

Niila Kunnari

Lasirakenteiden mitoitusohje

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinööriytyö

22.4.2015

Tekijä Otsikko	Niila Kunnari Lasirakenteiden mitoitusohje
Sivumäärä Aika	57 sivua + 1 liitettä 22.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaajat	Osastopäällikkö Jussi Kallioniemi Lehtori Arne Seppänen
<p>Insinööriyö tehtiin Sweco Rakennetekniikka Oy:lle ja se rajattiin koskemaan ainoastaan lasilaattoja, joihin kohdistuu tasoa vastaan kohtisuoria kuormituksia. Kosteus-, energia- ja äänitekniset seikat, paloturvallisuusasiat sekä ulkonäköseikat rajattiin insinööriyön ulkopuolelle. Insinööriyön painopiste asetettiin lasin kestävyuden määrittämiseen, mitoitukseen käyttö- ja murtorajatilassa sekä oikean lasityypin valintaan käyttökohteen mukaan.</p> <p>Työ aloitettiin lasin ominaisuuksiin sekä eri lasityyppeihin tutustumalla. Tietoa koottiin alan kirjallisuudesta sekä lasia käsittelevistä eurooppalaisista standardeista. Tämän jälkeen tutustuttiin lasin valinnalle eri standardeissa, standardiluonnoksissa ja kirjallisuudessa asetettuihin määräyksiin ja ohjeisiin.</p> <p>Lasilaattojen mitoitustavoista esiteltiin eurooppalaisen standardiluonnoksen prEN 16612 sekä saksalaisen DIN 18008 -standardin mukaiset laskelmat. Lisäksi suoritettiin vertailulasakelmia näiden standardien ja standardiluonnosten sekä Suomessa aiemmin käytettyjen mitoitusmenetelmien välillä. Näin saatiin käsitys siitä, miten menetelmät eroavat toisistaan.</p> <p>Insinööriyön tuloksena laadittiin Excel-pohjainen laskentasovellus lasilaattojen mitoittamiseksi prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaan. Ohjelman avulla voidaan määrittää lasin taivutusvetolujuuden mitoitusarvo murtorajatilan tarkasteluja varten sekä laminoidun lasin tehollinen paksuus käyttö- ja murtorajatilan tarkasteluja varten. Lisäksi suorakulmaisille kaikilta sivuiltaan jatkuvasti tuetuille laatoille voidaan laskea jännitykset murtorajatilan tarkasteluja varten sekä taipumat käyttörajatilan tarkasteluja varten.</p>	
Avainsanat	Lasilaatta, valokate, ikkuna, eristyslasi, lasikaide

Author Title	Niila Kunnari Design of Glass Panes
Number of Pages Date	57 pages + 1 appendix 22 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructors	Jussi Kallioniemi, Head of Department Arne Seppänen, Senior Lecturer
<p>This thesis was made for Sweco Rakennetekniikka Oy and it was outlined to deal only with glass panes subject to loads normal to the surface of the glazing. The main focus is on the determination of the load resistance of glass panes by calculation. Humidity, solar and sound control, thermal insulation and fire protection issues fall outside the scope of this thesis.</p> <p>The thesis was started by studying glass material properties and different glass types that are available. Information was gathered from literature and the European standards dealing with the subject. Regulations and guidelines regarding the choice of glass type by application were gathered from standards, draft standards and literature.</p> <p>Design equations according to a European draft standard prEN 16612 Glass in Building and a German standard DIN 18008 Glass in Building were presented. Comparison calculations were made between these standards and the methods previously used in Finland to get an idea of how the methods relate to each other.</p> <p>An Excel-based design software was created for the determination of the load resistance of glass according to prEN 16612. The software can be used to determine the design value of strength for different glass types and also the effective thickness of laminated glass panes. The software can also be used to calculate the maximum tensile bending stress in ultimate limit state and the maximum deflection in serviceability limit state of rectangular glass panes supported linearly on all edges.</p>	
Keywords	Glass, roof glazing, window, insulating glass, barrier glazing

Sisällys

Lyhenteet ja määritelmät

1	Johdanto	1
2	Lasin ominaisuudet	2
2.1	Määritelmä	2
2.2	Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet	3
2.3	Kemialliset ominaisuudet	3
2.4	Lasin lujuus	4
2.5	Lasin rikkoutuminen	4
3	Taivutuslujuus ja siihen vaikuttavat tekijät	5
3.1	Taivutuslujuus	5
3.2	Lämpökäsittelyn ja kemiallisen käsittelyn vaikutukset	5
3.3	Reunakäsittelyjen vaikutukset	5
3.4	Sään ja ympäristön vaikutukset	8
3.5	Kuormien vaikutusaikojen vaikutukset	8
3.6	Käyttöiän vaikutus	10
3.7	Lasilaatan koon vaikutus	10
4	Lasityypit	11
4.1	Tavallinen tasolasi	11
4.2	Lämpökarkaistu lasi	12
4.2.1	Heat Soak -testattu lämpökarkaistu lasi	13
4.3	Lämpölujitettu lasi	13
4.4	Kemiallisesti lujitettu lasi	14
4.5	Laminoitu lasi	14
5	Lasityypin valinta	16
5.1	Pystysuorat lasitukset	17
5.2	Lasikaiteet ja putoamissuojana toimivat lasitukset	18
5.3	Eristyslaselementeistä koostuvat valokatteet	19
5.4	Yhdestä lasilaatasta koostuvat valokatteet	21
5.5	Lattialasitukset ja lasiportaat	21

6	Rikkoutumisesta aiheutuvien riskien huomiointi	22
7	Lasilaatan mitoitus	24
7.1	Yleistä	24
7.2	DIN 18008 -standardin mukainen mitoitus	25
7.2.1	Käyttö- ja murtorajatilan tarkastelut	25
7.2.2	Eristyslaseielementit	29
7.3	prEN 16612 -standardiluonnoksen mukainen mitoitus	31
7.3.1	Käyttö- ja murtorajatilan tarkastelut	31
7.3.2	Laminoidut lasilaatat	36
7.3.3	Eristyslaseielementit	38
8	Kuormien jakautuminen eristyslaseielementeissä	39
8.1	2K-eristyslaseielementit	39
8.2	3K-eristyslaseielementit	43
9	Vertailu- ja esimerkkilaskelmat	45
9.1	Tavallisen float-lasin kestävyys	46
9.2	Lämpölujitetun float-lasin kestävyys	47
9.3	Lämpökarkaistun float-lasin kestävyys	48
9.4	Laminoidun lasin tehollisen paksuuden laskentaesimerkki	49
9.5	Lasin vaaditun paksuuden vertailu	50
9.6	Huomioita vertailu- ja esimerkkilaskelmista	53
10	Yhteenveto ja tulokset	54
	Lähteet	56

Liitteet

Liite 1. Suuret taipumat huomioiva jännitysten ja taipumien laskentamenetelmä kaikilta sivuiltaan jatkuvasti tuetuille suorakulmaisille lasilaatoille

Lyhenteet ja määritelmät

2K Kaksilasinen, eristyslaselementtien yhteydessä

3K Kolmilasinen, eristyslaselementtien yhteydessä

FEM Elementtimenetelmä (*Finite Element Method*)

PVB Polyvinyylibutyaali

RakMK Suomen rakentamismääräyskokoelma

Eristyslaselementti on kahdesta tai useammasta lasilaatasta koottu elementti, jossa lasien välissä on kaasutiivis ilman tai jalokaasun täyttämä tila.

Jäännöslujuus (*residual load-bearing capacity*) tarkoittaa laminoidun lasilaatan kykyä kantaa vaurioitumisen jälkeen riittävän pitkään riittävästi kuormia tietyllä vaurioasteella.

Kemiallisesti lujitettu lasi on lasia, jonka pinnoille on kemiallisen prosessin avulla muodostettu pysyvä puristusjännitys.

Laminoitu lasi koostuu kahdesta tai useammasta laminointikalvon tai muun vastaavan välikerroksen avulla toisiinsa liitetystä lasikerroksesta.

Lankalasi on valssattu lasi, johon lankaverkko tai yhdensuuntaiset langat painetaan tai syötetään kahden lasinauhan väliin.

Lasilaatta on lasilevy, johon kohdistuu tason pintaa vasten kohtisuora kuormitus.

Lämpökarkaistu lasi on lasia, jonka pinnoille on lämpökäsittelyn avulla muodostettu pysyvä puristusjännitys ja joka hajoaa rikkoutuessaan pieniksi murusiksi.

Lämpölujitettu lasi on lasia, jonka pinnoille on lämpökäsittelyn avulla muodostettu puristusjännitys, joka on pienempi kuin lämpökarkaistulla lasilla. Lämpölujitettu lasi hajoaa suuremmiksi kappaleiksi kuin lämpökarkaistu.

Monoliittinen lasi koostuu yhdestä lasikerroksesta.

Turvalasi on joko lämpökarkaistua lasia tai laminoitua lasia. Jotta lasi voidaan luokitella turvalasiksi, tulee sen täyttää tietyt erityisehdot murtumistapansa suhteen.

Välikerros on laminoidussa lasissa lasikerrosten väliin sijoittuva kerros.

1 Johdanto

Lasin käyttö rakentamisessa lisääntyy jatkuvasti. Se on ainutlaatuinen materiaali, joka päästää valon lävitseen, mutta sulkee samaan aikaan ympäristön aiheuttamat haittavai-
kutukset kuten kylmyyden, sateen ja melun rakennuksen ulkopuolelle. Nämä ominaisuu-
det ovat saaneet arkkitehdit suosimaan lasia rakennusmateriaalina.

Lasi on kuitenkin rakennesuunnittelijan kannalta hankala materiaali. Sen hauras ja yht-
äkkäinen murtotapa tekee riskien hallinnasta vaikeaa eikä lasia rakennusmateriaalina
toistaiseksi tunneta yhtä hyvin kuin yleisempiä terästä ja betonia. Nämä asiat saavat
helposti monet rakennesuunnittelijat olemaan varuillaan eikä tilannetta helpota se, että
Suomessa lasirakenteiden mitoitukseen ei ole käytettävissä virallista kansallista standar-
dia eikä myöskään Euroopan tasolla ole olemassa virallista standardia.

Eurooppalaista standardia lasirakenteiden mitoitusta varten on kehitelty pitkään ja stan-
dardiluonnoksia on ollut liikkeellä jo Eurokoodien esistandardivaiheesta asti. Suomessa
on yhä tänäkin päivänä laajalti käytössä RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirja,
jonka mitoitusohjeet perustuvat prEN 13474 -standardiluonnokseen siinä muodossa kuin
kyseinen standardiluonnos oli julkaistu marraskuussa 2000. Kirjassa esitelty mitoitusme-
netelmä on kuitenkin laadittu eurokoodien esistandardien pohjalta, eikä näin ollen ole
enää nykypäivänä täysin ajan tasalla. [11.]

Tässä insinööriyössä pyritään antamaan suunnittelijalle ajantasaiset ohjeet lasilaattojen
mitoitukseen. Asiaa lähestytään tuoreimman, vuonna 2013 julkaistun eurooppalaisen
standardiluonnoksen prEN 16612 sekä vuonna 2010 julkaistun saksalaisen DIN 18008
-standardin mukaisiin mitoitusmenetelmiin tutustumalla. Vertailulaskelmien avulla pyri-
tään antamaan suunnittelijalle käsitys mitoitusmenetelmien välisistä eroista. Tavoitteena
on myös laatia Excel-pohjainen laskentaohjelma lasilaattojen kestävyuden määrittä-
miseksi prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaisesti.

Toinen keskeinen asia, johon tässä insinööriyössä paneudutaan, on lasityypin valinta
käyttökohteen mukaan niin, että lasin mahdollisesta rikkoutumisesta aiheutuvat riskit py-
syvät hallinnassa. Asiaa lähestytään kokoamalla tietoa rakentamista koskevista mää-
räyksistä, standardiluonnoksista, ulkomaisista standardeista, lasirakentamista käsittele-
västä kirjallisuudesta sekä lasivalmistajien antamista ohjeista.

Tämän insinööriyön painopiste on lasirakenteiden mitoituksessa käyttö- ja murtorajati-
lassa sekä rikkoutumisesta aiheutuvien riskien hallinnassa ja se rajataan käsittelemään
ainoastaan lasilaattoja, joihin kohdistuu tasoa vastaan kohtisuoria kuormituksia. Kos-
teus-, energia- ja äänitekniset seikat, paloturvallisuusasiat sekä ulkonäköseikat rajataan
tämän insinööriyön ulkopuolelle.

Insinööriyö tehdään Sweco Rakennetekniikka Oy:lle.

2 Lasin ominaisuudet

2.1 Määritelmä

Lasi on amorfina aine, jolla ei ole kiinteille aineille ominaista kiderakennetta. Tämä joh-
tuu siitä, että lasisulan jäähdytyksessä sen viskositeetti kasvaa tietyllä lämpötila-alueella
niin nopeasti, etteivät lasin ainesosat ehdi asettua kidehilamuodon edellyttämään järjes-
tykseen. Lasilla ei ole selkeää kiinteytymis- tai sulamispistettä. Sen sijaan muutokset
nestemäisestä olomuodosta kiinteään tapahtuvat laajahkolla lämpötila-alueella, jolla mo-
lekyylien liikkuvuus heikkenee vaiheittain lämpötilan aletessa, kunnes aine kiinteytyy.
Tätä muutosaluetta hyödynnetään useissa lasin käsittelyprosesseissa, kuten lämpöluji-
tuksessa ja -karkaisussa. [3, s.13.]

Edellisen kappaleen määritelmän mukaisia laseja voidaan valmistaa nopeasti jäähdyttä-
mällä myös materiaaleista, jotka normaalisti muodostavat kiderakenteita. Samoin nor-
maalisti laseja muodostavat materiaalit voidaan hyvin hitaasti jäähdyttämällä saada
muodostamaan kiderakenteita. Teoriassa lasi on siis käsitteenä melko laaja. Tässä insi-
nööriyössä lasista puhuttaessa tarkoitetaan kuitenkin tavanomaista rakennuksissa käy-
tettävää soodakalkkisilikaattilasia. [5, s.18.]

2.2 Fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet

Taulukossa 1 on esitetty tavallisen soodakalkkisilikaattilasien fysikaalisten ja mekaanisten ominaisuuksien numeroarvot standardien EN 572-1 ja DIN 18008 sekä standardiluonnoksen prEN 16612 mukaisesti.

Taulukko 1. Soodakalkkisilikaattilasien yleisten ominaisuuksien arvot [6, s.10] [7, s.8] [8, s.15].

Tiheys	ρ	2500	kg/m ³
Kimmokerroin	E	70	GPa
Poissonin luku	μ	0,20-0,23 ¹⁾	-
Pituuden lämpölaajenemiskerroin	α	9	10 ⁻⁶ /K
¹⁾ Arvo vaihtelee hieman eri standardien mukaan.			

Taulukossa esitetyt arvot eivät ole tarkkoja vaatimuksia, jotka lasin tulee täyttää. Sen sijaan ne ovat yleisesti hyväksytyjä arvoja, joita voidaan käyttää laskennassa silloin, kun ei vaadita erityisen suurta tarkkuutta. [6, s.10.]

2.3 Kemialliset ominaisuudet

Tavanomainen tasolasi on useisiin muihin rakennusmateriaaleihin verrattuna kemiallisesti hyvin kestävä. Fluoriyhdisteet ja emäksiset liuokset kuitenkin syövyttävät sitä ja hapot liuottavat lasin alkaleja. Muun muassa sementti- ja kalkkivesi sekä silikaattimaalit ovat sellaisia aineita, jotka voivat vaurioittaa lasia päästessään sen kanssa kosketuksiin. [3, s.233.]

2.4 Lasin lujuus

Lasi on teoriassa hyvin lujaa. Sen käytännön lujuus on kuitenkin lasipinnan sisältämistä kuormitustilassa rikkoutumislähtöjä aiheuttavista niin kutsutuista mikrohalkeamista johtuen vain alle 1 % teoreettisesta. Puristuslujuus on vetolujuuteen verrattuna hyvin suuri. Esimerkiksi tavallisen tasolasin taivutusvetolujuus vaihtelee kuormitustavasta ja muista lujuuteen vaikuttavista tekijöistä riippuen yleensä välillä 40...120 MPa. Puristuslujuus puolestaan on suuruusluokkaa 900...1000 MPa. Lasilaatan mitoituksessa voidaankin siis yleensä rajautua tutkimaan pelkästään laatan vedetyn pinnan suurinta pääjännitystä ja vertaamaan sitä kyseisen pinnan taivutusvetolujuuteen. Saman lasin lujuudessa voi esiintyä eroja eri osien välillä. Lasin lujuuteen vaikuttavista tekijöistä on kerrottu tarkemmin tämän insinööriyön luvussa 3. [2, s.44][3, s.232.]

2.5 Lasin rikkoutuminen

Kun lasia kuormitetaan, se taipuu täysin elastisesti. Vedetyn pinnan jännityksen ylittäessä lasin taivutusvetolujuuden tapahtuu rikkoutuminen ilman plastista venymää. Rikkoutumislähtönä voi toimia joko mikrohalkeama tai jokin muu vika. Lasin rikkoutumiseen voi liian suuren kuormituksen lisäksi olla muitakin syitä, kuten äkilliset lämpötilan muutokset, lasin virheellinen tuenta, lasin tai aukon virheellinen mitoitus, väärin tai huolimattomasti suunnitellut työstöt, materiaalin epäpuhtaudet, ilmakuplat sekä nikkelisulfidin faasimuutos. [4, s.69][3, s.61,62.]

Lasin murtumistapa on hauras ja yhtäkkinen eikä lasi näin ollen varoita murtumisestaan lainkaan. Rikkoutuessaan lasi hajoaa viiltävän teräviksi sirpaleiksi, jotka voivat aiheuttaa henkilövahinkoja. Sirpaleiden kokoon ja muotoon voidaan vaikuttaa lämpökäsittelyjen avulla ja niiden aiheuttamaa riskiä voidaan hallita käyttämällä laminoitua lasia. Lämpökäsittely- ja laminointiprosesseja sekä niiden avulla saavutettavissa olevia lopputuotteita on käsitelty tämän insinööriyön luvussa 4.

3 Taivutuslujuus ja siihen vaikuttavat tekijät

3.1 Taivutuslujuus

Taivutuslujuus on lasirakenteiden mitoituksen kannalta määräävä ominaisuus. Sen mitoitusravon määrittäminen on kuitenkin hankalaa. Asiaa on tutkittu runsaasti, mutta taivutuslujuuden oikeaoppinen tilastollinen kuvaus on yhä avoin kysymys. Soodakalkkisilikaattilasien koestuksesta saadut tulokset noudattavat normaalijakaumaa vain harvoin. Tämä johtuu siitä, että lasin rikkoutuminen ei aiheudu ainoastaan jännityksistä vaan on seurausta jännitystilojen ja lasissa esiintyvien vikojen yhdistelmästä. [9, s.610-612.]

Lasin taivutuslujuuden määritysmenetelmät on esitetty eurooppalaisen standardin EN 1288 osissa 1-5. Standardissa EN 572-1 annetaan soodakalkkisilikaattilasien taivutuslujuudelle $f_{g,kk}$ karakteristinen arvo 45 MPa sovellettavaksi lyhytkestoiseen näennäisesti staattiseen kuormaan kuten tuulikuorma. Arvoon liittyy 5 % rikkoutumisriski 95 % todennäköisyydellä alarajan kohdalla. Sama karakteristisen taivutuslujuuden arvo annetaan myös standardiluonnoksessa prEN 16612. [6, s.12][8, s.18.]

