



Julkisivujärjestelmän lasinkannatuksen kehitystyö

Heikki Siirilä

OPINNÄYTETYÖ
Kesäkuu 2020

Konetekniikka
Koneautomaatio

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Konetekniikka
Koneautomaatio

SIIRILÄ, HEIKKI:

Julkisivujärjestelmän lasinkannatuksen kehitystyö

Opinnäytetyö 42 sivua, joista liitteitä 1 sivua
Kesäkuu 2020

Tämän opinnäytetyön tarkoitus oli suunnitella kestävämpi julkisivujärjestelmän lasinkannatus Purso Oy:n rakennusjärjestelmäyksikölle. Tavoitteena oli kehittää lasinkannatuksen entistä versiota siten, että se kestäisi 800 kilogramman lasin painoa. Tarve tälle kehitystyölle syntyi, kun työn tilaaja huomasi, että osa kilpailuvista yrityksistä ilmoittaa lasinkannatinjärjestelmänsä kantokyvyksi suuremman arvon kuin heidän nykyisen lasinkannatuksensa ilmoitetaan kestäväksi.

Tämän työn perustana käytettiin tuotekehitykseen ja lujuuslaskentaan liittyviä teoksia sekä yrityksen sisäistä osaamista. Työhön sisällytettiin myös lasinkannatuksen paranneltujen versioiden 3D-mallinnusta ja FEM-laskentaa. Lisäksi suoritettiin fyysiset kuormitustestit rakennetuille prototyypeille.

Tulosten perusteella kehitetty lasinkannatus kesti kuormitustesteissä 800 kilogramman lasin painoa niin, että vaakaprofiilin taipuma pysyi sallituissa rajoissa. Mallinnus ja FEM-analyysi osoittautuivat onnistuneiksi, sillä rakennelma käyttäytyi lähes suunnitellusti fyysisissä kuormitustesteissä.

Johtopäätöksenä voidaan todeta, että yritykselle löydettiin tapa tehdä lasinkannatinjärjestelmästä kestävämpi. Jatkokehityksenä olisi kuitenkin hyvä miettiä, kuinka alumiinisen lasinkannatinprofiilin taipuminen saataisiin estettyä vielä paremmin. Lisäksi olisi hyvä miettiä muun muassa, miten lasinkannatuksen valmistuskulut saadaan minimoitua kuormituskestävyys säilyttäen.

Opinnäytetyön liitteissä on luottamuksellista tietoa, joten niitä ei ole julkaistu tämän työn julkisessa versiossa.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Degree Programme in Mechanical Engineering
Machine Automation

SIIRILÄ, HEIKKI:
Development of a Glass Support for a Façade System

Bachelor's thesis 42 pages, appendices 1 pages
June 2020

The purpose of this thesis was to design a more durable facade glass support system for the building system unit at Purso Oy. The aim was to develop the glass support to withstand 800 kg of glass. The need for this development work arose when Purso Oy found out that some competing companies reported that their glass support systems could withstand a higher load than their own.

This thesis is based on literature related to product development and strength calculation, and the company's internal know-how. The work also includes 3D modeling and FEM calculations of improved versions of the glass support. Physical load measurements were performed on the built prototypes.

According to the results, the glass support withstood a glass weight of 800 kilograms so that the deflection of the horizontal profile remained within the permissible limits. The 3D modeling and FEM analysis proved to be successful, as the structure behaved almost as planned in physical load tests.

In conclusion, it can be said that this study succeeded in finding a way for the company to make the glass support system more sustainable. As a further development, it would be good to consider how the deflection of the aluminium glass support profile could be prevented better. In addition, it would be good to consider, how the manufacturing costs of the glass support can be minimized while maintaining load resistance.

The appendices to the thesis contain confidential information and were not included in the public version of this thesis.

Key words: facade, glass support, product development, fem-analysis

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	5
2	TEORIA	6
	2.1 Purso Oy	6
	2.2 Materiaalina alumiini	7
	2.3 Julkisivujärjestelmät	8
	2.4 Kuormitus	10
	2.5 Standardit	11
3	KEHITYSTYÖ	13
	3.1 Tavoitteenasettelu	13
	3.1.1 Lähtötilanne	13
	3.1.2 Tilaajan vaatimukset	15
	3.1.3 Asetetut tavoitteet	16
	3.2 Mallinnus	16
4	TESTAUS	20
	4.1 FEM	20
	4.1.1 Yleistä	20
	4.1.2 FEM-analyysi mallinnetuille rakenteille	21
	4.2 Fyysiset kuormitusmittaukset	23
5	TULOKSET	29
	5.1 FEM-analyysin tulokset	29
	5.2 Kuormitustestien tulokset	30
	5.2.1 Vaakaprofiilin taipuminen versiolle 1	32
	5.2.2 Lasinkannatinprofiilin taipuminen versiolle 1	32
	5.2.3 Tulokset versiolle 2	35
6	POHDINTAA	37
	6.1 Tulosten luotettavuus ja virhelähteet	37
	6.2 Tavoitteiden täytyminen	38
	LÄHTEET	40
	LIITTEET	42
	Liite 1. Koneistuskuvat	42

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön aiheena on lasinkannatuksen kehitystyö, ja sen tarkoituksena on kehittää kestävämpi ja siten entistä kilpailukykyisempi lasinkannatinjärjestelmä Purso Oy:n rakennusjärjestelmäyksikölle. Tarve tälle kehitystyölle syntyi, kun työn tilaaja vertasi nykyisen lasinkannatinjärjestelmänsä kuormituskestävyyttä kilpailevien yritysten ilmoittamiin lukuihin ja huomasi, että julkisivujärjestelmän kilpailukykyä olisi hyvä parantaa kehittämällä sen kestävyyttä. Uuden lasinkannattimen kehittäminen perustuu siis yrityksen nykyisen kannatinjärjestelmän parantamiseen.

Opinnäytetyön aihe on rajattu vahvistetun lasinkannatuksen suunnitteluun, prototyyppien rakentamiseen ja testauksiin. Työn perustana ovat tuotekehitykseen liittyvät teokset sekä yrityksen sisäinen osaaminen. Lisäksi tavoitteenasettelussa hyödynnetään etsittyjä tietoja kilpailevien yritysten vastaavista lasinkannatinjärjestelmistä. Suunnitellut versiot vahvistetusta lasinkannatusjärjestelmästä 3D-mallinnetaan ja niille tehdään FEM-analyysit. Näihin käytetään Autodesk Inventor -ohjelmaa. Lisäksi rakennetaan prototyyppit, joille suoritetaan fyysisiä kuormitustestejä.

Tämän opinnäytetyön teoriaosuudessa, eli luvussa 2, tarkastellaan alumiinia rakennusmateriaalina ja Purso Oy:ta yrityksenä. Lisäksi esitellään julkisivujärjestelmiin ja kuormitukseen liittyviä perustietoja sekä kerrotaan hieman julkisivujärjestelmien tuotekehityksessä huomioitavista standardeista. Luku 3 pitää sisällään tavoitteenasettelun kuvauksen ja rakennelmien 3D-mallinnuksen. Luvussa 4 esitellään lasinkannatinjärjestelmän FEM-analyysit ja fyysiset kuormitustestit. Niiden tulokset esitellään luvussa 5 ja viimeisenä pohditaan työn tuloksia ja onnistumista.

2 TEORIA

2.1 Purso Oy

Purso Oy on vuonna 1959 perustettu suomalainen perheyrittäjä, joka suunnittelee ja tuottaa alumiinista valmistettuja ratkaisuja teollisuuden eri aloille sekä järjestelmäratkaisuja julkisivuihin ja led-valaistukseen. Yrityksen tuotteet jaetaan kolmeen ryhmään yksiköiden mukaan: profiilit ja komponentit, rakennusjärjestelmät ja SNEP-valaistusjärjestelmät.

Yrityksen päätoimipiste sijaitsee Nokian Siurossa, missä on yrityksen pursotuslaitos, ajoneuvoyksikkö, kevytmetallikonepaja ja pintakäsittelylaitos. Purso Oy:n oma sulatto sijaitsee Ikaalisissa. Siellä alumiini sulatetaan, seostetaan ja valetaan pursotusaihioksi eli profiilien raaka-aineeksi. Aihoiden valmistuksessa hyödynnetään ensisijaisesti uudelleen sulatettavan raaka-aineen käyttöä. (Purso Oy n.d.)

Pursolla on asiakkaita ympäri Suomea ja Pohjoismaita, sekä jälleenmyyjiä Ruotsissa, Tanskassa ja Saksassa. Ruotsissa Pursolla on myös tekninen tuki ja myynti. Purso Oy:n liikevaihto oli vuonna 2018 noin 89 miljoonaa euroa. Liikevaihto nousi tuolloin edellisestä vuodesta 3 prosenttia. Tilikauden tulos oli noin 6 miljoonaa euroa ja liikevoittoprosentti oli 6,8. Yhtiön omavaraisuusaste oli 85 prosenttia. (Suomen asiakastieto Oy 2018.)

Pursoyhtiöihin kuuluu Purso Oy:n lisäksi Linjapinta Oy, Fennosteel Oy, Purso-Tools Oy ja Veme Oy. Lisäksi Purso Group on hiljattain ostanut hollantilaisen Nedal Aluminium B.V. -yhtiön osakekannan ja siten laajentanut tuotantoa Hollantiin. Purso Group -konsernin liikevaihdon arvioidaan nousevan kaupan myötä noin 170 miljoonaan euroon ja henkilöstömäärä noin 500 henkilöön. (Purso Group vahvistaa markkina-asemaansa... 2019.)

2.2 Materiaalina alumiini

Alumiini on alkuaine, joka kuuluu metalleihin. Se on suosittu teollisuuden raaka-aine muun muassa keveytensä takia. Etenkin rakennusmateriaalina alumiinin suosio perustuu sen lujuus-painosuhteeseen, sillä se on keveytensä lisäksi hyvin kestävä. (Teknologiateollisuus ry 2013, 5.) Alumiinin tiheys on 2700 kg/m^3 ja sulamispiste $660 \text{ }^\circ\text{C}$. Alumiinilla on myös hyvä lämmön- ja sähkönjohtokyky, sillä sen lämmönjohtavuus on $217 \frac{\text{W}}{\text{m}}^\circ\text{C}$ ja ominaisresistanssi $20 \text{ }^\circ\text{C}$:ssa $27,2 \cdot 10^{-9} \Omega\text{m}$. (Tekniikan kaavasto 2015, 177.)

Alumiini kestää hyvin ilman ja veden vaikutusta eikä siis ole altis korroosiolle. Alumiinin korroosiokestävyys perustuu sen pintaan muodostuvaan suojaavaan oksidikerrokseen. Alumiini hapettuu ja pintaan muodostuva tiivis oksidikerros suojaa alempia kerroksia korroosiolta. Oksidikerros antaa alumiinille myös hyvän sään ja UV-säteilyn kestävyuden. (Teknologiateollisuus ry 2013, 5.)

Puhdas alumiini on varsin pehmeää, joten teollisuudessa käytetään usein seostettua alumiinia. Usein alumiinia seostetaan muilla metalleilla, kuten magnesiumilla. Moniseosteknologioilla on mahdollista myös saavuttaa myös esimerkiksi parempi muokattavuus. (Teknologiateollisuus ry 2013, 6.)

Purson tekemien julkisivujärjestelmien pääasiallisena materiaalina käytetään alumiinia. Alumiinin etuna on muun muassa se, että se on ulkonakin lähes huoltovapaa materiaali. Toinen etu on, että oksidikerros muodostuu myös ajan myötä tulevien naarmujen päälle, eli näyttää ikään kuin alumiini korjaisi itse itsensä.

