

## Horisontal avstivning med glassfelt

**Benedicte Dalen**  
**Cathrine Høglo Stenberg**

Master i Bygg- og miljøteknikk  
Innlevert: juni 2017  
Hovedveileder: Kjell A Malo, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet  
Institutt for konstruksjonsteknikk





## MASTEROPPGAVE 2017

FAGOMRÅDE: Trekonstruksjoner	DATO: 08. Juni 2017	ANTALL SIDER: 87
---------------------------------	------------------------	---------------------

TITTEL:

**Horisontal avstivning med glassfelt**  
Horizontal stiffening with glass field

UTFØRT AV:

Benedicte Dalen  
Cathrine Høglo Stenberg



SAMMENDRAG:

Oppgaven skal finne svar på om glass kan benyttes som horisontal avstivning, og hvilke parametere som har størst innvirkning på stivheten. Undersøkelsene er gjort gjennom et litteraturstudie og en numerisk modell av en tre-glassramme.

Glass har vært kjent for mennesker i flere årtusener og ble først benyttet som byggemateriale av romerne. Selv om den generelle oppfatningen av glass er at det er et sprøtt materiale med lav bæreevne, har det stort potensiale i moderne bygg. Kombinasjonen av glass og tre er utfordrende. For at glass og tre skal opptre som en samlet motstand, med lastbærende egenskaper, er det avgjørende med et kontinuerlig feste mellom glasset og rammen. I tillegg er type feste og bindemiddel viktige parametere som har innflytelse på lastkapasiteten og stivheten til rammen.

Lim er i dag et mye brukt bindemiddel mellom glass og tre. Av alle typer lim er det de halvstive limene som viser best egenskaper når det kommer til avstivning av en tre-glassramme. Dette fordi de gir tilstrekkelig stivhet i tillegg til deformasjonskapasitet. Nolax-C44.8505 er det limet som anses verdt videre forskning.

Resultatene fra den numeriske modellen viser størst utbytte ved symmetrisk plassering av en liten ramme med glassfelt i bærekonstruksjonen. De viser også at tykkelsen på glasset har betydning for stivheten. Det som hadde størst innvirkning var forholdet mellom høyde og bredde på glassfeltet, hvor høyere forhold gav betydelig høyere stivhet.

FAGLÆRER: Kjell Arne Malo

VEILEDER(E): Haris Stamatopoulos & Aivars Vilguts

UTFØRT VED: Institutt for konstruksjonsteknikk





## Forord

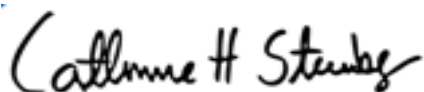
Denne masteroppgaven markerer avslutningen av sivilingeniørstudiet og er utarbeidet av to studenter ved NTNU i Trondheim, våren 2017. Studentene bak rapporten går studieretningen «konstruksjonsteknikk» med «prosjektering av konstruksjoner» som hovedprofil. Tema for oppgaven er horisontal avstivning med glassfelt og hvordan man på best mulig måte kan utnytte glassfeltet sine egenskaper. Dette ble valgt på bakgrunn av både egne og veileders interesseområder.

Oppgaven henvender seg spesielt til lesere med interesse for bygg og konstruksjoner. Det vil være en fordel om leserne har grunnleggende tekniske kunnskaper for å forstå innholdet.

Sist, men ikke minst, ønsker vi å rette en spesiell takk for god hjelp og oppfølging fra vår veileder professor Kjell Arne Malo, ved institutt for konstruksjonsteknikk. Han har gjennom hele prosessen vært engasjert og gitt konstruktiv tilbakemelding. I tillegg vil vi gjerne takke postdoktor Haris Stamatopoulos, stipendiat Aivars Vilguts og stipendiat Katarzyna Ostapska - Luczkowska, ved institutt for konstruksjonsteknikk for uvurderlig hjelp og nyttige råd og innspill.