3.2 Lämpökäsittelyn ja kemiallisen käsittelyn vaikutukset

Lämpökäsittelyssä lasi lämmitetään ensin noin 650 °C lämpötilaan, jolloin se pehmenee ja jännitykset katoavat, minkä jälkeen lasi jäädytetään. Jäähdytyksen nopeudesta riippuen voidaan lasin pinnoille aiheuttaa eri suuruisia puristusjännityksiä, jotka lisäävät lasin kestävyyttä taivutuksesta aiheutuvia vetojännityksiä vastaan. Menetelmistä on kerrottu tarkemmin tämän insinööriyön luvuissa 4.2 ja 4.3. Kemiallisella lujituksella voidaan aikaansaada samankaltaisia tuloksia ja menetelmästä on kerrottu tarkemmin tämän insinööriyön luvussa 4.4.

3.3 Reunakäsittelyjen vaikutukset

Vaikka on tiedossa, että leikkauksen laadulla ja reunakäsittelyillä on suuri vaikutus lasin taivutuslujuuteen, ei asiasta löydy kirjallisuudesta kovin paljon tietoa. Asiaa on tutkittu yliopistoissa sekä kotimaassa että ulkomailla. F.A. Veer tutkijaryhmineen on julkistanut tuloksia Hollannissa, Delftin teknisellä yliopistolla suoritetuista taivutuskokeista, joissa

lasikappaleita koestettiin leikattu reuna alaspäin, vetoalueella, sekä leikattu reuna ylöspäin, puristusalueella. Kaikki koekappaleet olivat 6 mm paksusta lasilaatasta koneellisesti leikattuja ja osaan oli suoritettu reunojen hionta. Kappaleiden pituus oli 400 mm ja leveys 40 mm. Koestus suoritettiin kolmipistetaivutuksena. Tulokset on esitetty taulukossa 2. [9, s. 610.]

Taulukko 2. Delftin teknisellä yliopistolla suoritettujen 400 mm pitkien, 40 mm leveiden ja 60 mm paksujen lasikappaleiden taivutuskokeen tulokset. [9, s.610].

Koejärjestely	Keskimääräinen murtolujuus [MPa]	Keskihajonta [% keskiarvosta]	Kokeiden lukumäärä
Sekoitus	65,6	21,7	30
Leikkausreuna ylöspäin	100,3	32,8	30
Leikkausreuna alaspäin	49,4	12,6	30
Leikattu ja hiottu reuna	82,5	8,5	30

Tuloksista on havaittavissa, että leikatun reunan ollessa vetoalueella lasin keskimääräinen murtolujuus on huomattavasti pienempi kuin sen ollessa puristusalueella, jossa leikkauksen seurauksena mahdollisesti syntyneistä säröistä ei ole haittaa. Reunojen hionnalla vaikuttaisi tulosten perusteella olevan positiivinen vaikutus taivutuslujuuteen. Tämä on havaittavissa, kun vertaa leikattujen ja hiottujen kappaleiden koestustuloksia sekaisin koestettujen kappaleiden tuloksiin. On huomionarvoista, että hionta ei välttämättä jokaisen koekappaleen kohdalla lisää taivutuslujuutta. Huolellisella hionnalla päästään kuitenkin pieneen keskihajontaan ja suhteellisen korkeisiin lujuusarvoihin, mikä on lasirakenteiden mitoituksen kannalta merkittävä asia. [9, s.612.]

Samantyyppisiin tuloksiin on päädytty myös Aalto-yliopistolla tehdyissä koestuksissa, joissa koekappaleina oli 8 mm paksuja, 320 mm pitkiä ja 50 mm korkeita lasisauvoja. Lämpökäsittelmätöntä float-lasia koestettiin yhteensä neljä kymmenen koekappaleen sarjaa. Yhdessä sarjoista leikkausreunat olivat käsittelemättömät, niin sanotut lohkoruunat. Muissa sarjoissa reunakäsittelynä oli joko terävien särmien hionta, raakareunahionta tai kiiltoreunahionta. Koestus suoritettiin nelipistetaivutuksena. Tulokset on esitetty taulukossa 3. [10, s.1-3.]

Taulukko 3. Aalto-yliopistolla suoritettujen 320 mm pitkien, 50 mm leveiden ja 8 mm paksujen lasikappaleiden taivutuskokeen tulokset [10, s.3].

Reunakäsittely	Keskimääräinen murtolujuus [MPa]	Keskihajonta [% keskiarvosta]	Kokeiden lukumäärä
Lohkoreuna	62	19,4	10
Terävien särmien hionta	48	12,5	10
Raakareunahionta	52	7,7	10
Kiiltoreunahionta	66	7,6	10

Kuten tuloksista voidaan huomata, sekä terävien särmien hionta että raakareunahionta näyttävät alentaneen keskimääräistä murtolujuutta. Samalla keskihajonta on kuitenkin pienentynyt huomattavasti ja molemmissa sarjoissa huonoin koetulos onkin ollut parempi kuin reunakäsittlemättömien kappaleiden sarjassa. Kiiltoreunahionnalla on saavutettu hieman korkeampi keskimääräinen murtolujuus, kuin mihin lohkoreunaisten kappaleiden sarjassa ylettiin. Samalla keskihajonta on koesarjoista kaikista pienin. Koska keskihajonnalla on suuri merkitys lujuuden suunnitteluarvon määrittämisessä, voitaneen päätellä, että laadukkaalla reunakäsittelyllä on positiivinen vaikutus lasirakenteiden mitoituksen kannalta. [10, s.4.]

Delftin yliopiston ja Aalto-yliopiston koestusten perusteella saatujen murtolujuuksien arvoissa on eroa. Tätä voi osaltaan selittää otannan rajallisuus, koestuksissa käytettyjen koekappaleiden kokoero sekä eroavaisuudet koestuslaitteistossa ja koestusjärjestelyissä. Toisaalta koestustuloksissa esiintyvät erot ovat hyvä osoitus siitä kuinka vaikeaa lasin taivutuslujuuden tarkka määrittäminen on.

Reunakäsittelyjen vaikutusta ei huomioida DIN 18008 -standardin tai prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaisissa mitoitusmenettelyissä. Tavallisen lujittamattoman lasin heikentynyt kestävyys laatan reunoilla otetaan kuitenkin huomioon DIN 18008 -standardissa, jonka mukaan kestävyden mitoitusarvosta saa hyödyntää vain 80 % jos laatan reunoille syntyy vetoa. Sääntö pätee reunakäsittelystä tai leikkauksen laadusta huolimatta, joten paremmalla reunakäsittelyllä tai laadukkaammalla leikkauksella ei varsinaisesti kuitenkaan saa lisäarvoa mitoituksessa. [7, s.12.]

3.4 Sään ja ympäristön vaikutukset

Lasi on kemiallisesti hyvin kestävä eikä ulkoilmassa juuri esiinny aineita, jotka pystyisivät vaurioittamaan lasipintoja. Fysikaaliset vauriot sen sijaan ovat melko yleisiä. Vaurioiden syntymistä ja niiden vaikutuksia lasin lujuuteen on tutkittu käyttäen hyväksi keinotekoisia menetelmiä, joissa sään ja ympäristön vaikutusten sykliä on kiihdytetty. Lasipinnat on jälkikäteen tutkittu ja valokuvattu mikroskooppien avulla ja koekappaleille on suoritettu kuormituskoe. [3, s.53.]

Lasin lujuuden on havaittu heikkenevän 10...40 % kymmenessä vuodessa. Tulosten hajonnat ovat olleet suuria, eivätkä pelkästään lasivalmistajien laatueroja ja erot ympäristötekijöissä riittä selittämään niitä. Kaupunkiolosuhteissa vaikutukset ovat olleet huomattavasti merkittävämpiä kuin maaseudulla. Tämä on selitettävissä sillä, että katujen ja teiden hiekoitukseen käytettävät aineet sisältävät pieniä partikkeleita, jotka tuuli pystyy tempaamaan mukaansa. Nämä pienet lasia kovemmat partikkelit iskeytyvät lasien ulkopintoihin aiheuttaen mikroskooppisen pieniä säröjä ja halkeamia, jotka puolestaan toimivat rikkoutumislähtöinä. [3, s.53.]

Pienillä pintavioilla on taipumus muuttua suuremmiksi. Näin voi tapahtua esimerkiksi silloin, kun lasin ulkopinnalle negatiivisen tuulenpaineen vaikutuksesta syntyy tason suuntaisia vetojännitystiloja, jotka rikkovat kahden pienemmän pintavian välisen ehjän kannaksen muodostaen näin yhden suuremman vauriokohdan. Näin muodostuneet suuremmat vauriot luonnollisesti heikentävät lasia entisestään. [3, s.54.]

Sään ja ympäristön vaikutuksia ei huomioida prEN 16612 tai DIN 18008 mukaisessa mitoituksessa. Suunnittelijan on kuitenkin hyvä tiedostaa nämä seikat ja pohtia tarvittaessa, onko esimerkiksi rannikoiden tuulisille alueille hiekoitettavan jalkakäytävän läheisyyteen sijoittuvien lasilaattojen mitoituksessa syytä lisätä ylimääräistä varmuutta.

3.5 Kuormien vaikutusaikojen vaikutukset

Lasilaatat kestävät huomattavasti paremmin lyhytaikaisesti kuin pitkäaikaisesti vaikuttavia kuormia, mikä on seurausta lasin amorfisesta sisäisestä rakenteesta. Pitkäaikaisen kuormituksen vaikutuksesta lasilevyissä pääsee tapahtumaan virumista. Jatkuva kuor-

mitus pitää myös särönkasvun kokoajan käynnissä. Edellä mainituista syistä lasin murtojännitys pienenee huomattavasti kuorman vaikutusajan kasvaessa. Taulukossa 4 on esitetty R.L. Hersheyn ja T.H. Higginsin suorittaminen tutkimusten tulokset float-lasin murtojännityksistä kuorman vaikutusajan muuttuessa. [3, s.54.]

Taulukko 4. Float-lasin murtojännitys kuorman vaikutusajan muuttuessa [3, s.54].

Kuorman vaikutusaika	Murtojännitys [MPa]
0,1 sekuntia	152
10 sekuntia	137
60 sekuntia	101
2 tuntia	76
24 tuntia	58

Koska erot kestävydessä kuorman vaikutusajan muuttuessa ovat näinkin merkittäviä, lasirakenteiden mitoituksen kannalta määräävä tapaus ei välttämättä ole se, jossa rakenteeseen kohdistuu suurimmat kuormat. Mitoituksessa on siis aina syytä tutkia erikseen kaikki kuormitustapaukset ja käyttää lasille asianmukaisia lujuusarvoja kuormitusyhdistelmän aikaluokan mukaan.

Kuormitusajan merkitys on suurimmillaan silloin, kun kyseessä on tavallinen float-lasi. Mikäli lasi on kemiallisesti lujitettua, lämpölujitettua tai lämpökarkaistua, on kuormitusajan vaikutus huomattavasti pienempi. Tämä johtuu siitä, että lujitusprosesseissa lasin pinnoille luodaan pysyvä puristusjännitys. Lujitusasteesta riippuen tämä esijännitys joko pienentää taivutuksesta pinnoille aiheutuvien vetojännitysten haitallisia vaikutuksia tai jopa eliminoi ne kokonaan. Näin ollen myös särönkasvu estyy ja kuormitusajan vaikutus luonnollisesti pienenee. [11.]

Tämä seikka on huomioitu sekä prEN 16612 -standardiluonnoksessa että DIN 18008 -standardissa, joiden mukaiset mitoituslaskelmat on esitetty tämän insinööriyön luvussa 7. DIN 18008 -standardissa kuormien vaikutusajan huomioiva k_{mod} kerroin on jätetty kokonaan pois lujitetun lasin kestävyden laskentakaavasta ja prEN 16612 -standardissa sen vaikutus lujitetun lasin kestävyteen on pienempi kuin tavallisen float-lasin kestävyteen.

3.6 Käyttöiän vaikutus

Käyttöiän vaikutusta lasien lujuuteen on tutkittu TexasTech University:ssä vertailemalla 20 - 25 vuotta käytössä olleiden ikkunalasien murtokuormia uusien float-lasien murto-kuormiin. Rakennuksien ulkolaseissa tapahtuneet lujuusmuutokset ovat olleet tuloksista selvästi havaittavissa. Lujuuksien muutoksia tapahtuu myös ympäristörasituksilta suoja-
tuissa laseissa, mutta muutokset eivät ole yhtä merkittäviä. Ilmiö on selitettävissä sillä, että ulkoilman kanssa tekemisissä oleviin lasihin pääsee iskeytymään tuulen vaikutuksesta partikkeleita, jotka aiheuttavat vaurioita. Ajan saatossa vaurioita kertyy yhä enemmän ja vauriot yhdistyvät muodostaen laajempia vaurioalueita. [3, s.54.]

Käyttöiän vaikutuksia lasin lujuuteen ei huomioida prEN 16612 -standardiluonnoksen eikä DIN 18008 -standardin mukaisessa mitoituksessa. Näiden seikkojen huomioiminen jääkin siis täysin suunnittelijan oman harkinnan varaan.

3.7 Lasilaatan koon vaikutus

Lasilaatan suuri koko vaikuttaa sen lujuuteen heikentävästi. Ilmiö perustuu siihen, että suurempaan pinta-alaan mahtuu todennäköisesti enemmän mikroskooppisia säröjä, halkeamia tai muita vaurioita jo alun perin. Mitä enemmän näitä vaurioita lasin pinnalla esiin-
tyy, sitä todennäköisempää on, että joukossa on vähintään yksi tarpeeksi vakava, niin kutsuttu kriittinen vika, joka alentaa lasilevyn lujuutta merkittävästi. Myös lasiin käytön aikana syntyvien vaurioiden todennäköisyys kasvaa laatan koon myötä ja nämä käytön aikana syntyvät vauriot luonnollisesti heikentävät lasia myös. [12, s.39.]

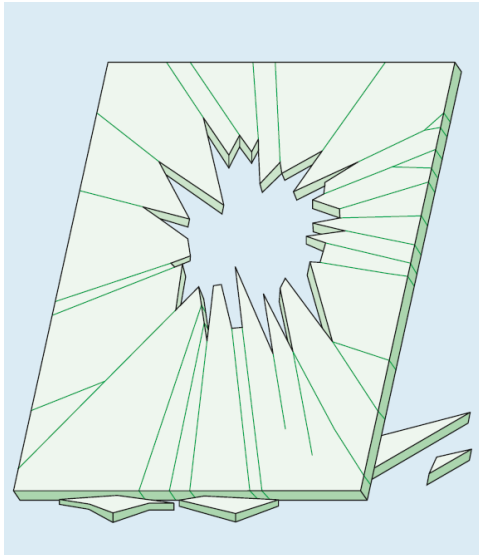
RIL 198-2001 -ohjekirjan prEN 13474 -standardiluonnokseen perustuvissa lasin kestä-
vyyden laskentakaavoissa lasilaatan koon vaikutusta lujuuteen pyrittiin huomioimaan k_A kertoimella. DIN 18008 -standardissa tai prEN 16612 -standardiluonnoksessa, joiden mukaiset mitoitusmenetelmät tässä insinööriyössä on esitelty, vastaavaa kerrointa ei kuitenkaan esiinny eikä lasilaatan koon vaikutusta sen kestävyteen huomioida.

4 Lasityypit

4.1 Tavallinen tasolasi

Tavallinen tasolasi valmistetaan float-menetelmällä, jossa sula lasi valutetaan sulatusuunista sulan tinan päälle, levitetään lasinauhaksi, jäädytetään ja leikataan haluttuun kokoon. Näin valmistettu lasi on paksuudeltaan tasaista, sen pinnat ovat erittäin sileät eikä siinä juurikaan esiinny vääristymiä. Float-lasi toimii perustana useimmille jalostetuille lasituotteille ja sitä voidaan esimerkiksi pinnoittaa, karkaista, laminoida, hiekkapuhaltaa, silkkipainaa, koristemaalata ja hopeoida. [4, s.14.]

Vaikka lasi onkin materiaalina lujempaa kuin usein luullaan, on tavallinen float-lasi rikkoutuessaan vaarallista sillä se hajoaa teräviksi kappaleiksi ja viiltovammojen riski on ilmeinen. Pelkkä tavallisen lasin paksuuden kasvattaminen ei tee siitä turvalasia, sillä vaikkakin sen murtolujuus kasvaa paksuuden myötä on se hajotessaan edelleen vaarallista. Mikäli vaarallisten sirpaleiden syntymistä on syytä välttää, tulee aina valita joko lämpökarkaistu tai laminoitu turvalasi. [4, s.43.]

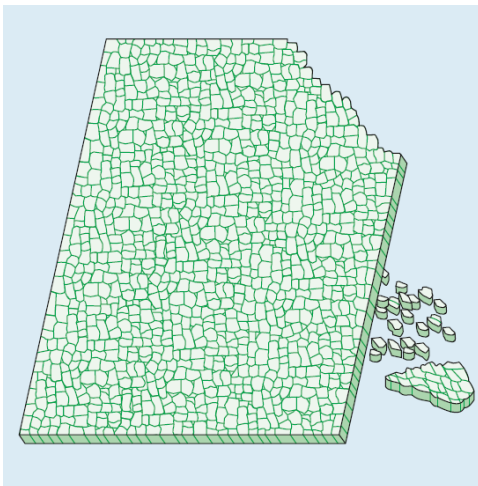


Kuva 1. Kun tavallista lasia kuormitetaan yli murtolujuuden, se rikkoutuu teräviksi kappaleiksi [4, s.44].

4.2 Lämpökarkaistu lasi

Lämpökarkaisussa lasi lämmitetään ensin uunissa noin 650 °C lämpötilaan, jolloin se pehmenee ja jännitykset katoavat. Seuraavaksi lasi jäädytetään nopeasti, jolloin lasin ulkopinnat jäähmettyvät laajentuneeseen tilaan hitaammin jäähtyvien sisäosien yhä vetäytyessä kasaan. Näin lasin ulkopinnoille syntyy pysyvä puristusjännitys ja sisäosiin vastaavasti vetojännitys. Prosessin tuloksena aikaansaatu lasi kestää taivutuksesta aiheutuvia rasituksia tavallista float-lasia paremmin. [3, s.85][4, s.44.]

Lämpökarkaistulla lasilla on erityinen turvallisuuspiirre. Se murenee rikkoutuessaan pieniksi, suhteellisen vaarattomiksi muruiksi. Standardissa EN 12150 on määritelty, miten lasin tulee rikkoutua, jotta se voidaan määritellä lämpökarkaistuksi turvalasiksi sekä annettu menetelmät, joilla vaatimusten täyttyminen voidaan todeta. [3, s.86.]



Kuva 2. Lämpökarkaistu turvalasi rikkoutuu hajotessaan pieniksi ja suhteellisen vaarattomiksi muruiksi [4, s.44].