Mikäli alumiinin luonnollinen hapettuminen halutaan estää, voidaan alumiini pintakäsitellä esimerkiksi pulverimaalaamalla tai anodisoimalla. Anodisoinnin aikana muodostetaan sähkökemiallisesti lasimainen, keinotekoinen oksidikerros alumiinin pintaan. (Teknologiateollisuus 2013, 10.) Käsiteltävät kappaleet upotetaan anodiksi elektrolyyttiliuokseen. Sähkövirran kulkiessa liuoksen läpi siitä vapautuu happea, joka reagoi alumiinin kanssa, ja alumiinin pinnalle muodostuu oksidikerros. Kerroksen vahvuutta ja ominaisuuksia voidaan säädellä muun muassa virrantiheyttä, käsittelyaikaa ja elektrolyyttiä muuttamalla. Lopputuloksena on kova, tiivis ja pysyvä pinta. Pursoilla on oma anodisointilaitos. (Purso 2003.)

Alumiinilla on hyvät kierrätysmahdollisuudet. Se voidaan sulattaa ja käyttää rajoittamattomia kertoja ilman laadun huononemista. Alumiinisten rakennustuotteiden kierrätysaste on noin 96 prosenttia. (Teknologiateollisuus ry 2013, 4.)

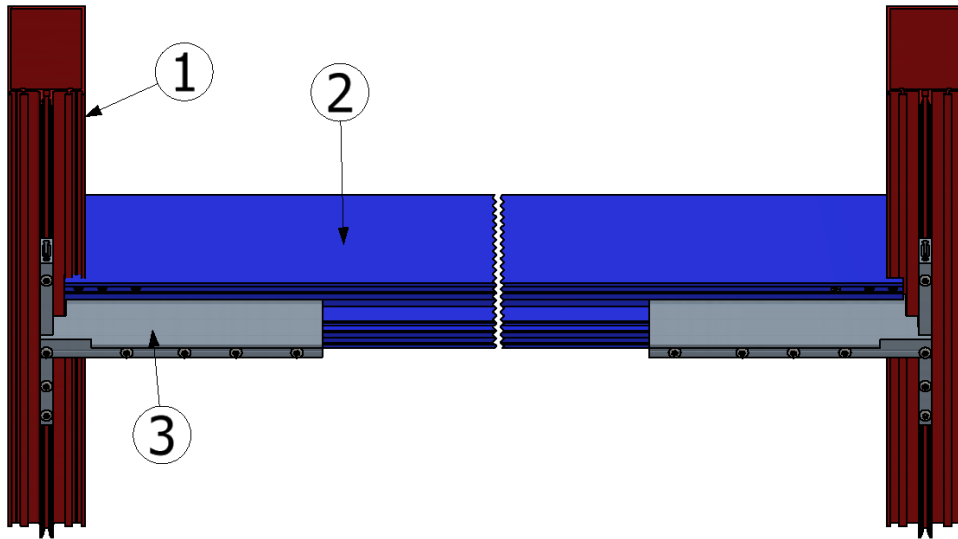
2.3 Julkisivujärjestelmät

Julkisivuksi määritellään rakennuksen ulkopinta, jonka muodostavat yleensä ulkoseinät. Erilaiset lasielementit ovat yleisiä julkisivurakentamisessa, minkä takia tarvitaan lasinkannatukseen suunniteltuja järjestelmiä.

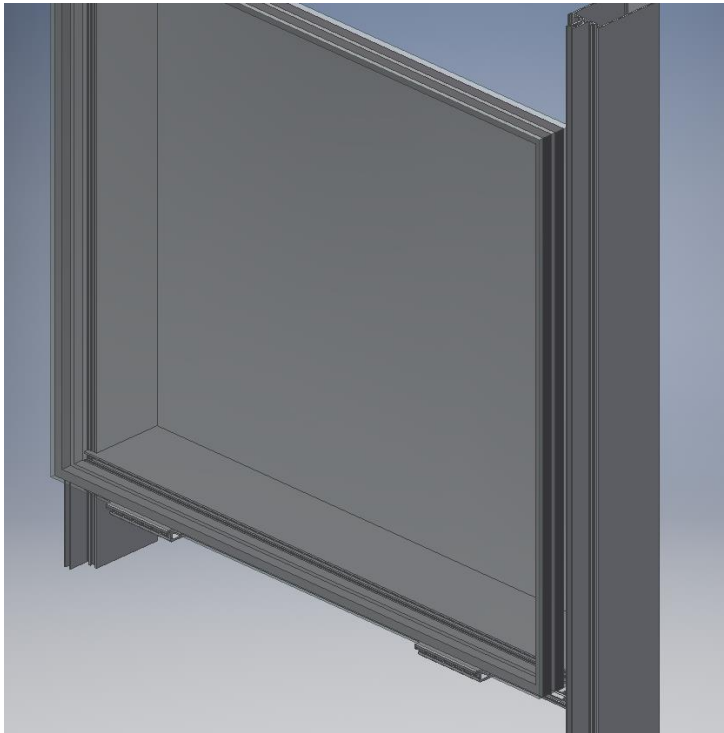
Purson julkisivujärjestelmät P50L ja P60L ovat lämpöeristettyjä, alumiinisia järjestelmiä julkisivuihin, valokattoihin ja sisälaseisiin. Tässä opinnäytetyössä keskitytään P60L julkisivujärjestelmän lasinkannatuksen vahvistamiseen. Julkisivujärjestelmiä on eri kokoisia lasin koosta ja painosta riippuen ja Pursolla P60L on se, jota käytetään tällä hetkellä suurimmille laseille. Nimitys tulee siitä, että runkoprofiilien paksuus on 60 mm.

Julkisivujärjestelmien voidaan ajatella yksinkertaistettuna koostuvan runkoprofiileista, joita ovat pysty- ja vaakaprofiilit, sekä lasinkannatinprofiileista. Nämä osat on merkitty kuvaan 1, jossa on havainnollistettu keskeltä katkaistua, yksinkertaistettua julkisivujärjestelmää. Kuvassa 2 puolestaan on mallinnettu julkisivujärjestelmä lasin kanssa, jotta olisi helpompi hahmottaa, mihin kohtaan lasi järjestelmässä asetetaan. Lasinkannatinprofiilin ja lasin väliin asetetaan järjestelmässä vielä lasinkannatuskiilaksi tai lasitueksi kutsuttu kappale, joka on yleensä noin 100 mm pituinen ja 4 mm lasipakettia leveämpi muovinen laatta. Kiilan paksuus on 3 mm, kun käytetään alumiinista lasinkannatinprofiilia. (Purso 2019.)

Osien kiinnityksessä käytetään usein siihen suunniteltuja liitosprofiileita. Lisäksi julkisivujärjestelmiin kuuluu todellisuudessa lukuisia muitakin komponentteja, kuten tiivisteitä, listoja ja eristeitä, mutta tässä työssä ne jätetään huomioimatta ja keskitytään kuvassa 1 nimettyihin profiileihin.



KUVA 1. Julkisivujärjestelmän runko yksinkertaistettuna: 1 pystyprofiili, 2 vaakaprofiili ja 3 lasinkannatinprofiili



KUVA 2. 3D-mallinnettu julkisivujärjestelmä lasilla

Lasinkannatinprofiili on julkisivujärjestelmän osa, jonka tehtävänä on kannattaa lasielementtiä ja siirtää mahdollisimman suuri osa lasin aiheuttamasta kuormasta järjestelmän vaakaprofiililta pystyprofileille. Tällä pyritään estämään vaakaprofiilin taipumista.

2.4 Kuormitus

Tämä opinnäytetyö sisältää lasinkannatuksen kuormituskestävyyden tutkimista FEM-analyysillä ja fyysisillä kuormitustesteillä. Siksi tässä kappaleessa on syytä käydä läpi lujuuslaskennan teoriaa kuormituksesta.

Kuormituksella tarkoitetaan mitä tahansa ulkoista voimaa tai momenttia, joka kohdistuu tutkittavaan kappaleeseen. Kuormituksia syntyy useista eri lähteistä, kuten painovoimasta, lämpölaajenemisesta tai kontakteista muihin kappaleisiin. Kappaleeseen kohdistuvat voimat voivat olla staattisia tai dynaamisia. Staattinen kuormitus tarkoittaa kuormitusta, jossa rakenteen jokainen osa on tasapainossa ulkoisten kuormien ansiosta, eli kappale pysyy paikallaan tai kulkee vakionopeudella. Dynaaminen kuormitus puolestaan on kuormitusta, joka vaihtelee ajan mukana. (Hietikko 2015a, 20.) Tässä työssä on oleellista tutkia lasin painon aiheuttamaa staattista kuormitusta.

Kuormitukset jaetaan viiteen peruskuormitukseen: veto, puristus, taivutus, leikkaus ja vääntö (Hietikko 2015a, 21). Tässä opinnäytetyössä keskitytään tutkimaan kappaleeseen vaikuttavaa taivutuskuormitusta. Tätä kuormitusta havainnollistetaan alla olevassa kuvassa 3. Kuvassa kappale on tuettu sen molemmista, kuten on tutkimuksen kohteena oleva julkisivujärjestelmän vaakaprofiilikin.



KUVA 3. Kappaleeseen kohdistuva taivutus (Hietikko 2015a, 22)

Kappaleeseen kohdistuva kuormitus on voima F , jolle pätee kaava

$$F = mg, \tag{1}$$

missä m on massa ja g on maan vetovoiman aiheuttama kiihtyvyyys. Maan pinnalla $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, joten, jos lasin massa on 800 kg niin sitä vastaava kuormittava voima on $F = 800 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 7848 \text{ kg} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 7,848 \text{ kN}$.

2.5 Standardit

Standardi on yhteinen menettelytapa toistuvaan toimintaan. Se on kirjallinen julkaisu, joka on standardisoinnista huolehtivan viranomaisen, järjestön tai muun tunnustetun elimen hyväksymä. Standardisoinnilla lisätään tuotteiden yhteensopivuutta ja turvallisuutta, suojellaan kuluttajaa ja ympäristöä sekä helpotetaan kotimaista ja kansainvälistä kauppaa. Suomessa on hajautettu standardisointijärjestelmä, jossa keskusjärjestönä toimiva SFS laatii standardit yhdessä toimialayhteisöjensä kanssa. (SFS n.d.)

Suurin osa voimassa olevista SFS-standardeista on alkuperältään EN-standardeja, jotka laaditaan eurooppalaisessa standardisointijärjestössä CEN:ssä. CEN on kaikkien EU- ja EFTA-maiden standardisointijärjestöjen yhteistyöelin. Kansainvälisellä tasolla laajin standardisointijärjestö on ISO (International Organization for Standardization). (SFS n.d.)

Tämän opinnäytetyön kannalta oleellisin huomioitava standardi on SFS-EN 17146:2019, joka antaa suosituksia lasinkannatusjärjestelmien kantavuuden testausmenetelmille. Standardin pääkriteeri on, että julkisivujärjestelmän osat on suunniteltava jakamaan kuorma siten, että kaikkien julkisivujärjestelmän osien käytettävyys säilyy pysyvässä kuormituksessa.

Standardissa asetetaan kriteerejä lasinkannatuksen kestävyuden testaukselle. Siinä huomautetaan muun muassa, että tutkittavien näytteiden, eli rakennettujen prototyyppien, täytyy standardin mukaan olla edustavia todelliselle mallille, jolla lasinkannatinprofiili siirtää kuormaa runkoprofiileille (SFS-EN 17146:2019). Toisin sanoen testattavan lasinkannatuksen on vastattava mahdollisimman hyvin järjestelmää siinä muodossa, kuin se käyttöön asennettuna tulee olemaan. Tämän takia lasinkannatinprofiilia on testattava osana julkisivujärjestelmää. Lisäksi

testattavien näytteiden tuennan on oltava sellainen, etteivät profiilit pääse pyörimään tai liikkumaan testauksen aikana ja pystysuora kuormitus tulisi testauksissa kohdistaa lasinkannatinprofiiliin mahdollisimman samalla tavalla kuin pysyvä kuorma todellisuudessakin tulee siihen kohdistumaan. (SFS-EN 17146:2019.)