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, NTNU

Trondheim, 8. Juni 2017



---

Cathrine Høglo Stenberg



---

Benedicte Dalen

## **Abstract**

This thesis marks the end of the Civil and Environmental Engineering studies at NTNU, with specialization within timber constructions. The goal of the thesis is to find out whether glass can be used as horizontal stiffening and decide which parameters have the greatest impact on the stiffness of a timber-glass frame. To find out, a literature study has been completed, in addition to building a numerical model of a timber-glass frame.

Glass has been known to people for several millennia and was first used as a building material by the Romans. As a building material, glass has gained an increasing share of the market due to improved mechanical properties and more precise and economical production. Although the general perception of glass is that it is a brittle material with low bearing capacity, it has great potential in modern buildings. As a construction material, glass has the capacity to stabilize a building, but this is still unusual in multi storey buildings. One of the reasons is the lack of available design rules in literature and standards.

As the glass and timber involves two materials with different physical properties, the combination can be challenging. In order to make glass and timber act as a total resistance, it is essential to have a continuous bonded line between the glass and the frame. In addition, the type of fastener and adhesive is important parameters that affect the load capacity and stiffness of the frame.

Glue is today a widely used adhesive between glass and timber. It binds together materials with different mechanical properties and ensures a smooth load transfer. Of all types of glue, it is the semi-rigid glues that shows best qualities when it comes to stiffening a timber-glass frame. This is because they provide adequate stiffness in addition to deformation capacity. Nolax-C44.8505 is the adhesive that is considered worth further research.

The results of the numerical model shows that symmetrical cross sections gain the highest stiffness. They also show that the thickness of the glass is important, but only up to a certain thickness. Further the results conclude that the ratio between height and width of the glass field had the greatest impact on the stiffness. Higher ratio gives a significantly higher stiffness.

## Sammendrag

Denne oppgaven er utarbeidet som en avslutning på masterstudiet Bygg- og miljøteknikk ved NTNU, retning konstruksjon, og da spesielt trekonstruksjoner. Oppgaven skal finne svar på om glass kan benyttes som horisontal avstivning, og hvilke parametere som har størst innvirkning på stivheten. For å finne ut av dette er det gjennomført et litteraturstudie, i tillegg til å bygge en numerisk modell av en tre-glassramme.

Glass har vært kjent for mennesker i flere årtusener og ble først benyttet som byggemateriale av romerne. Som byggemateriale har glass fått en økende andel av markedet på grunn av sine forbedrede mekaniske egenskaper og en mer presis og økonomisk produksjon. Selv om den generelle oppfatningen av glass er at det er et sprøtt materiale med lav bæreevne, har det stort potensiale i moderne bygg. Konstruksjonsmessig har glass kapasitet til å stabilisere en bygning, men dette er fortsatt uvanlig i bygninger på over to etasjer. En av grunnene er mangelen på tilgjengelige dimensjoneringsregler i litteratur eller standarder.

Kombinasjonen av glass og tre er utfordrende, da kombinasjonen involverer to materialer med forskjellige fysiske egenskaper. For at glass og tre skal opptre som en samlet motstand, med lastbærende egenskaper, er det avgjørende med et kontinuerlig feste mellom glasset og rammen. I tillegg er type feste og bindemiddel viktige parametere som har innflytelse på lastkapasiteten og stivheten til rammen.

Lim er i dag et mye brukt bindemiddel mellom glass og tre. Det binder sammen materialer med ulike mekaniske egenskaper og sørger for en jevn overføring av last. Av alle typer lim er det de halvstive limene som viser best egenskaper når det kommer til avstivning av en tre-glassramme. Dette fordi de gir tilstrekkelig stivhet i tillegg til deformasjonskapasitet. Nolax-C44.8505 er det limet som anses verdt videre forskning.

