



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU
SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Antti Harri

Rakennelasi

Lasi rakennusta jäykistävänä elementtinä

Opinnäytetyö

Kevät 2024

Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

Opinnäytetyön tiivistelmä

Tutkinto-ohjelma: Insinööri (ylempi AMK), Rakentaminen

Suuntautumisvaihtoehto: Rakennesuunnittelu

Tekijä: Antti Harri

Työn nimi: Rakennelasi: Lasi rakennusta jäykistävänä elementtinä

Ohjaaja: Martti Perälä

Vuosi: 2024

Sivumäärä: 56

Liitteiden lukumäärä: 0

Erityisesti pientalorakentamisessa trendinä on lisätä julkisivun lasitettua alaa, jolloin umpiseinän osuus rakennuksen vaipasta vähenee. Rakennusta voidaan jäykistää umpiseinän rakennuslevyn avulla, kun taas ikkunat ovat rungon aukkoihin tehtyjä kelluvia elementtejä, jotka eivät osallistu kokonaisjäykistykseen. Kun lasitettua alaa on enemmän, pienenee rakennuksen jäykkyys tuulikuormia vastaan. Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, voidaanko lasia käyttää myös rakennuksen jäykistämiseen, jolloin jäykistysjärjestelmästä saadaan eheämpi.

Tutkimus tehtiin kirjallisuuskatsauksen avulla, etsimällä suunnitteluohjeita lasirakenteille ja selvittämällä teoriaa. Lisäksi FEM-ohjelmistoilla mallinnetuista rakenteista saatiin tuloksia, joita voitiin analysoida. Vertailulaskelmia tehtiin kimmoteorian ja kirjallisuudessa esitettyjen kaavojen avulla käsinlaskentana. Näistä pyrittiin kehittämään yrityksen toimeksiantojen tueksi laskentapohjia.

Yksi keskeisiä opinnäytetyön tavoitteita oli tunnistaa jäykistävän lasirakenteen mitoittavia tekijöitä sekä määrittää, kuinka korkea kapasiteetti lasirakenteilla voidaan saavuttaa verrattuna yleisiin pientalon jäykistysmenetelmiin nähden. Tuloksien perusteella pystyttiin laatimaan käsinlaskelmamenetelmiä ja saatiin käsitys jäykistävien lasirakenteiden kapasiteetista.

Opinnäytetyön aikana selvisi, että aihealue on hyvin laaja, joten jatkotutkimuksille on mahdollisuuksia. Esimerkiksi seuraavaan eurokoodikokoelmaan on tekeillä oma osuutensa lasirakenteiden suunnittelulle, ja sen soveltamista rakennusten jäykistämiseen voidaan tutkia. Lisäksi lasirakenteita voidaan käyttää myös staattisia kuormia vastaan, vaikka tässä opinnäytetyössä keskityttiinkin jäykistävään lasirakenteeseen.

¹ Asiasanat: lasi, lasitus, mekaniikka, kuormitus

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Thesis abstract

Degree programme: Master of Engineering, Construction Engineering

Specialisation: Structural Design

Author: Antti Harri

Title of thesis: Structural glazing: Glass in a building as bracing element

Supervisor: Martti Perälä

Year: 2024

Number of pages: 56

Number of appendices: 0

Today's trend of having architectural designs that favour glass in façades create a problem in the structural design of detached houses. The more there are glazed surfaces, the less there are structural sheet walls that create the bracing against wind loads. If glass can be used as a bracing element in buildings against wind loads, the frame will be more consistent.

In the thesis literature and existing standards were studied to find means for stiffening detached houses. In addition, FEM-programs were used to calculate glass structures, and the results were analysed. For comparison, hand calculations based on elastic theory and formulas found in literature were created, which could later be used in a company's projects.

One of the main points of the thesis was to find limiting factors and to get a better understanding of what kind of capacity glass structures offer. These were compared to traditional methods of bracing buildings. Based on the results of the study, hand calculation methods could be created and the understanding of glass structures in bracing buildings against wind loads were formed.

During the thesis it became clear that the subject of the study was very wide, so future studies will be needed. For example, in the next Eurocode system there will be a section specifically for the design of glass structures, so a study how to implement that in bracing against wind loads can be studied. Furthermore, glass structures can be used to carry static loads, even though the thesis concentrated on bracing glass structures.

¹ Keywords: glass, glazing, mechanics, strains and stresses

SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä	2
Thesis abstract	3
SISÄLTÖ	4
Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo	6
1 JOHDANTO	10
1.1 Opinnäytetyön tausta	10
1.2 Opinnäytetyön tavoite.....	11
1.3 Opinnäytetyön rakenne	11
1.4 Opinnäytetyön rajauksia.....	12
1.5 Tutkimusmenetelmät.....	12
1.6 Yritysesittely	13
2 LASI MATERIAALINA	14
2.1 Lasinvalmistuksen historia	14
2.2 Lasi rakennuksissa.....	15
2.2.1 Monoliittinen lasi	15
2.2.2 Laminoitu lasi	16
2.2.3 Eristyslaseielementti	16
2.3 Lasin kemiallinen koostumus.....	17
2.4 Lasin mekaaniset ominaisuudet	18
2.5 Rakennemitoitus.....	19
2.5.1 Mekaaninen kiinnitys.....	19
2.5.2 Liimausainekiinnitys	21
2.5.3 Leikkausjännitys lasiruudussa.....	24
2.5.4 Stabiiliteetti	26
2.5.5 Kiepahdus.....	27
2.5.6 Lommahdus	28
3 NYKYTILAN KUVAUS.....	29
3.1 Rankarunko ja rakennuslevy	29
3.2 Levyseinälohkon rakennemitoitus	29

4	JÄYKISTÄVÄ LASI	32
4.1	Materiaalin lujuus ja suunnitteluarvot	32
4.2	Laselementit laskennassa	33
4.3	Leikkausjännityksen maksimi	35
4.4	Laselementin liimasauma	36
4.5	Laselementin kiinnityslista	37
4.6	Runko lasielementin ympärillä.....	39
4.7	Leikkauslommahdus DT 210 -ohjeen mukaan	42
4.8	Leikkauslommahdus, yksinkertainen menetelmä	44
5	TULOKSET	46
6	POHDINTA JA YHTEENVETO.....	54
	LÄHTEET	55

Kuva-, kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Monoliittinen lasi	15
Kuva 2. Useista lasiruuduista koostuva lasielementti	16
Kuva 3. Lämpöeristettyjä lasielementtejä.....	17
Kuva 4. Lasielementin pistemäinen kiinnitys.....	19
Kuva 5. Pistekiinnitysjärjestelmän tyypit 1–3	20
Kuva 6. Pistekiinnitysjärjestelmän tyypit 4–6	20
Kuva 7. Pistekiinnitysjärjestelmän kuormitus	21
Kuva 8. Liimausaineessa vaikuttavat voimat	22
Kuva 9. Lasiruudun leikkausjännitysten jakautuminen.....	25
Kuva 10. Erilliset palkkikerrokset ja yhtenäinen palkki.....	25
Kuva 11. Stabiiliteetinmenettämisen ilmiöt levyrakenteessa	26
Kuva 12. Taivutetun sauvarakenteen kiepahdus	27
Kuva 13. Havainnollistus levyn lommahduksesta	28
Kuva 14. Voimien jakaantuminen levyrakenteisessa seinässä.....	29
Kuva 15. Lasielementin mittapiirros	34
Kuva 16. Lasiruudun leikkausjännitysjakauma RFEM-ohjelmassa.....	36
Kuva 17. Periaatepiirros kiinnityslistasta.....	37
Kuva 18. Kuormien jakaantuminen rakennelasissa.....	40
Kuva 19. Rakennelasin laskentamalli.....	40
Kuva 20. Kiepahduksen ensimmäinen, toinen ja kolmas muoto NextFEM-mallissa.....	41

Kuva 21. Leikkauslommahduksen laskentamalli.....	42
Kuva 22. Lasiruudun laskentamalli	46
Kuvio 1. Muodonmuutoksien ja ajan suhde	23
Kuvio 2. Lasiruudun $h=1000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.	47
Kuvio 3. Lasiruudun $h=2000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.	47
Kuvio 4. Lasiruudun $h=3000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.	47
Kuvio 5. Lasiruudun $h=4000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.	48
Kuvio 6. Lasiruudun kuormakestävyys $h=1000$ sivusuhteen a/b funktiona.....	49
Kuvio 7. Lasiruudun kuormakestävyys $h=2000$ sivusuhteen a/b funktiona.....	49
Kuvio 8. Lasiruudun kuormakestävyys $h=3000$ sivusuhteen a/b funktiona.....	49
Kuvio 9. Lasiruudun kuormakestävyys $h=4000$ sivusuhteen a/b funktiona.....	50
Kuvio 10. K-arvojen joukko ja sovitettu funktio sivusuhteen a/b funktiona.	50
Taulukko 1. Lasin mekaaniset ominaisuudet	18
Taulukko 2. Natronkalkkilasin ominaistaivutuslujuus	19
Taulukko 3. Liimamassojen tyypillisiä materiaaliominaisuuksia	24
Taulukko 4. Vastaavat paksuudet laminoitulle lasille	35
Taulukko 5. Kiinnityslistan ruuvauksen leikkauskestävyydet.	39
Taulukko 6. Kriittisen leikkausjännityksen vakio K	44
Taulukko 7. Kriittisen leikkausjännityksen vakio K , laajennettu.....	50
Taulukko 8. Jäykistysjärjestelmien vertailua	53

Käytetyt termit ja lyhenteet

Float-lasi	Float-prosessin avulla valmistettu tasolasi
Heat soak -testi	Lämpökarkaistun lasin ylimääräinen lämpökäsittely, joka vähentää sen rikkoutumisen riskiä ja parantaa sen käyttöä turvallisuutta vaativissa kohteissa.
Ikkuna	Lasitettu rakennusosa
Karmi	Ikkunan rungon muodostava uloin osa
Kemiallisesti lujitettu lasi	Pintakerroksestaan puristuksessa oleva lasiruutu, joka rikkoutuu isoiksi sirpaleiksi, ja jolla on korkea lujuus.
Laminoitu lasi	Lasielementti, jonka monoliittisiä lasiruutuja yhdistää laminointikerros (eng. Laminated Glass, LG).
Lasi	Pääosin kvartsista muodostettu amorfinen massa, joka on haurasta, kovaa ja yleensä läpinäkyvää. Tässä työssä lasilla tarkoitetaan natronkalkkilasia, ellei muuta ole mainittu.
Lasielementti	Kahdesta tai useammasta lasiruudusta koostuva kokonaisuus
Lasiruutu	Puitteen tai suoraan karmin sisäpuolella oleva osa, yleensä tehty lasista
Liimamassa	Lasirakenteissa käytetty elastinen liimausaine, jolla on suuri muodonmuutoskyky.
Liimausaine	Tässä työssä termillä tarkoitetaan elastisia liimamassoja tai jäykkiä liimoja

Lämpökarkaistu lasi	Lämpökäsittelyn vuoksi pintakerroksestaan puristuksessa oleva lasiruutu, joka rikkoutuu pieniksi muruiksi, ja jolla on korkea lujuus (eng. Tempered Glass, Toughened Glass, TG).
Lämpölasielementti	Lasielementti, jonka yhdessä tai useammassa kerroksessa on lämmöneristävyttä parantava kaasutäytteinen kerros (eng. Insulated Glass Unit, IGU).
Lämpölujitettu lasi	Kuin lämpökarkaistu, mutta ei niin lujaa ja hajoaa isommiksi sirpaleiksi, mutta pienemmiksi kuin päästetty lasi (eng. Heat-Strengthened Glass).
Puite	Karmien sisäpuolella oleva saranoitu osa
Päästetty lasi	Lasi, jonka annetaan jäähtyä valmistusprosessin jälkeen hitaasti (eng. annealed), ja jonka sirpaleet ovat tikkaimaisia. Kutsutaan myös hehkutetuksi lasiksi.
Rakenneliima	Lasirakenteissa käytetty jäykkä liimausaine, kuten epoksi
Tasolasi	Litteä lasilevy

1 JOHDANTO

1.1 Opinnäytetyön tausta

Nykyajan pien- ja rivitaloissa arkkitehtisuunnittelu korostaa isoja ikkunoita, jopa ikkunaseiniä. Tämä aiheuttaa rakennuksen kokonaisjäykistykseen kannalta ongelmia. Teräsrunkoisia pientaloja ei käytetä käytännössä ollenkaan ja betonirunkoisia vain vähän. Teräsrakenteisissa liikerakennuksissa ja halleissa kokonaisjäykistys toteutetaan yleensä vinositeillä rungon sisäpuolella tai mastopilareilla, näkyväksi jäävänä rakenteena. Pientaloissa kantavien rakenteiden ei haluta näkyvän, vaan pintojen halutaan olevan sileitä ja yhtenäisiä. Betonirungot ovat hyvin jäykkiä ja massiivisia rakenteita, mutta niillä on huono lämmöneristävyys. Lisäksi puun käyttöä halutaan lisätä kaikessa rakentamisessa sen hyvän hiilijalanjäljen vuoksi.

Pientalot Suomessa rakennetaan usein puisella rungolla, joita on kahta päätyyppiä: hirsikehikot ja rankarungot. Hirsisissä rungoissa tuulen aiheuttamat kuormitukset siirtyvät hirsikerralta toiselle kitkavoimien sekä vaarujen avulla. Rankarunkoisissa pientaloissa jäykistykseen sen sijaan käytetään yleensä puu- tai kipsilevyjä. Perinteisiä ikkunoita ei ole suunniteltu jäykistämään rakennuksen runkoa, vaan ne asennetaan runkoon tehtyihin aukkoihin, ja väli tilkitään kevyellä ja voimia välittämättömällä eristeellä. Ikkuna on siis kantavasta rungosta irti oleva, kelluva rakennusosa. Kun umpiseinää korvataan enemmän ja enemmän ikkunoilla tai lasielementeillä, on rakennuksessa vähemmän jäykistävää runkoa.

Runkoon kohdistuvat tuulikuormat viedään perustuksille levytyksen ja sen kiinnitykseen käytettyjen kiinnikkeiden yhteistoiminnalla. Puurakenteissa mekaaniset puikkoliitokset eivät ole kovin vahvoja ja kestävyys ei välttämättä riitä suuremman tuulikuorman alueilla, jos rakennuksessa on enemmän kuin yksi asuinkerros. Kun puurankarunkoisen pientalon jäykistykseen umpiseinää ei ole tarpeeksi rakennuslevyillä toteutettavaksi, käytetään kapasiteetin loppuessa runkoon upotettavia puisia mastopilareita.

Euroopassa kantavat rakenteet suunnitellaan harmonisoidulla laskentajärjestelmällä, jota kutsutaan eurokoodiksi. Se on jaettu useaan eri osaan, sisältäen suunnitteluohjeet muun muassa teräkselle, puulle ja betonille. Lasirakenteita varten ei kuitenkaan ole olemassa omaa suunnitteluohjetta, vaan sellainen on vasta tekeillä. Eurokoodilla mitoitettaviin kohteisiin voidaan soveltaa muita standardeja ja laskentamenetelmiä, mutta niiden tulee olla

yhteensopivia sen kanssa. Yhteensopivuuden osoittaminen on vaikeaa, ellei verrattavaa järjestelmää ole.

1.2 Opinnäytetyön tavoite

Koska lasin monipuolinen käyttö rakennuksissa todennäköisesti lisääntyy jatkossakin, tässä työssä haluttiin selvittää, onko lasia mahdollista käyttää hyväksi rungon jäykistämisessä. Tällöin jäykistävän umpiseinän tarve vähenee, tai se voidaan poistaa kokonaan. Keskeinen selvitettävä asia oli jäykistyskyky verrattuna umpiseinään, eli vaikka jäykistäminen onnistuisi, saadaanko siitä sellaista etua, että on järkevää lisätä ylimääräisiä työvaiheita rakentamiseen.

Tässä työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Onko lasin suunnittelulle Euroopan laajuisia tai Euroopan jäsenmaakohtaisia suunnitteluohjeita?
- Millainen jäykistyskyky lasirakenteella voidaan saavuttaa?
- Mitkä ovat jäykistävän lasielementin mitoitettavia (rajoittavia) asioita?

1.3 Opinnäytetyön rakenne

Työn toisessa luvussa kerrotaan lasin ominaisuuksista, valmistuksesta ja siitä minkälaisia lasiruutuja on olemassa. Lisäksi kerrotaan lasin rakennemitoitukseen liittyvien ilmiöiden yleistä teoriaa.

Kolmannessa luvussa käydään läpi, miten pientalon rungon kokonaisjäykistys tehdään yleensä. Koska opinnäytetyön aiheena on korvata rakennelevyistä valmistettua umpiseinää lasilla, kerrotaan vain sellaisesta jäykistysjärjestelmästä.

Neljäs luku keskittyy opinnäytetyön aiheena olevaan jäykistävään lasiin ja sen teoriaan tarkemmalla tasolla kuin luvussa kaksi. Siinä käydään läpi kriittisimpiä asioita liittyen itse rakennemitoitukseen.

Viidennessä luvussa esitellään opinnäytetyön tuloksena saatuja kestävyyskysymyksiä. Nämä tulokset ovat tutkimuksen keskipisteessä, jotta voidaan vertailla olemassa olevien ja lasirakenteisten jäykistysjärjestelmien tehokkuutta.

Työn lopussa käsitellään tutkimustyön tuloksia ja jatkotutkimuksen aiheita. Lisäksi pohditaan, että mitä tämän opinnäytetyön perusteella tulisi ottaa huomioon tulevissa tutkimuksissa ja tuotekehityksessä.

1.4 Opinnäytetyön rajauksia

Teoriaosuudessa esitellään levyseinillä toteutettavaa rakennuksen jäykistämistä, jossa jäykistysjärjestelmä koostuu erillisistä lohkoista. Jos rakennuksen geometriaa tai kuormia jakavia tasoja (välipohja, yläpohja) ei muuteta ja lohkojen jäykkyyksien suhde umpiseinän ja lasirakenteen tilanteessa olisi sama, olisivat myös lohkoille muodostuvat kuormitukset samat. Tämän vuoksi keskitytään kertomaan rakennuksen jäykistämisestä lohkojen tasolla.

Lasi mielletään herkästi rikkoontuvaksi materiaaliksi, ja sen vuoksi pitkäaikaiskestävyys on oleellinen asia. Siihen voidaan suunnittelussa vaikuttaa muun muassa varmuuskertoimilla sekä suunnittelemalla rakenteet korjattaviksi ja huollettaviksi. Tässä työssä kerrotaan, millaisia varmuuskertoimia lasirakenteita suunniteltaessa tulee käyttää. Käytön aikana lasin pintaan kumuloituvien vaurioiden alentavaa vaikutusta kestävyyteen ei sen sijaan tarkastella.

