LASIN PAKSUUDEN MITOITUKSESTA

Jouko Pellosniemi

Rakenteiden mekaniikka, Vol. 36
No. 2, 2003, ss. 46-55

TIIVISTELMÄ

Lasien käyttö julkisivuissa on saavuttanut suurta suosiota julkisten rakennusten pinta-materiaalina. Syy käytön lisääntymiseen on lasin ominaisuuksien tekninen kehitys, mikä on tehnyt siitä erään tärkeimmistä rakennusaineista. Tänä päivänä lasia rakennuksissa käytetään sen perusominaisuuksien, valon läpäisyn, läpinäkyvyyden ja säänsuojan lisäksi muun muassa palo, melu-, esine- ja henkilösuojan ja henkilöturvallisuuden sekä koristeellisuuden ja korkeatasoisten sisustusratkaisujen materiaalina. Lasia ei yksinomaan käytetä verhouslevynä, siitä valmistetaan valokattoja, kaiteita ja katoksia, jotka mitoitetaan kuormitusmääräysten mukaisille rasituksille.

JOHDANTO

Tässä artikkelissa keskitytään yksinomaan lasin paksuuden mitoitukseen kuormitus-normien edellyttämien ohjearvojen avulla. Suureksi osaksi mitoitustapa perustuu Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisuun ”Valoa läpäisevät rakenteet”; (RIL 198-2001). Siinä esitettyjä lasin ominaisuuksia käytetään lähtötietoina määritettäessä lasin suunnittelulujuuksia. Julkaisussa esitetty laskentamalli pohjautuu eurooppalaiseen esistandardiin prEN 113474-1 ja prEN 113474-2, jotka tätä kirjoitettaessa on saanut huomattavaa arvostelua mitoituksen monimutkaisuuden vuoksi.

Erikoisesti tässä julkaisussa kiinnittää huomiota eristyslasielementtien, kansankielessä lämpölasien mitoitus. Siinä otetaan huomioon ulkoisten painekuormien, esimerkiksi lumen ja tuulen lisäksi kahden lasilaatan välissä olevan kaasun paineen vaihtelun vaikutus lasien jännityksiin ja taipumiin. Sisäisen kaasun paineen vaihtelu johtuu eristyslasielementin valmistus- ja asennuspaikan olosuhteiden välisistä mahdollisista ilmanpaine- ja lämpötilaeroista. Esimerkiksi, kun lasipaketin valmistustehtaan ja asennuspaikan välinen korkeusero on korkeintaan 700 m, syntyy kesäolosuhteissa sisäinen paine-ero p_H = 8,4 kN/m^2 ja talviolosuhteissa p_H = -8,4 kN/m^2. Kun valmistustehtaan ja asennuspaikan välistä eroa tarkalleen ei tunneta, joudutaan paine-eroista syntyvä pintakuormaksi valita jopa arvot p_C = 12, 0 kN/m^2 ja vastaavasti p_C = -15,0 kN/m^2.

Arvot ovat moninkertaisia ulkoisiin kuormiin verrattuna ja tämän takia osavarmuus-kertoimilla redusoidaan laskelmia siten, että lopputulokset olisivat kohtuullisia. Mitoitustapa ei herätä luottamusta, ja siksi ei tätä oteta huomioon seuraavissa laskelmissa.

Lasin teoreettista lujuutta ei käytetä läheskään hyödyksi. Tämä johtuu lasipinnan sisältä-mistä, kuormitustilassa potentiaalisia rikkoutumislähtöjä aiheuttavista niin kutsutuista mikrohalkeamista. Niiden vaikutus otetaan huomioon tilastollisesti määritettäessä lasilaadun ominaislujuutta. Samoin leikattu lasin reuna aiheuttaa rikkoutumislähtöjä, jotka vaihtelevat kooltaan ja lukumäärältään.

