

YKSINKERTAISEN LASILEVYN, KAKSIN- JA KOLMINKERTAISEN UMPIOLASIELEMENTIN MITOITTAMINEN TUULEN NOPEUSPAINEELE

Seppo Kauhanen

Rakenteiden Mekaniikka Vol. 14
No. 1 1981 s. 23...43

YHTEENVETO: Artikkelissa käsitellään ikkunalasin paksuuden määrittämistä tuulen nopeuspaineen perusteella. Aluksi käsitellään lasin lujuusominaisuuksia ja tuulikuorman määrittämistä. Artikkelin pääosan muodostaa VTT:n rakennetekniikan laboratoriossa suoritettun laajan lasien painekuormituksen selostus. Kokeisiin perustuen annetaan ohjeet tarvittavan lasin paksuuden määrittämiseksi.

JOHDANTO

Ikkunoissa käytettävien lasilevyjen mitoitusuusitus RT 384.12 oli peräisin vuodelta 1966. Tämän ajankohdan jälkeen kehitys on kulkenut suosituksen ohi, joten se kaipasi tarkistusta. Mitoituksen perusteena olleet tuulikuormat eivät vastanneet nykyisiä määräyksiä ja ns. float-lasi oli tullut markkinoille. Tämän lisäksi kokonaan uusille tuotteille, umpiolaseille ei ollut olemassa minkäänlaista suositusta.

Rakennustietosäätiön kutsumana työryhmä TK 53 sai tehtäväksi laatia mitoitussuosituksen, joka koski neljältä sivulta tuettuja lasilevyjä sekä umpiolasielementtejä. Työryhmä kartoitti tilanteen olemassaolevaan kirjallisuuteen syventyen ja totesi siinä olevien tietojen hajoavan niin paljon, että oli aiheellista tehdä oma kokeellinen tutkimus mitoitussuosituksen pohjaksi.

Tutkimuksen kokeellisessa osassa määrättiin Suomessa käytettäville lasilaaduille taivutusvetolujuus. Tässä yhteydessä haluttiin tutkia onko kone-lasin ja float-lasin lujuuksilla eroa vai voidaanko mitoituksessa käyttää molemmille lasilaaduille samoja lujuusarvoja. Tämän lisäksi koestettiin normaalikokoisia yksinkertaisia lasilevyjä, jotta saataisiin käsitys teoreettisen tarkastelun ja käytännön olosuhteiden yhteensopivuudesta. Umpiolasielementeille laadittiin kokonaan uusi mitoitussuositus ensimmäistä kertaa samojen teoreettisten tarkastelujen pohjalta, kuin yksinkertaisille laseille. Tutkimuksissa pyrittiin selvittämään elementin suuremman kuorman kantokyvyn määrä ja syyt sekä talviolosuhteiden vaikutus elementtiin. Käytännön kokeissa testattiin teoreettisen mallin soveltuvuutta. Tässä kirjoituksessa on esitelty nuo tutkimukset sekä mitoitussuosituksen kokeellinen tausta. Tämän lisäksi kirjoituksessa käsitellään lyhyesti kokeissa käytetyn lasin koostu-

mus ja tuulen nopeuspaineen synnyn perusteet.

LASI RAKENNUSAINEENA

Yleistä

Tässä kirjoituksessa käsitellään pystysuorassa asennossa olevia tasolaseja, joita käytetään rakennuksen ulkoseinissä olevien ikkunoiden ja ikkunoivien lasitukseen.

Tasolasilla tarkoitetaan tässä yhteydessä koneellisesti vedettyä lasia ja float-lasia. Koneellisesti vedettyjen lasien yleiset laatumääräykset on esitetty RT-kortissa numero 384.111 vuodelta 1971.

Lasin koostumus ja valmistusmenetelmä

Lasi on epäorgaaninen sulatustuote, joka on jäähdytetty kiteyttämättä, eli se on amorfinen aine. Raaka-aineena käytetään pääasiassa hiekkaa, soodaa ja kalkkikiveä (dolomiittia). Hiekka toimii lasin muodostajana ja runkona. Sooda toimii sulatteena alentaen sulamis- ja muokkauslämpötilat sopiviksi (n. 1450 °C - 950 °C). Stabilisaattorina toimivan kalkkikiven tehtävänä on antaa lasille haluttu kemiallinen kestävyys. Raaka-aineisiin lisättävillä erilaisilla aineilla voidaan mm edistää sulamista ja antaa lasille erityisiä ominaisuuksia.

Koneellisesti vedetty lasi valmistetaan vetämällä sulasta lasimassasta yhtäjaksoista leveää nauhaa ylöspäin. Vetonopeudesta riippuu tuotetun lasin paksuus. Nauhan leveys on noin kolme metriä. Lasin jäähdyttyä vetolinjan loppupäässä se leikataan määrämittäiseksi. Lasia valmistetaan 2...12 mm nimellispaksuuksina. Valmistustekniikasta johtuen lasi ei ole täysin tasapaksua, vaan siinä esiintyy ns. vetoaaltoisuutta.

Umpiolaseihin käytetään RT-384.111 laatumääräykset täyttävää tasolasia. Umpiolasilla tarkoitetaan yksikköä, joka on koottu kahdesta tai useammasta lasilevystä, joiden välissä on hermeettisesti suljettu ilmatila. Umpiolasista käytetään toisinaan myös nimitystä eristyslasi tai lämpölasia. Umpiolasit jaetaan rakenteensa mukaan kokolasirakenteisiin, lasi-metallirakenteisiin ja kittirakenteisiin umpiolaseihin. Tämän tutkimuksen yhteydessä koestetut umpiolasit olivat kittirakenteisiä umpiolaseja.

Umpiolasia valmistettaessa lasilevyt leikataan aluksi halutun kokoisiksi ja puhdistetaan. Tämän jälkeen lasilevyjen väliin asetetaan alumiini- tai teräslistat, jotka kiinnitetään lasiin kiinnitysmassalla, joka on tavallisesti tioplast- tai buteenikumipohjaista. Lasilevyjen väliin jäänyttä ilmaa ei yleensä vaihdeta, vaan sinne jäänyt kosteus imeytyy kuivatusaineeseen, joka on tavallisesti sijoitettu välilistan sisään. Välilistassa on raot, jotka välitilassa olevalla ilman kosteudella on mahdollisuus imeytyä kuivatusaineeseen. Kittirakenteisten umpiolasien reunoissa voi olla tiivistyslistat.

Umpion paine tasataan vastaamaan normaalia ilmanpainetta. Välilistan yleisin paksuus on 12 mm.

Lasin mekaaniset ominaisuudet

Lasi on amorfinen hauras aine, joka on teoriassa hyvin lujaa. Välittömästi muotoilun jälkeen tapahtuu lasin pinnassa tiettyjä muutoksia, joiden seurauksena käytännöllisesti katsoen kaikkien lasituotteiden lujuus laskee huomattavasti. Halkeama saa alkunsa aina lasin pinnasta ja se syntyy pintakerrokseen kohdistuvien liian voimakkaiden vetojännitysten johdosta. Halkeaman alkukohdassa on yleensä jonkinasteinen pintavaurio, kuten esimerkiksi ilmakupla tai reunassa pieni mikroskooppinen särö. Halkeama etenee yleensä läpi koko lasin liki äänen nopeudella.

Kirjallisuudessa esiintyvät lasin mekaanisten ominaisuuksien arvot vaihtelevat erittäin paljon. Vaihtelujen syinä ovat usein erilaiset koestusmenetelmät, lasin koostumus ja lasin jälkikäsitteilyn erilaisuus. Lähes kaikissa lasille tehtävissä kokeissa koetulokset joudutaan tulkitsemaan tilastollisin menetelmin, koska hauraan aineen hajonnat ovat suuret. Pienen koe-erän edustavuus on huono. Lasilla hajonnat ovat yleisesti 10-30 prosentin kokoluokkaa. Taulukossa 1 on esitelty eräitä kirjallisuudessa esiintyviä arvoja.

