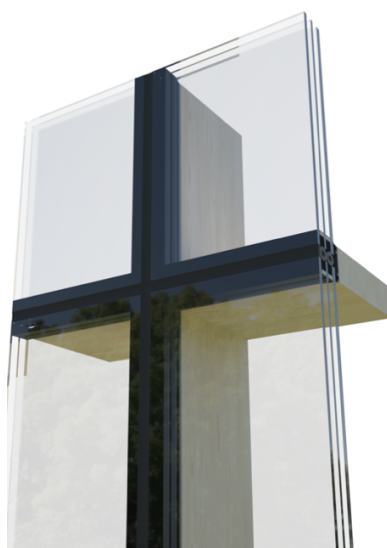




CHALMERS



Evaluering av brandprestanda hos glasfasadsystem

I samråd med *Lindner Scandinavia AB* evalueras glasfasadsystemet *LS3000 Link-Timber*

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

SEBASTIAN BRÅTEN

HARIS GARCEVIC

INSTITUTIONEN FÖR ARKITEKTUR OCH SAMHÄLLSBYGGNADSTEKNIK

AVDELNINGEN FÖR BYGGNADSTEKNOLOGI

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2024

www.chalmers.se

EXAMENSARBETE ACEX20

Evaluering av brandprestanda hos glasfasadssystem
I samråd med *Lindner Scandinavia AB* evalueras
glasfasadsystemet *LS3000 Link-Timber*

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet Samhällsbyggnadsteknik

SEBASTIAN BRÅTEN
HARIS GARCEVIC

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Bråten, S. & Garcevic, H.
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2024

Evaluering av brandprestanda hos glasfasadssystem
I samråd med *Lindner Scandinavia AB* evalueras glasfasadssystemet
LS3000 Link-Timber

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

SEBASTIAN BRÅTEN
HARIS GARCEVIC

© SEBASTIAN BRÅTEN, HARIS GARCEVIC, 2024

Handledare: Amar Talic, Beräkningsingenjör *Lindner Scandinavia AB*

Examinator: Bijan Adl-Zarrabi, Avdelningen för byggnadsteknologi

Examensarbete ACEX20

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Chalmers tekniska högskola 2024

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Avdelningen för byggnadsteknologi

Chalmers tekniska högskola

412 96 Göteborg

Telefon: 031-772 10 00

Omslag:

Glasfasadssystemet *LS3000 Link-Timber*

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik

Göteborg 2024

Evaluering av brandprestanda hos glasfasadssystem
I samråd med *Lindner Scandinavia AB* evalueras glasfasadssystemet
LS3000 Link-Timber

*Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet
Samhällsbyggnadsteknik*

SEBASTIAN BRÅTEN
HARIS GARCEVIC

Institutionen för arkitektur och samhällsbyggnadsteknik
Avdelningen för byggnadsteknologi
Bråten, S. & Garcevic, H.
Chalmers tekniska högskola

SAMMANFATTNING

Att ersätta traditionella aluminium/stål-fasadssystem till glasfasadssystem (Curtain Wall) i limträstomme har blivit allt vanligare. För att glasfasadssystem ska kunna säkerställa säkerhet i en byggnad vid eventuella brandförlopp behöver de utformas och dimensioneras så att de står intakta under en viss tid i enlighet med standarder från Svenska Institutionen för Standarder (SIS).

Det huvudsakliga fokusområdet i denna studie har varit att undersöka brandprestandan och hitta kritiska komponenter hos ett glasfasadssystem. Glasfasadssystemet *LS3000 Link-Timber* har utvärderats i samråd med *Lindner Scandinavia AB*. Företaget vill certifiera glasfasadssystemet med en brandklassning *EI30* som ska behålla täthet och isolering under en period om 30 minuter.

Arbetet inleddes genom inhämtning av tidigare resultat och slutsatser från brandklassningsförsök och undersökningar av brandprestanda hos glasfasadskomponenter. Vidare inhämtades relevant information från *SS-EN 1363-1*, *SS-EN 1364-3* och *SS-EN 13501-2* som ligger till grund för förhållanden som glasfasadssystemet prövas mot i de numeriska analyserna. De numeriska analyserna består av termiska och strukturella simuleringar där resultaten utvärderas mot respektive materials specifika egenskaper vid förhöjda temperaturer.

Resultaten från de numeriska analyserna i denna studie visade på att systemet i dess nuvarande utformning inte lever upp till de krav som ställs för brandklassning både gällande det termiska och strukturella beteendet. Analyserna indikerade om en tidig degradation av glasfasadssystemet och framför allt de strukturella komponenterna. Som en åtgärd till detta föreslås designförslag som eventuellt kan leda till att glasfasadssystemet kan nå en framtida önskad brandklassning.

Nyckelord: *Glasfasadssystem (Curtain Wall), Svenska Institutionen för Standarder (SIS), brandklassning, isolering (I), täthet (E)*

Evaluation of Fire Performance of Glass Facade Systems
In collaboration with *Lindner Scandinavia AB*, the curtain wall
LS3000 Link-Timber is evaluated.

*Degree Project in the Engineering Programme
Civil and Environment Engineering*

SEBASTIAN BRÅTEN
HARIS GARCEVIC

Department of Architecture and Civil Engineering
Division of Building Technology
Bråten, S. & Garcevic, H.
Chalmers University of Technology

ABSTRACT

Replacing traditional aluminum/steel facade systems with curtain walls in glulam structures has become increasingly common. To ensure safety in a building during potential fire incidents, curtain walls need to be designed and dimensioned to remain intact for a certain period in accordance with standards from the Swedish Institute for Standards (SIS).

The main focus of this study has been to investigate the fire performance and identify critical components of a curtain wall. The *LS3000 Link-Timber* curtain wall has been evaluated in consultation with *Lindner Scandinavia AB*. The company aims to certify the curtain wall with a fire rating of EI30, which should maintain integrity and insulation for a period of 30 minutes.

The work began by gathering previous results and conclusions from fire rating tests and investigations of the fire performance of curtain wall components. Additionally, relevant information was obtained from *SS-EN 1363-1*, *SS-EN 1364-3*, and *SS-EN 13501-2*, which form the basis for the conditions against which the curtain wall is tested in the numerical analyses. The numerical analyses consist of thermal and structural simulations where the results are evaluated against the specific properties of each material at elevated temperatures.

The results of the numerical analyses in this study showed that the curtain wall, in its current design, does not meet the requirements for fire rating in terms of both thermal and structural behavior. The analyses indicated early degradation of the curtain wall and primarily the structural components. As a measure to address this, design proposals are suggested that could potentially lead to the curtain wall achieving the desired fire rating in the future.

Key words: *Curtain wall, Swedish Institute for Standards (SIS),
fire performance, integrity (E), insulation (I)*

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

SAMMANFATTNING	I
ABSTRACT	II
INNEHÅLLSFÖRTECKNING	III
FÖRORD	V
1. INLEDNING	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Frågeställning	1
1.4 Metod	2
1.5 Avgränsning	2
2. LITTERATURSTUDIE	3
2.1 Generellt om glasfasadssystem	3
2.2 Kritiska komponenter i glasfasadssystem utsatta för brand	3
2.3 Storlekens betydelse på testexemplar vid brandprovning	6
2.4 Brandskyddsglas i glasfasadssystem	7
2.5 Brandprestanda hos trä	7
3. LS3000 LINK-TIMBER	9
3.1 Ingående komponenter	10
4. BRANDPROVNING ENLIGT SVENSK STANDARD	11
4.1 Regler och krav på testexemplar enligt SS-EN 1364–3:2014	11
4.2 Allmänna krav på testmiljö enligt SS-EN 1363–1:2020	13
4.3 Brandklassning enligt SS-EN 13501–2:2023	14
4.3.1 Bedömning av täthet (<i>E</i>)	14
4.3.2 Bedömning av isolering (<i>I</i>)	14
5. MATERIALEGENSKAPER VID FÖRHÖJDA TEMPERATURER	16
5.1 Termiska egenskaper	16
5.1.1 Aluminium	16
5.1.2 Limträ	17
5.1.3 Silica Aerogel	18
5.1.4 Luftfickor	18
5.1.5 Övriga material	18
5.2 Mekaniska egenskaper	19
5.2.1 Aluminium	19
5.2.2 Rostfritt stål	21
6. NUMERISK ANALYS	24

6.1	<i>Modeller</i>	24
6.1.1	Geometri vid termisk analys	24
6.1.2	Geometri vid strukturell analys	24
6.2	<i>Termiska randvillkor</i>	26
6.2.1	Konvektion	27
6.2.1.1	Värmeöverföringskoefficienten	28
6.2.2	Strålning	28
6.2.3	Omgivande temperatur	29
6.3	<i>Strukturella randvillkor</i>	29
6.3.1	Dimensionerande last och yttre randvillkor	29
6.3.2	Kontaktytor	30
6.3.3	Brottvillkor vid Finita Element-Metoder	30
7.	RESULTAT	31
7.1	<i>Termisk analys (Steady State Thermal)</i>	31
7.1.1	Termiska resultat vid 5 minuters brandexponering, 576 °C	31
7.1.2	Termiska resultat vid 30 minuters brandexponering, 842 °C	33
7.1.3	Analys av termiska resultat	35
7.2	<i>Strukturell analys (Static Structural Analysis)</i>	36
7.2.1	Strukturella resultat vid <1 minuts brandexponering, 300 °C	36
7.2.2	Strukturella resultat vid 1 minuts brandexponering, 350 °C	37
7.2.3	Analys av strukturella resultat	37
8.	DISKUSSION	39
9.	DESIGNFÖRSLAG	41
9.1	<i>Första förslaget</i>	41
9.2	<i>Andra förslaget</i>	41
9.3	<i>Konsekvenser av förslag</i>	42
10.	VIDARE STUDIER	43
	LITTERATURFÖRTECKNING	45
	APPENDIX I	48
	APPENDIX II	50

FÖRORD

Denna studie är resultatet av ett examensarbete på högskoleingenjörsprogrammet i samhällsbyggnadsteknik vid Chalmers tekniska högskola som omfattar 15 högskolepoäng.

Frågeställningen i studien är framtagen i samråd med *Lindner Scandinavia AB* som besitter en gedigen expertis inom fasad- och konstruktionslösningar.

Vi vill rikta ett stort tack till våra handledare Amar Talic och Magnus Strand som bidragit med värdefulla insikter, kunskaper och vägledning under genomförandet av arbetet. Vidare vill vi också tacka företaget för chansen att utföra ett examensarbete i samråd med de och hoppas studien ska kunna bidra till värdefull information för en framtida brandklassad glasfasadlösning.

Slutligen vill vi tacka Bijan Adl-Zarrabi för hans tid som examinator till detta examensarbete.

Göteborg, maj 2024
Sebastian Bråten
Haris Garcevic

1. INLEDNING

Detta kapitel har i huvudsaklig uppgift att introducera vad rapporten ska behandla, vilket innehåll som är relevant för att genomföra studien, vilka avgränsningar som gäller samt vilka metoder som ska tillämpas för att besvara frågeställningen.

1.1 Bakgrund

Samhällsbyggnadssektorn står för närmare 22 procent av Sveriges utsläpp av växthusgaserna och är därmed en av de mest utsläppsintensiva sektorerna i Sverige (Boverket, 2024). En omställningsfas har initierats inom byggsektorn där potentiella lösningar undersöks med syftet att minska utsläppsnivåerna genom att ersätta de traditionella byggnadsmaterialen betong och stål mot mer klimatsmarta alternativ som trä. Det anses vara fördelaktigt att använda trä som byggnadsmaterial eftersom det bland annat har möjlighet att binda koldioxid och agera cirkulärt (Svenskt trä, u.d.). Denna studie görs i samråd med *Lindner Scandinavia* som är ett nordiskt dotterbolag till den internationella organisationen *Lindner Group* och är specialister inom interiöra samt exteriöra konstruktionslösningar. De tillverkar och utvecklar glasfasadssystem efter önskemål från kund som är anpassningsbara mot varje enskilt projekt där de har möjlighet att möta eventuella komplexa byggnadslösningar. Företaget är starkt bidragande i utvecklingen av klimatsmarta glasfasadssystem med fokus på trä där marknaden historiskt dominerats av glasfasadssystem i aluminium och stål, men där efterfrågan av trä nu blivit märkbart större.

För ett glasfasadssystem som enligt normer är klimatsmart men också kan nå en brandklassning är vikten av material, dimensioner och utformning fundamentala. Det blir allt vanligare att bygga på höjden och framför allt förses byggnader med glasfasadssystem där säkerhet är en viktig faktor (Sędlak, Sulik, & Garbacz, 2022). Säkerhet i byggnader kan definieras på en rad olika sätt, ett exempel på detta är att byggnadsdelar certifieras med en brandklassning där de under en avsedd tid bibehåller bärförmåga, isolering eller täthet. En komplex utmaning är brandklassning av glasfasadssystem vars primära syfte är att bidra med ett stort ljusinsläpp samtidigt som det har ett lågt U-värde. En brandklassning bedöms i enlighet med relevanta normer för respektive byggnadsdel där krav, förutsättningar och testet beskrivs i detalj.

Denna studie kommer undersöka om glasfasadssystemet *LS3000 Link-Timber* kan nå en brandklassning och identifiera kritiska punkter samt utvärdera eventuella svagheter gällande de mekaniska och termiska egenskaperna hos de ingående komponenterna.

1.2 Syfte

Syftet med denna studie är att i samverkan med *Lindner Scandinavia AB* undersöka om glasfasadssystemet *LS3000 Link-Timber* kan nå en brandklassning om 30 minuter kopplat till täthet (E) och isolering (I), samt identifiera och analysera kritiska strukturella komponenter.

1.3 Frågeställning

Den huvudsakliga frågeställningen som studien kommer att besvara är om glasfasadssystemet *LS3000 Link-Timber* kan nå en brandklassning på *EI30* som avser täthet (E) och isolering (I)? Och om inte, identifiera varför.

1.4 Metod

Inhämtning av information för rapporten genomförs genom en litteraturstudie med avsikten att sammanställa relevant information från tidigare forskning, studier och standarder ur Svenska Institutionen för Standarder (SIS). Informationen inhämtas genom databaser (*Scopus*, *Google Scholar & SIS*) ur Chalmers tekniska högskolas bibliotek och granskas kritiskt för att säkerställa dess trovärdighet samt att den utvärderas noggrant för att undersöka om och hur den kan användas i denna studie.

Studien behandlar brandsimuleringar med hjälp av programvaror som tillhandahålls från *Lindner Scandinavia AB* och utför analyser med Finita Element-Metoder (FEM). Den programvara som använts för numerisk analys är *Ansys*.

1.5 Avgränsning

Glasfasaden *LS3000 Link-Timber* är en komplex lösning där flera faktorer kan påverka dess brandprestanda. Med avseende på studiens omfattning kommer fokus läggas på ett vanligt förekommande snitt i glasfasadsystemet samt inte behandla vissa aspekter och delar av glasfasadsystemet med lika stor noggrannhet. De aspekter som denna studie främst avgränsas ifrån är:

- Förkolningsprocessens påverkan på de mekaniska egenskaperna hos *Limträ*.
- Implementation av brandreaktivt svällande gel då materialegenskaper inte kunnat erhållas från leverantörer.
- Numeriska analyser på golv- och vägganslutningar som skall inkluderas i en brandprovning.
- Numeriska analyser av designförslag.

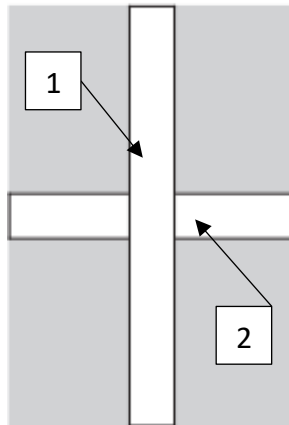
2. LITTERATURSTUDIE

I detta kapitel kommer tidigare forskning inom relevant ämnesområde att presenteras med syftet att undersöka eventuella studier där glasfasadssystem under brandförhållanden utvärderas.

2.1 Generellt om glasfasadssystem

LS3000 Link-Timber går under kategorin *curtain walling* (glasfasader) enligt SS-EN 13830 (2020) vilket är en typ av fasadsystem som branschmässigt är väldigt vanlig. Ett typiskt glasfasadssystem är inte delaktigt i att bära eller fördela laster i byggnaden utan är i stället en icke-bärande fasadlösning som sitter ansluten utanpå byggnaden.

Vanligtvis består den av vertikala och horisontella strukturella profiler som avgränsar och ansluter de olika glaspartierna. Dessa kallas *mullions* och *transoms* och skall endast vara bärande mot de bestående delarna i glasfasadsystemet (Sulik, Kinowski, & Sędlak, 2015). Profilerna består vanligtvis av materialen aluminium, stål och trä.



Figur 1. Figuren är hämtad från [SS-EN 1364-3:2014: Provnings av brandmotstånd – Icke bärande byggnadsdelar – Del 3: Glasfasader – Kompletta utförande] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar en typisk anslutning mellan mullion(1) och transom(2).

