pystysuoran lasilevyn mitoitus tuulikuormalle .....	56
12.11	Lasilevyn värähtely .....	58
	LÄHTEET .....	64

## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyöni aiheena on kuormitetut lasirakenteet. Työni tarkoituksena on koota keskeistä tietoa lasista ja levymäisistä lasirakenteista, mikä auttaisi suunnittelijaa ymmärtämään lasia materiaalina ja tuotteena. Työssäni pääpaino on rakennuslasituotteiden, lasin käytön, lasin ja lasirakenteiden ominaisuuksien sekä kuormitettujen lasirakenteiden mitoituksen esittelyssä. Halusin ottaa aiheeksi ennen kaikkea lasin, sillä se on tullut materiaalina minulle tutuksi ennen opiskelua tekemäni työn kautta. Opinnäytetyötä laatiessani olen oppinut paljon lisää lasista, lasirakenteista, lasin käyttäytymisestä ja mitoittamisesta. Uskon, että työni toimii hyvänä perehdytyksenä lasirakenteiden suunnittelemiselle ja auttaa ymmärtämään lasin käyttäytymistä kuormituksissa.

Työhöni olen valinnut aihekokonaisuuksia, jotka hahmottavat ikkunalasien kehitystä, lasin koostumusta ja lasille tyypillisiä ominaisuuksia. Lasin koostumus -luvussa selitetään lasin kemiallista rakennetta sekä lasin rakenteesta ja käsittelyistä johtuvia materiaaliominaisuuksia. Lasipinnoitteilla saadaan lasin käyttöominaisuuksia muokattua huomattavasti. Erilaisten pinnoitteiden käyttö on lisääntynyt voimakkaasti rakennuslaseille asetettujen vaatimusten myötä. Tämän vuoksi koin asian ajankohtaiseksi ja tärkeäksi ottaa mukaan työhön.

Lasijalosteista, joista lasituotteet valmistetaan, olen valinnut mukaan merkittävimmät ja yleisimmät jalosteet sekä näiden valmistustekniikat. Rakennuksissa käytettävä lasituotteiden kirjo on varsin laaja. Lasituotteista esittelen yleisimpiä Suomessa käytettyjä lasivalmisteita, jotka altistuvat erilaisille kuormituksille. Tällaisia erilaisia kuormituksia ovat tuuli-, lumi-, palo- ja lämpö- sekä erilaiset iskukuormat.

Yhtenä tärkeimmistä osioista työssäni on lasin kestävyys -luku. Tässä luvussa selvitetään lasin käyttäytymistä erilaisissa kuormituksissa. Sähkömagneettinen säteily -osio käsittelee pääasiassa lämpösäteilyn hallintaan vaikuttavia tekijöitä. Tämän ratkaisun tein siksi, että lasin käyttö on lisääntynyt rakennusten

julkisivuissa, mikä johtuu suurelta osin halusta luoda avaria lasipintoja. Lisäksi lasituotteiden parantuneet lämmöneristävyydet mahdollistavat suurten lasipintojen käytön. Lasirakenteiden mitoituksen olen rajannut koskemaan lasin mitoitusperiaatteita ja lasin sekä lasirakenteiden ominaisuuksia huomioivia matemaattisia kaavoja. Lasirakenteiden mitoitukseen olen valinnut työssäni teoreettisen lähestymistavan. Tämä siksi, että lasirakenteiden mitoitus käytännössä on niin laaja alue, ettei sen perusteellista käsittelyä ole mahdollista tehdä yhdessä luvussa. Tämä vaatisi ehkä oman opinnäytetyönsä.

Lasin käyttö rakentamisessa on lisääntynyt voimakkaasti kaikkialla maailmassa. Uusia lasirakenteita ja erilaisia lasipinnoitteita kehitetään uusien innovaatioiden sekä tekniikoiden tuloksena. Uusien lasituotteiden kehittäminen lisää lasin käyttömahdollisuuksia rakentamisessa.

## 2 LASINVALMISTAMISEN HISTORIA

Ihminen on hallinnut lasin valmistamisen jo viidentuhannen vuoden ajan, sillä varhaisimmat lasilöydöt ovat kolmetuhatta vuotta ennen ajanlaskun alkua. Ensimmäiset ihmisen valmistamat lasiesineet olivat pieniä lasihelmiä ja lantamuottien ympärille valamalla tehtyjä astioita. Keisari Augustuksen aikoihin (27 eKr - 14 jKr.) syntyi lasin puhallustekniikka, joka mahdollisti lasin muotoilemisen puhaltamalla. Vuonna 50 jKr. lasia valmistettiin puhaltamalla koko Rooman valtakunnan alueella. Historian tunnetuin lasikeskus on Venetsia, jossa jo 600-luvulla tiedetään valmistetun lasia. Tuolloin lasinpuhaltajien liikkumista rajoitettiin rangaistuksen uhalla, varmistaen näin tietotaidon pysyminen Venetsiassa. /23./

Angelo Barovier kehitti noin vuonna 1450 Cristallon, erittäin kirkkaan ja puhtaan värittömän lasimassan. Samanaikaisesti Cristallon kanssa käytettiin myös toista reseptiä, vetrum blanchumia. Meidän päiviimme asti säilyneet esineet ovat todennäköisesti vetrum blanchum reseptin mukaan valmistettuja, sillä Cristallon

ongelmana oli lasisairaus, jonka seurauksena esine alkoi säröillä ja lopulta hajosi. Venetsiassa kehitettiin edelleen jo roomalaiselta ajalta tuttuja tekniikoita. Filigraanilasi mainitaan lasin historiassa ensimmäisen kerran vuonna 1527. Myös cracklee, eli jäälasia, incalmo sekä millefiori ovat muranolaisten mestareiden kehittelemiä lasin kuumatyöstötekniikoita. /23./

## 2.1 Ikkunalasin valmistus

Ikkunalasin valmistuksen historia alkaa vuosisata ennen ajanlaskun alkua Syyriasta. Tältä ajalta ikkunalasilöytöjä on myös muinaisesta Italiasta, Pompejista. Keskiajalla Pohjois-Euroopassa ikkunalasien valmistustekniikat hallittiin luostareissa, jolloin ikkunalasien valmistuksen taito levisi myös Itämeren alueelle. Pitkän aikaa ikkunalaseja oli vain pienellä yhdyskuntaluokalla. Taito valmistaa ikkunalasia levisi luostareista yksityisiin valmistuspajoihin 1600- ja 1700-lukujen aikana. 1800-luvulla ja erityisesti 1900-luvulla ikkunalasi saavutti laajat markkinat. Ikkunalasista tuli kauppatavara ja lasinpuhaltajien ammattikuntia perustettiin itämeren alueen maissa. Tekninen kehitys mahdollisti yhä tasaisempien ja isompien ikkunalasien valmistuksen. /32./

Suomessa keskiajalla ikkunalasia ei käytetty juuri muualla kuin kirkoissa. Muissa rakennuksissa, jopa kruunun linnoissa ja aateliskartanoissa lasi-ikkunat yleistyivät vasta 1500-luvun puolivälin jälkeen. Syynä ikkunalasin käytön lisääntymiselle on todennäköisesti ollut lasin tarjonnan ja tuotannon kasvu, mutta myös rakennusten arkkitehtoniset suuntauksut, jotka ovat lisänneet lasin käyttöä rakentamisessa. Asiakirjoissa mainitaan vuodesta 1554 lähtien useita lasimestareita. 1600-luvulla kaupunkien vauraat porvarit alkoivat hankkia taloihinsa lasiruutuja. /22./

Suomen ensimmäinen lasitehdas perustettiin Uuteenkaupunkiin vuonna 1681. 1700-luvun lopussa lasitehtaat Ruotsissa eivät pystyneet tyydyttämään kasvanutta ikkunalasien kysyntää. Vuosisadan aikana ruotsalaiset perustivat kaksitoista lasitehdasta Suomeen, ensimmäisenä Ävikin tehdas vuonna 1748. Ruotsin vallan



aikana lasinvalmistus oli ainoa teollisuuden haara, jolla Suomi pystyi kilpailemaan valtakunnan muiden osien kanssa. Suomen lasintuotanto kattoi noin puolet koko valtakunnan tarpeesta /39/.

## 2.2 Ikkunalasin valmistusmenetelmiä

Ikkunalasin valmistusmenetelmiä on pääasiassa kuusi:

- pullonpohjalasimenetelmä
- sylinterilasimenetelmä
- vetolasimenetelmä ja lasin valssaus koneellisesti
- valulasimenetelmä
- tasolasimenetelmä

Seuraavassa esitetään pääkohdat yllä olevien valmistusmenetelmien periaatteista. Nykyään pullonpohja-, sylinteri- ja valulasimenetelmää käytetään yleensä vain valmistettaessa lasia taide- ja entisöintitarkoitukseen. Vetolasi- ja tasolasimenetelmä ovat tänä päivänä yleisesti käytössä kaupallisten rakennuslasituotteiden valmistuksessa. /38./

Pullonpohjalasimenetelmällä valmistettu lasi on varhaisin ikkunalasityyppi. Pullonpohjalasimenetelmässä lasi puhalletaan ison kuplan muotoon, jonka jälkeen puhallettu kupla leikataan toisesta päästään avoimeksi. Tämän jälkeen lasi lämmitetään uudelleen. Seuraavaksi lasia pyöritetään tangon päässä, jolloin kuplan muotoon puhallettu lasi muotoutuu pyöreäksi levyksi leikatun aukon laajetessa nk. keskipakoisvoiman vaikutuksesta. Lopuksi pyöreä, jäähdytetty levy leikataan tarvittavan kokoisiksi paloiksi. /38./

Sylinterilasimenetelmällä ikkunalasia valmistettaessa puhallettiin paksulla varsipillillä ensin pitkä ja kapea lasiputki, jonka päät sitten katkaistiin. Näin syntynyt lieriö halkaistiin pitkittäin auki ja oikaistiin suoraksi levyksi erillisessä

oikaisu-uunissa, jossa lasi saatiin pysymään pehmeänä hallitussa lämpötilassa oikaisuvaiheen aikana. /32./

Valulasia kutsutaan myös käsin valssatuksi lasiksi. Valulasimenetelmässä sula lasi kaadettiin tasolle, telattiin tasaiseksi ja jäädytettiin jäädytysuunissa. Jäädytettäessä lasilevy hallitusti uunissa sen jäädytyksen aikainen rikkoutuminen vähenee. Jos lasi jäädytetään nopeasti, syntyy lasilevyyn jännityksiä ja lasilevy on rikkoutumisherkeampi ja vaikeammin palasteltava. Jäädytyksen jälkeen lasilevyn pinnat hiottiin ja kiillotettiin molemmilta puolilta./18./

Lasin koneellisen valssauksen heti 1900-luvun alussa kehitti belgialainen insinööri Emil Bicheroux. /18./ Koneellisessa valssauksessa sula lasimassa juoksetetaan valssaustelojen väliin ja muodostuva lasinauha ohjataan jäädytysuuniin. Käsin valssattua ja koneellisesti valssattua lasia käytetään pääasiassa taide- ja sisustuslasituksissa. Valulasia, eli käsin valssattua lasia käytetään myös entisöintitarkoituksissa. /6, s.138./

Vetolasimenetelmän kehitti belgialainen Emile Forcault vuonna 1902. Menetelmässä lasi valmistettiin vetokoneen avulla. Lasi vedettiin ylöspäin jäädytyskuiluun suoraan sulatusuunista leveänä nauhana kahden asbestivalssin läpi. Jäädytyksen jälkeen yleensä 2 mm:n paksuinen lasi leikattiin ruuduiksi jäädytyskuilun yläpäässä. /32./ Alkuperäisestä Forcault-menetelmästä ovat amerikkalaiset kehittäneet myöhemmin uusia vetolasimenetelmiä, kuten Libbey-Owens -menetelmä vuonna 1917 ja The Pittsburgh -menetelmä vuonna 1928 /18./ Suomen ensimmäiset vetokoneet hankittiin vuonna 1926 ja suupuhalletun ikkunalasin valmistus loppui 1930-luvulla /32./

Tasolasimenetelmän kehitti englantilainen Alastair Pilkington 1950-luvulla. Tämä on nykyaikainen Float-menetelmä, jossa lasisula kellutetaan juoksevan tinan päällä levyksi /18/. Float-lasimenetelmän etuja ovat mm. valmistusmäärien suuri kapasiteetti sekä lasin pinnan ja laadun tasaisuus /6.s15/.

## 2.3 Lasinvalmistuksen teollistuminen

Koneellisen teknologian mahdollistaessa lasin valmistamisen massatuotannon, syventyi samalla myös lasin koostumuksen ja fysikaalisten ominaisuuksien tieteellinen tutkiminen. Lasin valmistuksen ja ominaisuuksien tuntemisen lisääntyessä keksittiin lasituotteita, joita voitiin käyttää entistä vaativammassa olosuhteissa. /18./

Avaintekijä ja modernin lasintutkimuksen edelläkävijä oli Saksalainen tutkija Otto Schott (1851-1935). Hän käytti tieteellisiä menetelmiä oppiakseen lukuisten lasin kemiallisten elementtien optiset ja lämpötekniset ominaisuudet. Muita tutkijoita olivat Ernst Abbe (1840-1905), joka tutki lasin optisia ominaisuuksia sekä Friedrich Siemens, joka kehitti allasuunin. Allasuuni syrjäytti tuolloin vanhan patauunin (pot furnace) ja mahdollisti sarjatuotannon. /18./

Ranskalainen tutkija Edouard Benedictus kehitti lasien laminointitekniikan, jossa laminointikalvolla liitettiin kaksi lasilevyä yhteen selluloidikalvolla (vuodesta 1936 lähtien laminointikalvona on käytetty polyvinyl butyraali -kalvoa [PVB], joka sitkeytensä ansiosta toimii hyvin ns. turvalasin laminointikalvona).

Komposiittirakenteensa ansiosta lasirakenne pysyy yhtenäisenä eikä lasista sen rikkoutuessa irtoa haitallisen suuria palasia. Edouard Benedictus patentoi uuden turvalasinsa nimellä ”Triplex” vuonna 1910. /18./

Vuonna 1932 Saint Gopain patentoi lasin lämpökarkaisumenetelmän, jolla lasin lujuusominaisuuksia voitiin kasvattaa /3, s.35/. Lämpökarkaisulla saatiin lasin pintaan muodostettua puristusjännitys, joka lisäsi lasin mekaanista lujuutta sekä kestävyyttä lämmönvaihtelua vastaan /6/.

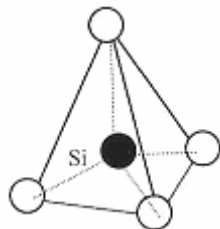
Rakennuslasina käytettävien lasilevyjen lisäksi rakennuksissa on käytetty myös lasitiiliä. Ennen 1900-luvun loppua rakennuksissa käytettävät lasitiilet olivat umpilasista valmistettuja ja tavallisen muuraustiilen muotoisia, joita valmistivat ainakin Siemens ja Luxfer Prismen-Gesellschaft. Albert Gerrer valmisti teollisesti

tiiliä, joiden sivut olivat sisäänvedetyt laastin tartunnan lisäämiseksi. 1900-luvun lopulla sveitsiläinen suunnittelija Gustave Falconnier keksi uuden muodon rakentamisessa käytettävälle tiilelle ja patentoi sen. Falconnierin keksimä valmistustapa oli tehdä ontto lasitiili puhaltamalla se muottiin ja tiivistämällä puhallusputken aiheuttama aukko sulalla lasilla. Nykyaikaisen onton lasitiilen valmistaminen mahdollistui teollisen kehityksen myötä 1930-luvulla. /18./

### 3 LASIN KOOSTUMUS

#### 3.1 Lasin kemiallinen rakenne ja luonne

Lasin molekyyliketju perustuu kolmisidoksiseen  $\text{SiO}_4$ -piioksidiin, joka on kallioperässä olevaa kvartsia /3, s. 53/. Piioksidi muodostaa voimakkaasti sitoutuneita nelitahokkaita (engl. tetrahedral) rakenneyksiköitä, jotka ovat liittyneet toisiinsa ketjuiksi siten, että kullakin tetraedrilla on kaksi yhteistä happi-iona viereisten tetraedrien kanssa (kts. kuva 1). Piioksidin nelitahokasrakenne on samanmuotoinen kuin timantilla, joka on erityisen kovaa. /4, s. 34./ Lasi on amorfinen eli tasalaatuinen aine, jolta puuttuu kiteinen rakenne/5, s. 51/. Lasin jäähtyessä kasvaa nesteen sisäinen kitka eli viskositeetti niin suureksi, että molekyylit liikkuvat liian hitaasti muodostaakseen uutta kiderakennetta /3, s. 53/.



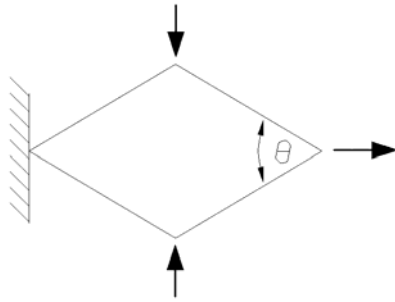
Kuva 1 /3, s.54/

Rakennuslasina käytettävä lasi on yleensä soodakalkkilasia. Soodakalkkilasin kaava on usein muotoa (suhteet painoprosenteina):  $70 \cdot \text{SiO}_4, 15 \cdot \text{Na}_2\text{O}, 10 \cdot \text{Ca}$  .

Lisäksi seokseen lisätään pieniä määriä muita oksideja, jotka vaikuttavat lasin väriin ja kirkkauteen /3, s. 129/.