Lasielementtejä on useita erilaisia. Tässä työssä keskitytään monoliittiseen lasiin ja eristyslaselementit sekä laminoituneet lasit rajataan pois. Eristyslaselementeissä täytekaasu ja lämpöeristyslaerit vaikuttavat oleellisesti lasin kestävyyteen. Laminoituneissa lasissa täytyy sen sijaan suunnitella kuormien välittyminen kerrokselta toiselle. Tässä työssä esitetään pelkästään menetelmä, jolla laminoituja lasielementtejä voidaan muuntaa laskennallisesti monoliittiseksi.

1.5 Tutkimusmenetelmät

Tämä työ toteutettiin laadullisena tutkimuksena, ja tutkimusmenetelmänä keskeisessä roolissa oli kirjallisuuskatsaus. Tätä tutkimusta tehtäessä tietoa on etsitty materiaalistandardeista ja julkaisuista, joissa kerrotaan, miten lasia voidaan käyttää rakennuksen jäykistämiseen. Koska nykyinen eurokoodijärjestelmä ei sisällä suunnitteluohjeita lasille, selvitettiin, onko sellaisia tulossa uudistuviin versioihin.

Tutkimusaineistoa kerättiin analysoimalla laskentaohjelmalla mallinnettuja rakenteita. Ohjelma antoi materiaaliin muodostuvan jännityksen, jonka avulla voitiin tutkia rakenteen

kestävyyttä ja jännitysten jakaantumista. Ohjelmaa käyttämällä oli myös mahdollista tutkia stabiliteetin menettämisen ilmiötä, eli tässä tapauksessa lommahdusta ja kiepahdusta.

1.6 Yritysesittely

Idea opinnäytetyön aiheesta syntyi jo 2018 kirjoittajan ollessa talotehtaalla rakennesuunnittelijana. Toimeksiannoissa oli yleistä, että arkkitehdin suunnittelema ja nykyaikainen pientalo sisälsi paljon lasisia pintoja ja vähän jäykistävää umpiseinää. Talotehdas oli kuitenkin pieni organisaatio, eikä tuotekehitys ollut siellä mahdollista.

Ajatus lasista rakennusta jäykistävänä elementtinä heräsi uudelleen 2020. Opinnäytetyön tilaajaksi ei saatu talotehtaita tai rakennuttajayrityksiä, joten työ päätettiin toteuttaa kirjoittajan oman yrityksen, Ratkon Oy:n, nimissä. Ratkon Oy on vuonna 2022 perustettu vaativaan rakennesuunnitteluun keskittyvä insinööritoimisto. Opinnäytetyön tarkoituksena oli avata yritykselle uusia mahdollisuuksia tarjota asiakkaille konsultaatiota lasirakenteisiin liittyen ja saada kilpailuetua muihin toimijoihin nähden.

Yritykselle pyrittiin kehittämään käsinlaskentapohjia, joilla lasirakenteiden mitoitus on asiakkaalle kustannustehokasta. Lähes aina toimeksiannot ovat kuitenkin ainutlaatuisia ja vaativat insinööriä ja luovien ratkaisujen etsimistä, jota tämän opinnäytetyön tekeminen varmasti edesauttaa.

2 LASI MATERIAALINA

Tässä luvussa kerrotaan lasista materiaalina ja rakennelasin mitoittamiseen liittyvistä ilmiöistä soveltuvien osin, ja esimerkiksi taivutuskestävyyttä tasoa vastaan kohtisuorille kuormille ei esitetä. Sellaisia kuormituksia syntyy seinämäisiin lasirakenteisiin tuuli- ja tungoskuormista. Laattamaisiin rakenteisiin niitä syntyy välipohjissa hyötykuormasta, sekä katoissa käytettynä lumikuormista. Eristyslaseielementeissä lämpötila- ja paine-erot eristystilassa ja lasin ulkopuolella aiheuttavat niin ikään taivutusta.

2.1 Lasinvalmistuksen historia

Lasia on valmistettu jo noin 5000 vuotta, ja alussa se keskittyi Syyrian ja Mesopotamian alueelle (Rainamo, 1999, s. 13–23). Sieltä valmistus levisi Välimeren alueelle, ja erityisesti Venetsia on ollut tärkeä lasinvalmistuksen alue, kunnes 1700-luvulla Saksassa ja Englannissa tehtiin läpimurtoja erilaisten lasiseosten käyttämisestä.

Lasin valmistus lasia puhaltamalla on ollut tärkeä edistysaskel, joka on hallittu jo noin 100 vuotta ennen ajanlaskun alkua (Rainamo, 1999, s. 13–23). Ensimmäinen tasolasin valmistusmenetelmä perustui lasinpuhaltamiseen, ja sen kehitti ranskalainen St. Gobain -yhtiö. Menetelmässä puhalletaan suuria lasisylintereitä, jotka leikataan auki ja muotoillaan tasomaiseksi. Tasolasin valmistusmenetelmänä lasinpuhallus on vanhentunut tekniikka, mutta sitä käytetään edelleen taidelasitöissä.

Rakennusten tasolasien valmistuksessa seuraava edistysaskel tapahtui 1900-luvulla, kun vuonna 1902 kehitettiin lasinvalmistuksen koneellinen vetomenetelmä, jossa sulaa massaa vedetään valssien läpi ja siitä edelleen jäähdytyskuiluun (Rainamo, 1999, s. 13–23). Jäähdytyskuilussa nauhasta leikataan lasiruutuja.

Nykyään käytössä oleva tasolasien valmistusmenetelmä, eli float-prosessi, on kehitetty vuonna 1959 (Rainamo, 1999, s. 15). Prosessissa lasimassaa kellutetaan sulan metallin päällä. Metallina käytetään yleensä tinaa, koska sen sulamispiste on lasinvalmistusta matalampi. Tämän menetelmän on kehittänyt englantilainen yhtiö Pilkington, ja sen ehdottomia etuja ovat lasin mittatarkkuus, tasaisuus ja virheettömyys.

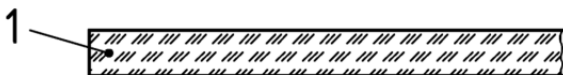
2.2 Lasi rakennuksissa

Tiettävästi ensimmäinen lasi-ikkuna Englannissa on valmistettu vuonna 674 (Koukkunen ym., 1985, s. 527–528). Suomessa lasiset ikkunat ovat yleistyneet kuitenkin vasta 1700- ja 1800-luvuilla. Suomen ensimmäinen lasitehdas rakennettiin vuonna 1681 Uuteenkaupunkiin (Rainamo, 1999, s. 13–23).

Lasia käytetään rakennuksissa sulkemaan aukko sillä tavalla, että valoa pääsee aukon lävitse (Pilkington, 2021, s. 4). Sitä voidaan myös käyttää tilaa rajaavina seininä, esimerkiksi kylpyhuoneen ja saunan välissä. Tällöin lasi estää myös huoneiden välisen ilman sekoittumista. Lasia käytetään niin ikään kaidemateriaalina. Lasiruutuja on useita eri tyyppejä: monoliittinen lasiruutu (eng. monolithic glass, MG), laminoitu lasielementti (eng. laminated glass, LG) ja lämpöeristetty lasielementti (eng. insulated glass unit, IGU) (SFS, 2021a, s. 8).

2.2.1 Monoliittinen lasi

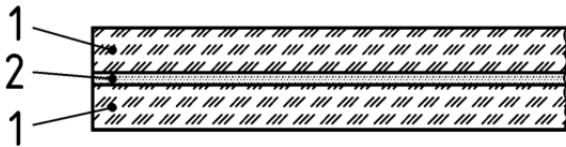
Monoliittinen lasi on määritelty standardissa CEN/TS 19100-1:2021 yksittäiseksi lasiruuduksi, jossa ei ole muita kerroksia (Kuva 1) (SFS, 2021a, s. 8). Monoliittinen lasiruutu voi olla tavallinen float-lasi tai lisäksi esimerkiksi lämpökarkaistu (Rainamo, 1999, s. 20–21). Lämpökarkaisussa tavallinen tasolasi karkaistaan kuumentamalla materiaali 600 °C lämpötilaan ja jäädyttämällä se nopeasti ilmavirran avulla. Tällöin sen pintaan jää mekaanisesti puristusjännityksessä oleva kerros, ja sen vuoksi lasin lujuus kasvaa ja rikkoutuessaan se hajoaa pieniksi murusiksi. Karkaistua lasia ei voida jälkikäteen pintajännitysten vuoksi, vaan kaikki reiät ja reunojen hionnat täytyy tehdä ennen karkaisua. Karkaisun voi myös saada aikaan kemiallisella käsittelyllä, jossa pinnan natriumionit vaihtuvat isommiksi kaliumioneiksi. Tavallisen lasin tapaan tällä tavalla karkaistu lasi hajoaa isoiksi kappaleiksi, minkä vuoksi se lähes aina laminoidaan.



Kuva 1. Monoliittinen lasi (German Institute for Standardization (DIN), 2020, s. 17).

2.2.2 Laminoitu lasi

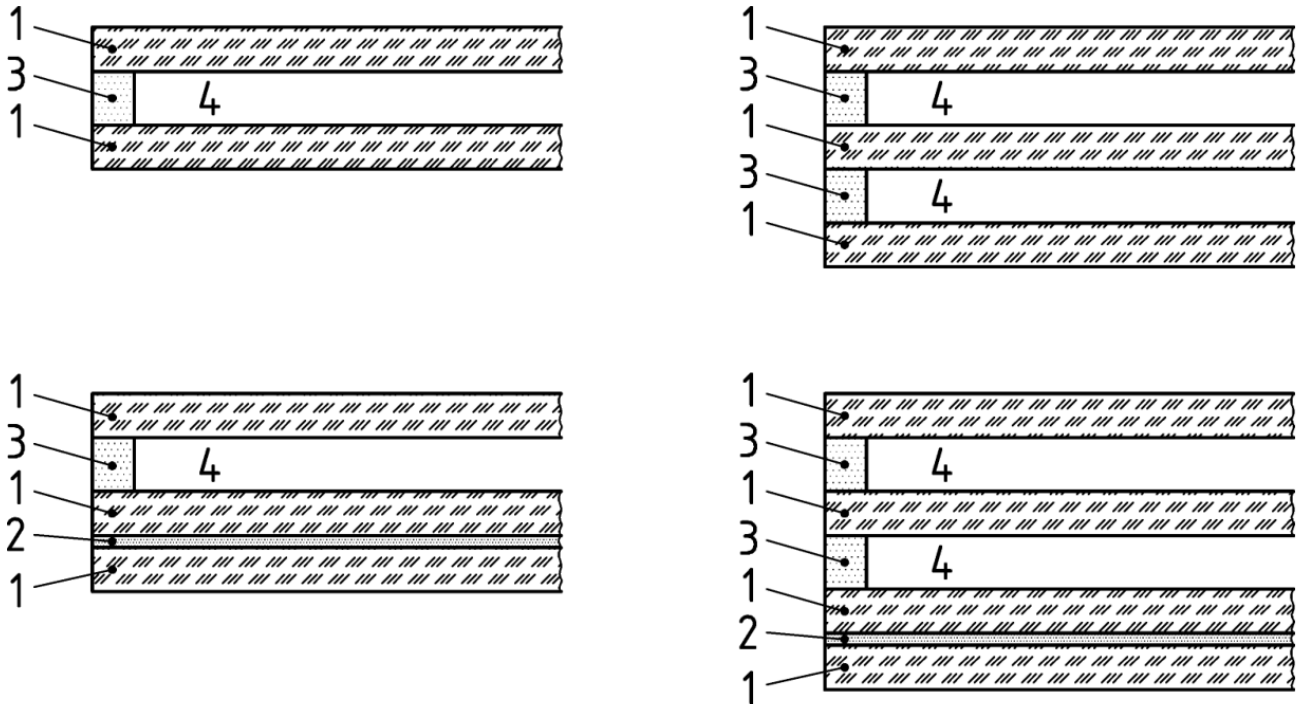
Laminoitu lasi muodostuu vähintään kahdesta lasiruudusta (Kuva 2, kerros 1), jotka yhdistetään toisiinsa välikerroksilla (kerros 2) (SFS, 2021a, s. 8). Välikerros on yleensä läpinäkyvää PVB-muovia tai erityistä laminointinestettä, jonka tarkoitus on estää särkynyttä lasiruutua hajoamasta kappaleiksi (Rainamo, 1999, s. 20). Vaikka laminoitu ja karkaisematon lasi hajoaa tikaarimaisiksi sirpaleiksi, sen käyttö turvalasina perustuu siihen, että rikkoutuneesta lasiruudusta ei irtoa kappaleita.



Kuva 2. Useista lasiruuduista koostuva lasielementti (DIN, 2020, s. 17).

2.2.3 Eristyslaselementti

Eristyslaselementti koostuu vähintään kahdesta lasiruudusta (Kuva 3, kerros 1), joita erottaa kaasun täyttämä välitila (kerros 4) (SFS, 2021a, s. 8). Kaasuna käytetään tavallista ilmaa, tai jalokaasuja kuten Argonia. Kaasutäyte parantaa monoliittiseen tai laminoituun lasiin verrattuna sen lämmöneristävyyttä, ja niitä käytetään modernien ikkunoiden sisempänä osana. Eristyslaselementeissä ruutuja erottaa lasituslista (kerros 3) ja elastisella liimamassalla tehty tiivistys.



Kuva 3. Lämpöeristettyjä lasielementtejä (DIN, 2020, s. 18).

2.3 Lasin kemiallinen koostumus

Lasi valmistetaan lasinmuodostaja-aineesta, sulatteista, koostumusta vakauttavista aineista ja lisäaineista (Rainamo, 1999, s. 13–23). Yleisin ikkunalasin lasinmuodostaja-aine on piidioksidi SiO_2 , eli kvartsihiekkä, ja sitä on lasissa noin 69–74 p-%. Lisäksi tavallisen ikkunalasin kemiallinen koostumus sisältää 12–16 p-% natriumoksidia Na_2O , joka on peräisin soodasta. Soodalla lasketaan valmistusprosessissa sulamispistettä. Kalsiumoksidia CaO sisältyy ikkunalasiin 5–12 p-%, magnesiumoksidia MgO 0–6 p-% ja alumiinioksidia Al_2O_3 0–3 p-%, ja ne ovat peräisin dolomiitista ja maasälvästä. Lasin kemialliseen koostumukseen kuuluu myös muita aineita 0–2 p-%, ja näitä ovat kaliumoksidi K_2O , rautaoksidi Fe_2O_3 ja rikkiatrioksidi SO_3 . Tällaista lasia kutsutaan natronkalkkilasiksi tai soodallasiksi.

Toinen yleinen lasityyppi natronkalkkilasin lisäksi on borosilikaattilasi, jolla on erityisen hyvät ominaisuudet korkeita lämpötiloja ja lämpötilojen vaihtelua vastaan (CNR, 2013, s.16). Tämän lisäksi sillä on hyvä hydrolyysin ja happojen kestävyys. Standardissa EN 1748-1-1 se määritellään lasiksi, joka sisältää 7–15 % boorioksidia. Borosilikaattilasia käytetään tarkkuutta vaativissa sovellutuksissa, mutta vain vähän rakentamisessa.

2.4 Lasin mekaaniset ominaisuudet

Lasi on hyvin monikäyttöinen materiaali ja sillä on hyvät lujuusominaisuudet. Se on materiaalina homogeeninen ja sen käyttäytyminen on rasituksessa lineaarisesti kimmoista (National research council of Italy (CNR), 2013, s. 29). Lasin atomirakenne mahdollistaa jopa yli 1000 MPa puristuslujuuden. Sen tarkka testaus on kuitenkin haastavaa, sillä testialustan ja materiaalin välinen epätasaisuus aiheuttaa jännityskeskittymiä, jotka laukaisevat murtumisen jo paljon ennen ideaalista lujuutta. Lasin tyypilliset mekaaniset ominaisuudet on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Lasin mekaaniset ominaisuudet (CNR, 2013, s. 30).

Suure	Arvo	Yksikkö
Tiheys ρ	2250–2750	kg/m ³
Kimmomoduuli E	63000–77000	MPa
Poissonin suhde ν	0,20–0,24	-
Lämpölaajenemiskerroin α	3,1–9,0	$\mu\text{m}/(\text{m K})$
Lämpökapasiteetti C_p	800	J/(kg K)
Lämpöjohtavuus λ	0,9–1,0	W/(m K)

Lasilla ei ole myötörajaa, vaan se hajoaa kerralla, mikä tarkoittaa murtotapahtuman olevan niin sanotusti hauras (Rainamo, 1999, s. 52–56). Ilmiön vakavuutta voidaan kuitenkin lieventää esimerkiksi laminoimalla tai lämpökarkaisemalla lasi, jolloin sen vaikutukset henkilöturvallisuuteen voidaan välttää.

Vetolujuuteen (Taulukko 2) vaikuttaa vallitseva ilmankosteus, sekä mikrohalkeamat ja virheet, jotka muodostuvat valmistusprosessin aikana (CNR, 2013, s. 29). Vetolujuus onkin paljon huonompi kuin atomirakenne antaisi olettaa. Koska halkeamat ovat isomman vaurion alkupisteinä, vaikuttaa lasiruudun kestävyys myös sen käyttöikä (Rainamo, 1999, s. 52–56). Uloin pinta on altis tuulen mukana liikkuvien pienten partikkelien hiovalle vaikutukselle, ja esimerkiksi julkisivuun kohdistuvat negatiiviset tuulenpaineet, eli imukuormat, pyrkivät taivuttamaan lasia, jolloin halkeamat voivat kasvaa. Lasilla ei ole materiaalin eheyttä palauttavaa mekanismia, vaan halkeamat ovat pysyviä. Ympäristöolosuhteiden lisäksi myös reunojen pintakäsittelyllä on merkitystä, eli onko kyseessä leikatut, saumatut vai hiotut reunat (Suomen Standardisoimisliitto (SFS), 2021a, s. 29). Tämä otetaan huomioon standardissa CEN/TS 19100-1:2021 kertoimella k_e , joka pienentää kapasiteettia. Sen vaihteluväliksi on annettu 0,8–1,0.