Resultatene fra den numeriske modellen viser størst utbytte ved symmetrisk plassering av en liten ramme med glassfelt i bærekonstruksjonen. De viser også at tykkelsen på glasset har betydning for stivheten, men bare opp til en grense. Det som hadde størst innvirkning var forholdet mellom høyde og bredde på glassfeltet, hvor høyere forhold gav betydelig høyere stivhet.

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>INNLEDNING</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>BAKGRUNNSTEORI</b>	<b>3</b>
<b>2.1</b>	<b>GLASS</b>	<b>3</b>
2.1.1	HISTORIE	3
2.1.2	GLASS SOM BYGGEMATERIALE	4
2.1.3	EGENSKAPER	4
2.1.4	GLASSTYPER	5
2.1.5	GLASSPRODUKTER	9
2.1.6	SAMMENLIGNING	12
<b>2.2</b>	<b>KOMPOSITTER AV TRE OG GLASS</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>FORBINDELSER</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>LIM</b>	<b>14</b>
2.4.1	SILIKON	15
2.4.2	AKRYL	15
2.4.3	POLYURETAN	16
2.4.4	EPOKSY	16
<b>2.5</b>	<b>AVSTIVNING</b>	<b>17</b>
2.5.1	GLASS SOM AVSTIVNING	17
2.5.2	TEST AV RAMMER	17
2.5.3	FESTETYPER	18
<b>2.6</b>	<b>SKJÆR- OG STREKKAPASITET AV LIMET</b>	<b>22</b>
2.6.1	STREKKTEST	22
2.6.2	SKJÆRTEST	24
<b>2.7</b>	<b>KONKLUSJON BAKGRUNNSTEORI</b>	<b>26</b>
<b>3</b>	<b>NUMERISK MODELLERING</b>	<b>29</b>
<b>3.1</b>	<b>ELEMENTER</b>	<b>29</b>
3.1.1	SKJÆRLÅSNING OG TIMEGLASSKONTROLL	29
3.1.2	SKALLELEMENTER	31
3.1.3	SOLIDELEMENTER	33
<b>3.2</b>	<b>KOHESIV SONE-MODELLERING</b>	<b>33</b>
<b>3.3</b>	<b>MATERIALMODELL - LIM</b>	<b>37</b>

<b>4</b>	<b>NUMERISK MODELL</b>	<b>39</b>
4.1	NUMERISK SMÅSKALAFORSØK - GLASSPANEL	40
4.2	NUMERISK SMÅSKALAFORSØK - KOHESIVT ELEMENT OG KOHESIV OVERFLATE	42
4.3	HOVEDMODELLEN	44
4.4	AVVIK	51
<b>5</b>	<b>PARAMETERSTUDIE</b>	<b>53</b>
5.1	PLOSSERING	53
5.2	TYKKELSE PÅ GLASSET	56
5.3	STØRRELSE PÅ GLASSFELTET	59
5.4	SKJØT VS. DOBBEL OVERLAPPSKJØT	61
<b>6</b>	<b>KONKLUSJON OG VIDERE FORSKNING</b>	<b>63</b>
<b>7</b>	<b>REFERANSER</b>	<b>65</b>
<b>8</b>	<b>VEDLEGG</b>	<b>70</b>