Atomien väliset sidokset ovat eripituisia ja -vahvuisia, eikä lasilla näin ollen ole terävää sulamispistettä kuten kiteisillä aineilla tai metalleilla. Lasi ei siis sula terävästi, vaan pehmenee kiinteästä sulaksi laajahkolla lämpötila-alueella, joka yleisimmillä laseilla on noin  $500^{\circ}\text{C}$  . /6, s. 13/. Puhtaan piioksin sulamislämpötila on noin  $1200^{\circ}\text{C}$  . Lasimassaan lisättävän soodan avulla lasin sulamislämpötilaa saadaan laskettua, siten että noin  $700^{\circ}\text{C}$  :ssa lasi on helposti työstettävissä. /3, s. 129./ Kun sooda  $\text{NaO}_2$  lisätään sulamislämpötilan alentamiseksi piioksidin kanssa, asettuvat  $\text{Na}^+$  ionit nelitahokkaista piioksideista muodostuneiden sidosten väliin heikentäen niitä. Heikentyneistä sidoksista johtuen soodakalkkilasin sulamislämpötila on matalampi verrattuna puhtaasta piioksidista valmistettuun lasiin. /4, s. 129./

Lasi on haurasta ja kiinteää, kun lämpötila on alle muutoslämpötilan, joka soodakalkkilasilla on noin  $500^{\circ}\text{C}$  . Kun lasin lämpötila on alle tämän lämpötilan, on lasi lineaarisesti täysin kimmainen ja rikkoutuu ilman myötöä. /3, s. 136./ Lasin kimmoisuuden mahdollistaa vapaa tila atomien sidosten välissä, joka sallii atomiverkon muuttaa muotoa. Atomiverkon kuormituksen kasvaminen lisää jännitystä atomiverkossa aiheuttaen siihen muodonmuutoksen. Jos lasia rasitetaan vetojännityksellä, aiheuttaa jännitys kuvan 2 mukaisen muodonmuutoksen atomiverkkoon ja jännityksen kasvaessa kulma  $\theta$  pienenee. /11, s. 10-11./ Lasin rikkoutuminen tapahtuu, kun atomiverkon muodonmuutos ei ole enää mahdollinen ja molekyyli sidokset pettävät /3, s. 136/.



Kuva 2 /11, s.10/

Soodakalkkilasilla on korkeahko lämpötilan laajenemiskerroin (noin  $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ).

Suuret lämpötilanvaihtelut aiheuttavat lasilevyyn pakkovoimia, jotka voivat synnyttää rikkoutumisvaaran./4, s.129./ Ikkunalasin lämmönjohtavuus yleisesti on

$0,81 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}}$ . Esimerkiksi valuraudan lämmönjohtavuus on  $28 - 44 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{C}}$ . /7, s.41-

42./ Koska lasi ei johda kovin hyvin lämpöä, syntyy siihen herkästi jännityksiä epätasaisesta lämpökuormasta. Näin esimerkiksi varjossa olevan osan ja auringon

lämpösäteilyssä olevan lasilevyn osan välille voi syntyä lasilevyn rikkova

lämpötilaero. Valmistusvaiheessa lämpötilaerojen lasiin aiheuttamat jännitykset

voivat purkautua rikkoen lasin välittömästi, tai jännitykset voivat purkautua

myöhemmin karkaistussa lasissa laskettua ominaislujuutta alhaisemmassa

jännityksessä lasilevyä rasitettaessa. Tästä johtuen on lasi jäähdytettävä

valmistusvaiheessa hitaasti tai muuten hallitusti. /11, s. 109./ Jos kuuma lasilevy

laitetaan esimerkiksi kylmään veteen, lasin pinnat ja reuna jäähtyvät veden

lämpötilaan, ennen kuin lasin sisäosat ennättävät jäähtyä. Lasin pinnan

kutistuminen aiheuttaa lasin molemmille pinnoille vetojännityksen ja lasi rikkoutuu

jos lasin pinnan vetokestävyys ylittyy. /4, s. 130./ Esimerkiksi kuuden millimetrin

vahvuinen tavallinen float-lasi, lämmitettynä noin  $70-75 \text{ C}$  :een, särkyä  $20 \text{ C}$

veteen upotettaessa. Karkaistua lasi puolestaan särkyä veteen upotettuna, kun se on

lämmitetty noin  $160$  asteiseksi. /37, s. 40-41./

Lasin rikkova lämpörasitus voi syntyä myös tilanteessa, jossa osa lasista on

auringonvalossa ja osa varjossa, tai kun lasin reuna on esimerkiksi alumiinisessa

karmissa, joka synnyttää kylmänä vuodenaikana kylmäsillan. Tällöin kylmille

reuna-alueille, jotka pyrkivät kutistumaan, syntyy vetojännitystä. Jos siis osa lasilevystä laajenee lämmön vaikutuksesta eri tahtiin, aiheuttaa tämä levyyn pakkovoimia ja lasissa olevat heikot kohdat, kuten säröt, kasvavat ja rikkovat lasilevyn. /6, s.59./

Lasilla on korkea puristuskestävyys, joka on noin 900 – 1000 MPa . Lasin taivutuskestävyys on kuitenkin vain kymmenesosa puristuskestävyydestä. Taivutuslujuuden pienuus johtuu lasin pinnalla olevista pienistä mikrohalkeamista, joita muodostuu lasin rakennusosien sidosten epähomogeenisuudesta. Eli kun lasin jähmettyessä tapahtuu kiteiden, eli molekyyliketjujen, sulkeutumista, synnyttää se epäsymmetrisen jännityksen, aiheuttaen näin lasin pinnalle eräänlaisia repeämiä. /11, s. 109./

Lasissa oleva halkeama (eri kuin mikrohalkeama) voi ajan myötä edetä huoneenlämmössä vesihöyryn ja lasilevyn kohdistuvan taivutuksen yhteisestä vaikutuksesta. Ilmiössä ilmassa oleva vesihöyry saavuttaa halkeaman kärjen rikkoen piin ja hapen muodostamia sidoksia ja muodostaen samalla hydroksidia. Lasi rikkoutuu lopulta staattisesti, kun halkeama on saavuttanut riittävän suuren osan lasilevyn poikkipinta-alasta eivätkä molekyylihidokset pysty enää vastustamaan halkeaman kasvamista. /3, s. 80./

### **3.2 Lasin käsittelyt taivutus- ja vetolujuuden kasvattamiseksi**

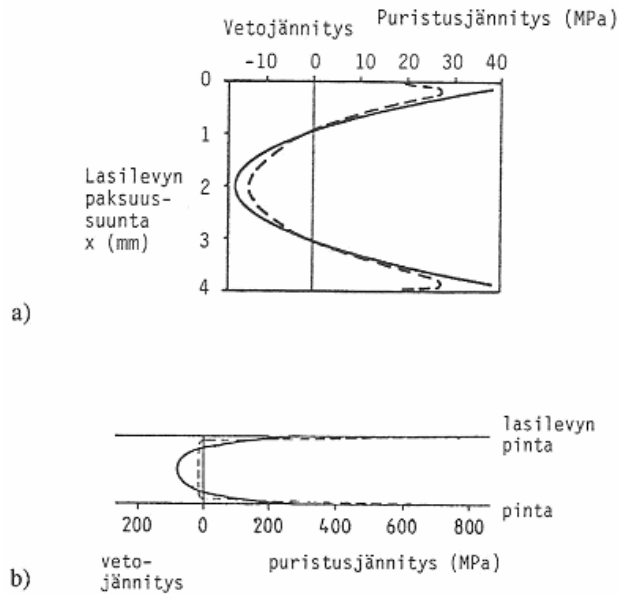
Lasin lujuutta voidaan lisätä karkaisulla. Lasi voidaan karkaista lämpökäsittelyllä tai kemiallisella käsittelyllä. Lämpökäsittelyssä, eli lämpökarkaisussa, lasi kuumennetaan muovailulämpötilaan ja jäähdytetään nopeasti ja hallitusti muutamaan kymmeneen celsiusasteeseen. Jäähdytysvaiheessa lasin pintakerrokset jäähtyvät ja kutistuvat sisäosia nopeammin. Myöhemmin myös lasin sisäosa jäähtyy ja pyrkii kutistumaan. Koska lasin pintaosa vastustaa sisäosan kutistumista, aiheuttaa tämä lasin ulkopintaan noin 100Mpa puristusjännityksen, jolloin sisäosaan jää vetojännitys. /4, s. 132-133./

Kemiallisessa karkaisussa kuumennettu lasi upotetaan sulaan suolaan, esimerkiksi kaliumnitraattiin. Lasin ollessa kosketuksissa kaliumnitraattiin, vaihtuvat osa lasin  $\text{Na}^+$  -ioneista kaliumioneiksi, jotka ovat noin 35 % natriumioneja suurempia. Kaliumionien natriumioneja suurempi koko aiheuttaa lasin pintaosaan puristusjännityksen, joka on maksimissaan noin 400Mpa. /4, s. 132-133./

Karkaistu lasi rikkoutuu, kun lasiin ulkoisen rasituksen aiheuttama vetojännitys ylittää lasin taivutuskestävyyden ja lasin pinnalla olevan puristusjännityksen /11, s.148/. Pinnan vetojännityksen ylittymisen lisäksi karkaistun lasin sisäosiin, missä vallitsee vetojännitys, voi aiheutua myös särö, joka rikkoo lasin. Yleensä karkaistu lasi rikkoutuu välittömästi jännityksen ylittyessä. Karkaistu lasi voi kuitenkin rikkoutua myös myöhemmin kuormituksen jälkeen, jolloin esimerkiksi iskusta aiheutunut vaurio tai valmistusvaiheessa syntynyt epäjatkuvuuskohta kasvaa kriittiselle tasolle. Näin voi käydä esimerkiksi lämpöjännityksen aiheuttamana tai uudestaan tapahtuvassa ulkoisessa kuormituksessa. /11, s. 149./

Lasin rikkoutumisen aiheuttaman särön voi synnyttää sen pintaan kohdistuva, pistemäinen, dynaaminen voima. Karkaistun lasin rikkoutumisen syystä riippumatta jännityksen purkautuminen eli lasin rikkoutuminen etenee spontaanisti läpi lasilevyn. Lasiin syntyvän säröilyn haaroittuminen aiheuttaa lämpökarkaistun lasin rikkoutumisen pieniksi vaarattomiksi paloiksi. Sirpalekoko on karkeasti verrannollinen purkautuvaan jännitysenergiaan, joka karkaisulla on lasiin aiheutettu. /11, s. 149./ Kuvassa 3.a on kuvattu jännityksen jakautuminen karkaistussa lasissa ja kuvassa 3.b on havainnollisesti kuvattu samalla karkaistun lasin ja kemiallisesti karkaistun lasin (katkoviiva) jännityksen jakautuminen.





Kuva 3 /1, s.19/

Karkaistun lasin rikkoutumisen voi aiheuttaa myös nikkelisulfidi. Tämä voi tapahtua pitkänkin ajan kuluttua lasin valmistuksesta. Nikkellisulfidi (NiS) on lasissa oleva kiteinen epäpuhtaus, joka syntyy nikkelin ja rikin yhtyessä lasin valmistusvaiheessa. Rikin joutumista lasiin on vaikea välttää, koska sitä on raaka-aineissa ja valmistusvaiheen palamisprosessissa. Esimerkiksi lasin sulatuksessa mahdollisesti käytettävä raskas polttoöljy sisältää paljon rikkiä. Nikkeliä voi joutua lasiin raaka-aineiden mukana tai sitä voi irrota mm. metallisista työkaluista. Nikkelin määrää on mahdollista rajoittaa tarkalla valvonnalla. /6, s. 63./

Nikkelisulfidi on stabiilissa tilassa yli  $380^{\circ}\text{C}$  : ssa . Tällöin sen olomuoto on  $\alpha$ -faasi (kahden kuusikulmion ja kuuden suorakaiteen muodostama kidemuoto). Alle  $380^{\circ}\text{C}$  : ssa nikkelisulfidin olomuoto on  $\beta$ -faasi (kuuden vinoneliön muodostama kidemuoto). Lasin karkaisuprosessissa lasin jäähtymisnopeus on sen verran suuri, että  $\alpha$ -faasi ei ennätä muuttumaan  $\beta$ -faasin muotoon. Nikkelisulfidin pituuden lämpötilakerroin ( $\text{NiS } \alpha = 140 \cdot 10^{-7}$ ) on suurempi kuin soodakalkkilasin (Soodakalkkilasi  $\alpha = 90 \cdot 10^{-7}$ ), minkä takia lasin jäähtyessä nikkelisulfidikide repeytyy irti ympäröivästä lasista ja kiteen ympärille jää tyhjää tilaa. Ajan myötä  $\alpha$ -faasi muuttuu stabiiliksi  $\beta$ -faasiksi, joka on tilavuudeltaan 3,9 % suurempi. Faasimuutoksessa nikkelisulfidikide kasvaa ja täyttää ensiksi tyhjän tilan

aiheuttaen puristusjännitystä ontelon seiniin. Sulkeumaontelon lasiseinään saattaa syntyä särön alku ympäröivästä lämpötilasta, sulkeuman suuruudesta ja sulkeuman kohdalla vaikuttavasta vetojännityksestä riippuen. Karkaistuun lasiin sitoutunut energia saa aikaan särön kasvun ja lasin murtuminen tapahtuu lämpökarkaisun aiheuttaman lasilevyn sisäisen vetojännityksen ja nikkelisulfidikiteen olomuodon aiheuttaman jännityksen yhteisvaikutuksesta. /6, s. 63./

Nikkelisulfidin aiheuttama rikkoutumisriski voidaan eliminoida lämmityskokeella (heat soak test), jossa karkaistu lasi lämmitetään alle 380 asteeseen. Lämmityksellä joudutetaan lasissa mahdollisesti olevan nikkelisulfidin faasimuutosta, jolloin haitallisen kiteen sisältämä lasi rikkoutuu lämmitysuunissa. /6, s. 62-63./

Lämmityskokeella saadaan eliminointua 20-40  $\mu\text{m}$  : ä suuremmat nikkelisulfidikiteet. Lasiin jäävät 20  $\mu\text{m}$  : ä pienemmät kiteet aiheuttavat edelleen lasin murtumavaaran. Sakain (2001) mukaan pienempien kiteiden syntyminen voidaan ehkäistä lasisulaan lisättävällä sinkkisulfaattilla, joka liuottaa nikkelisulfidin. Myös muilla lasimassaan lisättävillä lisäaineilla voidaan vähentää nikkelisulfidikiteiden muodostumista. Näitä ovat mm. tietyt metallioksidit ja nitraatit. /37, s. 42./

#### 4 LASIPINNOITTEET

Pinnoitteilla on mahdollista saavuttaa lasin pinnalle kiinteitä ja kestäviä kerroksia, joilla saadaan aikaiseksi eri käyttötarkoituksiin soveltuvia lasituotteita. Pinnoitteita on kehitetty mm. vähentämään infrapunasäteilyn läpäisevyyttä lasirakenteissa tai muodostamaan lasin pinnalle sähköä johtava kerros, joka voi toimia esimerkiksi osana hälytysjärjestelmää lasin rikkoutuessa ja vaurioituessa. /6, s. 21./

Läpinäkyvät pinnoitteet ovat metallioksideja. Lasin pinnoittamiseen metallioksideilla tai muulla pehmeämmällä materiaalilla on käytössä kaksi eri tekniikkaa: Off-line- ja On-line-pinnoitusmenetelmät. Offline- ja Online-

pinnoitteiden merkittävimmät erot ovat pinnoitteen kovuudessa sekä lasin ja pinnoitemateriaalin yhdistelmien määrissä sekä pinnoitteen paksuudessa. /6, s. 21/

Lämpösäteilyä ja näkyvän valon kulkemista lasirakenteen läpi voidaan estää myös maalipinnoitteilla, joilla voidaan luoda myös erilaisia arkkitehtonisia vaikutelmia. Maalaamalla lasin pinnalle virtapiiri sähköä johtavalla maalilla voidaan luoda myös esimerkiksi hälytysjärjestelmä, jossa lasin rikkoutuminen katkaisee virtapiiriin ja hälytys kytkeytyy päälle.

#### 4.1 Matalaemissiiviset pinnoitteet

Metallioksidoilla voidaan valmistaa lasin pinnalle kerros, joka heijastaa lämpösäteilyä ja lämpenee itsessään mahdollisimman vähän. Pinnoite voidaan tehdä lasin pinnalle, lasin valmistusvaiheessa On-line-pinnoituksena, josta käytetään myös nimitystä hot-end -pinnoitus. Kyseisessä pinnoitustekniikassa pinnoitemateriaali kuumennetaan noin 500 °C :een ja levitetään kuumen lasin pinnalle sumuna lasin valmistuksen yhteydessä. /3, s.218./ Pinnoitemateriaali leviää tasaisesti lasin pinnalle, ja pinnoitteen faasimuutos tapahtuu välittömästi pinnoitemateriaalin ja lasin reagoidessa toisiinsa /3, s. 243/. On-line -pinnoite on yleensä noin 10 nm paksu, kova keraaminen kerros lasin pinnalla. On-line-pinnoitusmenetelmällä saadaan aikaiseksi kova ja mekaanista kulutusta kestävä pinnoite./3, s. 218./

Off-line -pinnoite, toiselta nimeltään cold-end-pinnoite, saadaan lasille erillisessä prosessissa ja alhaisemmassa lämmössä kuin On-line-prosessissa tehtävä pinnoitus. Off-line -pinnoitusta voidaan tehdä monenlaisilla pinnoitemateriaaleilla, haluttujen ominaisuuksien saavuttamiseksi. Online-pinnoitteena käytettävien pinnoitemateriaalien määrä on laajempi kuin off-line-pinnoitusmenetelmässä käytettävien materiaalien määrä. Läpinäkymätön, samea pinnoite voidaan tehdä esimerkiksi vedellä laimennetun polyeteenioksidin, eli hapetetun polyeteenimuovin ja veden seoksella, joka sumutetaan 150 -asteisen lasin päälle. Lasin ollessa

sähkömagneettisessa kentässä, kiinnittyy pinnoitemateriaali lasin pintaan.