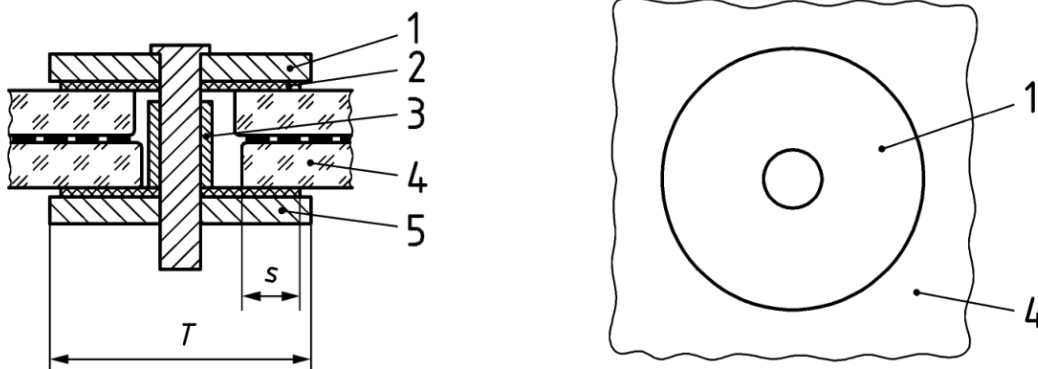
Taulukko 2. Natronkalkkilasin ominaistavutuslujuus (SFS, 2021a, s. 19).

Materiaali	Standardi	Arvo [MPa]
Tasolasi (float)	EN 572-2	45
Kiillotettu lankalasi	EN 572-3	33
Vedetty lasi	EN 572-4	45
Kuvioitu lasi	EN 572-5	33
Kuvioitu lankalasi	EN 572-6	27

2.5 Rakennemitoitus

2.5.1 Mekaaninen kiinnitys

Rakenteellisen lasielementin kiinnitykseen käytetään mekaanista ja yleensä pistemäistä kiinnitystä tai liimasaumaa, joka on useimmiten jatkuva reunoja pitkin (Haldimann ym., s. 143–163). Pistemäinen kiinnitys voidaan tehdä valmistamalla lasiruutuun reikä, jonka läpi asennetaan kiinnitysosa (Kuva 4). Kuvassa 4 kohdat 1 ja 5 esittävät kiinnitysosaa, 3 asennusholkkia, 2 tiivistettä ja 4 lasielementtiä.



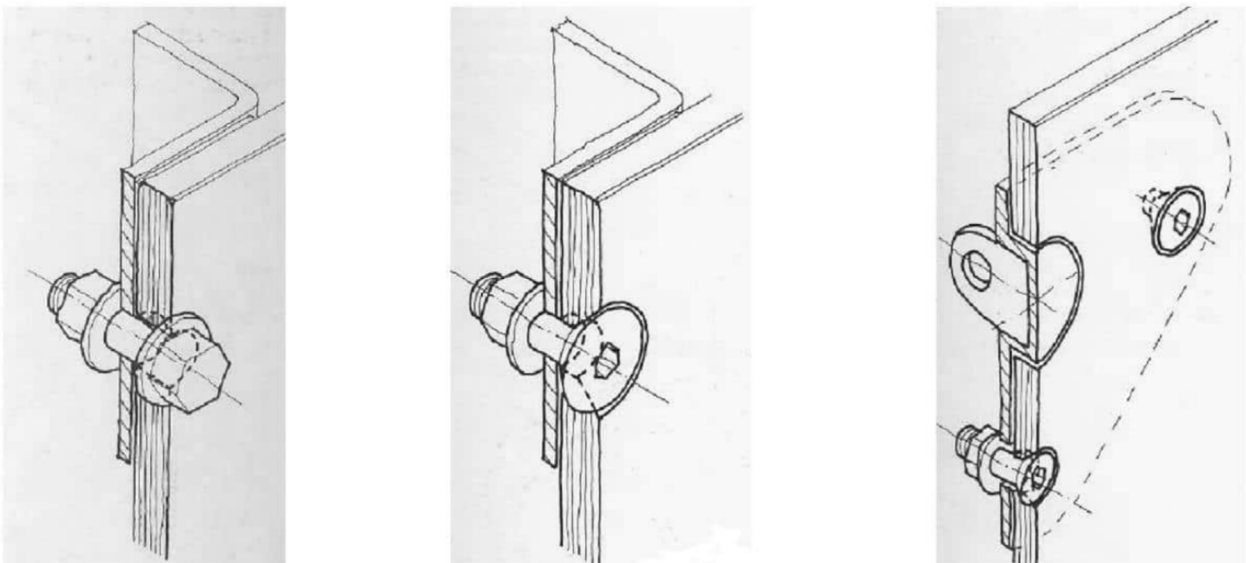
Kuva 4. Laselementin pistemäinen kiinnitys (DIN, 2013, s. 6).

Pistekiinnitys on kehitetty 1970-luvulla, ja sillä pyrittiin korostamaan lasisen pinnan jatkuvuutta ilman kehyksiä (CNR, 2013, s. 249). Pistekiinnitysjärjestelmän toinen osa koostuu kiinnityksistä lasiin ja toisaalta rakennuksen kantavaan runkoon, jolloin lasipinta toimii vain kuormien välittäjänä. Järjestelmät jaetaan yleensä kuuteen eri kategoriaan (kuvat 5 ja 6):

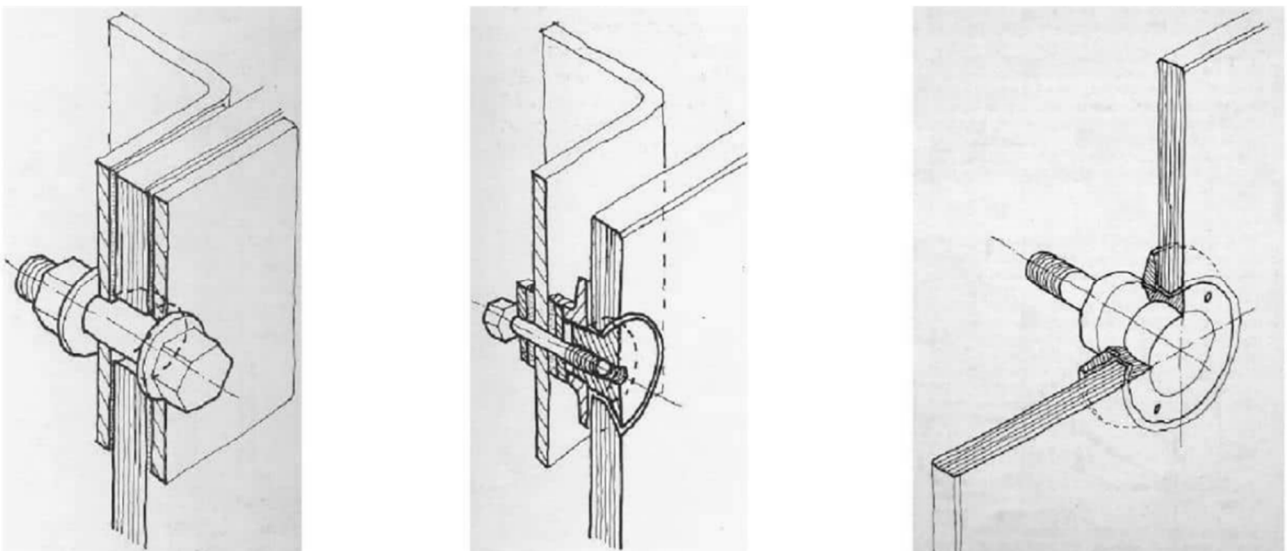
1. Kiinnityslevy ja kupukantainen ruuvi
2. Kiinnityslevy ja lasiin upotettu uppokantainen ruuvi
3. Nastajärjestelmä (eng. stud assembly)
4. Levy- ja vastalevy kupukantaisella ruuvilla

5. Tasojärjestelmä (eng. planar system)
6. Niveljärjestelmä (eng. rotule system).

Näistä yleisimpiä ovat taso- ja niveljärjestelmä (CNR, 2013, s. 250). Kummassakin lasi toimii kuormanvälittäjänä, josta kuormat siirtyvät kiinnityselimelle ja edelleen kantavalle rungolle. Merkittävä ero on momenttien välityksessä. Nimensä mukaisesti niveljärjestelmässä momentti ei välity lasikiinnityksessä, vaan kiinnityselimessä. Tasojärjestelmän kiinnityselin voi olla momenttia välittämätön, koska lasikiinnitys on jäykkä.

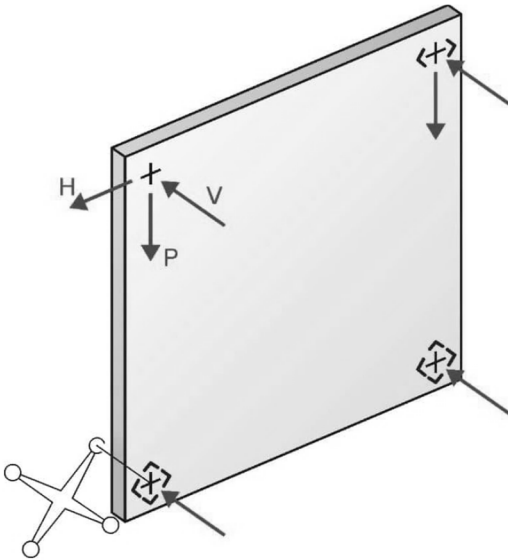


Kuva 5. Pistekiinnitysjärjestelmän tyypit 1–3 (CNR, 2013, s. 249).



Kuva 6. Pistekiinnitysjärjestelmän tyypit 4–6 (CNR, 2013, s. 249).

Kuormitus tyypillisessä pistekiinnitysjärjestelmässä on seuraava: järjestelmä on staattisesti määräämätön tasonvastaisille kuormille ja staattisesti määrätty tasosuuntaisille kuormille (Kuva 7) (CNR, 2013, s.252). Ylemmistä kiinnityspisteistä toinen sallii vaakasuuntaiset liikkeet ja molempien päätarkoituksena on kannattaa lasielementin massa ja osa tasonvastaisista kuormista. Alemmat kiinnityspisteet tukevat levyä vain poikkisuuntaisesti.



Kuva 7. Pistekiinnitysjärjestelmän kuormitus (CNR, 2013, s.252).

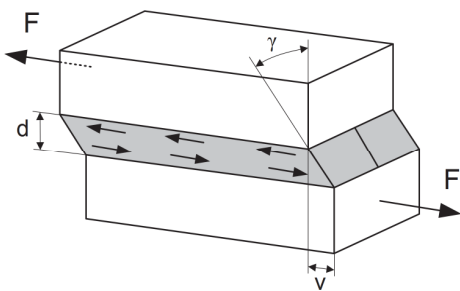
2.5.2 Liimausainekiinnitys

Liimamassakiinnitystä on alun perin käytetty kerrostalojen julkisivuissa lasielementtien kiinnittämiseen niiden alumiinisiin kiinnityslistoihin (Haldimann ym, 2008, s. 154–157). Liimamassakiinnityksen etuna mekaaniseen kiinnitykseen verrattuna on kuormitusten tasaisempi jakaantuminen, joka on tärkeää lasin hauraan murtumismekanismin vuoksi. Siksi niitä käytetään rakenteellisesti välittämään kuormitukset metallisen kiinnitysrungon ja lasin välillä, sekä lasikerrosten välillä. Liimaukset jaetaan kahteen eri kategoriaan, joita ovat elastiset liimamassoilla tehtävät liitokset (eng. structural sealant, structural silicone) sekä jäykät rakenneliimaliitokset (eng. adhesive joint, resin joint).

Liimausaineessa voi ulkoisten voimien vaikutuksesta tapahtua kolmenlaista eri muodonmuutosta, joista ensimmäinen tyyppi on elastinen muodonmuutos (Haldimann ym., 2008, s. 155). Tapahtuma ja sen palautumismekanismi alkuperäiseen muotoon ovat välittömiä. Muodonmuutos on mahdollinen liimauksessa vaikuttavien atomien valenssidosten kulmamuu-
tosten ansiosta. Toinen tapa sauman muodonmuutokselle ja sen palautumiselle on aikariippuvainen viskoelastinen muodonmuutos. Muodonmuutoksessa molekyyliketjut venyvät ja voivat

palautua. Kolmas tyyppi on myös aikariippuvainen, ja se on viskoplastinen muodonmuutos, mutta se ei ole palautuva. Tässä molekyyliketjut liikkuvat toisiinsa nähden. Muodonmuutoksen laajuus on riippuvainen käytettävän liimausaineen molekyyli­rakenteesta.

Liimasauman leikkaantumiseen syntyvät jännitykset ulkoisen voiman vaikutuksesta on esitetty kuvassa 8 (Haldimann ym, s. 156). Merkitään muodonmuutoksen kulmaa symbolilla γ , liimasauman korkeutta symbolilla d ja muodonmuutoksen pituutta symbolilla v .



Kuva 8. Liimausaineessa vaikuttavat voimat (Haldimann ym., s. 156).

Trigonometrian avulla todetaan muodonmuutuskulma γ , josta voidaan johtaa liukumoduulille G lauseke, joka pätee lyhytaikaisille kuormituksille, kun venymän arvot ovat pieniä (Haldimann ym, s. 156):

$$\tan \gamma = \frac{v}{d} \quad (1)$$

$$\Rightarrow G = \frac{\tau}{\tan \gamma} \quad (2)$$

Jäykistävälle lasirakenteelle muodostuu pitkäaikaisia kuormituksia lasin omasta massasta, ellei alinta liitoslistaa varusteta mekaanisilla kannakkeilla. Venyvyydelle I liimasaumassa annetaan näiden vaikutusten arvioimiseen kaava (Haldimann ym., 2008, s. 156):

$$I = \frac{\tan \gamma}{\tau} = B \cdot t^\alpha \quad (3)$$

missä

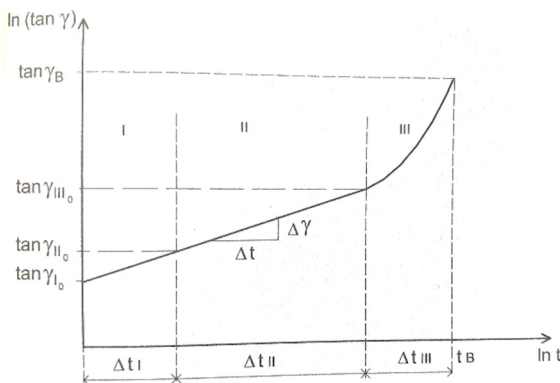
B, α ovat materiaaliominaisuuksia

t on leikkausmuodonmuutos ajan suhteen.

Voidaan määritellä kolme eri muodonmuutoksen aluetta (Haldimann ym., 2008, s. 156):

- I ensisijainen, jossa materiaalin viruma aiheutuu molekyyliketjujen venymisestä
- II toissijainen, jossa viruma aiheutuu molekyyliketjujen liukumisesta
- III tertiäärinen, jossa sidokset irtoavat.

Muodonmuutoksien ja ajan suhde on esitetty kuviossa 1:



Kuvio 1. Muodonmuutoksien ja ajan suhde (Haldimann ym., 2008, s. 157).

Liimaussaumot tulee suunnitella siten, että ne eivät saavuta viimeistä aluetta, jolla sidosten irtoaminen ei ole enää tasapainossa (Haldimann ym., 2008, s. 156). Rakenne murtuu tällä alueella.

Liimamassoja on kahta eri tyyppiä. Ensimmäistä tyyppiä edustavat yksikomponenttiset rakenesilikonit ja liimamassat, jotka kovettuvat ilmankosteuden vaikutuksesta (Haldimann ym., 2008, s. 157). Sauman mitoille suositellaan minimissään $d > 6$ mm paksuutta ja leveydelle $h < 20$ mm. Lisäksi mittasuhteen h/d tulee olla vaihteluvälillä 1:1–1:3. Toinen tyyppi on kemiallisen reaktion avulla kovettuvat kaksimponenttiset liimamassat. Reaktioaika on huomattavasti lyhyempi kuin yksikomponenttisillä massoilla, eikä siihen vaikuta sauman mittasuhte. Paksuuden suositus on sama, mutta sauman leveys voi olla huomattavasti suurempi: $h < 50$ mm. Tästä syystä myös mittasuhteelle voidaan sallia jopa 1:4 arvoja. Kaksimomenttisten liimamassojen käyttöä työmaolosuhteissa on hankala vakioida, ja sellaisia liitoksia tulisi tehdä vain tehdasolosuhteissa.

Yleisiä liimamassojen materiaaliominaisuuksien arvoja on annettu taulukossa 3, mutta koska arvot vaihtelevat valmistajittain, tulisi suunnittelussa käyttää valmistajan ilmoittamia arvoja (Haldimann ym., 2008, s. 157). Elastisten saumojen mitoitus ei käytetä erillisiä lujuuksia

alentavia varmuuskertoimia, vaan niille annetaan sallitut jännitykset, jotka eivät saa ylittyä. Liimausaineliitoksen suunnittelussa on tärkeää huomioida kuormitusajan merkitys. Jännitysvenyäsuhteelle sallitaan eurooppalaisen teknisen eritelmän (EAD 090010-00-0404) mukaan leikkausmuodonmuutoksessa $\epsilon_{sall} = \pm 12,5 \%$ murtovenymästä.

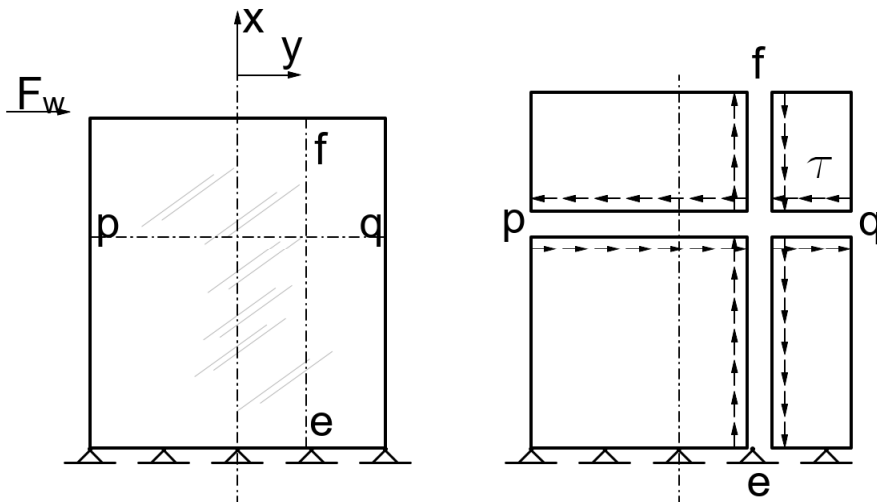
Taulukko 3. Liimamassojen tyypillisiä materiaaliominaisuuksia (Haldimann ym., 2008, s. 158).