Karkaistu lasi on hyvä vaihtoehto, kun rakenteen täytyy kestää raskaiden, ei terävien esineiden aiheuttamia kuormia. Sitä on perinteisesti käytetty silloin, kun tuuli-, lumi- tai lämpökuormat ylittävät tavallisen tai lämpölujitetun lasin lujuuden sekä silloin, kun sen turvallisuusominaisuuksia on määräyksissä vaadittu. Lämpökarkaistua lasia voidaan käyttää myös osana laminoituja laseja. Se ei kuitenkaan pysty laminoitun lasin osana tarjoamaan juuri minkäänlaisia jäännöslujuusominaisuuksia, sillä sen kyky siirtää jännityksiä rikkoutumisen jälkeen on murenevan rikkoutumistavan takia olematon. [4, s.44.]

4.2.1 Heat Soak -testattu lämpökarkaistu lasi

Karkaistu lasi voi harvinaisissa tapauksissa rikkoutua ikään kuin itsestään. Tämä johtuu lasimassan mahdollisesti sisältämästä nikkelisulfidista. Nikkellisulfidin α -faasi on stabiili yli 380 °C lämpötiloissa ja sen tilavuus on pienempi kuin alle 380 °C lämpötiloissa stabiilin β -faasin tilavuus. Kun lasi lämpökarkaisuprosessin aikana lämmitetään 650 °C lämpötilaan, muuttuvat NiS-kiteet α -faasiin. Lasin jäähtyminen suoritetaan kuitenkin niin nopeasti, ettei α -faasi ehdi muuttua takaisin β -faasiin. Nikkellisulfidi jää näin ollen epästabiiliin tilaan ja α -faasi koittaa karkaisun jälkeen hitaasti muuttua takaisin β -faasiin. [3, s.62.]

Mikäli nikkelisulfidin erkauma on riittävän suuri ja sijaitsee lasin keskiosan vetojännitysalueella, saattaa faasimuutoksesta aiheutuva tilavuuden kasvu aiheuttaa niin suuren jännityksen, että lasi rikkoutuu. NiS-jäämillä on olemassa kriittinen halkaisija, joka on riippuvainen karkaisun tasosta sekä kiteen sijainnista. Tätä kriittistä halkaisijaa suurempi koko aiheuttaa lasien spontaania rikkoutumista. Esimerkiksi karkaistun lasin, jonka sisäinen vetojännitys on 50 - 60 MPa:n välillä rikkoutumisen voi kokeiden perusteella aiheuttaa NiS-jäämä, jonka vähimmäishalkaisija on 44 - 58 μm . [3, s.62,63.]

Heat Soak -testauksessa pyritään kiihdyttämään nikkelisulfidin faasimuutosta lämmittämällä karkaistu lasi uudelleen hieman alle 300 °C lämpötilaan useiksi tunneiksi. Tavoitteena on saada lasi hajoamaan jo testauksen aikana, mikäli lasi sisältää haitallisia nikkelisulfidijäämiä. Menetelmän avulla pystytään merkittävästi pienentämään lämpökarkaistun lasin spontaanin hajoamisen riskiä. On kuitenkin syytä huomata, että Heat Soak -testaus ei ole absoluuttinen tae siitä, ettei rikkoutumista voisi myöhemmin tapahtua. [3, s.62.]

4.3 Lämpölujitettu lasi

Lämpölujitettua lasia valmistetaan samaan tapaan kuin lämpökarkaistua lasia. Suurin ero lämpökarkaisun ja -lujituksen välillä on se, että lämpölujitetun lasin jäähtyminen tapahtuu hitaammin. Hitaamman jäähtymisen takia lasin jähmettyminen tapahtuu tasaisemmin ja lasin pinnoilla vallitsevat puristusjännitykset sekä sisäosissa vallitsevat vetojännitykset jäävät pienemmiksi. Lämpölujitettu lasi ei ole yhtä kestäväää kuin lämpökarkaistu lasi eikä se kestä lämpötilojen muutoksia yhtä hyvin. [3, s.88.]

Rikkoutuessaan lämpölujitettu lasi hajoaa suuremmiksi kappaleiksi kuin lämpökarkaistu lasi. Kappaleet ovat teräviä ja vaarallisen viiltäviä tavallisen lasin tapaan. Lämpölujitetun lasin etuna lämpökarkaistuun lasiin verrattuna voidaan pitää sitä, ettei nikkelisulfidijäämistä aiheutuvaa spontaanin rikkoutumisen riskiä juurikaan esiinny. Lämpölujitetulla lasilla on myös lämpökarkaistua lasia paremmat jäännöslujuusominaisuudet, mikäli sitä käytetään laminoitujen lasilevyjen osana. Tästä syystä se on oiva valinta esimerkiksi lasikatteiden ja -lattioiden laminoitujen lasilaattojen materiaaliksi. [3, s.88][4, s.44.]

4.4 Kemiallisesti lujitettu lasi

Lasin kemiallinen lujitus perustuu suolakylpyprosessiin, jossa tapahtuvassa ionivaihdossa lasipinnan natriumionit korvautuvat suuremmilla kaliumioneilla. Prosessi aiheuttaa lasin pinnoille puristusjännityksen ja kemiallisesti lujitettu lasi onkin lämpökarkaistun lasin tapaan mekaanisesti huomattavasti tavallista lasia kestävämpää. Kemiallisesti lujitettua lasia voidaan leikata, mutta lujituksella saavutetut puristusjännitykset katoavat leikatausta reunasta. [1, s.240.]

Kemiallisesti lujitettu lasi rikkoutuu tavallisen lasin tapaan suurehkoiksi, viiltäviksi kappaleiksi. Sillä ei siis ole lämpökarkaistulle lasille tyypillisiä turvaominaisuuksia. Laminoitujen lasilevyjen osana kemiallisesti lujitettu lasi tarjoaa kuitenkin jäännöslujuuskapasiteettia, sillä se pystyy rikkoutumiskuvionsa ansiosta siirtämään jonkin verran kuormia myös hajoamisensa jälkeen. [1, s.240.]

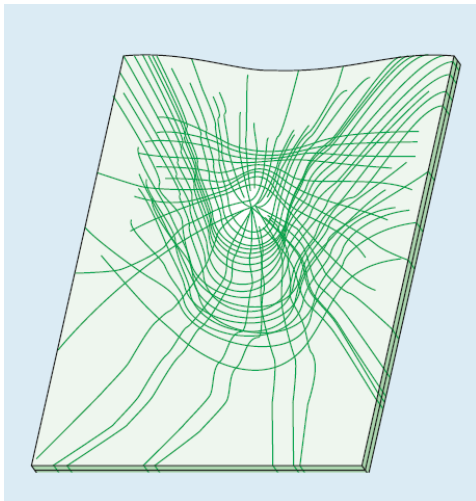
4.5 Laminoitu lasi

Laseja voidaan yhdistää toisiinsa laminoimalla. Yleisimmin käytetty menetelmä lasien laminoinnissa on foliolaminointi, jossa välikerroksena toimii kalvo. Välikerros asetetaan lasikerrosten väliin ja kokoonpano altistetaan korkealle lämpötilalle ja paineelle, jolloin kerrosten sulautuessa yhteen syntyy lopputuote. Yleisimmin käytetty materiaali laminoitikalvona on PVB. Nykyisin välikerrosmateriaaliksi on tarjolla kuitenkin muitakin vaihtoehtoja. Yksi näistä on DuPontin kehittämä ja valmistama SentryGlas, joka on huomattavasti jäykempää ja kestävämpää kuin tavanomainen PVB. [3, s.88][13, s.10.]

Vaihtoehtoinen menetelmä foliolaminoinnille on laminointiprosessi, jossa välikerros valmistetaan kaatamalla lasi- tai muovimateriaalikerrosten väliin nestettä, minkä jälkeen kokoonpano kovetetaan kemiallisesti tai ultraviolettivalolla, jolloin syntyy lopputuote. Laminointiin käytettävä neste on yleisimmin hartsia, mutta myös muita materiaaleja, kuten polyuretaania käytetään. [3, s.88][13, s.10.]

Laminoitu lasi voi koostua useista lasikerroksista ja pitää sisällään erilaisia lasia. Laminoidun lasin lujuuteen ja jäykkyyteen vaikuttaa lasikerrosten lukumäärän ja paksuuden, käytettyjen lasityyppien sekä välikerrosten materiaalien ja paksuuksien lisäksi esimerkiksi lämpötila ja käyttöikä. Kun kaikki edellä mainitut seikat tunnetaan, voidaan laminoidulle lasilaatalle määritellä tehollinen paksuus taipuma- ja jännitystarkasteluja varten. Tehollinen paksuus joudutaan usein määrittelemään reilusti varmalle puolelle, koska välikerrosten ominaisuuksia ei useinkaan tunneta riittävän hyvin. [8, s.25.]

Laminoitujen lasien erityispiirre on se, että kun lasia ylikuormitetaan, se murtuu tavallisen lasin tavoin, mutta lasinsirpaleet pysyvät kiinni laminointikerroksessa. Levy pysyy yhtenäisenä, mikä vaikeuttaa läpitukeutumista ja minimoi haavojen syntymisen riskin. Rikkoutumisen seurauksena syntyvät lasinpalat eivät myöskään pääse putoamaan mahdollisesti alla olevien ihmisten päälle. Mikäli laminoitu lasi täyttää standardin EN ISO 12543-2 mukaiset vaatimukset, sitä voidaan pitää laminoituna turvalasina. [4, s. 44][13, s.8.]



Kuva 3. Laminoidun lasin rikkoutuessa lasin sirpaleet jäävät kiinni laminointikalvoon ja lasilevy pysyy yhtenäisenä. Ominaisuus tekee laminoidusta lasista materiaalina ainutlaatuisen lasirakenteiden suunnittelun kannalta. [4, s.44.]

Edellisessä kappaleessa mainittujen turvallisuusominaisuuksien lisäksi laminoidulla lasilla on yksi erittäin tärkeä ja lasirakenteiden suhteen ainutlaatuinen ominaisuus; jäännöslujuus. Jäännöslujuuteen vaikuttavia seikkoja ovat lasin vaurioasteen ja vaurioitumattomien lasikerrosten lisäksi käytetyt lasityypit sekä käytetty laminointimateriaali. Lämpölujitettu, kemiallisesti lujitettu tai käsittelemätön lasi ovat rikkoutumiskuvioidensa ansiosta jäännöslujuuden kannalta huomattavasti parempia vaihtoehtoja kuin lämpökarikaistu lasi. Välikerrosmateriaaleista jäännöslujuuden kannalta paras vaihtoehto on SentryGlas, jonka avulla on mahdollista saavuttaa merkittäviä jäännöslujuusarvoja jopa silloin, kun kaikki lasikerrokset ovat rikkoutuneet. [5, s.377][14, s.15.]

5 Lasityypin valinta

Oikeanlaisen lasin valinta käyttökohteen mukaan on yksi lasirakenteiden suunnittelijan tärkeimmistä tehtävistä. Tehtävä vaikuttaa ensi kuulemalta yksinkertaiselta, mutta on itse asiassa melko haastavaa. Euroopan tasolla lasirakenteiden suunnittelusta ei ole toistaiseksi olemassa virallista standardia ja Suomessa voimassa olevat määräykset ja standardit antavat ohjeita vain hyvin niukasti tai yleisluonteisesti.

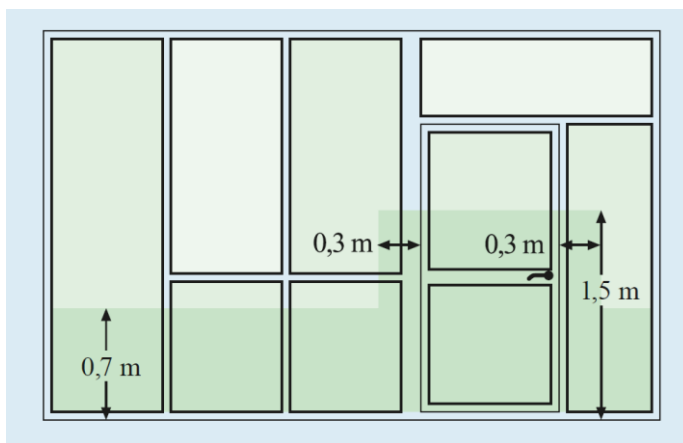
Suomen rakentamismääräyskokoelman osassa F2 todetaan, että lasirakenne tulee mitoitaa ja lasin tyyppi valita niin, ettei rikkoutuminen aiheuta henkilön putoamisvaaraa eivätkä putoavat sirpaleet aiheuta alle jäävän henkilön haavoittumisvaaraa. Karkaistun turvalasin käytön todetaan sen suuremman taivutuslujuuden takia olevan perusteltua kohteissa, joissa on korkea lujuusvaatimus tai lasi on alttiina toistuvalla dynaamiselle tai termiselle kuormitukselle. Esimerkkeinä mainitaan ovet, liikuteltavat väliseinät, ikkunat ja ulkoseinä- sekä valokatelasitukset. Nämä rakentamismääräyskokoelman antamat ohjeet jättävät kuitenkin monta asiaa avoimeksi. [15, s.10.]

Tähän lukuun on pyritty kokoamaan ohjeita lasityypin valintaan käyttökohteen mukaan. Ohjeita on kerätty rakentamista koskevista määräyksistä, standardiluonnoksista, ulkomaisista standardeista, lasirakentamista käsittelevästä kirjallisuudesta sekä lasivalmistajien antamista ohjeista. Tavoitteena on helpottaa suunnittelijan tehtävää, vaikkakin yksiselitteisten ohjeiden antaminen lasityypin valinnasta on melko hankalaa.

5.1 Pystysuorat lasitukset

Tässä luvussa esitetyt ohjeet koskevat kaikkia pystysuoria lasituksia. Lasikaiteille ja muille putoamissuojana toimiville lasituksille asetetuille lisävaatimuksille on omistettu lisäksi kokonaan oma kappaleensa.

Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan yleisön käyttöön suunnitelluissa tiloissa tulee aina käyttää turvalasia ovissa ja niiden välittömässä läheisyydessä, mikäli lasi on alempana kuin 1,5 metrin korkeudella. Muualla samaa suositusta tulee noudattaa 0,7 metrin korkeuteen asti. Asunnoissa sallitaan turvalasin korvaaminen vähintään 6 mm:n paksuisella tavallisella tasolasilla, mitä ei kuitenkaan voi suositella sillä tavallinen tasolasi rikkoutuu murtuessaan vaaralliseksi kappaleiksi paksuudestaan riippumatta. [15, s.10][4, s.45.]



Kuva 4. Yleisön käyttöön suunnitelluissa tiloissa on turvalasin käyttö pakollista kuvan osoittamilla alueilla [4, s.45].

Rakentamismääräyskokoelman ohjeet koskevat ainoastaan lasituksia, jotka ovat matalalla, törmäysalueella, eikä muita täsmällisiä ohjeita juuri anneta. Saksalainen DIN 18008 -standardi puolestaan antaa määräyksiä koskien jatkuvasti tuettujen lasilaattojen lasityypin valintaa, kun lasin yläreuna sijaitsee yli neljän metrin korkeudella mistä tahansa julkisesta paikasta. Tällöin ainoastaan monoliittisen lämpökarkaistun lasin käyttö on sallittua, ellei lasia ole tuettu jatkuvasti kaikilta reunoiltaan. Jatkuvasti kaikilta reunoiltaan tuetuille lasilaatoille ei ole asetettu lasityypin valinnan suhteen vaatimuksia. Lämpökarkaistun lasin on kuitenkin tuentatavasta riippumatta oltava aina heat-soak testattua turvalasia, jos sen yläreuna on yli neljän metrin korkeudella julkisesta paikasta, myös lasin ollessa osa eristyslaselementtiä. [16, s.5.]

DIN 18008 -standardissa on annettu määräyksiä myös pistemäisesti kiinnitettyjen lasilaattojen lasityypin valinnasta. Mikäli lasi on kiinnitetty ruuvien avulla, tulee standardin mukaan aina käyttää lämpökarkaistusta tai -lujitetusta lasista koostuvaa laminoitua lasia. Jos kiinnitys hoidetaan reunapuristinten avulla, sallitaan myös vähintään 6 mm paksun lämpökarkaistun ja Heat Soak -testatun turvalasin tai tavallisesta float-lasista koostuvan laminoitun lasin käyttö. [17, s.9.]

5.2 Lasikaiteet ja putoamissuojana toimivat lasitukset

Suomen rakentamismääräyskokoelman mukaan, mikäli karkaistun lasin rikkoutumisesta aiheutuu putoamisvaara, tulee käyttää lankalasia, laminoitua lasia tai laminoitun ja karkaistun lasin yhdistelmää. Ohje on jälleen melko yleisluonteinen. [15, s.10.]

Lasivalmistaja Pilkington antaa hieman täsmällisempiä ohjeita, joiden mukaan kaidelasituksissa käytettävän lasin tulee aina olla turvalasia. Lämpökarkaistun turvalasin käyttö on sallittua ainoastaan silloin, kun putoamiskorkeus on alle 500 mm. Putoamiskorkeuden ollessa tätä suurempi, tulee aina valita laminoitu turvalasi. Kaidelasitusten suunnittelussa on lattialasitusten tavoin huomioitava lasin rikkoutumisesta aiheutuvat seuraukset ja pohdittava onko mitoituksessa syytä huomioida kaiderakenteen osittainen vaurioituminen tai esimerkiksi yhden lasilaatan rikkoutuminen. Jos kyseessä on ainoastaan alareunastaan tuettu lasikaide, suositellaan yläreunassa tai sen lähellä käytettävän käsijohdetta, joka voidaan jännittää useamman lasilaatan yli ja joka näin ollen toimii putoamissuojana jos yksi lasilaatoista rikkoutuu. [4, s.72-73.]

Putoamissuojana toimivia lasikaiteita tai lasiseiniä koskevia erityisohjeita annetaan myös DIN 18008 -standardin osassa 4. Standardi jakaa lasikaiteet kolmeen eri luokkaan riippuen siitä, miten kaiteena toimivat lasilaatat on tuettu ja siitä, onko kaiteessa muuta putoamissuojana toimivaa rakennetta kuin itse lasi.

A luokkaan kuuluvat lasikaiteet ovat ainoastaan alareunastaan tuettuja eikä edes lasin yläreunassa kulje muuta putoamissuojana toimivaa rakennetta, kuten metallista käsijohdetta. Tällaisissa tapauksissa tulee standardin mukaan aina käyttää laminoitua turvalasia ja lasilaatan kestävyys tulee tarkistaa myös tilanteessa, jossa kaikki lasikerrokset ovat rikkoutuneet. [18, s.6.]