Tarkemmin puuttumatta kuormitetun lasin sisäisessä rakenteessa tapahtuviin ilmiöihin, on ulkoisen kuormituksen luonteella ja lähinnä kuormituksen kestoajalla huomattava vaikutus laskentajännitykseen. Kuormitusaika, hetkellinen, lyhytaikainen tai pitkäaikainen otetaan huomioon laskentajännityksen arvossa aikavaikutuskertoimen k_{mod} avulla. Hetkellisenä kuormana pidetään tuulikuormaa, lyhytaikaisena lumikuormaa ja pitkäaikaisena omaa painoa tai pysyvää kuormaa. Vastaavasti laminoiduissa laseissa välikerroksen kalvon liukukerroin G_{pvb} määritetään vastaavalla tavalla.

Käytännössä edellä mainittu jako on tuottanut jonkun verran hankaluutta, koska Suomen Rakennusinsinöörien Liiton julkaisussa ”Rakenteiden kuormitusohjeet”; (RIL 144-2002) jako on toisenlainen.

Jäljempänä laskelmissa on käytetty RIL 198-2001 esittämää jakoa, mutta siten, että k_{mod} ja G_{pvb} lasketaan kuormituksen vaikutusajan ja kuormituksen suuruuden painotettuna keskiarvona. Tämä yksinkertaistaa huomattavasti laskentaa. Samanlaista tapaa voisi soveltaa puurakenteiden mitoituksessa, jossa rakennusaineen luonne on lasin kaltainen.

Tähän asti lasin paksuuden mitoitus on suoritettu Eristyslasiyhdistys ry:n julkaiseman ja jo kortistosta poistetun RT-kortin TR X(31)-32284 avulla. Käytössä on ollut muitakin julkaisuja, mutta niissä kaikissa ei ole ymmärretty rakenteiden mitoituksessa olevia käsitteitä, käyttötilaa ja murtotilaa. Käytännössä on turvauduttu lasitehtaiden antamaan apuun ja on tultu toimeen varsin hyvin.

Laskuesimerkeissä on käytetty aineosavarmuuslukuja, jotka poikkeavat edellä mainittujen esistandardien ja ”Valoa läpäisevät rakenteet”; (RIL 198-2000) esittämistä. Ei kovin tieteellisenä perusteluna tälle menettelylle on se, että näin lasketut lasin paksuudet eivät kovinkaan suuresti kasva nykykäytännöstä.

Artikkelin liitteenä oleva, Mathcad -ohjelmalla tehty laskuesimerkki esittelee edellä kuvattua laskentamenettelyä. Esimerkissä ulkokatoksen katteena olevaan lasilaattaan kohdistuu omapainon lisäksi tuuli- ja lumikuorma. Kuormat edustavat kolmea eri aikavaikutusluokkaa.

LÄHTEET

[1] ”Valoa läpäisevät rakenteet”; (RIL 198-2000).
[2] ”Rakenteiden kuormitusohjeet”; (RIL 144-2002).

Jouko Pellosniemi, dipl.ins.

Insinööritoimisto Pellosniemi J&J,
Hauenkalliontie 8 D 21 02170 – Espoo
jouko.pellosniemi@welho.com

ESIMERKKI 1 (ulkokatos)
lasin 1800x1200 paksuuden määritys "noin" RIL 198-2001 mukaan

KOHTEEN SIJAINTITIEDOT:

Rakennuspaikkakunta: Helsinki

korkeus maanpinnasta: z $z := 20$
rakenteen korkeustaso: h_k $h_k := 14.5 - 10.2$ $h_k = 4.3$

LASITIEDOT: Kimmomoduuli E [N/mm^2] $E := 70000$
Poissonin luku μ $\mu := 0.20$

laminoitu lasi: ulkolasi karkaistua lasia ja sisälasi tavallista lasia

pvb-kalvon paksuus t_v [mm] $t_{v0} := 0.38$

Lasin koko:1800x1200 mm2; $h := 1200$ $l := 1800$

$a := \mathrm{if}(h \geq l, h, l)$ pitempi sivu a:

$b := \mathrm{if}(h \geq l, l, h)$ lyhyempi sivu b:

lasitason kaltevuus 0 ast: $\alpha := 0$

lasilevyn koon huomioonottava kerroin k_A $k_A := \left(\frac{h \cdot l}{1000^2}\right)^{0.04}$ $k_A = 1.031$