Taulukko 1. Lasin mekaanisia ominaisuuksia

Tiheys	2500	kg/m ³
Puristuslujuus	900-1000	MN/m ²
Vetolujuus	30-100	MN/m ²
Taivutusvetolujuus	30-100	MN/m ²
Kimmomoduuli	70-75	GN/m ²
Poisso'n luku	0,22-0,25	

Luvuista huomaa, että lasilla on huomattavasti suurempi puristuslujuus kuin vetolujuus. Konelasin ja float-lasin vetolujuudesta esiintyy kirjallisuudessa erittäin suuria mielipide-eroja. Lähteessä /7/ todetaan, että suoritetuissa kokeissa float-lasin murtumiskuorma oli keskimäärin 50 % konelasin murtumiskuormaa suurempi. PPG:n julkaisemassa käsikirjassa vuodelta 1975 sitävastoin konelasin murtumislujuus on todettu 10 % float-lasin murtumislujuutta suuremmaksi.

Lasin vetolujuus on suuresti riippuvainen kuormitusnopeudesta. Lasi kestää nopeaa kuormitusta (1-10 s) noin kaksi kertaa paremmin kuin pitkäaikaisesta kuormitusta. Nopean kuormituksen (5-30 s) vetolujuudet ovat noin 90 MN/m², minuutin kestävän noin 60 MN/m², puolen tunnin noin 50 MN/m² ja kolmen tunnin noin 30 MN/m² kokoluokkaa. Eri lähteet antavat hyvin erilaisia tuloksia, joiden hyväksikäyttöä vaikeuttavat vielä puutteelliset vertailut

ja tiedot eri lasilaaduista. Kuormitusnopeuden vaikutus lasin lujuusarvoihin on kuitenkin niin huomattava, että sen vaikutus on huomioitava ikkunalaasin mitoituksessa. Tuulen aiheuttama kuormitus on mitä suurimmassa määrin nopea kuormitus.

Taivutusvetolujuuden määrittäminen

Koska kirjallisuudesta ei ole voitu yksiselitteisesti määrittää Suomessa käytettävien lasilaatujen taivutusvetolujuutta, niin se päätettiin määrittää kokeellisesti DIN 52303 /8/ mukaan. Mittaukset suoritti VTT:n Rakennetekniikan laboratorio em. normin mukaisesti. Mittaukset tehtiin 200 koekappaleesta, joista puolet oli Lahden Lasitehdas Oy:n toimittamia konelaseja ja toinen puoli Metsäliiton teollisuus OY:n toimittamia float-laseja. Puolet kummastakin erästä oli 3 mm:n nimellispaksuista ja toinen puoli 4 mm:n nimellispaksuista. Näytteiden pituus oli 1100 mm ja leveys 360 mm.

Kustakin koekappaleesta mitattiin leveys kolmesta kohtaa, paksuus viidestä kohtaa ja lisäksi näytteet kuormitettiin murtumiseen asti.

Float-lasin ja konelasin taivutusvetolujuudet ja mitatut paksuudet on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Float-lasin ja konelasin paksuus ja taivutusvetolujuus

nimellis- paksuus	Float-lasi		Konelasi	
	mitattu paksuus	taivutusveto- lujuus	mitattu paksuus	taivutusveto- lujuus
mm	mm	MN/m ²	mm	MN/m ²
3	KA 3.0	54	KA 3.0	49
	max 3.0	68	max 3.1	59
	min 2.9	43	min 2.8	40
4	KA 4.0	50	KA 3.8	44
	max 4.0	65	max 4.0	58
	min 3.9	36	min 3.7	33
tiheys	2500 kg/m ³			

VTT:n suorittamien kone- ja float-lasien taivutusvetokokeiden tilastollinen tarkastelu antaa taivutusvetolujuuden arvoiksi eri todennäköisyyksillä taulukon 3 mukaisia arvoja.

Taulukko 3. Lasin taivutuslujuuden arvot eri todennäköisyyksillä

	konelasi		float-lasi		
	3 mm	4 mm	3 mm	4 mm	
99.2 %	36.7	29.5	38.8	33.4	MN/m ²
99.5 %	35.8	28.4	37.6	32.1	MN/m ²
99.9 %	32.9	25.0	33.9	28.2	MN/m ²

Lasin mitoituksessa hyväksytään kansainvälisesti yleensä 99.2 %:n varmuustaso.

Kun tarkastellaan konelasin ja float-lasin murtumiskuormia, huomataan, että 3 mm:n float-lasin lujuus on 12.5 % ja 4 mm:n float-lasin 29.6 % suurempi kuin konelasin lujuus. Eron tilastollista merkitystä tutkittiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä ja todettiin tilastollisesti merkitsevä ero 3:n ja 4:n mm lasin paksuuksien välillä. Erosta huolimatta katsottiin asialliseksi sopia molempien lasilaatujen taivutusvetolujuuden arvoksi 30 MN/m².

IKKUNAAN VAIKUTTAVAT KUORMAT

Tuulikuorma

Tärkein ikkunaan vaikuttava kuorma on tuulen aiheuttama paine. Tuulen nopeuspaineen muodostumiseen vaikuttavat monet tekijät. Tuulen saavat aikaan ilmakehässä vallitsevat paine-erot, jotka taas aiheutuvat ilman epätaasaisesta lämpiämisestä. Tuuli ei ole koskaan täysin laminaarista eli suoraviivaista virtausta. Sille on tyypillistä puuskaisuus, virtausnopeuden jatkuva muuttuminen. Tässä aaltomaisessa liikkeessä muuttuvat sekä amplitudi että frekvenssi varsin sattumanvaraisesti, ja mitä suurempia muutokset ovat, sitä voimakkaampia puuskat ovat.

Kun tietty rakenne tai rakennusosa halutaan mitoittaa tuulikuormille, on tunnettava se korkein tuulenpaine, joka todennäköisesti tulee kohdistumaan ko. rakenteeseen tämän käyttöaikana.

Rakenteen käyttöaikana siihen kohdistuva suurin tuulikuorma on määrättävä käyttäen apuna aikaisemmin suoritettuja tuulimittauksia. Koska toistaiseksi ei ole olemassa suoranaisia painemittauksia, niin on turvauduttava nopeushavaintoihin ja näiden avulla laskettava syntyvä paine. Rakenteen todennäköinen tuulikuorma voidaan ennustaa nopeushavainnoista, joiden mittausaika on 10 tai 60 minuuttia ja nopeuskeroimien avulla lasketuista puuskanopeuksista tilastomatematiikan avulla. Luonnonilmiöiden yhteydessä esiintyviä ääriarvoja tutkittaessa käytetään usein apuna ns. ekstreemien arvojen tilastotiedettä. Tässä yhteydessä käytetään Gumbelin jakaumaa, jonka avulla lasketaan maksimituulenopeuksista se nopeus, joka saavutetaan tai ylitetään keskimää-

rin kerran tietyn ennustusjakson aikana. Rakennuksen tuulikuormia määrätessä toistumisaikana pidetään 50 vuotta, eli tuuli ylittää todennäköisesti kerran 50 vuodessa määräyksissä käytetyn arvon.