Vidare anser Sulik et al. (2015) att glasfasadssystem vid eventuella bränder bör utformas på ett sådant sätt att det skall förhindra spridning av branden internt, externt och mot närliggande byggnader samt tillåta en säker evakuering.

Kraven kommer vanligtvis från europeiska standarder och dess brandprestanda mäts oftast i anslutning med de bärande byggnadskomponenterna, dock så kan individuella komponenter ha en betydligt viktigare roll vid en brand, exempelvis typ av material, storleksordning samt placering (Sulik, Kinowski, & Sędlak, 2015). Sulik et al. (2015) menar på att glasfasadsystemet bör vara dimensionerat i enlighet med relevanta brandstandarder där glasfasaden skall vara intakt under en specifik tidsperiod för att kunna säkerställa en viss grad av säkerhet.

2.2 Kritiska komponenter i glasfasadssystem utsatta för brand

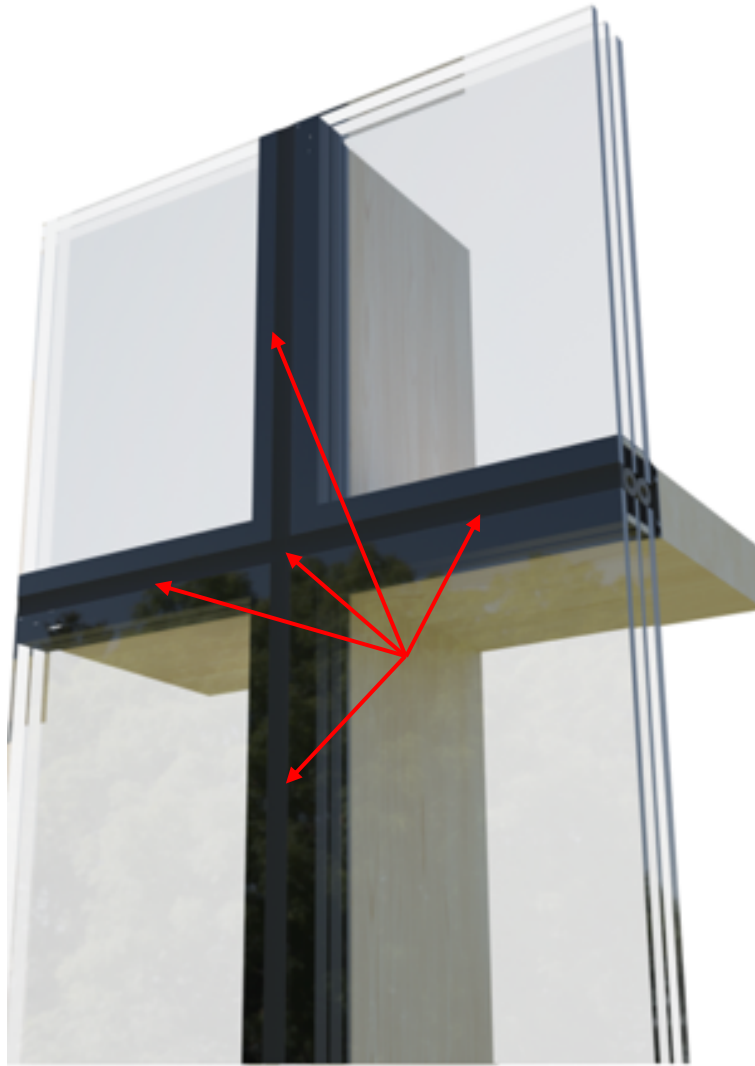
Ett glasfasadssystem är en komplext sammansatt typ av fasad med en mängd olika material i konstruktionen. Därav är det viktigt att kunna analysera beteendet hos olika komponenter och deras påverkan på varandra under brandexponering.

Sulik et al. (2016) har utfört en studie som strävar efter att hitta vart de högsta temperaturerna uppträder på den icke exponerade sidan av ett typiskt glasfasadssystem. Han menar att den

vanligaste strukturen på ett brandklassificerat glasfasadssystem består av en lastbärande stomme gjord av stål eller aluminium. Gällande glaset så ska det dominerande valet vara en typ av brandskyddsglas med ett inkorporerat gel som sväller upp vid särskilt höga temperaturer. Detta gel har som funktion att motverka brandens transmission genom goda termiska materialegenskaper.

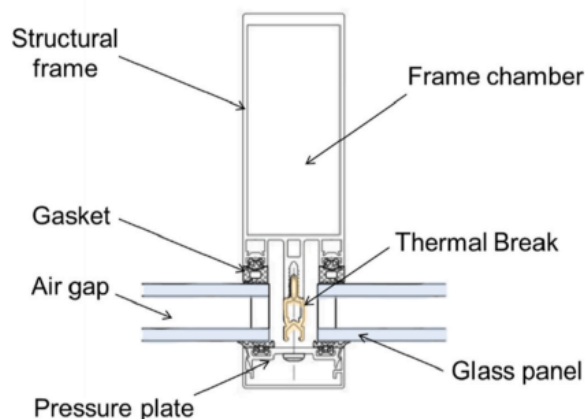
För att uppnå en viss brandklassning så behövs en brandprovning genomföras på ett testexemplar av glasfasaden i enlighet med EN 1364–3 (2014). Standarden specificerar i detalj hur testet skall utföras för att i slutändan ha möjligheten att uppnå en viss klassificering. En central del av testet kopplat till testexemplarets termiska isolering, *I*, är mätandet av temperaturstigning vilket görs med hjälp av specifikt utplacerade sensorer på den motstående sidan av testexemplaret.

Sulik et al. (2016) har enligt EN 1364–3 (2014) utfört en mängd test på typiska glasfasadssystem som utformats i olika dimensioner, och därefter analyserat resultaten i hopp om att identifiera gemensamma svaga punkter i testexemplaren. De visar en tydlig gemensam nämnare i att de punkterna som är mest utsatta för höga temperaturer hittas i anslutningarna av glaspartierna. Dessa består i hans testexemplar av vertikala och horisontella profiler i aluminium som avgränsar glaset från varandra. Se Figur 2 för motsvarande punkter på *LS3000 Link-Timber*.



Figur 2. Motsvarande kritiska punkter illustrerat på LS3000 Link-Timber.

Fortsättningsvis så hänvisar Lugaresi et al. (2023) till olyckor orsakat av brand där delar av glasfasaden fallit mot marken från höga höjder och därmed riskerat liv för fotgängare på marknivå. I och med den aktuella trenden att bygga högt i glasfasadssystem så är relevansen för termisk respons vid brandexponering i dessa system och dess samverkande komponenter extra relevant idag. I hennes termiska simuleringar används geometrin i Figur 3 där den bärande stommen av aluminium ("Structural frame" enligt Figur 3) tillsammans med *gasket*-komponenterna identifieras som särskilt intressanta.



Figur 3. En illustration av ingående komponenter i hänvisad studie av ett glasfasadssystem med aluminiumstomme. (Lugaresi, Sędlak, Kotsovionos, & Rein, 2023).

En central del i analysen av en brandexponerad glasfasad är de enskilda materialens förmåga att leda värme (Lugaresi, Sędlak, Kotsovionos, & Rein, 2023). Aluminium är ett material som ofta används som bärande stomme, men kan också hittas i anslutningarna som håller ihop hela strukturen i mindre geometrier. Materialet har en karakteristik med hög värmekonduktivitet och en låg kritisk temperatur på omkring 600 °C och presterar därmed i relation till exempelvis stål sämre i ett brandlastfall.

Enligt Lugaresi et al. (2023) så är även de gummibestående komponenterna *gaskets* värda att studera där dess främsta funktion är att separera och därmed motverka kollisioner mellan stomme och glasparti. Vid utförda brandtester på ett typiskt glasfasadssystem så antändes båda *gasket*-komponenterna och började smälta redan efter 10 minuters brandexponering. Trots den lilla massan i relation till hela glasfasadssystemet så kan denna process vara kritisk då det öppnar vägen för varm brandrök och gas att tränga igenom konstruktionen i deras frånvaro.

En eventuell genomträngande brandrök eller gas kan ha stor inverkan på temperaturökningen på den icke brandexponerade sidan av glasfasaden, vilket kan innebära försämrade resultat i ett brandklassningstest i enlighet med EN 1364–3 (2014).

Vidare relevanta resultat som Lugaresi et al. (2023) redovisar i studien är det material i hela glasfasadssystemet som har störst påverkan på den generella termiska responsen vid brandexponering. Hon menar att ett byte av stommateriäl bör ha störst termisk påverkan på den exponerade sidan där exempelvis ett byte till stål borde resultera i ett starkare brandmotstånd.

2.3 Storlekens betydelse på testexemplar vid brandprovning

Det blir allt vanligare att bygga på höjden vilket leder att dimensioner av diverse byggnadsdelar ökar (Sędlak, Sulik, & Garbacz, 2022). Sędlak et al. (2022) undersöker glasfasader med bärande profiler av aluminium och anser att brandklassningsförsök på testexemplar som utformas efter standardmått enligt teststandarden 1364–3 (2014), 3 meter i bredd och höjd i högsta grad är direkt applicerbart på dimensioner som överstiger detta en aning men att man bör undersöka hur detta appliceras på betydligt större dimensioner i praktiken med olika strukturella lösningar.

Sędlak et al. (2022) undersökte testexemplar med en bredd om 3 meter men med en höjd om 6 meter och kunde verifiera att för dimensioner som överstiger de standardmått som anges enligt EN 1364-3 (2014) krävs ingen ytterligare verifiering.

Vidare anser Sędlak et al. (2022) att profilens styvhet blir avgörande då en glasfasad blir utsatt för en brand oavsett skala på testexemplaret. Brandklassningsförsöken som utförts i studien avser inte bärförmåga utan man undersöker endast täthet (*E*) och isolering (*I*). Detta verifierades genom att testexemplaren testades med och utan förstärkta aluminiumprofiler där resultaten tydligt indikerade en markant förbättring av strukturell prestation från de förstärkta aluminiumprofilerna vid ett brandförlopp (Sędlak, Sulik, & Garbacz, 2022).

2.4 Brandskyddsglas i glasfasadsystem

En viktig komponent för ett glasfasadsystem är glaset och systemet kan bestå av olika glaskonfigurationer som bidrar med karakteristiker av olika slag. Generellt brukar glaslösningar bestå av en, två eller treglasfönster där glaset kan tillgodoses med diverse kemiska tillsatser som kan bidra till en högre brandprestanda vid eventuella bränder. Enligt Bai et al. (2020) kategoriseras glaset generellt utifrån Klass *A*, *B* och *C* där *A* är den klass som anses ha relevanta förutsättningar för att uppnå önskad isolering och -integritetsprestanda (*EI30*) som behandlas i denna studie.

Syftet med brandskyddsglas är att minska spridningen av branden, agera isolerande samt skydda människor som befinner sig i byggnaderna (Bai, Zengtao, Lei, & Baofang, 2020). Obehandlat glas spricker vid betydligt lägre temperaturer och blir därför en direkt fara för människor och dess omgivning. Som en åtgärd kan man då behandla glaset för att det skall kunna anses vara brandskyddsglas av något slag. För att ett glasfasadsystem ska kunna möta kraven från teststandardEN 1364–3 (2014) behöver det bestå av något sorts brandskyddsglas.

Brandskyddsglas består generellt av olika sammansättningar, men en vanlig metod är där en aktiv gel placeras mellan glaset, vilket vid en tillräckligt hög temperatur genomgår en endotermisk-reaktion (upptagning av omgivande värme), expanderar och agerar som ett effektivt isolerande skikt (Bai, Zengtao, Lei, & Baofang, 2020). Vidare så anser Bai et al. (2020) att trots glasets mjukningspunkt omkring 800 °C så spricker det betydligt tidigare på grund av spänningar som uppstår vid en brandexponering.

Slutligen anser Bai et al. (2020) att även om ett glasfasadsystem består av ett brandskyddsglas så är dess förmåga att behålla täthet (*E*) och isolering (*I*) vid ett brandförlopp under riskzonen då fördelarna hos brandskyddsglaset snabbt förloras vid en tidigare kollaps av de strukturella komponenterna.

2.5 Brandprestanda hos trä

En avgörande faktor för träs brandegenskaper är val av trä. Träsorter tenderar att prestera olika bra vilket beror på åtskiljande materialegenskaper där framför allt densiteten skiljer sig åt. Vid antändning av trä skapas ett ytligt kollager som agerar retarderande och skyddar insidan av träet mot syret vilket kan leda till att bärförmågan bibehålls under en längre tid vid ett brandlastfall. Träsorter med en högre densitet skapar ett tjockare kollager vilket agerar som bättre skydd (Zang, o.a., 2024).

En annan fundamental faktor är en brandskyddsbeklädnad av någon form som kan appliceras på träet och agerar som värmeretardant och kan minska värmespridning och antändningsrisken med cirka 72 procent (Zang, o.a., 2024).

Efter en brand då byggnaden befinner sig i nedkylningsprocessen så är kollapsrisken för byggnadsdelar i trä med tillhörande anslutningar som befinner sig mellan 100–300 °C högre än vid en fullt utlöst brand (Horne, Abu, Palermo, & Moss, 2023). Enligt författarna kan detta innebära att en eventuell kollaps vid en nedsläckt brand inte kan uteslutas helt eftersom den interna temperaturen hos materialen är av stor vikt.

Träkonstruktioners bärande byggnadsdelar består oftast av anslutningar i stål, med en högre värmeledningsförmåga än träet i sig (Horne, Abu, Palermo, & Moss, 2023). Det innebär att anslutningen bidrar till en högre intern temperatur hos de bärande byggnadsdelarna vilket resulterar i att en lägre bärförmåga kan nås i ett tidigare skede.

3. LS3000 LINK-TIMBER

LS3000-Link är glasningssystemet och kan appliceras på olika bärsystem som exempelvis trä, stål, aluminium och komposit. Denna studie fokuserar på anslutning mot limträ och skall undersöka möjligheten för glasfasadsystemet *LS3000 Link-Timber* att uppnå en önskad brandklassning på *EI30* vid en intern brandexponering enligt EN 1364-3 (2014).

Glasfasadsystemet har en möjlighet att erbjuda flexibla lösningar då det kan utformas fritt mot önskad design eftersom det monteras på plats till skillnad från förmonterade modulfasader.

Glasfasadsystemet består av en tre-glaskonfiguration, där dessa hålls ihop av aluminiumprofiler med tillhörande skruvar. Systemet hålls därtill vädertätt med hjälp av en yttre fog i silikon, se Figur 4 för en vy inifrån.



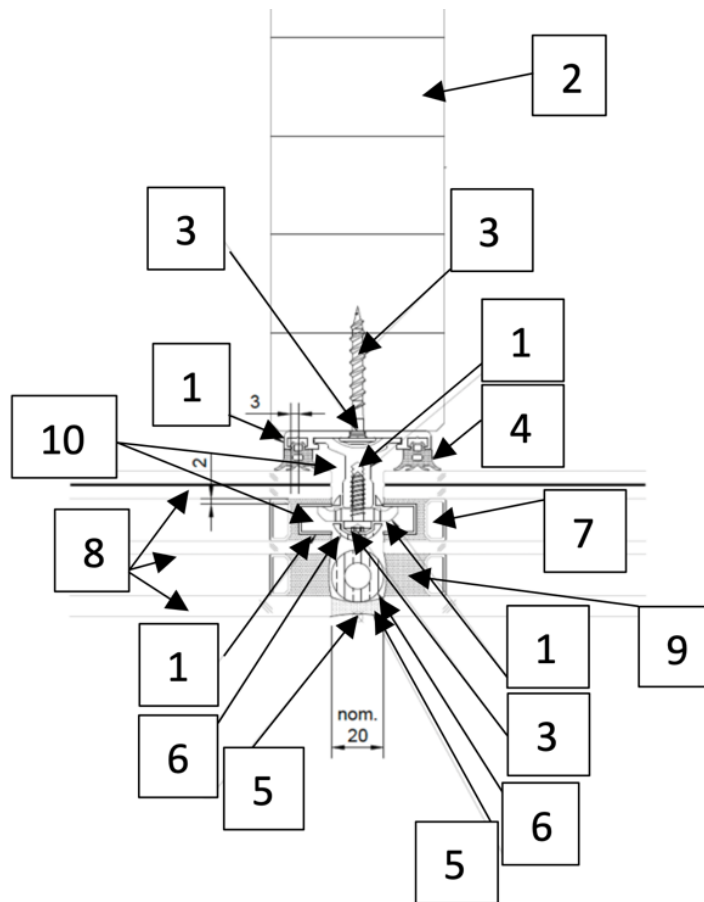
Figur 4. *LS3000 Link-Timber*, vy från insidan: Hämtad från Lindner Scandinavia AB
https://linscan.se/sv/Referenser/Aker_Tech/

3.1 Ingående komponenter

I denna studie kommer ett snitt enligt Figur 5 användas i de senare numeriska analyserna där nedanstående tabell presenterar de komponenter samt material som ingår i glasfasadsystemet LS3000 Link-Timber:

Tabell 1. Tabellen visar de ingående materialen i glasfasadsystemet LS3000 Link-Timber samt komponentnummer enligt Figur 5.