Lasin lujuusarvot esitetään myöhemmin, koska ne riippuvat kuormista

KUORMAT [kN/m2]: (vain lasitasoa vastaan kohtisuoraan vaikuttavat kuormat otetaan huomioon ja osavarmuuskertoimina käytetään Eurocodeissa esitettyjä arvoja)

Pysyvä kuorma:

lasin paino (lasin tiheytenä käytetään arvoa 2500 kg/m^3):

- ulkolasi t_u $t_{ulko} := 10$ $g_u := \frac{t_{ulko}}{1000} \cdot 25 \cdot \cos(\alpha)$ $g_u = 0.25$

- sisälasi t_s $t_{sisä} := 10$ $g_s := \frac{t_{sisä}}{1000} \cdot 25 \cdot \cos(\alpha)$ $g_s = 0.25$

$t := t_{ulko} + t_{sisä}$ $g := g_u + g_s$

Lumikuorma: RIL 144-1997+ norjal. normi, josta valitaan lämpötilakerroin C_T, jota ei ole määritetty Eurocodeissa

$C_T := 1$ $q_L := 2 \cdot C_T \cdot (\cos(\alpha))^2$ $q_L = 2$

Tuulikuorma: RIL 144-1997

- maastoluokka III

- korkeus z [m] $z := \mathrm{if}(z \le 8, 8, z)$ $q := 0.49 \cdot \left(\frac{z}{10}\right)^{0.32}$ $q = 0.612$

- paine/imukertoimet Cp = avoin katos +/-(0+2,0); valitaan keskiarvo

$C_p := \frac{0 + 2.0}{2}$ $C_p = 1$ $q_W := C_p \cdot q$ $q_W = 0.612$

Kuorman osavarmuusluvut: $r := 1..3$

- käyttötila $\gamma_F = 1$ $\gamma_F := 1.00$

- murtorajatila γ_{Fg} ja γ_{Fq} $\gamma_{Fg} := 1.35$ $\gamma_{Fq} := 1.5$

Kuormitusyhdistelmät:

- kuormien yhdistelmäkerroin ψ $\psi := 0.5$

- käyttötila kuorm.tap 1 $p_1 := \gamma_F \cdot g + \gamma_F \cdot q_L + 0.0 \cdot \gamma_F \cdot q_W$ $p_1 = 2.5$

- käyttötila kuorm.tap 2 $p_2 := g + \gamma_F \cdot q_L + \psi \cdot \gamma_F \cdot q_W$ $p_2 = 2.806$

- käyttötila kuorm.tap 3 $p_3 := g + \psi \cdot q_L + \gamma_F \cdot q_W$ $p_3 = 2.112$

- murtotila kuorm.tap 1 $p_{1d} := \gamma_{Fg} \cdot g + \gamma_{Fq} \cdot q_L + 0.0 \cdot \gamma_{Fq} \cdot q_W$ $p_{1d} = 3.675$

- murtotila kuorm.tap 2 $p_{2d} := \gamma_{Fg} \cdot g + \gamma_{Fq} \cdot q_L + \psi \cdot \gamma_{Fq} \cdot q_W$ $p_{2d} = 4.134$

- murtotila kuorm.tap 3 $p_{3d} := \gamma_{Fg} \cdot g + \psi \cdot \gamma_{Fq} \cdot q_L + \gamma_{Fq} \cdot q_W$ $p_{3d} = 3.093$

$$p := \begin{pmatrix} p_1 & p_{1d} \\ p_2 & p_{2d} \\ p_3 & p_{3d} \end{pmatrix} \qquad p = \begin{pmatrix} 2.5 & 3.675 \\ 2.806 & 4.134 \\ 2.112 & 3.093 \end{pmatrix} \qquad \gamma := \begin{pmatrix} 1 & \gamma_{Fg} \\ 1 & \gamma_{Fq} \\ 1 & \gamma_{Fq} \end{pmatrix}$$

LASIN MITOITUKSESSA KÄYTETTÄVÄT LUJUUSARVOT

Kuormitusajan vaikutuksen huomioon ottavat kertoimet k_{mod} ja $G_{pvb;}$ (kun lämpötila on < 25 °C)

Lasin jännityksen mitoitusarvoon vaikuttava kuorman aikavaikutuskerroin k_{mod} ja laminoidun lasin teholliseen paksuuteen vaikuttava liukukerroin G_{pvb} [N/mm²] riippuvat kuormituksen luonteesta.