Nopeuspaine lasketaan tavallisesti kaavasta $q = v^2/0.15$ (kN/m²). Kaavaan on päädytty nopeuspaineen yleisestä kaavasta $q = 1/2 \rho v^2$ käyttämällä ilman tiheytenä +15 °C lämpötilassa ja normaalissa ilmanpaineessa mitattua arvoa. Kaavoissa käytetään nopeuden v yksikkönä m/s. Kun huomioidaan edellä kuvailut tilastolliset tarkastelut ja tuulen vertikaalijakauma, on Suomen rakentamismääräyskokoelmassa päädytty seuraavaan tuulenpainejakamaan, jonka avulla rakennukset ja rakenneosat mitoitetaan tuulikuormalle, ellei luotettavin selvityksin muuta osoiteta.

$$q = 0.66 \left(\frac{h}{10}\right)^{1/5} \quad (1)$$

missä q = tuulen nopeuspaine (kN/m²)

h = mitoitettavan kohdan korkeus maanpinnasta (m)

kuitenkin vähintään 3 m

Ulkosaaristossa ja tuulisuudeltaan niihin verrattavissa olevilla merenranta- paikoilla on käytettävä vähintään 25 % suurempia nopeuspaineen arvoja. Vuonna 1978 annetulla määräyksellä nopeuspaineen arvoja saaristo-olosuhteissa korotettiin 40 prosenttiin perustuulikuormasta. Määräyksessä käsketään huomioimaan rakennusosia mitoitettaessa myös sisäpuoliset paine- ja imuvaikutukset. Rt-ohjekortin nomogrammia laadittaessa on kuitenkin pitäydytty ainoastaan kaavan mukaisessa nopeuspaineessa. Tähän on päädytty pelkästään nomogrammin käyttöystävällisyyden vuoksi. Nomogrammin tuulikuormat kaksinkertaisille ja kolminkertaisille umpiolasielementeille ovat redusoituja tuulikuormia ja niiden määräytymisperusteet on esitetty myöhemmin. /3, 4/

Muut mekaaniset kuormitukset on jätetty tämän tarkastelun ulkopuolelle.

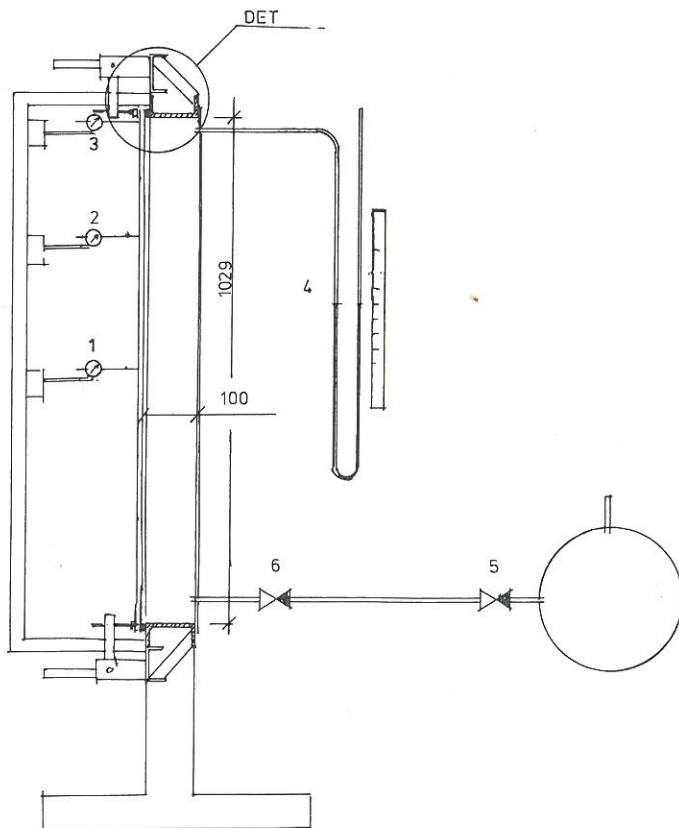
Lämpötilan vaihteluiden aiheuttamat rasitukset

Rakennukseen kiinnitetty ikkuna joutuu hyvin suurien lämpötilavaihtelujen alaiseksi. Sisälämpötila pysyy vuodet ympäriinsä keskimäärin +20 °C lämpötilassa, mutta ulkolämpötila vaihtelee -40 ja +30 asteen välillä. Lasilevy taipuisana laattana kestää hyvin tämänkaltaiset hitaat säästä johtuvat kohtisuoraan tasoa vastaan tapahtuvat liikkeet. Lasin lämpöliikkeitä ei ole käsitelty tässä kirjoituksessa.

Umpiolasielementeissä aiheutuu sitävastoin lämpötilan muutoksista kuormitus, joka on otettava huomioon. Kuormitus muodostuu, kun hermeettisesti suljetussa umpiossa ilman lämpötila muuttuu. Umpio on suljettu tehtaalla keskimäärin normaalissa ilmanpaineessa +20 °C lämpötilassa. Talviolosuhteissa umpion ilma jäähtyy ja saa aikaan alipaineen umpioon. Alipaine on lisäkuorma tuulikuormalle ja se vaikuttaa eniten tuulenpuoleiselle lasille. Kesäolosuhteissa umpioon muodostuu ylipaine ja se on lisäkuormana suojan puoleiselle lasille.

KOELAITTEISTO

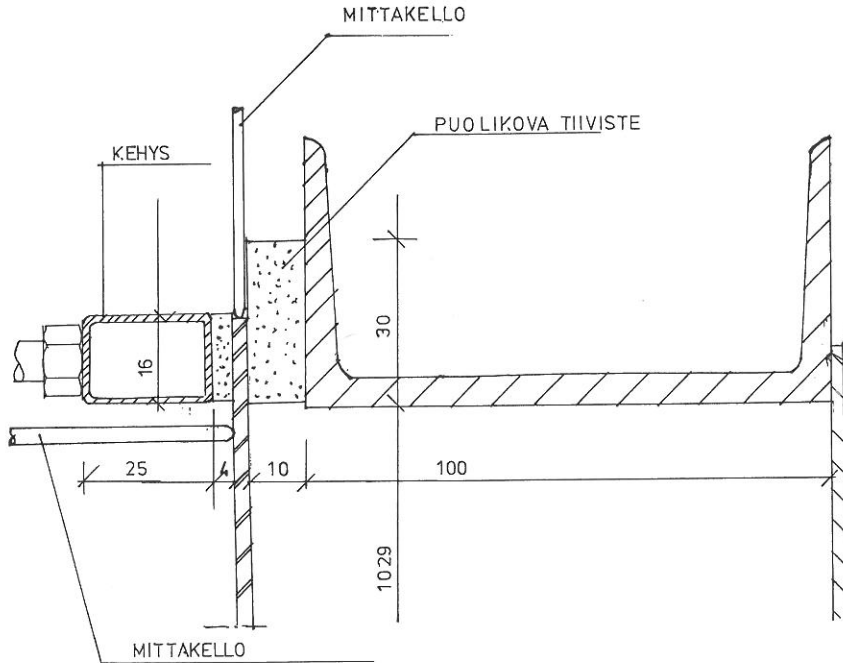
Kokeita varten kehitettiin kuvien 1 ja 2 mukainen laitteisto. Lasit kuormitettiin murtumiseen asti paineilman avulla. Koestettava elementti kiinnitettiin pystysuoraan asentoon laatikon etuseinäksi kehikon avulla. Koekappaleen käyttäytymistä tarkkailtiin mittakellojen avulla ja paineen kehittymistä seurattiin vesimanometrilla. Kuormitusnopeutta tarkkailtiin ainoastaan mittaamalla koestukseen käytetty aika. Mittareiden lukemien rekisteröinti tapahtui osittain kameralla ja osittain manuaalisesti. Kameran käyttö rekisteröintilaitteena osottautui käyttökustannuksiltaan halvaksi ja riittävän tarkaksi, mutta epävarmaksi menetelmäksi. Filmin kehityksen yhteydessä tuhoutui 2/3 mittausaineistosta. Tuhoutuneet tulokset olisivat täydentäneet keskipisteen taipumisesta saatavaa tietoa, etenkin kolminkertaisten umpiolasien osalta.



Kuva 1. Koestuslaatikko

1. Mittakello keskipisteessä
2. Mittakello neljännespisteessä
3. Mittakello tuella
4. Vesimanometri
5. Venttiili
6. Säädettävä venttiili

DET



Kuva 2. Koestuslaatikon reunarakenne

KOKEIDEN SUORITUS

Yksinkertaiset lasit mitattiin ja tarkastettiin ennen koestuksen alkua. Tarkastuksessa keskityttiin etsimään sellaisia vikoja, joilla saattaisi olla vaikutusta lasin kuormituskestävyyteen. Lasin taipumaa mitattiin lähinnä keskipisteestä. Neljännespisteessä olevalla mittarilla tarkkailtiin taipumakuvion muotoa. Muut mittarit olivat apumittareita, joilla eliminoitiin tukien siirtymät. Painetta lisättiin koestuslaatikkoon vakionopeudella kunnes lasi murtui. Mittareiden lukemat rekisteröitiin vesipatsaan noustua manometrissä 20 mm edellisestä rekisteröinnistä. Kokeen kesto mitattiin, jotta voitaisiin määrittää kuormitusnopeus. Murtumisen jälkeen mitattiin kuudetta satunnaisesti valitusta sirpaleesta lasin paksuus.