Standardi SFS-EN 13830 on julkisivuja koskeva tuotestandardi. Siinä pystysuuntaisesta kuormasta aiheutuvalle vaakaprofiilin taipumiselle on asetettu rajaksi $L/500$, missä L on vaakaprofiilin tukipisteiden välinen etäisyys (SFS-EN 13830, 21). Tässä työssä $L = 2000$ mm, joten rajaksi tulisi standardin mukaan 4 mm. Julkisivujärjestelmien P50L ja P60L tuote-esitteessä vaakaprofiilin sallituksi taipumaksi on kuitenkin ilmoitettu 3 mm (Purso Oy 2019). Tässä opinnäytetyössä päädyttiin myös käyttämään 3 mm raja-arvoa vaakaprofiilin taipumisen suhteen.

3 KEHITYSTYÖ

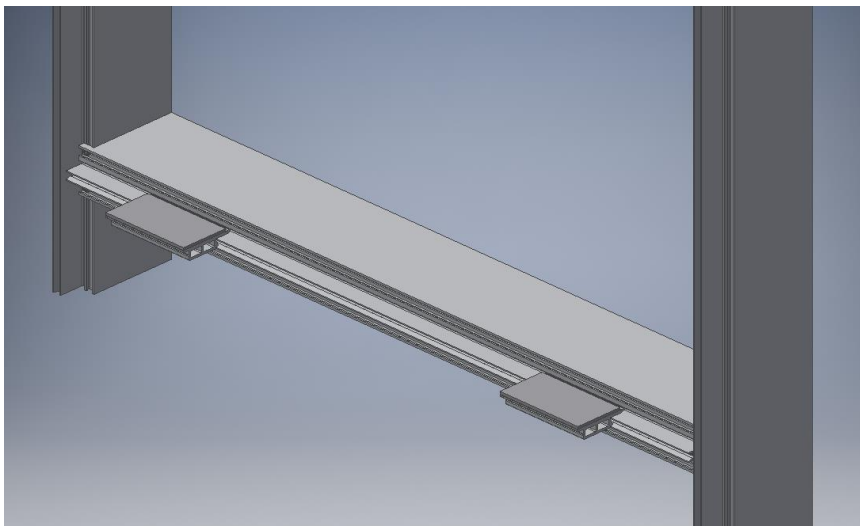
Tässä luvussa kuvataan lasinkannatuksen kehitystyötä. Ensin kerrotaan, miten kehitystyölle asetettiin tavoitteet ja sen jälkeen kuvaillaan suunnitteluvaihetta ja esitellään eri versioiden tietokoneavusteiset mallinnukset.

3.1 Tavoitteenasettelu

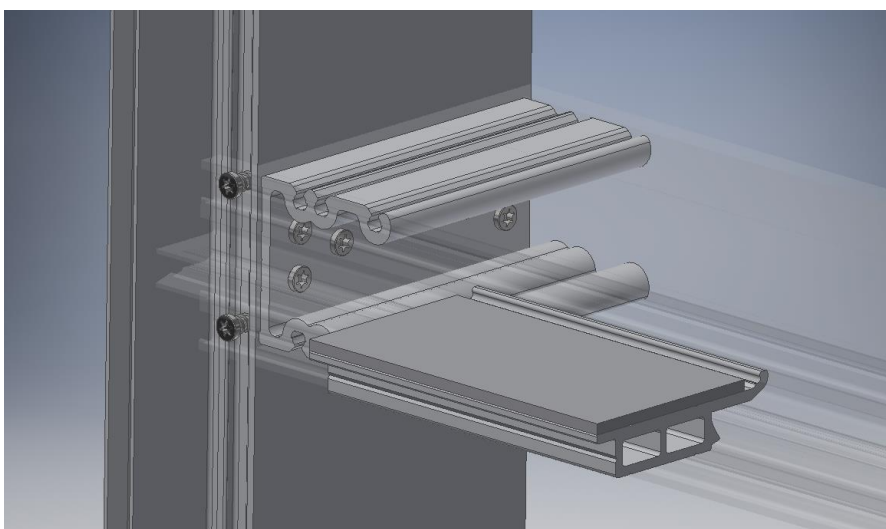
Lasinkannatuksen kehitystyön tavoitteisiin vaikuttivat tilaajan, eli Purso Oy:n vaatimukset ja sitä kautta myös kilpailevien yritysten antamat tiedot vastaavista tuotteista.

3.1.1 Lähtötilanne

P60L julkisivujärjestelmän lasinkannatuksesta on ennen tätä opinnäytetyötä kehitetty kaksi versiota, jotka eroavat lasinkannatinprofiilin suhteen. Opinnäytetyön varsinaisena lähtökohtana on niin sanottu normaali lasinkannatus eli julkisivujärjestelmä, joka nähdään kuvissa 4 ja 5. Kuvassa 5 etualalla nähdään lasinkannatinprofiili ja vaakaprofiili on muutettu läpinäkyväksi. Vaakaprofiili on kiinni pystyprofiilissa liitosprofiilin avulla. Kuten huomataan, tässä versiossa lasinkannatinprofiili on yksinkertainen ja lyhyt, eikä se ole liitoksissa pystyprofiiliin. Vaaka- ja pystyprofiilit on kiinnitetty toisiinsa liitosprofiililla, joka näkyy kuvassa 5 lasinkannatinprofiilin takana.

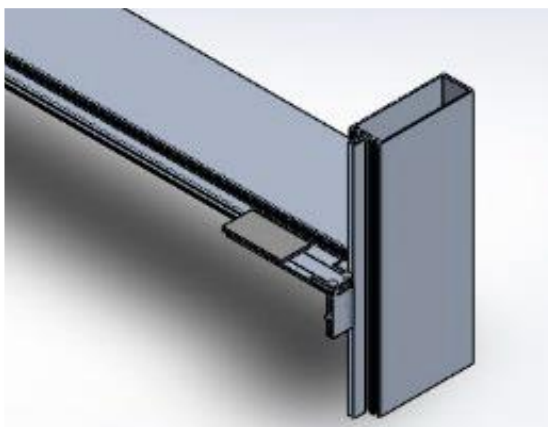


KUVA 4. Kehitettävä julkisivujärjestelmän lasinkannatus



KUVA 5. Lähtötilanne

Lasinkannatuksen toista aiemmin kehitettyä versiota kutsutaan vahvistetuksi lasinkannatukseksi. Kuten kuvasta 6 nähdään, vahvistetussa lasinkannatuksessa lasinkannatinprofiili jatkuu pidemmälle ja on kiinnitetty myös pystyprofiiliin pystysuoralla lisäosalla. Tämä lasinkannatus on todettu kuormitustesteillä kestävämmäksi kuin normaali lasinkannatus, mutta siltäkään ei ole päästy haluttuun tulokseen lasin painon suhteen. Julkisivujärjestelmien tuote-esitteessä on merkitty tämän lasinkannatuksen sallituksi lasin painoksi 400 kg.



KUVA 6. Aiemmin kehitetty, vahvistettu lasinkannatus

3.1.2 Tilaajan vaatimukset

Tilaja eli Purso Oy asetti kehitystyön tavoitteeksi, että lasinkannatus saataisiin kestävämpään samaa tai suurempaa lasin painoa kuin kilpailevien yritysten vastaaville tuotteille on ilmoitettu. Näin saataisiin kasvatettua julkisivujärjestelmän kilpailukykyä. Lisäksi olisi hyvä, että kehitystyössä huomioitaisiin myös lasinkannatuksen kustannusten minimointi.

Kehitystyö aloitettiin etsimällä tietoa kilpailevien yritysten julkisivujärjestelmistä ja lasinkannatusratkaisuksista. Taulukkoon 1 on koottu muutamien kilpailevien yritysten ilmoittamia tietoja. Tiedot ovat julkisesti löydettävissä yritysten omilta kotisivuilta.

TAULUKKO 1. Eri yritysten ilmoittamia tietoja koskien lasinkannatusjärjestelmiä

Yritys	Ilmoitettu lasin paino (kg)
Schüco	1080
Wicona	570
Sapa	800
Aluprof	1100
Hueck	800

On hyvä huomioida, että tiedot eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä ei voida varmuudella tietää, onko jokaisen yrityksen testauksissa noudatettu samoja rajoja esimerkiksi vaakaprofiilin taipuman suhteen.

3.1.3 Asetetut tavoitteet

Lasinkannatuksen kehitystyön tavoitteeksi päädyttiin yhdessä tilaajan kanssa asettamaan, että sen tulisi kestää 800 kg painavaa lasia. Vaikka asetettu tavoite ei ylitäkään kaikkien kilpailevien yritysten ilmoittamia lasin painoarvoja, se tekisi tilaajan mielestä Purson julkisivujärjestelmästä riittävän kilpailukykyisen.

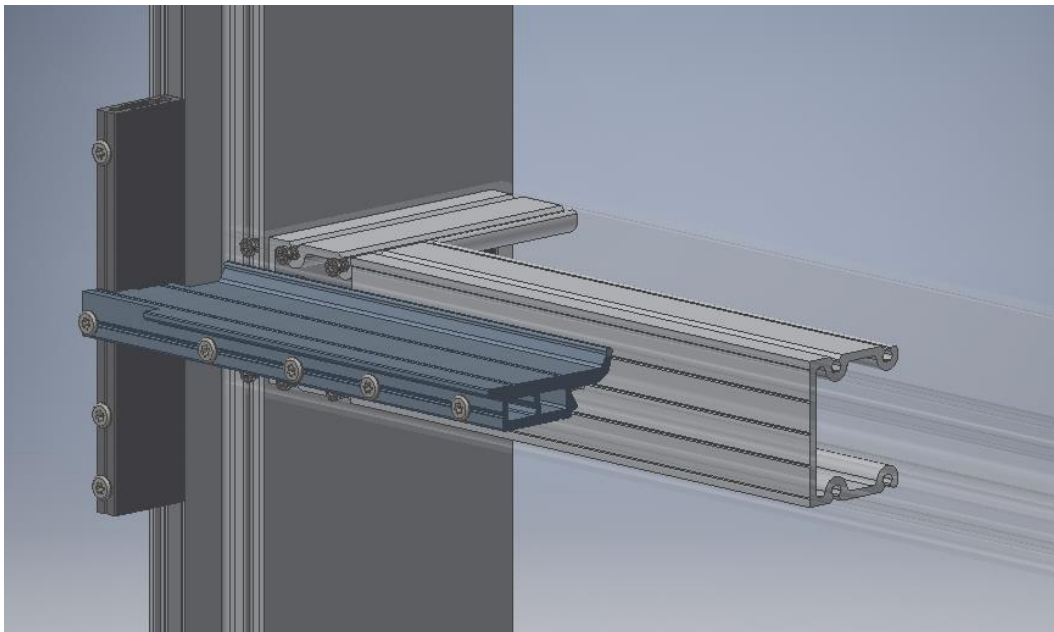
3.2 Mallinnus

Tuotekehitysprosessissa käytetään usein apuna tietokoneavusteista suunnittelua, CAD (Computer Aided Design tai Computer Aided Drafting), joka hyödyntää tietokoneen matemaattista ja graafista mallinnuskykyä (Hietikko 2015b, 139). Tietokoneavusteinen suunnittelu voidaan määrittellä tietokonejärjestelmien käytöksi suunnittelun luomisessa, muokkaamisessa, analysoinnissa tai optimoinnissa (Groover & Zimmers 1984). Tässä työssä käytettiin lasinkannatuksen suunnitteluun ja mallintamiseen Autodesk Inventor -ohjelmistoa. Sen avulla saatiin 3D-mallinnettua kehitettävä lasinkannatusjärjestelmä ja piirrettyä julkisivujärjestelmän prototyypin rakentamiseen tarvittavat koneistuskuvat.