-omap $k_{mod,g}$ (pitkäaikainen kuorma): $k_{mod.g} := 0.27$ $G_{pvb.g} := 0.01$

-lumi $k_{mod,L}$ (lyhytaikainen kuorma): $k_{mod.L} := 0.36$ $G_{pvb.L} := 0.5$

-tuuli $k_{mod,t}$ (hetkellinen kuorma): $k_{mod.W} := 0.72$ $G_{pvb.W} := 0.75$

Kuorman aikavaikutuskerroin k_{mod} ja liukukerroin G_{pvb} [N/mm²] määritetään painollisina arvoina seuraavasti: Laskentatapa ei ole sama kuin alustavan Euronormin laskentaesimerkeissä on esitetty. Se kuitenkin yksinkertaistaa laskelmia ja tapa voisi olla käyttökelpoinen puurakenteiden mitoituksesssa, missä laskelmat ovat suuresti luonteeltaan samankaltalsia. Kertoimiin vaikuttaa kuormituksen luonne merkittävästi.

- kuormitustapaus 1: 1 x omapaino + 1 x lumi + 0 x tuuli

k_{mod} murtotilassa ja G_{pvp} käyttötilassa:

$$k_{1.mod} := \frac{\gamma_{1,2} \cdot k_{mod.g} \cdot g + 1.0 \cdot \gamma_{2,2} \cdot k_{mod.L} \cdot q_L + 0.0 \cdot \gamma_{3,2} \cdot k_{mod.W} \cdot q_W}{p_{1,2}} \qquad k_{1.mod} = 0.343$$

$$G_{1.pvb} := \frac{\gamma_{1,1} \cdot G_{pvb.g} \cdot g + 1.0 \cdot \gamma_{2,1} \cdot G_{pvb.L} \cdot q_L + \gamma_{3,1} \cdot G_{pvb.W} \cdot q_W}{p_{1,1}} \qquad G_{1.pvb} = 0.586$$

- kuormitustapaus 2: 1 x omapaino + 1 x lumi + 0.5 x tuuli

k_{mod} murtotilassa ja G_{pvp} käyttötilassa:

$$k_{2.mod} := \frac{\gamma_{1,2} \cdot k_{mod.g} \cdot g + 1.0 \cdot \gamma_{2,2} \cdot k_{mod.L} \cdot q_L + 0.5 \cdot \gamma_{3,2} \cdot k_{mod.W} \cdot q_W}{p_{2,2}} \qquad k_{2.mod} = 0.385$$

$$G_{2.pvb} := \frac{\left(\gamma_{1,1} \cdot G_{pvb.g} \cdot g + 1.0 \cdot \gamma_{2,1} \cdot G_{pvb.L} \cdot q_L + 0.5 \cdot \gamma_{3,1} \cdot G_{pvb.W} \cdot q_W\right)}{p_{2,1}} \qquad G_{2.pvb} = 0.44$$

- kuormitustapaus 3: 1 x omapaino + 0.5 x lumi + 1.0 x tuuli

k_{mod} murtotilassa ja G_{pvp} käyttötilassa:

$$k_{3.mod} := \frac{\gamma_{1,2} \cdot k_{mod.g} \cdot g + 0.5 \cdot \gamma_{2,2} \cdot k_{mod.L} \cdot q_L + 1.0 \cdot \gamma_{3,2} \cdot k_{mod.W} \cdot q_W}{p_{3,2}} \qquad k_{3.mod} = 0.447$$