Suure	Tunnus	Arvo [MPa]
Sallittu vetojännitys, lyhytaik.	$\sigma_{sall.ST}$	0,14
Sallittu vetojännitys, pitkäaik.	$\sigma_{sall.LT}$	0,14
Sallittu leikkausjännitys, lyhytaik.	$\tau_{sall.ST}$	0,070–0,128
Sallittu leikkausjännitys, pitkäaik.	$\tau_{sall.LT}$	0,007–0,011
Kimmomoduuli, lyhytaik.	E_{LT}	1,0–2,5
Suure	Tunnus	Arvo
Sallittu venymä	ϵ_{sall}	$\pm 12,5 \%$
Poissonin suhde	ν	0,49

Oikein suunniteltuna liimamassasaumat tarjoavat useita etuja, joita ovat muun muassa lasin iskunkestävyyden paraneminen liimamassasauman muodonmuutoskyvyn vuoksi (Haldimann ym., 2008, s. 158). Lasituksen tulee kuitenkin olla laminoitu, jotta kuormat välittyvät lasin rikkoutumisen jälkeenkin elastiselle kiinnitykselle, joka kuluttaa osan iskuenergiasta. Sauman sijoitus vaikuttaa siihen, kuinka paljon muodonmuutoskykyä se sallii, ja siksi sauma tulisi sijoittaa lasiruudun tasoon, eikä reunaan.

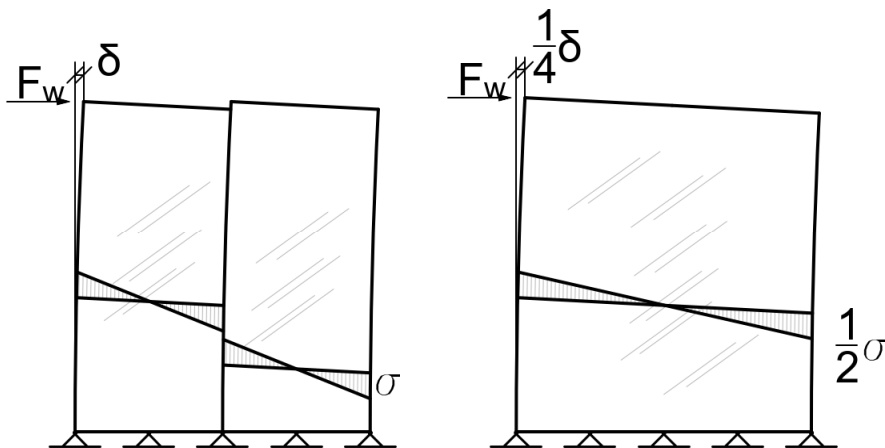
2.5.3 Leikkausjännitys lasiruudussa

Kappaleessa vaikuttava taivutusmomentti aiheuttaa siihen leikkausjännitys jakauman (Kuva 9) (Karhunen ym., 1993, s. 97). Leikkausvoima aiheuttaa leikkausjännitystä voiman suuntaisessa tasossa p–q ja lisäksi taivutuksen vuoksi myös voimaa kohtisuorassa olevassa kappaleen halkileikkaustasossa e–f. Leikkausjännitykset ovat risteyskohdissa yhtä suuret.



Kuva 9. Lasiruudun leikkausjännitysten jakautuminen.

Jos rakenne koostuisi kahdesta erillisestä kappaleesta, jotka pääsevät kitkattomasti liukumaan toisiinsa nähden, toimisivat ne vain kaksinkertaisella kapasiteetilla. Jos palkit olisivat samaa materiaalia ilman liukupintaa, vaikuttaisi tällä pinnalla leikkausjännitys, jonka vuoksi kokonaisuus on jäykempi kuin kaksi erillistä. Sen taipuma olisi $1/4$ ja jännitys $1/2$ verrattuna erillisiin (Kuva 10).



Kuva 10. Erilliset palkkikerrokset ja yhtenäinen palkki.

Leikkausjännityksen kaava on muotoa (Karhunen ym., 1993, s. 100):

$$\tau = \frac{Qs}{Ib} \quad (4)$$

missä

Q on leikkausvoiman suunnitteluarvo

- S on staattinen momentti
 I on jäyhyysmomentti
 b on poikkileikkauksen leveys.

Kun kaavaan (4) sijoitetaan staattisen momentin ja jäyhyysmomentin kaavat maksimileikkajännityksen tilalle, sievenee kaava muotoon

$$\tau_{max} = \frac{3Q}{2A} \quad \text{suorakaidepoikkileikkauksella} \quad (5)$$

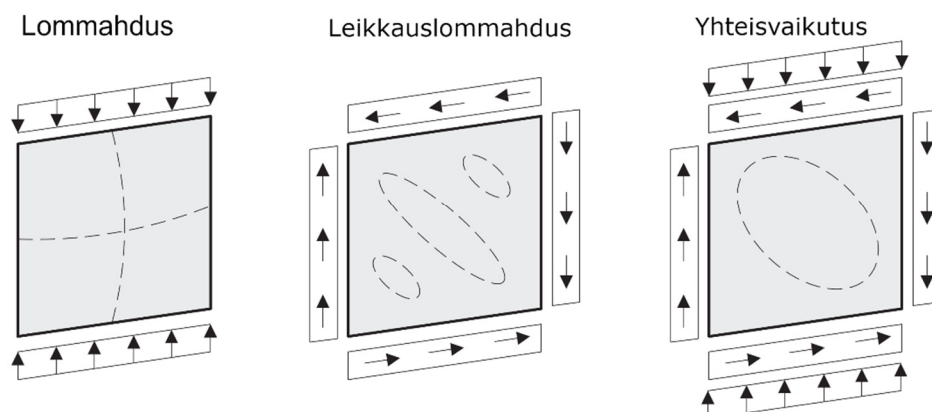
missä

- A on poikkileikkausala.

Leikkausjännityksen muoto on parabolinen suorakaidepoikkileikkauksessa ja sen maksimi on neutraaliakselilla.

2.5.4 Stabiliateetti

Jos levyrakenteeseen kohdistuu tasonsuuntaisia kuormia, se voi menettää stabiliateetin (Haldimann ym., 2008, s. 122). Näitä ilmiöitä ovat puhtaasta puristuksesta aiheutuva lommahdus (eng. buckling), leikkauslommahdus (eng. local buckling), sekä yhdistetty lommahdus ja leikkauslommahdus (Kuva 11).



Kuva 11. Stabiliateetinmenettämisisilmiöt levyrakenteessa (Haldimann ym., 2008, s. 122)

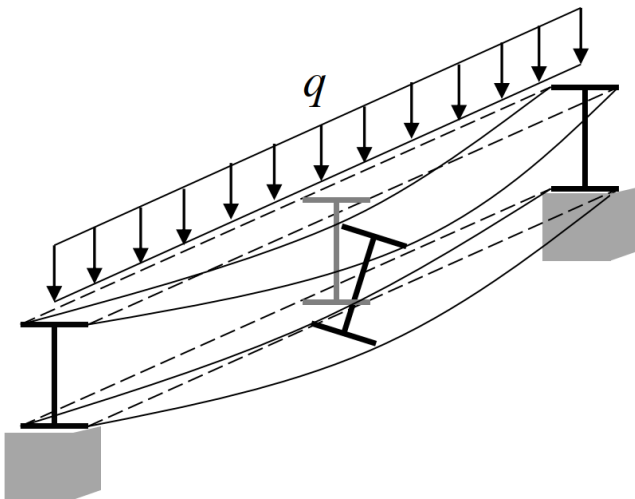
Tässä opinnäytetyössä tutkitaan keskimmaisessä piirroksessa esitettyä tilannetta, jossa kuormitus on tasonsuuntaisesti ja se aiheuttaa lasipaneelin leikkausta. Kiepahtamisilmiö voi

esiintyä, jos lasilevy on tuettu vain kahdelta sivulta. Leikkauslommahdus voin sen sijaan ilmetä, jos lasilevy on tuettu kaikilta sivuiltaan.

2.5.5 Kiepahdus

Kiepahdus on suomenkielisissä teoksissa yhdistetty sauvarakenteeseen, mutta tässä opinäytetyössä sillä voidaan viitata myös levymäiseen rakenteeseen, kun sen kuormitus aiheuttaa vedetyn ja puristetun komponentin ja tuentaehdot sallivat puristetun reunan stabiliteetin menettämisen. Todettakoon, että tulkinta, onko rakenne sauva, laatta tai levy on yleensä määritelty kirjallisuudessa sen poikkileikkauksen mittasuhteiden avulla.

Kiepahdus tarkoittaa taivutetun rakenteen puristetun puolen stabiiliuden menetystä (Saari-
neva, 2007, luku 8.2). Jos yksinkertaisesti päistään tuettua palkkia kuormitettaisiin pysty-
suuntaisella voimalla (Kuva 12), olisi palkin poikkileikkauksessa sen yläosa puristettu ja ala-
osa vedetty. Kun puristetun puolen kuormitus ylittää kriittisen pisteen, se menettää stabiiliu-
den ja kiepahtaa, eli kiertyy pituusakselinsa ympäri.



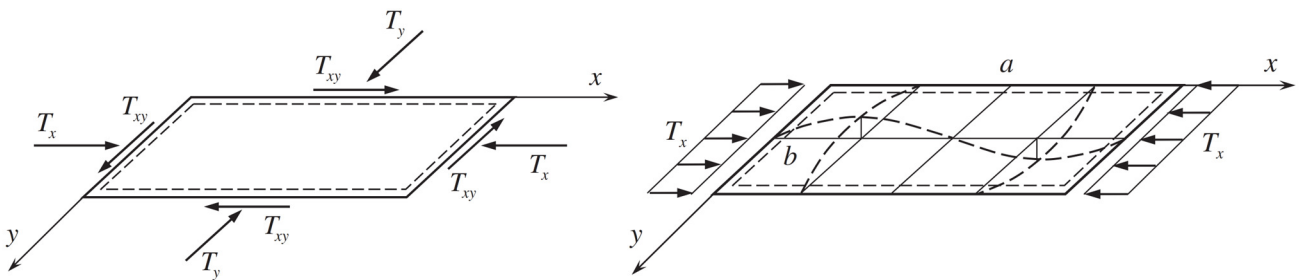
Kuva 12. Taivutetun sauvarakenteen kiepahdus (Perälä, 2016, s. 71).

Kiepahdusilmiö voi tapahtua vain vahvemman akselin suhteen taivutettaessa (Ongelin, 2016, s. 90). Siihen vaikuttaa jänneväli, kuormituksen suuruus, kantavan rakenteen geometria, tuenta ja materiaali. Lisäksi rakennelasin kiepahtamiseen vaikuttaa rakenteen hoikkuuden vuoksi myös valmistuksen ja asennuksen toleranssit, kuormien epäkeskeisyys, virheet materiaalissa sekä välikerroksen materiaalin ominaisuudet laminoituissa laseissa (CNR, 2013, s. 192).

2.5.6 Lommahdus

Kun taivuttava kuormitus tapahtuu vahvemman akselin suhteen ja rakenteen puristettu reuna on tuettu poikkisuuntaisesti, ei rakenne pääse kiepahtamaan. Tällöin se voi menettää stabiiliuden lommahtamalla. Saarinevan (2007, luku 8.3) mukaan lommahdusmuotoon vaikuttaa suorakaiteen sivusuhte. Lommahdukseen vaikuttavat samat tekijät kuin kiepahdukseen, eli kuormituksen suuruus ja niin edelleen. Lommahtaminen tapahtuu levymaisessä tai hoikassa rakenteessa, kun siihen kohdistuu leikkausta tai puristusta (Perälä, 2016, s. 2).

Lommahdus tapahtuu, kun levyyn kohdistuu puristusta tai leikkausta tason suuntaisesti (Vasiliev, 2013, s. 545). Klassisen levyteorian mukaan tasapaino menetetään ilmiössä ja levyn muoto muuttuu aaltoilevaksi (Kuva 13). Eulerin nurjahdusteorian mukaan voidaan laskea kriittinen alin kuorma, jolla tasapaino menetetään.



Kuva 13. Havainnollistus levyn lommahduksesta (Vasiliev, 2013, s. 545–546).

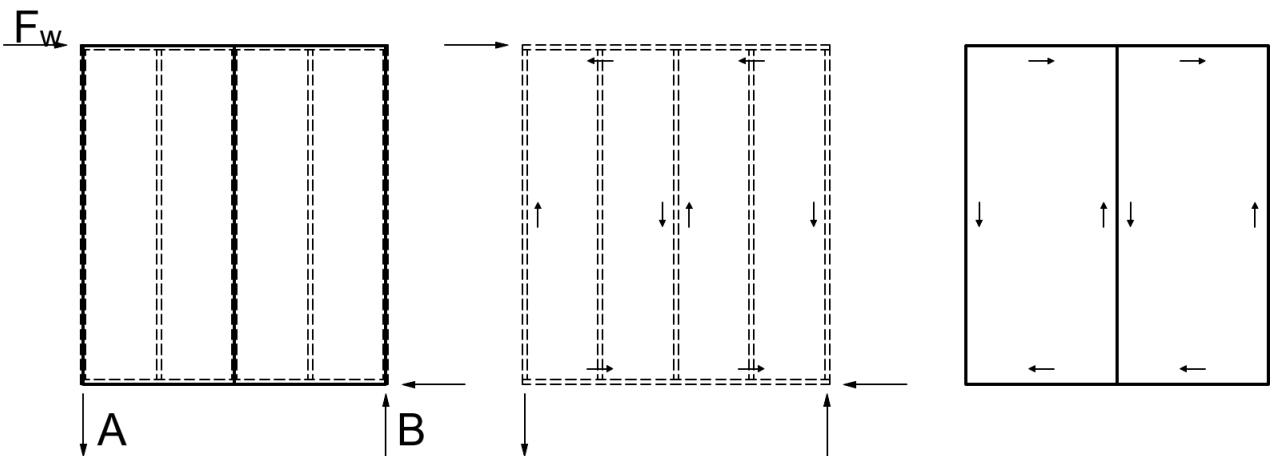
Haldimann ym. (2008, s. 213) toteavat, että Eulerin nurjahdusteoriaa ei kuitenkaan tulisi käyttää murtorajatilän mitoituksen perusteena, sillä se yliarvioi rakenteen todellisen kapasiteetin lommahduksen suhteen, kun kyseessä on paksuhko levy, ja vastaavasti aliarvioi kestävyysden, kun kyseessä on mittasuhteiltaan hoikka levy. Budynas ym. (2020, s.604) mainitsevat lisäksi, ero on yleensä suurempi, kun kyseessä on puhdas puristus kuin yhdistetty veto ja puristus levyjen leikkauskuormituksessa. Budynas ym. (mts.) jatkavat, että millä tahansa teoreettisen kaavan arvolla saatuja kriittisen kuorman arvoja tulisi pitää rakenteen kestävyysden maksimina ja että toisin kuin sauvojen stabiliteetin menettämislähtökäytännön suhteen, levyjen tapauksessa rakenteessa ilmenevillä epätäydellisyyksillä on suurempi merkitys ilmiön esiintymiseen.

3 NYKYTILAN KUVAUS

Tässä luvussa kerrotaan suppeasti puurunkoisten pientalojen jäykistämisestä umpilevyseinillä. Läpinäkymättömät umpiseinät voivat rajoittaa arkkitehtonisia ratkaisuja, joten umpiseinien korvaaminen lasilla voi tulevaisuudessa olla yksi sen uusi käyttökohde.

3.1 Rankarunko ja rakennuslevy

Levyseinäjäykistyksessä runko muodostuu runkotolpista, jotka asennetaan pääsääntöisesti 600 mm välein, sekä ala- ja yläohjauspuusta. Vähintään toinen puoli rungosta on levytetty rakennuslevyllä, kuten kipsilevyllä. Kuvassa 14 on esitetty kahdesta rakennuslevystä ja viidestä runkotolpasta muodostuva jäykistyslohko ja voimien jakaantuminen eri rakenneosille.



Kuva 14. Voimien jakaantuminen levyrakenteisessa seinässä.

Suunnittelukäsikirjassa RIL 205-1-2017 on esitetty jäykistysseinien yksinkertaistettu analyysi (Suomen rakennusinsinöörien liitto (RIL), 2017, s. 156–159). Käsikirjan ohje perustuu eurokoodimitoituksen standardiin SFS-EN 1995-1-1. Suurimmilla rakennuslevyvalmistajilla on myös omat suunnitteluohjeet, jotka perustuvat yleiseen teoriaan, mutta lähtötietojen arvot on räätälöity valmistajan omille tuotteille. Tästä syystä ohjeissa on usein kielto vaihtaa tuote rakennustyömaalla, vaikka tuote olisi näennäisesti vastaava.

3.2 Levyseinälohkon rakennemitoitus

On tärkeää muistaa, että rakennuksen kiertokeskiötä laskettaessa täytyy huomioida kuormien jakaantuminen jäykkyyksien suhteessa. Jos kaikki seinät ovat rakenteeltaan

samanlaisia, voidaan laskentaa yksinkertaistaa laskemalla pelkästään pituuksien suhde. Lohkojen kapasiteetit lasketaan yhteen kaavalla (6), jota verrataan seinälinjaa kuormittavaan vaakavoimaan $F_{v.Ed}$.

$$F_{v.Rd} = \sum F_{i.v.Rd} \quad (6)$$

missä

$F_{i.v.Rd}$ on seinälohkon vaakaleikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo

Yksittäisen lohkon kapasiteetti lasketaan kaavalla (7):

$$F_{i.v.Rd} = \frac{F_{f.Rd} b_i c_i}{s} \quad (7)$$

$$F_{f.Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{f.Rk}}{\gamma_M} \quad (8)$$

missä

$F_{f.Rd}$ on yksittäisen liittimen leikkausvoimakestävyyden mitoitusarvo

b_i on seinälohkon leveys

c_i on kapean lohkon kerroin

s on liitinväli

k_{mod} on puurakenteen aika- ja kosteusluokan huomioiva kerroin

γ_M on puuliitoksen osavarmuuskerroin (liitoksilla 1,3).

Tarkemmassa analyysissä otetaan huomioon muun muassa se, mitkä sivut levystä on kiinnitetty, sekä kiinnittimen siirtymäkerroin. Seinälinjat voivat myös koostua useista erilaisista seinätyypeistä, jota yksinkertaistettu analyysi ei salli.

Kukin lohko tulee ankkuroida päistään alempaan rakenteeseen (Kuva 14, voimat A ja B). Voimat määritetään kaavalla:

$$A = B = F_{i.c.Ed} = F_{i.t.Ed} = \frac{F_{i.v.Ed} h}{b_i} \quad (9)$$

missä

h on seinän korkeus.

Lohkojen päiden ankkurointi on hyvin tärkeää kohteissa, joissa rakennus on korkea, sisältää epäkeskeisesti aseteltuja jäykistäviä lohkoja, tuulikuorman arvo on suuri ja jäykistävät lohkot ovat lyhyitä. Yläpuolisten rakenteiden omalla painolla voi mitätöidä osan nostekuormista, kun huomioi edullisen kuorman kertoimen 0,9. Nostekuormat vaikuttavat runkotolpassa, joka voidaan joutua varustamaan erillisellä kiskoankkurilla, jolla kuormitus saadaan siirrettyä suoraan perustuksille tai välipohjalle.