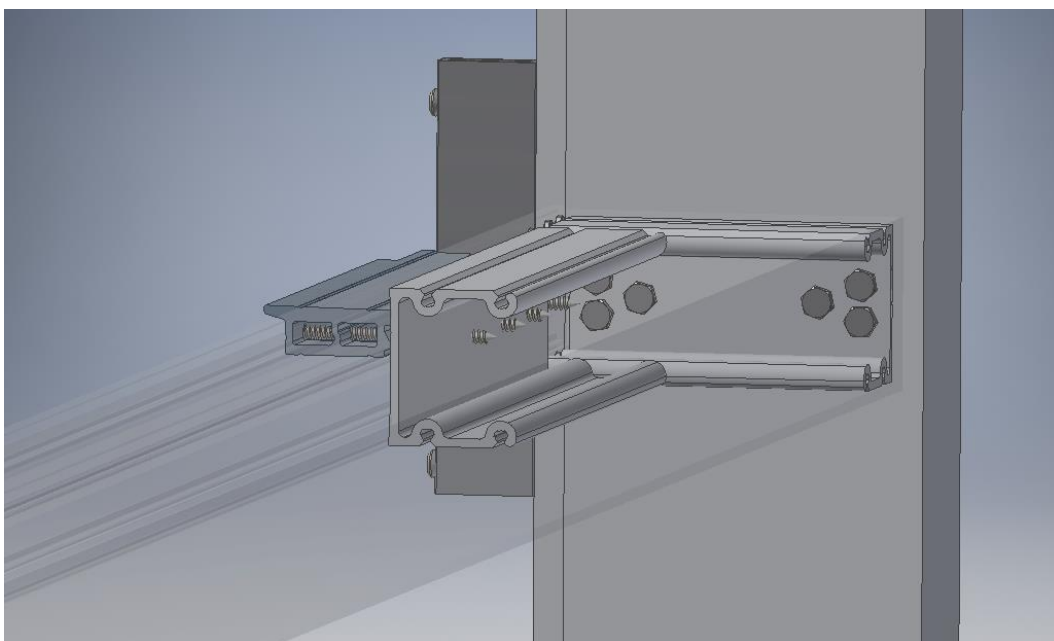
3D-mallin pohjana toimi Purson nykyisen P60L julkisivujärjestelmän Inventor-mallinnus, josta riisuttiin työn kannalta ylimääräiset osat pois. Riisuttu pohja nähdään kuvassa 4. Kehittämisvaiheessa suunniteltiin, miten lasinkannatinprofiilista ja profiilien kiinnityksistä saataisiin muokattua kestävämmät. Suunnittelussa pyrittiin huomioimaan muun muassa aikaisemmat tutkimukset ja omat kokemukset.

Kuvissa 7 ja 8 on Autodesk Inventorilla mallinnettu lasinkannatuksen versio 1. Siinä on pyritty kehittämään lasinkannatusta kestävämmäksi lisäämällä tukirakenteita ja vahvistamalla osien kiinnityksiä esimerkiksi läpipulttauksilla. Lähtötilanteeseen, eli kuviin 4 ja 5 vertaamalla nähdään, millaisia muutoksia on tehty.

Tästä suunnitelmasta piirrettiin koneistuskuvat, joita tarvittiin testattavien prototyyppien rakentamiseen.



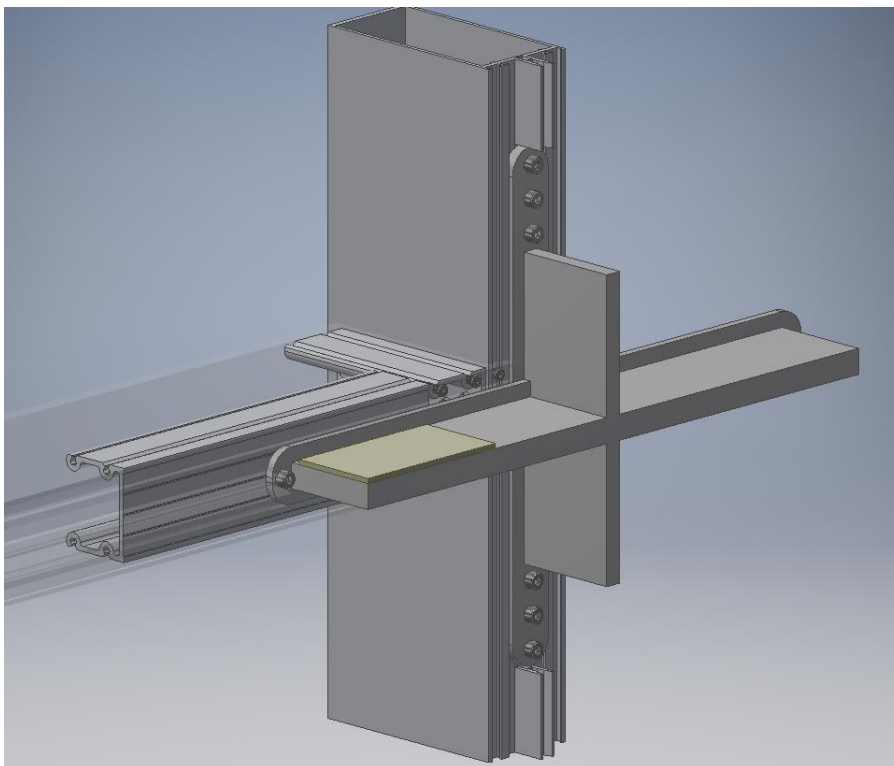
KUVA 7. Version 1 rakenne etupuolelta



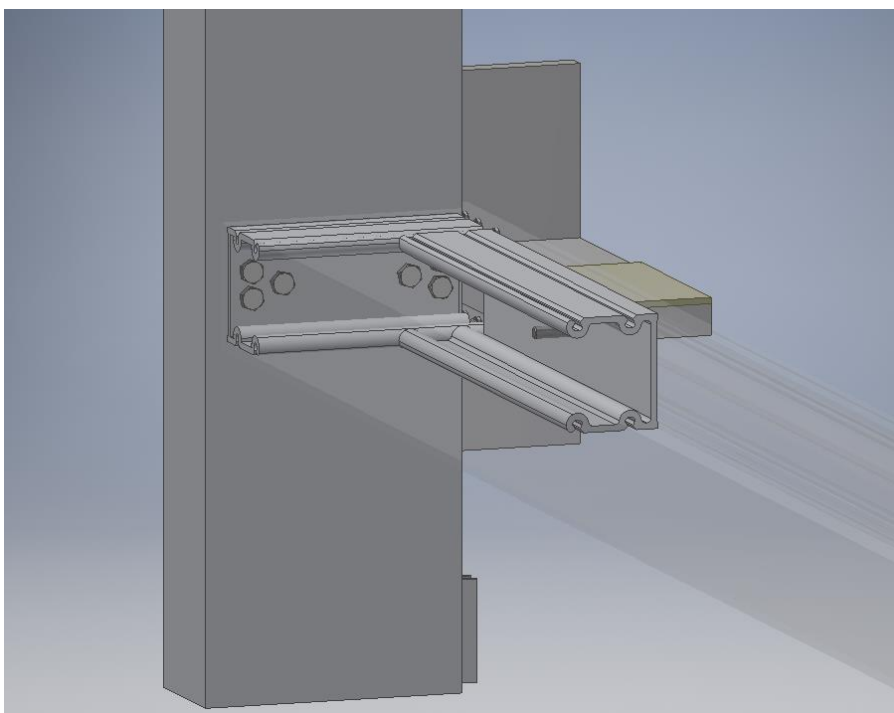
KUVA 8. Version 1 rakenne takaa, vaakaprofiilin sisältä

Versioksi 2 valikoitui teräksinen lasinkannatinprofiili, jonka suunnittelusta on alun perin vastannut Purson rakennusjärjestelmäyksikön tekninen päällikkö Vesa Knuutila. Teräksinen lasinkannatinprofiili on malliltaan risti, eli käytännössä se on suunniteltu siten, että pystyprofiilin molemmille puolille asetetaan lasi. Tässä

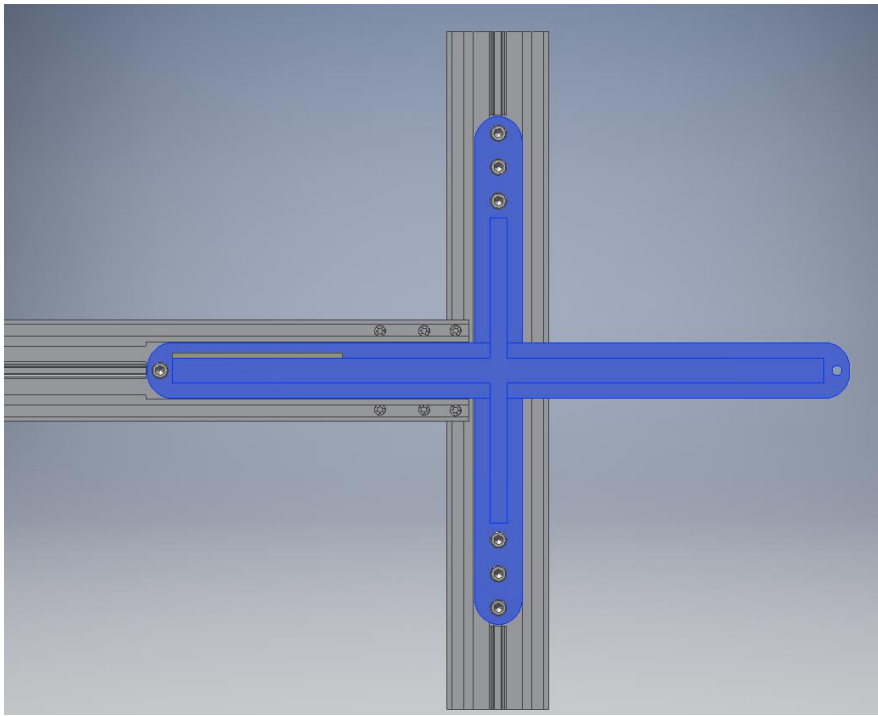
työssä keskitytään kuitenkin tutkimaan vain yhtä puolta. Teräksinen lasinkannatin, eli versio 2 on 3D-mallinnettu Autodesk Inventorilla kuvissa 9, 10 ja 11.



KUVA 9. Version 2 rakenne etupuolelta



KUVA 10. Versio 2 takaa, vaakaprofiilin sisältä



KUVA 11. Teräksinen lasinkannatinprofiili korostettu sinisellä

4 TESTAUS

Seuraavaksi esitellään edellisessä luvussa mallinnettujen versioiden testaukset. Testattavat koekappaleet koostuvat kaksi metriä pitkistä vaakaprofiilista, joka on päistään liitosprofiileilla kiinni katkaistuissa pystyprofiileissa, ja jonka päissä on vahvistetut lasinkannatukset. Versioita testataan FEM-analyysillä ja fyysisillä kuormitustesteillä.

4.1 FEM

4.1.1 Yleistä

Simulointimenetelmien kehittyminen on tuonut mukanaan mahdollisuuksia tuotteen testaamiseen jo suunnitteluvaiheessa. Tässä työssä käytetään tuotteen kestävyuden simulointiin Autodesk Inventor-ohjelmistoa, jonka avulla suoritetaan mallinnetuille koekappaleille FEM-analyysit.