Pinnoitekerroksen paksuus on noin 50nm. /3, s. 218./

Toinen pinnoitusmenetelmä, joka soveltuu kovemmille pinnoituksessa käytettäville materiaaleille, on höyrystää pinnoitemateriaali, esimerkiksi alumiini pinnoituskammiossa. Off-line-pinnoitus tehdään alipaineistetussa kammiossa, jonne johdetaan erityistä työkaasua. Yleisimmin Off-line-pinnoituksessa käytetään argonkaasua. Kammiossa on pinnoitemateriaalina toimiva katodi ja anodina toimiva lasi. Työkaasun positiiviset ionit kulkeutuvat kohti katodia irrottaen siitä negatiivisia pinnoiteatomeja. Kaasuuntuneet pinnoiteatomit kulkeutuvat alipaineisessa kammiossa anodina toimivan lasin pinnalle. Koska katodin ja anodin välinen sähkövaraus aiheuttaa niiden välille sähkömagneettisen kentän, kulkevat atomit korkeammasta potentiaalista matalampaan ja kiinnittyvät lasin pintaan. /3, s. 244-245./

## 4.2 Maalipinnoitteet

Lasiin saadaan kestävä maalaus kiinnittämällä ns. emalimaali korkeassa lämpötilassa osaksi lasin pintarakennetta. Maalin polttaminen lasin pintaan tehdään yleensä lasin karkaisun yhteydessä tai lasin taivutusuunissa, lasilevyn taivutuksen yhteydessä. Väri maalille saadaan metallioksidoilla, jotka sekoitetaan lasirakeiseen massaan, jota puolestaan kutsutaan fritiksi. Fritissä on mm. lyijymönjää, boorihappo-oksidia, kvartsia, litiumia, natriumia, kadniumia, titaania ja zirkoniumia. Seos kuumennetaan noin 1000 asteeseen, minkä jälkeen sula massa jäähdytetään veteen. Fritin nopeasti jäähtyessä muodostuu pieniä lasirakeita. Lasirakeet jauhetaan väriaineen kanssa hienoksi pulveriksi. Pulveri sekoitetaan sideaineeseen, joka usein on veden ja arabikumien seos, sekä tarpeen vaatiessa laimennetaan ohenteella. Maali lasille voidaan levittää ruiskulla, verhomalausmenetelmällä tai silkkipainolla. Maali kuumennetaan lasin pintaan 500 - 700 asteessa. /37, s. 51./ Koska maali sisältää lasia, sulaa se kuumennettaessa lasin pintaan kiinni /6, s. 130/. Lasia voidaan pinnoittaa myös

kaksikomponenttisilla reaktiomaaleilla, jotka eivät tarvitse kuumennusta. Reaktiomaalit eivät kuitenkaan ole yhtä kestäviä naarmuuntumista vastaan kuin polttomaalit. /37, s. 52./

## **5 LASIJALOSTEET**

### **5.1 Float-lasi**

Rakennuslasituotteet valmistetaan nykyään pääsääntöisesti Float-lasista. Pääpiirteessään Float-lasin valmistus tapahtuu valamalla sula lasi sulan tinan päälle. Tinan päälle valettu lasilevy siirretään seuraavaksi jäähdytysuuniin, jossa lasilevyn jäähdytys suoritetaan hallitusti siihen syntyvien jännitysten minimoimiseksi. Hallittu jäähdyttäminen mahdollistaa lasin molekyylien järjestäytymisen koko lasilevyn alueella, jolloin lasin jännitys jakauma muodostuu mahdollisimman tasaiseksi. Jäähdytyksen jälkeen lasin laatu tarkistetaan ja pitkä nauhamainen lasilevy leikataan määrämittäisiksi aihioiksi. /29, s. 16./

Lasilevyn kansainväliseksi mitaksi on määräytynyt 3210 mm ja lasilevyjen maksimipituus on yleensä 6 m. Valmistuspaksuus lasilla on 0.4-19 mm. Float-lasi on valmistusmenetelmänsä ansiosta tasalaatuista ja sen pinta on hyvin tasaista. /29, s. 16/. Float-lasiin kuten lasiin yleensä voidaan porata ja työstää tarvittavia aukkoja ja koloja. Lasilevyä voidaan muotoilla hiomalla, jyrsimällä, vesileikkauksella ja erityisen lasiveitsen avulla. Muotoilun rajana on lähinnä mielikuvitus.

### **5.2 Valssattu ja vedetty tasolasi**

Rakennuslasituotteita valmistetaan myös valssatusta ja vedetystä tasolasista. Valssatusta ja vedetystä tasolasista valmistettujen tuotteiden määrä markkinoilla on pienempi kuin Float-lasista valmistettujen. Tämä johtuu mahdollisesti

tuotantokustannuksista ja -tehokkuudesta sekä pinnan tasaisuudesta, joka Float lasissa on valssattua lasia parempi. Yksinkertaistetun mallin mukaan tasolasin valmistaminen valssaamalla tapahtuu valmistamalla sula lasimassa, joka ohjataan valssien väliin, jolloin saadaan jatkuva lasinauha tai jatkuva, muotoon valssattu profiili. Valsseilla vaikutetaan lasin paksuuteen, lasin pinnanmuotoon sekä lasin poikkileikkauksen muotoon. Valsstatun ja vedetyn lasin valmistusmenetelmien suurimpana erona on, että valssattu lasi valmistetaan vaakatasossa valsseilla ja vedetty lasi vedetään telojen avulla lasimassasta pystysuoraan jäähdytyskuiluun./20/

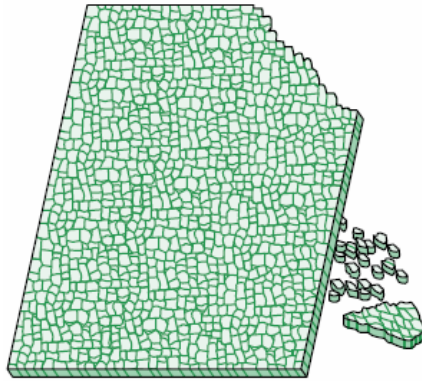
### 5.3 Karkaistu lasi

Lämpökarkaistut lasilevyt valmistetaan yleisimmin float-lasista, mutta myös valssatusta ja vedetystä lasista tehtyjä lasituotteita valmistetaan karkaistuna. Lämpökarkaistun lasin veto- ja taivutuslujuus on noin neljä kertaa Float-lasia suurempi ja kemiallisesti karkaistun lasin veto- sekä taivutuslujuus on noin viisi kertaa Float-lasia suurempi. /6, s. 86-88./

Lämpökarkaisukäsittelyn ansiosta lasi rikkoutuessaan hajoaa pieniksi paloiksi, joiden kokoon ja muotoon voidaan vaikuttaa lämpökarkaisuprosessissa. Palat eivät saa olla liian suuria eivätkä myöskään liian pieniä tai puikkomaisia. Karkaistua lasia kutsutaan turvalasiksi sen pirstaloituvan rikkoutumislouheensa vuoksi. Karkaistun lasin kestävyys ylittyessä pienet putoavat tai lentävät lasinpalat aiheuttavat huomattavasti pienemmän haitan kuin käsittelemättömän, rikkoutuvan lasin isot ja epäsymmetriset palat. /6, s. 86-88./

On huomioitava, että kemiallisesti karkaistu lasi rikkoutuu tavallisen float-lasin tapaan, joten yksittäistä kemiallisesti karkaistua lasia ei voi käyttää niin sanottuna turvalasina. /6, s. 20./ Kuvassa 4 on esitetty periaatekuva lämpökarkaistun lasin niin sanotusta rikkoutumiskuviosta. Lasille tehtävät työt, kuten reiät ja kolot on tehtävä ennen karkaisuprosessia, sillä lasin työstäminen myöhemmin voi rikkoa

lasin ja lisäksi karkaistun lasin työstö muuttaa lasielementin jännityksiä merkittävästi. Jos lasiin halutaan tasomaisesta lasista poikkeava muoto, puristetaan lasi pehmitysvaiheen jälkeen haluttuun muotoon muottien välissä, minkä jälkeen lasin lämpökarkaisu tehdään välittömästi. /6, s. 86-88./



Kuva 4 /29/

#### 5.4 Lämpölujitettu lasi

Lämpölujitettu lasi on käsitelty samalla periaatteella kuten karkaistu lasi. Ero varsinaiseen lämpökarkaisuun on alhaisempi maksimilämpötila ja hitaampi jäähtytys käsittelyprosessissa sekä vähäisempi lujuuden lisääntyminen. Rikkoutuvan lämpölujitetun lasin sirpaleet ovat suurempia kuin karkaistun lasin sirpaloitumisessa syntyvät palaset johtuen pienemmästä pinnan puristusjännityksestä. Lämpölujitetun lasin rikkoutuessa syntyvät palaset ovat kuitenkin pyöreämpiä ja vaarattomampia kuin käsittelemättömän lasin rikkoutumisessa syntyvät epämääräisen muotoiset palaset. /6, s. 88./

## 6 LASITUOTTEET

### 6.1 U-profiili (Profiililasi, lasilankku)

U-muotoista lasiprofiilia valmistetaan menetelmällä, jossa u-profiili saadaan lasille valssaamalla sula lasi muotoonsa valssiryhmän läpi. Samalla tehdään lasille mahdollinen pinnan kohokuviointi, joka saadaan valssin pinnanmuodolla./14/ Lasi voidaan varustaa langoituksella, jolla voi olla vahvistustarkoituksen sijaan myös ainoastaan koristetarkoitus. Tarvittava sävy lasille saadaan käyttämällä lisäaineilla värjättyä lasimassaa tuotteen valmistamisessa. /31/

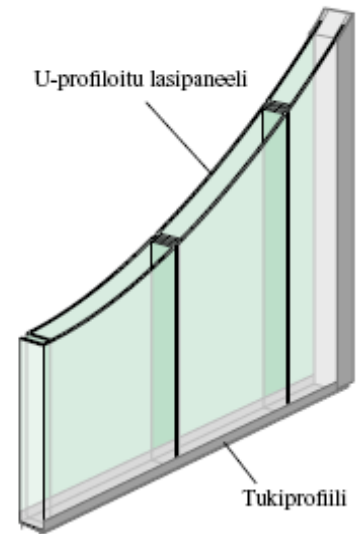
Profiililasia voidaan pinnoittaa selektiivi- ja auringonsuojapinnoitteilla tai sitä voidaan maalata. Muotonsa ansiosta u-profiililasi on erityisen jäykkä ja itsekantava elementti, jonka voi asentaa sekä vaaka- että pystytasoon. Elementit voivat olla jopa seitsemän metriä pitkiä. Elementit asennetaan limittäin tai puskuun muodostaen näin yhtenäisen lasipinta, jossa vain elementtien väliset ohuet saumat ja elementtien päiden paikalla pitämiseksi tarvittavat metalliprofiilit rikkovat näkyvän pinnan. Profiilin kestävyyttä ja turvallisuutta rikkoutumistilanteessa voidaan lisätä karkaisulla, langoituksella sekä lasin pintaan laminoitavalla lujitekalvolla./31/ Kuvissa 5 ja 6 on esimerkki profiililasista sekä profiililasitusrakenteesta ja kuvassa 7 on esitetty profiilien eri limitys mahdollisuuksia.



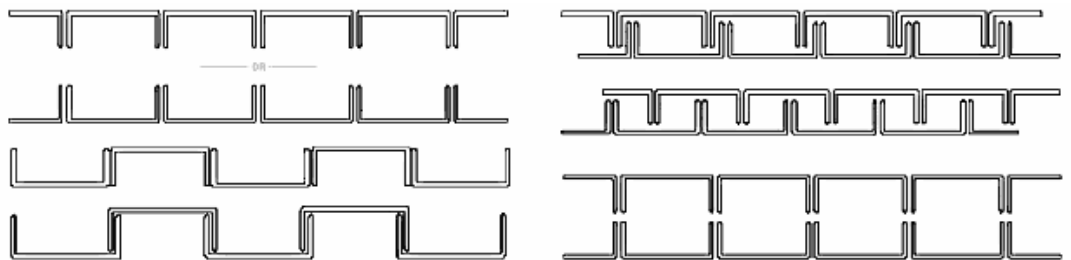
## Pilkington Profilit



Kuva 5 /14/



Kuva 6 /29/



Kuva 7 /14/

## 6.2 Lankalasi

Teräslankaverkolla vahvistettu, nk. lankalasi valmistetaan valssaamalla. Lankalasin valmistusvaiheessa teräslankaverkko upotetaan pehmeässä tilassa olevaan lasilevyyn. Vaihtoehtoisesti teräslankaverkko voidaan puristaa valssaamalla kahden pehmeässä tilassa olevan lasilevyn väliin. /19/

Lankalasi pysyy tasomaisena lasin rikkoutumisen jälkeenkin, koska lasinpalaset pysyvät kiinni tukena toimivassa teräslankaverkossa. Rikkoutunut elementti ei irtoa

asennetulta paikaltaan ennen kuin esimerkiksi tulipalon aiheuttama lämpö tai kuormituksen aiheuttama voima saa teräslangan myötäämään. Lankalasin pintaan voidaan muodostaa haluttu pinnanmuoto valssauksen yhteydessä tai pinta voidaan hioa tasaiseksi. Ilman pinnan käsittelyä lankalasin pinta on kevyen aaltomainen vaakana ja pystysuunnassa. /19/ Kuvassa 8 on Pilkington Pyroshield -lankalasi, josta käy ilmi lankojen sijoittuminen lasissa.



Kuva 8 /29/

### 6.3 Laminoitu lasi

Laminoinnilla lasit voidaan yhdistää toisiinsa laminointikalvolla tai käyttämällä nestemäistä laminointiainetta. Laminoitikalvon materiaali on yleensä polyvinyylibutyaalia ja nesteenä käytettävä laminointiaine on yleensä hartsia tai polyuretaania. Nestemäisen laminointiaineen jäykkyys on laminoitikalvoa pienempi, joten laminoitua lasia käytettäessä niin sanottuna turvalasina saadaan PVB-kalvolaminoinnilla lasielementille parempi kestävyys. Jos laminointikalvon jäykkyys olisi niin suuri, ettei lasien suhteen pääsisi syntymään liukumaa, olisi laminoidun lasin lujuus sama kuin vastaavan paksuisen yhtenäisen lasilevyn taivutuslujuus. Float-lasista valmistetun laminoidun lasin taivutuslujuus on pienempi kuin samanpaksuisen, yksittäisen Float-lasilevyn taivutuslujuus, koska laseja yhdessä pitävä laminointikerros viruu elastisuutensa takia eikä näin ollen

pysty siirtämään syntyviä leikkausvoimia lasilta toiselle kokonaisuudessaan. /6, s. 88-89./

Laminoidussa lasirakenteessa laminointikerros pitää rikkoutuneen lasilevyn palaset kiinni laminointikerroksessa, eikä putoavien tai lentävien lasinkappaleiden vaaraa synny. Laminoinnin ansiosta rikkoutunut lasielementti ei romahda paikaltaan. Jos kuormitus jatkuu lasien rikkoutumisen jälkeen, venyy laminointikalvo kuormituksen ja ajan funktiona, kunnes rikkoutunut lasielementti irtoaa paikaltaan, esimerkiksi raameistaan. Laminointilaselementissä voi olla useampia lasikerroksia, joiden määrää rajoittavat lähinnä optisten ominaisuuksien tason tarve ja rakenteelle asetettu painoraja. Kerroksien määrän lisäyksellä voidaan saavuttaa toivottavia ominaisuuksia, kuten säteilyn-, paineen-, palon- ja äänensuojausta. /6, s. 88-89./

Laminointielementissä käytettävät lasit voidaan myös taivuttaa haluttuun muotoonsa taivutusuunissa ennen laminointia. Laminoidussa lasielementissä voidaan käyttää myös lämpölujitettua ja karkaistua lasia. Karkaistun lasin käyttö laminoidussa lasielementissä saattaa osoittautua ongelmalliseksi tilanteessa, jossa lasin tulisi pysyä asennetulla paikallaan senkin jälkeen, kun lasielementin lasit ovat rikkoutuneet. Elementin rikkoutumisen jälkeen jatkuva kuormitus aiheuttaa karkaistusta lasista valmistetun elementin irtoamisen paikaltaan, kun laseja yhdessä pitävä laminointikalvo venyy rikkoutuneen lasin rajapintojen kohdilta. Koska tiheän ja symmetrisen rikkoutumiskuvion takia palasien välisiä rajapintoja on paljon, voi jopa elementin oma paino riittää aiheuttamaan elementin reunojen vetäytymisen pois listoituksestaan ja lasin irtoamisen paikaltaan. /6, s. 88-89./

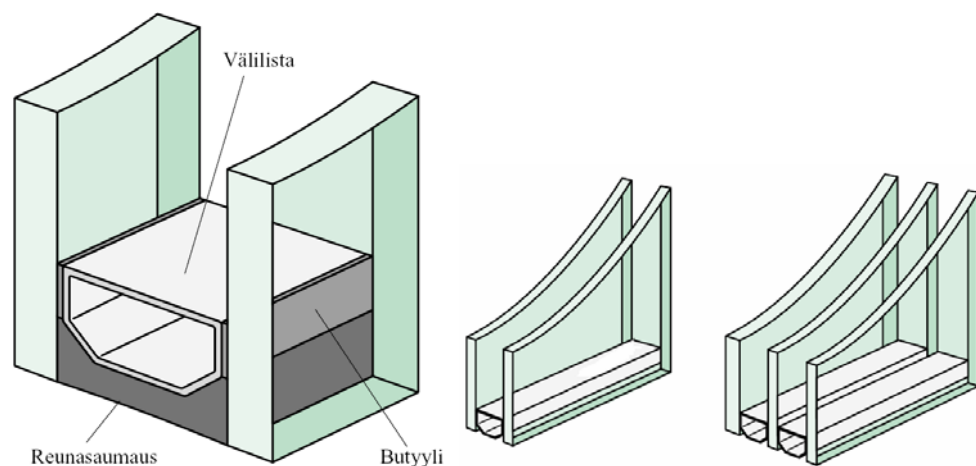
## 6.4 Kuviolasi

Kuviolasi valmistetaan valssaamalla kohokuviointi pehmeään lasimassaan. Myös kuviolasin lujuutta voidaan lisätä karkaisulla. Lämpökarkaisukäsittelyn tekemistä saattaa rajoittaa kohokuvioityypin syvyys. Tuotetta käytetään yleensä kohteissa,

joissa halutaan samalla sekä näköestettä että hyvää valonläpäisyä. Kuviolasia voidaan käyttää myös laminoidussa elementissä ja eristyslaseielementissä. Kuviolasia voidaan muotoilla ja työstää kuten tavallista sileää lasia./20/

## 6.5 Eristyslaseielementti (Umpiolasi)

Eristyslaseielementillä saadaan parempi lämmön ja äänen eristävyys ovi- ja ikkunalasitukseen sekä yleensä aukkolasituksissa. Elementti rakentuu kahdesta tai useammasta toisiinsa yhdistetystä lasilevystä, joiden väliin jää yksi tai useampi suljettu ilmatila, riippuen lasien määrästä elementissä. Kuva 9 esittää periaatteen eristyslaseielementin rakenteesta.