4 JÄYKISTÄVÄ LASI

Tässä opinnäytetyössä pyrittiin selvittämään kapasiteettia rajoittavia tekijöitä ja erilaisia murtomekanismeja. Ensin mallinnettiin pelkkä lasiruutu kolmella eri elementtimenetelmään perustuvalla ohjelmalla: NextFEM, RFEM ja STAAD.Pro. Lasiruudun laskentamalli pidettiin yksinkertaisena. Lasiruudun paksuus oli 8 mm kaikissa laskentamalleissa, ja pinta-alaa muuttamalla saatiin laskettua ohjelman antama stabiliteetin menetyksen kerroin (eng. buckling factor). Kolmea ohjelmaa käyttämällä saatiin varmistettua, että mallinnus on tehty oikein. Murto-rajatilan (MRT, eng. Ultimate Limit State, ULS) mukaisessa laskennassa kuormat korotetaan varmuuskertoimilla ja materiaalin lujuutta alennetaan ominaislujuudesta suunnittelulujuudeksi materiaalin osavarmuuskertoimilla.

4.1 Materiaalin lujuus ja suunnitteluarvot

Vaikka eurokoodissa ei ole lasille omaa osiota, voidaan eri lähteistä löytää lasille sovellettavia ohjeita ja arvoja. Osavarmuuskertoimet on määritelty standardissa CEN/TS 19100-1:2021:en. Myös tasolasille löytyy sovellettavat materiaaliarvot (Taulukko 1, s. 18). Päästetylle lasille suunnittelutaivutuslujuus lasketaan kaavalla (SFS, 2021a, s. 28):

$$f_{g,d} = k_e \cdot k_{sp} \cdot k_{mod} \cdot \lambda_A \cdot \lambda_l \cdot \frac{f_{g,k}}{\gamma_{MA}} \quad (10)$$

missä

k_e on reunan tai reikien viimeistelyn kerroin (1,0 float-lasille hiotuilla reunoilla)

k_{sp} on pintakäsittelyn huomioiva kerroin (1,0 käsittelemätön float-lasi)

k_{mod} on kuorman keston huomioiva kerroin (1,0 tuulikuormille)

λ_A on pinta-alan vaikutuskerroin (1,0 kun $A \leq 18 \text{ m}^2$)

λ_l on sivumitan vaikutuskerroin (1,0 kun $l \leq 6 \text{ m}$)

$f_{g,k}$ on ominaistaivutuslujuus päästetylle lasille

γ_{MA} on materiaalin osavarmuuskerroin päästetylle lasille (1,8 seuraamusluokassa CC2).

Lämpö- tai kemiallisella käsitellyn lasin korkeampi lujuus lasketaan samalla kaavalla (10), lisäämällä siihen toinen termi:

$$f_{b,d} = f_{g,d} + k_p \cdot k_{e,p} \cdot \frac{f_{b,k} - f_{g,k}}{\gamma_p} \quad (11)$$

missä

$f_{g,d}$ on kaavan (10) mukainen päästetyn lasin suunnittelulujuus

k_p on esijännityksen kerroin (1,0 vaakatasossa tehdylle käsittelylle)

$k_{e,p}$ on reunan tai reikien esijännittämisen kerroin

$f_{b,k}$ on ominaistaivutuslujuus lujitetulle lasille

γ_p on materiaalin osavarmuuskerroin lujitetulle lasille (1,2 seuraamusluokassa CC2).

4.2 Lasielementit laskennassa

Tässä työssä lasielementiksi kutsutaan useista lasiruuduista koostuvia rakenneosia, joihin kuuluvat laminoitunut lasielementit, lämpölasielementit sekä näiden yhdistelmät. Laskennassa monoliittisen lasin laskenta on yksinkertaisinta, koska eri jäykkyydellä olevia muita rakennekerroksia ei esiinny. Lasielementtien laskentaa voidaan yksinkertaistaa muuntamalla niiden rakennekerrokset yhdeksi kerrokseksi, jolloin niitä voi käsitellä laskennassa yhtenä monoliittisenä lasiruutuna.

Suunnitteluohjeessa esitetään kolme tasoa lasielementin mallinnukseen (CNR, 2013, s. 176).

Laminoitun lasielementin mallinnan tasot ovat

- Taso 1: muunnetaan kerrokset vastaamaan monoliittista ruutua
- Taso 2: välissä oleva leikkausta välittävä laminaatti määritetään jousina
- Taso 3: ohjelmallinen mallinnus solid-elementteinä.

Jäljempänä esitetään tason 1 mukainen menetelmä SFS-EN 16612-2019 mukaan (SFS, 2019, s.42–44). Standardissa todetaan laskennan olevan monimutkaista, ja siihen vaikuttavat ympäristöolosuhteet hyvin paljon. Koska kuormituksen kesto on erilainen esimerkiksi tuuli- ja lumikuormalla, voivat materiaaliominaisuudet muuttua kuormituksen aikana ympäristön lämpötilan tai ilmanpaineen muuttumisen vuoksi. Laminoituissa lasielementeissä erityisesti muovinen välikerros on hyvin altis tällaisille muutoksille. Lähimmäksi todellista tilannetta päästään vain kehittyneillä laskentaohjelmilla, ja rajauksena esitetäänkin, että tätä menetelmää

käytetään vain yksinkertaisesti reunoiltaan tuetuille lasilaatoille, joihin kohdistuu tasaisesti jakautunut kuorma.

Menetelmä saattaa antaa liian suuria kapasiteetteja pienille laatoille ja liian pieniä isoille. Se on tarkoitettu taivutettujen lasielementtien laskentaan, joissa voimien välittyminen kerrokselta toiselle on tärkeää.

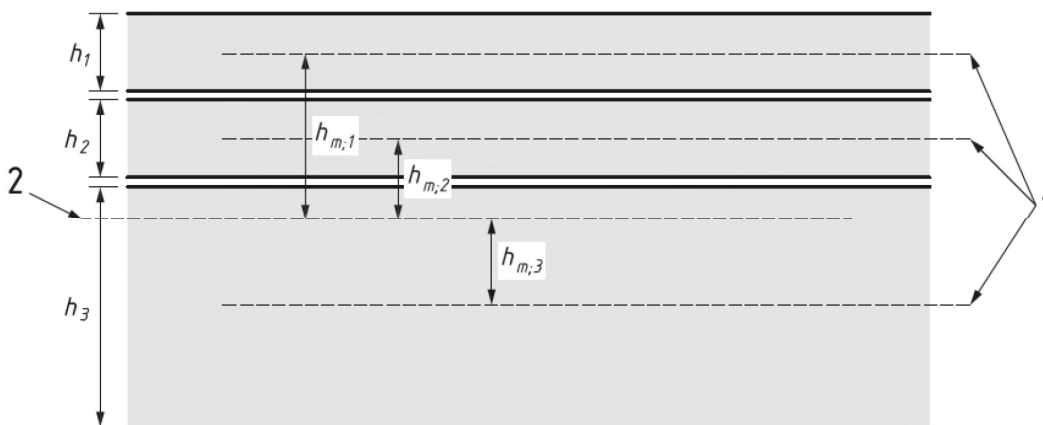
Lasielementin vastaava tehollinen paksuus taipuman laskentaa varten lasketaan kaavalla:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{\sum_k h_k^3 + 12\omega \cdot \sum_i (h_i h_{m,i}^2)} \quad (12)$$

missä

- ω on kuorman välittymisen kerroin (0–1)
- h_k on levykerroksen paksuus $h_1, h_2 \dots h_k$
- h_i on levykerroksen paksuus $h_1, h_2 \dots h_i$
- $h_{m,i}$ on etäisyys neutraaliakselilta levykerroksen $h_{m,1}, h_{m,2} \dots h_{m,i}$ keskelle

Kaavan muuttujia on havainnollistettu kuvassa:



Kuva 15. Lasielementin mittapiirros (SFS, 2019, s.42).

Kuorman välittymisen kertoimen arvo $\omega = 0$ tarkoittaa, ettei leikkausjännitys siirry lainkaan kerrokselta toiselle, ja $\omega = 1$ tarkoittaa, että kerrokset olisivat kiinteästi kytketyt toisiinsa. Kerrotoimen ω tarkempi määrittäminen esitetään standardissa SFS-EN 16612.

Lasielementin vastaava monoliittinen paksuus jännityksen laskentaa varten lasketaan kaavalla (13), kerrokselle j:

$$h_{ef,\sigma,j} = \sqrt{\frac{h_{ef,w}^3}{h_j + 2\omega h_{m,j}}} \quad (13)$$

missä

$h_{ef,w}$ on kaavan (12) mukainen tehollinen paksuus

h_j on levykerroksen paksuus $h_1, h_2 \dots h_j$

$h_{m,j}$ on etäisyys neutraaliakselilta levykerroksen $h_{m,1}, h_{m,2} \dots h_{m,j}$ keskelle

Yleisimpien lasielementtien muunnetut paksuudet voidaan valita myös taulukosta 4:

Taulukko 4. Vastaavat paksuudet laminoidulle lasille (SFS, 2019, s. 43)

Lasikerrosten paksuus [mm]	Vastaava paksuus ($\omega = 0,3$)	
	$h_{ef,w}$	$h_{ef,\sigma,j}$
3+3	5,07	5,62
4+4	6,63	7,32
5+5	8,19	9,03
6+6	9,75	10,74
8+8	12,86	14,15
10+10	15,98	17,57

Kun lasielementti on symmetrinen ja siihen kohdistuu keskeinen tuulikuorma paneelin suuntaisesti, ei välikerrosta tarvitse laskea. Taipumaa ja taivutusta laskettaessa tuulikuorman on kohdistuttava paneeliin tasoa vastaan kohtisuoraan. Tällainen kuormitustapaus tulee kyseeseen myös jäykistävällä rakennelasille, kun rakennuksen julkisivuun kohdistuu imu- tai painekuormia. Tässä työssä ei esitetä yhdistettyjen kuormien vaikutuksia.

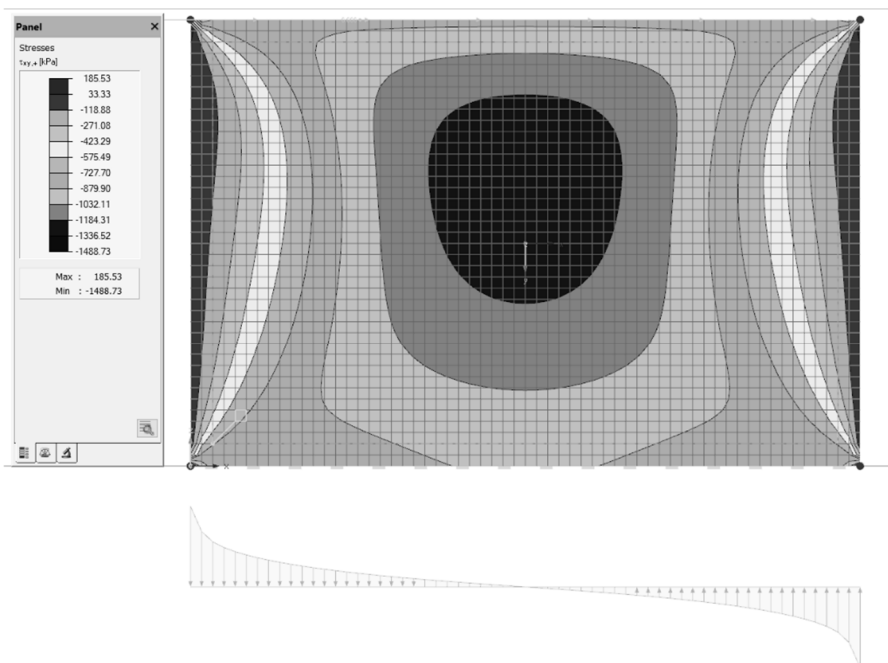
4.3 Leikkausjännityksen maksimi

Pelkistetään lasiruutu laskentaa varten sauvamalliksi (Kuva 9, s. 2425). Lasin yläreunaa vaakasuuntaisesti kuormittava tuulikuorma aiheuttaa siihen taivutusmomenttia, joka edelleen aiheuttaa leikkausjännitys jakauman. Rakennemalli on vastaava kuin mastopilarilla ja vaakasuuntaisella pistekuormalla. Leikkausjännitys voidaan laskea kaavalla (5), ja saatua jännitystä voidaan verrata materiaalin kestävyteen. Laskenta tehdään murtorajatilassa huomioiden materiaalin kestävyden alentaminen sekä kuormien korottaminen.

Ohjeen CNR-DT 210/2013 mukaan suunnitteluleikkauslujuuden arvoksi voidaan sama kuin suunnittelutaivutuslujuuden arvo (CNR, 2013, s. 202), jolloin $\tau_{g,d} = f_{g,d}$. Leikkausjännityksen ja lujuuden tulee täyttää ehto:

$$\frac{\tau_{max}}{\tau_{g,d}} \leq 1,0 \quad (14)$$

FEM-ohjelmalla laskettaessa voidaan määrittellä tiheä laskentahila, ja jännitykset jakaantuvat kuorman sijoittelun ja tukiehtojen vuoksi hieman eri tavalla kuin käsinlaskentana tehtyyn ideaalimalliin verrattuna. Jännitys jakaumasta (Kuva 16) voidaan havaita, että suurin jännitys on keskialueella arvolla -1250 kPa ja reunoilla noin 0 kPa.



Kuva 16. Lasiruudun leikkausjännitys jakauma RFEM-ohjelmassa.

4.4 Lasielementin liimasauma

Liimasauman mallintamiseen esitetään neljä hyväksyttävää astetta (CNR, 2013, s. 162–165).

Liimasauman mallinnuksen tavat ovat

- taso 0: korvataan vastaavilla tukiehdoilla
- taso 1: lineaarisesti kimmoisa malli, vakiolla ja erillisillä kimmoisilla arvoilla
- taso 2: lineaarisesti kimmoisa malli, vakiolla ja jatkuvilla kimmoisilla arvoilla
- taso 3: epälineaariset mallit.

Tasossa 0 liimamassa materiaalina jätetään mallintamatta ja pelkkä vaikutus lasin ja kehyksen välillä huomioidaan. Tämä mallinnetaan yleensä ideaalisena nivelenä.

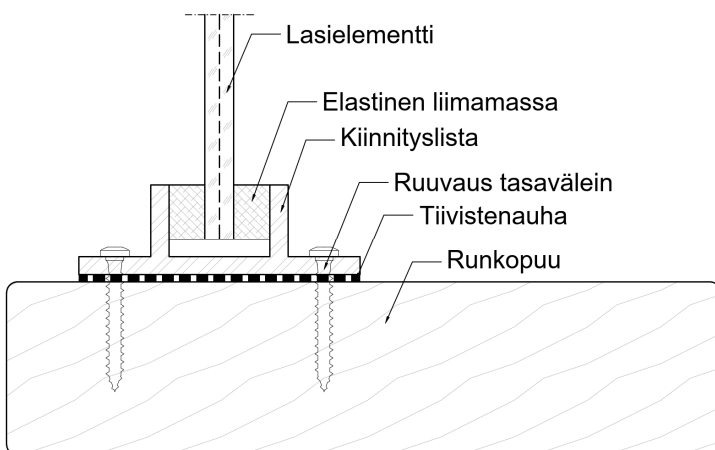
Tasossa 1 tehdään jälkitarkistus, että materiaalivalmistajan ilmoittamat venymän arvot eivät ylitä. Jos tarkkaa tietoa ei ole materiaalin ominaisuuksista, voidaan otaksua $\epsilon_{el} = 12,5 \%$ useimmille rakenneliimamassoille. Jatkuva liimasauma elementtinä korvataan yksittäisillä jousilla, jotka jaetaan laskentahilan mukaan. Jouselle tulee mallintaa vetojäykkyys, sekä leikkausjäykkyys sauman pitkittäis- sekä poikittaissuuntaan.

Tasossa 2 tehdään myös jälkitarkastus, mutta yksittäisten jousien sijaan sauma mallinnetaan kolmiulotteisina solid-elementteinä ja niille määritetään materiaalin mukaiset arvot. Tässä tavassa on tärkeää käyttää tarpeeksi hienojakoista hilajakoa, koska muuten malli voi tuottaa liian suuria jäykkyyksiä. Mallille voidaan otaksua kimmomoduulin $E = 1,5 \text{ MPa}$ ja Poissonin suhteelle $\nu = 0,499$ arvoja, mikäli tarkempaa tietoa ei ole saatavilla.

Tasossa 3 tehdään epälineaarinen analyysi. Se ei yleensä ole tarpeen rakennuksiin liittyvien lasien liimasaumojen laskennassa, koska muodonmuutokset jäävät kohtuullisiksi.

4.5 Lasielementin kiinnityslista

Lasielementin kiinnittämiseksi rakennuksen runkoon tarvitaan voimia välittävä kiinnityselin. Liian kova materiaali lasia vasten voi aiheuttaa pistemäisiä jännityksiä ja elementin murtumisen. Tarkastellaan tapausta, jossa elastisella liimamassalla kiinnitetään teräslista lasiruutuun (Kuva 17). Kiinnityslistan voi asentaa puurunkoon tasaväleihin laitettavilla ruuveilla.



Kuva 17. Periaatepiirros kiinnityslistasta.

Kiinnityslista on haarukkamainen lattamallisella pohjalla, jonka läpi ruuvi kiinnitys voidaan tehdä. Piirros on periaatetasoinen, sillä esimerkiksi ulkoilmasta sisätilaan ulottuva pohjalevy sallii lämmön siirtymisen tavalla, joka aiheuttaa sisäpuolelle vesihöyryn kondensoitumista kylmän listan pintaan. Mittasuhteet eivät myöskään ole edulliset tai erityisen siistit näkyviin jääväksi rakenteeksi.

Kiinnityslistan ja lasielementin välisen liimasauman kestävyys voidaan laskea muuntamalla pistevoima lasielementin keskipisteen suhteen momentiksi:

$$M_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{a/2} \quad (15)$$

missä

a on paneelin korkeus.