Nummer	Typ	Material (Komponent)
	Bärande	
1		Aluminium
2		Limträ
3		Rostfritt stål
	Isolerande & Tätande	
4		EPDM (gaskets)
5		Silikon
6		Polyeten
7		Styrenakrylnitrilharts (Spacer)
8		Glas
9		Polysulfid
10	Luftficka	-



Figur 5. Illustration av ett snitt i glasfasadsystemet LS3000 Link-Timber med ingående komponenter som används i denna studie.

4. BRANDPROVNING ENLIGT SVENSK STANDARD

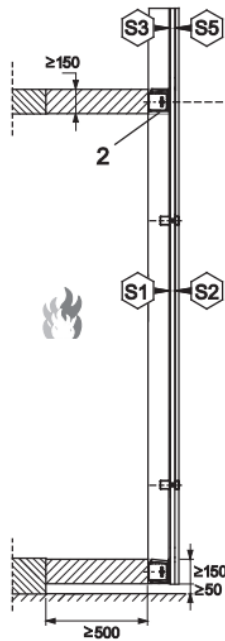
4.1 Regler och krav på testexemplar enligt SS-EN 1364-3:2014

Enligt SS-EN 1364-3 (2014) med titeln ”*Provning av brandmotstånd - Icke bärande byggnadsdelar – Del 3: Glasfasader - Kompletta utförande*” är syftet med denna standard att ingående beskriva och reglera brandprovningens processen specifikt för glasfasader. Standarden syftar till att beskriva två olika brandscenarion där brandexponering kan ske mot glasfasadens insida eller utsida där denna studie kommer att fokusera på en exponerad insida. Vidare beskriver SS-EN 1364-3 (2014) tillåtna geometriska lösningar, dimensioner, anslutningar till provningsugnen, - samt placeringar av temperatursensorer.

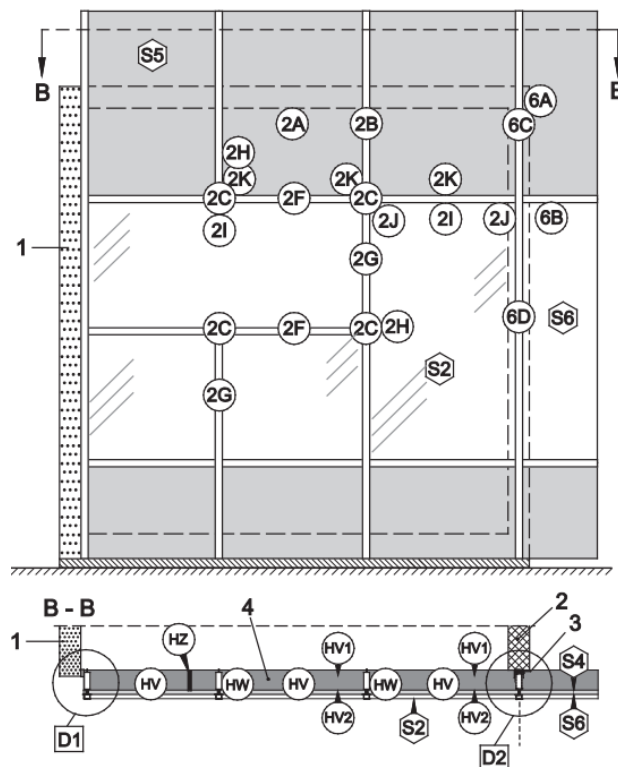
Fortsättningsvis enligt SS-EN 1364-3 (2014) så får testexemplarets brandutsatta bredd och höjd inte underskrida 3x3 meter. Testexemplaret tillåts heller inte få strukturellt stöd underifrån, därav sätts ett krav på minst 50 mm mellan testexemplarets lägsta punkt ned till marken eller annat som kan agera som strukturellt stöd, se Figur 6.

Vidare så beskriver SS-EN 1364-3 (2014) skillnader på vad som måste inkluderas i ett testexemplar beroende på om insidan eller utsidan av glasfasaden är brandexponerad. En brandprovning på ett testexemplar för intern exponering kommer att behöva inkludera hela glasfasadsystemet. Det innebär att den bärande limträstommen, samt anslutningar mot golv och väggar som överensstämmer med hur systemet används i praktiken, kommer behöva vara en del av testexemplaret.

Se Figur 6 och 7 för illustrationer på hur ett typiskt standardiserat test mot intern exponering är utformat enligt SS-EN 1364-3 (2014). Bjälklagen som testexemplaret ansluts mot skall likväl anslutas mot ugnen där minsta tillåtna längd och tjocklek är 500 respektive 150 mm. En del av testexemplaret fortsätter utanför ugnen för att simulera en fortsatt kontinuerlig konstruktion och förtätas för att hålla branden innanför. Sensorerna mäter temperaturer utöver hela testexemplaret, och främst på den icke exponerade sidans ytor med undantaget på de delar som ligger utanför ugnens dimensioner där även sensorer på motsatt sida placeras. Fortsättningsvis så inkluderas både landskaps, - och porträttglas för att ha möjlighet att implementera båda i praktiken vid en lyckad brandprovning.



Figur 6. Figuren är hämtad från [SS-EN 1364-3:2014: Provnig av brandmotstånd – Icke bärande byggnadsdelar – Del 3: Glasfasader – Komplet utförande] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar ett standardiserat testexemplar med vy från sidan av ugnen.



Figur 7. Figuren är hämtad från [SS-EN 1364-3:2014: Provnig av brandmotstånd – Icke bärande byggnadsdelar – Del 3: Glasfasader – Komplet utförande] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar ett standardiserat testexemplar med vy framför ugnen.

4.2 Allmänna krav på testmiljö enligt SS-EN 1363–1:2020

Gällande ugnens testmiljö så skall den enligt SS-EN 1364–3 (2014) överensstämma och följa de krav och riktlinjer som anges i den relaterade standarden för mer allmänna krav SS-EN 1363–1 (2020).

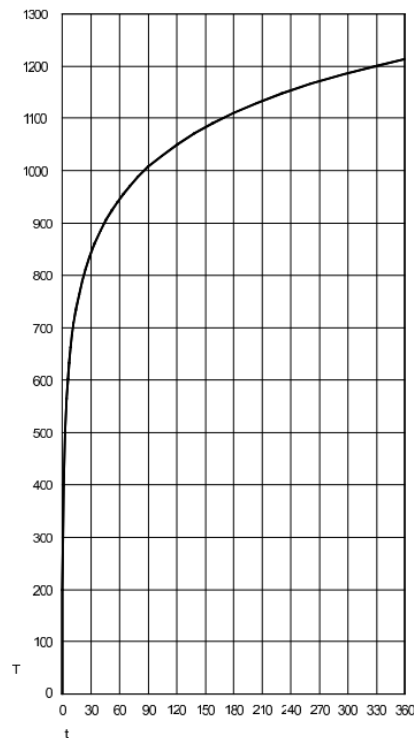
Första kravet är att medeltemperaturen i ugnen skall kunna hanteras så att den följer förhållandet givet av standardbrandkurvan:

$$T = 345 \log_{10}(8t + 1) + 20 \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (1)$$

Där: T = ugnens medeltemperatur $[^{\circ}\text{C}]$

t = tid $[\text{min}]$

Det relevanta tidsintervallet för denna studie är främst mellan 0–30 minuter, där medeltemperaturen vid 30 minuter når 842 °C. Ekvation (1) beskriver vad som kallas standardbrandkurvan och visar temperatur som funktion av tid, se Figur 8. Enligt SS-EN 1363–1 (2020) och SS-EN 1991-1-2 (2002) kan detta förhållande användas vid brandprovning respektive simuleringar av ett brandlastfall.



Figur 8. Figuren är hämtad från [SS-EN 1363–1: Provnings av brandmotstånd – Del 1: Allmänna krav] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se.
Figuren visar standardbrandkurvan.

Enligt SS-EN 1363–1 (2020) så skall även omgivande temperatur i laboratorielokalen ligga mellan 10°C och 40°C när testet startas. Den mäts ett par meter ifrån testexemplarets icke exponerade sida och kontrolleras under testets gång sådan att den inte ökar eller minskar med 20°C respektive 10°C i förhållande till den ursprungliga temperaturen.

4.3 Brandklassning enligt SS-EN 13501–2:2023

Enligt SS-EN 13501–2 (2023) är syftet med standarden att klargöra hur brandklassningsprocessen ska genomföras av olika byggnadsdelar och konstruktionslösningar. Den bistår med information om krav, tillvägagångssätt och slutlig klassificering utifrån relevanta bedömningsområden. I denna studie kommer glasfasaden främst bedömas mot täthet (*E*) och isolering (*I*).

4.3.1 Bedömning av täthet (*E*)

Enligt SS-EN 13501–2 (2023) så mäts en byggnadsdels täthet (*E*) genom att studera dess förmåga att förhindra en eventuell brand att tränga igenom till motsatt sida. Vid genomträngning av lågor och/eller varm brandrök, kan antändning ske på insidan av den brandseparerande byggnadsdelen, samt anslutande material till den.

Kapitlet som behandlar klassificering för glasfasader i SS-EN 13501–2 (2023) beskriver att bedömningsprocessen gällande täthet (*E*) beror på följande aspekter:

- Eventuella sprickor och öppningar.
- Eventuella lågor på den sida av glasfasaden som ej är exponerad.
- Eventuell antändning av en bomullstuss.

Gällande kontrollen av testexemplarets eventuella sprickor så mäts detta genom att använda sig av ett specifikt verktyg som kallas *gap gauge* enligt SS-EN 1363-1 (2020). Två olika tjocklekar på 6 och 25 mm används i testet och förs in i eventuella sprickor på testexemplaret i ugnens riktning.

Den förstnämnda på 6 mm anses på ett lyckat sätt ha penetrerat testexemplaret om den kan föras in i en öppning i ugnens riktning, och med en längd på 150 mm. Den med 25 mm:s tjocklek anses på ett lyckat sätt ha penetrerat testexemplaret om den endast kan föras in i en öppning i ugnens riktning. Om något av dessa scenarion uppstår så skall tid och plats för detta dokumenteras, vilket är avgörande för slutlig klassificering enligt SS-EN 1363–1 (2020).

Vidare så skall eventuella lågor som dyker upp på den ej exponerade sidan dokumenteras med tid och plats likt fallet för sprickor, men dessutom under hur lång de uppträder i enlighet med SS-EN 1363–1 (2020).

Slutligen gällande tätheten, så placeras en bomullstuss mot alla ytor av testexemplaret på den icke exponerade sidan i max 30 sekunder, eller till dess att den tar eld. Vid antändning dokumenteras tid och plats likt de två tidigare fallen i enlighet med SS-EN 1363–1 (2020). Viktigt att notera är att bomullstussen skall placeras utmed testexemplaret utan hänsyn till eventuella sprickor och genomträngning av varma gaser.

4.3.2 Bedömning av isolering (*I*)

Gällande en byggnadsdels termiska isolering (*I*) så studeras i stället dess förmåga att motstå genomträngning av brand genom värmeöverföring i enlighet med SS-EN 13501–2 (2023). Risk för antändning på den icke exponerade sidan uppstår vid höga temperaturer då värme överförs från den exponerade sidan.

Enligt SS-EN 13501–2 (2023) så kommer testexemplaret utvärderas utifrån medelvärdet på temperaturökningen både som ett medelvärde över hela testexemplaret, och ett momentant maxvärde som kan uppstå på vilken plats som helst, på den sida som ej är exponerad av

brand. Gränsvärdena som därefter bestämmer resultatet på systemets termiska isolering, I , är följande:

- $\Delta T_{medel} < 140$ °C från den ursprungliga medeltemperaturen på den sida av testexemplaret som ej är exponerad.
- $\Delta T_{max} < 180$ °C från den ursprungliga medeltemperaturen på den sida som ej är exponerad, mäts momentant.

Enligt SS-EN 1363–1 (2020) så finns inga specifika krav gällande den initiala medeltemperaturen på testexemplaret som man mäter temperaturökningarna ifrån, där och väljs därmed som den aktuella temperaturen vid testets start.

5. MATERIALEGENSKAPER VID FÖRHÖJDA TEMPERATURER

Detta kapitel kommer presentera de termiska och mekaniska egenskaperna som används i respektive FE-analyser. Egenskaperna hämtas från standarder som tar hänsyn till hur egenskaperna förändras vid förhöjda temperaturer. Dessa egenskaper kommer sedan appliceras i *Ansys* där termiska och strukturella beteenden studeras för kritiska temperaturintervall.

Gällande de termiska egenskaperna så har den temperaturberoende materialegenskapen värmekonduktivitet hämtats ur tillhörande Eurokoder för trä (SS-EN 1995-1-2 (2004)) och aluminium (SS-EN 1999-1-2 (2007)). Temperaturberoende materialegenskaper för resten av materialen har antagits konstanta då leverantörer för dessa produkter inte kunnat bistå med dessa egenskaper tillsammans med att studien har avgränsats. Därför har resterande nödvändiga termiska materialegenskaper tagits ur EN ISO 10456 (2007) som gäller för normala temperaturer.

Gällande de mekaniska egenskaperna för aluminium och rostfritt stål så har bi-linjära grafer på spänning-töjningssambanden vid förhöjda temperaturer tagits fram med hjälp av SS-EN 1999-1-1 (2007) och SS-EN 1993-1-2 (2005). Dessa har använts i de strukturella FE-analyserna för respektive material där syftet främst varit att förenkla simuleringar som utförs i *Ansys*.

5.1 Termiska egenskaper

5.1.1 Aluminium

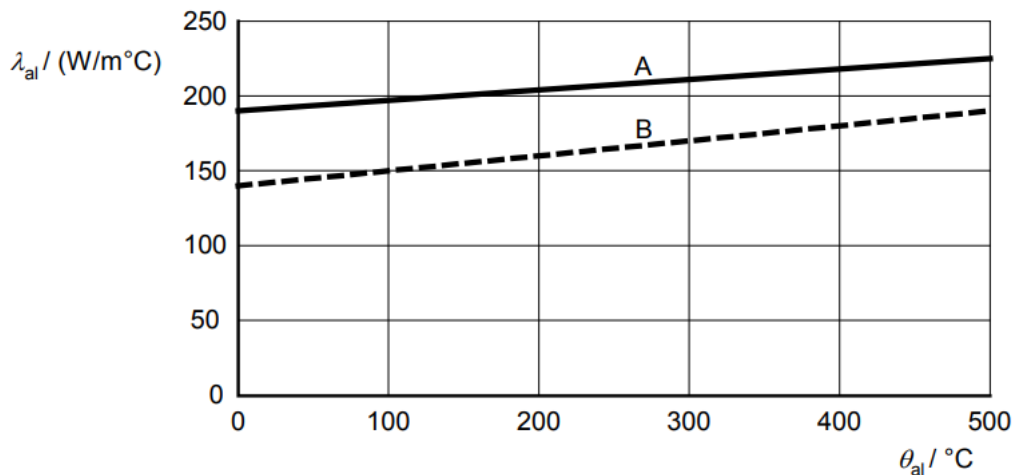
Vid förhöjda temperaturer så förändras aluminiumets materialegenskaper markant. Glasfasadsystemets nuvarande aluminiumprofiler med legering och härdning *EN AW-6063 T66* tillhör serien 6xxx. I enlighet med SS-EN 1999-1-2 (2007) förändras värmekonduktiviteten som funktion av temperatur hos aluminium genom följande förhållande:

$$\lambda_{al} = 0,07 * \theta_{al} + 190 \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}] \quad (3)$$

Tabell 2. Sambandet mellan värmekonduktiviteten och temperatur för aluminium.

Temperatur [°C]	Värmekonduktiviteten, λ_{al} [W/m°C]
0	190
100	197
200	204
300	211
400	218
500	225

Där linje A i Figur 9 grafiskt visar hur värmekonduktiviteten förändras vid förhöjd temperatur för *EN AW-6063 T66*.



Figur 9. Figuren är hämtad från [SS-EN 1999-1-2:2007: Eurokod 9: Dimensionering av aluminiumkonstruktioner – Del 1-2: Brandteknisk dimensionering] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar värmekonduktiviteten för aluminium som funktion av temperatur.

Där. λ_{al} är värmekonduktiviteten [W/m°C]

θ_{al} är temperaturen i aluminiumet [°C].

Ekvationen gäller för följande temperaturintervall:

$$0\text{ °C} < \theta_{al} < 500\text{ °C}$$

En slutlig notering är att smältpunkten för denna legering ligger mellan 615–655 °C (Alumeco, u.å.).