Kuva 9 /29/

Suljetun ilmvälin aikaansaamiseksi on käytössä metallisia tai muovisia välilistoja sekä kuiviketta sisältäviä butyyli nauhoja ( $\text{Hiilivety} = \text{C}_4\text{H}_9$ ). Metallinen välilista on yleensä alumiinia. Metallilistalla varustetussa eristys-elementissä lista liimataan sivuistaan lasien pintaan plastisella butyyli massalla. Tämän tarkoituksena on pitää listat paikoillaan varsinaisen sauman levittämisen aikana sekä mahdollistaa lasilevyjen kiertymisen listan suhteen kuormitustilanteessa. Lisäksi plastinen butyyli massa vähentää kylmäsiltaa alumiinilistan ja lasien välillä pienen lämmönjohtavuutensa ansiosta. Metallilistan sivuistaan lasiin liimaamisen jälkeen

(metallilistan liimaus sivuistaan lasien pintoihin voidaan jättää myös tekemättä), levitetään elastinen polysulfidi-, silikoni- tai polyuretaaniliima lasien ja listan rajaamaan tilaan. Liimauksella lista ja lasit sidotaan toisiinsa. Vastaava liimaus tehdään butyyliinauhavälikettä käytettäessä. /6, s. 99–100./

Eristyslaseielementin suljetussa välitilassa voidaan käyttää tavallista kuivaa huoneilmaa sekä erilaisia kaasuja. Perustuen kaasujen erilaisiin fysiologisiin ominaisuuksiin voidaan näillä vaikuttaa lasielementin lämmönläpäisyyden ja äänen kulkeutumiseen elementin läpi. Lämmönjohtavuuden pienentämiseen käytettäviä yleisimpiä kaasuja ovat Argon (Ar), krypton (Kr) sekä ilmakehässä vähäisenä pitoisuutena oleva ksenon (Xe). /6, s. 99–100./ Kaasun sisältämän vesihöyryn sitomiseksi ja tasaamiseksi eristyslaseielementin lista tai metalliprofiilin ontto sisäosa on varustettu kuivikeaineella. Kuivikeaineena käytettävällä molekyylillä on rakenne, jonka tarkoituksena on sitoa ylimääräistä kosteutta ja liuoteaineen kaasumolekyyleja tehokkaasti. /6, s. 101./

Ääneneristävyttä parantamaan käytetään eristyslaseielementin suljetussa välitilassa mm. rikkiheksafluoridia ( $\text{SF}_6$ ), joka tiheydensä ansiosta vastustaa siihen kohdistuvaa värähtelyenergiaa ja heikentää näin äänen kulkeutumista kaasutilassa. Ääneneristävyys paranee rikkiheksafluoridia käytettäessä muutamalla desibelillä. /6, s. 99–100./ Eristyslaseielementin rikkoutuminen lämpöjännityksen purkautumisen lisäksi voi aiheutua myös elementin suljettuun ilmatilaan syntyvän yli- tai alipaineen seurauksena. Jos suurta ilmanpainetta ja lämpötilan eroa ei huomioida elementin suunnittelussa ja valmistuksessa, saattaa elementti rikkoutua valmistuspaikan ja asennuspaikan välisen ilmanpaine- ja lämpötilaeron seurauksena. Myös eri kaasujen erilaiset diffuusionopeudet voivat aiheuttaa hitaasti syntyvän paineenmuutoksen ilmatilaan, jolloin toista kaasua diffusioituu enemmän elementin suljettuun ilmatilaan ja toista kaasua diffusioituu hitaammin pois ilmatilasta. Tilanne voi aiheuttaa lasin rikkoutumisen jännityksen ylittyessä ali- tai ylipaineen vaikutuksesta, riippuen diffusioituvien kaasujen suunnista ja määristä. /2, s. 22./

Eristyslaselementissä voidaan käyttää eri lasijalosteita ja tuotteita, kuten laminoitua lasia, lankalasia, pintakuvioitua lasia jne. /28, s. 100/. Lasivalintojen lisäksi eristyslaselementin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa erilaisilla lasin pinnoituksilla. Niillä voidaan vaikuttaa esimerkiksi pitkäaaltoisen lämpösäteilyn läpäisyyn, tai lasin pinnoite voi toimia sähkövastuksena, joka tuottaa lämpöenergiaa käyttötilaansa /29, s. 107./

## 6.6 Lasitiilet

Lasitiili valmistetaan kuumentamalla lasimassa noin  $1550^{\circ}\text{C}$ :en kaasukuplien poistamiseksi, jonka jälkeen lämpötila lasketaan sopivan viskositeetin saamiseksi noin  $1200^{\circ}\text{C}$ :en. Lasitiili rakentuu kahdesta puolikkaasta: lasimassa valetaan ns. naarasmuottiin ja koirasmuottiin. Lasitiilen puolikkaiden valmistuttua lämmitetään näiden liitospinnat noin  $800^{\circ}\text{C}$ :een ja painetaan kevyellä paineella toisiaan vasten. Tiilen ja sisälle jääneen ilman jäähtyessä syntyy sisälle alipaine, joka on noin 70 % normaalista vallitsevasta ilmanpaineesta. Alipaineen aiheuttamana vähenee ilmatilan lämmönjohtavuus, mikä johtuu kaasumolekyylien vähyydestä ja niiden pidentyneistä välimatkoista. Lisäksi vesihöyryn kondensoituminen vähenee vesihöyryn pitoisuuden laskiessa. /17/

Lasitiilestä voidaan rakentaa pystyrakenteita, kuten seiniä ja valoaukkoja sekä vaakarakenteita, joita voidaan käyttää kattorakenteissa, lattiarakenteissa ja yleensä kävelypintoina /6, s. 123–124/. Kuormitetut rakenteet, kuten välipohjat, joissa on käytetty lasitiiliä, kannatetaan lasitiilien välissä kulkevilla betonipalkeilla, jotka ovat samalla lasitiilien välisiä saumoja./35/ Myös metallisia kehikkoja voidaan käyttää kantamaan kuormat ja lasitiilet esimerkiksi kattorakenteissa. /24, s.2./

Onttojen lasitiilien lisäksi markkinoilla on myös umpilasista valmistettuja lasitiiliä, joita käytetään esimerkiksi lämpimien tilojen välipohjissa, joissa ei ole välttämättä tarpeen käyttää lämpöä paremmin eristävää onttoa lasitiiltä. Onton lasitiilen

ääneneristävyys on useita kymmeniä desibelejä. Ääneneristävyysarvo on riippuvainen valmistajan valmistamasta lasitiilen koosta ja mallista sekä tiilen kiinnitystavasta. Eristävyysarvot ovat karkeasti noin 40...50db. U-arvo lasitiilirakenteilla on  $2,7 \dots 3,1 \frac{W}{m^2K}$ , kiinnitystavasta riippuen. /6.s123–124./

Lasitiiliä voidaan muurata laastilla kuten normaaleja tiiliä, tai niitä voidaan liimata toisiinsa välikkeiden ja listojen avulla sekä kiinnittää silikonilla toisiinsa. Lasitiilirakenteita on markkinoilla myös paloluokkiin E30...E90 sekä EI30...EI90, jolloin sekä lasitiilet että niiden kiinnitykseen käytettävän muurauslaastin ja terästen on oltava testattujen rakenteiden mukaisia ominaisuuksien saavuttamiseksi ja varmistamiseksi. /30, s. 2./ Lasitiilirakenteet suunnitellaan kestäväksi tuulikuormaa ja niillä voidaan saavuttaa myös luodinkestäviä lasipintoja. Lasitiilellä voidaan tehdä myös murronkestävä rakenne, jossa oikealla lasitiilen koolla, sauman paksuudella ja laastisauman raudoituksella saavutetaan vaadittu ominaisuus./36/

Pääsääntöisesti pystysuorat lasitiiliranteet suunnitellaan kantamaan vain oman ja päälle ladottujen lasitiilien painon. Pelkkien kuormittamattomien lasitiilimuurausten käyttö pystysuorissa rakenteissa johtuu mahdollisesti lasitiilen heikosta tartunnasta etenkin muurauslaastiin.

## **7 LASIRAKENTEIDEN KANNATUSMENETELMIÄ**

### **7.1 Listalasisitus**

Perinteinen lasin kiinnitysmenetelmä runkorakenteeseen on lasituslistojen käyttö. Listakiinnityksessä lasilevy, laminoitu lasielementti tai eristyslaselementti tuetaan kannatuskiilojen välityksellä vaakasuuntaisen karmi- tai runkorakenteen päälle. /37, s. 62./ Tukikiilojen käytön merkitys korostuu lasilevyn ja lasirakenteen koon ja

tätä myötä painon lisääntyessä. Kannatuskiilojen käytöllä mahdollistetaan lasilevyn tai lasirakenteessa olevien useampien lasilevyjen vapaa lämpöliike suhteessa runkoon. Tällöin lasilevyn kosketuspinta-ala kannatuskiilojen välityksellä runko- tai karmirakenteeseen on pienempi, jolloin lasilevyn ja kantavan rakenteen välistä kitkavaikutusta ei tarvitse alkaa erikseen määrittelemään. Kannatuskiilojen lisäksi listalasiutuksessa käytetään tuki- ja tuulikiiloja. Tukikiiloja käytetään pitämään lasi oikeassa asennossa ja irti karmirakenteesta, kun lasin tai lasirakenteen liikkuminen kehykseen nähden on mahdollista. Tuulikiilat siirtävät lasin tasopintoja vastaan tulevia kuormia kehysrakenteisiin./37, s. 62./

Lasin ja lasirakenteen kiinnityksessä käytettävien listojen välinen liitos tulisi suunnitella sellaiseksi, ettei liian tiukka sovitus rikkoisi lasia lämpöliikkeen tai rungon siirtymän aiheuttaman pakkovoiman takia. Rikkoutumisen riski korostuu metallisia listoja käytettäessä, joten listan ja lasin välissä on syytä käyttää joustavaa tiivistettä, vaikka rakenne ei joutuisikaan esimerkiksi sadevedelle alttiiksi./37, s. 63./

## 7.2 Pistekiinnitetty lasi

Pistekiinnitettyllä kannatusmenetelmällä kiinnitetyn lasin kiinnittiminä käytetään yleensä pultteja. Pistekiinnityksellä kannatettu lasi on syytä olla karkaistua lasia kestävyuden ja turvallisuuden parantamiseksi. Metallin ja lasin välisissä kontaktipinnoissa tulee käyttää pehmeää vaimennusmateriaalia ja lasin kiinnitysreikien tulee olla väljiä tai soikeita. Pistemäisen tuen aiheuttama taivutusmomentti lasiin on minimoitava, koska momentista syntyy suuria vetojännityksiä reiän ympärille. Myös kiinnikkeiden, kuten pulttien kiristämisessä lasipintoja vasten on noudatettava suunnitelmissa määritellyjä tiukkuuksia, eli pultin yms. vääntömomenttia./6, s. 66./

Mittausten mukaan karkaistussa lasissa senkatun reiän viisteisiin tulee samansuuruinen puristus kuin lasilevyn tasopintoihin. Sylinterimäisen reiän



sisäpinnan keskelle syntyy keskimääräistä suurempi vetojännitys ja reiän ympärille pienempi puristus. Näin ollen heikoimmat kohdat reiän alueella ovat reiän sisäpinnan keskellä ja lasilevyn pinnoissa. Reiän ympärillä lasipintojen heikompi alue ulottuu lasin paksuuden tai paksuuden puolikkaan etäisyydelle reiän reunasta./37, s. 79./ Liitoksia suunniteltaessa on huomioitava, ettei liitoksia kiristetä liian tiukasti, jotta lämpöliikkeet pääsevät tapahtumaan vapaasti /37, s. 66/.

### 7.3 Structural glazing eli SG-lasitus

SG-lasituksessa lasilevyt, laminoidut lasielementit tai eristyslaselementit liimataan silikonisaumaussmassalla runkorakenteeseen. Rakenteessa silikoniliima toimii saumamassana sekä kuormia siirtävänä liitoksena rungon ja lasilevyn välillä. SG-lasituksen on todettu kestävän hyvin räjähdyspaineen aiheuttamaa kuormitusta joustavan liitosrakenteensa ansiosta. Lasien kiinnittämisessä käytettävä silikonisaumamassa kestää hyvin ympäristön rasituksia ja vaihtuvasuuntaisia muodonmuutoksia./37, s. 67./

## 8 PALONSUOJALASIT

Lasituotteita on mahdollista käyttää osastoivina rakenteina. Tulipaloa osastoivien lasirakenteiden tulee kestää palon aiheuttamaa lämpörasitusta ja estää kaasujen sekä liekkien läpäisemästä rakennetta. Joillakin lasituotteilla, kuten laminoidusta ja eristyslaselementistä valmistetuilla lasituotteilla, on mahdollisuus vaikuttaa lämpösäteilyn kulkeutumiseen lasirakenteen lävitse. /6, s. 49./ Lasirakenteisiin, kuten yleensä rakennusosiin kohdistuvia vaatimuksia kuvataan rakenteen kantavuudella (R), rakenteen tiiviydellä (E) ja rakenteen eristävyydellä (I) /25, s. 4/.

## 8.1 Lasirakenteen kantavuus palotilanteessa

Kantavia sekä myös palotilanteessa kantavuutensa ylläpitäviä rakenteita, esimerkiksi lattioita, voidaan tehdä laminoidusta monikerroslasista sekä lasitiilen ja raudoitetun betonin muodostamasta yhdistelmä rakenteesta, jossa lasitiilien väleissä olevat raudoitetut betonipalkit toimivat kantavana rakenteena. Lasitiilistä ja laminoidusta monikerroslasielementistä valmistetussa kantavassa lasirakenteessa on mahdollista saavuttaa samanaikaisesti myös tiiviys ja eristävyys. /6, s. 51, 13./ Palo-osastoivat lasitiiliset seinät tehdään yleensä muuraamalla sementtilaastilla ja vahvistamalla mahdollisesti raudoitteella.

## 8.2 Lasirakenteen tiiviys

Lasinvalmistajilla on monenlaisia lasituotteita, joilla lasirakenteiden tiiviysvaatimus voidaan toteuttaa. Lasirakenne on tiivis niin kauan kunnes se sortuu. Soodakalkkilasilevy itsessään ei kestä nopeaa, palon aiheuttamaa lämpötilan nousua, sillä lasin epätasainen lämpeneminen palon aikana synnyttää lasiin jännityksiä, jotka rikkovat lasin. Lasirakenteen tiiviyden toteuttava lasirakenne on mahdollista toteuttaa myös yksittäisellä lasilevyllä, jos käytettävä lasi on esimerkiksi puhdasta silikaattilasia tai yleisemmin käytettyä borosilikaattilasia. Käytettäessä borosilikaattilasista valmistettua lasilevyä saadaan osastoiva lasirakenne, joka voi jopa säilyä rikkoutumattomana palotilanteessa. /37, s. 55./ Borosilikaattilasi kestää huomattavasti paremmin lämpötilaeroja kuin tavanomainen, rakennuslasina käytettävä soodakalkkilasi. Borosilikaattilasin lämpölaajenemiskerroin on vain kolmasosa soodakalkkilasiin lämpölaajenemiskertoimesta, mikä johtuu lasin molekyylien välisistä vahvemmista sidoksista. Borosilikaattilasia käytetään yleisesti myös kuumennusta kestävässä ruoanvalmistusastioissa. /4, s. 130/

Käytettäessä palonsuojalasina teräslankaverkolla vahvistettua lasia, pitää lasin sisällä oleva teräslankaverkko lasirakenteen vielä yhtenäisenä ja säilyttää näin tiiviytensä, vaikka itse lasi rikkoutuukin pienemmiksi osiksi. /37, s. 55./

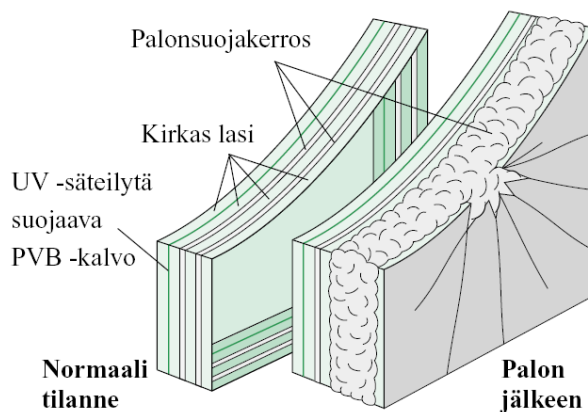
Laminoidussa lasielementissä lasilevyjen välissä oleva laminointikalvo pitää lämpöjännityksestä rikkoutuvat lasilevyn kappaleet kiinni itsessään ja säilyttää kantavuutensa niin kauan kunnes kalvo pehmenee ja menettää sitkeytensä.

### 8.3 Lasirakenteen eristävyys

Osastoivan rakenteen eristävyydellä tarkoitetaan palotilanteessa syntyvän haitallisen korkean lämpösäteilyn eristävyyttä rakenteessa. Suomen Rakennusmääräyskokoelman palomääräyksissä /25/ suojaetäisyys määritetään pinta-alaltaan pienehköille lämpösäteilyä läpäiseville rakenteille. Suojaetäisyys valitaan niin suureksi, ettei lämpösäteilyn teho ylitä  $10 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2}$ . Standardoidussa 30 minuuttia kestävässä palotilanteessa yksittäisen lasilevyn lämpötila nousee noin 500 asteeseen, jolloin lämpösäteilyn teho lasin pinnan lähellä on noin 40 kW neliömetrille. Metrin etäisyydellä lasista lämpösäteilyn intensiteetti on vielä noin 28 kW neliömetrille. Suurin säteilytehon intensiteetti, jonka ihminen kestää, on noin 1 kW neliömetrille. Palovammoja ihmiselle syntyy kahdessakymmenessä sekunnissa, kun lämpösäteilyn teho on noin 7 kW neliömetrille. Monet korkealle kuumuudelle herkät materiaalit syttyvät teholla 10 kW neliömetrille. /37, s. 88./ Useampilasisilla lasirakenteilla voidaan tehdä osastoivia, vaarallisen korkeata lämpösäteilyä eristäviä rakennusosia. Monikerroslasirakenteissa lämpösäteilyn energia sitoutuu lasirakenteen väliaineisiin. Monikerroslasirakenteina valmistettavia rakennuslasituotteita ovat laminoidut lasielementit sekä eristyslaselementit. Laminoidussa, monikerroksisessa lasielementissä eristävänä väliaineena oleva laminointikerros on yleensä silikaattia. Silikaatin altistuessa palossa syntyvälle lämmölle höyrystyy siinä oleva kidevesi, sitoen samalla lämpöä. Kideveden vapautuessa ja höyrystyessä silikaattikerros laajenee, mikä parantaa

entisestään lasirakenteen lämmöneristävyyttä. Palonsuojaeristyslaselementin lasien välit on täytetty geelillä, joka on yleensä vesipohjaista. /6, s. 51./

Kuva 10 esittää periaatekuvauksen silikaattiväliaineen käyttäytymisestä palotilanteessa. Silikaattivälikerroksella varustettu laminoitu lasielementti tulee UV-säteilyherkkyytensä vuoksi suojata tältä säteilyltä. Laselementissä yleisesti käytettävä PVB-kalvo antaa tehokkaan suojan UV-säteilyä vastaan.