Saatu taivutusmomentti voidaan jakaa voimakomponenteiksi elementin mittasuhteiden perusteella. Suorakaiteen geometrian takia, kun yhden sivun pituuden muuttaminen muuttaa myös toisen sivun momenttivartta $a \cdot \frac{b}{2} = b \cdot \frac{a}{2}$, on samalla tavalla tehty liimasauma aina yhtä jäykkä jokaisella sivulla edellyttäen, että kiertokeskiö on suorakaiteen keskellä. Liimasaumoissa vaikuttava voima voidaan muuntaa leikkausjännitykseksi kaavalla (16) ja sen tulee olla pienempi tai yhtä suuri kuin materiaalivalmistajan ilmoittama arvo.

$$\tau_{SS} = \frac{M_{Ed}}{2 \cdot ((a \cdot b_{SS} \cdot n_{SS}) \cdot \frac{b}{2} + (b \cdot b_{SS} \cdot n_{SS}) \cdot \frac{a}{2})} = \frac{V_{Ed}}{4 b \cdot b_{SS} \cdot n_{SS}} \quad (16)$$

$$F_{Ed} = \frac{M_{Ed}}{2 a \cdot b \cdot n_{SS}} = \frac{V_{Ed}}{4 b \cdot n_{SS}} \quad (17)$$

missä

τ_{SS} liimasaumassa vaikuttava leikkausjännitys

a on paneelin korkeus

b on paneelin leveys

b_{SS} on liimasauman leveys

n_{SS} on sauman leikkeisyys

F_{Ed} on liitoksessa vaikuttava voima.

Havaitaan, että vain lasielementin leveyden b muuttaminen vaikuttaa liimasaumaan kohdistuvaan voimaan, sillä korkeus a supistuu pois. Kapasiteettia voidaan muuttaa myös lisäämällä liimasauman leveyttä b_{ss} tai lisäämällä kiinnityslista ja liimaus molemmille puolille lasia.

Liitoslistan mekaaniset puikkoliittimet, eli tässä tapauksessa ruuvit, voidaan mitoittaa kaavan (17) mukaan. Metallinen kiinnityslista ei yleensä ole kapasiteettia rajoittava, vaan sen liitos puuhun ruuveilla, sillä puu on metalliin verrattuna hyvin pehmeä materiaali. Liitoksen tehokkuutta voidaan parantaa lisäämällä ruavin pituutta, paksuutta tai käyttämällä esiporausta. Syysuuntaisella ja tiheällä ruuvauksella tulee myös huomioida tehollisen ruuvirivin muuttuja kapasiteettia madaltavana tekijänä.

Kiinnityslistan ja puun ruuviliitos voidaan mitoittaa SFS-EN 1995-1-1:2015 standardin tai RIL 205-1-2017 suunnittelukäsikirjan ohjeiden mukaan. Taulukossa 5 on esitetty leikkauskestävyyden arvot tyypilliselle liitokselle. Arvoja voidaan käyttää liitokselle, jonka teräksisen listan paksuus on 5 mm, kiinnikkeiden reiät maksimissaan 5,5 mm, kiinnittyvän puun lujuusluokka on C24 ja aikaluokka on hetkellinen. Taulukon toisessa sarakkeessa on ominaiskestävyys, kolmannessa käyttöluokan 1 ja 2 suunnittelukestävyys ja viimeisessä sarakkeessa käyttöluokan 3 suunnittelukestävyys.

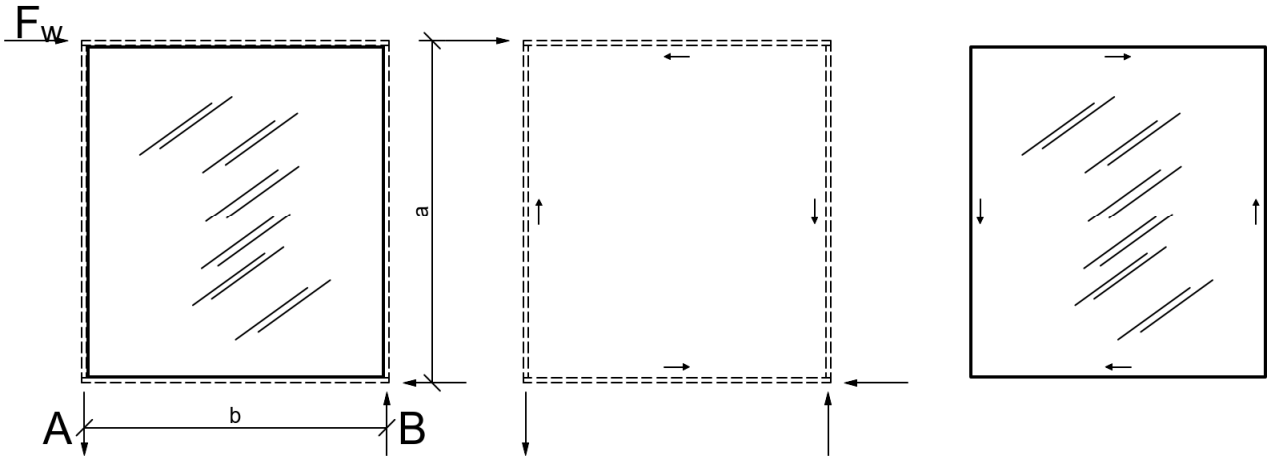
Taulukko 5. Kiinnityslistan ruuvauksen leikkauskestävyydet.

Ruuvi	R_k [kN]	R_d [kN]	R_d [kN]
Kupukantainen 5x35 puuruuvi	1,26	1,07	0,87
Kupukantainen 5x40 puuruuvi	1,37	1,16	0,95
Kupukantainen 5x50 puuruuvi	1,53	1,29	1,06
Kupukantainen 5x60 puuruuvi	1,53	1,29	1,06
Kupukantainen 5x70 puuruuvi	1,53	1,29	1,06

4.6 Runko lasielementin ympärillä

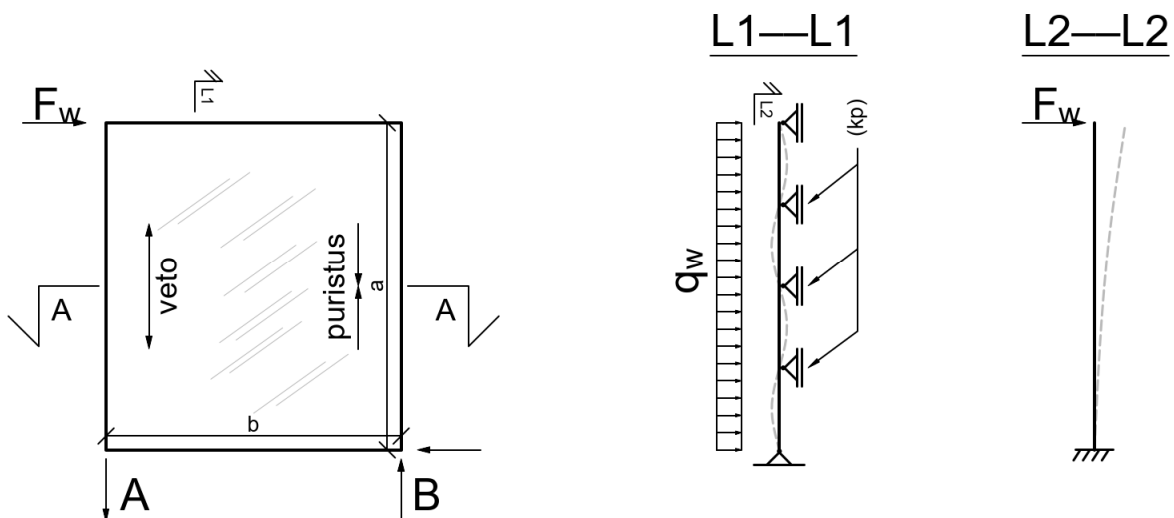
Luvussa 2.2.4 esitettiin kiepahdukseen ja luvussa 2.2.5 lommahdukseen liittyvää teoriaa. Runko lasielementin ympärillä vaikuttaa näiden ilmiöiden esiintymiseen (Kuva 18). Rakennelasin tyviosan momenttikuormitus ja -kapasiteetti muodostuu sen mittasuhteista.

Rakenteeseen vaikuttava momentti voidaan laskea yhtälöllä $M_t = F_w * a$. Saatu taivutusmomentti voidaan jakaa voimapariksi $A = B = M_t/b$. Rakennelasin ja liittyvän rakennuksen runkorakenteen tulee olla vähintään yhtä kestävä.



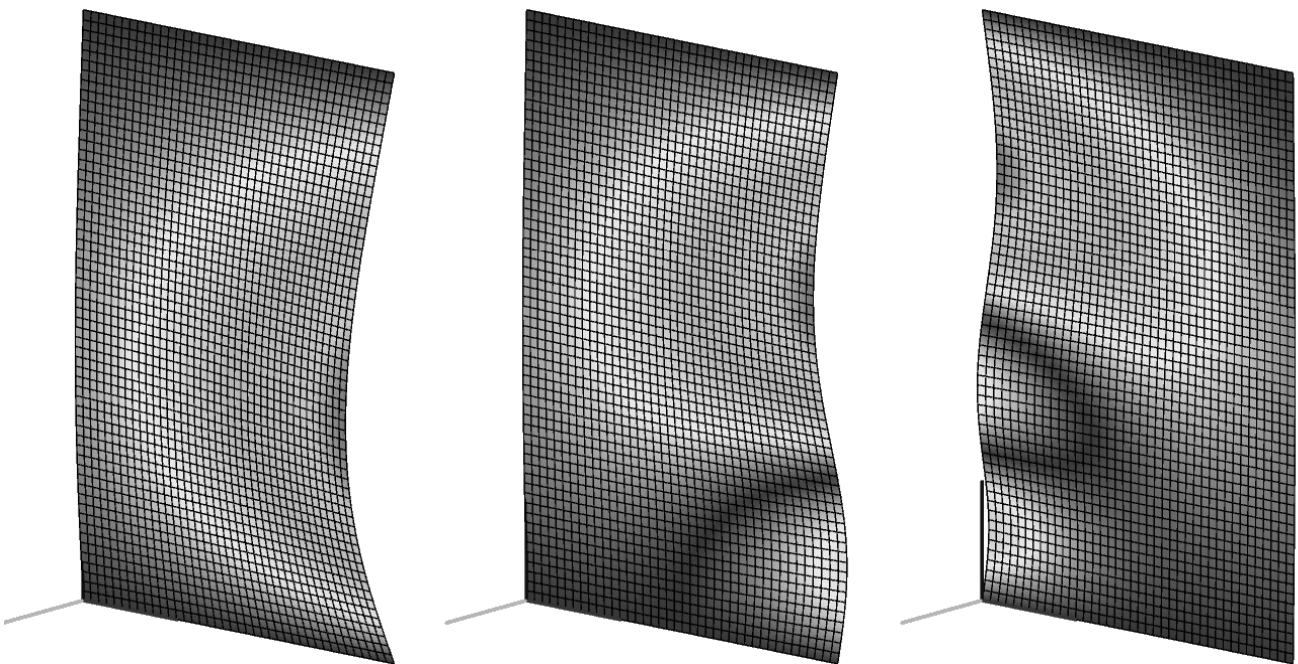
Kuva 18. Kuormien jakaantuminen rakennelasissa.

Laselementti, joka jäykistää rakennusta tuulikuormia vastaan, voidaan yksinkertaistaa seinän suuntaiseksi ulokepalkiksi (Kuva 19). Tällöin lasiin muodostuu vedetty ja puristettu komponentti, jolloin kiepahdus on mahdollista, jos sivusuuntaisen tuennan jäykkyys on riittämätön. Tuulikuorman dynaamisuudesta aiheutuen kuormat voivat vaikuttaa kummasta tahansa suunnasta. On myös huomattava, että tasoa vastaan voi muodostua yhtä aikaa pistekuorman F_w kanssa positiivinen tai negatiivinen tuulenpaine q_w .



Kuva 19. Rakennelasin laskentamalli.

Jos rakennelasin puristettu puoli on tukematon, se voi kiepahtaa. Kuvassa 19 merkinnällä kp on esitetty kiepahdustuennaksi kolme välitukea. Kiepahduksen muotoja on mahdollista laskea useita, mutta sitä epätodennäköisempiä ne ovat, mitä suurempi kiepahdusmuodon järjestysnumero on. Kuvassa (Kuva 20) on esitetty lasketun rakennelasin kolme ensimmäistä kiepahdusmuotoa, kun rakenne on sivusuunnassa ilman tuentaa. Kolmannessa muodossa stabiliteetti menetetään eri puolella kuin kahdella ensimmäisellä. Tämä aiheutuu siitä, että tulokseksi saatu kiepahduskerroin on negatiivinen, minkä vuoksi kuorman suunta vaihtuu ja puristettu puoli on oikeanpuoleinen sivu.



Kuva 20. Kiepahduksen ensimmäinen, toinen ja kolmas muoto NextFEM-mallissa.

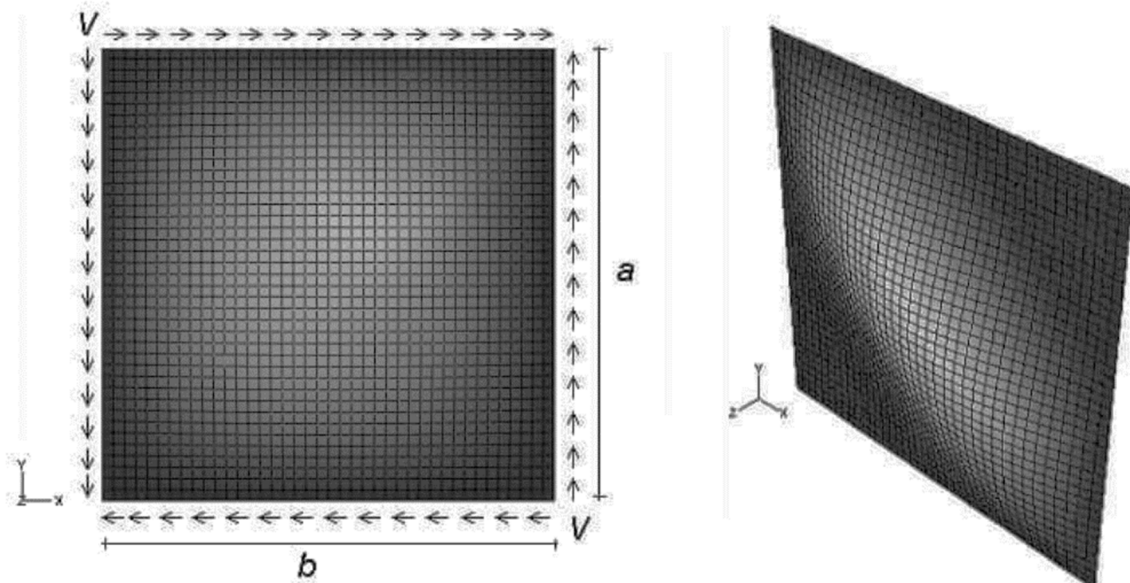
Kiepahtamisen voi estää tukemalla rakenteen puristetun osan poikkisuunnassa. Palkeissa tällainen tuenta on usein palkin päälle asennettava toisiokannatin. Jäykistävässä lasirakenteessa poikkituennan täytyisi sijaita pystykarmeissa ja niihin liitettyssä runkorakenteessa. Tuennan voi toteuttaa esimerkiksi jäykistäväällä väliseinällä, mutta koska tuulen suunnasta aiheutuen jäykistävän lasin kuormitus voi tulla kummasta suunnasta tahansa, täytyisi myös jäykistävän väliseinän sijaita molemmilla puolilla elementtiä.

Laselementin kiinnityslistat ja kiinnityksen takia myös runkorakenne jäykistävät lasin reunoja heikommassa suunnassa kiepahdusta vastaan sekä rajoittavat lommahtamista. Laskentaohjelmalla kokeiltiin teräksisen kiinnityslistan ja runkopuun vaikutusta ja todettiin, että poikkisuuntaiset kuormat ovat melko pieniä ja helposti hallittavissa. Runkopuun jäykkyys laskettiin Finnwood-ohjelmistolla ja tiedot siirrettiin pystuosien tukiehtoihin jousivakiona. Laselementin

koko oli 4000x4000x8. Tarkennetulla laskennalla saatiin $b_f = 3,411$ ja pelkälle lasielementille $b_f = 2,191$, eli kuormituskyky parantui noin 1,5-kertaiseksi.

4.7 Leikkauslommahdus DT 210 -ohjeen mukaan

Tarkastellaan staattista mallia, jossa rakennukseen kohdistuva tuulikuorma siirtyy rungolta lasielementin kiinnityslistoille ja siitä edelleen liimauksen välityksellä lasiruudulle.



Kuva 21. Leikkauslommahduksen laskentamalli (CNR, 2013, s. 201)

Lasielementti on yksinkertaisesti tuettu reunoiltaan, eli se pääsee kiertymään tuella. Tuulikuorman resultantti kohdistuu lasielementin yläreunaan vaakasuunnassa, jolloin lasielementtiin muodostuu tason suunnassa tapahtuvaa leikkausta. Jos lasia kuormitetaan tarpeeksi suurella voimalla, se lommahtaa.

Suunnitteluohjeessa lasilevyn leikkauslommahdus käsitellään sen mukaan, onko lasilevy monoliittinen, laminoitu lasielementti vai lämpölasielementti. Kun kyseessä on monoliittinen lasi, tulee kaavan (18) ehdon täyttyä:

$$V_{Ed} \leq V_{b.Rd} \quad (18)$$

missä

V_{Ed} on tuulikuorman suunnitteluarvo

$V_{b.Rd}$ on leikkauslommahduskestävyys.

Leikkauslommahdus lasketaan kaavan (19) avulla:

$$V_{b.Rd} = X \cdot A \cdot \tau_{g,d} \quad (19)$$

missä

X on pienennyskerroin

A on leikkausta vastustava ala

$\tau_{g,d}$ on suunnitteluleikkauslujuus ($\tau_{g,d} = f_{g,d}$)

Suunnitteluohjeessa on yhteneväisyyksiä teräksen eurokoodiin, jossa käytetään hyväksi lommahduskäyriä. Pienennyskerroimen X kaavassa (19) hyödynnetään kertoimia α^* ja α_0 , joilla säädetään käyrää. Myös Haldimann ym. (2008, s. 129) ehdottavat teräksen eurokoodin lommahduskäyrien käyttämistä, mutta eriävällä $\alpha_0 = 0,8$ arvolla.

$$X = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}, X \leq 1,0 \quad (20)$$

$$\Phi = 0,5 [1 + \alpha^* (\bar{\lambda} - \alpha_0) + \bar{\lambda}^2] \quad (21)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot \tau_{g,k,st}}{V_{cr}^{(E)}}} \quad (22)$$

$$V_{cr}^{(E)} = k_{\tau} \frac{\pi^2 D}{b^2} \quad (23)$$

$$D = \frac{E_G \cdot h^3}{12(1-\nu^2)} \quad (24)$$

$$k_{\tau} = \begin{cases} 4,00 + \frac{5,34}{(a/b)^2}, & \text{kun } a/b < 1,0 \\ 5,34 + \frac{4,00}{(a/b)^2}, & \text{kun } a/b \geq 1,0 \end{cases} \quad (25)$$

missä

X on pienennyskerroin leikkauslommahduksessa

Φ on apusuure

α^* on vakio (0,49)

α_0 on vakio (0,50)

- $\bar{\lambda}$ on muunnettu hoikkuus
 $V_{cr}^{(E)}$ on Eulerin kriittinen leikkauskestävyys
 D on levyn taivutusjäykkyys
 E_G on kimmomoduuli
 $\tau_{g.k.st}$ on ominaisleikkauslujuus ($\tau_{g.k.st} = f_{g.k.st}$)
 a on paneelin korkeus
 b on paneelin leveys
 h on paneelin paksuus.