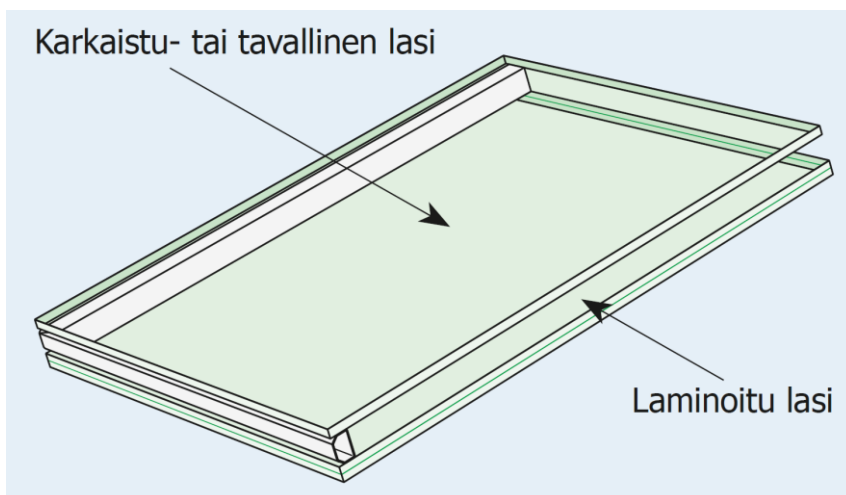
Luokkaan B kuuluvat lasikaiteet, joiden yläreunassa kulkee esimerkiksi metallinen kaide. Tällaisissakin ratkaisuissa on ainoastaan laminoidun lasin käyttö sallittu, mutta lasin kestävyysvarmistaminen vaaditaan ainoastaan tilanteelle, jossa yksi lasikerroksista on rikkoutunut. [18, s.6.]

Luokka C pitää sisällään sellaiset lasikaiteet, joissa lasilaatat ovat kaikilta reunoiltaan jatkuvasti tuettuja. Tällaisissa tapauksissa standardi sallii lämpökarkaistun lasin käytön kaidelasina. Lisäksi lämpökarkaistun lasin käyttö on sallittua putoamissuojana toimivien eristyslaselementtien törmäyspuolen lasina. Tällaisissa tapauksissa ainakin yhden eristyslaselementin muista lasista on kuitenkin oltava laminoitua lasia. [18, s.6.]

5.3 Eristyslaselementeistä koostuvat valokatteet

RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirja, antaa joitain ohjeita lasikatteiden lasilaattojen valintaan. Ulommaiseksi lasilaataksi suositellaan lämpökarkaistua lasia ja sisimmäiseksi laminoitua lasia. Mikäli kyseessä on 3K-eristyslaselementti, saa keskimäinen lasilevy ohjeen mukaan olla tavallista tasolasia. Lämpötilakuormista aiheutuvan rikkoutumisriskin vuoksi voidaan sisimpänä lasina laminoidun lasilevyn sijaan kirjan mukaan käyttää myös lämpökarkaistua tai -lujitettua lasia. Lasien paksuudet valitaan tapauskohtaisesti. Lankalasia ei sen heikon mekaanisen lujuuden vuoksi suositella käytettäväksi lasikatteissa. [2, s.164.]

Myös lasivalmistaja Pilkington antaa samankaltaisia suosituksia valokatteissa käytettävien lasilaattojen valintaan perustapauksissa. Ylimmäksi lasiksi suositellaan tavallista tai karkaistua lasia ja alimmaksi laminoitua lasia. [4, s.71.]



Kuva 5. Perussuositus lasien valinnasta valokatteiden 2K-eristyslaselementteihin [4, s.71].

Saksalaisessa DIN 18008 -standardissa ei anneta alimman lasilevyn valintaan juuri liikumavaraa, vaan kattolasituksissa alimmaiseksi lasiksi on valittava laminoitu turvalasi, joka on valmistettu tavallisesta tai lämpölujitetusta lasista. Mikäli tehollinen jänneväli pääkantosuuntaan on alle 700 mm, sallitaan myös lankalasin käyttö. [16, s.5.]

Myös laminoinnissa käytettyjen välikerrosten paksuuksista on DIN 18008 -standardissa annettu määräyksiä, jotka riippuvat tuentatavasta ja jännevälistä pääkantosuuntaan. Yleisesti välikerroksen nimellispaksuuden tulee olla 0,76 mm. Mikäli tehollinen jänneväli pääkantosuuntaan on korkeintaan 800 mm ja lasilaatta on kaikilta sivuiltaan jatkuvasti tuettu, sallitaan myös nimellispaksuudeltaan 0,38 mm:n välikerrokset. [16, s.5.]

Standardissa todetaan lisäksi, että eristyslaselementtien alimman lasilaatan kestävyys on varmistettava myös tilanteessa, jossa ylemmät lasilaatat pettävät. Ylempien lasilaattojen pettämistä voidaan käsitellä onnettomuustilanteena. [16, s.5.]

Määräyksistä poikkeaminen sallitaan, mikäli muulla tavoin varmistetaan rakenteen riittävä rikkoutumisen jälkeinen kuormienkantokyky ja estetään lasikappaleiden putoamisesta aiheutuvat riskit. Esimerkkinä mainitaan riittävän kestävä, pienisilmäisen verkon käyttäminen valokatteen alapuolella. [16, s.5.]

5.4 Yhdestä lasilaatasta koostuvat valokatteet

Yhdestä lasilaatasta koostuvia valokatteita ovat esimerkiksi ulkotiloissa sijaitsevat katokset. Tällaisia katekattaisuuksia koskevia sääntöjä on annettu ainakin DIN 18008 -standardissa, jonka mukaan yksittäisestä lasilaatasta koskevia valokatteita koskevat samat säännöt kuin eristyslaselementtien alinta lasilaattaa. Ainoastaan tavallisesta float-lasista tai lämpölujitetusta lasista valmistetun laminoidun turvalasin sekä tietyissä poikkeustapauksissa lankalasin käyttö on siis sallittua. [16, s.5.]

Lisäksi yhdestä lasilaatasta koostuvien valokatteiden tapauksessa on syytä huomata, että itse lasilaatan osittainen vaurioituminen on syytä huomioida mitoituksessa ja riittävä kantavuus varmistettava myös vaurioituneessa tilassa. Samanlaista turvamarginaalia kuin kahdesta tai useammasta lasilaatasta koostuvan eristyslaselementin tapauksessa, jossa yhden lasilaatan rikkouduttua muut lasilaatat pystyvät vielä kantamaan kuormia, ei nimittäin yhdestä lasilaatasta koostuvalla valokatteella ole.

5.5 Lattialasitukset ja lasiportaat

Lattialasituksissa suositellaan käytettäväksi vähintään kolminkertaisia laminoituja turvalaseja. Ylin lasikerros toimii ainoastaan suojakerroksena naarmuuntumista vastaan ja se voidaan myös karhentaa kitkan kasvattamiseksi. Lämpökarkaistun lasin käyttöä tulisi välttää lattialasituksissa käytettävissä laminoituissa lasilaatoissa, sillä se ei mahdollista lasilaatalle lähes minkäänlaista vaurioitumisen jälkeistä kuormien kantokykyä. Tavallinen float-lasi tai lämpölujitettu lasi ovat parempia vaihtoehtoja ja niiden käyttö on suositeltavaa, mikäli riittävien lujuusarvojen saavuttaminen ei välttämättä vaadi karkaistun lasin käyttöä. Lattialasituksia suunniteltaessa on aina syytä huomioida ainakin lasilaatan osittainen rikkoutuminen ja pohtia, mitä kuormia laatan tulisi kestää milläkin vaurioasteella ja kuinka kauan. Näitä vaurioitumisen jälkeiseen kantokykyyn liittyviä asioita on avattu tarkemmin luvussa 6. [4, s.73.]



Kuva 6. Lattialasituksissa on aina syytä käyttää vähintään kolminkertaista laminoitua lasia. Päälimmäinen lasikerros voidaan karhentaa kitkan lisäämiseksi. [4, s.73].

6 Rikkoutumisesta aiheutuvien riskien huomiointi

Tavanomaiset teräs- ja betonirakenteet mitoitetaan yleensä teräksen myötölujuuden mukaan ja mitoituksessa pyritään sitkeään murtotapaan. Näin toimimalla pyritään luomaan tärkeä turvamarginaali rakenteen pettämisen ja sitä mahdollisesti seuraavan sortumisen välille. Lasi ei materiaalina tarjoa tällaisia mahdollisuuksia vaan monoliittinen, yhdestä kerroksesta koostuva lasilaatta rikkoutuu kappaleiksi ja sortuu välittömästi jännitysten ylittäessä murtolujuuden. Tällainen yhtäkkinen rikkoutuminen aiheuttaa luonnollisesti ongelmia rakenteiden riskinhallinnassa. [11.]

Myös lasirakenteissa marginaali rakenteen rikkoutumisen ja sitä seuraavan sortuman välille voidaan kuitenkin pyrkiä luomaan käyttämällä useammasta kerroksesta koostuvia laminoituja laseja. Tällöin osan kerroksista vaurioituttua, loput kerrokset kykenevät vielä kantamaan kuormia ja jopa kaikkien lasikerrosten vaurioituttua laatalla on laminointikerrosten ansiosta jonkin verran kantokykyä. Näin rakenteen sortumista voidaan viivyttää tai se voidaan mahdollisesti jopa estää kokonaan. [11.]

Hollantilainen lasirakenteiden suunnittelun asiantuntija Freek Bos on väitöskirjassaan tutkinut sitä, miten suunnittelijat ovat käytännössä pyrkineet pitämään lasin rikkoutumisesta aiheutuvat riskit kurissa. Tutkimuksen mukaan suunnittelijoiden keskuudessa vallitsee yhteisymmärrys siitä, että jonkin asteinen vaurioituminen lasirakenteissa tulee huomioida ja kyseisen vaurion ilmetessä tulee riittävä jäännöslujuus (residual load-bearing capacity) taata henkilövahinkojen tai muuten kohtuuttomien vahinkojen välttämiseksi.

Käsitykset siitä, mitkä vaurioasteet ja kuormat tarkasteluissa tulisi ottaa huomioon, kuitenkin vaihtelevat. Suunnittelijat pitävät yleisesti lämpölujitetun tai käsittelemättömän lasin käyttöä laminoiduissa lasilevyissä suositeltavana, koska ne mahdollistavat rikkoutumiskuvionsa ansiosta paremman jäännöslujuuden. Lämpökarkaistua lasia käytetään mielellään ainoastaan, kun sen korkeita lujuusarvoja välttämättä tarvitaan. [5, s.xiv.]

Laminoidun lasilaatan valmistuksessa käytettyjen lasikerrosten lisäksi myös laminointimateriaalilla sekä laminointikerrosten paksuudella on luonnollisesti vaikutusta jäännöslujuuteen. Laminoidun lasin rikkoutumisen jälkeistä käyttäytymistä on tutkittu runsaasti eri yliopistoilla ympäri maailmaa, mutta toistaiseksi riittäviä tietoja ei ole saatu hankittua, jotta eri välikerrosmateriaalien tarjoamat mahdollisuudet kyettäisiin tarkasti huomioimaan laskennallisilla keinoin.

Uudenaikaisilla, jäykemmillä välikerrosmateriaaleilla voidaan yleensä päästä huomattavasti parempiin rikkoutumisen jälkeisiin kestävyysarvoihin kuin perinteisillä välikerrosmateriaaleilla ja niiden toimintakyky säilyy myös tavanomaisia laminointimateriaaleja korkeammassa lämpötiloissa. Kuitenkin on syytä huomata, että kesän aikana laminointimateriaalin lämpötila saattaa kohota jopa noin 80°C:een ja tässä lämpötilassa myös uudenaikaisemmat laminointimateriaalit, kuten SentryGlas menettävät lujuuttaan ja jäykkyytään jo merkittävästi. Asiaan on etsitty ratkaisua muun muassa kokeilemalla erilaisten teräsverkkojen ja ohuiden perforoitujen metallilevyjen käyttöä laminointikerroksessa ja testaamalla tällaisten lasilaminaattien toimintaa eri lämpötiloissa. [19, s.253,727.]

Saksalainen, vuonna 2010 julkaistu DIN 18008 vaikuttaisi olevan ensimmäinen standardi, jossa lasirakenteille asetetaan jäännöslujuusvaatimuksia osana turvallisuuskonseptia. Jäännöslujuudelle asetetut vaatimukset riippuvat rakenteen tyypistä, vaurioitumisasteesta sekä ulkoisesta kuormituksesta. Jäännöslujuudelle asetettujen ehtojen toteutuminen voidaan osoittaa laskennallisesti, silloin kun lasikerroksista vain osa on murtunut. Tällöin laskennassa ei huomioida rikkoutuneeksi oletettuja lasikerroksia lainkaan. Jos jäännöslujuudelle myös kaikkien lasikerrosten rikkouduttua on asetettu vaatimuksia, on vaatimusten toteutuminen osoitettava kokeellisesti. Tällaisia rakenteita ovat esimerkiksi jotkin lasikaiteet. [7, s.7,13.]

7 Lasilaatan mitoitus

7.1 Yleistä

Lasilaattojen mitoituksesta ei ole olemassa Euroopan tasolla virallista standardia. Tässä insinööriyössä on esitettyä vuonna 2010 julkaistun saksalaisen DIN 18008 -standardin mukainen lasilaattojen mitoitusmenettely sekä vuonna 2013 laaditun eurooppalaisen prEN 16612 -standardiluonnoksen mukainen mitoitusmenettely. Suunnittelijan on syytä huomata, että näiden mitoitusmenetelmien käyttöön tulee aina hankkia erikseen lupa tapauskohtaisesti. Lisäksi on syytä huomata, että prEN 16612 mukainen mitoitusmenetelmä on vasta standardiluonnoksen tasolla ja siihen voi tulla muutoksia ennen kuin standardi otetaan virallisesti käyttöön. [11.]

Suomessa laajasti käytössä ollut RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirja perustuu aiempaan, vuonna 1999 laadittuun standardiluonnokseen prEN 13474, jonka pohjalta tässä insinööriyössä esitetty uudempi standardiluonnos on kehitelty. Tässä esitettyä standardiluonnosta voidaankin pitää jossain määrin kehittyneempänä versiona aiemmasta. Yksi tärkeä ero aiempaan prEN 13474 -standardiluonnokseen verrattuna on se, että nykyinen prEN 16612 -standardiluonnos perustuu täysin eurokoodeihin. Vanha standardiluonnos oli kehitetty eurokoodien standardiluonnosten pohjalta ja on sikäli nykyään hieman ajastaan jäljessä. [11.]

Vertailulaskelmissa tämän insinööriyön luvussa 9 on esitetty lasilaattojen kestävyksiä eri standardien, standardiluonnosten ja ohjeiden mukaisesti laskettuina. Näiden vertailulaskelmien avulla voi saada käsityksen siitä, miten menetelmät eroavat toisistaan ja mikä menetelmä antaa eniten varmuutta missäkin mitoitusilanteessa. Vertailu voidaan suorittaa pelkästään lasilaattojen laskennallisia kestävyksiä vertailemalla, sillä jännitysten ja taipumien laskenta suoritetaan samalla tavoin kaikissa tapauksissa. On kuitenkin syytä huomata, että esimerkiksi kuormitusyhdistelmien muodostamisessa ja kuormien laskennassa on hieman eroa eurokoodien esistandardeihin perustuvan RIL 198-2001 -ohjekirjan ja muiden vertailussa mukana olevien menetelmien välillä. [11.]

7.2 DIN 18008 -standardin mukainen mitoitus

Koska lasirakentaminen lisääntyy jatkuvasti eikä Euroopan tasolla ollut lähitulevaisuudessa näköpiirissä hyväksytyä standardia lasirakenteiden mitoituksesta, päätettiin Saksassa vuonna 2003 perustaa oma standardoimisvaliokunta kansallisen DIN-standardin laatimiseksi. Standardin DIN 18008 ensimmäiset kaksi osaa, yleisosa ja lineaarisesti tuettuja lasilaattoja käsittelevä osa, julkaistiin joulukuussa 2010 ja niistä on nykyään saatavilla myös englanninkieliset käännösversiot. Tämän insinööriyön puitteissa käsitellään lähinnä näitä kahta osaa. [19, s.465.]

Tähän päivään mennessä standardista on julkaistu yhteensä viisi osaa virallisina standardeina ja kuudes osa standardiluonnoksena. Myöhemmissä osissa käsitellään muun muassa pistemäisesti tuettujen lasilaattojen, lasikaiteiden sekä lasilattioiden ja -portaiden suunnittelua sekä näille rakenteille asetettuja erityisvaatimuksia. Osat kolmesta kuuteen on julkaista tähän mennessä vain saksankielisinä ja tässä insinööriyössä on esitetty näistä osista vain joitain poimintoja.

7.2.1 Käyttö- ja murtorajatilan tarkastelut

DIN 18008 perustuu rajatilamitoitukseen ja osavarmuuslukumenettelyyn ja on näin ollen periaatteeltaan samankaltainen eurokoodien kanssa. Käyttö- ja murtorajatilan kuormitusyhdistelmät sekä näiden kuormien aiheuttamien vaikutusten mitoitusarvot tulee määrittää EN 1990 ja EN 1991 mukaisesti.

Jännitysten ja taipumien laskenta tulee suorittaa siten, että tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin todellisuutta ja paikalliset jännityshuiput (esimerkiksi porattujen reikien kohdalla) tulevat huomioiduksi. [7, s.10.]

Lasilaatan taipumat murtorajatilassa voivat olla merkittävästi suurempia kuin 0,2...0,5 kertaa laatan paksuus. Tällöin lineaarisen teorian mukaan laskettujen laatan taipumien ja jännitysten virheet kasvavat merkittävän suuriksi laatan keskipinnan venymisen vuoksi. Todellisuutta vastaavaa ja taloudellista mitoitusta tavoiteltaessa onkin huomiotava suurista taipumista aiheutuva laatan geometrinen epälineaarisuus. Kun taipumat kasvavat kuorman lisääntymisen myötä, laattaan syntyy kalvojännityksiä, ts. laatan pinnan suuntaisia vetojännityksiä. Suuresti taipuneessa laatussa on siis sekä taivutusjännityksiä että vetojännityksiä. Kalvojännityksiä voi syntyä vain sellaisiin laattoihin, joissa

laatan reunaehdot sallivat jännitysten uudelleenjakautumisen. Esimerkiksi kahdelta vastakkaiselta sivultaan tuettuun laattaan ei synny kalvovoimia, vaan laatta toimii palkkirakenteen tavoin. [2, s.45.]

DIN 18008 -standardin mukaan laskennassa saa huomioida suurista taipumista aiheutuvat laatan geometrisen epälineaarisuuden hyödylliset vaikutukset [7, s.10]. Ne voidaan huomioida FEM-laskentasovellusten avulla. Liitteessä 1 on esitetty myös suuret taipumat huomioiva jännitysten ja taipumien käsinlaskentamenetelmä kaikilta neljältä sivultaan tuetuille suorakulmaisille laatoille, joihin kohdistuu ainoastaan tasoa vastaan kohtisuoria kuormia.

Tukirakenteiden muodonmuutokset ja siirtymät on huomioitava jännityksiä arvioitaessa. Esimerkiksi laatan reuna voidaan olettaa jatkuvasti tuetuksi, mikäli tukena toimivan rakenteen taipuma on korkeintaan $l/200$ lasilaatan tuetun reunan suhteen. Mitoitus perustuu seuraaviin ehtoihin. [7, s.10][16, s.4.]