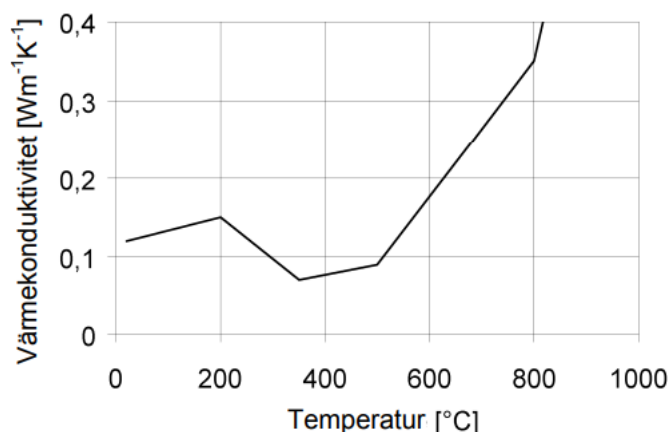
5.1.2 Limträ

I enlighet med SS-EN 1995-1-2 (2004) förändras värden på värmekonduktiviteten för trä och förkolnat trä vid förhöjda temperaturer. Bilaga B i standarden tar hänsyn till standardbrandförlopp.

Enligt SS-EN 1995-1-2 (2004) kan värmekonduktiviteten hos kolskiktet anses vara effektivt där hänsyn tas till eventuell ökad värmeöverföring över 500 °C på grund av krympsprickor, samt över 1000 °C då kollagret antas försvinna. Tabellen nedan visar sambandet mellan värmekonduktiviteten och temperatur för trä och det förkolade skiktet. I Figur 10 visas sambandet grafiskt.

Tabell 3. Sambandet mellan värmekonduktiviteten och temperatur för trä och det förkolade skiktet.

Temperatur [°C]	Värmekonduktivitet λ [W/m°C]
20	0,12
200	0,15
350	0,07
500	0,09
800	0,35
1200	1,50



Figur 10. Figuren är hämtad från [SS-EN 1995-1-2:2004: Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner – Del 1–2: Allmänt – Brandteknisk dimensionering] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar sambandet mellan värmekonduktivitet och temperatur för trä och det förkolade skiktet.

5.1.3 Silica Aerogel

Då materialegenskaper från ett genomskinligt reaktivt brandgel som skummar i brandförhållanden var tilltänkt att användas i FE-analyserna men inte biståts med från glasleverantör så har *Silica Aerogel* använts i simuleringarna då det antas kunna användas under liknande förhållanden utifrån dess termiska egenskaper.

Silica aerogel är ett genomskinligt, värmeisolerande material som tål höga temperaturer där He et al. (2015) tagit fram värmekonduktiviteten av materialet som funktion av temperatur och tryck genom en numerisk analys som de termiska FE-analyserna i denna studie använder sig av, och följer:

Tabell 4. Värmekonduktiviteten för Silica aerogel vid olika temperaturer.

Temperatur [K]	Värmekonduktivitet λ [W/mK]
300	0,015
400	0,02
500	0,04
600	0,06
700	0,09
800	0,13
900	0,18

5.1.4 Luftfickor

I glasfasadsystemet finns också luftfickor där värmekonduktiviteterna för dessa har beräknats enligt SS-EN ISO 10077-2 (2017) och sedan förenklats till ett medelvärde som används i senare simuleringar, och är:

$$\lambda_{\text{luftfickor}} = 1,5 \quad [\text{W/m}^\circ\text{C}]$$

5.1.5 Övriga material

Utöver de ovan nämnda materialen så har isolerande, tätande och till viss del strukturella material använts i de termiska simuleringarna. Skruvarna av rostfritt stål har uteslutits eftersom de inte antas vara av vital betydelse vid en termisk analys då dom inte uppträder

kontinuerligt i hela geometrin. Ur standarden SS-EN ISO 10456 (2007) hämtas värden på värmekonduktivitet som används i de termiska FE-analyserna och är som följer:

Tabell 5. Värmekonduktiviteten för övriga material hos glasfasadsystemet LS3000 Link Timber-stick.

Material (Komponent)	Värmekonduktivitet λ [W/m°C]
Polyeten	0,05
Silikon	0,35
Styrenakrylnitrilharts (Spacer)	0,14
EPDM (gaskets)	0,25
Polysulfid	0,4
Glas	1

5.2 Mekaniska egenskaper

5.2.1 Aluminium

Vid förhöjda temperaturer förändras de mekaniska egenskaperna hos aluminium. Enligt SS-EN 1999-1-2 (2007) bestäms 0,2 % -gränsen för plastisk töjning vid denna temperatur genom följande:

$$f_{o,\theta} = k_{o,\theta} * f_o \quad [\text{MPa}] \quad (4)$$

Där $f_{o,\theta}$ är 0,2% -gränsen vid förhöjd temperatur

f_o är 0,2% -gränsen vid rumstemperatur enligt SS-EN 1999-1-1 (2007)

$k_{o,\theta}$ är reduktionsfaktor vid förhöjd temperatur enligt SS-EN 1999-1-2 (2007).

Aktuellt värde för 0,2% -gränsen och brotthållfastheten erhålls ur SS-EN 1999-1-1 (2007):

- för $t \leq 10$ [mm]

$f_o = 200$ [MPa]

$f_u = 245$ [MPa].

Reduktionsfaktorn erhålls ur SS-EN 1999-1-2 med värden för respektive temperatur enligt Tabell 6.

Tabell 6. Reduktionsfaktor av hållfastheten vid förhöjda temperaturer för aluminium med legering och härdning EN AW-6063 T66.

Temperatur [°C]	Reduktionsfaktor $k_{o,\theta}$
20	1
100	0,91
150	0,84
200	0,71
250	0,38
300	0,19
350	0,09
550	0

Aluminiums spänning-töjnings samband kan ersättas med hjälp av en bi-linjär graf i enlighet med SS-EN 1999-1-1 (2007) som beaktar materialets elastiska, oelastiska och plastiska område som då ersätter den vanliga spännings-töjningskurvan med räta linjer för respektive område. För den bi-linjära modell får följande samband antas vid ett uteslutande av en noggrannare bestämning:

$$f_p = \text{nominellt värde på } f_o \quad [\text{MPa}]$$

$$f_{max} = \text{nominellt värde på } f_u \text{ (Figur 10) eller } f_p \quad [\text{MPa}]$$

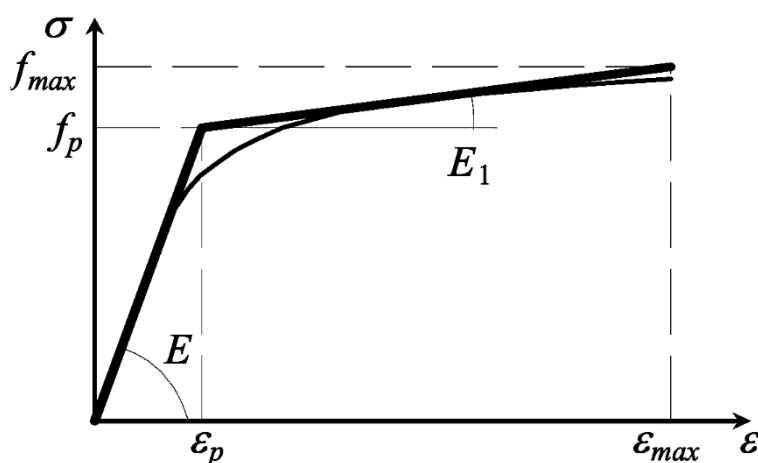
$$\varepsilon_{max} = 0,5 * \varepsilon_u \quad [-]$$

$$\varepsilon_u = \text{nominellt värde på brotttöjningen enligt (6) och (7)} \quad [-]$$

$$\varepsilon_p = \frac{f_o}{E} \quad [-]$$

$$E_1 = \frac{(f_u - f_o)}{(0,5 * \varepsilon_u - \varepsilon_p)} \quad [\text{MPa}] \quad (5)$$

Figur 11 illustrerar hur en bi-linjär graf vid normala temperaturer tas fram med hjälp av ekvationer och värden ovan. Vid förhöjda temperaturer kommer graferna se annorlunda ut på grund av reduktionsfaktorernas påverkan på hållfasthet, töjning och E-modul.



Figur 11. Figuren är hämtad från [SS-EN 1999-1-1:2007: Eurokod 9: Dimensionering av aluminiumkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar ett bi-linjärt spänning-töjnings samband vid normal temperatur.

Den nominella brotttöjningen bestäms enligt:

$$\text{- för } f_o < 400 \quad [\text{MPa}]$$

$$\varepsilon_u = 0,30 - 0,22 * \frac{f_o(\text{MPa})}{400} \quad [-] \quad (6)$$

$$\text{- för } f_o \geq 400 \quad [\text{MPa}]$$

$$\varepsilon_u = 0,08 \quad [-] \quad (7)$$

Ekvationerna (6) och (7) har tagits fram av Eurokod genom att experimentella undersökningar har gjorts på flera legeringar, samt med hjälp av interpolering av de erhållna resultaten. Via ekvationerna erhålls en övre gräns för brottförlängningen som antas vara approximativ enligt SS-EN 1999-1-1 (2007).

Elasticitetsmodulen för aluminiumlegeringen *EN AW-6063 T66* vid förhöjd temperatur förändras enligt SS-EN 1999-1-2 (2007) på följande sätt:

Tabell 7. Aluminiumets elasticitetsmodul vid olika temperaturer.

Aluminiumtemperatur, θ_{al} [°C]	Elasticitetsmodul, $E_{al,\theta}$ [MPa]
20	70 000
50	69 300
100	67 900
150	65 100
200	60 200
250	54 600
300	47 600
350	37 800
400	28 000
550	0

5.2.2 Rostfritt stål

I studien antas skruvarna vara av den autentiska stålsorten *1,4401* trots att de egentligen är *A4-70* vilket beror på brist av relevant materialdata vid förhöjda temperaturer. SS-EN 1993-1-4 (2006) redovisar dimensioneringsvärden för sträckgräns och brottgräns som följer:

$$f_y = 200 \text{ (Sträckgräns)} \quad [\text{MPa}]$$

$$f_u = 500 \text{ (Brottgräns)} \quad [\text{MPa}]$$

Relevanta mekaniska materialegenskaper vid förhöjda temperaturer hittas normalt i bilaga C i SS-EN 1993-1-2 (2005) där reduktionsfaktorer k_θ används relativt f_y , f_u , E_a och E_{ct} .

Ekvation (8), (9), (10) och (11) används för att beskriva spänning-töjningssambandet vid ökad termisk belastning:

$$f_{0,2p,\theta} = k_{0,2p,\theta} * f_y \quad \text{är hållfasthet vid 0,2\% plastisk töjning} \quad [\text{MPa}] \text{ (8)}$$

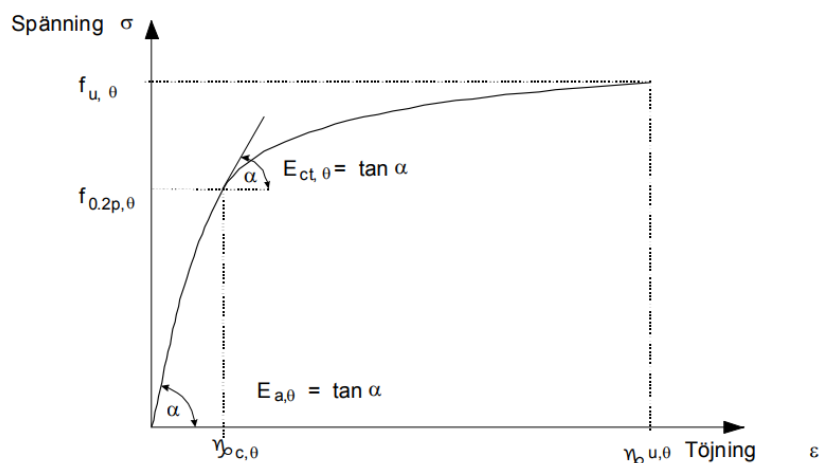
$$f_{u,\theta} = k_{u,\theta} * f_u \quad \text{är draghållfasthet} \quad [\text{MPa}] \text{ (9)}$$

$$E_{a,\theta} = k_{a,\theta} * E_a \quad \text{är lutning inom det elastiska området} \quad [\text{MPa}] \text{ (10)}$$

$$E_{ct,\theta} = k_{ct,\theta} * E_{ct}$$

är lutning vid 0,2% plastisk töjning

$$[\text{MPa}] \quad (11)$$



Figur 12. Figuren är hämtad från [SS-EN 1993-1-2:2005: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 1-2: Brandteknisk dimensionering] och är återgiven med vederbörligt tillstånd av SIS, Svenska institutet för standarder som också säljer den kompletta standarden www.sis.se. Figuren visar stålets spännings-töjningskurva vid förhöjda temperaturer.

Lindner Scandinavia har tagit fram ett förenklat samband som tidigare använts vid dimensionering med hjälp av FE-analyser. Den bygger på reduktionsfaktorn relativt sträckgränsen f_y men innehåller en extra säkerhet gällande E_a och E_{ct} efter företagets önskemål. Detta bi-linjära spänning-töjningssamband har använts i denna studie och följande tabellvärden har erhållits:

Tabell 8. Elasticitetsmodul, hållfasthet och tangentmodul vid olika temperaturer vid användning av bi-linjärt samband.

Temperatur, θ_a [°C]	Elasticitetsmodul, $E_{a,\theta}$ [MPa]	Hållfasthet 0,2% $f_{0,2p,\theta}$ [MPa]	Tangentmodul, $E_{ct,\theta}$ [MPa]
200	53 785	152	713
250	52 189	147	706
300	50 591	142	700
350	48 990	137	706
400	47 385	132	712
450	46 293	129	695
500	45 202	126	677
600	43 531	122	599

650	40 552	112	592
700	37 523	102	582

6. NUMERISK ANALYS

Detta kapitel redovisar de förutsättningar som används vid FE-analyserna genomförda med hjälp av programvaran *Ansys*.

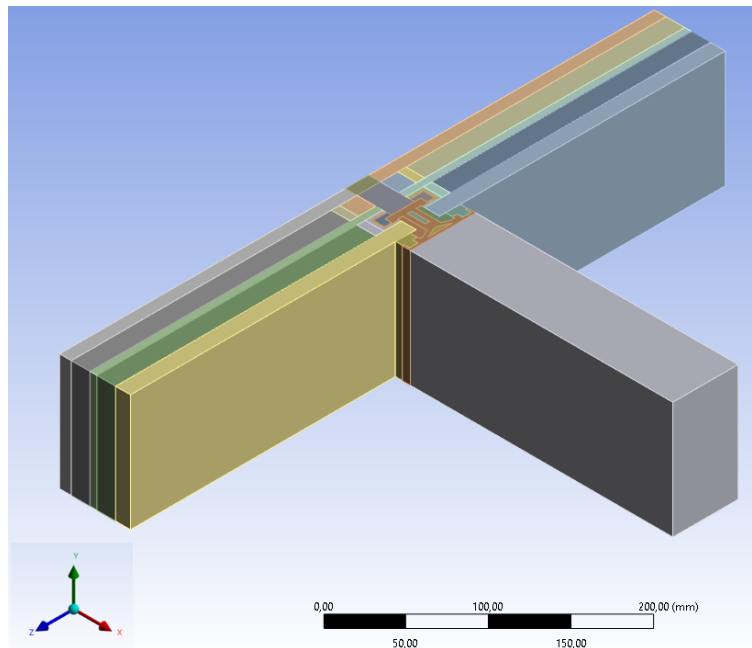
6.1 Modeller

Modellerna som användes i de numeriska analyserna modellerades enligt ritningar erhållna från Lindner Scandinavia. Modellerna gjordes initialt i 2D-format med hjälp av *AutoCAD*, och extruderas till en 3D modell med hjälp av *Inventor* för att slutligen föras in i *Ansys*.

6.1.1 Geometri vid termisk analys

Den geometriska modellen som används i de termiska FE-analyserna är 3D-version av ett ursprungligt 2D-snitt av glasfasadsystemet som ingående beskrivs i kapitel 3, Figur 5 med stöd av Tabell 1.

Då det är en modell av större karaktär har komponenternas geometrier förenklats för att underlätta simuleringarnas genomförbarhet. Därmed har komplexa former ersatts mot kvadratiska och triangulära former. Skruvarna har uteslutits då de inte uppträder kontinuerligt som de andra materialen i modellen. Se Figur 13 för en illustration av hela modellen.

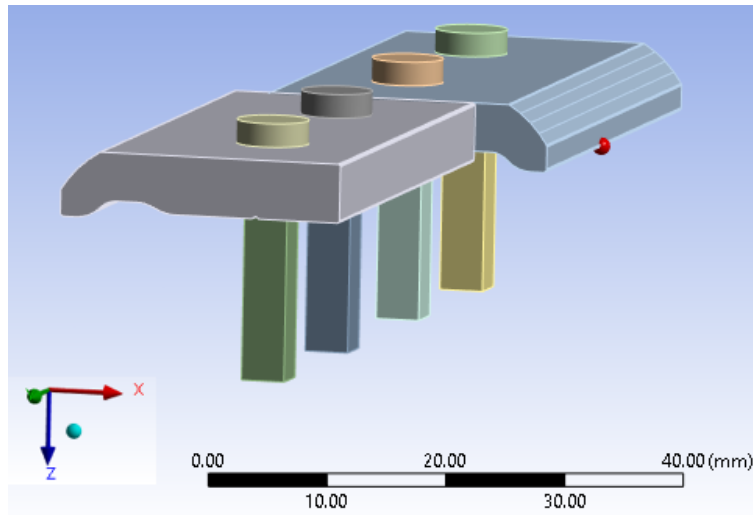


Figur 13. Geometri som användes i *Ansys* för att simulera brandtestförsök efter 5 och 30 minuter.