Kuva 10 /29/

## 9 LASIN KESTÄVYYS

### 9.1 Lasin lujuuteen vaikuttavia tekijöitä

Lasilevyn lujuuteen on todettu vaikuttavan kuormitusaika ja levyn koko. Lasin pinnassa on mikrohalkeamia, jotka kasvavat kun lasimolekyylien sidokset katkeavat vetojännityksen ylittäessä näiden yhdessä pitävän voiman aiheuttaen lasin rikkoutumisen. Lasilevyn käytössä saattaa syntyä myös mikrohalkeamia isompia naarmuja, joista murtuminen voi alkaa. Lasille on ominaista, että se kestää hetkellistä kuormitusta enemmän kuin pitkäaikaista kuormitusta. /37, s. 39./ Lasi on amorfisen rakenteensa vuoksi erittäin suuren viskositeetin omaavaa nestettä, jossa ei tavanomaisissa käyttölämpötiloissa tapahdu virtausta. Erityisen suuren viskositeetin omaavassa nesteessä olevat molekyylit liikkuvat rajallisesti, mutteivät pysty liukumaan toistensa ohi, jolloin lasi rikkoutuu sidosten peittäessä. /6, s. 54./

Kuormituksen ja kuormitusajan lisäksi lasin kestävyys vaikuttaa lämpötila, sillä lasin viskositeetti on riippuvainen lämpötilasta.

Karkaisemattoman ja lämpölujittamattoman lankalasin taivutuslujuus on pienempi tavalliseen käsittelemättömään float-lasiin verrattuna. /37, s. 39./ Ilmiön syynä on todennäköisesti lasin keskellä olevan teräslankaverkon aiheuttama leikkausjännitys lasilevyä kuormitettaessa. Polttomaalatus, karkaistun lasin maalatus lasipinnan vetolujuus on huomattavasti pienempi verrattuna maalaamattomaan karkaistuun lasiin. /37, s. 39./ Heikennys johtuu ilmeisesti siitä, että lasin pintaan sulatettava maalikerros sisältää lasin lisäksi myös muita aineita kuin lasia, eikä kerroksen lujuus ole tällöin yhtä suuri kuin homogeenisen, maalaamattoman lasin pinta. Lisäksi maalipinta ja maalikerroksen sekä lasinlevyn rajakohta on todennäköisesti epätasainen, eikä lasin pinta kestä näin ollen yhtä suurta vetojännitystä kuin sileä lasipinta.

## 9.2 Reunojen käsittelyn vaikutus lasin lujuuteen

Lasin kestävyys vaikuttavat lämpö- ja kemiallisen karkaisun sekä lämpökäsittelyn lisäksi myös lasin koostumus ja lasilevyn reunojen työstö. Rakennuslasina käytettävän lasilevyn reunat voivat olla käsittelemättömiä, eli lasilevyn reunat ovat lasin palastelun jäljiltä terävät. Lasilevyn särmien reunat voidaan hioa, mikä vaikuttaa lasilevyn taivutusvetolujuuden arvoihin. Rakennuslaseissa käytettyjä hiontoja on pääasiassa neljää eri tyyppiä: särmien hionta, raakareunahionta, puolipyöreä hionta ja kiiltoreunahionta. Helsingin Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion kokeessa on tutkittu lasin reunakäsittelyn vaikutusta lasiprisman taivutuslujuuteen. Taulukossa 1 on lasiprisman 8 · 320 · 50 mm<sup>3</sup> tehdyn taivutusvetolujuuden koetulokset. Jokaista reunakäsiteltyä ja käsittelemätöntä lasiprismaa on kymmenen kappaletta kutakin, joten otantamäärän pienuuden takia tulokset eivät tilastollisesti välttämättä ole täysin totuudenmukaisia. Kuormitus on kohdistettu kokeessa kohtisuoraan lasiprisman pitkälle reunalle. Tulokset osoittavat, että kiiltoreunahionnalla

saavutetaan suurin taivutuslujuuden keskiarvo. Reunakäsittlemätöntä lasia ei yleensä lämpökarkaista eikä lämpölujiteta, sillä lasin terävä reuna kestää huonosti lämpökäsittelyn aikana syntyviä suuria lämpötilaeroja. /6, s. 83./ Käsittlemätön, palastelun jäljiltä oleva lasi voi olla reunoiltaan kestävämpi kuin reunahiottu lasi. Helsingin Teknillisen korkeakoulun kokeessa hiomattomalla lasiprismalla oli kaikkien näytteiden suurin, mutta myös pienin lujuusarvo. Tästä syystä on parempi käyttää reunahiottua lasia, jonka ominaislujuuden hajonta on pienempi verrattuna käsittlemättömän lasin lujuusarvojen hajontaan. /37, s. 79./

Taulukko 1 /36. Liite IV 16 (16)

Lasityyppi	Reunakäsittely	Taivutuslujuuden keskiarvo N / mm <sup>2</sup>	Taivutuslujuuden keskihajonta N / mm <sup>2</sup>
float	käsittlemätön	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

### 9.3 Lasin lämmönkestävyys

Lasi kestää varsin suuria lämpötiloja lämmitessään tasaisesti koko pinta-alaltaan, mutta ei kestä jos lämpölaajeneminen eri osissa lasilevyä on kovin suurta. Massavärjätyt ja pinnoitetut lasit absorboivat tavallista kirkasta lasia enemmän lämpösäteilyä, joten näillä on suurempi riski rikkoutua epätasaisen lämpölaajentumisen seurauksena. Esimerkiksi lasin ollessa listoitettu, lämpenee

listoituksen tai muiden rakenneosien alla varjossa oleva lasin reuna lasilevyn keskiosia hitaammin. /37, s. 76./ Lasilevyn eri osien eritahtisen lämpenemisen aiheuttama lämpölaajeneminen synnyttää puristusta lasilevyn keskiosiin ja vetojännitystä levyn reuna-alueille.

Lasilevyn reunan vetokestävyyden ylittyminen on yleinen syy lasilevyn rikkoutumiselle. Lasi kestää moninkertaisesti enemmän puristusta kuin vetoa. Tämän lisäksi reuna-alueiden vetolujuus on lasilevyn keskialueita heikompi, johtuen suurimpien säröjen ja mikrohalkeamien sijainnista lasilevyn reunoissa. /37, s. 77./ Haitallisia lämpötilaeroja synnyttäviä tilanteita ovat mm. lasille tulevat voimakkaat ja terävät varjot sekä tilanteet, jossa lasirakenteeseen on kosketuksissa muita rakenteita, jotka johtavat voimakkaasti lämpöä. Haitallisen lämpötilaeron voi synnyttää myös lämmönlähteen, kuten säteilylämmittimen suora säteily lasiin sekä lämpöä takaisin heijastavat pinnat, joista yleisimmän rikkoutumisriskin aiheuttaa lasirakenteen sisäpuolelle, ilman tuuletusväliä asennettu sälekaihdin. /37, s. 76./ Eristyslasi-elementti saattaa rikkoutua myös elementin suljetussa ilmatilassa olevan kaasun lämpölaajentumisen tai -kutistumisen seurauksena, jolloin kaasun paineen muutos kuormittaa lasilevyjä. Tällöin lasipinnan kaareutuessa syntyy lasin pinnan suuntaista vetojännitystä, joka rikkoo lopulta lasin vetokestävyyden ylittyessä. /2, s. 19./

#### **9.4 Lasin pinnan kestävyys**

Eri tutkimuksissa on todettu ulkoilmaa vasten olevien lasien lujuudessa heikentymistä, joka on ollut merkittävintä kaupunkiympäristössä. Syynä heikentymiseen on mm. tuulen mukana kulkevan, hiekoitushiekasta eroosioituneen hienoaineksen iskeytyminen lasin pintaan, mikä aiheuttaa siihen ajan mittaan mikroskooppisen pieniä säröjä. Ulkopuolisen kuormituksen synnyttämistä pienistä pintavioista kehittyy ajan mittaan suurempia vaurioita lasilevyn pinnan suunnassa syntyvien vetojännityksien, esimerkiksi tuulen imun vaikutuksesta. Lasin pinnan suuntainen vetojännitys rikkoo pienten säröjen välissä olevan ehjän lasipinnan,

jolloin pienet lasipinnan vauriot yhdistyvät suuremmiksi vaurioiksi. Pintavikojen lisääntymisen myötä lasilevyn taivutuskestävyys ja pinnan puhdistuvuus heikkenee. /6, s. 53./

Kemiallista räsitystä lasin pintaosiin aiheuttaa fluorivetyhappo (HF). Sitä käytetäänkin aggressiivisen reagoitinsa vuoksi kaupallisesti lasin pintaan tehtävien, hiekkapuhallettua pintaa muistuttavien kuvioiden ja alueiden syövyttämisessä. Muita happoja lasi kestää kuitenkin hyvin. Lasi kestää huonosti monia emäksisiä liuoksia. Lasipinnan altistuessa vedelle, joka ei pääse poistumaan vapaasti, voi veden emäksisyyden kasvaminen vaurioittaa lasia. Koska vesi reagoi lasin kemiallisiin sidoksiin liuottaen pinnasta natriumia ja kaliumia, muodostaa se näin emäksisen liuoksen, joka syövyttää lasipinnan rikki. Alkalisen liuoksen aiheuttama pinnan rikkoutuminen synnyttää lasin pinnalle niin sanottua lasihometta, joka ilmenee mattamaisena ja harmaana laikkuna. /37, s. 39./

## 10 LASI JA SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY

Tavalliseen Float-lasilevyyn osuvasta kohtisuorasta, näkyvästä valosta heijastuu takaisin noin 8 % /37, s. 38/. Noin 9 % näkyvästä valosta imeytyy lasiin riippuen lasin rautaoksidipitoisuudesta. Loput valosta kulkeutuu esteettä läpi. Tavallinen kirkas lasi läpäisee tehokkaasti aallonpituudet, jotka ovat 200 ja 3000 nm:n välillä ja absorboi niitä pienemmät ja isommat aallonpituudet. /13, s. 61./

Auringon lämpösäteilyn aallonpituuksista aallonpituutta <380 nm on noin 4 %, aallonpituuden alueella olevaa 380 - 760 nm säteilyä on kokonaissäteilystä noin 44 % ja aallonpituusalueella 760 - 2500 nm olevan säteilyn osuus on noin 52 %. Auringon säteilyenergiasta lämmennyt ympäristö säteilee noin 8000 - 12000 nm aallonpituuksilla, mistä osa absorboituu lasiin. /13, s. 61./ Valonläpäisy riippuu paitsi aallonpituudesta myös valonsäteen kohtauskulmasta lasin pintaan. Kohtaamiskulman ollessa suurempi kuin 60 astetta, vähenee valon läpäisy voimakkaasti. /37, s. 38./



## 10.1 Sähkömagneettisen säteilyn läpäisyä pienentävät tuotteet

Lämpösäteilyn sekä näkyvän valon etenemistä lasirakenteessa voidaan estää erilaisilla lasituotteilla. Lämpösäteilyn läpäisyä estävät tuotteet voidaan jakaa pääsääntöisesti kahteen eri toimintaluokkaan. Tuote voi estää lämmitetystä tilasta pitkäaaltoisen lämpösäteilyn karkaamista tai tuote voi vähentää ympäristöstä esimerkiksi huonetilaan säteilevän pitkän- sekä auringosta säteilevän lyhytaaltoisen säteilyn läpäisyä samanaikaisesti. Lämpösäteilyn läpäisyä vähentävät tuotteet vähentävät samalla näkyvän valon läpäisyä, joskin ilmiö voidaan minimoida tehokkaasti valitsemalla oikea pinnoitemateriaali. /6, s. 19./

Säteilyn heijastumisen lisäämiseksi lasinpinta voidaan pinnoittaa erittäin ohuella metallikerroksella, joka voi olla esimerkiksi hopeaa, kultaa tai kuparia. Pinnoitteena voidaan käyttää myös puolijohdeoksidikerrosta, joka on usein tinaoksidia tai indiumoksidia. /6, s. 28./ Käytettävällä metalli- tai puolijohdeoksidikerroksella pyritään pienentämään pinnan emissiviteettiä pitkäaaltoisella lämpösäteilyllä, jonka aallonpituus on  $>2500$  nm. Yleensä pinnoite on sijoitettu lasirakenteessa lämmitettävän tilan sisäpuolelle estämään lämpösäteilyn kulkemista pois huonetilasta ja näin lisäten ikkunan lämmöneristävyyttä. Pitkäaaltoinen sähkömagneettinen säteily heijastuu törmätessään pinnoitteena käytettävän metalli- tai puolijohdekerroksen vapaisiin elektrodeihin. /6, s. 27./ Pitkän- ja lyhyen lämpösäteilyn etenemisen estävä, niin sanottu kaksoisselektiivilasi, on pinnoitettu useilla eri ominaisuuksia omaavilla pinnoitekerroksilla /37, s. 49/.

Sähkömagneettista säteilyn etenemistä estävä pinnoitettu lasi absorboi tehokkaasti siihen osuvaa säteilyä. Sähkömagneettisesta säteilystä lämmennyt lasi säteilee itsessään ympäristöönsä lämpöä, joten se on syytä sijoittaa uloimmaksi lasiksi, koska tarkoitus on estää esimerkiksi huonetilaa lämpiämstä liikaa. Tällöin estettäväksi tarkoitettu lämpösäteily ei säteile lämmenneen lasin välityksellä edelleen huonetilaan vaan yllilämpö vapautuu tehokkaammin ulkoilmaan. /37, s.

49./ Pinnoitteeksi valitun materiaalin atomien uloimpien elektronikehien elektronit ovat liikkuvia, jotka estävät säteilyn läpikulkeutumista muodostuneen elektroniverhon läpi./6, s. 27./

Pinnoittamisen lisäksi itse lasin pintaa muotoilemalla voidaan lisätä heijastuvan säteilyn osuutta. Lasin pintaan voidaan syövyttää tai puhalttaa esimerkiksi piioksidilla mikropriisma-alueita osalle lasin projektiopinta-alaa. Mikroprismojen kulmien on tarkoitus olla mahdollisen pienessä kohtaamiskulmassa auringon säteilyyn nähden, jolloin säteilyn heijastuminen olisi mahdollisimman tehokasta prismoissa. /6, s. 40./ Lämpösäteilyn ja näkyvän valon etenemistä voidaan vähentää myös massavärjättyllä lasilla sekä maalauksella. Massavärjätyn lasin lasiraaka-aineeseen on valmistusvaiheessa lisätty metallikiteitä tai metallien oksideja. Lasissa olevat metallikiteet ja metallien oksidit absorboivat osan auringon säteilystä lämmittäen lasia. Lasirakenteessa uloimpana olevan lämmenneen massavärjätyn lasin lämpösäteily säteilee osittain ulkoilmaan ja vain pieni osa säteilee sisätiloihin. Samaa lasin lämpenemisilmiötä voidaan hyödyntää myös maalipinnoitetulla lasilevyllä. Auringonsuojalasituotteiden on yleensä syytä olla karkaistuja tai lämpölujitettuja, jotta ne kestäisivät suurten lämpötilavaihtelujen aikaansaamia jännityksen muutoksia. /6, s. 40./

Ionisoivaa säteilyä estävien lasituotteiden nimenä on usein käytetty säteilynsuojalasi, lyijylasi tai röntgenlasi. Ionisoivaa, lyhytaaltoista säteilyä estetään lisäämällä lasimassaan raskasmetalleja. Eniten käytetään lyijyoksidia (PbD), jota on lasissa yleensä 65 % tai enemmän. Muita säteilynsuojauksessa käytettyjä raskasmetalleja ovat mm. ceriumoksidi ja bariumoksidi, joiden optiset ominaisuudet ovat paremmat kuin lyijyoksidin. Lasilevyn sisältämän lyijyn lyijyvastaavuus ilmoitetaan millimetreissä tai prosentteina lasin paksuudesta. Käytetty raskasmetalli ja sen määrä lasissa riippuu estettävästä säteilystä. /6, s. 68./

## 11 LASIRAKENTEIDEN SUUNNITTELUMÄÄRÄYKSET

Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132 määrittelee Suomessa rakentamiselle asetettavat vaatimukset (117 §), joiden mukaan rakennuksen tulee sen käyttötarkoituksen edellyttämällä tavalla täyttää rakenteiden lujuuden ja vakauden, paloturvallisuuden, hygienian, terveyden ja ympäristön, käyttöturvallisuuden, meluntorjunnan sekä energiatalouden ja lämmöneristyksen perusvaatimukset (*olennaiset tekniset vaatimukset*). Maankäyttö- ja rakennuslain lisäksi ministeriö antaa Suomen rakennusmääräyskokoelmassa rakentamista koskevia teknisiä ja näitä vastaavia yleisiä määräyksiä ja ohjeita./27/

Suomen rakennusmääräyskokoelman F2 mukaan määrätään: ”Rakennuksen lasirakenteet kuten lasiseinät ja -ovet, ikkunat, valokatteet tai lasikaiteet tulee suunnitella ja toteuttaa siten, että materiaalin ominaisuuksista johtuvat riskit on otettu huomioon. Lasirakenne mitoitetaan ja lasin tyyppi valitaan siten, ettei rikkoutuminen aiheuta henkilön putoamisvaaraa eikä sirpaleiden putoaminen alle jäävän haavoittumisvaaraa.” /16, s. 10./ Lisäksi lasirakenteen pinnan kestävyydelle annetaan määräys: ”Lasipinnan tulee kiinnikkeineen kestää siihen tavanomaisesti kohdistuvat kuormat, jollei pintaa ole varustettu tarkoituksenmukaisella kiinteällä törmäyesteellä.”/16, s. 10./ Suomen rakennusmääräyskokoelman F2 osa sisältää määräysten lisäksi ohjeita hyväksytyistä rakenneratkaisuista.