Käyttörajan mitoitusehto:

$$E_d \leq C_d \quad (1)$$

E_d = käyttörajan kuormista aiheutuvan taipuman mitoitusarvo

C_d = sallittu taipuma

Murtorajan mitoitusehto:

$$E_d \leq R_d \quad (2)$$

E_d = murtorajan kuormista aiheutuva jännitys

R_d = kestävyuden mitoitusarvo kaavan (3) tai (4) mukaisesti

Lämpölujitetun tai -karkaistun lasin kestävyysmitoitussarvo R_d lasketaan seuraavasti.

$$R_d = \frac{k_c \cdot f_k}{\gamma_M} \quad (3)$$

k_c = rakenteen tyyppin huomioiva kerroin, joka saa arvon 1,0

f_k = taivutuslujuuden ominaisarvo (ks. taulukko 5)

γ_M = materiaalin osavarmuusluku, joka lämpölujitetulle ja -karkaistulle lasille on 1,5

Tavallisen lämpökäsittelemättömän float-lasin kestävyttä arvioidessa käytetään kuorman vaikutusajan huomioivaa k_{mod} kerrointa. Koska kuorman vaikutusajalla on merkittävä vaikutus kestävyteen, on tärkeää tarkastaa aina kaikki kuormitustapaukset, sillä määräävä tapaus ei välttämättä ole se, joka aiheuttaa suurimman jännityksen. Tavallisen float-lasin kestävyysmitoitussarvo R_d lasketaan seuraavasti [7, s.12]:

$$R_d = \frac{k_{mod} \cdot k_c \cdot f_k}{\gamma_M} \quad (4)$$

k_{mod} = kuormitusajan vaikutuksen huomioiva kerroin (ks. taulukko 6)

k_c = rakenteen tyyppin huomioiva kerroin, joka vähintään kahdelta reunaltaan jatkuvasti tuetuille laatoille saa arvon 1,8 ja muissa tapauksissa arvon 1,0

f_k = taivutuslujuuden ominaisarvo (ks. taulukko 5)

γ_M = materiaalin osavarmuusluku, joka lämpökäsittelemättömälle lasille on 1,8

Mikäli lämpölujittamattoman lasilaatan reunat altistuvat vetorasituksille, esimerkiksi jos kyseessä on kahdelta reunaltaan tuettu lasilaatta, saa taivutuslujuudesta huomioida mitoituksessa vain 80 % [7, s.12]

Taulukossa 5 on esitetty taivutuslujuuden ominaisarvot f_k DIN 18008 -standardin mukaan mitoitusta varten eri lasityypeille.

Taulukko 5. Taivutuslujuuden ominaisarvot eri lasityypeille [22].

Lasityyppi	Taivutuslujuuden ominaisarvo f_k [MPa]
Tavallinen float-lasi	45
Lämpölujitettu float.lasi	70
Lämpölujitettu kuviolasi	45
Lämpökarkaistu float-lasi	120
Lämpökarkaistu kuviolasi	75

Taulukossa 6 on esitetty lämpökäsittlemättömän float-lasin kestävyuden laskennassa käytettävän kuormitusajan vaikutuksen huomioivan k_{mod} kertoimen arvot DIN 18008 -standardin mukaisesti. Kerroin valitaan lyhytkestoisimman kuormitusyhdistelmässä vaikuttavan kuorman mukaisesti [7, s.12].

Taulukko 6. Kuorman vaikutusajan huomioivan k_{mod} kertoimen arvot [7, s.12].

Kuorman aikaluokka	Esimerkkejä kuorman aiheuttajista	k_{mod}
Pysyvä	Omapaino, korkeuserot	0,25
Keskipitkä	Lumi, lämpötilan vaihtelut, ilmanpaineen muutokset	0,40
Hetkellinen	Tuuli, vaakasuuntainen viivakuorma	0,70

Jos mitoitetaan laminoitua lasilaattaa, saa kestävyuden mitoitusarvoa kasvattaa 10 %. Leikkausvoimien hyödyllistä siirtymistä lasikerrosten välillä laminoitikerroksen kautta ei saa huomioida mitoituksessa. Sen sijaan haitallinen leikkausvoimien siirtyminen tulee aina ottaa huomioon. [7, s.10,12.]

Sallitulle taipumalle käyttörajatilassa on sekä jatkuvasti tuetuille että pistemäisesti tuetuille lasilaatoille annettu arvo $l/100$. Lasilaatoille joiden päällä kävellään, kuten lasirappuset, on asetettu tiukempi raja-arvo $l/200$. [16, s.6][17, s.10][20, s.5.]

7.2.2 Eristyslaselementit

Eristyslaselementeissä kahden tai useamman lasin välissä on kaasutiivis tila. Tällaisten elementtien mitoituksessa on huomioitava välitilan ja ympäristön väliset paine-erot. Nämä paine-erot ovat seurausta välitilan kaasun lämpötilan muutoksista sekä ympäristön ilmanpaineen muutoksista elementin valmistushetkeen verrattuna. Ympäristön ilmanpaineen muutokset johtuvat sääolosuhteiden sekä korkeusaseman muutoksista. [7, s.9.]

Suurimmat paine-erot välitilan ja ympäristön välillä ilmenevät talvella, kun lämpötilat ovat matalia ja ilmanpaine on korkea ja kesällä, kun lämpötilat ovat korkeita ja ilmanpaine on matala. Taulukossa 7 on annettu arvoja välitilan lämpötilan muutoksille ΔT , ympäristön ilmanpaineen muutoksille Δp_{met} sekä korkeusaseman muutoksille ΔH , jotka soveltuvat käytettäviksi normaalitapauksissa. [7, s.9.]

Taulukko 7. Ympäristöolosuhteiden muutoksille annettuja arvoja tavanomaisissa tapauksissa [7, s.9].

Olosuhteet	Lämpötilan muutos ΔT [K]	Ympäristön ilmanpaineen muutos Δp_{met} [kN/m ²]	Korkeusaseman muutos ΔH [m]
Kesä	+20	-2,0	+600
Talvi	-25	+4,0	-300

Taulukossa 7 annetut arvot on määritelty eristyslaselementille, jonka kokonaisenergian absorptio on 30 %. Kesällä auringon säteilytehoksi on oletettu 800 W/m² ja tulokulmaksi 45°. Ulkoilman ja sisäilman lämpötiloiksi on oletettu kesäolosuhteissa +28°C ja keskimääräiseksi ilmanpaineeksi 1010 hPa. Sisä- ja ulkopuolen pintavastuksiksi on oletettu 0,12 m²K/W. Näistä olosuhteista on oletettu seuraavan välitilaan noin +39°C lämpötila. Tuotannon on oletettu kesäolosuhteiden tarkastelua varten tapahtuneen talvella +19°C lämpötilassa ja korkeassa 1030 hPa:n ilmanpaineessa. [7, liite A.]

Talviolosuhteissa auringon säteilytehon on oletettu olevan täysin olematon ja ulkoilman lämpötilaksi on oletettu -10°C. Sisäilman lämpötilaksi on talvella oletettu +19°C ja lasin U_g arvoksi 1,8 W/m²K. Keskimääräiseksi ilmanpaineeksi on talvella oletettu 1030 hPa. Sisäpuoliselle pintavastukselle on annettu arvo 0,13 m²K/W ja ulkopuoliselle pintavastukselle arvo 0,04 m²K/W. Näistä talvella vallitsevista olosuhteista on välitilaan laskettu

seuraavan noin +2°C lämpötila. Tuotannon on oletettu talviolosuhteiden tarkastelua varten tapahtuneen kesällä +27°C lämpötilassa ja matalassa 990 hPa:n paineessa. [7, liite A.]

Mikäli kokonaisenergian absorptio on suurempi kuin 30 %, eristyslaselementissä on sisäinen auringonsuojalaite tai rakennus on lämmitämätön, tulee taulukossa 8 esitetyt ΔT_{add} arvot lisätä taulukossa 7 annettuihin lämpötilan muutoksen ΔT arvoihin. Mikäli todellinen korkeusero asennuspaikan ja tuotantopaikan välillä on suurempi kuin taulukon raja-arvot, mikä Suomen olosuhteissa on äärimmäisen harvinaista, tai olosuhteet muutoin merkittävästi poikkeavat edellä mainituista, tulee tämä huomioida. [7, s.9.]

Taulukko 8. Erityisolosuhteiden huomioiminen lämpötilan muutoksen arvoissa [7, s.9].

Olosuhteet	Syy lämpötilan muutoksen lisäykselle	Lämpötilan muutoksen lisäys ΔT_{add} [K]
Kesä	Kokonaisenergian absorptio 30 % - 50 %	+9
	Sisäpuolinen auringonsuojalaite (tuulettuva)	+9
	Kokonaisenergian absorptio yli 50 %	+18
	Sisäpuolinen auringonsuojalaite (ei tuulettuva)	+18
	Lämpöeristyspaneeli lasituksen takapuolella	+35
Talvi	Lämmitämätön rakennus	-12

Ympäristöolosuhteiden muutoksista aiheutuva lasilaattojen välitilan isokoorinen paine p_0 voidaan määrittää seuraavasta kaavasta.

$$p_0 = 0,012 \frac{kN}{m^3} * \Delta H - \Delta p_{met} + 0,34 \frac{kN}{m^2 * K} * \Delta T \quad (5)$$

Δp_{met} = ympäristön ilmanpaineen muutos (ks. taulukko 7)

ΔT = lämpötilan muutos (ks. taulukot 7 ja 8)

ΔH = korkeusaseman muutos (ks. taulukko 7)

Eristyslaselementeissä kuormat jakautuvat lasilaattojen kesken. Luvussa 8 on esitetty laskentatapa kuormien jakautumisen arvioimiseksi sekä kaksilasisissa että kolmelasisissa eristyslaselementeissä.

7.3 prEN 16612 -standardiluonnoksen mukainen mitoitus

Standardiluonnos prEN 16612 on eurooppalaisen teknisen komitean CEN/TC 129 ”Glass in Building” laatima vuonna 2013 julkaistu standardiluonnos. Luonnos perustuu aiempaan prEN 13474 -standardiluonnokseen ja on tämän insinööriyön laatimishetkellä kyselyvaiheessa. Vaikka standardiluonnos onkin kehittyneempi versio aiemmasta standardiluonnoksesta, jonka mukainen mitoitusmenetelmä on puolestaan esitetty RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirjassa, suunnittelijan on syytä hankkia lupa näiden ohjeiden käyttämiseen suunnittelussa tapauskohtaisesti. Lisäksi on syytä varmistaa tietojen ajantasaisuus, sillä muutoksia saattaa tulla ennen luonnoksen hyväksymistä viralliseksi standardiksi. [11.]

7.3.1 Käyttö- ja murtorajatilan tarkastelut

Käyttö- ja murtorajatilan kuormitusyhdistelmät sekä näiden kuormien aiheuttamien vaikutusten mitoitusarvot tulee määrittää EN 1990 ja EN 1991 mukaisesti. Jännitysten ja taipumien laskenta tulee suorittaa siten, että tulokset vastaavat mahdollisimman hyvin todellisuutta ja paikalliset jännityshuiput tulevat huomioiduksi. [8, s.13,22.]

Laskennassa saa huomioida suurista taipumista aiheutuvan laatan geometrisen epälineaarisuuden hyödylliset vaikutukset. Nämä vaikutukset huomioiva käsinlaskentamenetelmä kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuettujen laattojen jännitysten ja taipumien arvioimiseksi on esitetty liitteessä 1. Menetelmä soveltuu käytettäväksi vain sellaisille laatoille joihin kohdistuu ainoastaan tasoa vastaan kohtisuoria kuormia. [8, s.22.]

Tukirakenteiden muodonmuutokset ja siirtymät on huomioitava jännityksiä arvioitaessa. Standardissa on lisäksi todettu, että kaikkien lasilaattojen tulee suunnittelukuormien lisäksi kestää käyttökohteesta riippumatta tasan jakautunut lyhytaikainen $0,5 \text{ kN/m}^2$ ker-toimeton kuorma riittävän lujuuden takaamiseksi. [8, s.22.]

Lasilaattojen mitoitus perustuu seuraaviin mitoitusehtoihin.

Käyttörajan mitoitusehto:

$$w_{max} \leq w_d \quad (6)$$

w_{max} = käyttörajan kuormista aiheutuvan taipuman mitoitusarvo

w_d = sallittu taipuma

Murtorajan mitoitusehto:

$$\sigma_{max} \leq f_{g;d} \quad (7)$$

σ_{max} = murtorajan kuormista aiheutuva jännitys

$f_{g;d}$ = kestävyden mitoitusarvo kaavan (8) tai (9) mukaisesti

Lämpökäsittämättömän ja muuten esijännittämättömän lasin kestävyden mitoitusarvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} * k_{sp} * f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} \quad (8)$$

$f_{g;k}$ = esijännittämättömän lasin taivutuslujuuden ominaisarvo (45 N/mm²)

$\gamma_{M;A}$ = materiaalin osavarmuusluku, joka saa arvon 1,8

k_{sp} = pintaprofiilin huomioiva kerroin (ks. taulukko 9)

k_{mod} = kuormitusajan huomioiva kerroin (ks. kaava 10 ja taulukko 10)

Esijännitetyn lasin, esimerkiksi lämpökarkaistun, lämpölujitetun tai kemiallisesti lujitetun lasin kestävyysmitoitussarvo lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} * k_{sp} * f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v * (f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}} \quad (9)$$

$f_{g;k}$ = esijännittämättömän lasin taivutuslujuuden ominaisarvo (45 N/mm²)

$f_{b;k}$ = esijännitetyn lasin taivutuslujuuden ominaisarvo (ks. taulukko 11)

$\gamma_{M;A}$ = materiaalin osavarmuusluku, joka saa arvon 1,8

$\gamma_{M;v}$ = materiaalin osavarmuusluku, joka saa arvon 1,2

k_{sp} = pintaprofiilin huomioiva kerroin (ks. taulukko 9)

k_{mod} = kuormitusajan huomioiva kerroin (ks. kaava 10 ja taulukko 10)

k_v = lujituskerroin, joka huomioi valmistustavan (ks. taulukko 12)

Taulukko 9. Lasin pintaprofiilin huomioivan k_{sp} kertoimen arvot [8, s.19].

Lasilaatu	k_{sp} kertoimen arvo	
	pintakäsitlemätön	hiekkapuhallettu
Float-lasi	1,0	0,6
Konelasi	1,0	0,6
Emaloitu float- tai konelasi	1,0	0,6
Kuviolasi	0,75	0,45
Emaloitu kuviolasi	0,75	0,45
Pintahiottu lankalasi	0,75	0,45
Kuvioitu lankalasi	0,6	0,36
Huom! Happortsatulle lasille käytetään pintakäsitlemättömän arvoa		

Kuormitusajan vaikutuksen huomioivan k_{mod} kertoimen tyypilliset arvot on annettu taulukossa 10. Vaihtoehtoisesti kertoimen arvot voidaan laskea kaavan 10 avulla. Rakennusten tavanomaisille kuormille kertoimen minimiarvo on 0,25 ja maksimiarvo 1,0. Poikkeuksellisille, erittäin lyhytkestoisille kuormille, kuten räjähdyskuormat voidaan harkita keroimelle myös suurempia arvoja kuin 1,0. Laskentakaavaa voidaan pitää tarkkana kuormituksille, joiden kesto on vähintään 20 millisekuntia. [8, s.19.]

$$k_{mod} = 0,663 * t^{-\frac{1}{16}} \quad (10)$$

t = kuormituksen kesto tunteina

Taulukko 10. Kuormitusajan huomioivan k_{mod} kertoimen tyypilliset arvot [8, s.20].

Kuorma	Kuormituksen kesto	k_{mod}
Henkilökuorma	lyhyt, yksittäinen (30 s.)	0,89
Tuuli	lyhyt, yksittäinen (tuulenpuuska)	1,0
Tuuli	lyhyt, toistuva (myrsky) (10 min)	0,74
Lumi	keskipitkä (3 kk) ¹⁾	0,41
Päivittäinen lämpötilan vaihtelu	keskipitkä (11 h)	0,57
Ilmanpaineen vaihtelu	keskipitkä	0,50
Vuosittainen lämpötilan vaihtelu	keskipitkä (6 kk)	0,39
Pysyvä kuorma, omapaino	pysyvä	0,29
¹⁾ Arvo $k_{mod}=0,41$ on valittu kuormituksen kestolle 3 kk. Alun perin standardiluonnoksessa on annettu arvo $k_{mod}=0,44$, joka vastaa kuormituksen kestoja 1 kk. Arvo on muutettu, jotta se vastaisi paremmin Suomen olosuhteita.		

Kun tarkastellaan kuormitusyhdistelmiä, k_{mod} kerroin valitaan kestoaltaan lyhimmän kuormitusyhdistelmässä vaikuttavan kuorman mukaan. On tärkeää suorittaa mitoituslaskelmat kaikilla kuormitustapauksilla, sillä lasin kestävyys mitoitusarvo on riippuvainen kuormitusajasta eikä määräävä tapaus näin ollen välttämättä ole se, joka aiheuttaa suurimmat jännitykset. Kuormitusajan vaikutukset huomioivalle k_{mod} kertoimelle saatetaan antaa kansallisia arvoja standardin EN 16612 kansallisissa liitteissä, mikäli standardi otetaan Euroopassa virallisesti käyttöön. [8, s.20.]

Taulukko 11. Esijännitetyn lasin taivutuslujuuden ominaisarvot $f_{b;k}$. [8, s.21]

Lasilaatu	Taivutuslujuuden ominaisarvo $f_{b;k}$ [N/mm ²]		
	Lämpökarkaistu turvalasi (myös heat-soak testattu)	Lämpölujitettu lasi	Kemiallisesti lujitettu lasi
Float- tai konelasi	120	70	150
Kuviolasi	90	55	100
Emaloitu float- tai konelasi	75	45	-
Emaloitu kuviolasi	75	45	-

Taulukossa 11 tarkoitetaan lämpökarkaistulla turvalasilla standardin EN 12150, Hea Soak -testatulla lämpökarkaistulla turvalasilla standardin EN 14179, lämpölujitetulla lasilla standardin EN 1863 ja kemiallisesti lujitetulla lasilla standardin EN 12337 mukaisia laseja. [8, s.21]

Taulukko 12. Valmistustavan huomioivan lujituskertoimen k_v arvot. [8, s.21]

Valmistustapa	Lujituskertoimen k_v
Lämpökäsittely vaakatasossa (tai muuten niin, ettei lasiin jää kannattelusta jälkiä)	1,0
Lämpökäsittely pystyasennossa (tai muuten niin, että lasiin jää kannattelusta jäljet)	0,6

Taulukossa 12 annetuista vaihtoehdoista lämpökäsittely vaakatasossa on nykyään yleisempi vaihtoehto. Suunnittelijan on kuitenkin aina varmistettava erikseen lasivalmistajalta kuinka lujitus tapahtuu.

Sallitulle taipumalle on annettu standardissa raja-arvoksi 1/65 tai 50 mm sen mukaan kumpi arvoista on pienempi, mikäli tiukempia vaatimuksia ei ole asetettu. Kyseinen vaatimus on kuitenkin melko löyhä, joten esimerkiksi DIN 18008 mukainen arvo 1/100 on tavallisesti parempi vaihtoehto raja-arvoksi. Etenkin eristyslaselementtejä mitoitettaessa on tärkeää käyttää tiukempia vaatimuksia taipumille, sillä eristyslaselementtien tiivistykset pettävät lähestulkoon varmasti, mikäli taipumat kasvavat liian suuriksi ja tällöin elementin lämmöneristävyys heikkenee huomattavasti. [11.]