Kaksin- ja kolminkertaisille suorille umpiolasielementeille suoritettiin samat mittaukset ja koestukset kuin yksinkertaisille lasille. Ennen koestusta umpioiden paineiden annettiin tasaantua vastaamaan ulkoilman painetta. Murtumistapahtumassa seurattiin elementin lasien rikkoontumisjärjestystä.

Kaksin- ja kolminkertaisille alkuaan taipuneille umpiolasielementeille suoritettiin jälleen samat tarkastukset, merkinnät ja mittaukset kuin edelli-

sille koekappaleille. Tämän lisäksi elementin ulommaisiin lasihin aiheutettiin neljän millimetrin taipuma sisäänpäin mitattuna ruudun keskeltä. Tällä toimenpiteellä simuloitiin kylmyyden aiheuttamaa umpion paineen laskua talviolosuhteissa. Kolminkertaisen elementin reunalistaan tehtiin kumpaankin umpioon johtava reikä ja paineen annettiin tasaantua vastaamaan ulkoilman painetta. Seuraavaksi umpiot yhdistettiin toisiinsa letkulla ja ilmaa imettiin pois niin paljon, että lasien yhteenlaskettu taipuma oli kahdeksan millimetriä. Letkun tarkoituksena oli tasata paine molemmissa umpioissa samaksi, jotta saataisiin täysin symmetrinen tilanne aikaan. Reikien tukkimisen jälkeen elementti koestettiin kuten edellä.

KOETULOKSET

Yksinkertaiset lasit

Yksinkertaisia laseja koestettiin kaikkiaan 18 kpl. Lasien nimellispaksuus oli 3 mm ja ne olivat kaikki konelasia. Lasin koko oli $1059 \times 1059 \text{ mm}^2$. Yksittäiset mittaustulokset on esitetty lähteessä /9/. Seuraavaan taulukkoon on kerätty tärkeimmät arvot.

Taulukko 4.

	KA	s	C_v	
lasin paksuus	2.84	0.05	0.019	mm
murtumispaine	3.71	0.82	0.220	kN/m^2
kuormitusnopeus	10.98	1.90	0.173	Pa/s

Lasin paksuuden todettiin olevan laatumääräysten sallimissa rajoissa, joten näytteiden katsottiin olevan edustavia.

Murtumispaineiden hajonta on tässä aineistossa suurempi kuin lasin taivutusvetolujuuden määrittämisen yhteydessä todettu hajonta. Eroon vaikuttaa ilmeisesti koekappaleiden reunojen erilainen ennakkokäsittely. Taivutusvetolujuuskokeissa lasien reunat olivat hiottuja, kun taas tässä kokeessa reuna oli leikkaamisen jäljiltä. Murtumispaineen jakaamaa voidaan pitää normaali-jakaantuneena.

Kuormitusnopeus ei pysynyt tässä koejärjestelyssä vakiona eikä kuormitus vastaa tuulenpuuskan kestoa. Suuremman kuormitusnopeuden käyttö olisi vaatinut sähköiset rekisteröintilaitteet. Saadut arvot ovat kuitenkin varmemmalle puolen, koska lasin on yleisesti todettu kestävän paremmin nopeita kuormituksia. Tässä aineistossa ei havaita murtumispaineen riippuvan kuormitusnopeudesta.

Lasin keskipisteen taipumaa seurattiin paineen funktiona. Mittausaineistosta saatiin tulokset neljästä koekappaleesta. Kuvassa 3 on esitetty tai-

pumien arvot paineen funktiona.

Tulokset osoittavat, että lasilevyllä on hauraudestaan huolimatta suuri muodonmuutoskyky. Kun tarkastellaan taipuman kehitystä paineen kasvaessa, niin havaitaan kuinka hyvin käyrät vastaavat toisiaan eri laseilla. Käyräparveen sovitettiin kolmannen asteen regressiokäyrä, jonka selitysasteeksi saatiin 0.994. Regressiokäyrää käytettiin hyväksi laskettaessa kuorman ja kaantumista eri laseille kaksinkertaisissa umpiolasielementeissä.

Kaksinkertaiset suorat umpiolasielementit

Kaksinkertaisista umpiolasielementeistä neljä koestettiin suorina, jotta saataisiin vertailuaineistoa niille elementeille, jotka oli käsitelty simuloimaan talviolosuhteita. Lasien nimellispaksuus oli 3 mm ja ne olivat kaikki konelasia. Elementin koko oli $1059 \times 1059 \text{ mm}^2$ ja alumiinisen välilistan paksuus oli 12 mm.

Lasien mitatut paksuudet ja hajonnat olivat samaa luokkaa kuin yksinkertaisilla laseilla, joten aineistot olivat vertailukelpoisia.

Murtumispaineen keskiarvo oli 6.17 kN/m^2 , joten se oli 1.66-kertainen yksinkertaisten lasien murtumiskuormiin verrattuna. Hajonta oli tässä aineistossa 41.6 %, joten johtopäätösten teko on kyseenalaista. Pienin murtumisarvo alitti 12.9 %:lla suurimman yksinkertaisilla laseilla todetun arvon.

Kuormittamattoman lasin keskipisteen taipumista saatiin tuloksia kolmesta elementistä. Niiden kuvaajat on esitetty kuvassa 4.

Jälleen havaitaan, kuten yksinkertaisten lasien yhteydessä, että kuvaajat pysyvät erittäin hyvin koossa. Käyräparveen sovitettu regressiomalli antaa selitysasteeksi 0.9996.

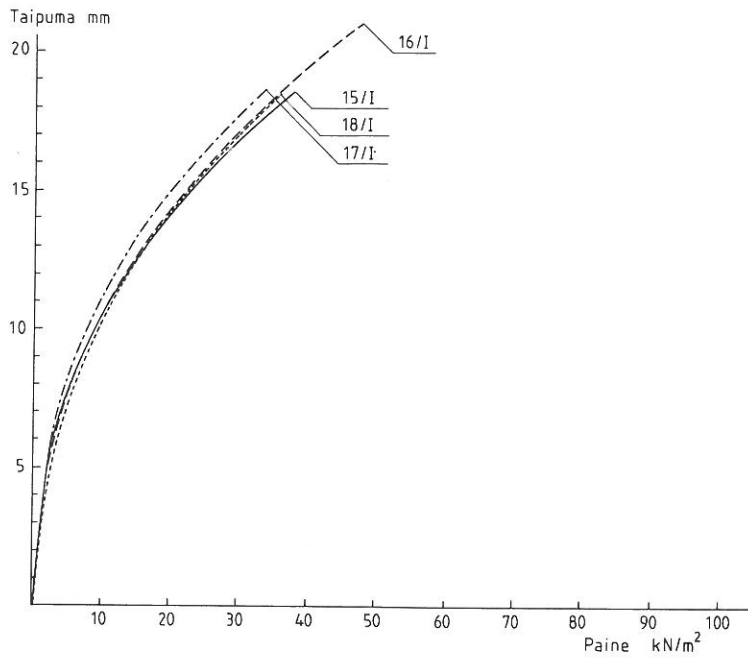
Kaksinkertaiset alkuaan taipuneet umpiolasielementit

Elementtejä koestettiin kaikkiaan 15 kpl, ja ne olivat saman tyyppisiä kuin suorina koestettut elementit. Elementin lasihin oli aiheutettu ennen koestamista keskimäärin 4 mm taipuma sisäänpäin mitattuna lasin keskipisteestä. Tällä toimenpiteellä haluttiin saada koetilanne vastaamaan talviolosuhteita.