# 1 Innledning

I byggesektoren er det en økende etterspørsel av bruken av store transparente elementer i private bygg og næringsbygg (Nicklisch & Serrano, 2014). Mye av grunnen til dette er forskning som viser at dagslys spiller en viktigere rolle for vår biologiske funksjon enn tidligere antatt. I tillegg oppholder man seg i dag mer inne enn tidligere. Dette har ført til at investorer og arkitekter sikter mot å maksimere tilførselen av naturlig lys. Fra gammelt av har hovedmålet med vinduer vært å slippe inn dagslys, gi utsyn og beskytte mot vær og vind. Dette er fremdeles viktig, men det har i tillegg blitt et økt fokus på å skape et godt innemiljø med lavest mulig energiforbruk og miljøpåvirkning. I tillegg har utviklingen av glass gjort det til et sterkere byggemateriale, noe som gjør det mer egnet som del av bærekonstruksjonen (Pilkington, 2015). Dette fører til at glass i dag kan bli brukt til mer enn å bare slippe inn naturlig lys (Leskovar & Premrov, 2013). Glass tilbyr gjennomsiktighet, i tillegg til utmerkede styrke- og stivhetsegenskaper. Derimot viser glass sprø brudd og dimensjoneringen er for øyeblikket begrenset (Nicklisch & Serrano, 2014). Trevirke er i motsetning til glass et velkjent materiale som er mye brukt i tillegg til å være det eldste byggematerialet vi har. Det har veletablerte rutiner og standarder for dimensjonering. Tre er et duktilt materiale under trykk, som er å foretrekke, da en får en forvarsel før brudd (Nicklisch & Serrano, 2014).

Som en naturlig råvare, representerer tre en av de beste valgene for energieffektiv bygging, da det også er et materiale med gode termiske egenskaper, sammenlignet med andre byggematerialer. Dessuten spiller det en viktig rolle i reduksjon av CO<sub>2</sub>-utslipp og sikrer et komfortabelt innemiljø. Tatt i betraktning den økende betydningen av energieffektive byggemetoder, vil bruken av tre spille en stadig viktigere rolle i fremtiden (Leskovar & Premrov, 2012).

Med den teknologiske utviklingen er tre og glass i ferd med å bli viktige konstruksjonsmaterialer, da integrering av store glassflater i trekonstruksjoner representerer et stort potensiale for miljøvennlig og energieffektive bygninger (Piculin, Ber, Premrov & Brank, 2014). Tre- og glasskonstruksjoner har forbedret seg kraftig de siste årene når det kommer til styrke og termiske egenskaper. Glass som byggemateriale har derfor et stort potensiale (Leskovar & Premrov, 2012). På den andre siden er det å kombinere de to materialene komplisert (Leskovar & Premrov, 2013).

Med bakgrunn i interessen for glass som konstruksjonsmateriale, er denne rapporten utarbeidet for å kartlegge bruken av glass, hvilke egenskaper det har, hvordan kompositter av tre og glass kan simuleres numerisk og hvilke parametere som har innvirkning på stivheten.

Hovedfokuset har vært å finne forskning hvor glass er benyttet som avstivning av en treramme og opprette en numerisk modell for å fastslå påvirkningen glass har på stivheten. Starten på oppgaven er derfor en teoridel, som begynner med en innføring i glass, dets egenskaper, forskjellige glasstyper og glassprodukter. Så går det over til tre-glasskompositter og hva som er viktig å tenke på når tre og glass skal kombineres. Videre kartlegges ulike forbindelser før tidligere forskningsresultatene presenteres. En konklusjon over hva som er de beste løsningene avslutter kapittelet.

Videre i oppgaven presenteres modelleringsteori og hvordan modellen er modellert. Verdier og metoder som er benyttet samt resultater fra beregninger i FEM-programmet Abaqus, legges frem. Oppgaven avsluttes med et parameterstudie hvor det er gjennomført undersøkelser på hva som har innvirkning på den horisontale avstivningen av rammen.

I oppgaven er det et hovedfokus på glasset da det er dette som undersøkes om kan benyttes som horisontal avstivning. Det er derfor valgt å ha fokus på de mest vanlige glasstypene og -produktene som en del av et veggelement. Aspekter som kostnader, isoleringsevne og lignende har ikke blitt vurdert. Vi har også valgt å avgrense festemidlene, festetypene og verdier til den numeriske simuleringen med innholdet og resultatene i forskningsrapportene. De numeriske modellene er avgrenset til å benytte vanlig glass (floatglass) og tar ikke høyde for parametere som fukt og temperatur.