7.3.2 Laminoidut lasilaatat

Toisin kuin DIN 18008 -standardi, prEN 16612 -standardiluonnos sallii laminointikerroksen leikkausvoimien siirtokyvyn huomioimisen mitoituksessa. Tällöin tulee käyttää sopivaa laskentamenetelmää, joka huomioi laminointimateriaalin plastiset ja viskoelastiset ominaisuudet sekä niiden muutokset lämpötilan ja kuormitusajan vaikutuksesta. Nämä ominaisuudet voidaan huomioida asianmukaista FEM-laskentamalla käyttämällä. [8, s.23.]

Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää seuraavaa, yksinkertaistettua, teholliseen paksuuteen perustuvaa laskentatapaa, jossa leikkausvoimien siirtyminen laminointikerroksen kautta huomioidaan leikkausvoimien siirtokertoimen (*shear transfer coefficient*) ω avulla. Lasilaatalle määritellään kokonaisuutena tehollinen paksuus taipumatarkastelua varten ja kullekin lasikerrokselle erikseen tehollinen paksuus jännitystarkastelua varten. Kunkin kerroksen tehollista jännitystä murtorajatilassa verrataan kyseisen kerroksen mitoituslujuuteen. Mikäli kaikki kerrokset ovat samaa lasityyppiä ja näin ollen kaikilla kerroksilla on sama mitoituslujuus, voidaan jännitystarkastelut suorittaa ainoastaan sille lasikerrokselle, jonka tehollinen paksuus jännitystarkastelua varten on kaikista pienin. [8, s.23.]

Laminoidun lasilaatan tehollinen paksuus taipumatarkastelua varten:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega(\sum_i h_k h_{m;k}^2)} \quad (11)$$

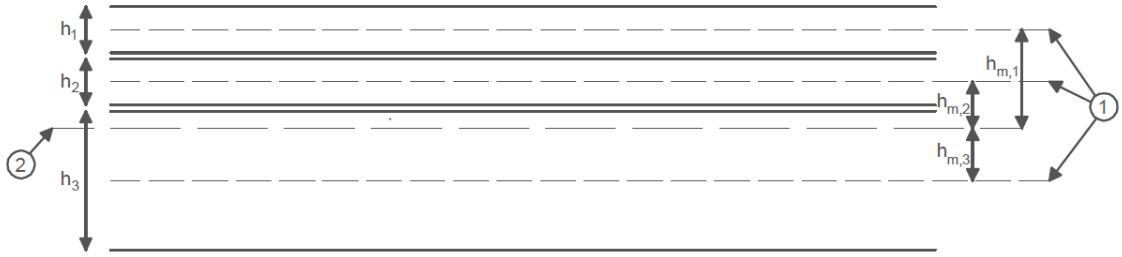
Laminoidun lasilaatan kerroksen j tehollinen paksuus jännitystarkastelua varten:

$$h_{ef;\sigma;j} = \sqrt{\frac{(h_{ef;w})^3}{(h_j + 2\omega h_{m;j})}} \quad (12)$$

ω = leikkausvoimien siirtokerroin (ks. taulukko 13)

h_k, h_j = lasilevyjen paksuudet (ks. kuva 7)

$h_{m;k}, h_{m;j}$ = lasikerrosten keskilinjojen etäisyydet koko laatan keskilinjasta (ks. kuva 7)



Kuva 7. Laminoitujen lasilaattojen tehollisen paksuuden laskennassa käytettävät merkinnät. Numerolla 2 osoitettu katkoviiva kuvaa koko laatan keskilinjaa ja numerolla 1 osoitetut katkoviivat kuvaavat kunkin lasikerroksen keskilinjaa. [8, s.24.]

Laminointikerroksen rakenteelliseen toimintaan vaikuttavat muun muassa lämpötila, kuormitusaika sekä lasilaatan koko. Leikkausvoimien siirtokertoimen ω arvo määräytyykin erikseen kullekin kuormitustapaukselle sen mukaan, mihin jäykkyyssryhmään kyseinen laminointikerros kuuluu kyseisessä kuormitustapauksessa. Kertoimen arvot eri jäykkyyssryhmille ja kuormitustapauksille on annettu taulukossa 13. Mikäli laminointikerroksen ominaisuuksia ei ole määritetty prEN 16613 -standardiluonnoksen mukaisesti, tulee lasilaatta mitoittaa käyttäen jäykkyyssryhmän 0 arvoja.

Taulukko 13. Laminointikerroksen leikkausvoimien siirtokertoimen ω arvot kuormitustapauksen ja jäykkyyssryhmien mukaan jaoteltuna. [8, s.25]

Kuormitustapaus	Jäykkyyssryhmä			
	0	1	2	3
Tuulikuorma (välimeren alue)	0	0	0,1	0,6
Tuulikuorma (muut alueet)	0	0,1	0,3	0,7
Henkilökuormat kaiteille (tavallinen)	0	0	0,1	0,5
Henkilökuormat kaiteille (tungos)	0	0	0	0,3
Lasi, jonka päällä kävellään huoltotarkoituksessa	0	0	0	0,1
Lumikuormat lämmittämättömissä rakennuksissa	0	0	0,1	0,3
Lumikuormat lämmitetyissä rakennuksissa	0	0	0	0,1
Pysyvät kuormat	0	0	0	0

Laminointikerroksen leikkausvoimien siirtokykyä kuvaavan ω kertoimen arvot voivat vaihdella välillä nolasta yhteen. Kerroin saa arvon 0, kun leikkausvoimien ei ajatella siirtyvän laminointikerroksen kautta lainkaan. Vastaavasti kerroin saisi arvon 1, mikäli leikkausvoimien voitaisiin ajatella siirtyvän laminointikerroksen kautta täysin ja lasilaatan voitaisiin näin ollen ajatella toimivan täysin monoliittisesti. [8, s.23.]

7.3.3 Eristyslaselementit

Myös prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaan eristyslaselementin lasilaattojen mitoituksessa huomioidaan ulkoisten mekaanisten painekuormien lisäksi elementin lasien välitilan kaasun paineen vaihtelun vaikutus jännityksiin ja taipumiin. Sisäisen kaasun paineen vaihtelu aiheutuu välitilan lämpötilan muutoksista sekä muutoksista ympäristön ilmanpaineessa. Ympäristön ilmanpaineen muutokset sekä välitilan lämpötilan muutokset aiheutuvat sääolosuhteiden sekä korkeusaseman muutoksista valmistushetkeen verrattuna. Näistä muutoksista aiheutuva lasilaattojen välitilan isokoorinen paine voidaan laskea seuraavan kaavan avulla.

$$p_0 = p_{H;0} + p_{C;0} \quad (13)$$

$p_{H;0}$ = korkeusaseman muutoksesta aiheutuva isokoorinen paine

$p_{;0}$ = ympäristön ilmanpaineen tai lämpötilan muutoksista aiheutuva isokoorinen paine

$$p_{H;0} = C_H(H - H_P) \quad (14)$$

C_H = 0,012 kN/m³

H = asennuspaikan korkeusasema

H_P = eristyslaselementin tuotantopaikan korkeusasema

$$p_{C;0} = C_T(T_C - T_P) - (p_a - p_P) \quad (15)$$

C_T = 0,34 kN/(m²*K)

p_a = ilmanpaine tarkasteluhetkellä

p_P = ilmanpaine eristyslaselementin tuotantohetkellä

T_C = eristyslaselementin välitilan kaasun lämpötila tarkasteluhetkellä

T_P = lämpötila eristyslaselementin valmistushetkellä

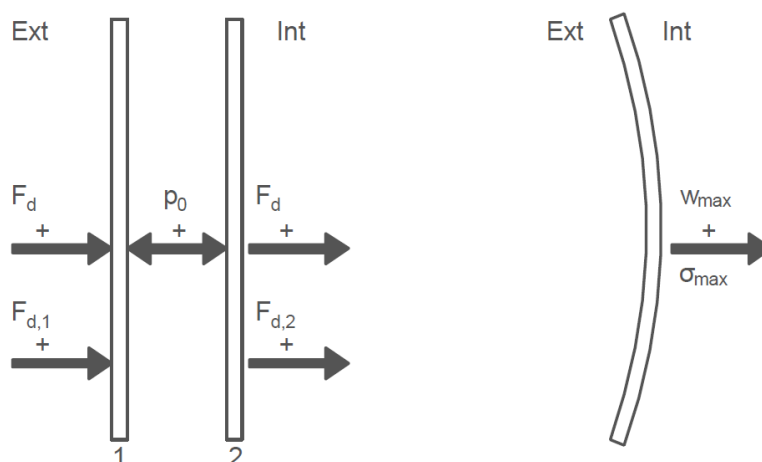
Osa näissä laskentakaavoissa esiintyvistä termeistä on melko vaikeaa määrittellä tarkasti. Yleensä voidaankin pitäytyä yksinkertaistuksissa ja isokoorinen paine p_0 voidaan normaalitapauksissa määrittää esimerkiksi tämän insinööriyön luvussa 7.2.2 esiteltyjen DIN 18008 -standardin mukaisten taulukkoarvojen avulla. Väli-tilan kaasun lämpötilan T_c määrittämiseksi sekä kaksi- että kolmelasisille eristyslaselementeille on prEN 16612 -standardiluonnoksessa annettu myös laskentakaavat, mutta ne on jätetty tästä insinööriyöstä pois niiden vaikeaselkoisuuden takia.

Eristyslaselementeissä kuormat jakautuvat lasilaattojen kesken. Luvussa 8 on esitetty laskentatapa kuormien jakautumisen arvioimiseksi sekä kaksilasisissa että kolmelasisissa eristyslaselementeissä.

8 Kuormien jakautuminen eristyslaselementeissä

8.1 2K-eristyslaselementit

2K-eristyslaselementeissä ulkoisten painekuormien (esim. tuulikuorma, lumikuorma ja omapaino) jakautumista lasilaattojen kesken voidaan arvioida lasilaattojen jäykkyyksien sekä eristysyksikkökertoimen (*insulating unit factor*) avulla. Standardiluonnoksen prEN 16612 liitteessä C on annettu seuraavat ohjeet.



Kuva 8. Kuormien vaikutussuunnat sekä laattojen taipuman suunta. Lisäksi kuvassa on esitettyä yleinen käytäntö lasilaattojen numeroinnista rakennuksen ulkopuolen (ext) ja sisäpuolen (int) suhteen. [8, liite C]

Lasilaatan 1 jäykkyyden osuus kokonaisjäykkyydestä:

$$\delta_1 = \frac{h_1^3}{h_1^3 + h_2^3} \quad (16)$$

Lasilaatan 2 jäykkyyden osuus kokonaisjäykkyydestä:

$$\delta_2 = \frac{h_2^3}{h_1^3 + h_2^3} = 1 - \delta_1 \quad (17)$$

h_1, h_2 = lasilaattojen paksuudet

Jos eristyslaselementissä käytetään laminoitua lasia, tulee laskennassa käyttää paksuutena lasilaatan tehollista paksuutta. Laminoidun lasilaatan tehollisen paksuuden laskentamenetelmä on esitetty luvussa 7.3.2.

Välitilan eristysyksikkökerroin:

$$\phi = \frac{1}{1 + \left(\frac{a}{a^*}\right)^4} \quad (18)$$

a = lasilaatan lyhempi sivumitta

a^* = karakteristinen sivumitta

Karakteristinen sivumitta a^* riippuu eristyslaselementin lasilaattojen sekä välitilan paksuuksista sekä elementin muodosta ja se voidaan määritellä seuraavan kaavan avulla.

$$a^* = 28,9 \left(\frac{s \cdot h_1^3 \cdot h_2^3}{(h_1^3 + h_2^3) \cdot k_5} \right)^{0,25} \quad (19)$$

h_1, h_2 = lasilaattojen paksuudet

s = välitilan paksuus

k_5 = välitilan tilavuuden muutosta kuvaava kerroin (ks. taulukko 14 tai kaava 20)

Välitilan tilavuuden muutosta kaasun paineen seurauksena kuvaavan k_5 kertoimen arvot on esitetty taulukossa 14. Kertoimen arvo riippuu eristyslaselementin sivusuhteesta λ . Sivusuhde määritetään lasilaatan lyhemmän sivumittan a suhteena sen pidempään sivumittaan b .

Taulukko 14. Välitilan tilavuuden muutosta kuvaavan kertoimen k_5 arvot [8, liite B].

$\lambda=a/b$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1
k_5	0,0194	0,0235	0,0288	0,0349	0,0420	0,0499	0,0585	0,0676	0,0764	0,0858

Haluttaessa kertoimen k_5 arvo voidaan määrittää esistandardin prEN 16612 mukaisesti myös laskennallisesti seuraavan kaavan avulla.

$$k_5 = \left(\frac{z_1}{16 \cdot \lambda^2} \right) (0,4198 + 0,22 * e^{(-6,8 * \lambda^{1,33})}) \quad (20)$$

Sivusuhde λ määritellään aivan kuten taulukossa 14. Kerroin z_1 voidaan laskea seuraavan kaavan avulla.

$$z_1 = 192(1 - \mu^2)\lambda^2 \left(0,00406 + 0,00896 \left(1 - e^{(-1,123 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,097})} \right) \right) \quad (21)$$

Kertoimen z_1 laskentakaavassa esiintyvän poissonin luvun μ arvo tavanomaiselle soodakalkkisilikaattilasille vaihtelee lähteestä riippuen välillä 0,20 - 0,23.

Kun kaikki tarvittavat kertoimet on määritetty, saadaan laskettua ulkoisten painekuormien jakautuminen eristyslaselementin laattojen kesken. Laskentakaavat sekä ulommalla että sisemmällä lasilaatalla vaikuttavien kuormien jakautumisen määrittämiseksi välitilan kaasun kautta lasilaattojen kesken on esitetty taulukossa 15.

Taulukko 15. Ulkoisten kuormien jakautuminen 2K-eristyslaselementin lasilaattojen kesken [8, liite C].

Kuorma	Laatalla 1 vaikuttava osuus	Laatalla 2 vaikuttava osuus
Ulkoinen kuorma F_d laatalla 1	$F_{d,1} = (\delta_1 + \phi\delta_2)F_d$	$F_{d,2} = (1 - \phi)\delta_2F_d$
Ulkoinen kuorma F_d laatalla 2	$F_{d,1} = (1 - \phi)\delta_1F_d$	$F_{d,2} = (\phi\delta_1 + \delta_2)F_d$

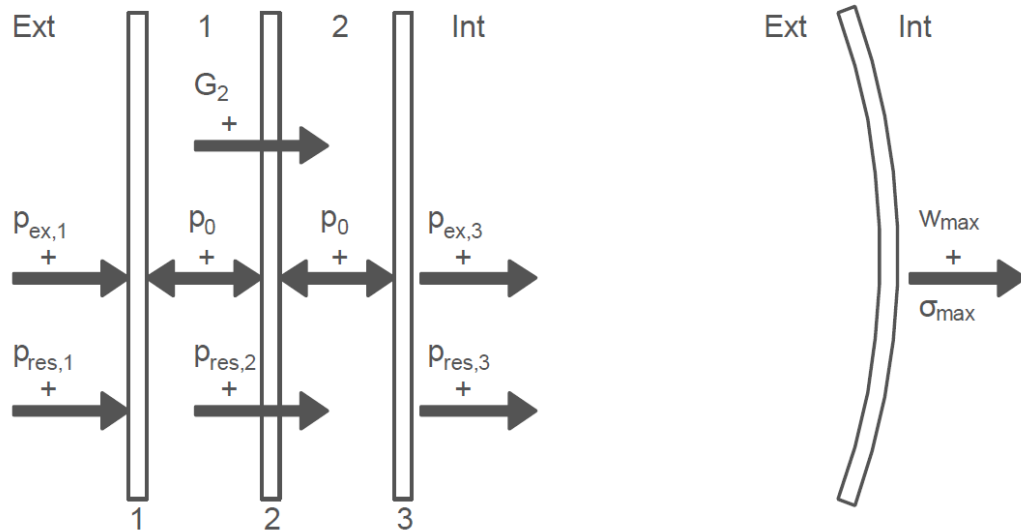
Ulkoisten kuormien lisäksi eristyslaselementtien lasilaattoihin aiheuttaa kuormitusta isokoorinen paine p_0 , jonka laskentatapa on esitetty tämän insinöörityön luvuissa 7.2.2 ja 7.3.3. Isokoorisesta paineesta aiheutuvien kuormien vaikutusten jakautuminen lasilaattoille on esitetty taulukossa 16.

Taulukko 16. Isokoorisen paineen aiheuttamien vaikutusten jakautuminen eristyslaselementin lasilaattojen kesken. [8, liite C]

Kuorma	Laatalla 1 vaikuttava osuus	Laatalla 2 vaikuttava osuus
Isokoorinen paine p_0	$-\phi p_0$	ϕp_0

8.2 3K-eristyslaselementit

3K-eristyslaselementeissä ulkoisten painekuormien (esim. tuulikuorma, lumikuorma ja omapaino) jakautumista lasilaattojen kesken sekä sisäisten paine-erojen vaikutusta voidaan arvioida seuraavien ohjeiden mukaisesti.



Kuva 9. Kuormien vaikutussuunnat sekä laattojen taipuman suunta. Lisäksi kuvassa on esitettyä yleinen käytäntö lasilaattojen sekä välitilojen numeroinnista rakennuksen ulkopuolen (ext) ja sisäpuolen (int) suhteen. [8, liite C]

Välitilan 1 eristysyksikkökerroin:

$$\phi_1 = \frac{1}{1 + \alpha_1 + \alpha_1^+} \quad (22)$$

Välitilan 2 eristysyksikkökerroin:

$$\phi_2 = \frac{1}{1 + \alpha_2 + \alpha_2^+} \quad (23)$$

Välitilan k suhteellinen tilavuuden muutos:

$$\alpha_k = \frac{V_{p;k} \cdot p_a}{V_{pr;k}} > 0 \quad \alpha_k^+ = \frac{V_{p;k+1} \cdot p_a}{V_{pr;k}} > 0 \quad (24)$$

$V_{p;k}$ = laatan k tilavuuden muutos yksikköpaineesta (ks. kaava 25)

p_a = 100 kN/m²

$V_{pr;k}$ = välitilan k alkuperäinen tilavuus (ks. kaava 26)

$$V_{p;k} = k_5 A \frac{a^4}{h_k^3} \frac{1}{E} \quad (25)$$

k_5 = välitilan tilavuuden muutosta kuvaava kerroin (ks. taulukko 14 tai kaava 20)

A = laatan pinta-ala $a \cdot b$, missä a on lyhempi sivumitta ja b on pidempi sivumitta

a = laatan lyhempi sivumitta

h_k = laatan k paksuus (laminoidun lasilaatan tapauksessa tehollinen paksuus)

E = kimmokerroin (soodakalkkisilikaattilasille 70 GPa)

$$V_{pr;k} = s_k * a * b \quad (26)$$

s_k = välitilan k paksuus

a = laatan lyhempi sivumitta

b = laatan pidempi sivumitta

Taulukko 17. Sisäiset paine-erot (vain tuulikuorma, lumikuorma tai omapaino) [8, liite C].