6.1.2 Geometri vid strukturell analys

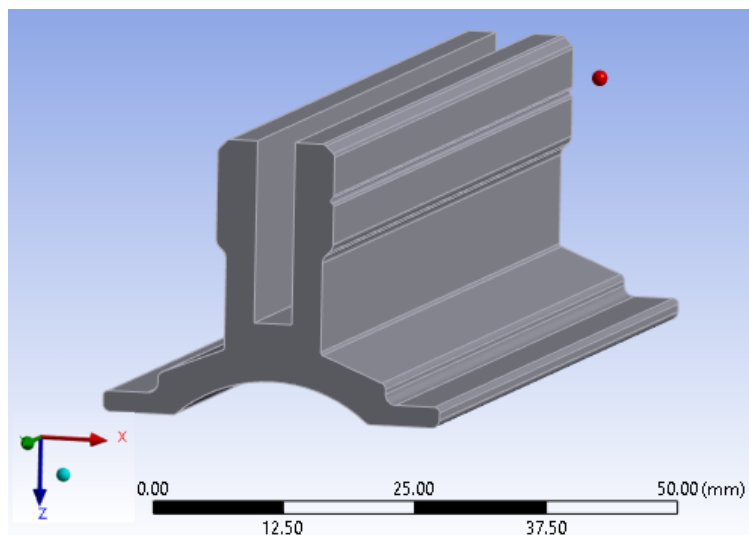
Till skillnad från den termiska analysen är modellen som används i de strukturella beräkningarna förfinad då den endast inkluderar de lastbärande komponenterna, limträet exkluderat, vilket gör simuleringarna enklare att genomföra.

De första aluminiumprofilerna är de två spegelvända *Clipsen* med tillhörande skruvar i rostfritt stål. Det sitter 2 skruvar i varje *Clips* som för lasten genom skruven till nästa aluminiumprofil, se Figur 14.



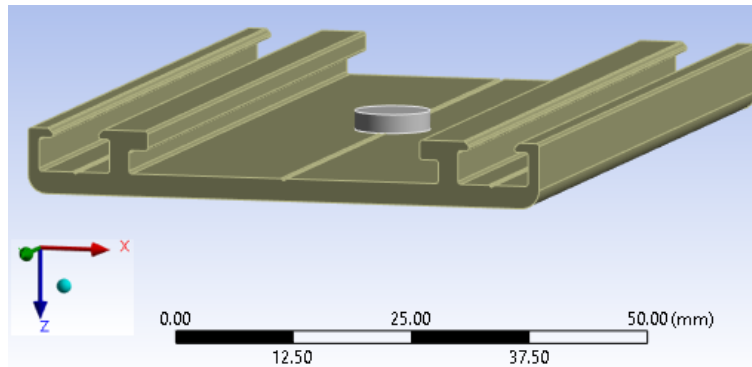
Figur 14. Geometri av Clips med tillhörande skruvar.

Skruvarna sitter sedan gängade i aluminiumprofilen som kallas *Släden*. Den är symmetrisk och har en kontinuerlig geometri längs med hela modellen. Lasten förs ned till varsin ände där den har kontakt med nästa profil, se Figur 15. Både *Clips* och *Släde* uppträder intermittent sett till hela glasfasadsystemet.



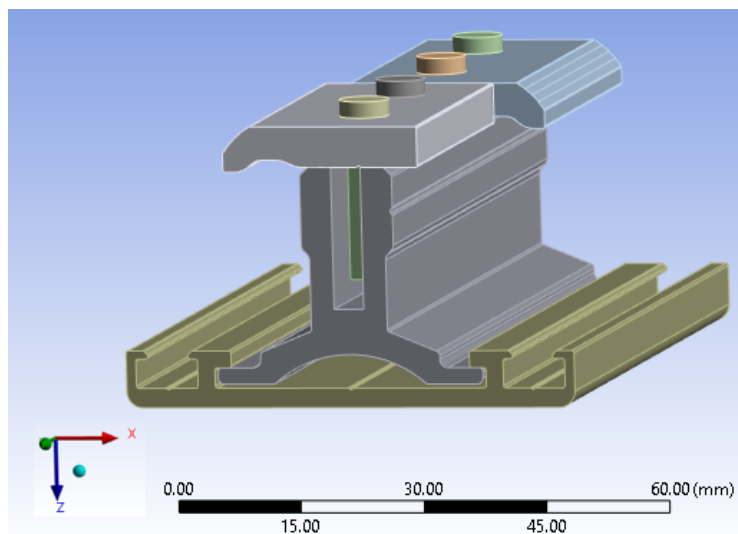
Figur 15. Geometri av Släden.

Den sista profilen kallas *Link* och har kontaktytor mot *Slädens* ändrar. I profilen simuleras en skruv genom ett cylindriskt hål med tillhörande skruvhuvud som är lokaliserat centralt i geometrin och har som uppgift att föra lasten till limträet, se Figur 16. *Link*-profilen uppträder kontinuerligt sett till hela glasfasadsystemet.



Figur 16. Geometri av Link med tillhörande skruvhuvud.

Alla profiler i den strukturella modellen som kommer användas i simuleringarna är nu presenterade, och kan ses i Figur 17.

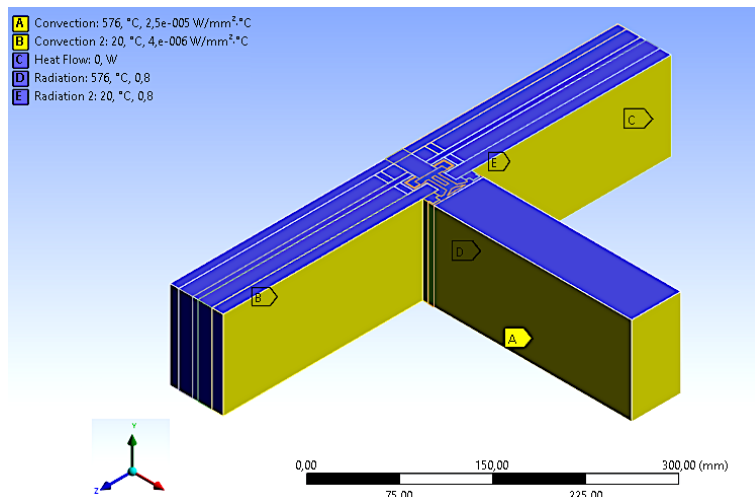


Figur 17. Geometri av hela aluminiumprofilen.

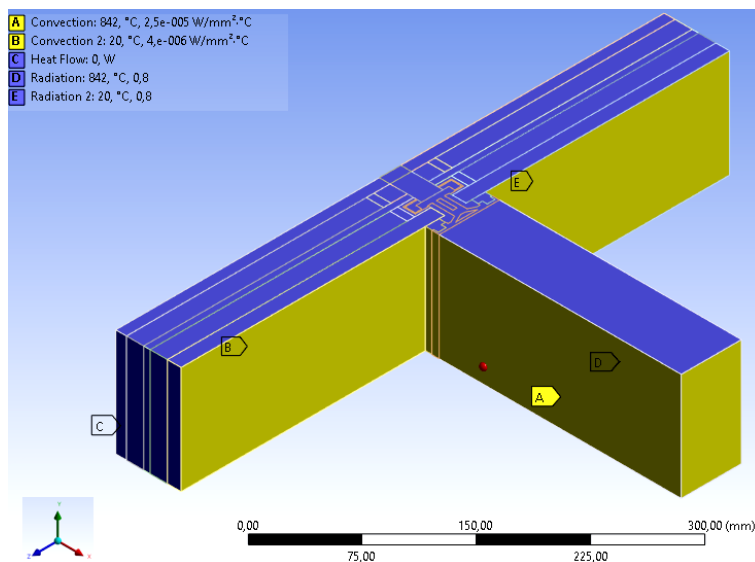
6.2 Termiska randvillkor

Enligt SS-EN 1991-1-2 (2002) så kommer randvillkoren som styr simuleringarnas termiska resultat vara konvektion, strålning och omgivande temperatur. Samtliga tre verkar på båda sidor av glasfasaden, men med olika ingångsvärden. Det totala värmeflödet som kommer verka på ytorna ges av följande ekvation:

$$q_{netto} = q_{konvektion} + q_{strålning} \quad [W/m^2] \quad (12)$$



Figur 18. Randvillkor för provkroppen vid en termisk simulering – 5 minuters brandtestförsök.



Figur 19. Randvillkor för provkroppen vid en termisk simulering - 30 minuters brandtestförsök.

Konvektionen och strålningen appliceras enligt de gula ytorna i Figur 18 och 19 medan de blåa ytorna med villkoret *Heat Flow, 0 W* innebär att värmen är förhindrad att flöda igenom dessa vilket är lämpligt då geometrin är ett snitt av en fullständig glasfasad.

6.2.1 Konvektion

Båda sidor av glasfasaden kommer att belastas med konvektion, det vill säga transport av värme via luften. Följande ekvation i enlighet med SS-EN-1991-1-2 (2002) beskriver det totala värmeflödet till följd av konvektion:

$$q_{konvektion,exponerad} = h_k * (\theta_{gas} - \theta_{yta}) \quad [W/m^2] \quad (13)$$

$$q_{konvektion,icke\ exponerad} = h_k * (\theta_{omg} - \theta_{yta}) \quad [W/m^2] \quad (14)$$

Där h_k är värmeöverföringskoefficienten [W/m²°C]

θ_{gas} är temperaturen i brandugnen [°C]

θ_{yta} är yttemperaturen på respektive sida [°C]

θ är omgivande temperatur på icke exponerad sida [°C].

6.2.1.1 Värmeöverföringskoefficienten

Värmeöverföringskoefficienten h_k beror på specifika värmeresistanser som verkar då värmen tar sig från luften till ytan på respektive sida av glasfasaden, där:

$$h_{k,exponerad} = \frac{1}{R_{se}} \quad [\text{W/m}^2\text{°C}] \quad (15)$$

$$h_{k,icke\ exponerad} = \frac{1}{R_{si}}. \quad [\text{W/m}^2\text{°C}] \quad (16)$$

Koefficienterna bör enligt EN 1991-1-2 (2002) sättas till 25 [W/m²°C] respektive 4 [W/m²°C] på exponerad respektive icke exponerad sida av glasfasaden då ett brandlastfall skall simuleras. Detta medför att värmeresistanserna R_{se} och R_{si} som används är 0,04 [m²°C /W] respektive 0,25 [m²°C /W]

6.2.2 Strålning

Även strålning kommer att belasta båda sidor av glasfasaden och beror av följande ekvation i enlighet med EN-1991-1-2 (2002):

$$q_{strålning} = \Phi * \varepsilon_m * \varepsilon_f * \sigma * [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \quad [\text{W/m}^2] \quad (17)$$

Där	Φ	är formfaktorn	[-]
	ε_m	är emissionstalet för glasfasadens yta/ytor	[-]
	ε_f	är emissionstalet för branden	[-]
	σ	är Boltzmanns konstant	[W/m ² K ⁴]
	θ_r	är strålningstemperaturen från omgivningen	[°C]
	θ_m	är yttemperaturen på glasfasaden	[°C].

Både formfaktorn Φ och brandens emissionstal ε_f sätts till 1,0, då denna studie inte tar hänsyn till eventuella reduktioner såsom skuggeffekter.

I enlighet med SS-EN 1999-1-2 (2007) för aluminium och SS-EN 1995-1-2 (2004) för trä ges emissionstalen 0,7 respektive 0,8, men då även materialen EPDM och glas är direkt exponerade av branden så görs ett konservativt antagande att emissionstalet för glasfasadens alla ytor i simuleringarna väljs till 0,8. Detta är enligt SS-EN-1991-1-2 (2002) ett godkänt emissionstal att använda om inget annat nämns i relevanta standarder. På den icke exponerade sidan finns materialen glas och silikon där emissionstalet sätts till 0,8.

Strålningstemperaturen, θ_r , ansätts till den temperatur som ges av standardbrandkurvan vid given tid enligt SS-EN 1364-3 (2014) då glasfasaden på den exponerade sidan antas vara fullt omsluten av branden som verkar i ugnen enligt SS-EN 1991-1-2 (2002). På den icke

exponerade sidan av glasfasaden sätts strålningstemperaturen till omgivningstemperaturen 20°C.

Boltzmanns konstant σ är givet: $5,67 \cdot 10^{-8}$ [W/m²K⁴].

6.2.3 Omgivande temperatur

I simuleringarna används standardbrandkurvan som omgivande temperatur på den exponerade sidan där de främst analyserade temperaturerna 576°C och 842°C sker 5,- respektive 30 minuter in enligt SS-EN 1991-1-2 (2002).

Omgivande temperatur på den icke exponerade sidan sätts till 20°C i alla simuleringar då de skall representera en rimlig inomhustemperatur i ett testlaboratorium samt ligger i tillåtet intervall för bestämmelserna kring omgivande temperatur givna av SS-EN 1363-1 (2020).

6.3 Strukturella randvillkor

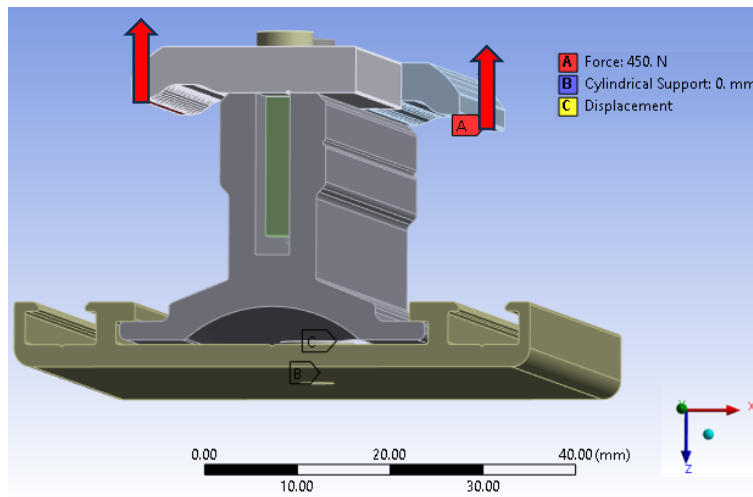
Resultaten i den strukturella FE-analysen kommer att styras av mekaniska temperaturberoende materialegenskaper, dimensionerande last, yttre randvillkor och typ av kontaktytor.

6.3.1 Dimensionerande last och yttre randvillkor

I samråd med *Lindner Scandinavia* har den dimensionerande lasten antagits i form av en vindslast som når 450 N och verkar i ändarna av *Clipsen*, se Figur 20. Lasten har tagits fram med stöd av EN 1991-1-4 (2005) samt baserat på glasens typstorlek enligt SS-EN 13830 (2020).

I en brandprovning om täthet (*E*) och isolering (*I*) så kommer förmodligen ingen vindslast belasta aluminiumprofilerna men det kan sannolikt antas att andra laster kan belasta aluminiumet på grund av omkringliggande materials beteenden. Exempelvis kan komponenter lossna eller utvidga sig och eventuellt belasta systemet, där den dimensionerande vindslasten tar höjd för detta.

I Figur 20 illustreras lasten tillsammans med tilläggande randvillkor som håller emot. ”*Cylindrical support, [B]*” fungerar som en del av substitutet för den uteblivna skruven och är inställd att låsa rörelser i radiell och tangentiell riktning i hålet mellan *Link*-profilen och limträet. ”*Displacement, [C]*” ligger på skruvhuvudets ovansida och är inställd att förhindra rörelser i z-riktning, det vill säga i skruvens axiella riktning.

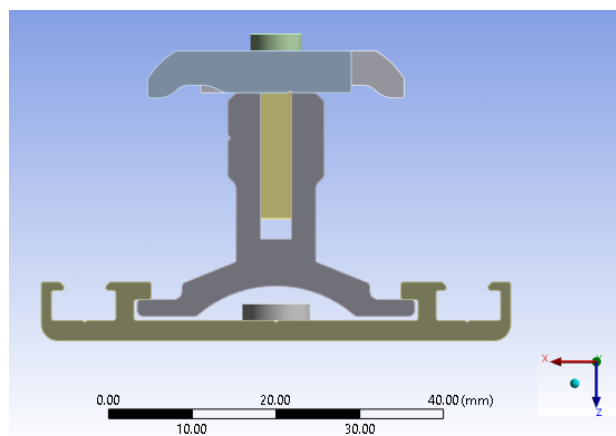


Figur 20. En illustration av hur dimensionerande last verkar på aluminiumprofilerna.