FEM (Finite Element Method tai Finite Element Modeling) on tietokonepohjainen numeerinen tekniikka, joka kiinteisiin mekaanisiin ongelmiin sovellettaessa arvioi jännitys-venymäsuhteen (Soloman 1999). FEM-menetelmällä, eli elementtimenetelmällä, voidaan mallintaa nykypäivänä lähes millainen tahansa kappale, kokonaisuus, materiaaliominaisuus tai kuormitus. Menetelmä on hyvä apuväline muun muassa jännitysten laskemisessa ja lämmönjohtavuuden tutkimisessa. (Hietikko 2015b, 113.)

FEM-analyysissä tutkittava rakenne on jaettu pieniin, hyvin määriteltyihin komponentteihin, joita kutsutaan elementeiksi. Kun rakenteeseen kohdistetaan ulkoista kuormitusta, kaikki elementit muuttavat muotoaan, kunnes systeemi saavuttaa jälleen tasapainon. (Hietikko 2015b, 113 – 114; Soloman 1999.)

FEM-laskenta perustuu siihen, että rakenteen jokaista elementtiä kohden voidaan kirjoittaa tasapainoyhtälöt, jotka yhdistetään yhteensopivuusehtojen avulla

solmupisteissä. Solmupisteiden koordinaattien ja valitun materiaalin ominaisuuksien avulla muodostetaan jäykkyyssmatriisi, joka edelleen yhdistetään kuormitukseen. Näin saadaan selville kunkin solmupisteen siirtymä. Niiden avulla voidaan laskea kappaleessa vaikuttavat jännitykset. (Hietikko 2015b, 113 – 114.)

4.1.2 FEM-analyysi mallinnetuille rakenteille

Julkisivujärjestelmien 3D-mallinnuksen jälkeen voitiin tutkittaville rakenteille suorittaa FEM-analyysit. Inventor sisältää elementtimenetelmään perustuvan analysointityökalun nimeltään Stress Analysis. Se soveltuu hyvin analysointityökaluksi, kun halutaan tutkia kappaleeseen vaikuttavien voimien aiheuttamia taipumia, kuten tässä tutkimuksessa.

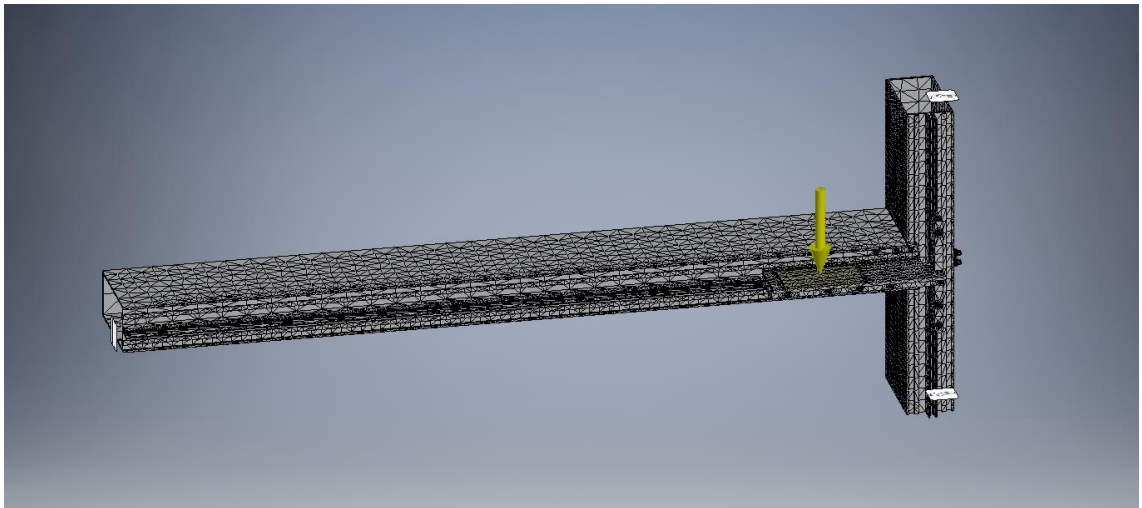
Stress Analysis perustuu elementtiverkkoon ja tarkasteltavien kappaleiden väliin ehtoihin. Lisäksi täytyy määrittää kappaleeseen vaikuttavat voimat ja tuennat. (Lealin 2015.)

Tässä analyysissä hyödynnettiin tutkittavan järjestelmän symmetriaa, eli analyysi suoritettiin puolikkaalle rakenteelle. Tämä voitiin mahdollistaa sillä, että vaakaprofiilin vapaan pään tuentaehdoksi asetettiin ”frictionless constraint” eli kitkaton liitos. Laskennoissa hitsaukset jätettiin huomioimatta ja hitsausaumojen oletettiin olevan materiaaliltaan yhtenäisiä. Pulttauksissa päädyttiin määrittämään liitoksen tyypiksi ”bonded”, mikä voitaisiin suomentaa esimerkiksi sidotuksi liitokseksi. Pystyprofiilin tuentaehtoina käytettiin fixed constrain -ehtoja eli tuennan kaikki vapausasteet oletettiin lukituiksi. Vaakaprofiilin ja pystyprofiilin liitos muutettiin muotoon ”separation”. Tällä haluttiin varmistaa, ettei ohjelma luule vaakaja pystyprofiileita yhtenäiseksi elementiksi, sillä ohjelma tekee elementtijaon automaattisesti. Kuormitus asetettiin kohdistuvaksi lasinkannatinprofiilin muoviseen lasinkannatuskiilaan.

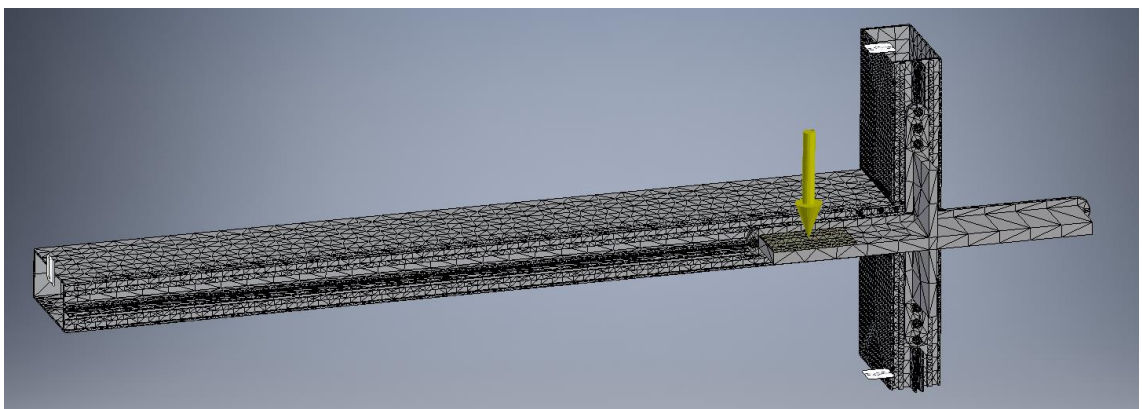
FEM-analyyseilla haluttiin selvittää, paljonko vaakaprofiili tulee taipumaan, jos järjestelmään kohdistuu 800 kilogramman lasin paino. Se vastaa noin 7848 Newtonin pystysuuntaista kuormitusta. Koska lasi asetetaan lasinkannatinprofiilien

muovisten kiilojen päälle, yhteen lasinkannatinprofiliin kohdistuu 3924 N kuormitus. FEM-analyysissä päädyttiin käyttämään pyöristettyä kuormitusta 4000 N.

Elementtiverkko luotiin Inventorin Mesh-työkalulla. Kuvissa 12 ja 13 nähdään testattavien rakenteiden elementtiverkotukset, ja keltainen nuoli kuvaa rakenteeseen kohdistuvaa voimaa. Työkalu myös jakoi tutkittavan rakenteen automaattisesti elementeiksi. Tämän jälkeen voitiin suorittaa analyysi, joka laski, millaiset taipumat elementteihin kuormituksesta aiheutuu ja ilmoitti vaakaprofiilin todennäköisen taipuman millimetreinä. (Lealin 2015.) FEM-analyysien tulokset esitellään luvussa 5.



KUVA 12. Elementtiverkko versiolle 1



KUVA 13. Elementtiverkko versiolle 2

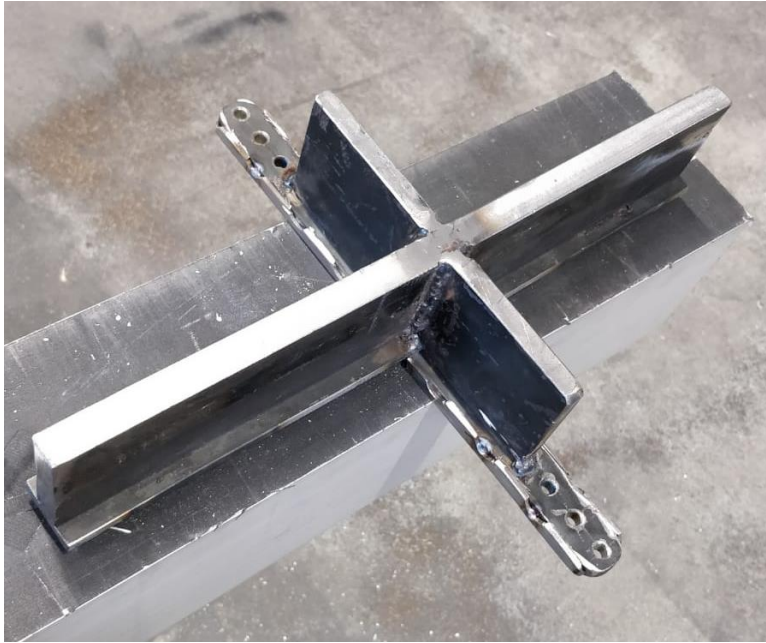
4.2 Fyysiset kuormitusmittaukset

Koekappaleiden fyysiset kuormitustestit oli alun perin tarkoitus suorittaa TAMK:in laboratorioissa, mutta koronaepidemian iskiessä pääsy oppilaitoksen tiloihin estyi. Testaukset päädyttiin siksi suorittamaan Purson omilla mittauslaitteilla protopajalla.

Ensin rakennettiin prototyypit testattavista järjestelmistä koneistuskuvien mukaisesti. Tarvittavat osat tilattiin protopajalle, missä Ari Hakala koneisti profiilit ja auttoi prototyyppien kokoamisessa. Käytössä oli kaksi kahden metrin pituista vaakaprofiilia, joiden päihin asennettiin liitosprofiilien avulla pätkät pystyrunkoprofiileja sekä lasinkannatinprofiilit ja suunnitellut tukirakenteet. Kolmeen pätyyn asennettiin versio 1 ja yhteen pätyyn teräksinen lasinkannatinprofiili (kuva 15), eli versio 2.