	Sisäinen kuormitus	Ulkoinen kuorma laatalta 1	Oman painon kuormitus laatalta 2	Ulkoinen kuorma laatalta 3
Δp_1	$p_0 \phi_1 \frac{1 + \phi_2 \alpha_1^+}{\beta}$	$p_{ex;1} \frac{\phi_1 \alpha_1}{\beta}$	$-G_2 \frac{\phi_1 \alpha_2^+ \phi_2 \alpha_1^+}{\beta}$	$-p_{ex;3} \frac{\phi_1 \alpha_2^+ \phi_2 \alpha_1^+}{\beta}$
Δp_2	$p_0 \phi_2 \frac{1 + \phi_1 \alpha_2}{\beta}$	$p_{ex;1} \frac{\phi_1 \alpha_1 \phi_2 \alpha_2}{\beta}$	$G_2 \frac{\phi_1 \alpha_1 \phi_2 \alpha_2}{\beta}$	$-p_{ex;3} \frac{\phi_2 \alpha_2^+}{\beta}$
missä: $\beta = 1 - \phi_1 \alpha_1^+ \phi_2 \alpha_2$				

Taulukko 18. Eri kuormista aiheutuvat resultanttikuormat lasilaatoille. [8, liite C]

	Sisäinen kuormitus	Ulkoinen kuorma laatalla 1	Oman painon kuormitus laatalla 2	Ulkoinen kuorma laatalla 3
$p_{res;1}$	$-\Delta p_1$	$p_{ex;1} - \Delta p_1$	$-\Delta p_1$	$-\Delta p_1$
$p_{res;2}$	$\Delta p_1 - \Delta p_2$	$\Delta p_1 - \Delta p_2$	$G_2 + \Delta p_1 - \Delta p_2$	$\Delta p_1 - \Delta p_2$
$p_{res;3}$	Δp_2	Δp_2	Δp_2	$\Delta p_2 + p_{ex;3}$

9 Vertailu- ja esimerkkilaskelmat

Luvuissa 9.1, 9.2 ja 9.3 on esitetty muutamia esimerkkilaskelmia lasin kestävyuden mitoitusarvon määrittämisestä murtorajatilan tarkasteluja varten. Laskelmiin on poimittu muutamia eri lasityyppejä ja lisäksi kuormituksen kesto vaihtelee esimerkkeittäin. Esimerkkilaskelmissa on esitetty sekä prEN 16612 -esistandardin että saksalaisen DIN 18008 -standardin mukainen laskenta.

Lisäksi on esitetty taulukkomuodossa kestävyuden mitoitusarvoja murtorajatilan tarkasteluja varten eri lasityypeille ja kuormitustapauksille. Myös tuentatavan vaikutus on pyritty huomioimaan, jos sillä on vaikutusta kestävyuden mitoitusarvoon. Taulukoissa on esitetty edellisessä kappaleessa mainittujen standardien ja standardiluonnosten mukaisien arvojen lisäksi RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirjan mukaiset arvot, jotta suunnittelija saisi käsityksen siitä, mihin suuntaan prEN 16612 mukaiset arvot ovat muuttuneet aiemmasta esistandardista, johon kyseinen RIL:n julkaisu perustuu.

DIN 18008 ja prEN 16612 mukaiset arvot ovat keskenään vertailukelpoisia, sillä kuormat ja kuormitusyhdistelmät sekä näiden vaikutukset määritellään niissä molemmissa EN 1990 ja EN 1991 mukaan. Sen sijaan RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirjassa esitelty mitoitusmenetelmä perustuu eurokoodien esistandardeihin, joten sen mukaan lasketut arvot eivät välttämättä ole täysin vertailukelpoisia.

Luvussa 9.4 on esitetty esimerkki laminoituneen lasilaatan tehollisen paksuuden määrittämisestä prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaan ja luvussa 9.5 on suoritettu vertailu lasilaatan vaaditusta paksuudesta prEN 16612 -standardiluonnoksen sekä Suomessa aiemmin käytetyn RT-10316 -ohjekortin välillä.

9.1 Tavallisen float-lasin kestävyys

Tarkastellaan tavallista float-lasia, joka on kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuettu. Lasia ei ole lujitettu tai pintakäsittely. Käsitellään kuormitustapausta, jossa lasia rasittaa ainoastaan omapaino ja kuormitusyhdistelmä on näin ollen pitkäaikainen.

Lasin kestävyysmitoitussarvo pitkäaikaisille kuormituksille prEN 16612 mukaan:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} * k_{sp} * f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} = \frac{0,29 * 1,0 * 45 \frac{N}{mm^2}}{1,8} = 7,25 \frac{N}{mm^2} \quad (27)$$

Lasin kestävyysmitoitussarvo pitkäaikaisille kuormituksille DIN 18008 mukaan:

$$R_d = \frac{k_{mod} * k_c * f_k}{\gamma_M} = \frac{0,25 * 1,8 * 45 \frac{N}{mm^2}}{1,8} = 11,25 \frac{N}{mm^2} \quad (28)$$

Taulukossa 19 on esitetty vastaavan rakenteen kestävyysmitoitussarvot myös keskipitkän ja lyhytaikaisen vaikutusajan kuormitusyhdistelmille. Taulukon arvoja varten lasilaatan lyhemmäksi sivumitaksi a on valittu 600 mm ja pidemmäksi sivumitaksi b 1200 mm. Lasilaatan koolla on taulukon arvoista vaikutusta ainoastaan RIL 198-2001 mukaisiin arvoihin.

Taulukko 19. Kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuetun tavallisen float-lasin kestävyysmitoitussarvot kuormien vaikutusajan mukaan eri standardien, standardiluonnosten ja ohjeiden mukaan laskettuna.

Kuorman vaikutusaika	$f_{g;d}$ [N/mm ²] prEN 16612 mukaan	R_d [N/mm ²] DIN 18008 mukaan	$f_{g;d}$ [N/mm ²] RIL 198-2001 mukaan
Pysyvä	7,25	11,25	6,84
Keskipitkä	10,25	18,00	9,12
Hetkellinen	18,50	31,50	18,24

Kuten taulukon arvoista voidaan huomata, prEN 16612 ja RIL 198-2001 mukaiset arvot ovat melko lähellä toisiaan. Saksalainen DIN 18008 antaa reilusti korkeampia lujuusarvoja kyseisessä tapauksessa. Tämä johtuu jatkuvasti tuetun tavallisen float-lasin kestävyysmitoitussarvojen laskennassa käytettävän rakennetyypin huomioivan kertoimen k_c arvosta 1,8.

9.2 Lämpölujitetun float-lasin kestävyys

Tarkastellaan lämpölujitettua float-lasia, joka on kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuettu. Lasia ei ole pintakäsitelty ja lämpölujituksen oletetaan tapahtuneen vaakatasossa. Käsitellään kuormitustapausta, jossa lasia rasittaa omapaino sekä lumikuorma ja kuormitusaika on näin ollen keskipitkä.

Lasin kestävyuden mitoitusarvo prEN 16612 mukaan, kun kuormitusaika on keskipitkä:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} * k_{sp} * f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v(f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}} = \frac{0,41 * 1,0 * 45 \frac{N}{mm^2}}{1,8} + \frac{1,0(70 - 45) \frac{N}{mm^2}}{1,2} = 31,08 \frac{N}{mm^2} \quad (29)$$

Lasin kestävyuden mitoitusarvo DIN 18008 mukaan, kun kuormitusaika on keskipitkä:

$$R_d = \frac{k_c * f_k}{\gamma_M} = \frac{1,0 * 70 \frac{N}{mm^2}}{1,5} = 46,67 \frac{N}{mm^2} \quad (30)$$

Taulukossa 20 on esitetty vastaavan rakenteen kestävyuden mitoitusarvot myös pysyville ja lyhytaikaisille kuormitusyhdistelmille. Taulukon arvoja varten lasilaatan lyhemmäksi sivumitaksi a on valittu 600 mm ja pidemmäksi sivumitaksi b 1200 mm. Lasilaatan koolla on taulukon arvoista vaikutusta ainoastaan RIL 198-2001 mukaisiin arvoihin.

Taulukko 20. Kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuetun lämpölujitetun float-lasin kestävyuden mitoitusarvot kuormien vaikutusajan mukaan eri standardien, standardiluonnosten ja ohjeiden mukaan laskettuna.

Kuorman vaikutusaika	$f_{g;d}$ [N/mm ²] prEN 16612 mukaan	R_d [N/mm ²] DIN 18008 mukaan	$f_{g;d}$ [N/mm ²] RIL 198-2001 mukaan
Pysyvä	28,08	46,67	17,71
Keskipitkä	31,08	46,67	19,99
Hetkellinen	39,33	46,67	29,11

Kuten taulukon arvoista voidaan huomata, tällaisessa tapauksessa RIL 198-2001 on ohjeista selkeästi konservatiivisin. Saksalainen DIN 18008 -standardi antaa jälleen suurimmat lujuusarvot ja prEN 16612 -standardiluonnos sijoittuu välimaastoon.

9.3 Lämpökarkaistun float-lasin kestävyys

Tarkastellaan lämpökarkaistua float-lasia, joka on kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuettu. Lasia ei ole pintakäsitelty ja lämpökarkaisun oletetaan tapahtuneen vaakatasossa. Käsitellään kuormitustapausta, jossa lasia rasittaa omapaino, lumikuorma sekä tuulikuorma ja kuormitus on näin ollen lyhytaikainen.

Lasin kestävyysmitoitussarvo lyhytaikaisille kuormituksille prEN 16612 mukaan:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod} * k_{sp} * f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_v(f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;v}} = \frac{0,74 * 1,0 * 45 \frac{N}{mm^2}}{1,8} + \frac{1,0(120 - 45) \frac{N}{mm^2}}{1,2} = 81,00 \frac{N}{mm^2} \quad (31)$$

Lasin kestävyysmitoitussarvo lyhytaikaisille kuormituksille DIN 18008 mukaan:

$$R_d = \frac{k_c * f_k}{\gamma_M} = \frac{1,0 * 120 \frac{N}{mm^2}}{1,5} = 80,00 \frac{N}{mm^2} \quad (32)$$

Taulukossa 21 on esitetty vastaavan rakenteen kestävyysmitoitussarvot myös pysyville ja keskipitkille kuormitusyhdistelmille. Taulukon arvoja varten lasilaatan lyhemmäksi sivumitaksi a on valittu 600 mm ja pidemmäksi sivumitaksi b 1200 mm. Lasilaatan koolla on taulukon arvoista vaikutusta ainoastaan RIL 198-2001 mukaisiin arvoihin.

Taulukko 21. Kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuetun lämpökarkaistun float-lasin kestävyysmitoitussarvot kuormien vaikutusajan mukaan eri standardien, standardiluonnosten ja ohjeiden mukaan laskettuna.

Kuorman vaikutusaika	$f_{g;d}$ [N/mm ²] prEN 16612 mukaan	R_d [N/mm ²] DIN 18008 mukaan	$f_{g;d}$ [N/mm ²] RIL 198-2001 mukaan
Pysyvä	69,75	80,00	39,45
Keskipitkä	72,75	80,00	41,73
Hetkellinen	81,00	80,00	50,85

Taulukon arvoista voidaan helposti huomata, että lämpökarkaistun lasin tapauksessa RIL 198-2001 on selvästi konservatiivisin. Saksalaisen DIN 18008 -standardin ja prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaiset arvot ovat puolestaan kohtuullisen lähellä toisiinsa, joskin pitkäaikaisilla kuormitustapauksilla eroa on jonkin verran.

9.4 Laminoidun lasin tehollisen paksuuden laskentaesimerkki

Lasketaan kahdesta lasikerroksesta koostuvan laminoidun lasilaatan tehollinen paksuus standardiluonnoksen prEN 16612 mukaisesti. Valitaan lasien paksuuksiksi $h_1 = 4$ mm ja $h_2 = 6$ mm. Oletetaan laminoitikalvon paksuudeksi $h_{lk} = 0,76$ mm ja leikkausvoimien siirtokertoimen arvoksi $\omega = 0,3$. Oletetaan lisäksi, että molemmat lasikerrokset ovat lämpölujitettua lasia.

Lasketaan ensin lasikerrosten keskilinjojen etäisyydet koko lasilaatan keskilinjasta.

$$h_{m,1} = \frac{(4+0,76+6) \text{ mm}}{2} - \frac{4 \text{ mm}}{2} = 3,38 \text{ mm} \quad (33)$$

$$h_{m,2} = \frac{(4+0,76+6) \text{ mm}}{2} - \frac{6 \text{ mm}}{2} = 2,38 \text{ mm} \quad (34)$$

Lasilaatan tehollinen paksuus taipumatarkastelua varten:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{4^3 + 6^3 + 12 * 0,3 * (4 * 3,38^2 + 6 * 2,38^2)} \text{ mm} = 8,276 \text{ mm} \quad (35)$$

Lasikerrosten teholliset paksuudet jännitystarkasteluja varten:

$$h_{ef,\sigma;1} = \sqrt{\frac{8,276^3}{4+2*0,3*3,38}} \text{ mm} = 9,697 \text{ mm} \quad (36)$$

$$h_{ef,\sigma;2} = \sqrt{\frac{8,276^3}{6+2*0,3*2,38}} \text{ mm} = 8,736 \text{ mm} \quad (37)$$

Jännitystarkastelut on tarpeen suorittaa erikseen kullekin lasikerrokselle, mikäli kerrokset koostuvat eri lasityypeistä ja näin ollen niiden mitoituslujuudet vaihtelevat. Jos taas kaikki lasikerrokset ovat samaa lasityyppiä, voidaan jännitystarkastelut suorittaa ainoastaan sille lasikerrokselle, jonka tehollinen paksuus jännitystarkasteluja varten on kaikista pienin. Tässä tapauksessa, koska molemmat lasikerrokset ovat lämpölujitettua lasia, voidaan jännitystarkasteluissa tehollisena paksuutena käyttää 8,736 mm.

9.5 Lasin vaaditun paksuuden vertailu

Tässä luvussa on esitetty lasilaatan vaaditun paksuuden laskenta standardiluonnoksen prEN 16612 sekä Suomessa aiemmin melko laajalti käytössä olleen RT 38-10316 -ohjekortin mukaan. RT 38-10316, Lasilevyt, paksuuden mitoitus -ohjekortin mukaista laskentamenetelmää ei tässä insinööriyössä ole käsitelty tämän luvun ulkopuolella. Ohjekortissa esitetyt mitoitusohjeet koskevat ainoastaan rakennuksen ulkoseinään pystysuoraan asennettavia ja kaikilta sivuiltaan jatkuvasti tuettuja ikkunalaseja, joihin ei tuulikuorman lisäksi kohdistu muita ulkoisia kuormia. Ohjekortissa on annettu laskennallisen taiputusjännityksen σ_b arvo ainoastaan tavalliselle float-lasille. Ohjekortti ei myöskään huomioi normaalia alhaisemman lämpötilan tai matalan ilmanpaineen aiheuttamia rasiuksia eristyslaselementtien mitoituksessa. [21, s.1.]

Edellisessä kappaleessa mainittujen seikkojen takia RT 38-10316 -ohjekortin soveltuvuus mitoitukseen on hyvin rajallista. Lisäksi ohjekortti on ajastaan jäljessä, koska tuulikuorma tulisi sen mukaan määrittää RakMK:n osan B1 mukaan. Ohjekortin mukainen lasilevyn paksuuden laskennallinen määrittäminen on kuitenkin haluttu ottaa tässä insinööriyössä vertailukohtaksi prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaiselle mitoitukselle, jotta voidaan saada jonkinlainen käsitys siitä, kuinka merkittävästi menetelmien antamat tulokset poikkeavat toisistaan.

On syytä huomata, että tässä esitetyt vertailulaskelmat eivät anna täysin tarkkaa tai yleispätevää kuvaa RT 38-10316 ja prEN 16612 mukaisten mitoitusmenetelmien avulla laskettujen lasilaattojen paksuuksien välisistä eroista, koska RakMK:n ja eurokoodien mukainen tuulikuormien määrittäminen poikkeavat toisistaan merkittävästi. Täysin tarkan ja yleispätevän vertailun toteuttaminen menetelmien välillä on erittäin hankalaa, ellei mahdollista, koska eurokoodien mukaan tuulikuormia määritettäessä lopputulokseen vaikuttaa huomattavasti useampi seikka kuin RakMK:n mukaan eivätkä tulokset näin ollen aina suhteudu toisiinsa samalla tavoin.

Tässä vertailulaskelmassa lasi on tavallista float-lasia ja se on kaikilta neljältä sivultaan jatkuvasti tuettu. Lasi asennetaan pystyasentoon eikä kyseessä ole eristyslaselementti. Lasiin ei kohdistu tuulikuorman lisäksi muita ulkoisia kuormia. Tuulenpaineen ominaisarvoksi q_k oletetaan tässä $0,65 \text{ kN/m}^2$ sekä prEN 16612 että RT 38-10316 mukaista mitoitusta varten. Lasilaatan lyhemmäksi sivumitaksi a valitaan 2000 mm ja pidemmäksi sivumitaksi b valitaan 2500 mm .

Lasilaatan laskennallinen paksuus RT 38-10316 -ohjekortin mukaan:

$$t = 10^3 * \sqrt{\frac{3}{4} * \frac{p}{\sigma_b} * \left(1 - \frac{5}{6} * \frac{\lambda^2}{1+\lambda^4}\right) * \frac{\lambda(1-\mu\lambda^2)}{1+\lambda^4}} = 4,9mm \quad (38)$$

p = kokonaistuulikuorma $a*b*0,65 \text{ kN/m}^2 = 3,25 \text{ kN}$

λ = sivusuhte $a/b = 0,8$

σ_b = lasin laskennallinen taivutusjännitys, tässä $3*10^4 \text{ kN/m}^2$

μ = poissonin luku, tässä 0,25

Lasilaatan nimellispaksuus valitaan laskennallisen paksuuden perusteella. RT 38-10316 -ohjekortin taulukon 1 mukaan laskennallista paksuutta 4,9 mm vastaava nimellispaksuus on tavalliselle float-lasille 6 mm. [21, s.2.]

Mitoitetaan seuraavaksi kyseinen ikkunalasi prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaisesti. Taivutusvetojännityksen ja taipuman maksimiarvot lasketaan liitteen 1 mukaisilla laskentakaavoilla. Lasin vaaditun paksuuden laskennallinen määrittäminen ei suoraan ole mahdollista, sillä lasin paksuus vaikuttaa jännitysten ja taipumien laskennassa käytettäviin k_1 ja k_4 kertoimiin. Standardiluonnoksen prEN 16612 mukaisessa mitoituksessa on siis ensin valittava lasille paksuus, laskettava jännitys ja taipuma ja tarkistettava sitten, että murto- ja käyttörajatilan mitoitusehdot täyttyvät.

Valitaan lasin paksuudeksi h aluksi RT 38-10316 -ohjekortin perusteella saatu 6 mm ja tarkastetaan toimisiko lasi myös prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaan, kun suurista taipumista aiheutuva laatan geometrinen epälineaarisuus otetaan huomioon.