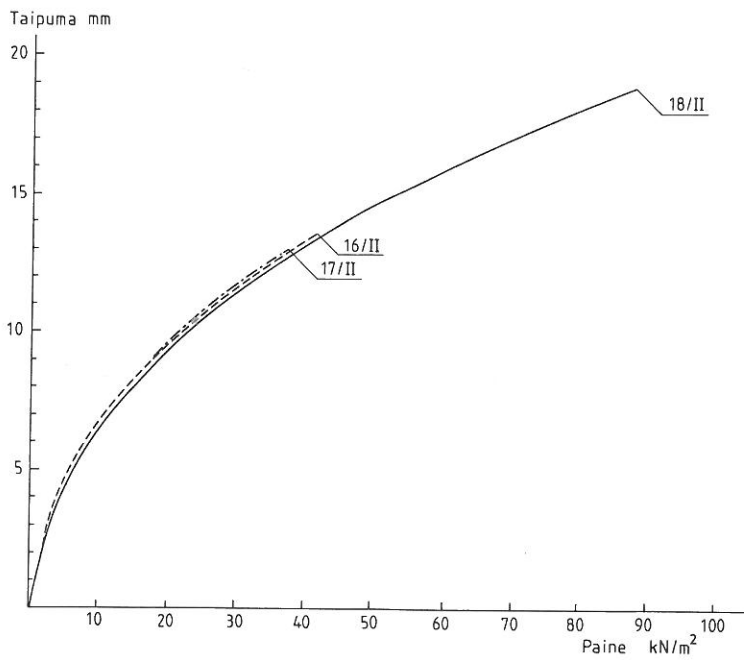
Lasin paksuudessa ei havaittu eroavaisuuksia edellisiin kokeisiin verrattuna.

Murtumispaineen keskiarvo oli 6.75 kN/m^2 ja hajonta 0.97 kN/m^2 eli 14.3 %. Arvo poikkesi 9.3 % suorina koestettuihin elementteihin nähden ja se oli 1.22-kertainen yksinkertaisiin lasilevyihin verrattuna. Alkutaipuman vaikutusta murtumiskuormaan selvitetiin varianssianalyysin avulla. Vertailussa ei havaittu eroa aineistojen välillä.

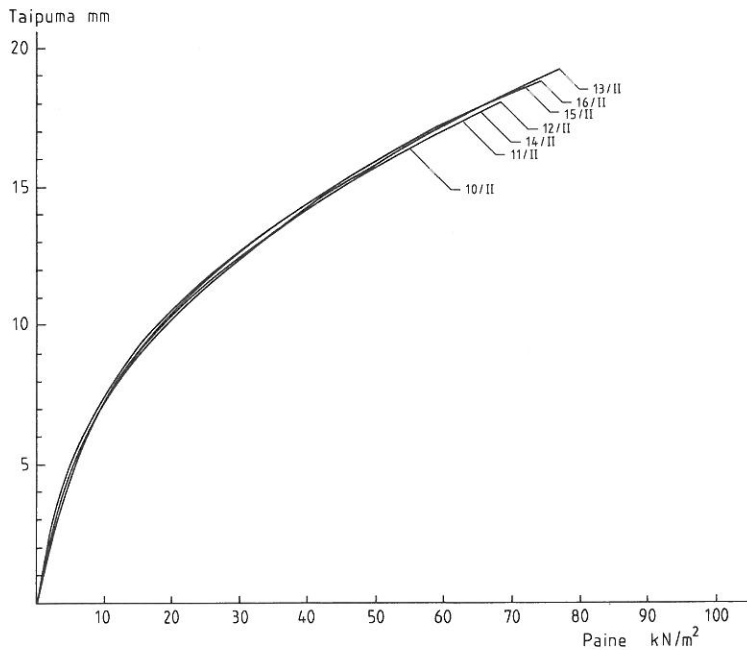
Elementin keskipisteen taipumista saatiin tuloksia seitsemästä kokeesta. Kuvaajat on esitetty kuvassa 5. Regressiomallin selitysasteeksi saatiin 0.9994, joten käyrät pysyvät erittäin hyvin koossa. Kuvaaja poikkeaa huo-



Kuva 3. Keskipisteen taipuma paineen funktiona
Yksinkertaiset lasit



Kuva 4. Keskipisteen taipuma paineen funktiona
Kaksinkertaiset suorat umpiolasielementit



Kuva 5. Keskipisteen taipuma paineen funktiona
Kaksinkertaiset umpiolasielementit, joissa oli alkutaipuma

mattavasti suorien elementtien taipumakuvaajasta. Murtumishetken taipumalla on tilastollisesti erittäin merkittävä ero. Ero on luonnollinen, mutta hämmästyttävä, koska vastaavaa eroa ei ole murtumispaineissa.

Kolminkertaiset suorat umpiolasielementit

Kolminkertaisista umpiolaseista koestettiin jälleen neljä suorina, jotta saataisiin vertailuaineistoa niille elementeille, joihin oli aiheutettu alkutaipuma kuvaamaan talviolosuhteiden vaikutusta. Elementit olivat saman kokoisia kuin kaksinkertaiset elementit. Lasien nimellispaksuudet olivat 3 mm ja välilistojen paksuudet 12 mm.

Lasin paksuudet olivat jälleen konelasin laatuvaatimusten rajoissa ja samaa kokoluokkaa kuin edelläkäsittelystä aineistossa.

Murtumispaineiden keskiarvo oli 9.7 kN/m^2 ja hajonta 242 eli 24.9 %. Arvo on 2.6-kertainen yksinkertaisiin lasihin nähden ja 1.4-kertainen kaksinkertaisiin elementteihin verrattuna. Taipumista ei saatu tietoja.

Kolminkertaiset alkuaan taipuneet umpiolasielementit

Elementtejä koestettiin kaikkiaan 15 kpl. Elementtien ulommaisiin lasihin oli aiheutettu ennen koestamista 4 mm:n taipuma sisäänpäin mitattuna keskipisteestä.

Lasien todettiin olevan paksuudeltaan edellisiä koekappaleita vastaavia. Murtumispaineen keskiarvo oli 11.0 kN/m² ja hajonta 1.30 eli 11.8 %. Yksinkertaisiin lasihin nähden murtumispaine on 2.97-kertainen ja kaksinkertaisiin elementteihin nähden 1.66-kertainen. Kolminkertaisiin suorina koestettuihin elementteihin nähden aineistossa ei ole eroa.

Taipuman kuvaajia kahdesta elementistä. Regressiokäyrän selityksasteeksi saatiin 0.992, joka on hieman huonompi kuin edellisissä kokeissa. Aineiston niukkuuden vuoksi johtopäätösten tekoon ei ryhdytä.

Tutkittujen lasien paksuudet olivat taulukon 5 mukaiset.

Taulukko 5. Lasien paksuuksien keskiarvot

	1-l _s	2-l _s	2-l _t	3-l _s	3-l _t
ulkolasi	-	2.75	2.74	2.72	2.76
keskilasi	-	-	-	2.72	2.77
painelasi	2.79	2.74	2.75	2.75	2.76

Lasien paksuudet tutkituissa koekappaleissa pysyivät lasin paksuudesta annettujen laatumääräysten puitteissa, joten aineiston voidaan todeta edustavan normaalia tuotantoa, eikä näinollen ole havaittu lasien valitsemista koetilannetta varten.

Lasien ja elementtien murtumiskuormien keskiarvoiksi saatiin taulukon 6 arvot.