KUVA 14. Prototyyppien rakennusta protopajalla



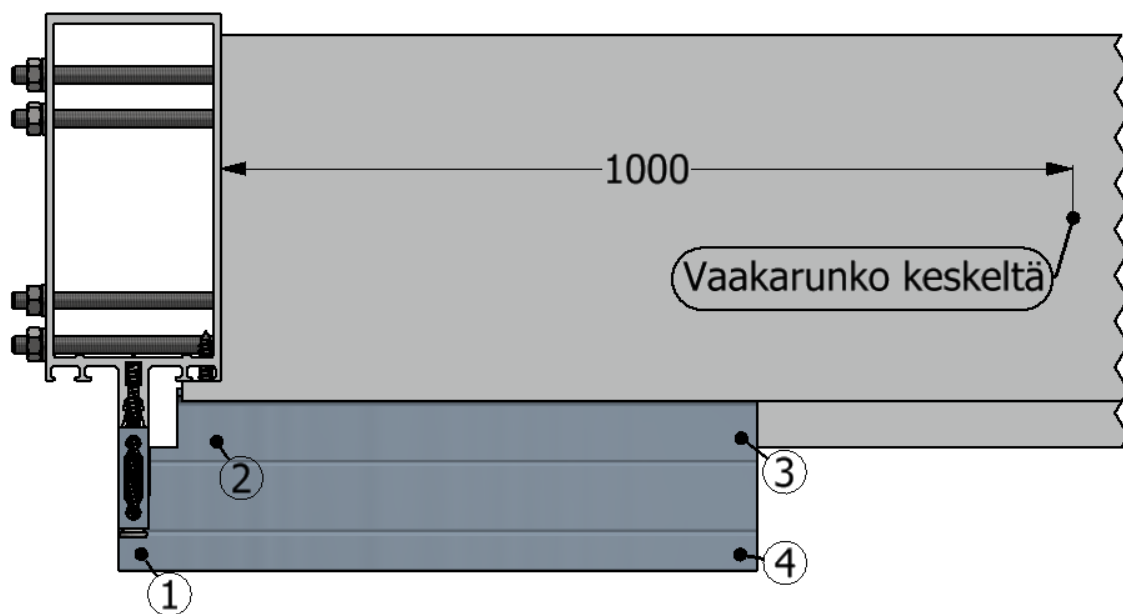
KUVA 15. Teräksinen lasinkannatinprofiili

Koska prototyypeissä oli lasinkannatukset molemmissa päissä, voitiin suorittaa yhteensä neljä eri mittausta siten, että kullakin kerralla tutkittiin järjestelmän yhtä päätä. Kuormituksessa käytettiin kuvassa 16 näkyvää hydrauliprässiä. Hydrauliprässiin kytkettiin Futek-voima-anturi, joka yhdistettiin tietokoneeseen. Voima-anturin kapasiteetti oli 10 000 lb, eli noin 44,5 kN. Tietokoneohjelma, jolla voimaa seurattiin, oli nimeltään SENSIT. Ohjelma ilmoitti prässin voiman kilonewtoneina.



KUVA 16. Testauksissa käytetty hydrauliprässi

Testaukset tehtiin siten, että järjestelmän toinen pää kiinnitettiin prässin alle ja toinen pää tuettiin niin, että vaakaprofiili on täysin vaakatasossa. Koska käytettävissä ei ollut taipuman mittaamiseen tarkoitettuja antureita, taipumat mitattiin manuaalisesti. Lasinkannatinprofiilin taipumista päädyttiin tutkimaan neljästä eri kohdasta kuvan 17 mukaisesti. Lähtötilanne merkittiin asettamalla rautalangasta väännetyt, teroitettut merkkipuikot tarkasti lasinkannatinprofiilin pinnalle, kuten kuvasta 18 nähdään. Kun järjestelmään kohdistettiin kuormitus, muodostunut taipuma mitattiin jokaisen puikon alta tarkasti rakotulkillä (kuva 19). Standardissa ohjeistettiin asettamaan mittausanturit lasinkannatuskiilan pätyihin, mutta tässä tutkimuksessa näin ei voitu menetellä, koska puikkoja ei voitu asettaa siihen kohtaan, mistä järjestelmää kuormitettiin.



KUVA 17. Taipumien mittauspisteet ylhäältä päin katsottuna



KUVA 18. Koeasetelma



KUVA 19. Taipumien mittaamiseen käytetty rakotulkki

Vaakaprofiilin taipuma mitattiin keskeltä vaakaprofiilia, eli metrin päästä päädyistä. Tämä päädyttiin mittaamaan digitaalista työntömittaa hyödyntäen, eli mitan kärki asetettiin nolla-asennossa vaakaprofiilin pintaan ennen kuormitusta ja kun profiili kuormituksen aikana taipui, voitiin kärkeä pidentää siten, että se osui jälleen profiilin pintaan. Kuvassa 20 on havainnollistettu vaakaprofiilin taipuman mittausta. Työntömitta näytti aiheutuneen taipuman 0,01 millimetrin lukematarkkuudella.



KUVA 20. Vaakaprofiilin taipuman mittaustilanne

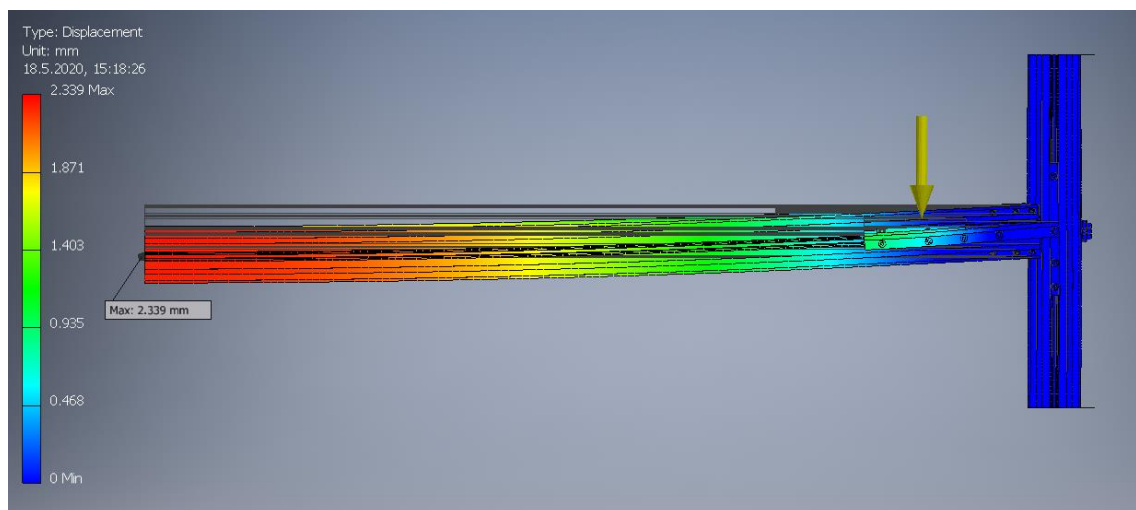
Mittausten tulokset on koottu taulukkoon 2. Koska tavoitteena oli, että järjestelmä kestäisi 800 kg lasia, oli tärkeintä testata, paljonko osat taipuvat kyseisessä tilanteessa. Koska järjestelmä on symmetrinen, kumpaankin päähän kohdistuu ideaalitapauksessa 400 kilogramman paino, eli kun tutkittiin vain yhtä päätä, kohdistettiin hydrauliprässillä järjestelmään noin 3,924 kN voima. Koska SENSIT näytti alkuvoimaksi -0,432 kN, eikä sitä ollut mahdollista nollata, lopullisen kuormituslukeaman oli oltava 3,51 kN, jotta lasinkannatinprofiiliin kohdistuva kuorma olisi 3,924 kN eli 400 kg.

5 TULOKSET

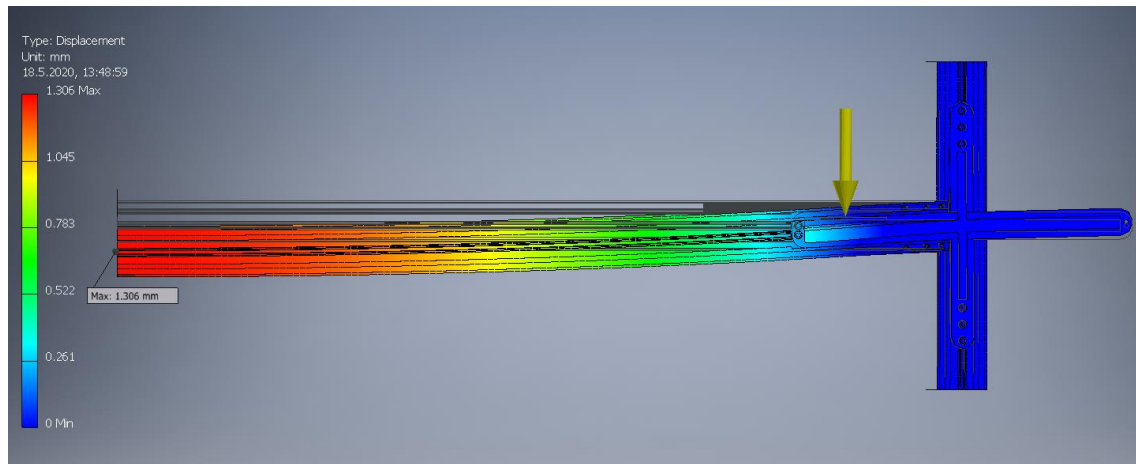
Tässä luvussa käsitellään FEM-analyyseissa ja fyysisissä kuormitustesteissä saatuja tuloksia.

5.1 FEM-analyysin tulokset

Stress Analysis -työkalu antoi testatuille rakennelmille taipumakuvan ja laski, paljonko vaakaprofiili tulee todennäköisesti taipumaan 4000 N kuormituksessa. Tulokset alumiiniselle lasinkannatukselle nähdään kuvassa 21 ja teräksiselle kuvassa 22.



KUVA 21. FEM-analyysi versiolle 1



KUVA 22. FEM-analyysi versiolle 2

FEM-analyysin mukaan käytettäessä versiota 1 vaakaprofiili taipuu keskeltä 2,339 mm ja versiolla 2 vastaava taipuma on 1,306 mm. Kummassakin tapauksessa taipuma näyttäisi siis pysyvän pienempänä kuin 3 mm. Kuvista huomataan lisäksi, että myös lasinkannatinprofiileissa tapahtuu hieman taipumista. Teräksinen lasinkannatus on FEM-analyysin perusteella kestävämpi kuin alumiininen versio.

5.2 Kuormitustestien tulokset

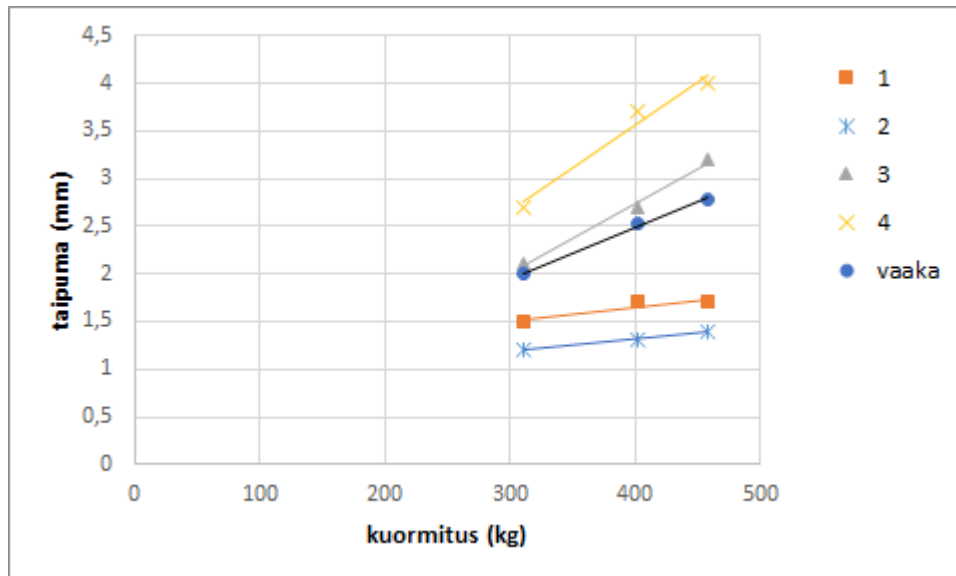
Taulukkoon 2 on koottu fyysisten kuormitusmittausten tulokset. Alkuvoima ja loppuvoima ovat tietokoneohjelman antamat lukemat, joten todellinen kuormitus kilonewtoneina on loppuvoima – alkuvoima, eli esimerkiksi ensimmäisellä rivillä $3,51 \text{ kN} - (-0,432 \text{ kN}) = 3,942 \text{ kN}$. Lopullinen/kg ilmoittaa todellista kuormitusta vastaavan massan kilogrammoina, eli sovelletaan yhtälöä (1). Taipumat 1, 2, 3 ja 4 kertovat mitatut lasinkannatinprofiilin taipumat eri pisteissä, kuten luvussa 4.2 kuvattiin. Vaakaprofiili keskeltä -sarakkeessa ovat vaakaprofiilin taipumat kussakin mittauksessa.