Laatan taivutusvetojännityksen maksimiarvo saadaan seuraavasta kaavasta:

$$\sigma_{max} = k_1 \frac{a^2}{h^2} F_d = 0,177 * \frac{2000^2}{6^2} * 0,975 * 10^{-3} \frac{N}{mm^2} = 19,18 \frac{N}{mm^2} \quad (39)$$

k_1 = 0,177 (ks. liite 1, taulukko A)

a = lasilaatan lyhempi sivumitta, tässä 2000 mm

h = lasin nimellispaksuus, tässä 6 mm

F_d = kuorman mitoitusarvo murtorajatilassa, tässä $1,5*0,65 \text{ kN/m}^2 = 0,975 \text{ kN/m}^2$

Standardiluonnoksen prEN 16612 murtorajatilan mitoitusehto (ks. kaava 7) voidaan muokata seuraavaan muotoon.

$$\frac{\sigma_{max}}{f_{g,d}} \leq 1,00 \quad (40)$$

Käyttöasteen tulee siis mitoitusehdon mukaisesti olla pienempi kuin 100 %. Verrataan edellisellä sivulla laskettua taivutusvetojännityksen maksimiarvoa taulukon 19 mukaiseen tavallisen float-lasin taivutusvetolujuuden mitoitusarvoon hetkellisille kuormille prEN 16612 mukaisesti laskettuna, jotta saadaan käyttöaste selville.

$$\frac{19,18}{18,50} = 1,04 \quad (41)$$

Käyttöaste on siis hieman yli 100 %. Ylitys ei kuitenkaan ole merkittävä. Kun lasin nimellispaksuudeksi valitaan $h = 8 \text{ mm}$ ja laskenta suoritetaan uudelleen samaan tapaan kuin edellä, saadaan taivutusvetojännityksen maksimiarvoksi:

$$\sigma_{max} = 15,27 \frac{N}{mm^2} \quad (42)$$

Tätä taivutusvetojännityksen maksimiarvoa vastaava käyttöaste on:

$$\frac{15,27}{18,50} = 0,83 \quad (43)$$

Murtorajatilan tarkastelu on nyt suoritettu. Lasketaan seuraavaksi taipuma kaavasta:

$$w_{max} = k_4 \frac{a^4 F_d}{h^3 E} = 0,045 * \frac{(2000mm)^4}{(8mm)^3} * \frac{0,65}{70*10^6} = 13,04 \text{ mm} \quad (44)$$

k_4 = 0,045 (ks. liite 1, taulukko B)

a = lasilaatan lyhempi sivumitta, tässä 2000 mm

h = lasin nimellispaksuus, tässä 8 mm

F_d = kuorman mitoitusarvo käyttörajatilassa, tässä 0,65 kN/m²

E = kimmokerroin, tässä 70 000 MPa

Mikäli taipumarajana käytetään $l/100$ laatan lyhemmän sivumitan a mukaan, saadaan sallitulle taipumalle arvo $w_d = 20 \text{ mm}$. Näin ollen käyttörajatilan mitoitusehdon (ks. kaava 6) voidaan todeta täyttyvän. Lasin vaadituksi nimellispaksuudeksi saadaan siis prEN 16612 mukaisesti laskettuna 8 mm.

Mainittakoon vielä erikseen, että mikäli suurista taipumista aiheutuvaa laatan geometrista epälineaarisuutta ei huomioida ja laskenta suoritetaan lineaarisen teorian mukaan, tulokset poikkeavat edellisestä ja laatan vaadittu nimellispaksuus kasvaa. Tässä esimerkiksi lineaarisen teorian mukaan laskettaessa olisi prEN 16612 mukaan vaadittu 10 mm paksu lasi, kun taas nyt käyttöaste ylittyi vain hyvin täpärästi 6 mm paksulla lasilla. Tämä on hyvä osoitus siitä, että nämä seikat on hyvä huomioida todellisuutta vastaavaan ja taloudelliseen mitoitukseen pyrittäessä.

9.6 Huomioita vertailu- ja esimerkkilaskelmista

Vertailulaskelmista voidaan huomata, että saksalainen DIN 18008 -standardi antoi kaikille lasityypeille tarkastelluissa tilanteissa suurimmat kestävyysarvot. Poikkeuksena edelliseen oli ainoastaan lämpökarkaistun lasin kestävyys hetkellisiä kuormia vastaan, jolle prEN 16612 -standardiluonnos antoi hieman suuremman arvon. Konservatiivisimmat arvot antoi kaikissa tapauksissa RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet.

On kuitenkin syytä huomata, että tavallista float-lasia tarkasteltaessa tuentatavalla oli suuri vaikutus siihen, miksi DIN 18008 mukaiset arvot olivat niin korkeita. Mikäli lasi olisi ollut jatkuvasti tuettu vain kahdelta reunaltaan ja lasilaatan reunoille olisi päässyt syntymään vetojännityksiä, olisivat kestävyysarvot olleet vain 80 % taulukon 19 arvoista. Lujuusarvot olisivat olleet vielä pienempiä, mikäli tuentatapa ei olisi ollut lineaarinen, sillä rakennetyypin huomioiva kerroin k_c olisi saanut arvon 1,8 sijasta arvon 1,0.

On myös syytä huomata, että ohjeet poikkeavat toisistaan laminoitujen lasilaattojen mitoitusta koskevilta osin. DIN 18008 ei salli laminointikalvon leikkausvoimien siirtokyvyn hyödyllisten vaikutusten huomioimista mitoituksessa, mutta sallii lasin kestävyuden mitoituservon kasvattamisen 1,1 kertaiseksi. RIL 198-2001 ja prEN 16612 puolestaan sallivat laminointikalvon leikkausvoimien siirtokyvyn huomioimisen, mikäli laminointiin käytetyn materiaalin ominaisuudet tunnetaan. Näin ollen vertailulaskelmien tulokset eivät ole suoraan vertailukelpoisia laminoitujen lasien ollessa kyseessä.

10 Yhteenveto ja tulokset

Lasin puristuslujuus on sen vetolujuuteen verrattuna hyvin suuri. Lasilaatan mitoituksessa murtorajatilassa voidaankin yleensä tyytyä vertaamaan suurinta taivutusvetojännitystä taivutusvetolujuuden mitoitusarvoon. Tehtävä on kuitenkin haastava, sillä lasin taivutuslujuuteen vaikuttaa moni seikka, joita on avattu tarkemmin tämän insinööriyön luvussa 3. Murtorajatilan tarkastelujen lisäksi on tietysti käyttörajatilassa tarkastettava, etteivät lasilaatan taipumat ylitä sallittuja arvoja.

Merkittävimpiä lasin kestävyyyteen vaikuttavia tekijöitä on kuormituksen kesto aika. Lasi kestää huomattavasti paremmin hetkellisiä kuormia kuin pysyviä kuormia. Tämä seikka on huomioitu tässä insinööriyössä esitellyissä DIN 18008 ja prEN 16612 mukaisissa mitoitusmenettelyissä erityisen kuormitusajan vaikutukset huomioivan k_{mod} kertoimen avulla. Kertoimen arvo pienenee kuormitusajan pidetessä.

Lämpökäsittelyjen tai kemiallisten käsittelyjen avulla voidaan aikaansaada lasilaatan pinnoille pysyvä puristusjännitys, joka lisää lasin kestävyyttä taivutuksesta aiheutuvia rasituksia vastaan merkittävästi. Lisäksi tämä pysyvä puristusjännitys pienentää kuormitusajan vaikutusta lasin kestävyyyteen ja esimerkiksi DIN 18008 -standardissa k_{mod} kerroin on jätetty kokonaan pois lämpölujitetun tai -karkaistun lasin taivutuslujuuden mitoitusarvon laskentakaavoista.

Lasirakenteiden riskienhallinta on hankalaa lasin hauraan murtotavan ja lasin rikkoutuessa syntyvien viiltävän terävien kappaleiden takia. Edellä mainituista syistä on hyvin tärkeää valita oikea lasityyppi käyttökohteen mukaan. Tehtävä kuulostaa yksinkertaiselta, mutta on itse asiassa melko haastava. Tämän insinööriyön lukuun 5 koottiin ohjeita lasityypin valintaan rakentamista koskevista määräyksistä, standardiluonnoksista, ulkomaisista standardeista, lasirakentamista käsittelevästä kirjallisuudesta sekä lasivalmistajien antamista ohjeista.

Lasilaattojen mitoituksesta ei ole olemassa Euroopan tasolla virallista standardia. Tässä insinööriyössä on esitelty saksalaisen DIN 18008 -standardin sekä eurooppalaisen prEN 16612 -standardiluonnoksen mukaiset mitoitusmenettelyt. Kumpikaan näistä menetelmistä ei ole Suomessa yleisesti hyväksytty, joten niiden käyttöön on aina hankittava lupa tapauskohtaisesti.

Suomessa on yhä laajasti käytössä RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -kirja, joka perustuu tässä insinööriyössä esiteltyä prEN 16612 -standardiluonnosta huomattavasti aikaisempaan prEN 13474 -standardiluonnokseen. Kirjassa esitetyt mitoituslaskelmat on laadittu Eurokoodien esistandardien pohjalta ja ne ovat siksi ajastaan jäljessä, eikä niitä tulisi enää käyttää. Ne eivät kuitenkaan ole virheellisiä ja niitä voidaan käyttää mitoituksessa, kunhan tämä seikka huomioidaan kuormien laskennassa ja kuormitusyhdistelmien muodostuksessa.

Tämän insinööriyön luvun 9 vertailulaskelmista voidaan huomata, että saksalainen DIN 18008 -standardi antoi kaikille lasityypeille tarkastelluissa tilanteissa lähes poikkeuksetta suurimmat taivutusvetolujuuden mitoitusarvot. Konservatiivisimmat arvot antoi kaikissa tapauksissa RIL 198-2001, Valoaläpäisevät rakenteet -ohjekirja ja prEN 16612 -standardiluonnos sijoittui edellä mainittujen välimaastoon.

Insinööriyön puitteissa laadittiin Excel-pohjainen lasilaattojen mitoitusohjelma. Ohjelma perustuu prEN 16612 -standardiluonnokseen ja soveltuu suorakulmaisten, kaikilta neljältä sivultaan tuettujen lasilaattojen mitoitukseen. Mikäli tuentatapa poikkeaa edellä mainitusta, tulee lasilaatan jännitykset ja taipumat määrittää esimerkiksi asianmukaisen FEM-laskentamallin avulla. Laskentaohjelma sisältää myös laminoituneen lasilaatan tehollisen paksuuden määrittämiseen soveltuvan välilehden.

Lähteet

- 1 Siikanen Unto, Rakennusaineoppi, kuudes painos, Rakennustieto Oy, 2001, Hämeenlinna.
- 2 RIL 198-2001 Valoaläpäisevät rakenteet, Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry, 2001, Helsinki.
- 3 Rainamo Matti, Riikonen Mauri, Lasirakentajan käsikirja, Enterpress Oy, Tampere, 1999.
- 4 Lasifakta 2012, Pilkington Lahden lasitehdas Oy, 2012.
- 5 Bos Freek, Safety Concepts in Structural Glass Engineering, Zutphen, Alankomaat, 2009.
- 6 SFS-EN 572-1 Rakennuslasit. Perustuotteet. Soodakalkkisilikaattilasi. Osa 1: Määritelmät ja yleiset fysikaaliset ja mekaaniset ominaisuudet, Suomen Standardoimisliitto SFS, 2012
- 7 DIN 18008-1 Glass in Building - Design and construction rules - Part 1: Terms and general bases, German Institute for Standardization, 2010.
- 8 prEN 16612 Glass in building - Determination of the load resistance of glass panes by calculation and testing, 2013.
- 9 Glass Performance Days 2007, Proceedings of the 10th International conference in Tampere, 2007.
- 10 Tenhunen Olavi, Rakenneteknisiä mittauksia kaksoisjulkisivussa, Rakenteiden Mekaniikka -verkkolehden artikkeli, 2003 [verkkodokumentti] <rmseura.tkk.fi/rmlehti/2003/nro2/RakMek_36_2_2003_5.pdf> luettu 19.3.2015.
- 11 Hassinen Paavo, haastattelu, 26.2.2015
- 12 Tenhunen Olavi, Teknillisen korkeakoulun teräsrakennetekniikan laboratorion julkaisuja, Metalli-lasirakenteisen kaksoisjulkisivun materiaalien soveltamiskriteerit, 2003 [verkkodokumentti] <<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/38/isbn9512268132.pdf?sequence=1>> luettu 19.3.2015.
- 13 SFS-EN ISO 12543-1 Rakennuslasit. Laminoitu lasi ja laminoitu turvalasi. Osa 1: Komponenttien määritelmät ja kuvaukset, Suomen Standardoimisliitto SFS, 2011

- 14 Pilkington Planar -esite, Pilkingtonin verkkosivut,
<http://www.pilkington.com/resources/planarbrochurei2701oct2009in-cldatasheetsdec2008.pdf>
luettu 23.3.2015
- 15 F2 Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakennuksen käyttöturvallisuus, Määräykset ja ohjeet 2001, Ympäristöministeriö, Asunto- ja rakennusosasto
- 16 DIN 18008-2 Glass in building - Design and construction rules - Part 2: Linearly supported glazings, German Institute for Standardization, 2010.
- 17 DIN 18008-3 Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 3: Punktförmig gelagerte Verglasungen, Deutsches Institut für Normung, 2013.
- 18 DIN 18008-4 Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 4: Zusatzanforderungen an absturzsichernde Verglasungen, Deutsches Institut für Normung, 2013.
- 19 Glass Performance Days 2011, Proceedings of the 12th International conference, 2011.
- 20 DIN 18008-5 Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln - Teil 5: Zusatzanforderungen an begehbare Verglasungen, Deutsches Institut für Normung, 2013.
- 21 RT 38-10316 Lasilevyt, paksuuden mitoitus –ohjekortti, Rakennustietosäätiö1986
- 22 Siebert Geralt, Maniatis Iris, Tragende Bauteile aus Glas, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berliini, Saksa, 2012

Liite 1: Suuret taipumat huomioiva jännitysten ja taipumien laskentamenetelmä kaikilta sivuiltaan jatkuvasti tuetuille suorakulmaisille lasilaatoille

Tässä liitteessä on esitetty neljältä sivultaan jatkuvasti tuetun suorakulmaisen lasilaatan taipumien ja taivutusvetojännitysten laskentakaavat, jotka huomioivat suurista taipumista aiheutuvan laatan geometrisen epälineaarisuuden.

Taivutusvetojännityksen maksimiarvo:

$$\sigma_{max} = k_1 \frac{a^2}{h^2} F_d$$

Taipuman maksimiarvo:

$$w_{max} = k_4 \frac{a^4}{h^3} \frac{F_d}{E}$$

Laskentakaavoissa ja taulukoissa lasilaatan sivumitoista a on lyhempi sivumitta ja b on pidempi sivumitta. Lasilaatan sivusuhte $\lambda = a/b$ ja pinta-ala $A = ab$. Lasilaatan paksuutta merkitään kirjaimella h . Jännitysten laskennassa F_d on murtorajatilan mitoituskorma ja taipuman laskennassa F_d on käyttörajatilan mitoituskorma. E on lasin kimmokerroin.

Kertoimille k_1 ja k_4 on annettu arvoja taulukoissa A ja B. Nämä arvot pätevät Poissonin luvuille μ välillä 0,20...0,24 ja niitä voidaan interpoloida lineaarisesti. Taulukoiden yhteydessä on annettu myös kaavat laskentaa varten.

Kertoimet k_1 ja k_4 määräytyvät sivusuhteen λ sekä yksiköttömän kuorman p^* (non-dimensional load) avulla. Yksikötön kuorma p^* määritetään seuraavasta kaavasta.

$$p^* = \left(\frac{A}{4h^2} \right)^2 \frac{F_d}{E}$$

Taulukko A. Kertoimen k_1 arvot jännitysten laskentaa varten. [prEN 16612, liite B]

$\lambda=a/b$	p^*										
	0	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,268	0,261	0,244	0,223	0,190	0,152	0,135	0,130	0,129	0,128	0,128
0,9	0,319	0,309	0,286	0,260	0,218	0,172	0,152	0,145	0,144	0,144	0,144
0,8	0,380	0,369	0,341	0,309	0,257	0,199	0,173	0,164	0,162	0,162	0,162
0,7	0,449	0,437	0,408	0,372	0,311	0,236	0,199	0,186	0,184	0,184	0,184
0,6	0,524	0,515	0,490	0,457	0,391	0,294	0,238	0,215	0,212	0,211	0,211
0,5	0,600	0,595	0,580	0,559	0,506	0,395	0,302	0,255	0,247	0,245	0,245
0,4	0,671	0,669	0,664	0,655	0,631	0,551	0,429	0,322	0,297	0,290	0,289
0,3	0,724	0,723	0,722	0,721	0,716	0,694	0,629	0,471	0,388	0,356	0,349
0,2	0,747	0,747	0,747	0,747	0,747	0,745	0,738	0,699	0,613	0,502	0,457
0,1	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,750	0,749	0,748	0,740	0,729

Laskennallisia tarkoituksia varten:

$$k_1 = \frac{1}{4 \left[\frac{1}{z_2^2} + \frac{(p^*)^2}{(z_3^2 + (z_4 p^*)^2)} \right]^{0,5}}$$

missä:

$$z_2 = 24 \left[0,0447 + 0,0803 \left(1 - \exp \left(-1,17 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,073} \right) \right) \right]$$

$$z_3 = \frac{1}{\lambda} \left(4,5 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^2 + 4,5 \right)$$

$$z_4 = \frac{1}{\lambda} \left(0,585 - 0,05 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) \right)$$

Taulukko B. Kertoimen k_4 arvot taipumien laskentaa varten. [prEN 16612, liite B]

$\lambda=a/b$	p^*										
	0	1	2	3	5	10	20	50	100	200	300
1,0	0,0461	0,0414	0,0354	0,0310	0,0255	0,0189	0,0137	0,0088	0,0062	0,0044	0,0036
0,9	0,0559	0,0505	0,0434	0,0381	0,0314	0,0233	0,0168	0,0108	0,0077	0,0054	0,0044
0,8	0,0683	0,0624	0,0540	0,0477	0,0395	0,0293	0,0213	0,0137	0,0097	0,0069	0,0056
0,7	0,0826	0,0769	0,0680	0,0607	0,0507	0,0380	0,0277	0,0178	0,0127	0,0090	0,0073
0,6	0,0984	0,0941	0,0858	0,0781	0,0666	0,0508	0,0373	0,0242	0,0172	0,0122	0,0100
0,5	0,1148	0,1125	0,1069	0,1005	0,0889	0,0703	0,0527	0,0345	0,0247	0,0176	0,0144
0,4	0,1303	0,1295	0,1273	0,1242	0,1166	0,0994	0,0781	0,0528	0,0382	0,0273	0,0224
0,3	0,1421	0,1419	0,1416	0,1410	0,1392	0,1324	0,1170	0,0872	0,0654	0,0477	0,0393
0,2	0,1474	0,1474	0,1474	0,1473	0,1472	0,1468	0,1452	0,1363	0,1195	0,0962	0,0822
0,1	0,1480	0,1480	0,1480	0,1480	0,1480	0,1480	0,1480	0,1479	0,1477	0,1471	0,1460

Laskennallisia tarkoituksia varten:

$$k_4 = \frac{\left[\left(\frac{\left(\frac{1}{z_1^4} + 4(p^*)^2 \right)^{0,5} - \frac{1}{z_1^2}}{2} \right)^{0,5}}{16\lambda^2 p^*} \right]}$$

missä:

$$z_1 = 192(1 - \mu^2)\lambda^2 \left[0,00406 + 0,00896 \left(1 - \exp \left(-1,123 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right)^{1,097} \right) \right) \right]$$