6.3.2 Kontaktytor

Även kontaktytor har stor betydelse på hur komponenterna kommer att uppträda i förhållande till varandra, där simuleringarna gjorda på denna modell använder sig av två.

De flesta kontaktytor antas vara "bonded" vilket innebär att två ytor betar sig som att de är hoplimmade, eller gängade i varandra. Villkoret "frictionless" är den andra typen av kontaktyta som används och uppträder i *Clipsens* ogängade skruvhål, samt ytorna där *Clipsen* vilar på *Släden*. I dessa fall uppträder inte två ytor som om de vore hoplimmade utan antas kunna separera men inte penetrera varandra.



Figur 21. Geometri som användes i Ansys för att undersöka bärformåga vid förhöjd temperatur.

6.3.3 Brottvillkor vid Finita Element-Metoder

Det som resultaten främst kommer att mätas mot anges i bilaga C, SS-EN 1993-1-5 (2006), med särskilt hänsyn till användning av FE-analyser och täcker båda materialen. Den rekommenderade begränsningen på töjningen ϵ_{brott} är 5% och blir därför brottvillkoret.

7.RESULTAT

De termiska analyserna initierades med syftet om att identifiera eventuella kritiska komponenter hos glasfasadsystemet där resultaten vägs emot varje materials termiska materialegenskaper. Resultaten presenteras både som helhet och fristående materialkomponenter samt antas vara intakta oavsett temperatur.

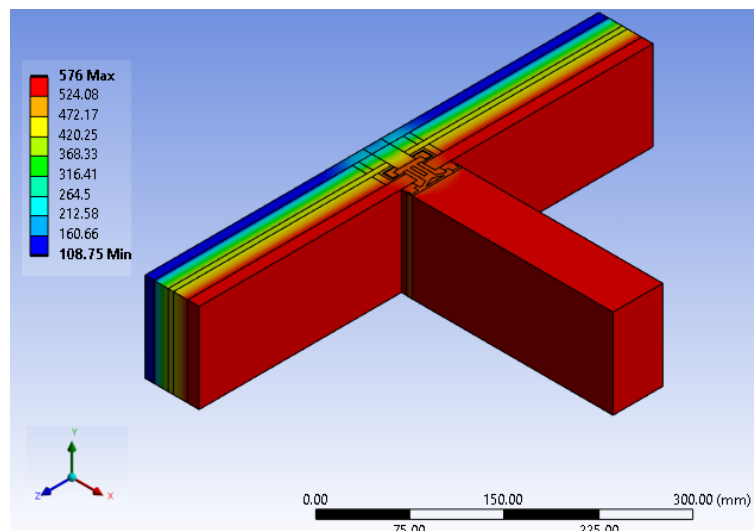
Utifrån de identifierade kritiska komponenterna givna av de termiska resultaten fortsatte studien undersöka de komponenter som ansågs avgörande för glasfasadsystemets strukturella kapacitet. De strukturella resultaten presenteras främst med hänsyn till brottvillkoret angett i kapitel 6.3.3.

7.1 Termisk analys (*Steady State Thermal*)

Modellerna simuleras i enlighet med temperaturer från standardbrandkurvan enligt EN 1363–1 (2020) som motsvarar 5 respektive 30 minuter.

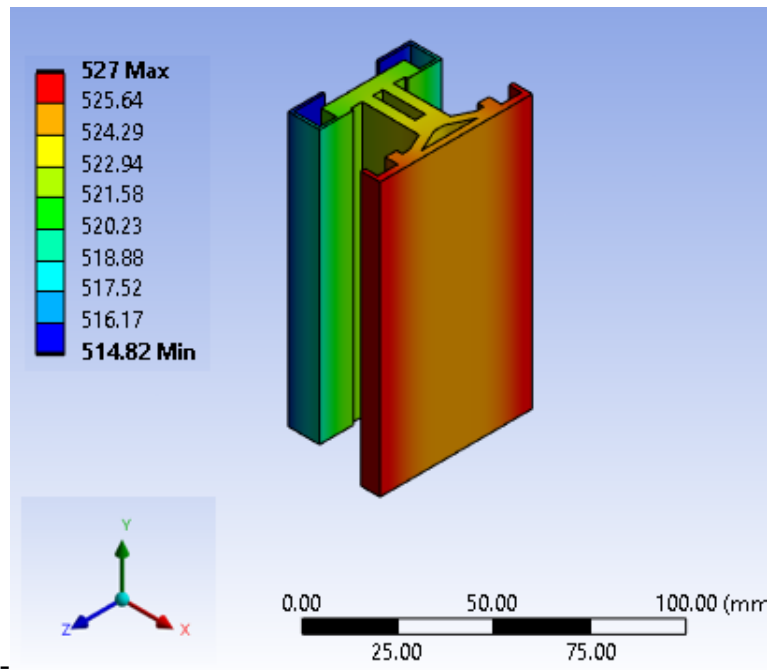
7.1.1 Termiska resultat vid 5 minuters brandexponering, 576 °C

Resultaten på hela modellen efter 5 minuter som syns i Figur 22 visar att stora delar av de direkt brandexponerade komponenterna bestående av limträ, glas, EPDM och aluminium når temperaturer upp mot 576°C. För att noggrannare bestämma temperaturerna som varje enskild komponent når så analyseras isolerade resultat.



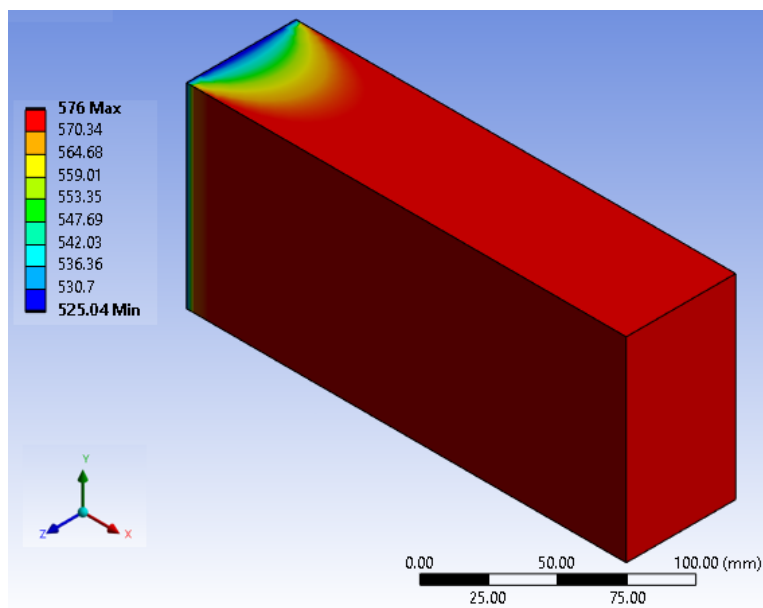
Figur 22. Resultatet efter 5 minuters brandsimulering över hela tvärsnittet.

Figur 23 visar att aluminiumprofilerna når ett temperaturintervall mellan ca 514°C och 527°C. Värmeledningens väg är tydlig då högst temperaturer ses på *Link*-profilens yttersidor som är direkt exponerade av branden men där temperaturerna sjunker ned mot ca 520°C vid *Clips*-profilerna.



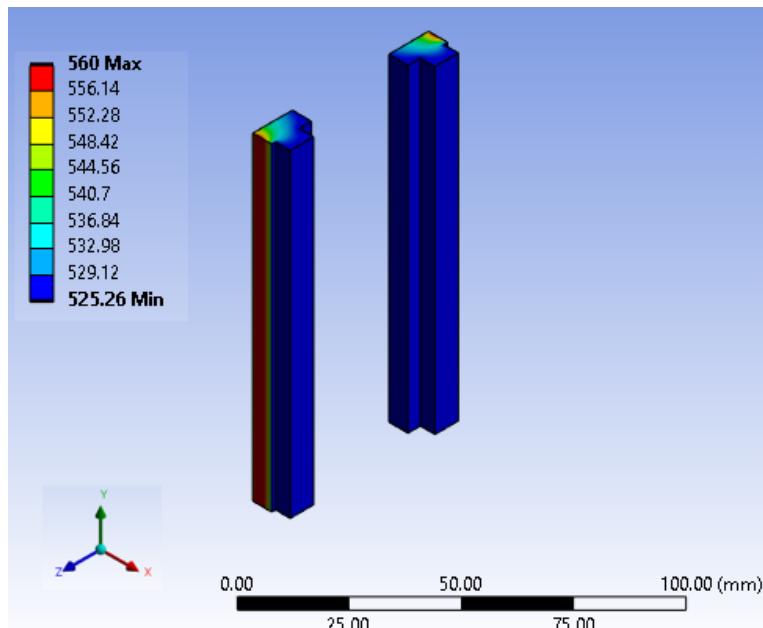
Figur 23. Temperatur hos aluminium efter 5 minuters brandsimulering.

Vid närmare analys av limträet visar resultatet att i stort sett hela limträkomponenten når temperaturen 576°C. Undantaget hittas i området närmare anslutningen med aluminiumet där temperaturen sjunker mot 525°C.



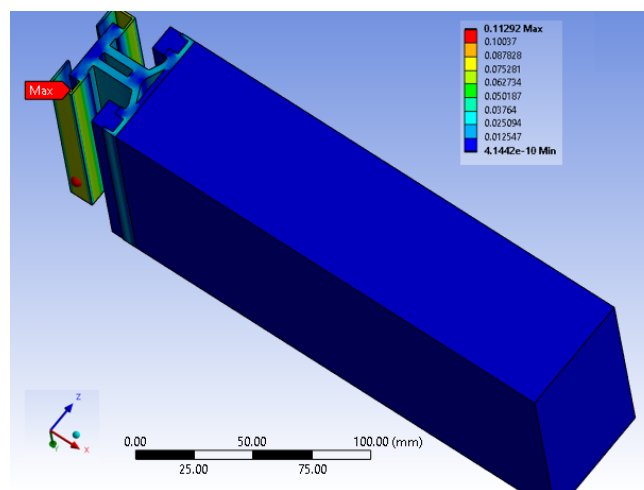
Figur 24. Temperatur hos limträ efter 5 minuters brandsimulering.

I Figur 25 visas temperaturfördelningen i EPDM gaskets där materialets yttre kant når cirka 560°C, men där stora delar håller sig runt 525°C. Smältpunkten för EPDM gaskets förväntas ligga runt 200 °C vilken överstigs kraftigt i hela komponenten (Lugaresi, Sędlak, Kotsovionos, & Rein, 2023).



Figur 25. Temperatur hos EPDM gaskets efter 5 minuters brandsimulering.

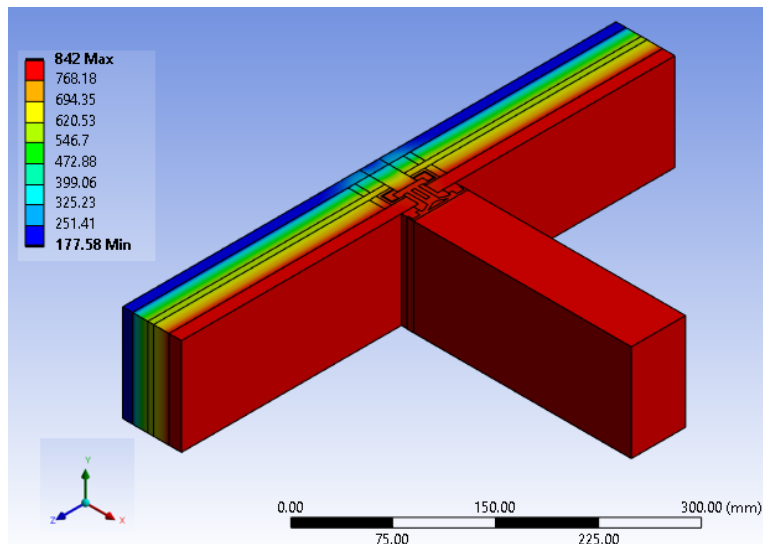
Resultaten visar även att en stor del av värmen transporteras genom aluminiumprofilerna. I jämförelse limträet och EPDM gaskets så leder aluminiumet mycket mer, vilket syns tydligt i Figur 26 där profilen maximalt når $0,11 \text{ W/mm}^2$.



Figur 26. Distribution av värmeflöde i modellen efter 5 minuters brandsimulering.

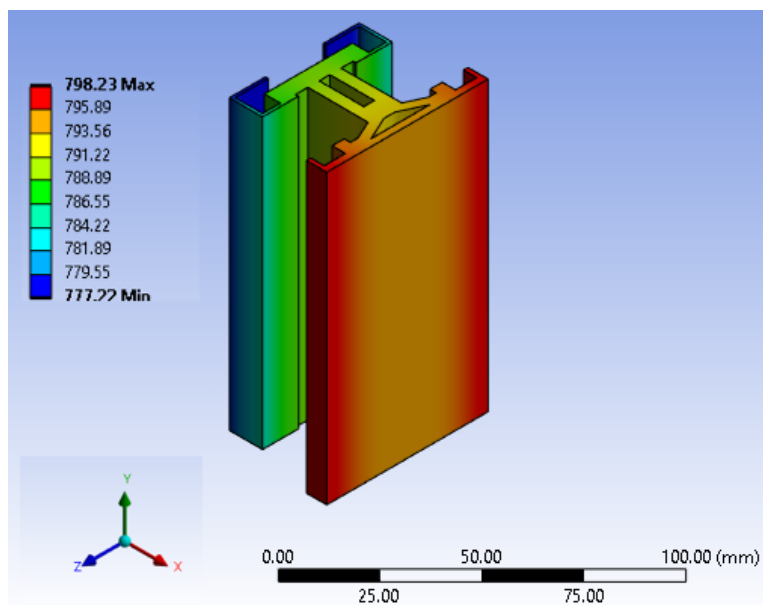
7.1.2 Termiska resultat vid 30 minuters brandexponering, $842 \text{ }^\circ\text{C}$

Liknande värmeledningsmönster ses efter 30 minuter som efter 5, där de kritiska materialen i förhållanden till dess termiska egenskaper förväntas vara aluminium, EPDM, samt limträet. De direkt brandexponerade materialen verkar nå temperaturer runt $800 \text{ }^\circ\text{C}$, se Figur 27.



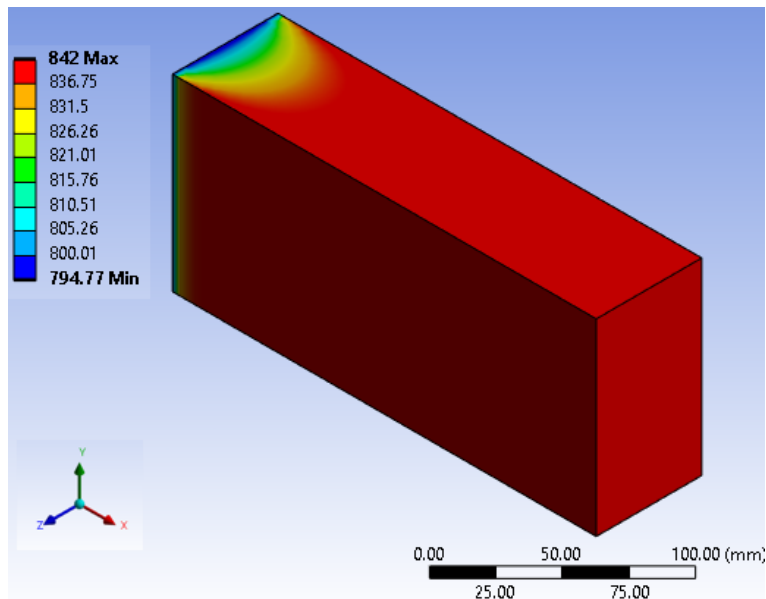
Figur 27. Resultatet av ett simulerat 30 minuters brandsimulering.

Aluminiumprofilens maximala temperatur ligger nära 800°C vid den fullt exponerade sidan och cirka 775°C med störst avstånd från branden. Vid dessa temperaturer kan aluminiumet antas vara genomsmält.



Figur 28. Temperatur hos aluminium efter 30 minuters brandsimulering.

Nästan hela limträet når temperaturen 842°C men sjunker mot 775°C närmare anslutningen med aluminiumet likt fallet efter 5 minuters brand.



Figur 29. Temperatur hos limträet efter 30 minuters brandsimulering.

7.1.3 Analys av termiska resultat

Resultaten indikerar att redan efter 5 minuters brandexponering så når flera komponenter riskfyllda temperaturer kopplat till dess termiska materialegenskaper.

I Figur 25 ses att EPDM *gaskets* överstiger 500°C vilket är ett stort problem då de maximalt förväntas klara av en temperatur på omkring 200°C (Lugaresi, Şeđlak, Kotsovionos, & Rein, 2023). Därefter kan de antas vara fullt genomsmälta vilket innebär att det inte längre finns någon dämpande funktion som förhindrar kollisioner mellan glaset och aluminiumprofilen. Det innebär också att glasfasadens täthet är hotad då det sannolikt ökar chanserna för brandrök att tränga igenom vilket hade kunnat skapat ännu högre temperaturer för bakomliggande material och äventyrar därmed chanserna att klara kraven för *EI30*.