Taulukko 2. Kuormitusmittausten tulokset

	kN	kN	kg	Taipuma/mm				Vaakaprofiili keskeltä
	Alkuvoima	Loppuvoima	Lopullinen/ kg	1	2	3	4	
Runko1 oikea	-0.432	3.51	401.8	2.4	1.5	3	4.6	1.86
Runko1 vasen	-0.432	2.62	311.1	1.5	1.2	2.1	2.7	2
	-0.432	3.505	401.3	1.7	1.3	2.7	3.7	2.52
	-0.432	4.05	456.9	1.7	1.4	3.2	4	2.79
Runko 2 vasen	-0.433	3.508	401.7	0.7	0.6	2	2.7	1.68
Runko 2 oikea teräs	-0.43	2.619	310.8	0.4	0.5	X	2.4	1.6
	-0.43	3.503	400.9	0.6	0.8	X	2.5	2.06
	-0.43	4.506	503.2	1	1.1	X	3.2	2.43
	-0.43	5.012	554.7	1.1	1.1	X	3.5	2.57

Punaisessa ja sinisessä mittauksessa mitattiin taipumat suoraan tavoitekuormituksella, eli noin 400 kg kuormalla. Keltaisissa mittauksissa haluttiin kokeilla mitata taipumat eri suuruisilla kuormituksilla, eli ensin 311,1 kg kuormituksella, sitten tavoitekuormituksella 401,3 kg ja lopuksi vielä tavoitetta suuremmalla kuormituksella 456,9 kg, jotta voidaan vertailla profiilin kestävyyttä eri kuormituksissa. Järjestelmää ei palautettu mittausten välissä lepotilaan. Vihreässä mittauksessa mitattiin version 2 taipumia eri suuruisilla kuormituksilla. Koska huomattiin teräksisen profiilin kestävä alumiinista paremmin, oli mielenkiintoista tutkia taipumia myös yli 500 kg kuormituksissa.

Kuviossa 1 on piirretty kuvaajat keltaisen mittauksen tuloksista eri mittauspisteissä. Kuvaajista nähdään, että eniten taipumaa näyttäisi kohdistuvan lasinkanatinprofiilin pisteeseen 4 ja vähiten pisteeseen 2. Taipumat näyttäisivät myös kasvavan melko lineaarisesti kuormituksen kasvaessa.



KUVIO 1. Keltaisen mittauksen tulokset kuvaajina eri kohdissa mitatuille taipumille

5.2.1 Vaakaprofiilin taipuminen versiolle 1

Tulostaulukon perusteella voidaan vetää johtopäätös, että vaakaprofiilin taipuma ei näyttäisi ylittävän sallittua 3 mm taipumaa 800 kg lasin painolla. Tätä johtopäätöstä vahvistaa se, että 3 mm ei ylittynyt edes, kun keltaisessa mittauksessa lasinkannatusta kuormitettiin 456,9 kg vastaavalla voimalla. Keskiarvoksi vaakaprofiilin taipumalle noin 400 kg kuormitusmittauksista saatiin $(1,85 \text{ mm} + 2,52 \text{ mm} + 1,68 \text{ mm})/3 \approx 2,02 \text{ mm}$.

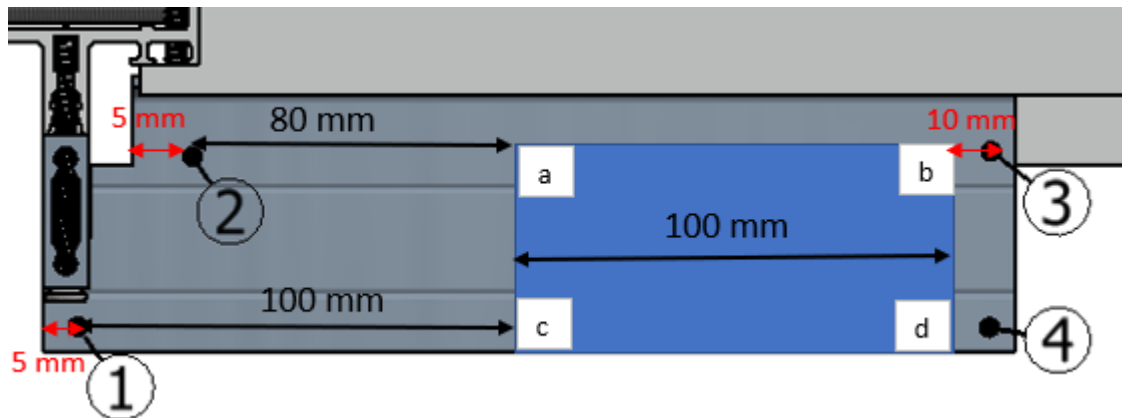
5.2.2 Lasinkannatinprofiilin taipuminen versiolle 1

Eniten taipumaa fyysisissä kuormitustestauksissa aiheutui lasinkannatinprofiilin pisteeseen 4. Keskiarvoksi tälle taipumalle saatiin noin 400 kg kuormituksen mittauksissa $(4,6 \text{ mm} + 3,7 \text{ mm} + 2,7 \text{ mm})/3 \approx 3,7 \text{ mm}$.

Lasinkannatinprofiilin taipumisen osalta standardissa SFS-EN 17146:2019 mainitaan vain, että jos käytetään eristyslasia, on suositeltavaa rajoittaa lasinkannatinprofiilin muodonmuutos siten, että kahden peräkkäisen lasin välinen siirtymä (suorassa kulmassa) on maksimissaan 1 mm (SFS-EN 17146:2019). Tämän

täyttymistä on vaikeaa arvioida, koska lasien välinen etäisyys vaihtelee sen mukaan, millaista lasipakettia käytetään. Yleisimmissä eristyslasipaketeissa on 2 tai 3 peräkkäistä lasia, joten muutos lasinkannatuskiilan matkalla saa olla standardin perusteella 1 tai 2 mm. On myös huomioitava se, että tässä tutkimuksessa käytettiin 50 mm levyistä lasinkannatuskiilaa, mutta kiilan koko vaihtelee lasipaketin paksuuden mukaan.

Arvioidaan seuraavaksi lasinkannatuskiilan kulmiin kohdistuneita taipumia, jotta voitaisiin tutkia, paljonko peräkkäisten lasien välille syntyy muutosta. Käytetään arvioiden laskemisessa hyödyksi kuvan 23 mittoja ja pisteissä 1, 2, 3 ja 4 mitattuja taipumia. Huomioi, että kuvan tehtävä on vain havainnollistaa mittoja ja lasinkannatuskiilan paikkaa, eikä se ole mittakaavassa.



KUVA 23. Lasinkannatuskiilan sijainti

Laskuissa pisteiden a ja b ajatellaan olevan syvyysuunnassa samalla tasolla kuin pisteet 2 ja 3. Pisteiden 2 ja 3 etäisyys lasinkannatinprofiilin vasemmasta reunasta on noin 5 mm, pisteen a etäisyys 85 mm, pisteen b etäisyys 185 mm ja pisteen 3 etäisyys 195 mm. Pisteiden c ja d puolestaan ajatellaan olevan syvyysuunnassa samalla tasolla kuin pisteiden 1 ja 4. Pisteiden 1 ja 4 etäisyys lasinkannatinprofiilin vasemmasta reunasta on 5 mm, pisteen c etäisyys 105 mm, pisteen d etäisyys 205 mm ja pisteen 4 etäisyys 215 mm. Jos oletetaan lasinkannatinprofiilin taipumien kasvavan lineaarisesti vasemmalta oikealle mentäessä, saadaan muodostettua tunnetuista arvoista kaavat, joilla saadaan laskettua arviot taipumille pisteissä a, b, c ja d. Esimerkiksi kuormituksessa 311,1 kg:

Kun pisteistä 2 ja 3 tunnetuille tiedoille muodostetaan kaava Excelin lineaarisella regressiolla, saadaan kaavaksi $y = 0,0047x + 1,1289$, jonka avulla voidaan laskea taipumat kohdissa 85 mm ja 185 mm. Esimerkkinä pisteen a taipuma laskeaan siis $0,0047 \cdot 85 + 1,1289 = 1,5284$ (mm), koska piste a on 85 mm etäisyydellä lasinkannatinprofiilin vasemmasta reunasta. Tiedot on koottu taulukkoon 3.

TAULUKKO 3. Pisteille 2 ja 3 mitatut taipumat ja etäisyyden vasemmasta reunasta sekä näiden tietojen perusteella arvioidut tiedot pisteille a ja b

taipumat a ja b		
	etäisyys reunasta (mm)	taipuma (mm)
piste 2	5	1,2
piste 3	195	2,1
piste a	85	1,5284
piste b	185	1,9984

Vastaavasti voidaan arvioida pisteiden c ja d taipumat 311,1 kg kuormituksella pisteissä 1 ja 4 mitattujen taipumien perusteella. Kaavaksi muodostui lineaarisella regressiolla $y = 0,0057x + 1,4714$. Tiedot on koottu taulukkoon 4.

TAULUKKO 4. Pisteille 1 ja 4 mitatut taipumat ja etäisyyden vasemmasta reunasta sekä näiden tietojen perusteella arvioidut tiedot pisteille c ja d

taipumat c ja d		
	etäisyys reunasta (mm)	Taipuma (mm)
piste 1	5	1,5
piste 4	215	2,7
piste c	105	2,0699
piste d	205	2,6399

Kun on saatu arviot pisteiden a, b, c ja d taipumille, voidaan tutkia kahden peräkkäisen lasin välistä muutosta. Pisteiden a ja c välinen ero on $2,0699 \text{ mm} - 1,5284 \text{ mm} = 0,5415 \text{ mm}$ ja pisteiden b ja d välinen ero $2,6399 \text{ mm} - 1,9984 \text{ mm} = 0,6415 \text{ mm}$. Jos siis tähän 50 mm lasinkannatuskiilalle asetetaan 800 kg painava 2K lasi, muutos kahden peräkkäisen lasin välillä on tämän arvion

mukaan 0,6415 mm. Jos lasketaan tällä tavoin erot kaikille version 1 mittauksille, saadaan taulukko 5.