Suomalaisen mitoituskäytännön mukaisten mitoitusharjojen (Suomen rakennusmääräyskokoelma) lisäksi on Euroopan alueella otettu käyttöön Eurokoodit, jotka korvaavat niihin rinnastettavat rakenteiden kantavuutta koskevat tekniset ohjeet. Eurokoodit käsittävät kantavien rakenteiden suunnittelua koskevat eurooppalaiset standardit. Eurokoodien ja Suomen rakentamismääräyskokoelman määräykset ja ohjeet toimivat rinnan vuoteen 2010 saakka. Rinnakkaiskäytön loputtua eurokoodien kanssa päällekkäiset suunnitteluohjeet poistetaan Suomen rakentamismääräyskokoelmasta. Suomen rakentamismääräyskokoelman ja eurokoodien suunnittelusääntöjä ei saa yhdistellä. Suomessa eurokoodien suunnitteluperusteista ja kuormista vastaa yhdessä ympäristöministeriön kanssa

SFS-standardisointi. SFS-standardisointi julkaisee sekä myy kyseiset standardit. Eurokoodien ideana on eurooppalaisen rakennusteollisuuden kilpailukyvyn parantaminen EU:n alueella. /15/

Rakennuksessa käytettävälle rakenteelle, rakenneosalle tai rakennukseen kiinteästi liittyvälle tarvikkeelle tai tuotteelle on mahdollista saada ympäristöministeriön toimesta tyyppihyväksyntä. Tyyppihyväksyttyä tuotetta voidaan käyttää Suomessa jokaisessa rakennuskohteessa ilman, että joudutaan selvittämään, onko tuote määräysten mukainen. /27/ Euroopan sisämarkkinoiden tehostamiseksi on Euroopan unionin alueella CE-merkintä, jolla tuotteen valmistaja voi osoittaa tuotteensa täyttävän jonkin jäsenvaltion tai jäsenvaltioiden kansallisen teknisen esitelmän vaatimukset. Koska kaikissa EU-maissa ei tuotteille ole asetettu samoja vaatimuksia, ei CE-merkittyä tuotetta voi aina käyttää samaan tarkoitukseen kaikissa jäsenvaltioissa. /26/

## **12 LASIRAKENTEIDEN MITOITUS**

### **12.1 Lasin materiaaliominaisuuksia**

Seuraavalla sivulla olevassa taulukossa on esitetty soodakalkkilasin materiaaliominaisuuksia mitattuna 18 asteen lämpötilassa.

Taulukko 2 Soodakalkkilasin materiaaliominaisuuksia lämpötilassa 18 °C/8, s. 44/

Tiheys	$\rho$	2500	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
Kimmokerroin	E	70 000	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Liukkerroin	G	29 200	$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$
Poissonin vakio	$\nu$	0,20	
Pituuden lämpölaajenemiskerroin	$\alpha$	$9 \cdot 10^{-6}$	$\frac{1}{\text{K}}$

## 12.2 Lasirakenteiden mitoitusohjeet

Suomen Rakennusinsinöörien liiton julkaisussa RIL-198-2001 esitellään EN-standardiluonnoksen prEN 13474 mukainen lasirakenteiden mitoitusmenetelmä sekä mitoitusmenetelmä, joka perustuu lujuuksien ominaisarvoihin ja lineaariseen laattateoriaan, jossa kuormituksen oletetaan olevan kohtisuoraan lasilevyn pintaa kohden.

### Mitoitus lineaarisella ja epälineaarisella laattateorialla

EN-standardiluonnoksessa prEN 13474 esitetty mitoitus suoritetaan rajatilamenetelmällä. Lasin jännitysarvoina käytetään sitä vastaavaa tilastoitua, kokeellisesti määritettyä lasin lujuuksien jakaumasta arvioitua vaurioitusmistodennäköisyyttä. Mitoitusyhtälöissä käytetään tästä johdettua kerrointa. Vaikka lasin materiaaliominaisuudet ovat riippuvaisia mm. lasin koostumuksesta, kuormitusajasta ja lämpötilasta, voidaan mitoituksessa käyttää taulukon 2 arvoja, koska lasin materiaaliominaisuuksiin vaikuttavat tekijät otetaan huomioon mitoitusyhtälöissä käytettävillä kertoimilla ja osavarmuusluvuilla. /8, s. 43, 44, 47./

Lasilevyn alhaisessa kuormituksessa syntyy levyyn taivutusjännityksiä. Kuormituksen lisääntyessä lasilevyn taipuma ja taivutusjännitys kasvavat sekä lasilevyn vedetylle pinnalle muodostuu lasilevyn pinnan suuntaista vetojännitystä, eli kalvojännitystä. /8, s. 45./ Kalvojännityksessä lasin maksimivetojännitys alkaa siirtyä lasilevyn keskiosasta kohti nurkkia ruudun halkaisijan suuntaisesti epälineaarisuuden kasvaessa. /12, s. 140./ Lineaarilla laattateorialla lasketut jännityksien ja taipumien arvot muodostuvat virheellisiksi lasilevyn keskipinnan venymisen seurauksena, jolloin jännitykset ja taipumat tulevat yliarvioituiksi. /8, s. 45./ Lineaarisen laattateorian laskelmilla suurilla taipumilla saadaan varmuutta mitoitukseen, ehkä liikaakin ja lasipaksuus saattaa tulla tarpeettoman suureksi. Taipuma alkaa muodostua merkitykselliseksi, kun se ylittää puolet lasin paksuudesta /12, s. 140/. Pyrittäessä taloudelliseen ja todenmukaista tilannetta kuvaavaan mitoitukseen, on huomioitava suurista taipumista aiheutuva levyn geometrinen epälineaarisuus. Geometrisen epälineaarisuuden huomioiminen käsinlaskumenetelmin lineaarisella laattateorialla (epälineaarinen kimmoteoria), joka huomioi suuren taipuman, on erityisen työlästä, joten laskenta tehdään yleensä tietokoneella esimerkiksi differenssi- tai elementtimenetelmällä. /12, s. 140./

Lasirakenteiden tuet tulisi suunnitella mahdollisimman jäykiksi, eli tukien taipumat tulisi olla mahdollisimman pienet varsinkin, kun lasilevyn taipuma on myös pieni. Tukirakenteiden taipuma saattaa lisätä lasilevyn maksimivetojännitystä huomattavasti taipumattomaan tukirakenteeseen verrattuna. Tilanteessa, jossa lasilevy taipuu paljon, tukien taipuma lisää maksimivetojännitystä lasilevyssä vähemmän. /12, s. 140./ Kalvojännityksiä syntyy lasilevyillä, joiden tuenta sallii jännitysten uudelleen jakautumisen. Näin esimerkiksi kahdelta vastakkaisilta reunoiltaan tuettuun lasilevyyn ei synny epälineaarista kalvojännitystä, vaan lasilevy rikkoutuu vetojännityksen ylittyessä, lasilevyn jännemitan puolivälistä. Mitoitusohjeen mukaisesti kolmelta ja kahdelta sivulta tuetuissa tapauksissa riittää standardiehdotuksen mukaan lineaarinen laattateoria. /8, s. 42, 46./

Lasirakenteen mitoitus voidaan jakaa ainakin kolmeen tarkkuustasoon:

Lasirakenteen osat voidaan mitoittaa yksittäisinä komponentteina, jolloin

rakenteessa käytettävien osien välistä yhteistoimintaa ei tarkastella. Tarkemmassa mitoituksessa lasiranteiden komponentteittain mitoittamisen lisäksi arvioidaan rakenneosien rajapinnoissa syntyviä siirtymiä erillisten laskentamallien mukaan. Periaatteena on mitoittaa tiivisteet ja liitososat kestävästi siirtymät ja jännityserot. Mitoituksessa ei ole kuitenkaan tarkoituksena hyödyntää tiivisteiden ja liitosten välittämää liittovaikutusta. Kolmantena vaihtoehtona lasirakenne voidaan mitoittaa yhtenä kokonaisuutena, huomioiden rakenneosien väliset vuorovaikutukset. Tällöin liitosten jäykkyys- ja kestävyysarvoina käytetään kokeellisesti määriteltyjä arvoja, joissa huomioidaan kuormitusvaihteluiden, ympäristörasitusten ja ajan vaikutukset. Rakenneosien ja niiden välisten liitosten huomioonottamisella voidaan saavuttaa edullisempi ratkaisu pelkkien rakenneosien komponenttien mitoittamiseen verrattuna. /40, s. 51./

### **Lineaariseen laattamalliin perustuva mitoitus (Perinteinen mitoitus)**

Lasilevy voidaan mitoittaa myös prEN 13474 -standardiehdotuksen lisäksi lineaariseen laattamalliin perustuvalla teoriolla. Lasikatteen mitoitus tasaisella kuormituksella on esitetty Rakennusinsinöörien liiton julkaisussa RIL 198-2001, Valoa läpäisevät rakenteet. Lineaarisen laattamallin teoria perustuu Navierin ratkaisuun ja kaksoissarjakehitelmään. /8, s. 58./ Rakennusinsinöörien liiton julkaisussa esitetyssä laskentamallissa laattana oleva lasilevy oletetaan tuetun nivelisesti kaikilta sivuiltaan, jota kuormittaa tasainen kuorma  $q$ . /1, s. 21./ Mitoitus tehdään rajatilamenetelmällä, jossa lasilevyn keskipisteen suurinta vetojännitystä verrataan vetolujuuden ominaisarvoon. Taipuma mitoitetetaan käyttörajatilassa, ja laskettua taipuma-arvoa verrataan sallittuun taipumaan. /8, s. 58./

Rakennusinsinöörien liiton julkaisussa RIL 198-2001, Valoa läpäisevät rakenteet on esitetty vain tasaisesti kuormitetun lasilevyn mitoitus. Lineaaristen laattamallien teoriolla voidaan mitoittaa kuitenkin myös mm. keskeisellä, pistemäisellä kuormituksella rasitettu lasilevy. Viivakuormitettu lasilevy voidaan mitoittaa siirtämällä viivakuorman resultantti laatan keskelle pistekuormaksi ja suorittamalla lasirakenteen mitoitus pistekuormitettuna rakenteena. /6, s. 66./

### 12.3 Lasin taivutuskestävyys

Lasin materiaaliominaisuudet riippuvat paitsi tarkasteltavan lasin koostumuksesta myös materiaaliominaisuuksien mittauksessa käytetyistä menetelmistä ja mittausolosuhteista. Lasilevyjen mitoituksessa keskitytään levyn taivutuskestävyyteen tai paremminkin levyn pinnan tason suuntaiseen vetojännitykseen, sillä lasi kestää puristusta enemmän kuin vetoa. Lasin vetolujuus on riippuvainen lasipinnan eheydestä ja sen kosteuspitoisuudesta, lämpötilasta, kuormitusajasta ja mittasuhteista sekä levyn pinta-alasta. Lasilevyn suurentuessa lisääntyy myös lasin vetolujuutta heikentävien vaarallisimpien pintavirheiden esiintymistodennäköisyys. /13, s. 65./

Koska lasissa oleva kriittinen pintasärö ei välttämättä ole suurimman vetojännityksen kohdalla, on syytä käyttää tehollisen jännityksen käsitettä. Lasilevyyn kohdistuva tehollinen jännitys muutetaan todelliseksi vetojännitysjakautuman keskiarvoksi. On todennäköisempää, että voiman vaikutusalueelle osuu kriittinen pintasärö, kun voiman vaikutusalue on suurempi, kuin että kriittinen pintasärö olisi pienellä alalla suurimman vetojännityksen kohdalla. /12.s133./

Tavallisen float-lasin taivutuksen yhteydessä syntyvä pinnan vetokestävyys riippuu lasilevyn rasitustavasta. Teoriassa lasilevyn keskiosaa rasitettaessa lasin kestävyys on kiinni pinnan mikrohalkeamien vetokestävyydestä ja rasituksen ollessa reuna-alueella, voi reunassa oleva särö tai kolo olla heikoin kohta. Käytännössä kuitenkin lasin murtuminen ei välttämättä tapahdu levyn kohdassa, jossa pinnan vetojännitys on suurimmillaan, vaan vetojännityksen ylitys voi tapahtua esimerkiksi lasilevyn reuna-alueella olevan halkeaman tai särön kasvamisena, jossa jännitys voi olla lasipinnan päävetojännitystä alhaisempi./13, s. 65./



## 12.4 Lasin taivutusvetolujuus

RIL 198-2001:ssä on esitetty EN-standardiluonnoksen prEN 13474 kansallisten standardien mukaiset lasin lujuuden veto- ja taivutuslujuuden arvot. Standardin mukaan tavallisen float-lasin taivutusvetolujuuden ominaisarvoksi ( $f_{g,k}$ ) esitetään

$$45 \frac{N}{mm^2},$$

joka on määritelty Weibullin todennäköisyysjakautuman 5 %:n

fraktiiliarvolla.

Lasin taivutuslujuutta voidaan lisätä kemiallisella lujittamisella, lämpökarkaisulla ja lämpölujituksella. Eri lasijalosteiden taivutusvetolujuuksien ominaisarvot prEN 13474-1:1999:n mukaisesti on esitetty taulukossa 3 /12, s. 50/.

Taulukko 3

Lasilaatu	Peruslasin laatu	$f_{g,k} \left( \frac{N}{mm^2} \right)$
Karkaistu lasi ja karkaistu turvalasi	Rakennuslasi (float) tai konelasi	120
	kuviolasi	90
	taustamaalattu float-lasi tai taustamaalattu kuviolasi	75
Lämpölujitettu lasi	Float-lasi tai konelasi	70
	kuviolasi	55
	taustamaalattu float-lasi tai taustamaalattu kuviolasi	45
Kemiallisesti lujitettu lasi	Float-lasi tai konelasi	150
	kuviolasi	150
Karkaistu borosilikaattiturvalasi	borosilikaattilasi	120
Lämpölujitettu borosilikaattilasi	borosilikaattilasi	-

## 12.5 Kuormitusajan vaikutus lasilevyn kestävyteen

Lasilevyn vetomurtolujuus nopeassa kuormituksessa on noin  $30 \dots 100 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$  ja pitkäaikaisessa kuormituksessa noin  $19 \dots 28 \cdot 10^6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$ . Lyhyen- ja pitkäaikaisen murtokuormituksen välinen suhde voidaan laskea karkeasti kaavalla:

$$\frac{f_{\text{lyhyt}}}{f_{\text{pitkä}}} = \left( \frac{t_{\text{pitkä}}}{t_{\text{lyhyt}}} \right)^{\frac{1}{x}}$$

jossa:

- $f_{\text{lyhyt}}$  on lyhytaikainen kuormitus
- $f_{\text{pitkä}}$  on pitkäaikainen kuormitus
- $t_{\text{pitkä}}$  on pitempi kuormitusaika
- $t_{\text{lyhyt}}$  on lyhyempi kuormitusaika
- juuren  $x$  arvo on Pilkingtonin mukaan 16 ja Glaverbelin mukaan 14

Kaavalla laskettuna esimerkiksi tuuli- ja lumikuorman aiheuttaman murtojännityksen suhteeksi tulee noin  $2 \dots 2,5 \left( = \frac{f_{\text{tuuli}}}{f_{\text{lumi}}} \right)$ . Lukuarvon suuruus riippuu kuormitusten oletetuista vaihteluista ja kuormitusajasta./37, s. 38, 39./

Kuormitusajan vaikutusta lasilevyn kestävyteen ovat tutkineet amerikkalaiset R.I.Hershey sekä T.H.Higgins. He tutkivat 60 sekunnin aikana kestäneen kuormitusajan vaikutusta tietyn vahvuisen lasin murtokuormaan. Tilastoiduista tutkimustuloksista on johdettu kaava murtokuorman ja lasivahvuuden välisestä riippuvuudesta:

$$q = 0,5 \cdot t^{1,8} \cdot A^{-1}$$

jossa:

- q on lasilevyn murtokuorma, kPa
- t on lasilevyn vahvuus, mm
- A on lasilevyn pinta-ala, m<sup>2</sup> /6, s. 54/

Eurooppalaisessa luonnosstandardissa (prEN 13474-1\_1999) käytetään lasin suunnittelulujuuden määrittämisessä kerrointa  $k_{mod}$ , jolla huomioidaan lasin lujuuden heikkeneminen kuormitusajan seurauksena. /8, s. 49./

## 12.6 Lasilevyn pinta-alan vaikutus kestävyYTEEN

Koska pinta-alan kasvaessa lisääntyy myös lasissa olevien lasin lujuutta heikentävien säröjen määrä, on tämä ilmiö eurooppalaisessa luonnosstandardissa (prEN 13474-1 1999) huomioitu osavarmuusluvulla:

$$k_A = A^{\frac{1}{\beta}}$$

jossa:

- A on mitoitettavan lasilevyn pinta-ala, m<sup>2</sup>
- $\beta = 25$  on Weibullin todennäköisyysjakauman muotoparametri. /8, s. 49./

## 12.7 Lämmön aiheuttama vetojännitys

Lasilevyn epätasainen lämpeneminen ja sen kautta erisuuruinen lämpölaajeneminen lasin reuna-alueilla ja keskellä ovat usein lasiruudun

rikkoutumisen syynä varsinkin lujittamattomalla lasilla. Suurimmat säröt ja mikrohalkeamat sijaitsevat lasin reunoissa, jolloin niiden vetolujuus on alhaisempi lasilevyn keskialueeseen verrattuna. Lasin reunan hiontakäsittelyllä voidaan reunan vetolujuutta parantaa. Suunnittelustandardeissa ei lasin reunajännityksen huomioimiseksi ole asetettu erityisiä ohjeita. Taloudelliseen ja turvalliseen lopputulokseen pääsemiseksi on suunnittelussa kuitenkin huomioitava lämpöjännityksen aiheuttama rikkoutumisvaara ottamalla huomioon lasin paksuus, reunakäsittelyn ja lasityypin vaikutus lasilevyn kestävyyyteen./12, s. 142, 143./

Lasiruudun terminen vetojännitys voidaan laskea karkeasti kaavalla:

$$\frac{\delta_T}{\Delta T} = 0.63 \frac{\text{MPa}}{^\circ\text{C}}$$

jossa:

- $\delta_T$  on lämpöjännitys
- $\Delta T$  on lasilevyn reuna-alueen ja keskiosan lämpötilaero /12, s. 143./

Tarkempi arvo lämpölaajentumisen aiheuttamalle pintojen vetojännitykselle reuna-alueilla voidaan laskea kaavalla:

$$\delta = \frac{\alpha E \Delta T}{1 - \nu}$$

jossa:

- $\alpha$  on lämpölaajenemiskerroin
- $E$  on kimmomoduuli
- $\Delta T$  on lasilevyn reuna-alueen ja keskiosan lämpötilaero

-  $\nu$  on Poissonin suhde = 0,25 /4, s. 130/

Float-lasi kestää maksimissaan 40 K lämpötilaeron ja lämpökarkaistu maksimissaan 200 K lämpötilaeron. /33, s. 6./ Lasilevyn lämpöjännityksen suuruuteen vaikuttavat paikallisia lämpötilaeroja aiheuttavat varjostukset lasiruudulle. Jännitystä voivat lisätä myös lasirakenteen yhteydessä olevat lämpösäteilyä lasin pintaan takaisin heijastavat rakenteet, kuten kaihtimet ja verhot. Tällöin esteiden välisessä huonosti tuulettuvassa tilassa ilman lämpötila voi nousta haitallisen korkeaksi. Sisätiloissa lasiruudun pintaan ohjautuva lämmin tai viileä ilmavirtaus, esimerkiksi lämmitys- tai jäähdytyslaitteesta voi myös lisätä jännitystä lasissa haitallisesti. Lämpöjännitys on suurempi massavärjätyillä ja yleensä pinnoitetuilla laseilla, joiden säteilyn absorptio on suurempi kirkkaaseen, pinnoittamattomaan lasiin verrattuna. Myös vaalea pinta lisää lasin lämpöjännitystä: esimerkiksi valkoinen maalipinta lasin vastakkaisella puolella säteilee tehokkaasti säteilyä takaisin lasiin lisäten näin lasin lämpökuormitusta. /12, s. 143./

## 12.8 Laminoidun lasin mitoitus

Lasilevyjen välissä oleva laminointikalvo siirtää lasielementin taipumisen yhteydessä syntyvää leikkausjännitystä lasilevyltä toiselle. Laminointikalvon virumaherkkyydestä riippuu, kuinka tehokkaasti kalvo siirtää leikkausvoimia. Jos laminointikalvon leikkausjäykkyyden suhde kuormitukseen on tarpeeksi suuri, toimii laminoitu lasielementti kuin vastaavan paksuinen lasilevy. Tällöin kalvon viruma on nolla. Laminointikalvon virumiseen vaikuttavat kuormitusaika ja lämpötila./12, s. 131./ Laminointikalvona yleisesti käytetty materiaali on PVB.