Som nämnt i kapitlet för termiska materialegenskaper så förkolas limträet med tiden och inkluderar dessa termiska effekter i simuleringarna i form av förändringar på värmekonduktiviteten. Det medför en representativ värmeledning fram mot aluminiumprofilen som tillsammans med limträet fungerar som det bärande systemet i glasfasaden. Detta förutsätter att förkolningsprocessen inte har skapat en kollaps rent strukturellt.

Link-profilen kan med största säkerhet inte fastställas vara genomsmält då den maximalt når upp till 527°C i simuleringen efter 5 minuters brandexponering. SS-EN 1999-1-2 (2007) visar dock att både termiska och mekaniska materialegenskaper som funktion av förhöjd temperatur slutar vid antingen 500°C eller 550°C vilket indikerar att man kan anta att aluminiumet antingen börjat smälta och/eller nästan förlorat all sin bärande kapacitet.

Då aluminiumprofilerna har som uppgift att ta upp, - och fördela den dimensionerande lasten så identifieras här den mest kritiska delen av glasfasadssystemet, vilket ligger till grund för fortsatta strukturella hållfasthetsberäkningar.

Vidare så är värmeflödets beteende också ett intressant resultat då det visar hur inflytelserik aluminiumprofilen är med hänsyn till värmeledningen genom glasfasadssystemet i jämförelse

med andra komponenter som främst illustreras i Figur 26 genom jämförelse med limträet. Materialets höga värmekonduktivitet är styrande i att värmedistributionen ser ut som den gör.

Det exponerade glaset antas vara intakt och leder också in värme mot aluminiumprofilerna. Här används dock inga temperaturvarierande materialegenskaper såsom i fallen för aluminium och limträ, vilket kan medföra en mindre representativ bild av resultatet.

Resultaten efter 30 minuter är inte lika relevanta för fortsättningen av studien då det fastslås flera problemområden redan efter 5 minuter. Eftersom *Lindner Scandinavia* önskar att nå en brandklassning på *EI30* så indikerar de termiska resultaten efter 5 minuter att åtgärder behöver göras.

7.2 Strukturell analys (*Static Structural Analysis*)

Utifrån de presenterade resultaten i den termiska analysen så togs beslutet om att påbörja strukturella beräkningar på aluminiumprofilen då den sannolikt är avgörande för glasfasadsystemets strukturella kapacitet vid förhöjda temperaturer. Aluminiumprofilen syftar till att föra lasten via alla dess komponenter till limträet där en kollaps av aluminiumet kan innebära en kollaps av hela glasfasadsystemet.

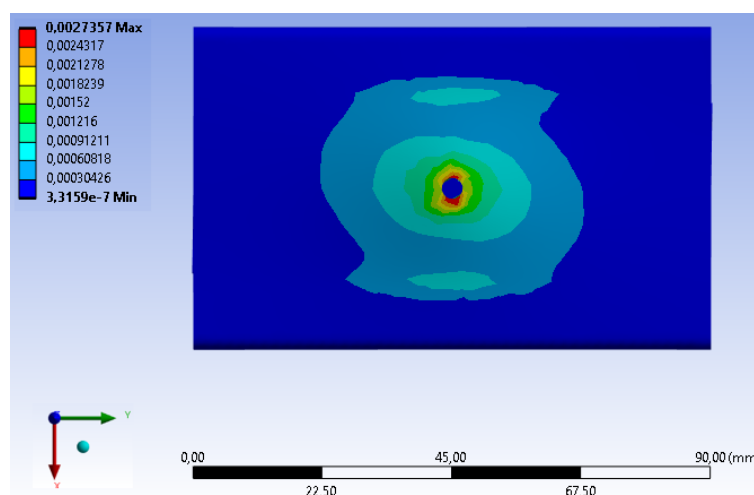
Med anledning av detta så fokuserar detta kapitel på hur aluminiumet kommer att bete sig då förhöjda temperaturer tillsätts simultant med den dimensionerande vindslasten. Syftet är att hitta det kritiska temperaturintervallet där aluminiumet inte har tillräcklig strukturell kapacitet.

7.2.1 Strukturella resultat vid <1 minuts brandexponering, 300 °C

Den maximala töjningen uppgår till cirka 2,7% för en temperatur vid 300 °C vilket motsvarar en tid på under en minut enligt standardbrandkurvan från EN 1363–1 (2020). Denna töjning uppkommer i *Link*-profilen, placerad omkring skruvhålet.

Brottvillkoret på 5% maximal töjning överskrids inte och aluminiumet kan antas klara lasten vid den avsedda temperaturen.

För övriga komponenters resultat kopplat till spänningar och deformation presenteras dessa under APPENDIX I.



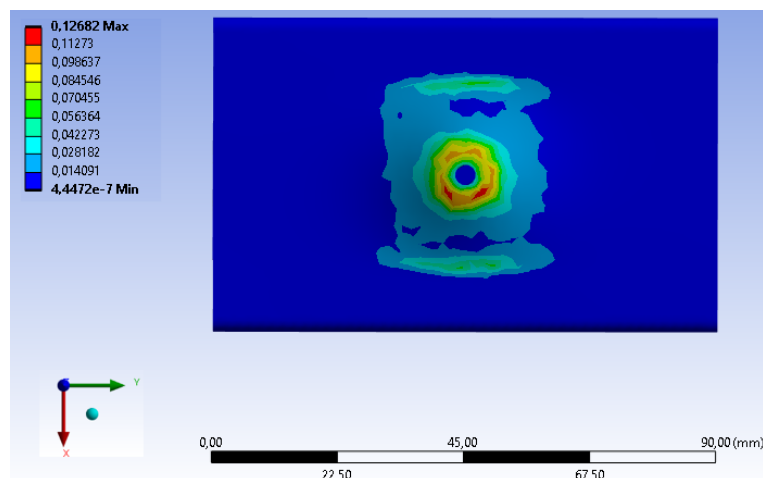
Figur 30. Total töjning visad över hela geometrin vid 300 °C..

7.2.2 Strukturella resultat vid 1 minuts brandexponering, 350 °C

Den maximala töjningen uppgår till över 12% vid en temperatur om 350°C vilket motsvarar ungefär 1 minut enligt standardbrandkurvan från EN 1363–1 (2020). Töjningen uppträder på liknande sätt som tidigare runt skruvhålet i *Link*-profilen, men med en mycket högre töjning än för fallet vid 300°C.

Den maximalt tillåtna töjningen på 5% enligt brottvillkoret överskrids under dessa förhållanden vilket fastslår att systemet inte klarar lasten. Resultatet visar att det kritiska temperaturintervallet för aluminiumprofilerna ligger mellan 300 och 350 °C med hänsyn till den dimensionerande lasten.

För övriga komponenters resultat kopplat till spänningar och deformation presenteras dessa under APPENDIX II.



Figur 31. Total töjning visad över hela geometrin vid 350 °C.

7.2.3 Analys av strukturella resultat

Resultaten visar en tydlig indikation på att den strukturella förmågan är starkt reducerad då aluminiumprofilen befinner sig mellan 300 °C och 350 °C och belastas med den dimensionerande vindslasten.

Tabell 9. Resultat i tabellform över töjningar vid strukturell analys.

Temperatur [°C]	Töjning [%]	Brottvillkor [%]	Resultat
300	2,74	5	OK
350	12,68	5	EJ OK

Vid 300 °C är det *Link*-profilen som blir utsatt för störst töjningar. Den fasta inspänningen med skruv i limträet förhindrar rörelser i kraftens riktning och bidrar till att de största töjningarna uppträder här. Då temperaturen stiger till 350°C överskrids brottvillkoret kraftigt vilket indikerar att om aluminiumprofilen hade belastats med den dimensionerande vindslasten, hade hela glasfasadsystemet riskerat att nå kollaps innan 1 minuts brandexponering.

Även om en vindslast förmodligen inte kommer belasta systemet vid en eventuell brandprovning under förhållanden i ett testlaboratorium, så indikerar de strukturella resultaten

att aluminiumet riskerar att kollapsa om en brand skulle uppstå under vindförhållanden i ett verkligt projekt.

Avslutningsvis så visade de termiska och strukturella resultaten att aluminiumprofilerna som ligger exponerat i systemet når kritiska temperaturer utifrån dess materialegenskaper. Temperaturintervallet som resultaten är baserade på uppträder väldigt tidigt i standardbrandkurvan från EN 1363–1 (2020). Detta indikerar att en önskad brandklassning om *EI30* kräver förändring av glasfasadsystemet för att de avgörande komponenterna ska kunna behålla sin strukturella kapacitet. Då aluminiumprofilerna når ett tidigt brott riskerar resterande komponenter att lossa från glasfasadsystemet vilket per automatik resulterar i ett misslyckat test enligt EN 1364–3 (2014).

Simuleringar över 350 °C har uteslutits i och med att det kritiska temperaturintervallet hittas vid en lägre temperatur där resultaten redan visat vart och när problemen uppstår.

8. DISKUSSION

Denna studie har haft som mål att utvärdera glasfasadssystemet *LS3000 Link-Timber*, med syftet att identifiera eventuella kritiska punkter som kan vara avgörande i ambitionen att nå brandklassningen *EI30*. Det är därför oundvikligt att inte diskutera problemen med aluminiumprofilen som i och med dess avgörande funktion rent strukturellt i kombination med hur svagt den presterar vid högre temperaturer, är den del av glasfasadssystemet som är mest kritisk.

En kritisk konsekvens av de strukturella resultaten är att aluminiumet vid ett brandförlopp med en last simultant kan orsaka en total kollaps tidigt. Det kan innebära stora konsekvenser kopplat till olyckor då komponenterna kan falla mot människor på marknivå eftersom glasfasadssystem ofta implementeras i höga byggnader. Detta är något som också Lugaresi et al. (2023) behandlade i sin studie där det dokumenterades faktiska olyckor som skett, vilket är i enlighet med resultaten i denna studie.

Även om ett scenario där aluminiumet inte behöver hantera en dimensionerande last vid en brandprovning enligt EN 1364–3 (2014) och kollapsar strukturellt, så visar de termiska resultaten att profilen riskerar att vara nära sin smältpunkt redan efter 5 minuter. En genomsmält *Link*-profil innebär att anslutningen mot limträet inte längre är intakt då skruven inte har något att fästa mot. Därmed riskerar systemet att släppa från limträet och orsaka en kollaps, oavsett last. Utöver de riskerna så leder aluminiumet mycket värme då den kan antas ha en värmekonduktivitet nära 225 [W/mK] redan innan 5 minuters brandexponering. Det medför risker att omgivande material närmare den icke exponerade ytan når högre temperaturer snabbare och därmed höjer yttemperaturerna som är avgörande för den slutliga brandklassificeringen givna av EN 13501–2 (2023).

Slutligen landar det i att om aluminiumet skall behållas behöver det skyddas bättre rent termiskt, men då även en eventuell strukturell kollaps kan ske tidigt borde det vara fördelaktigt att lasten hanteras av en annan komponent/material som presterar bättre under ett brandlastfall.

Även om studien inte har utfört strukturella beräkningar på limträet med hänsyn till förkolningsprocessens påverkan på hur det presterar vid förhöjda temperaturer, så måste det nämnas att detta är något som behöver kontrolleras. Enligt EN 1995-1-2 (2004) så är den dimensionerande förkolningshastigheten 0,65 mm/min för limträet, vilket kan innebära att stora delar kommer vara förkolnat. Förkolningsskiktet kan dessutom vara ännu större om man även beaktar påverkan av sprickor och rundade hörn.

Med det sagt så bör det dock vara enklare att hantera det problemet, exempelvis med impregnering eller brandskyddsbeklädnad för att fördröja och motarbeta förkolningsprocessen vilket enligt Zang et al. (2024) kraftigt kan minska värmeledningen men också antändningsrisken. En ytterligare potentiell åtgärd kan vara att öka tjockleken på limträet och få ett större lager limträ som inte hinner förkolna. Dessa typer av lösningar kräver dock beräkningar som stödjer hypoteserna vilket denna studie avgränsats ifrån. Slutligen bör även värmeledningen mellan skruv och limträ kärna undersökas djupare, vilket Horne et al. (2023) bekräftade med hänsyn till den höga värmekonduktiviteten som skruvar i stål typiskt har. Detta är en parameter som inte beaktats i de termiska analyserna då de inte uppträder kontinuerligt men kan antas ha en viss påverkan på de platser de finns.

Vidare var det vid studiens start tydligt att EPDM *gaskets* var komponenter som är utsatta för stor risk under ett brandförlopp. Lugaresi et al. (2023) nämnde att dessa komponenter typiskt smälter omkring 200 °C vilket enligt de presenterade resultaten uppstår innan 5 minuter har passerat. Detta är därmed också en bekräftad kritisk komponent då den i ett genomsmält tillstånd inte längre tätar mellan glaset och aluminiumprofilerna. Eftersom även en högre genomsläpplighet av varma gaser kan uppstå, kan även här en slutsats dras att åtgärder behöver göras.

Det inkommerade uppskummande gelet mellan glaset som kommer användas i praktiken men inte kunnat användas i studien har en påverkan på det slutgiltiga resultatet. Det är dock främst det första glaset som för in värme mot aluminiumet vilket ändå skapar en representativ bild på vilka temperaturer som uppstår i aluminiumet. Detta framför allt vid 5 minuters exponering, då det sannolikt är högre risk att glaset spricker ju längre tid de exponeras och därmed har en större påverkan på resultaten.

Brandglastillverkarna som bistår med glaskonfigurationerna, inklusive gelen och ger en garanti på att deras produkter klarar brandlastfall på 30 minuter vilket ligger till grund för att dessa komponenter inte har fokuserats på lika mycket som ovan nämnda i denna studie.

Som slutsats så är det tydligt att aluminiumet, limträet och EPDM *gaskets* alla lider av att de är direkt exponerade av branden, vilket medför svag prestation av glasfasadsystemet relativt tidigt då önskad brandklassning är *EI30*.

9. DESIGNFÖRSLAG

För att nå en brandklassning av ett glasfasadsystem krävs det generellt att de avgörande komponenterna är intakta under ett brandförlopp och att deras huvudsakliga funktioner så som isolering, bärande kapacitet och tätning förutsätts bibehållas.

Glaset förutsätts vid en framtida brandprovning klara de förhöjda temperaturerna då glasfasadsystemet består med ett brandglas från brandglastillverkare. Därmed kommer förslagen inte fokusera på förändringar gällande detta.

Studien undersöker inte förkolningsdjupet hos limträet men utifrån de förkolningshastigheter som är presenterade i EN 1995-1-2 (2004) antas den nuvarande dimensionen riskera att förlora nödvändig bärande kapacitet. Aluminiumprofilerna samt EPDM *gaskets* kräver också åtgärder för att glasfasadsystemet ska kunna nå en eventuell brandklassning.

9.1 Första förslaget

Detta förslag innebär att nuvarande glasfasadsystem behåller de redan existerande dimensionerna men adderar yttre skyddande lager och reaktiva material för att förbättra de termiska egenskaperna. Följande åtgärder föreslås:

- **EPDM *gaskets*** ersätts med likvärdig komponent som sväller upp vid högre temperaturer och isolerar glasfasadsystemets invändiga komponenter.
- **Limträet** appliceras med en brandskyddsbeklädnad eller impregnering som agerar retarderande mot förkolningshastigheten samt motarbetar värmeledningen då ett extra värmemotstånd adderas.
- **Aluminiumprofilerna** appliceras med brandskyddsbeläggning som förbättrar de termiska materialegenskaperna vilket innebär att aluminiumet kan behållas intakt vid högre temperaturer.
- **Reaktiva material** som sväller upp vid högre temperaturer och skapar effektiva isolerande barriärer introduceras vid kritiska punkter. Därmed fördröjs värmeledningen in mot kritiska komponenter hos glasfasadsystemet.

9.2 Andra förslaget

Detta förslag innebär förändring av dimensioner av det ursprungliga glasfasadsystemet och adderar yttre lager och reaktiva material för att förbättra de termiska egenskaperna.

- **Limträet** dimensioner ökas för att möta den nödvändiga dimensionen som glasfasadsystemet behöver med hänsyn till förkolningsprocessen.
- **EPDM *gaskets*** ersätts med likvärdig komponent som sväller upp vid högre temperaturer och isolerar glasfasadsystemets invändiga komponenter.
- **Clips-profilen** ersätts med en stålbricka som presterar bättre vid högre temperaturer med hänsyn till dess materialegenskaper.
- **Aluminiumprofilens** lastbärande ansvar vid höga temperaturer tas över av en skruv i rostfritt stål som sträcker sig från stålbrickan till limträet.
- **Link- och Släd-profilerna** exkluderas inte från glasfasadsystemet men förväntas bara bidra med bärande kapacitet vid normala temperaturer.
- **Reaktiva material** som sväller upp vid högre temperaturer och skapar effektiva isolerande barriärer introduceras vid kritiska punkter. Därmed fördröjs värmeledningen in mot kritiska komponenter hos glasfasadsystemet.