$$G_{3.pvb} := \frac{\left(\gamma_{1,1} \cdot G_{pvb.g} \cdot g + 0.5 \cdot \gamma_{2,1} \cdot G_{pvb.L} \cdot q_L + 1.0 \cdot \gamma_{3,1} \cdot G_{pvb.W} \cdot q_W\right)}{p_{3,1}} \qquad G_{3.pvb} = 0.456$$

$$k_{mod} := \begin{pmatrix} k_{1.mod} \\ k_{2.mod} \\ k_{3.mod} \end{pmatrix} \qquad k_{mod} = \begin{pmatrix} 0.343 \\ 0.385 \\ 0.447 \end{pmatrix} \qquad G_{pvb} := \begin{pmatrix} G_{1.pvb} \\ G_{2.pvb} \\ G_{3.pvb} \end{pmatrix} \qquad G_{pvb} = \begin{pmatrix} 0.586 \\ 0.44 \\ 0.456 \end{pmatrix}$$

Varmuutason sovituskerroin γ_n , jolla Euronormin mukaan pyritään saavuttamaan suunnilleen sama tulos ja varmuustaso kuin nykyisin käytännössä olevalla tavalla. $\gamma_n := 1.0$

Aineen osavarmuusluvut γ_m tavalliselle ja karkaistulle lasille: $\gamma_{m.tav} := 1.5$ $\gamma_{m.kar} := 1.8$

Nämä arvot ovat erilaisia, kuin alkuperäisessä ohjeissa on esitetty. Tässä on yksinkertaistettu laskentaa jättämällä pois eristyslasielementtien välitilan, korkeus- ja lämpötilaeroista syntyvän paineen vaikutus, koska se voi olla suurudeltaan jopa yli 10 kN/m^2, usein moninkertaisesti yli tavanomaisen kuormituksen. Tällainen kuoman arvo ei anna vakuuttavaa kuvaa laskentamallista, kun painekuorman yhteydessä käytetään resusoitavia kertoimia, jotta tulos saadaan näyttämään uskottavalta. Tässä esimerkissä ei ole eristyslasielementtiä.

Lasin taivutusvetolujuus f_{gk} [N/mm2]:

- tavallisen lasin taivutusvetolujuus $f_{gk.tav}$ [N/mm2]: $f_{gk.tav} := 45$

- tavallisen lasin taivutuslujuuden laskenta-arvo $f_{d.tav}$ [N/mm2]:

$$f_{dtav} := k_{mod} \cdot \frac{f_{gk.tav}}{\gamma_{m.tav} \cdot k_A} \cdot \gamma_n \qquad f_{dtav} = \begin{pmatrix} 10 \\ 11.2 \\ 13 \end{pmatrix}$$

- karkaistun lasin taivutusvetolujuus $f_{gk.kar}$ [N/mm2]: $f_{bk.kar} := 120$

- karkaistun lasin taivutuslujuuden laskenta-arvo $f_{g.kkar}$ [N/mm2]:

$$f_{dkar} := \left(\left(\frac{f_{bk.kar} - f_{gk.tav}}{\gamma_{m.kar}} + k_{mod} \cdot \frac{f_{gk.tav}}{\gamma_{m.kar} \cdot k_A} \right) \right) \cdot \gamma_n \qquad f_{dkar} = \begin{pmatrix} 50 \\ 51 \\ 52.5 \end{pmatrix}$$

LASIN MITOITUS käyttötilassa (taipumatarkastelu)

$$t = 20 \qquad t_1 := t_{ulko} \qquad t_2 := t_{sisä} \qquad t_s := 0.5(t_1 + t_2) + t_{v0} \qquad t_{s1} := \frac{t_s \cdot t_1}{t_1 + t_2} \qquad t_{s2} := \frac{t_s \cdot t_2}{t_1 + t_2}$$

$$I_s := t_1 \cdot t_{s2}^{\,2} + t_2 \cdot t_{s1}^{\,2} \qquad \Gamma := \frac{1}{1 + 9.6 \cdot \frac{E}{G_{pvb}} \cdot \frac{I_s \cdot t_{v0}}{t_s^{\,2} \cdot b^2}} \qquad \Gamma = \begin{pmatrix} 0.398 \\ 0.332 \\ 0.34 \end{pmatrix} \qquad t_{ew} := \left(t_1^{\,3} + t_2^{\,3} + 12 \cdot \Gamma \cdot I_s \right)^{\frac{1}{3}}$$