Taulukko 6. Murtumiskuormien keskiarvot ja suhteet

	1-l	2-l _s	2-l _t	3-l _s	3-l _t	
murtumispain.	3.71	6.17	6.75	9.70	11.02	kN/m ²
murtumis-	1.00	1.66	1.82	2.61	2.97	
paineiden	0.60	1.00	1.09	1.57	1.79	
suhteet	0.55	0.91	1.00	1.44	1.63	-
	0.38	0.64	0.70	1.00	1.14	
	0.34	0.56	0.61	0.88	1.00	

Lasien ja elementtien murtumiskuormat ovat hämmästyttävän suuret kun niitä vertaa esimerkiksi rakentamisessa käytettävien normien määrittämiin vähimmäiskuormiin. Murtumiskuormat ovat yksinkertaisilla lasilla n. 5-6-kertaisia tuulen nopeuspaineeseen verrattuna. Ikkunan heikoin kohta ei ole lasilevy, vaan saranoiden ja helojen kiinnitykset karmiin. Murtumispaineelle voidaan esittää yhtälö 2, joka kertoo murtumispaineen lisäyksen lasien lukumäärän funktiona.

$$p = 3.53k - 0.05$$

(2)

missä p = murtumispaine (kN/m^2)

k = lasien lukumäärä

Yhtälön selitysaste on 0.843, joka on suhteellisen hyvä, kun muistaa murtumispaineiden suuren hajonnan.

Taipumat murtumishetkellä olivat keskimäärin taulukon 7 mukaiset.

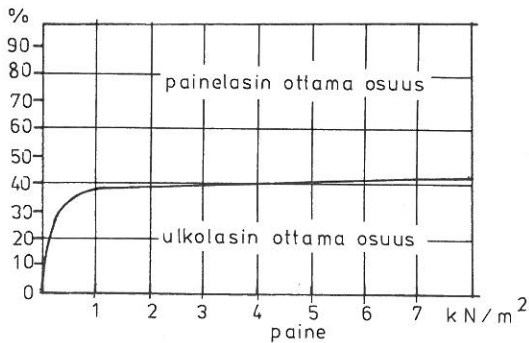
Taulukko 7. Keskipisteen taipumat murtumishetkellä

	1-1	2-1 _s	2-1 _t	3-1 _s	3-1 _t	
taipuma	19.21	15.00	18.00	-	17.70	mm

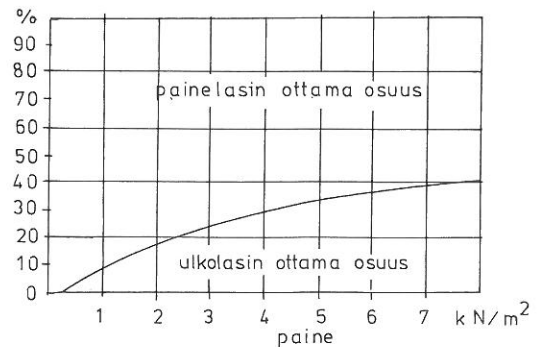
Lasilevyn taipumiskyky on huomattava kun kyseessä on hauras aine. Muodonmuutoskyky edistää osaltaan lasin kuormituskestävyyttä, koska suurien taipumien yhteydessä muodostuvat kalvovoimat ottavat huomattavan osan voimista.

KUORMAN JAKAANTUMINEN ERI LASEILLE

Kokeissa saatuja paineen ja taipuman välisen riippuvuuden regressiomalleja hyväksi käyttäen laskettiin kaksinkertaisen umpiolasielementin umpion paine ja sitä kautta saatiin laskettua lasien ottama osuus kokonaiskuormasta. Kuviissa 6 ja 7 on esitetty saadut tulokset



Kuva 6. Kuorman jakaantuminen eri lasille suorissa kaksinkertaisissa umpiolaseissa



Kuva 7. Kuorman jakaantuminen eri lasille kaksinkertaisissa umpiolasielementeissä, joissa oli alkutaipuma

Suurien elementtien tuloksista huomataan, että koestuspaineen kasvaessa painelasi kantaa suurimman osan etenkin alkuvaiheessa, jonka jälkeen tilanne tasoittuu nopeasti lähes vakioksi. Elementin murtumisalueella muutoksia ei tapahdu käytännöllisesti katsoen lainkaan ja painelasi kantaa kuormasta 58 %

ja ulkolasi 42 %. Elementeissä, joissa oli alkutaipuma, paineen siirtyminen umpion yli tapahtuu hitaammin, mutta murtumiskuormien alueella tilanne vastaa suorien elementtien tilannetta. Tässä on ilmeinen perustelu sille, että murtumispaineiden keskiarvoilla ei ollut tilastollista merkityseroa.

Kolminkertaisten umpiolasien yhteydessä vastaavaa selvitystä ei voitu tehdä, koska mittausaineisto oli niin puutteellinen.

MITOITUSSUOSITUS

Yleistä

Edellä esitettyjen selvitysten ja kokeiden perusteella laadittiin mitoitussuositus RT-38-10013. Ohjekortissa esitetään ohjeet tuulikuorman alaisen ikkunan ja ikkunaoven lasilevyn paksuuden määrittämiseksi tuulen nopeuspaineen sekä lasilevyn koon ja sivusuhteen funktiona. Kortin ohjeet koskevat kaikilta sivuiltaan kiinnitettyjä yksinkertaisia lasilevyjä sekä kaksin- ja kolminkertaisia umpiolasielementtejä. Ohjeen mukaan mitoitetaan koneellisesti vedetty lasi ja ns. float-lasi. Kortin ohjeet eivät koske muun ulkoisen kuorman alaisen lasilevyn mitoitusta eivätkä myöskään koristelasin, varmuuslasin tms. mitoitusta.

Lasilevyn paksuuden määrittäminen

Levyn paksuuden määrittäminen perustuu edellä määritettyyn lasin vertailulujuuteen, tuulikuorman suuruuteen sekä levyillä ja elementeillä suoritettujen kokeiden antamaan aineistoon.

Molempien lasilaatujen laskennallisena taivutuslujuutena voidaan pitää samaa arvoa, 30 MN/m². Arvo perustuu koneellisesti vedetyn lasin lujuuteen, joka kokeissa oli alhaisempi. Erilaisten lujuuksien käyttö ei käytännön mitoituksessa ole tarpeellista, koska suunnittelijalla ei riitä mielenkiintoa määrittää lasilaatua erikseen ja lasien hankintavaiheessa ei käytännössä tiedettäisi suunnitteluperusteita, jolloin mahdollisuudet liian ohuen lasin esiintymiselle olisivat suuremmat. Lasin suppeumalukuna on käytetty arvoa 0,25. Lasin paksuus määritetään Marcuksen kaavasta johdetun kaavan 3 perusteella.

$$t = 10^3 \times \sqrt{\frac{3}{4} \frac{P}{\sigma_{\text{vert}}} \left(1 - \frac{5}{6} \frac{r^2}{1+r^4}\right) \times \left(\frac{r(1-vr^2)}{1+r^4}\right)} \quad (3)$$

missä t = lasilevyn paksuus (mm)

$$\sigma_{\text{vert}} = 30000 \text{ kN/m}^2$$

P = lasilevyn kokonaistuulikuorma (kN)

$$= q \times a \times b$$

q = tuulen nopeuspaine (kN/m²)

a = lasin pitempi sivu (m)
b = lasin lyhyempi sivu (m)
r = b/a
v = Poisson luku
= 0.25

Yksinkertaisen lasilevyn ohuin sallittu paksuus normaaleissa olosuhteissa saadaan suoraan kaavasta. Tällöin käytetään tuulen nopeuspaineena Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B1 käyttämää tuulen nopeuspaineen arvoa yhtiöstä (1).

Ikkunaan valittavan lasin nimellispaksuus määräytyy lasin laatumääräysten yhteydessä esitetyn paksuustaulukon mukaisesti. Kun mitoitettava ikkuna on tuulisuudeltaan ulkosaaristoa tai merenrantaa vastaavalla paikalla, käytetään tuulen nopeuspaineen arvona 25 % suurempia arvoja, mutta muuten mitoituksen kulku on sama.