Eurooppalaisessa luonnosstandardissa (prEN 13474-1, 13474-2:1999) on laminointikalvon leikkausjäykkyys huomioitu kalvon leikkauskertoimella  $\Gamma$ , jonka suuruuteen vaikuttavat mm. lasin kimmokerroin, laminointikalvon

liukukerroin  $\left( G = \frac{N}{\text{mm}^2} \right)$  ja lasilevyn koko. Laminoitun lasielementin tehollinen kokonaispaksuus ratkaistaan yhtälöillä, joissa laminoitikalvon leikkausjäykkyyttä kuvaava leikkauskerroin on yhtenä parametrina. /8, s. 52./ Koska laminoitikalvon virumiseen vaikuttaa merkittävästi aika, on lyhytaikaisessa kuormituksessa mahdollista käyttää leikkauskertoimella arvoa  $\Gamma = 1$ . Toisin sanoen laminoitikalvo kestää hetkellistä kuormitusta kuten tuulta ilman merkittävää liukumaa. /8.s51./

## 12.9 Eristyslaselementin mitoitus

Eristyslaseielementit ovat yleensä kaksi- tai kolmelasisia. Lasilevyn sivumittojen ollessa pieniä ja välissä olevan ilmvälän ollessa paksu toimivat lasilevyt itsenäisinä rakenneosina. Jos eristyslaseielementin sivumitat ovat suuria ja lasilevyt lähellä toisiaan, jakaantuvat ilmanpaineesta ja lumesta aiheutuvat kuormat elementin muillekin laselle. /1, s. 23./ Eristyslaseielementin lasihin kohdistuvien ulkoisten kuormien lisäksi elementti altistuu suljetun ilmatilan kaasun laajentumisen ja kutistumisen, jolloin eristyslaseielementin lasien välissä, suljetussa tilassa olevan kaasun tilavuuden muutokset aiheuttavat elementin sisäistä kuormitusta. /8, s. 54./

Eristyslaseielementin sisäiseen kuormitukseen vaikuttaa kaasun lämpötila sekä elementin ulkoinen ilmanpaine, joka on riippuvainen maanpinnan korkeustasosta. Suomessa kesän ja talven ääriämpötilojen otaksutaan olevan keskimäärin kesällä  $+70^{\circ}\text{C}$  ja talvella  $-30^{\circ}\text{C}$ . Jos kyseinen ääriämpötila poikkeaa paikallisesti tästä paljon, on syytä käyttää mitoituksessa paikallisten ääriämpötilojen keskiarvoa. /8, s. 38./ EN-standardiluonnoksessa prEN 13474-1 esitetään suljetun lasitilan kaasun yli-/alipaine-eron aiheuttaman kuormituksen laskentakaavat.

Maanpinnan korkeusasemasta riippuva, ulkoisen ilmanpaineen aiheuttaman kuormituksen mitoittaminen eristyslaseielementille voidaan laskea kaavalla:

$$P_H = C_H (H - H_p)$$

jossa:

- $P_H$  on maanpinnan korkeusasemasta riippuva lasielementin suljetun ilmatilan ali- tai ylipaine
- $C_H = 0,012 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$  on lasielementin suljetun ilmatilan paine-eron korkeuskerroin
- $H - H_p$  on korkeusaseman erotus. (Esimerkiksi valmistuspaikan ja asennuspaikan korkeusaseman erotus).

Eristelaselementin suljetussa ilmatilassa vallitseva, ympäristön lämpötilasta ja meteorologisesta paineesta riippuva ali- tai ylipaine voidaan laskea kaavalla:

$$P_C = C_C (T - T_p) - (P - P_p)$$

jossa:

- $C_C$  on sisäisen paine-eron lämpötilakerroin
- $T - T_p$  on elementin valmistushetken lämpötilasta vähennettynä asennuspaikan lämpötila
- $P - P_p$  on valmistushetken meteorologinen ilmanpaineesta vähennetty asennuspaikan meteorologinen ilmanpaine /8, s. 54./

Eristyslaselementtiä kuormittavan kaasun paineen riippuvuus tilavuudesta ja lämpötilasta voidaan ratkaista myös kaasujen yleisellä tilayhtälöllä:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

jossa:

- $p$  on paine  $\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)$
- $V$  on eristyslasielementin suljetun ilmatilan tilavuus ( $\text{m}^3$ )
- $T$  on termodynaaminen lämpötila
- Alaviitteet 1 ja 2 kuvaavat eri olosuhteita /10, s. 107./

Yleisellä tilayhtälöllä saadaan todennäköisesti vain karkea arvio lämpötilan vaikutuksesta kaasun paineeseen, sillä lasilevyjen venyminen paineen vaikutuksesta kasvattaa suljetun ilmatilan tilavuutta, jota yhtälössä ei ole otettu huomioon.

## 12.10 Pystysuoran lasilevyn mitoitus tuulikuormalle

RT-ohjekortissa RT 38-10316, Lasilevyt, paksuuden mitoitus on esitetty Marcuksen laskentakaava kaikilta sivuiltaan tuetun yksittäisen lasilevyn paksuuden mitoittamiseksi. Kaava soveltuu tuulikuormitetun lasilevyn mitoitukseen, joka saa poiketa pystysuorasta linjasta enintään  $10^\circ$  tai ylä- ja alareunan välinen poikkeama vaakasuunnassa saa olla enintään 300mm.

$$t = 10^3 \sqrt{\frac{3}{4} \cdot \frac{p}{\sigma_b} \cdot \left(1 - \frac{5}{6} \cdot \frac{r^2}{1+r^4}\right) \cdot \frac{r(1-\nu r^2)}{1+r^4}}$$

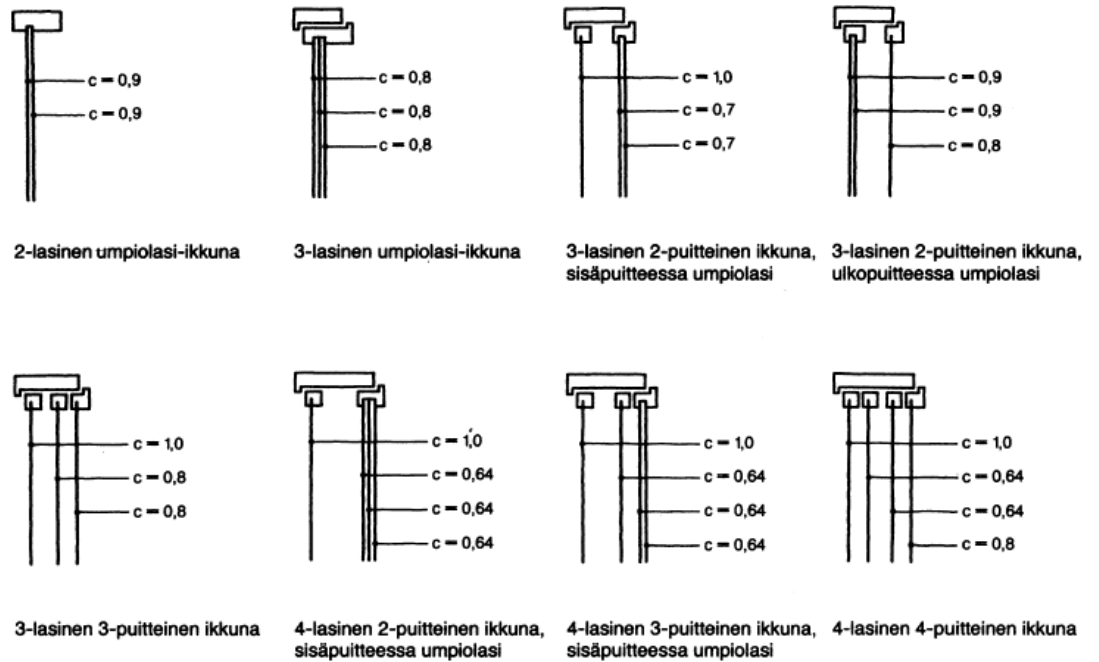


jossa:

- $t$  on lasilevyn paksuus.
- $\sigma_b$  on lasin laskennallinen taivutusjännitys  $\left( = \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$ .
- $p$  on lasilevyn kokonaistuulikuorma = tuulenpaine  $q$  kerrottuna lasilevyn pinta-alalla (= kN).
- $q$  on tuulenpaine  $\left( = \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \right)$ .
- $r$  on lasilevyjen sivujen suhdeluku  $\left( = \frac{b}{a} \right)$ , jossa  $b$  on lyhyemmän sivun mitta ja  $a$  on pitemmän sivun mitta (m).
- $\nu$  on Poissonin suhde. /6, s. 64./

### **Useampilasisen lasirakenteen mitoitus tuulikuormalle**

RT-ohjekortissa RT 38-10316 Lasilevyt, paksuuden mitoitus, esitetään redusointikerroin  $c$ , jota käyttämällä voidaan määrittellä useampilasisten lasirakenteiden lasilevyjen paksuudet. Kertoimella huomioidaan tuulikuorman jakautuminen lasirakenteen eri laseille. Kertoimella kerrotaan Marcuksen laskentakaavalla laskettu yksittäisen lasin mitoituspaksuus. Kuvassa 11 esitetään kertoimet eri lasirakenteille. On huomattava, ettei yllä mainittu lasilevyn paksuuden laskentakaava huomioi eristyslaselementin suljetun välitilan kaasun tilavuudenmuutoksista aiheutuvia kuormituksia./33/



Kuva 11 /33/

## 12.11 Lasilevyn värähtely

Tuulella ilman virtaus synnyttää rakenteiden ympäristöön turbulensseja, jotka voivat aiheuttaa lasilevyn haitallista värähtelyä. Eurocode 1:n osassa 2-4 (SFS-ENV 1991-2-4, 1995) todetaan, että lasilevyn värähtelytaajuuden ollessa viisi (5) Hertsiä tai enemmän, voidaan lasilevy mitoittaa tuulesta aiheutuvana painekuormana. Lasilevyn resonoidessa matalammalla taajuudella tulee tarkistaa dynaamisen voiman aiheuttama kuormitus. /3, s. 114./ Saksalaisessa DIN 1055 normissa on myös annettu värähtelytaajuuden raja-arvoksi viisi (5) hertsiä. Normissa ilmoitettu viiden (5) hertsin raja-arvo on saatu simulointien tuloksista. Simulaatioissa on tutkittu julkisivujen tuulirasitusta kaupunkiympäristössä, jossa rakennusten ulkopinnoille aiheutuu herkästi turbulenssia. Turbulenssin lasiruuduille aiheuttamaa resonanssivärähtelyä on jäljitelty ANSYS © elementtimenetelmäohjelmalla. Simuloinnissa on tutkittu pinta-aloiltaan ja poikkileikkaukseltaan erikokoisien ja erilaisilla kiinnityksillä olevien lasiruutujen kuormituskestävyyttä. /41, s. 27./

Lasirakenteen värähtelyn tarkistelussa on huomioitava lasilevyn värähtelyn lisäksi lasirakenteeseen liittyvien rakenneosien, kuten sauvarakenteiden värähtelytaipumus. Teknillisen korkeakoulun julkaisussa *Kaksoisjulkisivun suunnitteluohjeet* (2003) esitetään mitoitus ehdot lasirakenteiden värähtelylle.

### **Runkorakenteen värähtelyn mitoitus ehdot**

Lasirakenteeseen liittyvän, vapaasti tuetun palkin ominaistajuuden minimiehto:

$$f_0 = 1,57 \cdot \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \geq 5,0 \text{ Hz}$$

Lasirakenteeseen liittyvän ulokepalkin ominaistajuuden minimiehto:

$$f_0 = 0,560 \cdot \sqrt{\frac{EI}{mL^4}} \geq 5,0 \text{ Hz}$$

joissa:

- E on kimmomoduuli
- I on jäyhyysmomentti tarkasteltavassa suunnassa
- m on rakenteen värähtelevä massa palkin pituusyksikköä kohti
- L on palkin jänneväli. /12, s. 114/

### **Lasilevyn värähtelyn mitoitus ehdot**

Neliön muotoisen, neljältä sivultaan tuetun lasilevyn ominaistajuuden minimiehto:

$$f_0 = \left( 4,90 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \frac{t}{a^2} \geq 5,0 \text{ Hz}$$

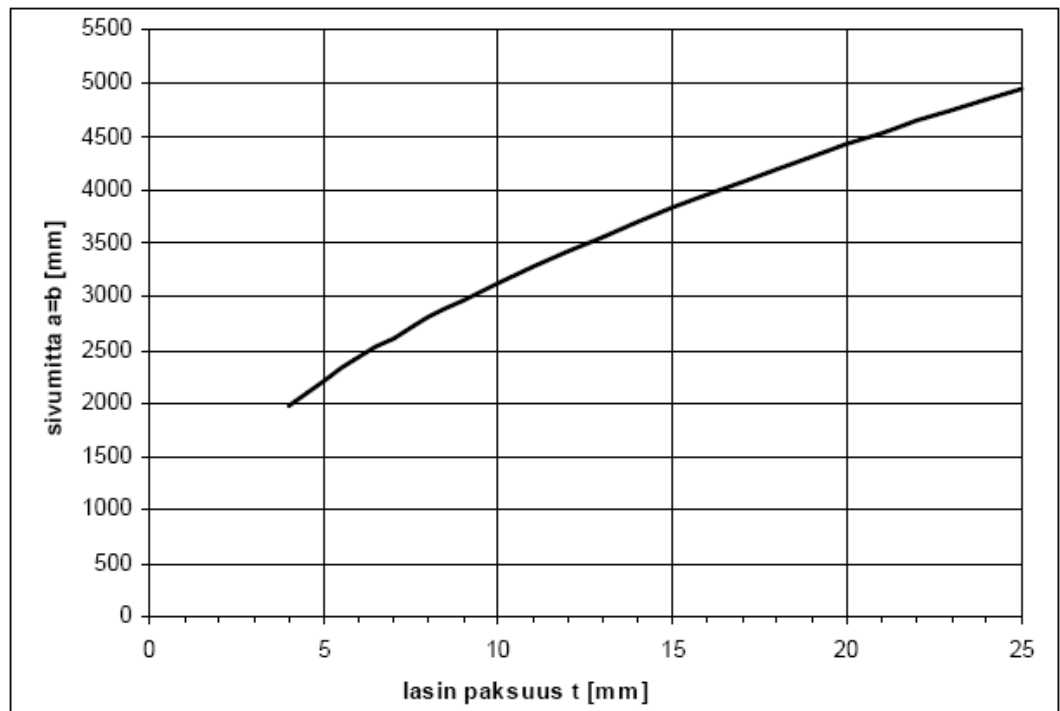
jossa:

$t$  = lasin paksuus ja  $a$  = lasin sivumitta, kun mitoitettavan lasin

materiaaliarvot ovat SFS-EN 572-1 mukaisia:  $E = 70000 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$ ,

$\nu = 0,2$  ja  $\rho = 2500 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ .

Kuvassa 12 ominaistajuuden minimiehto neliön muotoiselle, neljältä sivultaan tuetulle lasilevyllä on esitetty graafisesti sivumitan ja lasin paksuuden funktiona.