Lasin tehollinen paksuus t_{ew}

$$t_{ew} = \begin{pmatrix} 16.596 \\ 16.062 \\ 16.13 \end{pmatrix}$$

Lasilaatan jäykkyys K

$$K := \frac{E \cdot t_{ew}^{\,3}}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \qquad K = \begin{pmatrix} 2.778 \times 10^{7} \\ 2.518 \times 10^{7} \\ 2.55 \times 10^{7} \end{pmatrix} \qquad taip_{kr_{r,1}} := \frac{p_{r,1}}{K_{r,1}}$$

$$taip_{kr} = \begin{pmatrix} 9.001 \times 10^{-8} \\ 1.114 \times 10^{-7} \\ 8.281 \times 10^{-8} \end{pmatrix}$$

suhteen "p/K" suurin arvo ilmaisee taipuman määräävän kuormitustapauksen käyttörajatilassa. Tässä tapauksessa taipuman mitoittava kuormitustapaus on 2: omapaino+lumikuorma+1/2xtuulikuorma (r = 2).

pysyvä kuorma (omapaino) + hyötykuormat $r := 2$

Lasin mitat l,h	$h = 1200$	$l = 1800$
kuormituksen paikka	$u := \frac{l}{2}$	$v := \frac{h}{2}$
kuormitusala:	$c := \frac{l}{2}$	$d := \frac{h}{2}$
Kuorma p [N/mm2]	$p := \frac{p_{2,1} \cdot 1000}{1000^2}$	$p = 2.806 \times 10^{-3}$

$m := 40$ $n := 40$ $i := 1..m$ $j := 1..n$

Taipuma määritetään neljältä sivulta tuetun laatan sarjamuotoiseen ratkaisuun perustuvien kaavojen avulla pisteeessä: $x := \frac{l}{2}$ $y := \frac{h}{2}$

$$a_{i,j} := \frac{16 \cdot p}{\pi^2} \cdot \frac{1}{i \cdot j} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot u}{l}\right) \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot c}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot v}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot d}{h}\right)$$

$$p(x,y) := \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} a_{i,j} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right)$$

$$w_{i,j} := \frac{a_{i,j}}{K_r \cdot \pi^4 \cdot \left[\left(\frac{i}{l}\right)^2 + \left(\frac{j}{h}\right)^2\right]^2}$$

$$w(x,y) := \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right)$$

$w(x,y) = 1.8$

$w_{sall} := \frac{b}{100}$ $w_{sall} = 12$

LASIN MITOITUS murtotilassa (jännitystarkastelu) $r := 2$

pysyvä kuorma (omapaino)+hyötykuormat

$$p := \begin{pmatrix} p1 & p1d \\ p2 & p2d \\ p3 & p3d \end{pmatrix} \qquad p_{2,2} = 4.134$$

Voimasuureet murtorajatilassa määritetään neljältä sivulta tuetun laatan differenssimenelmään perustuvien kaavojen avulla pisteessä:

$$x := \frac{l}{2} \qquad y := \frac{h}{2}$$

kuormituksen painopisteenpaikka paikka: $u := \frac{l}{2}$ $v := \frac{h}{2}$

kuormitusala (tasainen kuorma koko lasilevyllä): $c := \frac{l}{2}$ $d := \frac{h}{2}$

Kuorma p [N/mm2] $p := \frac{p_{r,2} \cdot 1000}{1000^2}$ $p = 4.134 \times 10^{-3}$