Kaksinkertaisen umpiolasin mitoitus tapahtuu saman kaavan perusteella käyttäen samaa lujuusarvoa kuin yksinkertaisten lasien yhteydessä. Elementin suurempi lujuus huomioidaan kuormituksessa vähentämällä tuulen nopeuspaineen arvoa 20 %:lla peruskuormituksesta. Perusteena tälle on kuorman jakaantumisesta eri laseille suoritettu selvitys. Selvityksen perusteella todettiin murtumispaineen alueella suorien elementtien painelasin kantavan kuormasta n. 58 % ja taivutettujen elementtien yhteydessä vastaava luku on 63 %. Toisaalta yksinkertaisten lasien kantokyky murtumispaineen mukaan arvosteltuna on 56 % kaksinkertaisten elementtien kantokyvystä. Näiden lukujen valossa 20 % kuorman pienennys on liian pieni. Vähennys voisi olla 27 %, mutta 20 % on soveliaampi kun kaksinkertaisia elementtejä mitoitetaan korotetulle tuulenpaineelle. Tällöin 25 %:lla korotettu tuulenpaineen arvo kaksinkertaisille elementeille tulee samaksi kuin yksinkertaisten lasien normaaliolosuhteiden tuulenpaine. Seitsemän prosenttiyksikön vaikutus on varmuutta lisäävä, eikä sillä ole sanottavaa merkitystä normaalikokoisten ikkunoiden lasinpak-suuksien määrittämisessä. Tämän lisäksi on muistettava murtumispaineiden suhteellisen suuri hajonta, jonka vaikutus on eliminoitava suuremmalla varmuudella.

Kolminkertaisten umpiolasien mitoitus perustuu jälleen samaan kaavaan ja lujuusarvoihin kuin yksinkertaisten lasien yhteydessä. Elementin suurempi lujuus otetaan jälleen huomioon kuormituksessa. Kuormituksena käytetään 20 % pienempiä tuulen nopeuspaineen arvoja kuin kaksinkertaisten lasien yhteydessä. Kolminkertaisille elementeille ei voitu laskea eri lasien ottamia kuormitusosuuksia kuten kaksinkertaisten elementtien yhteydessä. Tästä syystä on turvauduttava ainoastaan murtumispaineiden antamaan tietoon. Tuloksista todetaan kaksinkertaisten elementtien kantokyvyn olevan 62 % kolminkertaisten elementtien kantokyvystä, joten 20 % kuormituksen pienentäminen on varmemmalla puolen. Kun kolminkertaista elementtiä mitoitetaan ulkosaaristoa vastaavalla 25 % korotetulla tuulenpaineella, niin tällöin kuormitus on sama kuin kaksinkertaisilla elementeillä normaaliolosuhteissa.

Lasilevyn paksuuden mitoitusnomogrammi

Kuvassa 8 on esitetty edellisen kohdan perusteella laadittu mitoitusnomogrammin periaatekuva. Täydellinen nomogrammi on esitetty RT-kortissa RT 38-100013 sivulla 2. Nomogrammin ensimmäisessä osassa määritetään lasiin kohdistuvan tuulen nopeuspaineen redusoidut mitoitusarvot. Kuvaajien yhtälöt vasemmalta lähtien ovat

$$\text{I} \quad q = 0.4224 \left(\frac{h}{10} \right)^{1/5} \quad (4)$$

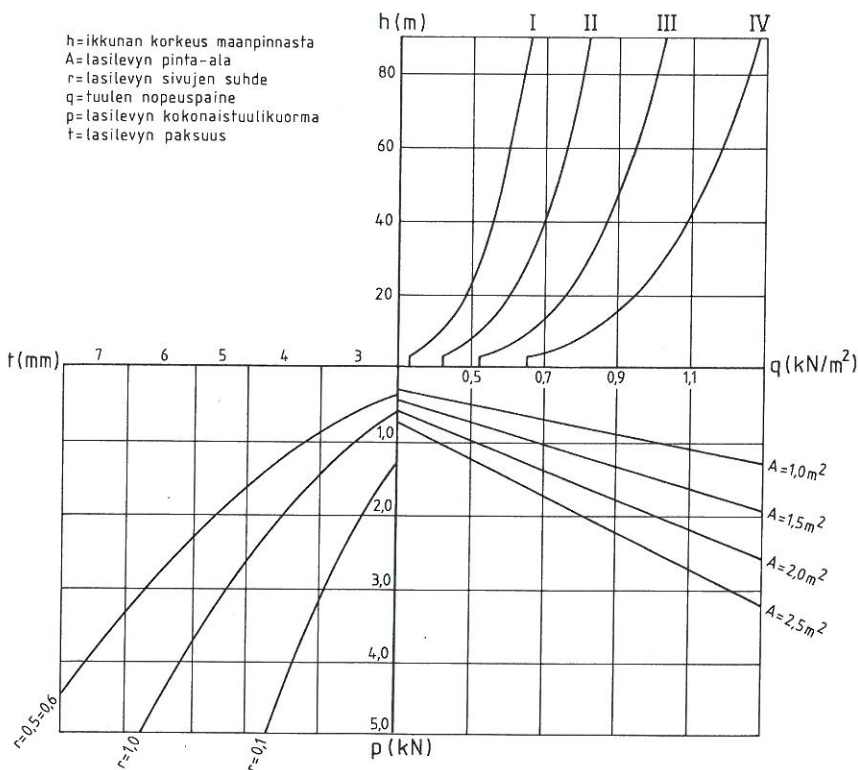
$$\text{II} \quad q = 0.5280 \left(\frac{h}{10} \right)^{1/5} \quad (5)$$

$$\text{III} \quad q = 0.6600 \left(\frac{h}{10} \right)^{1/5} \quad (6)$$

$$\text{IV} \quad q = 0.8250 \left(\frac{h}{10} \right)^{1/5} \quad (7)$$

missä q = tuulen nopeuspaine (kN/m^2)

h = korkeus maanpinnasta (m), vähintään 3 m



Kuva 8. Ikkunalasin paksuuden määrittäminen

Esimerkissä on

$h = 35$ m ikkunan korkeus maanpinnasta

$a = 2$ m lasilevyn pitempi sivu

$b = 1$ m lasilevyn lyhyempi sivu

$A = 2$ m² lasilevyn pinta-ala

$r = 0,5$ lasilevyn sivujen suhde

Lasilevyn paksuudeksi saadaan 5 mm

I-kuvaajaa käytetään mitoitettaessa kolminkertaisia umpiolaseja normaaliolosuhteissa.

II-kuvaajaa käytetään mitoitettaessa kolminkertaisia umpiolaseja ulkosäällä yms. merenrantapaikoilla sekä kaksinkertaisia umpiolaseja normaaliolosuhteissa.

III-kuvaajaa käytetään mitoitettaessa kaksinkertaisia umpiolaseja ulkosäällä yms. merenrantapaikoilla sekä yksinkertaisia lasilevyjä normaaliolosuhteissa.

IV-kuvaajaa käytetään mitoitettaessa yksinkertaisia lasilevyjä ulkosäällä yms. merenrantapaikoilla.

III-kuvaaja on Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B1 tuulen nopeuspaineen peruskuvaaja. Kuvaajien keskinäiset erot ovat seuraavat

$$q_{II} = 1.25 q_I \quad (8)$$

$$q_{III} = 1.25 q_{II} \quad (9)$$

$$q_{IV} = 1.25 q_{III} \quad (10)$$

Nomogrammin toisessa osassa (IV neljännes) suoritetaan kertolasku $P = Aq$. Tätä ennen on pitänyt laskea ikkunan pinta-ala A (m²).

Nomogrammin kolmanteen osaan (III neljännes) on piirretty lasin paksuus kokonaiskuorman P funktiona eri sivusuhteilla $r = b/a$. a on lasin pitempi sivu ja b on lasin lyhyempi sivu. Käyräparven yhtälö on lasin paksuuden mitoitustaava (3). Nomogrammista saatavat lasin paksuudet on esitetty nimellispaksuuksina. Nomogrammi on laadittu siten, että nimellispaksuus ja lasin laskettu paksuus vastaavat toisiaan taulukon 8 mukaan.