## **2 Bakgrunnsteori**

Dette kapitlet presenterer i hovedsak det som er nødvendig å vite om glass, hvordan det oppfører seg og hva som finnes av ulike glasstyper og -produkter. I tillegg viser tidligere forskning at hvordan glasset er festet til trevirket og med hvilket lim glasset er festet med har stor innvirkning på stivheten til trerammen. Dette vil derfor også være en del av fokuset i kapitlet.

### **2.1 Glass**

Dette delkapitlet omhandler glassets historie, glass som byggemateriale og glassets egenskaper. I tillegg vil ulike glasstyper og glassprodukter bli beskrevet. Delkapitlet avsluttes med en tabell som oppsummerer og sammenligner ulike glass.

#### **2.1.1 Historie**

Glass har vært kjent for mennesker i flere årtusener og ble først benyttet som byggemateriale av romerne (Hess, 2004). De var da i stand til å lage glassruter på omtrent en kvadratmeter. Da det romerske imperiet falt ble mye av kunnskapen om glass tapt, inkludert produksjonsprosessen. Produksjonen av glass ble først startet opp igjen under renessansen med et ønske om å øke glassets optiske kvalitet. Glassene ble polert og speilglass fremstilt, noe som var en kostbar prosess. Det var først ved slutten av den industrielle revolusjonen masseproduksjonen av glass begynte. Noe som førte til et standardprodukt med akseptabel kvalitet (Huveners, 2009).

I 1952 ble basisen for glassproduksjonen av floatglass oppfunnet av Sir Alastair Pilkington, som i dag det mest brukte glasset (Leskovar & Premrov, 2013). Fra gammelt av hadde ikke glass noen annen funksjon enn å skille inne fra ute, gi utsyn og beskytte mot vær og vind. Selv om det med fordel slapp naturlig lys inn medførte det store varmetap om vinteren og overoppheting om sommeren (Winter et al., 2010). I dag har det blitt viktig å skape best mulig inn klima, med lavest mulig energiforbruk og miljøpåvirkning (Pilkington, 2015). Dette, i tillegg til et økt ønske om gjennomsiktige bygningselementer som en del av den moderne arkitekturen, har økt behovet for bruken av glass (Winter et al., 2010). Den teknologiske utviklingen på glass frem til i dag, muliggjør denne bruken (Stepinac et al., 2016).

### **2.1.2 Glass som byggemateriale**

Glass, som byggemateriale, har fått en økende andel av markedet grunnet forbedrede mekaniske egenskaper og en mer presis og økonomisk produksjon. Selv om den generelle oppfatningen av glass er at det er et sprøtt materiale med lav bæreevne, har det et stort potensiale i moderne bygg. Frem til nå har det kun vært brukt som sekundærkomponent eller fasadeelement, men takket være den teknologiske utviklingen har glass blitt kapabel til å overføre betydelige krefter (Stepinac et al., 2016).

Bruk av glass som en del av bærekonstruksjonen er derimot delvis begrenset på grunn av manglende retningslinjer og standarder. Eurokode for strukturelt glass er fremdeles under utarbeidelse, så det finnes kun grove retningslinjer for bruk og utforming av glasselementer. Dette fører til at glasset ofte overdimensjoneres (Feldmann & Kasper, 2013).

Fordeler med dagens glass er at en effektiv energikontroll oppnås. I tillegg tilfredsstillende det høye krav til brannvern, støydemping, personsikkerhet og selvrensing. Mulighetene til å kombinere forskjellige glass gjør det også mulig å utnytte forskjellige funksjoner i en og samme konstruksjonsdel (Pilkington, 2015).

### **2.1.3 Egenskaper**

Glass er et uniformt materiale, som før det blir nedkjølt til et fast stoff er en væske med tilfeldig orienterte molekyler. Nedkjølingen skjer uten krystallisering. Det består av kombinasjoner av bånd med forskjellige materialer og har derfor ingen kjemisk formel. De ulike båndene fører til at lysbølgene kan passere relativt uforstyrret gjennom materialet og gjør glasset transparent. Glass er også amorf-isotrop, som vil si at egenskapene ikke avhenger av retning (Schittich, Staib, Balkow, Schuler & Sobek, 2007).