$m := 40$ $n := 40$ $i := 1..m$ $j := 1..n$

$$a_{i,j} := \frac{16 \cdot p}{\pi^2} \cdot \frac{1}{i \cdot j} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot u}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot c}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot v}{h}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot d}{h}\right)$$

$$p(x,y) := \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} a_{i,j} \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \qquad w_{i,j} := \frac{a_{i,j}}{K_r \cdot \pi^4 \cdot \left[\left(\frac{i}{l}\right)^2 + \left(\frac{j}{h}\right)^2\right]^2}$$

$$m_x(x,y) := K_r \cdot \pi^2 \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \cdot \left[\left(\frac{i}{l}\right)^2 + \mu \cdot \left(\frac{j}{h}\right)^2\right] \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \qquad m_x(x,y) = 253.4$$

$$m_x := m_x(x,y)$$

$$m_y(x,y) := K_r \cdot \pi^2 \cdot \sum_{i=1}^{m} \sum_{j=1}^{n} w_{i,j} \cdot \left[\mu \cdot \left(\frac{i}{l}\right)^2 + \left(\frac{j}{h}\right)^2\right] \cdot \sin\left(\frac{i \cdot \pi \cdot x}{l}\right) \cdot \sin\left(\frac{j \cdot \pi \cdot y}{h}\right) \qquad m_y(x,y) = 466.4$$

$$m_y := m_y(x,y)$$

YHTEENVETO : **KAR 10 mm+lam TAV 10 mm** $t_1 = 10$ $t_2 = 10$

jännitysten tarkistus:

$$t_{1eff} := \sqrt{\frac{\left(t_{ew_r}\right)^3}{t_1 + 2 \cdot \Gamma_r \cdot t_{s2}}} \qquad t_{1eff} = 17.558 \qquad t_{2eff} := \sqrt{\frac{\left(t_{ew_r}\right)^3}{t_2 + 2 \cdot \Gamma_r \cdot t_{s1}}} \qquad t_{2eff} = 17.558$$

$$\sigma_x := \frac{m_x \cdot 6}{t_{1eff}^{\,2}} \qquad \sigma_x = 4.9 \qquad \sigma_y := \frac{m_y \cdot 6}{t_{1eff}^{\,2}} \qquad \sigma_y = 9.1$$

$$\sigma := \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\frac{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2}{4}} \qquad \sigma = 9.1 \quad < \quad f_{dtav_r} = 11.2 \qquad f_{dkar_r} = 51$$

Tuloksesta nähdään, että mitoituksen määrittää tavallisen lasin suunnittelulujuus. Jos molemmat lasit olisivat karkaistua lasia, riittäisi lasin kokonaispaksuudeksi 10 mm (= 5 + 5 mm). Taipuma olisi tällöin 10,2 mm (sall =12 mm) ja jännitys murtotilassa 29,5 N/mm^2, mikä on tässä tapauksessa paljon alle karkaistun lasin suunnittelulujuuden f_{dkar} = 51,3 N/mm^2.

ENTISEN KÄYTÄNNÖN MULAINEN MITOITUS

voimasuureet käyttötilan arvoja eli käytössä on ns. sallittujen jännitysten menetelmä

kuormat muutetaan vastaamaan lyhytaikaisia kuormia siten, että
- omapaino ja lumikuorma kerrotaan 2,6 :lla
- tuulikuorma käsitetään lyhytaikaiseksi kuormaksi, joten sen kerroin on = 1
- yhdistelmäkerroin ψ = 0.5

$$p_{vanha} := 2.6\left(g + q_L\right) + 1.0 \cdot \psi \cdot q_W \qquad p_{vanha} = 6.806$$

$$m_x := 417.2 \qquad m_y := 767.9$$

käytettäessä laminoitua lasia jännityksiä laskettaessa lasin paksuus t pitää jakaa 1,4 :llä

$$t := 20$$

$$\sigma_x := \frac{m_x \cdot 6}{\left(\frac{t}{1.4}\right)^2} \qquad \sigma_x = 12.266 \qquad \sigma_y := \frac{m_y \cdot 6}{\left(\frac{t}{1.4}\right)^2} \qquad \sigma_y = 22.576$$

$$\sigma := \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\frac{\left(\sigma_x - \sigma_y\right)^2}{4}} \qquad \sigma = 22.576$$

Lasin sallitut jännitykset, kun varmuuskerroin on = 2,5

$$\sigma_{tav} := 30 \qquad \sigma_{kar} := 50$$