Taulukko 8. Nimellispaksuuden ja lasketun paksuuden vastaavuus

nimellispaksuus	laskettu paksuus	
3	$t \leq 2.8$	mm
4	$2.8 < t \leq 3.8$	mm
5	$3.8 < t \leq 4.5$	mm
6	$4.5 < t \leq 5.4$	mm
7	$5.4 < t \leq 6.3$	mm

Lasien paksuuksien vaihtelurajat poikkeavat laatumääräysten esittämistä arvoista. Nomogrammiin otetut rajat ovat lasinvalmistajien ilmoittamia todellisia valmistuksessa esiintyviä paksuuksia vastaavia arvoja. Nomogrammin käyttö selviää RT-kortissa olevasta ohje-esimerkistä.

Standardikokoisten ikkunoiden lasilevyjen paksuudet

Mitoitusohjeessa, RT-kortin no RT 38-10013 sivulla 3 on lisäksi laskettu rakentamisessa yleisimmin käytetyille ikkunoille valmiiksi lasien paksuudet. Laskelmien pohjana ovat olleet seuraavat arvot:

- ikkuna sijaitsee 20 m:n korkeudessa maanpinnasta
- kuormitusalueena on käytetty valoaukon suuruutta, joka on yksinkertaisilla laseilla M-170 mm ja umpiolaseilla M-100 mm (M on moduulimitta)

- lasien nimellispaksuus määräytyy edellisessä kohdassa esitetyn katkaisurajataulukon 8 mukaan.

Ikkunan sijainnin valitseminen 20 m:n korkeuteen johtuu siitä, että näin voidaan määrittää normaalin kerrostalon standardikokoisten ikkunoiden lasipaksuudet vakioiksi, ja ikkunat ovat sovitettavissa rakennusaikana vapaasti eri paikkoihin talossa. Jos kullekin kerrokselle valittaisiin oma lasin paksuutensa, niin siitä olisi seurauksena sekaannusta asennusvaiheessa ja vakioikokoisten ikkunalasiin varastointimäärien kasvu. Taulukossa 9 on esitet-

ty esimerkinomaisesti yksinkertaisen lasilevyyn paksuuden määrittämisohje.

Kokemusperäisen tiedon mukaan 4 m korkeilla umpiolasielementeillä on taipumus rikkoontua talviolosuhteissa. Tämän vuoksi näissä ikkunoissa käytetään 4 mm:n paksuista lasia.

Taulukko 9. Yksinkertaisten lasilevyjen paksuus standardikokoisissa ikkunoissa normaaliolosuhteissa. Nimellispaksuus mm

	6M	9M	12M	15M	18M
4M	3	3	3	3	3
6M	3	3	3	3	3
9M	3	3	3	3	3
12M	3	3	3	3	4
14M	3	3	3	3	4
15M	3	3	3	3	4
16M	3	3	4	4	4
18M	3	3	4	4	4
21M	3	4	4	5	5

YHTEENVETO JA LOPPUPÄÄTELMÄT

Lasi on hauras materiaali, jonka puristuslujuus on lähes kymmenkertainen vetolujuuteen verrattuna. Tämän lisäksi lasi kestää nopeaa kuormitusta noin kaksi kertaa enemmän kuin pitkäaikaista kuormitusta.

Lasin taivutusvetolujuus määritettiin DIN 52 303 mukaan. Kokeiden perusteella float-lasi todettiin lujemmaksi, mutta eron havaittiin olevan siinä määrin pienen, että katsottiin tarkoituksenmukaiseksi pitää molempia lasilaatujen taivutusvetolujuutena 30 MN/m^2 . Arvo perustuu konelasin 99.2 % varmuustasolla saatuun arvoon.

Taulukko 10. Lasin taivutusvetolujuus 99.2 % varmuustasolla.

nimellispaksuus	konelasi	float-lasi
mm	MN/m^2	MN/m^2
3	37	39
4	30	33

Lasin taivutusvektolujuudeksi 99.2 % varmuustasolla saatiin taulukon 10 arvot.

Tärkein ikkunaan kohdistuva kuormitus on tuulen aiheuttama nopeuspaine. Nopeuspaineen arvona käytetään Suomen rakentamismääräyskokoelman osan B1 esittämää painetta (kaava 1).

Ulkosaarilla tms. merenrantapaikoilla käytetään 25 %:lla korotettuja tuulenpaineen arvoja. Umpiolasien umpiossa olevan ilman jäähtyminen aiheuttaa umpioon alipainetta talviolosuhteissa ja on siten lisäkuormana elementeille. Lisäkuorman vaikutus näkyy tutkimusten mukaan suurimapana kuorman jakaantumisessa eri laseille kuormituksen alkuvaiheessa. Mitoitukseen lisäkuormalla ei ole merkitystä muissa kuin kapeissa elementeissä, joiden tiedetään rikoontuvan talviolosuhteissa, jos lasilevyn paksuus on 3 mm.

Lasilevyn mitoituksessa on käytetty paksuuden määräämiseen ns. Marcuksen kaavaa (3).

Lasilevyn mitoitusohjeen laadinnan pohjaksi koekuormitettiin yksinkertaisia lasilevyjä 18 kpl, kaksin- ja kolminkertaisia umpiolasielementtejä kutakin 19 kpl. Osa umpiolasista koestettiin suorina (2-1_s ja 3-1_s) ja loppuihin aiheutettiin 4 mm:n alkutaipuma.

Kaksinkertaisilla umpiolasielementeillä paineen puoleinen lasi kantaa murtumiskuorman alueella n. 58 % kuormasta ja talviolosuhteissa luku on n. 63 %.

Lasin paksuuden mitoitusta varten on laadittu mitoitusohjeen RT-38 10013 mukaisesti. Yksinkertainen lasilevy mitoitetään käyttäen Marcuksen kaavaa ja kuormituksenä tuulen nopeuspainetta. Kaksinkertaisten lasien mitoituksessa niiden suurempi lujuus huomioidaan pienentämällä kuormitusta 20 % yksinkertaisten lasien kuormituksesta. Kolminkertaisten lasien suurempi lujuus huomioidaan pudottamalla kuormitusta 20 % kaksinkertaisten lasien kuormituksesta.

Ohjeen mitoitusmenettely on sangen varovainen, kun sitä verrataan muiden maiden vastaaviin ohjeisiin. Vertailua vaikeuttaa eri maissa käytetyt erilaiset lasin valmistuspaksuudet nimellispaksuuksiin nähden ja kuormitusotaksumat ovat myös erilaiset.

MERKINNÄT

C_v	variaatiokerroin
KA	keskiarvo
P	kokonaiskuorma
a	sivumitta
b	sivumitta
h	korkeus maan pinnasta
p	paine, tasainen kuorma
q	tuulen nopeuspaine
r	sivusuhte
s	hajonta
t	lasin paksuus
σ	jännitys
v	Poisson luku

KIRJALLISUUTTA

- [1] Wolmir, A.SI, Biegsamme Platten und Schalen VEB Verlag für Bauwesen, Berlin 1962.
- [2] Laininen, P., Todennäköisyyslaskenta ja tilastolliset menetelmät, TKY 346, Otakustantamo 1977.
- [3] Rakennusten tuulikuormat, Rakennushallitus, Rakennusosasto, Tiedotus 1:68.
- [4] Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden varmuus ja kuormitukset B1, Sisäasiainministeriö, Helsinki 1978.
- [5] Marcus, H., Die Theorie elastischer Gewebe und ihre Anwendung auf die Berechnung biegsamer Platten, Verlag von Julius Springer, Berlin 1932.
- [6] McGrath, Raymond and Frost, A.C., Glass in architecture and decoration, The architectural press, London.
- [7] Jonsson, B., Glas i byggnader. Glasets tjocklek, Lunds tekniska högskola, Raport BKL 1976:15.
- [8] DIN 52 303, Prüfung von Glas Biegeversuch, 1975.
- [9] Kauhanen, S., Yksinkertaisen lasilevyn sekä kaksin- ja kolminkertaisen umpiolasielementin mitoittaminen tuulen nopeuspaineelle. Diplomityö. Helsingin teknillinen korkeakoulu, Rakennusinsinööri-osasto. Otaniemi 1980. 62 s.

Seppo Kauhanen, Helsingin kaupungin rakennusvirasto, talonsuunnitteluosasto