Vakio α^* vastaa teräksen eurokoodissa olevaa α_{LT} vakiota, jolla valitaan soveltuva kiepahduskäyrä, eli käyrä c. Vastaavasti α_0 on sama kuin $\bar{\lambda}_{LT,0}$, jolle suositellaan Suomessa arvoa 0,4.

4.8 Leikkauslommahdus, yksinkertainen menetelmä

Yksinkertaista kaavaa on vaikea laatia, koska rakenteen mittasuhteet, tuentaehdot ja kuormitus vaikuttavat hyvin paljon. Kriittiselle leikkausjännitykselle annetaan kaava (Budynas, 2020, s. 618):

$$\tau_{b.cr} = K \frac{E_G}{1-\nu^2} \left(\frac{h}{a}\right)^2 \quad (26)$$

missä

- a on paneelin korkeus
 h on paneelin paksuus
 K on sivusuhteen mukainen vakio
 E_G on kimmomoduuli
 ν on Poissonin suhde.

Vakio K saadaan taulukosta 6.

Taulukko 6. Kriittisen leikkausjännityksen vakio K (Budynas, 2020, s. 618)

$\alpha = b/a$	1,0	1,2	1,4	1,5	1,6	1,8	2,0	2,5	3,0	∞
K	7,75	6,58	6,00	5,84	5,76	5,59	5,43	5,18	5,02	4,40

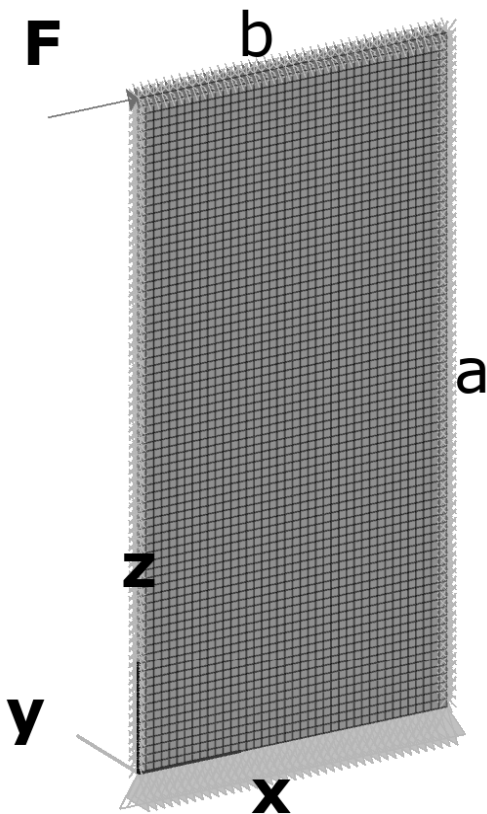
Yksinkertaistetun menetelmän taulukosta voidaan havaita, ettei siinä ole arvoja mittasuhteille, joissa lasiruudun korkeus on suurempi kuin leveys, eli $\alpha < 1,0$. Kaava (26) perustuu Eulerin

nurjahdusteoriaan, ja se voidaan löytää lähes samassa muodossa teräksen eurokoodista SFS-EN 1993-1-5 s. 20. Standardissa sanotaan myös, että se on jännitys, jossa virheetön ja pieniin siirtymiin perustuva kappale menettää stabiliteetin.

5 TULOKSET

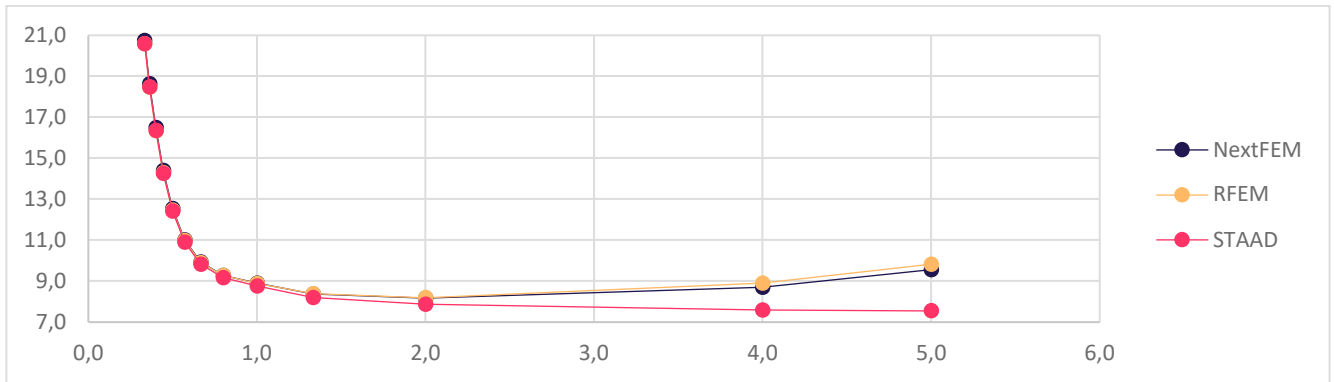
Tutkimusvaiheessa selvitettiin, millainen vaikutus lasiruudun mittasuhteilla on sen kestävyteen. FEM-ohjelmalla mallinnettiin monoliittinen lasirakenne, jonka paksuus oli 8 mm. Sivumitat vaihtelivat 250x1000–4000x4000 mm välillä niin, että korkeutta muutettiin 1000 mm ja leveyttä 250 mm porrastuksella, jonka jälkeen rakenteen leikkauslommahduskerroin laskettiin uudelleen. Laskentamalleja muodostui näin yhteensä 156 kappaletta.

Tuentaehdoiksi määritettiin nivelellinen kiinnitys alaosalle (X, Y, Z estetty, kiertymä sallittu) ja sivutuettu kiinnitys muille sivuille (Y estetty, kiertymä sallittu). Näin ollen kuvassa 22 esitetty rakenne toimii kuin mastopilari, jolla on jäykkä kiinnitys alapäästä.



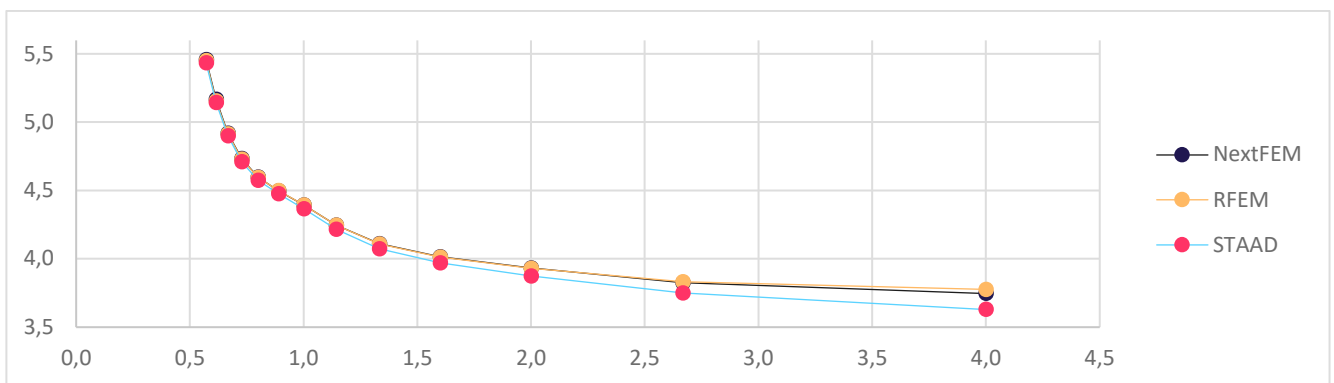
Kuva 22. Lasiruudun laskentamalli NextFEM-ohjelmassa.

Rakenne mallinnettiin kolmella eri ohjelmalla, jotta voitiin minimoida virheet ja vertailla eri ohjelmien tuloksia. Saatiin tulokseksi neljä eri käyrää, joiden muoto ei ole yhtenevä sivusuhteen $\alpha = a/b$ samalla vaihteluvälillä. Sivusuhdetta ei siis voitu käyttää rakenteen laskennan vakiointiin.



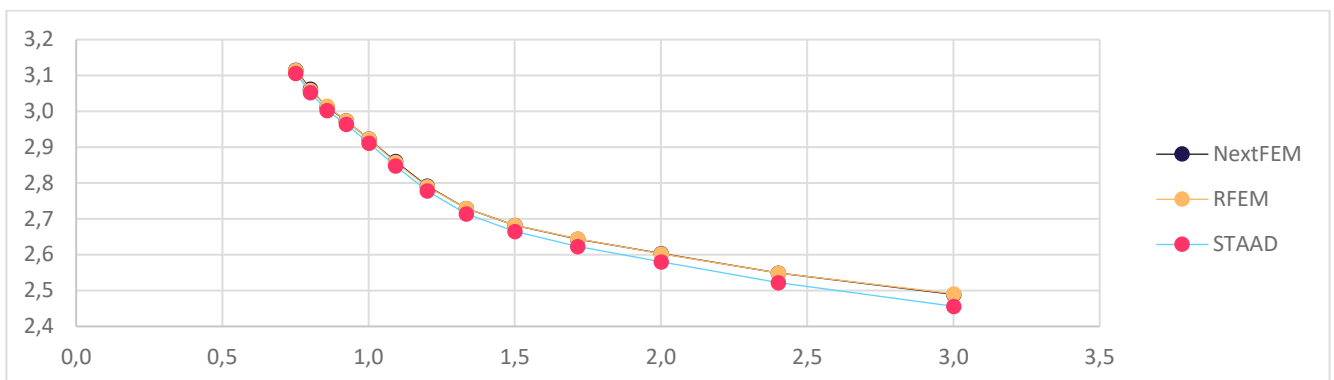
Kuvio 2. Lasiruudun $h=1000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.

Kuviosta havaitaan, että kun sivusuhte kasvoi 2,0-arvosta suuremmaksi, STAAD.Pro -ohjelmistolla lommahduskerroin jatkoi laskemistaan, kun kahdella muulla ohjelmistolla kapasiteetti lähti uudelleen kasvamaan. Kyseessä olivat lasiruudun koot 200×1000 ja 250×1000 . Kapasiteetin kasvua voi selittää mitan b lyheneminen, jolloin rakenteen tasomainen käyttäytyminen on paremmin estetty, koska sivuille a määritetyt sivutuennat ovat lähempänä toisiaan.



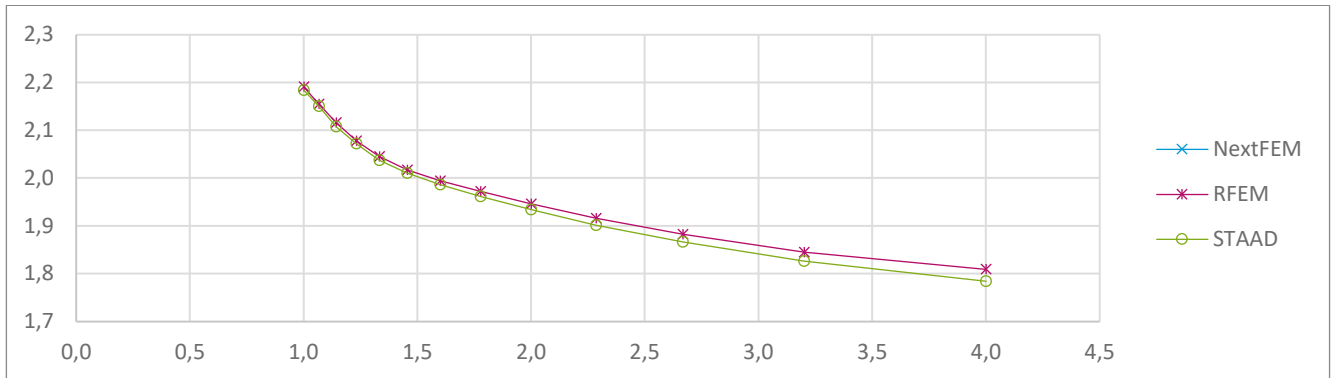
Kuvio 3. Lasiruudun $h=2000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.

Kuviossa käyrät ovat yhteneviä jokaisen ohjelmiston välillä, eikä isoja eroja arvoissa ole. Tämän perusteella voidaan arvioida niiden olevan luotettavia.



Kuvio 4. Lasiruudun $h=3000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.

Samoin tämän korkeusryhmän kuviossa eri ohjelmistoilla lasketut arvot vastaavat toisiaan. Jatkolaskelmissa on noudatettu kuitenkin NextFEM-ohjelmiston tuottamia arvoja.



Kuvio 5. Lasiruudun $h=4000$ lommahduskerroin sivusuhteen a/b funktiona.

Myös viimeisessä tarkastellussa ryhmässä kuvioden muodot ja arvot ovat keskenään vertailukelpoisia. Tässä ryhmässä kaikki tarkasteltavat pisteet ovat yli 1,0 sivusuhteella.

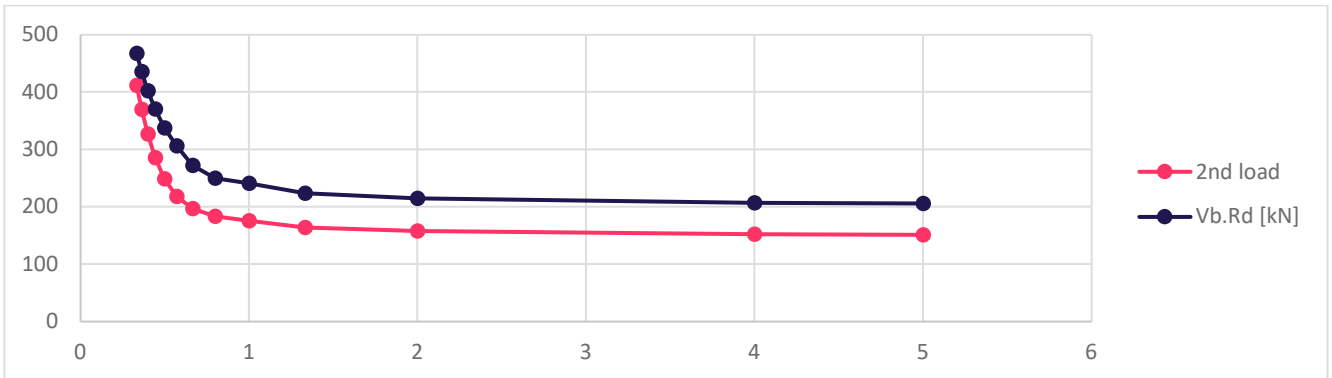
Luvussa 4.6 esiteltiin kimmoteoriaan perustuva yksinkertaistettu menetelmä leikkauslommahduksen laskemiseen lasiruudulle. Menetelmällä ei ollut mahdollista laskea tiettyjen mittasuhteiden paneeleita, ja koska tätä työtä varten laskettu data sisälsi arvoja myös tuolle alueelle, päätettiin vertailla käyriä.

Ensin muutettiin olemassa olevaa dataa niin, että laskettiin leikkauslommahduskertoimen avulla kriittinen kuorma, jolla lommahdus tapahtuu. Kriittinen kuorma on rakenteeseen määrätyn kuorman ja lommahduskertoimen tulo. Tuloksen luotettavuutta arvioitiin laskemalla tällä kuormalla toinen iteraatio, ja sen pitäisi tuottaa mahdollisimman lähelle 1,000 olevaa arvoa oleva lommahduskerroin. Jokaisesta korkeusryhmästä laskettiin uudelleen sivusuhteen $\alpha = 1,0$ rakennemalli. Todettiin arvojen olevan riittävän tarkkoja, sillä eroa oli maksimissaan 1 %.

Sitten taulukoitiin kaavan (26) kertoimen K arvo jokaiselle mittasuhteelle. Hyödyllisimmät arvot olivat korkeusryhmän $H=1000$ ja $H=2000$ arvoissa, koska niissä oli eniten pieniä α :n arvoja. Kertoimen avulla saatiin selvitettyä kriittinen leikkauslommahdusjäännitys $\tau_{b,cr}$ ja edelleen leikkauslommahduskuorma.

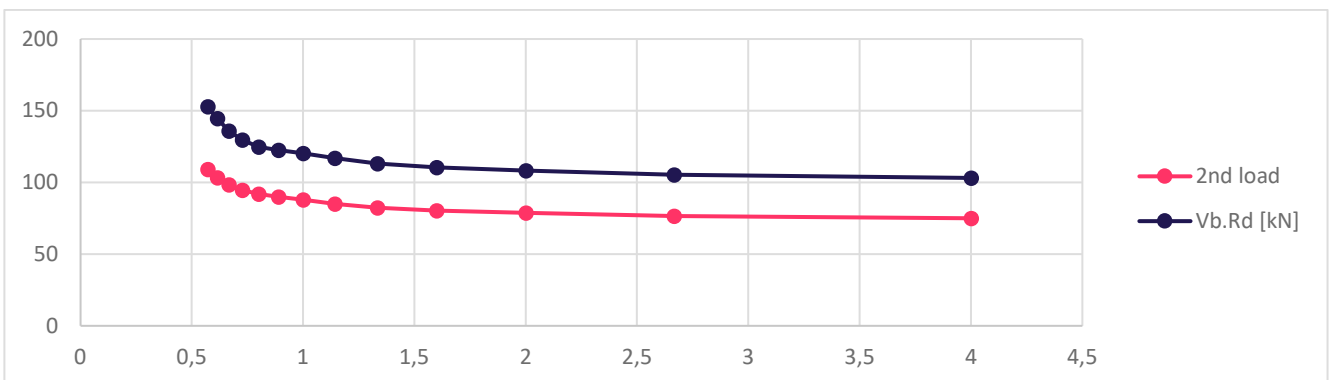
Menetelmien tulosten suhteen havaittiin olevan 73 %. Käsineläskenta antoi siis noin 27 % pienempiä arvoja, mutta käyrät kuitenkin noudattivat samaa muotoa. Tämän suhdeluvun avulla

voitiin ratkaista kuorma, siitä edelleen jännitys ja K-kertoimen arvo. Saadut tulokset esitetään kuvioissa 6–9.