TAULUKKO 5. Lasinkannatuskiilan pisteiden a ja c sekä b ja d väliset taipumaerot

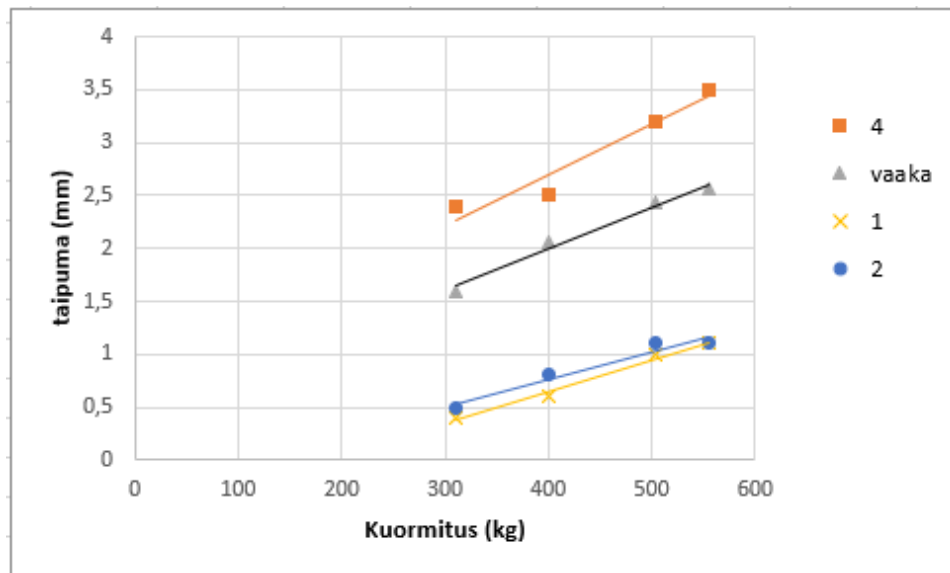
Kuormitus (kg)	pisteiden a ja c ero (mm)	pisteiden b ja d ero (mm)
401,83	1,3181	1,5781
311,11	0,5415	0,6415
401,33	0,7577	0,9677
456,88	0,6401	0,7901
401,73	0,4577	0,6677

Tuloksista huomataan, että punaisella mittauksella lasinkannatinprofiili taipui yllättävän paljon ja sinisellä taas yllättävän vähän. Kuitenkin koska mikään eroista ei ole yli 2 mm, voitaisiin arvioida, että lasina voidaan käyttää 3K lasia, sillä kahden peräkkäisen lasin välinen muodonmuutos suorassa kulmassa ei tällöin ole suurempaa kuin 1 mm. Koska punaisessa mittauksessa erot ylittivät 1 mm rajan, ei näiden tulosten perusteella voitaisi suositella 800 kg painoista 2K lasia. Tulosten luotettavuutta arvioidaan enemmän luvussa 6.

5.2.3 Tulokset versiolle 2

Teräksisen lasinkannattimen tuloksista (taulukko 2) huomataan, että lasinkannatinprofiili taipuu huomattavasti vähemmän kuin alumiininen lasinkannatinprofiili. Lisäksi vaakaprofiilin taipumat pysyivät alle 3 mm vaikka järjestelmää testattiin huomattavasti suuremmillakin kuormituksilla kuin alumiinisia versioita.

Kuvioon 2 on piirretty kuvaajat version 2 mittaustuloksista. Mittauspisteisiin on sovitettu suorat. Kuvasta huomataan, että tälläkin versiolla eniten taipumaa muodostuu kohtaan 4, mutta vähiten kohtaan 1. Teräs on materiaalina kestävämpää kuin alumiini, joten lasinkannatinprofiiliin syntyneet taipumat olivat huomattavasti pienempiä kuin alumiiniseen.



KUVIO 2. Teräsversion tuloksista piirretyt kuvaajat

6 POHDINTAA

Tässä luvussa pohditaan ensin tulosten luotettavuutta ja mahdollisia virhelähteitä. Lopuksi tehdään yhteenveto siitä, miten onnistuttiin kehitystyön tavoitteiden täyttämässä.

6.1 Tulosten luotettavuus ja virhelähteet

Tuloksia tarkastellessa on tärkeää huomioida muun muassa se, että poikkeustilanteen takia kuormitusmittaukset tehtiin Purson protopajalla, eikä siksi käytössä ollut taipumien mittaamiseen tarkoitettuja antureita. Koska taipumien mittaaminen käsin oli paljon työläämpää, mittauskertojen lukumäärä jäi valitettavan vähäiseksi. Poikkeusolojen takia mittausmenetelmissä täytyi käyttää hieman luovuutta ja lasinkannatinprofiilin taipumien tutkintaa ei valitettavasti pystytty toteuttamaan ihan niin relevantisti kuin olisi haluttu.

Pohditaan seuraavaksi tarkemmin, mitkä virhelähteet saattoivat vaikuttaa siihen, että tulostaulukossa nähdään eroja eri mittauskertojen välillä. Se, että prototyyppien välillä on pieniä eroja, on toisaalta luonnollista, sillä julkisivujärjestelmät koostaan käsin. Punaisen ja sinisen mittauksen tulosten erot saattavat johtua muun muassa siitä, että punaisessa mittauksessa vaakaprofiilin molemmissa päissä oli version 1 lasinkannatinprofiili, mutta sinisessä mittauksessa toisessa päässä oli teräksinen, version 2 lasinkannatinprofiili. Voidaankin pohtia, oliko sillä mahdollisesti vaikutusta tuloksiin, että toisessa päässä oli kestävämpi profiili tukemassa vaakaprofiilia.

Toinen mahdollinen virhelähde on pystyprofiilien kiinnitys mittaustilanteessa. Pystyprofiilit pyrittiin tukemaan mahdollisimman hyvin, ettei järjestelmä pääse testauksessa liikkumaan tai kiertymään. Pystyprofiilia ei kuitenkaan välttämättä pystytty testeissä tukemaan yhtä hyvin kuin pystyprofiilit todellisessa, paikalleen asennetussa julkisivujärjestelmässä ovat tuettuina. Ei voida siis varmuudella sanoa, pääsikö järjestelmä mittauksissa kiertymään, mikä aiheuttaisi virhettä muun muassa lasinkannatinprofiilin taipumiin.

Lasinkannatinprofiilin taipumien tutkimisessa olisi saatu varmempia tuloksia, jos käytössä olisi ollut taipuma-antureita. Lisäksi olisi hyvä mitata taipumat suoraan lasinkannatuskiilan nurkista. Lasinkannatinprofiilin taipumia tarkasteltaessa on myös hyvä huomioida, että järjestelmää kuormitettiin lasinkannatinprofiilin reunasta lasinkannatuskiilan kohdalta, eikä tasaisesti koko lasinkannatuskiilan matkalta syvyysuunnassa. Tämän takia lasinkannatinprofiilin piste 4 saattoi taipua enemmän kuin todellisessa kuormituksessa.

Jatkokehityksenä täytyisi tutkia vielä tarkemmin lasinkannatinprofiilin taipumista. Lasinkannatinprofiilin taipumista voitaisiin vähentää käyttämällä entistä paksumpirakenteisia alumiiniprofiileja tai siirtämällä lasinkannatuskiilaa lähemmäs pystyprofiilia. Tällöin kuorma kohdistuisi entistä enemmän pystyprofiileille, jolloin todennäköisesti sekä vaakaprofiili että lasinkannatinprofiili taipuisivat vähemmän. Haittapuolena tällä on kuitenkin se, että mitä kauempana lasinkannatuskiilat ovat toisistaan, sitä suuremmat jännitykset kohdistuvat lasiin. Standardin SFS-EN 12488:2016 mukaan lasinkannatuskiilan etäisyys pystyprofiilista on oltava vähintään 50 mm. Etäisyys on suhteutettava lasin mittoihin ja painoon, joten yleensä se on 80 – 100 mm, kuten tässäkin tutkimuksessa, mutta lasinkannatuskiilan siirtämistä kannattaisi siitä huolimatta vielä tutkia. (SFS-EN 12488:2016.) Toisena jatkokehitysideana olisi hyvä tutkia lasinkannatuksen kustannusten minimointia siten, että kestävyyskyky saadaan pidettyä mahdollisimman hyvänä.

6.2 Tavoitteiden täytyminen

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää julkisivujärjestelmän lasinkannatusta kestävämmäksi. Tavoitteeksi asetettiin 800 kg painavaa lasia kestävä julkisivujärjestelmä. Työn tuloksena saavutettiin tieto siitä, että jos 2 metrin mittaisen vaakaprofiilin sallittu taipuma on 3 mm, molemmat testatut versiot toteuttavat tavoitteen. FEM-analyysien tulokset tukivat fyysisten kuormitusmittausten tuloksia. Opinnäytetyöprojektissa siis löydettiin yritykselle tapoja tehdä lasinkannatuksesta entistä kestävämpi.

Kun lisätutkimuksissa varmistetaan myös lasinkannatinprofiilin kestävydestä, voidaan kehitetyn lasinkannatuksen prototyyppi lähettää viralliselle testaajalle, esimerkiksi Eurofinsille. Virallisissa testeissä tuotteelle varmistetaan standardien täytyminen, minkä jälkeen tuote voidaan ottaa markkinoille.

LÄHTEET

Groover, M. P. & Zimmers, E. W. Jr. 1984. CAD / CAM: Computer-Aided Design and Manufacturing. Department of Industrial Engineering Lehigh University. Prentice-Hall, Inc. USA. Chapter 1, Introduction.

Hietikko, E. 2015a. Palkki, Lujuuslaskennan perusteet, Käytännöllinen opas. Kolmas painos. Helsinki: BoD - Books on Demand.

Hietikko, E. 2015b. Tuotekehitystoiminta. Kolmas painos. Helsinki: BoD - Books on Demand.

Lealin, S. 2015. Stress Analysis, Frame Analysis and Calculation of Metal Structures in Inventor Software. Applied Mechanics and Materials, Vols. 809 – 810. 871 – 877.

Purso Group vahvistaa markkina-asemaansa Euroopassa ostamalla hollantilaisen Nedal Aluminiumin. Ajankohtaista. Purso Oy. Julkaistu 1/2019. Luettu 23.3.2020. <https://purso.fi/fi/yritys/ajankohtaista/purso-group-vahvistaa-markkina-asemaansa-euroopassa-ostamalla-hollantilaisen-nedal-aluminiumin/>

Purso Oy. n.d. Yritys. Luettu 23.3.2020. <https://purso.fi/fi/yritys/>

Purso Oy. 2003. Anodisointi. Esite. Luettu 23.3.2020. https://purso.fi/files/6314/3081/3615/purso_anodisointi_2003_fin.pdf

Purso Oy. 2019. Julkisivujärjestelmät P50L ja P60L. Tuote-esite. Valmistus, myynti ja tekninen neuvonta. Luettu 23.3.2020. https://pursobuilding.fi/files/7315/8228/5922/Purso_P50L_2019-12.pdf.

SFS Suomen Standardisoimisliitto. n.d. Standardien laadinta. Luettu 14.4.2020. https://www.sfs.fi/standardien_laadinta

SFS-EN 12488:2016. Rakennuslasit. Lasitusuositukset. Lasin asennusohjeet pystysuoriin ja kalteviin rakenteisiin. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, Luettu 20.4.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 13830:2015. Julkisivujärjestelmät. Tuotestandardi. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, Luettu 25.5.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

SFS-EN 17146:2019. Determination of the strength of infill supports. Test method and requirements. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS, Luettu 20.4.2020. Vaatii käyttöoikeuden. <https://online.sfs.fi/fi/index.html.stx>

Soloman, S. 1999. Sensors Handbook. Second Edition. The McGraw-Hill Companies, Inc. Computer Design Tools. Chapter 63.2.2 Finite Element Modeling.

Suomen Asiakastieto Oy. Purso Oy, Taloustiedot. Tilikausi 31.12.2018. Luettu 23.3.2020. <https://www.asiakastieto.fi/yritykset/fi/purso-oy/22380411/taloustiedot>

Teknologiateollisuus ry. 2013. Rakenna tulevaisuutta varten – Rakenna alumiinista. Esite. Julkaissut Alumiinituotteet toimialaryhmä, Teknologiateollisuus ry. Käännös GDA:n alkuperäisestä esitteestä An die Zukunft denken – mit Aluminium bauen. Luettu 23.5.2020. https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/file_attachments/jasenet_ryhmat_alumiinituotteet_rakenna_tulevaisuutta_varten.pdf

Tekniikan Kaavasto. 2015. Tammertekniikka, 15. painos. Tampere: Amk-Kustannus Oy.

LIITTEET

Liite 1. Koneistuskuvat

tämä liite on luokiteltu salassa pidettäväksi