Glass er et ikke-duktilt materiale og vil derfor ikke få varige deformasjoner, men gå tilbake til sin opprinnelige form når lasten fjernes, hvis det ikke allerede har gått til brudd (Loughran, 2003). Det er perfekt elastisk helt til brudd og vil ikke vise plastiske deformasjoner før de første sprekkene. En får derfor ingen forvarsel før glasset knuses. Egenskapene kan sammenlignes med betong (Leskovar & Premrov, 2013). Det har høy trykkfasthet, men er et sprøtt materiale med lav strekkfasthet. Derfor er strekk som regel kilden til brudd i glass (Winter et al., 2010). Egenskapene til glass er vist i Tab. 2.1.

Tab. 2.1: Properties of glass (Winter et al., 2010)

Tensile strength	Compressive strength	Density	E-module	Temperature coefficient of expansion
45 N/mm <sup>2</sup>	700 – 900 N/mm <sup>2</sup>	2500 kg/m <sup>3</sup>	70 000 N/mm <sup>2</sup>	9x10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>

Glass har bedre kapasitet for jevnt fordelte laster enn punktlaster og tåler korttidslaster bedre enn langtidslaster. Det er derfor viktig at glasset er festet kontinuerlig rundt hele kanten av glasset, da det vil føre til en fordelaktig jevnt fordelt lastoverføring. På denne måten unngås spenningstoppene som er med på å øke sannsynligheten for brudd (Winter et al., 2010).

I realiteten kan glass tåle høyere laster enn stål og den høye elastisitetsmodulen på 70 GPa er over dobbelt så høy som for eksempel for betong. Ulempen er at den manglende duktiliteten gjør glasset avhengig av at store deformasjoner ikke oppstår i materialene som er koblet til glasset. Deformasjonene vil gi punktlastoverføring og større konsentrasjoner av trykk- og strekkrefter i glasset, noe som vil føre til brudd ved en lavere last enn hvis lastoverføringen til glasset holdes kontinuerlig. I kombinasjon med andre materialer er det derfor viktig at bindemiddelet er relativt fleksibelt og har evnen til å overføre last til og fra glasset (Loughran, 2003).

En av de større utfordringene med glass er at styrkeegenskapene til to helt like glass kan variere med en faktor på tre. Det gjør det derfor umulig å forutsi den eksakte styrken til et glass før det er testet og ødelagt. Denne uforutsigbarheten avhenger av det gitte glassets sprekker, feil, defekter og andre karakteristikker. For å håndtere dette benyttes bruddsannsynlighet. I de fleste tilfeller blir glasset dimensjonert for å møte en bruddsannsynlighet på 8/1000. Altså vil 8 av 1000 glass knuses ved den gitte lasten. Ønskes det å redusere risikoen for brudd blir en nødt til å anta en lavere kapasitet på glasset, og det vil bli nødvendig å øke tykkelsen for å oppnå ønsket kapasitet (Loughran, 2003). En økning av tykkelsen vil øke kapasiteten da styrken til glasset øker proporsjonalt med tykkelsen (Pilkington, 2015).

#### 2.1.4 Glasstyper

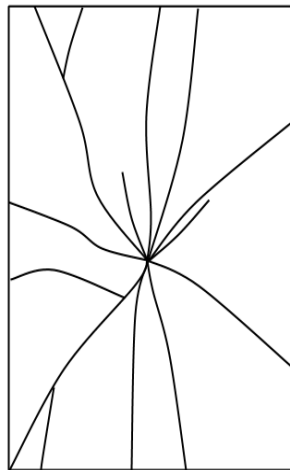
Glass finnes i uendelig mange variasjoner og kombinasjoner. Noen av parameterne som bør tas til betraktning ved bruk av glass er type glass, tykkelse, avstand mellom glassene, samt hva eventuelle tomrom skal fylles med (Pilkington, 2015). I dette kapitlet vil noen av de mest kjente og brukte glasstypene presenteres.