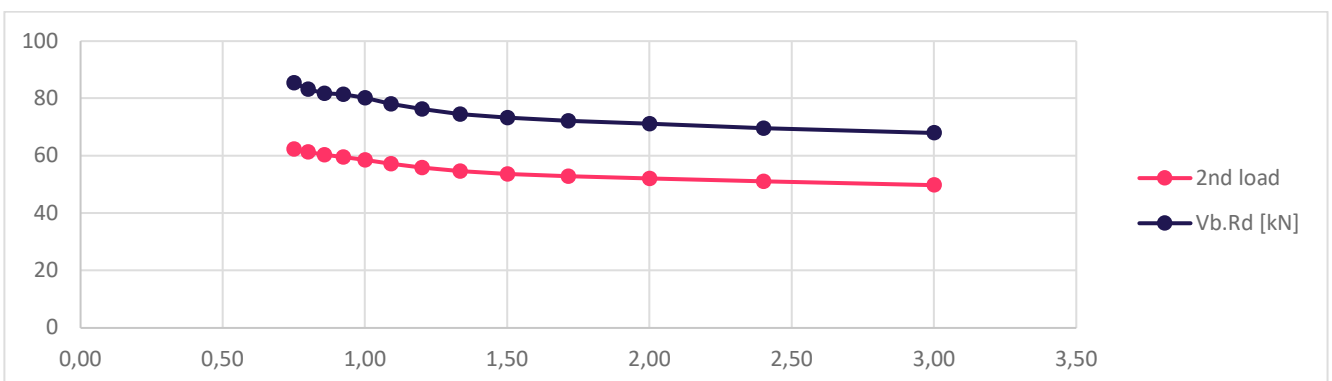


Kuvio 6. Lasiruudun kuormakestävyys $h=1000$ sivusuhteen a/b funktiona.

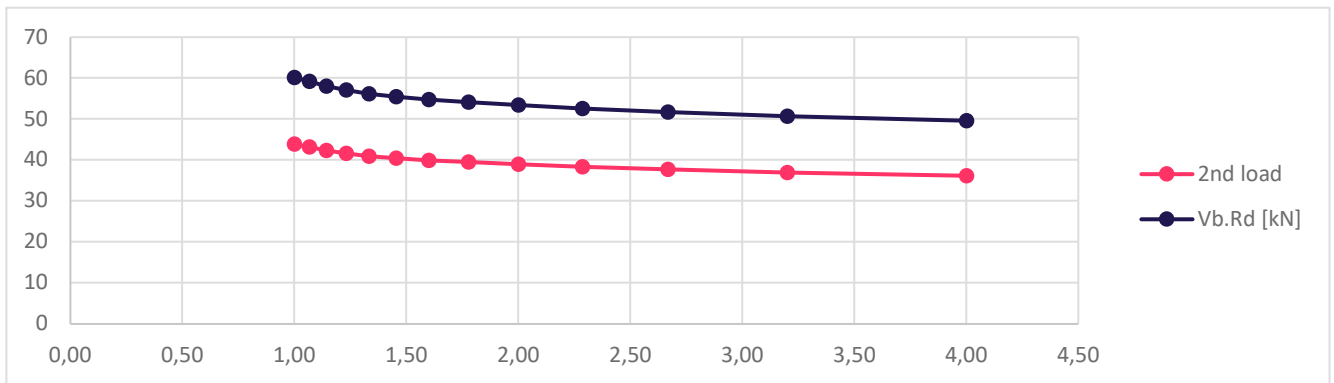
Tämän ryhmän laskennassa on noudatettu STAAD.Pron arvojoukkoa. Muilla ohjelmilla kapasiteetti lähti uudestaan nousemaan, joten STAAD.Pron arvot ovat turvallisella puolella.



Kuvio 7. Lasiruudun kuormakestävyys $h=2000$ sivusuhteen a/b funktiona.

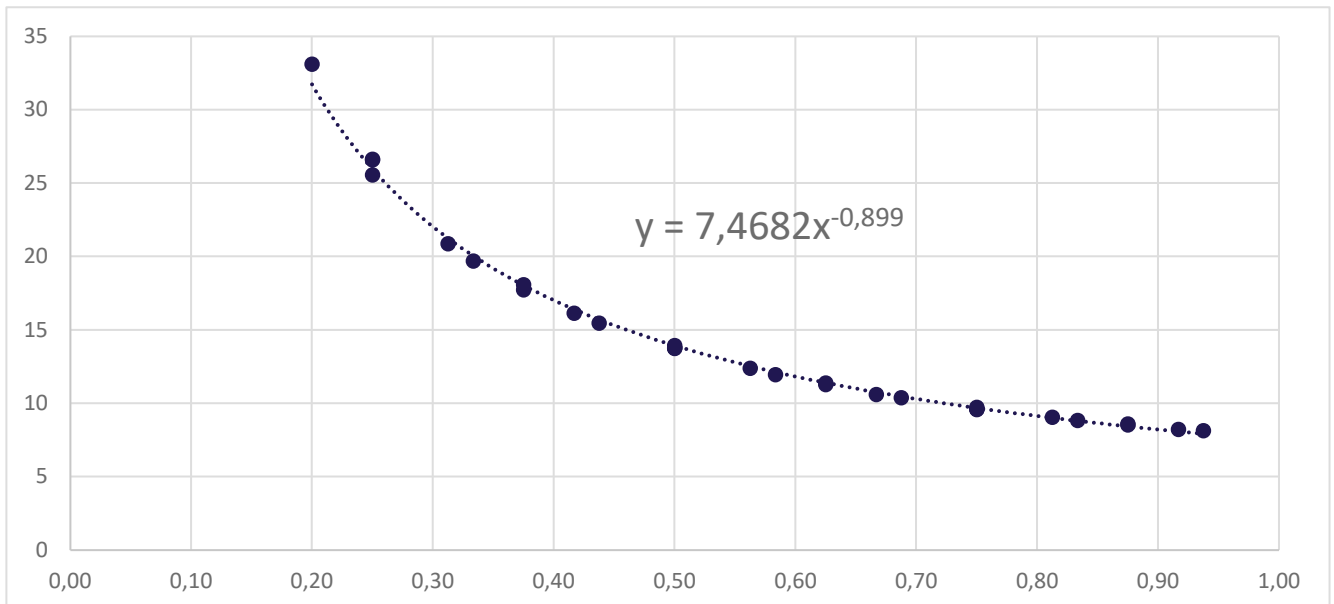


Kuvio 8. Lasiruudun kuormakestävyys $h=3000$ sivusuhteen a/b funktiona.



Kuvio 9. Lasiruudun kuormakestävyys $h=4000$ sivusuhteen a/b funktiona.

Edelleen näiden arvojen perusteella tehtiin kuvaaja, ja siihen funktion sovittamalla saatiin laskettua keskimääräiset arvot sivusuhteen puuttuvalle alueelle.



Kuvio 10. K-arvojen joukko ja sovitettu funktio sivusuhteen a/b funktiona.

Kuvaajassa olevalla funktiolla voidaan laskea myös pienempien sivusuhteiden arvoja. Taulukossa 7 on esitetty 0,1-porrastuksin saadut arvot:

Taulukko 7. Kriittisen leikkausjännityksen vakio K , laajennettu

$\alpha = b/a$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
K	59,19	31,74	22,04	17,02	13,93	11,82	10,29	9,13	8,21

Lasketaan sivusuhteella 0,75 oleva esimerkki ja verrataan sitä elementtimenetelmää hyödyn-
tävän ohjelmiston tulokseen.

Lähtötiedot:

$$a = 4 \text{ m}$$

$$b = 3 \text{ m}$$

$$\alpha = 0,75$$

$$K = 7,4682 \cdot 0,75^{-0,899} = 9,67$$

$$E_G = 70 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,23$$

$$h = 8 \text{ mm.}$$

Lasketaan kriittinen leikkausjännitys $\tau_{b.cr}$ kaavalla (25).

$$\tau_{b.cr} = K \frac{E_G}{1 - \nu^2} \left(\frac{h}{a}\right)^2 = 9,67 \frac{70 \text{ GPa}}{1 - 0,23^2} \left(\frac{8 \text{ mm}}{4 \text{ m}}\right)^2 = 3,52 \text{ MPa} \Rightarrow \tau_{max}$$

Leikkausjännityksen kaava suorakaidepoikkileikkaukselle kaavan (5) mukaan.

$$\tau_{max} = \frac{3 Q}{2 A}$$

Q on tässä tapauksessa leikkausvoimakkestävyyden arvo $V_{b.Rd}$. Sijoitetaan kaavaan aiemmin
laskettu $\tau_{max} = \tau_{b.cr}$ ja ratkaistaan $V_{b.Rd}$.

$$\Rightarrow V_{b.Rd} = \frac{2 \tau_{max}}{3 \gamma_M} \cdot k_{mod} \cdot A = \frac{2}{3} \cdot \frac{3,52 \text{ MPa}}{1,2} \cdot 1,0 \cdot 8 \text{ mm} \cdot 3 \text{ m} = 46,9 \text{ kN}$$

$$\frac{34,1 \text{ kN}}{46,9 \text{ kN}} = 72,7 \%$$

Kuten laskennasta voidaan todeta, lommahdus tapahtuu jo paljon ennen kuin materiaalin lu-
juus saavutetaan. Lasiruudun kriittinen leikkausjännitys on yksi mahdollisesti rakennetta ra-
joittava, eli mitoittava, tekijä. Muut tarkastelut tulee tehdä kohteen luonteen mukaisesti.

Lasketaan kaavoilla (7) ja 8 (luku 3) tyypillisen puurankarunkoisen ulkoseinän jäykistyskestävyys levytyksen osalta, jota voidaan verrata lasista saatavaan kapasiteettiin. Valitaan tuotejärjestelmäksi Knauf Oy:n tuotteet ja sovelletaan suunnitteluohjetta EUFI29-20005465-C. Rakenteen materiaalikerrokset ovat sisältä ulos: KEK13 sisäverhouksen kipsilevy, puurunko 48x198 ja KXT9 ulkoverhouksen kipsilevy. Oletetaan puurungon olevan vähintään 600 mm jaolla, mutta kuitenkin niin tiheä, että levyn lommahdusta ei tapahdu. Yhteiskestävyyteen saa ohjeen mukaan hyväksyä heikomman levyn kapasiteetista vain 50 %, jos levyt ja niiden kiinnitys eivät ole samanlaisia.

$$s = 70 \text{ mm}; b_1 = 4000 \text{ mm}; h = 4000 \text{ mm}; c_1 = 1,00; \gamma_M = 1,3; k_{mod} = 1,1$$

$$F_{f.Rk} = 0,55 \text{ kN} ; \text{KEK13} + \text{ITW BYG Spit 151600 (3,9x32)}$$

$$F_{1.v.Rk} = 0,55 \cdot 4000 \cdot \frac{0,60}{70} = 31,43 \text{ kN}$$

$$F_{f.Rk} = 0,51 \text{ kN} ; \text{KXT9} + \text{Senco 39A32MC (3,9x32)}$$

$$F_{2.v.Rk} = 0,51 \cdot 4000 \cdot \frac{0,60}{70} = 29,14 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rk} = F_{1.v.Rk} + F_{2.v.Rk} \cdot 50 \% = 46,00 \text{ kN}$$

$$F_{v.Rd} = k_{mod} \cdot \frac{F_{v.Rk}}{\gamma_M} = \underline{\underline{38,92 \text{ kN}}}$$

Työssä tarkasteltiin useilla eri mittasuhteilla olevia lasiruutuja. Taulukkoon 8 on koottu niistä saatuja kestävyksiä, joita vertaillaan edellä laskettuun kipsilevyjäykisteiseen ulkoseinään.

Taulukko 8. Jäykistysjärjestelmien vertailua

Tyyppi	Pinta-ala	Levyypaksuus	Menetelmä	F _{v,Rd} [kN]
Kipsilevyseinä	4000x4000	13+9 mm	EC5	38,9
Lasiruutu	4000x4000	8 mm	Luku 4.5	11,6
			Luku 4.6	50,1
			FEM	36,5
Kipsilevyseinä	3000x3000	13+9 mm	EC5	29,19
Lasiruutu	3000x3000	8 mm	Luku 4.5	20,1
			Luku 4.6	66,8
			FEM	48,7
Kipsilevyseinä	2000x2000	13+9 mm	EC5	19,46
Lasiruutu	2000x2000	8 mm	Luku 4.5	42,9
			Luku 4.6	100,2
			FEM	73,2
Kipsilevyseinä	1000x1000	13+9 mm	EC5	9,73
Lasiruutu	1000x1000	8 mm	Luku 4.5	144,0
			Luku 4.6	200,4
			FEM	145,9

Kipsilevyseinän kapasiteetti laskee jäykistyslohkon leveyden myötä, koska kiinnikkeiden määrä vähenee. Lasijäykistys sen sijaan kasvaa, koska materiaalin lommahtamisen mahdollisuus pienenee tukivälin lyhentymisen vuoksi. Menetelmien vertailua vaikeuttaa myös erilaiset materiaalin osavarmuuskertoimet.

6 POHDINTA JA YHTEENVETO

Opinnäytetyön alkuvaiheessa lasin käyttö rakenteellisesti tuntui vieraalta. Kun työhön syvennyttiin, havaittiin, että myös Euroopassa on olemassa olevia jäsenmaakohtaisia standardeja ja tutkimustyötä tehdään käytön lisäämiseksi. Rakennelasin käyttö Euroopassa vaatii kuitenkin yhtenäisen suunnitteluohjeen eurokoodiin sisällytettynä. Useissa standardeissa ja lähteissä on esitetty vain tasoon nähden kohtisuoraan kuormitettujen lasielementtien suunnittelu. Näitä rakenteita ovat tyypillisesti katto- ja välipohjapinnat. Tuulikuormat siirtyvät rungolta tason suuntaisesti ja näiden kuormien suunnitteluun on edelleen huonosti materiaalia.

Lasin käyttö rakennuksen jäykistämiseen ja tason suuntaisten kuormien siirtämiseen on realistinen ja hyvä vaihtoehto. Pinnan tulee olla jatkuva ja kiinteä, joten se ei voi olla samalla kulkuaukko tai avattava ikkuna. Toisaalta lasiruutuun on mahdollista työstää aukko ja se voidaan mallintaa kehittyneillä FEM-ohjelmistoilla. Jos jäykistävien lasipintojen käyttö rakennuksissa yleistyy, on aukotuksia syytä tutkia tulevissa tutkimuksissa.

Lasin valmistustekniikka, yhtenäisen pinnan lämpöliikkeet ja yksittäisen eristyslaselementin massa rajoittavat käyttöä. Tämän opinnäytetyön perusteella 4000x4000 mm pinta on ylärajalla edellä mainitut asiat huomioon ottaen. Eräiden valmistajien esitteissä kiinteän ikkunan suurimmaksi sivumitaksi on kerrottu 3150–3500 mm, kuitenkin maksimissaan 6 m² pinta-ala.

Käyttöön liittyy paljon epävarmuustekijöitä ja lisätutkimusta vaativia asioita. Käytön aikana lasiin voi muodostua pieniä halkeamia, jotka vaikuttavat oleellisesti sen lujuuteen. Pitkäaikaiskestävyys rajattiin tästä työstä pois, mutta dynaamisten kuormien vaikutusta ja mahdollista teknistä käyttöikää kannattaa selvittää.

Valituilla ohjelmistoilla ei ollut mahdollista sisällyttää pinta- tai tilavuusmallien laskentaan alku- ja materiaalivirheitä siten, että niistä olisi saatu tarkennettu lommahduskerroin. Tällainen laskenta oli rajattu ohjelmistoissa sauvojen laskentaan, joita tässä työssä ei käytetty. Tästä syystä tuloksiksi saadut lommaduskertoimet voivat olla liian korkeita.

Eri laskentamenetelmät tuottavat hyvin erilaisia tuloksia. Lasielementin sekä liittyvän kiinnityslistan ja rungon rakenne muuttavat tuloksia hyvin herkästi. Rakennelasin kantavuutta pohdittaessa suunnittelijan tulee olla hyvin aiheeseen ja kohteen erityispiirteisiin perehtynyt.

LÄHTEET

- Budynas, R., & Sadegh, A. (2020). *Roark's formulas for stress and strain* (9. p.). McGraw-Hill Education.
- German Institute for Standardization (DIN). (2020). *Glass in building: Design and construction rules part 1, terms and general bases, English translation of DIN 18008-1:2020-05* (DIN 18008-1:2020-05).
- Haldimann, M., Luible, A., & Overend, M. (2008). *Structural use of glass*. International Association for Bridge and Structural Engineering.
- Karhunen, J., Lassila, V., Pyy, S., Ranta, A., Räsänen, S., Saikkonen, M., & Suosara, E. (1993). *Lujuusoppi*. Otatieto.
- Knauf. (2020). *Laskentaohje Knauf Oy:n kipsilevyjen levjyäkistykseksi eurokoodi 5 mukaan* (EUFI29-20005465-C).
- Koukkunen, K. (1985). *Uusi pikkujättiläinen*. WSOY.
- National research council of Italy (CNR). (2013). *Guide for the design, construction and control of buildings with structural glass elements* (CNR-DT 210/2013).
- Ongelin, P., & Valkonen, I. (2016). *SSAB Domex Tube: Rakenneputket*. SSAB Europe.
- Perälä, M. (2016). *Teräsrakenteet, osa I, opetusmateriaalia*. [Opetusmateriaali]. SeAMK Moodle.
- Pilkington. (2021). *Lasifakta 2021: Käytännöllinen apu rakennuslasien valintaan*. https://www.pilkington.com/-/media/pilkington/site-content/finland/architects/1595_glasfakta2021_web_fi.pdf
- Rainamo, M. (1999). *Lasirakentajan käsikirja*. Enterpress.
- Saarineva, J. (2007). *Lujuusoppi: Peruskurssi* (6. uud. p.). Pressus.
- Suomen rakennusinsinöörien liitto (RIL). (2017). *Puurakenteiden suunnitteluohje: Eurokoodi EN 1995-1-1* (RIL 205-1-2017).
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2006). *Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–5: Levyrakenteet* (SFS-EN 1993-1-5).
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2015). *Eurokoodi 5: Puurakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt* (SFS-EN 1995-1-1 + A1 + A2 + AC).

- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2019). *Rakennuslasit: Poikittaisen kuormankestävyden laskennallinen määrittäminen* (SFS-EN 16612:2019).
- Suomen Standardisoimisliitto (SFS). (2021a). *Design of glass structures. Part 1: Basis of design and Materials* (CEN/TS 19100-1:2021:en).
- Vasiliev, V., & Morozov, E. 2013. *Advanced mechanics of composite materials and structural elements* (3. p.). Elsevier.