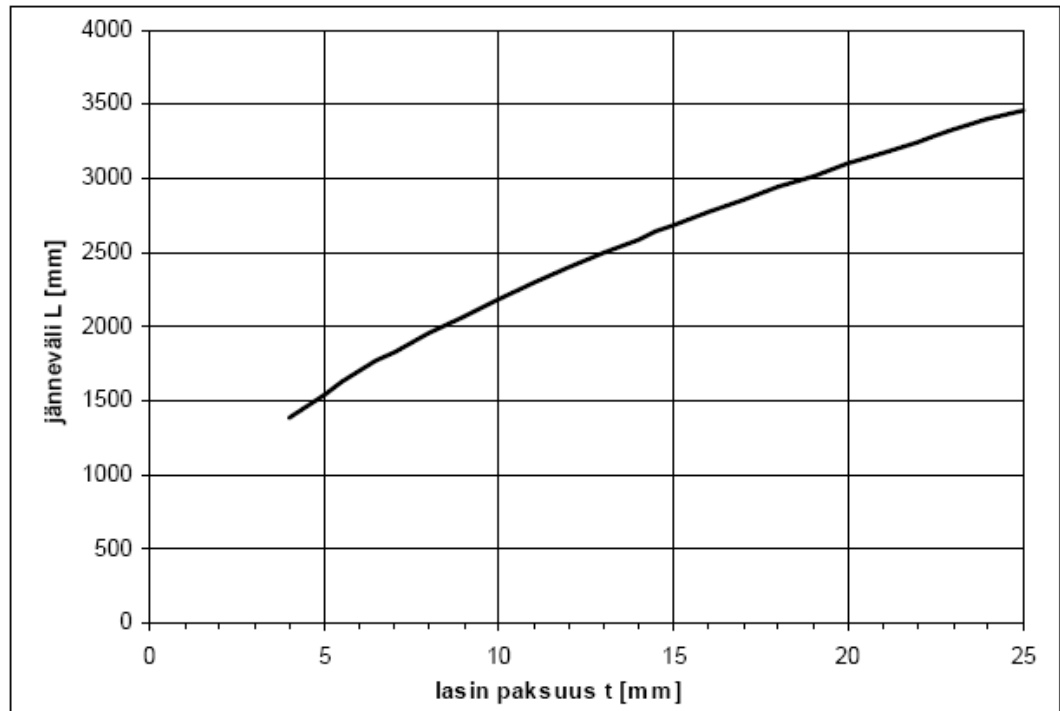
Kuva 12 Maksimisivumitta lasin paksuuden funktiona värähtelyehdon  $f_0 \geq 5$  Hz perusteella neljältä sivulta tuetuille neliön muotoisille lasiruuduille. /12, s. 115./

Suorakaiteen muotoisen, kahdelta sivultaan, vapaasti tuetun lasilevyn ominaistajuuden minimiehto:

$$f_0 = \left( 2,40 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \frac{t}{L^2} \geq 5,0 \text{ Hz}$$

jossa L on jänneväli ja t on lasin paksuus

Suorakaiteen muotoisen, kahdelta sivultaan, vapaasti tuetun lasilevyn ominaistajuuden minimiehto on esitetty graafisesti kuvassa 13.



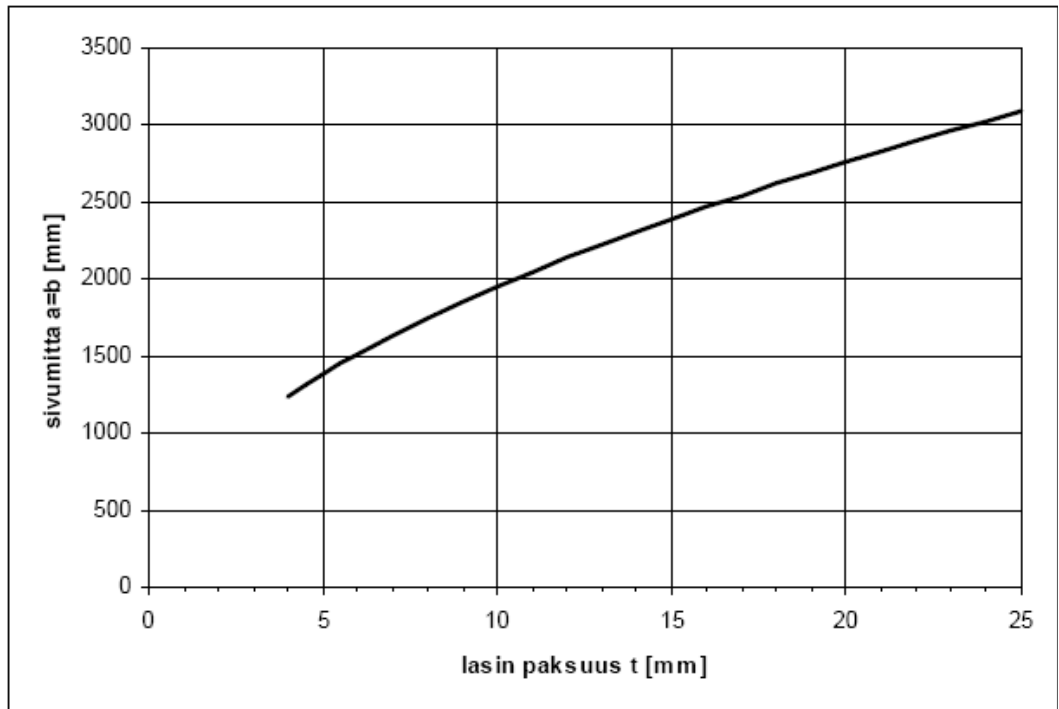
Kuva 13 Maksimijänneväli lasin paksuuden funktiona värähtelyehdon  $f_0 \geq 5$  Hz perusteella kahdelta sivulta tuetuille lasiruuduille. /12, s. 116./

Pistemäisesti neljästä nurkastaan tuetun, neliön mallisen lasiruudun ominaistajuuden minimiehto:

$$f_0 = \left( 1,90 \cdot 10^3 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) \cdot \frac{t}{a^2} \geq 5,0 \text{ Hz}$$

jossa a on lasiruudun sivumitta ja t on lasin paksuus

Pistemäisesti neljästä nurkastaan tuetun, neliön mallisen lasiruudun ominaistaajuuden minimiehto on esitetty graafisesti kuvassa 14.



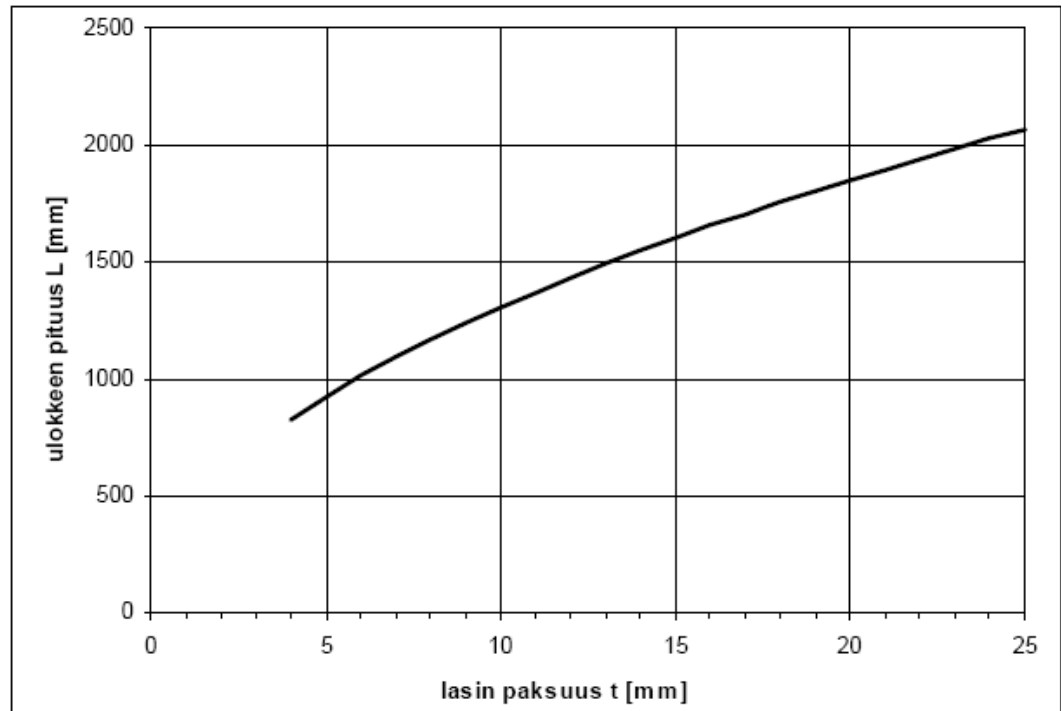
Kuva 14 Maksimisivumitta lasin paksuuden funktiona värähtelyehdon  $f_0 \geq 5$  Hz perusteella nurkistaan pistemäisesti tuetuille neliön muotoisille lasiruuduille./12, s. 116./

Ulokkeellisen lasiruudun ominaistaajuuden minimiehto:

$$f_0 = \left(850 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot \frac{t}{L^2} \geq 5,0 \text{ Hz}$$

jossa L on lasiruudun ulokkeen maksimipituus ja t on lasin paksuus

Kuvassa 15 ominaistaajuuden minimiehto on esitetty graafisesti ulokkeen pituuden ja lasin paksuuden funktiona.



Kuva 15 Maksimijänneväli lasin paksuuden funktiona värähtelyehdon  $f_0 \geq 5$  Hz perusteella ulokkeellisille lasiruuduille. /12, s. 117./

## LÄHTEET

### Painetut lähteet

- 1 Hassinen, Paavo., Mantere, Leevi., Saarimaa, Juho., Hemmilä, Kari. & Rautiainen, Liisa. Valoaläpäisevien rakenteiden arviointi. Menetelmiä ja koetuloksia. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo 1992.
- 2 Hemmilä, Kari, Suomalaisten ikkunoiden kestävyys. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. Espoo 2005. 59 s.
- 3 Le Bourhis, Eric, Glass. Mechanics and Technology. Wiley-VCH Verlag GmbH&Co.KGaA. Weinheim 2008. 366 s.
- 4 Martin, John, Materials for Engineering. Second edition. Maney Publishing for The Institute of Materials. London 2002. 244 s.
- 5 Perustieto sanakirja. Toim. Ahola Veikko, Kuhlman Irmeli, Luotio Jorma. Gummerus. Jyväskylä 1996. 1324 s.
- 6 Rainamo, Matti., Riikonen, Mauri., Lasirakentajan Käsikirja. Enterpress Oy. Tampere 1999. 152 s.
- 7 Rakentajan kalenteri 2002. 86.vuosikerta. Rakennustieto Oy. Helsinki 2001.1088s.
- 8 RIL 198-2001 Valoaläpäisevät rakenteet. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL r.y. Helsinki 2001. 206 s.
- 9 Seppänen, Raimo., Tiihonen, Seppo., Wuolijoki, Hilikka., Kervinen, Martti., Smolander, Juhani., Haavisto, Anja., Karkela, Lea. & Varho, Kiuru., Maol-  
taulukot. Otava. Keuruu 2003. 159s.



- 10 Tekniikan kaavasto. Tammertekniikka. Jyväskylä 2002. 192s.
- 11 Uhlmann, D. R., Kreidl, N. J., Glass: science and technology. Volyme 5. Elasticity and strength in glasses. Academic press, INC. New York 1980. 282 s.

### Sähköiset lähteet

- 12 Alinikula, T., Bergman, J., Hänninen, J., Lintula, K., Mäkeläinen, P., Palmi, P., Tenhunen, O., Viljanen, M., Vuolio, A., Kaksoisjulkisivun suunnitteluohjeet. [pdf-sivu]. Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion julkaisuja 26. 2003. [viitattu 29.2.08]  
Saatavana: <http://www.tkk.fi/Yksikot/Rakennus/Teras/TKK-TER-26e.pdf>
- 13 Alinikula, T., Kesti, J., Lehtinen, T., Mäkeläinen, P., Tenhunen, O., Uuttu, S., Viljanen, M., Vuolio, A. Metall-Lasirakenteet Kaksoisjulkisivussa. Esitutkimus. [pdf-sivu]. Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion julkaisuja 21. 2001. [viitattu 29.2.08]  
[http://www.tkk.fi/Units/Civil/Steel/Publications/TKK\\_TER\\_series/TER21-4.pdf](http://www.tkk.fi/Units/Civil/Steel/Publications/TKK_TER_series/TER21-4.pdf)
- 14 Bendheim Wall Systems, Inc. [www-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa: <http://www.bendheimwallsystems.com/wall-glass-coatings.htm>
- 15 Eurokoodit käyttöön vuonna 2007. [pdf-sivu]. ympäristöministeriön viestintäyksikkö. 2006. [viitattu 29.2.08] Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=54079&lan=fi>
- 16 Fränti-Pitkäranta, Marttiina. Ympäristöministeriön asetus rakennuksen käyttöturvallisuudesta. [pdf-sivu]. Ympäristöministeriö. 2001. [viitattu 29.2.08] Saatavissa: <http://www.finlex.fi/data/normit/6376-F2.pdf>

- 17 Glass Block Technology Ltd. [www-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa:  
<http://www.glassblocks.co.uk/old/downloads/History-2pp.pdf>
- 18 Glass Online. [www-sivu]. Artech Publishing S.r.l. [viitattu 29.2.08]  
Saatavissa: <http://www.glassonline.com/infoserv/history.html>
- 19 Glass Online. [www-sivu]. Artech Publishing S.r.l. 2008. [viitattu 1.3.08]  
Saatavissa: <http://www.glassonline.com/infoserv/dictionary/418.html>
- 20 Glass Online. [www-sivu]. Artech Publishing S.r.l. 2008. [viitattu 1.3.08]  
Saatavissa: <http://www.glassonline.com/infoserv/dictionary/610.html>
- 21 Glass Online. [www-sivu]. Artech Publishing S.r.l. 2008. [viitattu 1.3.08]  
Saatavissa: <http://www.glassonline.com/infoserv/dictionary/629.html>
- 22 Haggrén, Georg. [pdf-sivu]. [viitattu 29.2.08] Saatavissa:  
<http://www.pori.fi/smu/ghaggren.pdf>
- 23 Hulkkonen, Sara. Studio Hippoglass Ky. [pdf-sivu]. [viitattu 29.2.08]  
Saatavissa: <http://www.hippoglass.com/htmls/artikkelit/art10.pdf>
- 24 IBP Glass Block. [pdf-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa:  
<http://www.ibpglassblock.com/pdf/install/skylight.pdf>
- 25 Kurki, Pirjo. Ympäristöministeriön asetus rakennusten paloturvallisuudesta.  
[pdf-sivu]. Ympäristöministeriö. 2002. [viitattu 29.2.08] Saatavissa:  
<http://www.finlex.fi/data/normit/10530-37-3762-4.pdf>
- 26 Laki rakennustuotteiden hyväksynnästä 13.3.2003/230  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2003/20030230?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=ce-merkint%C3%A4>

- 27 Maankäyttö- ja rakennuslaki 5.2.1999/132  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1999/19990132#a132-1999>
- 28 Macky, Ian. Glassian. [www-sivu]. 2004. [viitattu 29.2.08] Saatavissa:  
<http://glassian.org/Falconnier/index.html>
- 29 Pilkington Lasifakta 2007. [pdf-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa:  
<http://www.pilkington.com/resources/johdanto.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/lasivalinta.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/lammoneristys.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/auringonsuojaus.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/palonsuojaus1.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/aaneneristys.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/henkiloturvallisuus1.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/esinejahrenkilosuojaus1.pdf> ,  
[http://www.pilkington.com/resources/koristelasit\\_julkisivulasit.pdf](http://www.pilkington.com/resources/koristelasit_julkisivulasit.pdf) ,  
<http://www.pilkington.com/resources/lasitusjarjestelmat1.pdf> ,  
<http://www.pilkington.com/resources/erikoislasit1.pdf> sekä  
[http://www.pilkington.com/resources/perustietoalasista\\_hakemisto.pdf](http://www.pilkington.com/resources/perustietoalasista_hakemisto.pdf)
- 30 Rakennustieto Oy. RT F-37426 / RT/KH 417.3-37426. Rakennustieto. Elokuu 2007. [pdf-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa:  
<http://www.tarviketieto.net/channels/materiaali/pdf/37426.pdf>
- 31 Regal Glass. [www-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa:  
[http://www.regal.com.tr/eng\\_linit.asp](http://www.regal.com.tr/eng_linit.asp)
- 32 Riksantikvarieämbetet. Traditional Building Materials of the Baltic Sea Region. [pdf-sivu]. National Heritage Board, Sweden. 2003. [viitattu 29.2.08] Saatavissa: <http://balticheritage.raa.se/reports/traditional-building.pdf>

- 33 RT-kortisto. [optinen levy.] Kesäkuu 2006 (24). Rakennustietosäätiö RTS. Rakennustieto Oy 2006
- 34 Solaris GmbH. [www-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa: [http://www.solaris-glassblocks.com/en/technik/konstruk\\_8.htm](http://www.solaris-glassblocks.com/en/technik/konstruk_8.htm)
- 35 Solaris GmbH. [www-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa: [http://www.solaris-glassblocks.com/en/technik/konstruk\\_9.htm](http://www.solaris-glassblocks.com/en/technik/konstruk_9.htm)
- 36 Solaris GmbH. [www-sivu]. [viitattu 1.3.08] Saatavissa: [http://www.solaris-glassblocks.com/en/technik/produkt\\_7.htm](http://www.solaris-glassblocks.com/en/technik/produkt_7.htm)
- 37 Tenhunen, Olavi. Metall-Lasirakenteisen kaksoisjulkisivun materiaalien soveltamiskriteerit. [pdf-sivu]. Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion julkaisuja 28. 2003 [viitattu 29.2.08] Saatavissa: <http://lib.tkk.fi/Lic/2003/isbn9512268132/isbn9512268132.pdf>
- 38 The London Crown Glass Company. [www-sivu]. [viitattu 29.2.08] Saatavissa: <http://www.londoncrown-glass.co.uk/Manufacturing.html>
- 39 Toppinen, Teemu . [www-sivu]. [viitattu 29.2.08] Saatavissa: [http://www.oph.fi/kulttuuri\\_ikkuna/esine/lasi/historiaa.html](http://www.oph.fi/kulttuuri_ikkuna/esine/lasi/historiaa.html)
- 40 Vuolio, Aki. Kaksoisjulkisivujärjestelmien rakennetekniikka. [pdf-sivu]. Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion julkaisuja 22. 2001. [viitattu 29.2.08] Saatavissa: [http://www.tkk.fi/Units/Civil/Steel/Publications/TKK\\_TER\\_series/TKK-TER-22.pdf](http://www.tkk.fi/Units/Civil/Steel/Publications/TKK_TER_series/TKK-TER-22.pdf)

- 41 Wörner, J.-D. Probabilistic Dynamics of Wind Excitation on Glass Façade. [pdf-sivu]. Dem Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie der Technischen Universität Darmstadt zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte. 2003. [viitattu 29.2.08]  
Saatavissa: [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968081983&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=968081983.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=968081983&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=968081983.pdf)