9.3 Konsekvenser av förslag

De förslag som har presenteras innebär att chanserna för en eventuell brandklassning på *EI30* bör förbättras. En lösning som innebär korrigerande av nuvarande glasfasadssystem kan medföra ändringar av material, produktion, kostnad, leverantörer och förändringar av klimatavtryck. Därmed är det av stor vikt att en förändring av glasfasadsystemet analyseras innan det verkställs.

Det primära syftet är att nå ett brandklassificerat glasfasadssystem som kan användas på samma sätt mot vilket som analyserats i denna studie. Valet om vilken typ av förändring som tillämpas på glasfasadsystemet kan komma att ändra designen och intrycket av byggnaden rent estetiskt. Exempelvis så är det kanske inte designmässigt lämpligt att markant öka dimensionerna på limträet bara för att uppnå tillräcklig prestation mot brand.

Inför en brandprovning bör den nya lösningen prövas teoretiskt där den termiska och strukturella responsen analyseras med hjälp av numeriska analyser likt de utförda i denna studie.

10. VIDARE STUDIER

Nedan presenteras förslag på vidare studier:

- Limträet bör vidare utvärderas med hänsyn till försämringen av dess mekaniska materialegenskaper givet av förkolningsprocessen.
- Designförslagen bör analyseras termiskt och strukturellt genom numerisk analys likt metoden i denna studie.
- Andra konstruktionsdelar som krävs för en godkänd brandprovning enligt EN 1364–3 (2014) såsom golv, - och vägganslutningar bör genomgå en liknande numerisk analys och vägas mot kraven givna av EN 13501–2 (2023) för brandklassning *EI30*.
- Inför en brandprovning bör en lämplig utformning av testexemplaret tas fram i enlighet med de krav som presenteras i med EN 1364–3 (2014) samt i samråd med personal från testlaboratorium.

LITTERATURFÖRTECKNING

Alumeco. (u.å.). *Alumeco*. Hämtat från Aluminium egenskaper:

<https://www.alumeco.se/kunskap-teknik/data-aluminium/aluminium-egenskaper/>

Bai, B., Zengtao, L., Lei, L., & Baofang, Z. (den 29 Juni 2020). Research on Influencing Factors of Fire Restistance of Curtain Wall in High-rise Buildings. *Journal of Physics: Conference Series*, 1549(3). doi:doi:10.1088/1742-6596/1549/3/032031

Boverket. (2024). *Utsläpp av växthusgaser från bygg- och fastighetssektorn*. Hämtat från <https://www.boverket.se/sv/byggande/hallbart-byggande-och-forvaltning/miljoindikatorer---aktuell-status/vaxthusgaser/>

He, Y.-L., & Xie, T. (2015). Advances of thermal conductivity models of nanoscale silica aerogel insulation material. *Applied Thermal Engineering*, 28-50. doi:https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.02.013

Horne, P., Abu, A., Palermo, A., & Moss, P. (Juni 2023). Thermal response of timber connections in the cooling phase. *Fire and Materials*, 4(47), 479-497. doi:10.1002/fam.3136

Lugaresi, F., Sędlak, B., Kotsovionos, P., & Rein, G. (Oktober 2023). Thermal response of a curtain wall framing system under fire conditions. *Fire Safety Journal*, 140. doi:https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103850

Sędlak, B., Sulik, P., & Garbacz, A. (den 15 Maj 2022). Scale effect in the evaluation of the fire resistance of glazed partitions. *Journal of Building Engineering*, 49. doi:https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104108

Sulik, P., Kinowski, J., & Sędlak, B. (den 16 Oktober 2015). FIRE RESISTANCE OF ALUMINIUM GLAZED CURTAIN WALLS, Test results comparison depending on the side of fire exposure. *2015: Proceedings of the International Conference in Dubrovnik, 15 - 16 October, 2015*. Dubrovnik: Czech Technical University in Prague. doi:https://doi.org/10.14311/asfe.2015.076

Sulik, P., Sedlak, B., & Kinowski, J. (2016). Study on critical places for maximum temperature rise on. *2nd International Seminar for Fire Safety of Facades, FSF 2016*. 46. Lund: EDP Sciences. doi:10.1051/mateconf/20164602006

Svenska Institutet för Standarder. (den 20 December 2002). *SS-EN 1991-1-2 - Eurokod 1: Laster på bärverk - Del 1-2: Allmänna laster - Termisk och mekanisk verkan av brand*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ssen199112/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 10 December 2004). *SS-EN 1995-1-2:2004: Eurokod 5: Dimensionering av träkonstruktioner - Del 1-2: Allmänt - Brandteknisk dimensionering*. Hämtat från <https://www-sis->

se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ssen1995122004/

Svenska Institutet för Standarder. (den 22 April 2005). *SS-EN 1991-1-4:2005: Eurokod 1: Laster på bärverk – Del 1-4: Allmänna laster - Vindslast*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1991142005/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 29 April 2005). *SS-EN 1993-1-2:2005: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 1-2: Brandteknisk dimensionering*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ssen1993122005/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 6 November 2006). *SS-EN 1993-1-4:2006: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 1-4: Rostfritt stål*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1993142006/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 6 November 2006). *SS-EN-1993-1-5:2006: Eurokod 3: Dimensionering av stålkonstruktioner – Del 1-5: Plåtbalkar*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1993152006/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 8 Maj 2007). *SS-EN 1999-1-1:2007: Eurokod 9 : Dimensionering av aluminiumkonstruktioner – Del 1-1: Allmänna regler*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsindustrin/tekniska-aspekter/ssen1999112007/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 7 Mars 2007). *SS-EN 1999-1-2:2007: Eurokod 9: Dimensionering av aluminiumkonstruktioner – Del 1-2: Brandteknisk dimensionering*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ssen19991220072/>

Svenska Institutet för Standarder. (den 21 December 2007). *SS-EN ISO 10456:2007: Byggmateriäl och produkter – Fukt- och värmetekniska egenskaper – Tabeller med beräkningsvärden och metoder för bestämning av termiska egenskaper för deklarerat resp. beräkning*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsmaterial/allmant/sseniso104562007/>

Svenska institutet för Standarder. (den 2 Februari 2014). *SS-EN 1364-3:2014: Fire resistance tests for non-loadbearing elements – Part 3: Curtain walling – Full configuration (complete assembly)*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ssen136432014/>

- Svenska Institutet för Standarder. (den 27 Juli 2017). *SS-EN ISO 10077-2:2017: Termiska egenskaper hos fönster, dörrar och jalusier – Beräkning av värmegenomgångskoefficient – Del 2: Numerisk metod för karm och båge (ISO 10077-2:2017)*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsmaterial-och-byggnader/byggnadsdelar/dorrrar-och-fonster/ss-en-iso-10077-22017/>
- Svenska Institutet för Standarder. (den 24 Februari 2020). *SS-EN 1363-1:2020: Fire resistance tests - Part 1: General requirements*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ss-en-1363-12020/>
- Svenska Institutet för Standarder. (den 2 Juni 2020). *SS-EN 13830:2015+A1:2020: Curtain Walling – Product Standard*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/byggnadsprojektering/glas/ss-en-138302015a12020/>
- Svenska Institutet för Standarder. (den 5 Juni 2023). *SS-EN 13501-2:2023: Fire classification of construction products and building elements – Part 2: Classification using data from fire resistance and/or smoke*. Hämtat från <https://www-sis-se.eu1.proxy.openathens.net/produkter/miljo-och-halsoskydd-sakerhet/skydd-mot-brand/brandtalighet-for-byggnadsmaterial/ss-en-13501-22023/>
- Svenskt trä. (u.d.). *Träarkitektur och träbyggande*. Hämtat från <https://www.svensktra.se/hallbarhet/klimatnytta/arkitektur-och-byggande/>
- Zang, X., Liu, W., Wu, D., Pan, X., Zhang, W., Bian, H., & Shen, R. (Januari 2024). Contemporary Fire Safety Engineering in Timber Structures: Challenges and Solutions. *Fire*, 7. doi:10.3390/fire7010002

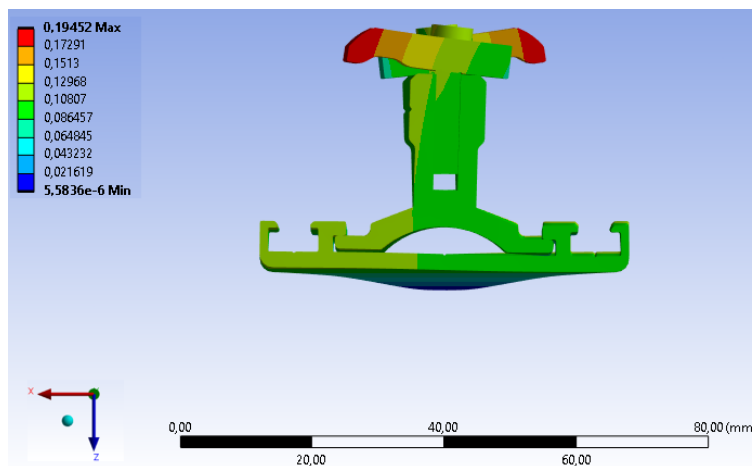
APPENDIX I

Den efterföljande tabell tillsammans med figurer avser presentera resultaten från den strukturella analysen.

Tabell 10. Spänning, deformation och töjning av strukturella komponenter vid 300 °C brandexponering samtidigt med dimensionerande last.

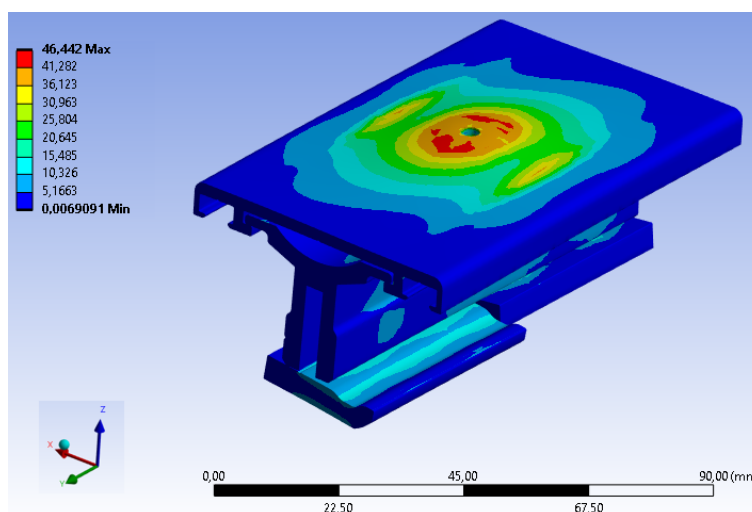
Komponent	Spänning [MPa]	Deformation [mm]	Töjning [%]
Hela geometrin	46,42	0,1945	-
Rostfria stålskruvar	-	-	1,942

Den maximala deformationen uppstår i *Clips*-profilen.



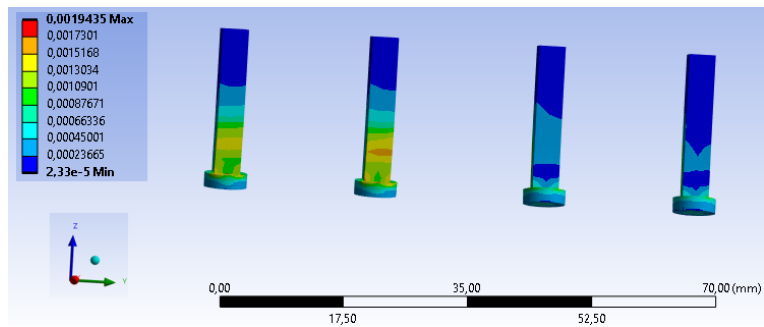
Figur 32. Deformationsfördelning visad över hela geometrin vid 300 °C.

Den maximala spänningen uppstår i *Link*-profilen och vid en temperatur om 300 °C uppgår spänningen till cirka 47 MPa vilket överstiger den sträckgräns då det börjar plasticera enligt Ekvation 4.



Figur 33. Spänningsfördelning i aluminiumet vid 300 °C.

Den maximala töjningen hos skruvarna är mindre än aluminiumprofilerna vilket beror av bättre mekaniska materialegenskaper vid given temperatur.



Figur 34. Töjningsfördelning i skruvarna vid 300°C.

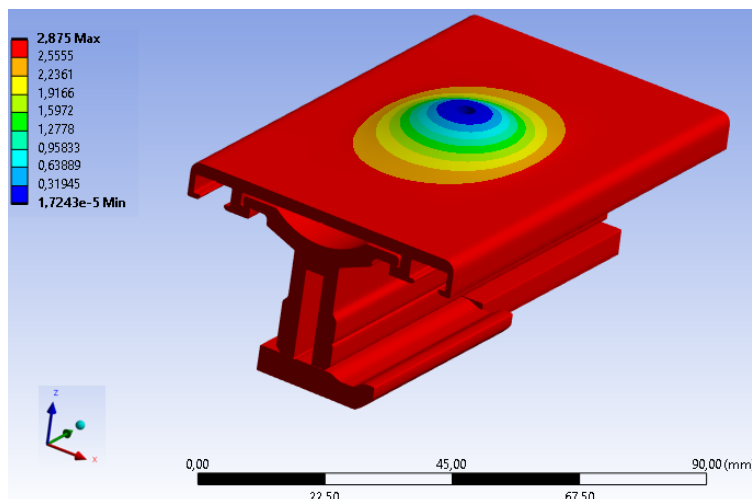
APPENDIX II

Den efterföljande tabell tillsammans med figurer avser presentera resultaten från den strukturella analysen.

Tabell 11. Spänning, deformation och töjning av strukturella komponenter vid 350°C brandexponering simultant med dimensionerande last.

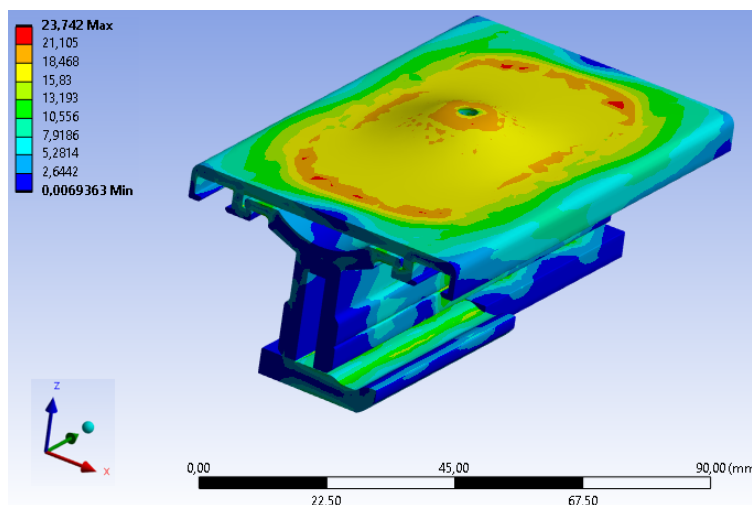
Komponent	Spänning [MPa]	Deformation [mm]	Töjning [%]
Hela geometrin	23,742	2,875	-
Rostfria stålskruvar	-	-	3,731

Den maximala deformationen vid 350°C skiljer sig från det tidigare beteendet vid 300°C. Vid denna temperatur ökar deformationen markant och kan nu ses över hela geometrin förutom runt skruvhålet.



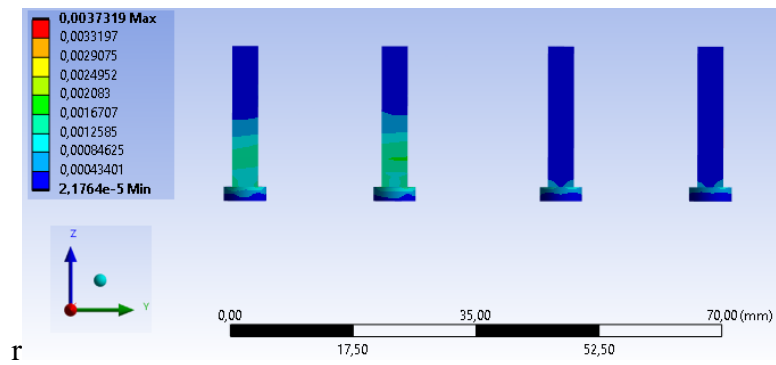
Figur 35. Deformationsfördelning visad över hela geometrin vid 350°C.

Vid 350°C reduceras sträckgränsen och spänningen befinner i brottstillstånd.



Figur 36. Spänningsfördelning i aluminiumet vid 350°C.

Den maximala töjningen hos skruvarna är mindre än aluminiumprofilerna vilket beror av bättre mekaniska materialegenskaper vid given temperatur.



Figur 37. Töjning i skruvarna vid 350 °C.



CHALMERS