##### Floatglass og gløding

Det regnes med at mer enn 90 % av glass i bygninger er floatglass, noe som gjør det til det mest brukte glasset i dagens samfunn (Leskovar & Premrov, 2013). I dagligtale kalles det floatglass eller bare glass, men går også under navnene kalksodasilikatglass, natronkalkglass og sodalimeglass (Mirit glas, u.d.a).

Proessen for produksjon av floatglass ble oppfunnet av Sir Alastair Pilkington i 1952. Selve glasset fremstilles av sand, soda og kalkstein med små tilsetninger av dolomitt og feltspat som smeltes sammen (Pilkington, 2015). Den smeltede glassmassen helles på et bad av flytende tinn for å jevne det ut og oppnå et resultat med glatte overflater på begge sider. Neste steg i prosessen er glødning i en ovn kaldt lehr.

Glødning skjer etter at glassmassen er formet. Glasset blir gradvis nedkjølt fra en høy temperatur, mens det sendes over det flytende tinnnet. Dette gjøres for å frigjøre de indre restspenningen i glasset som oppstår under tidligere steg i produksjonen. At glasset glødes er avgjørende for holdbarheten. Resultatet av glødning er et produkt med nesten perfekte parallelle og blanke overflater som er fri for optiske forstyrrelser. Glødes ikke glasset på en tilfredsstillende måte vil de termiske påkjenningene, som et resultat av bråkjøling, redusere styrken og stabiliteten av glasset over tid (Mocibob, 2008).



*Fig. 2.1: Breakage of float glass*

Det er ikke uvanlig at en svært liten del av tinnset integreres i glasset. Tinnset kan påvirke overflaten og forårsake overflatedefekter som reduserer styrken på det ferdige glasset. Fordelen derimot med denne prosessen er at det er mulig å produsere store partier av høy kvalitet, i tillegg til at det er mulig å farge glasset mens det produseres (Schittich et al., 2007). Ulemper med floatglass er at det kun tåler en temperaturendring på 40 °C og ved brudd vil det knuses i store, spisse og skarpe biter (se Fig. 2.1), som kan forårsake alvorlig skade. Byggeforskrifter begrenser derfor bruken på steder hvor det er høy risiko for at det skarpe knuste glasset vil påføre ekstra skade på blant annet mennesker (Mocibob, 2008). For å unngå et slikt brudd kan glasset herdes (Mirit glas, u.d.a).

### **Herdet glass**

Det er flere måter og prosesser for å herde glass. To av dem er kjemisk herdet glass og termisk herdet glass.

*Kjemisk herdet glass* er kjent for sin høye styrke. Glassets overflate blir styrket kjemisk ved å senke det ned i et bad av kaliumnitrat (kaliumsalt) oppvarmet til 450 °C (Mocibob, 2008). I denne prosessen byttes de mindre natriumionene fra glassets overflate med de større kaliumionene fra det flytende kaliumnitrattet. Utvekslingen tar 16 – 18 timer. Det skapes en trykksone i glassets overflate og en strekksone i glassets kjerne. Da glass er sårbart for strekkspenninger, fører de permanente trykkspenningene i glassets overflate til at tidspunktet for brudd kan utsettes (Mirit glas, u.d.b). Overflatetrykket kan nå opp til 690 MPa (Mocibob, 2008).

En fordel med kjemisk herdet glass er at det kan bearbeides etter herdeprosessen. Det kan slipes, skjæres og bores hull i, men gjøres dette mister glasset sin ekstra styrke i et område på 20 mm fra kuttet. I tillegg har kjemisk herdet glass forbedret slagstyrke, bøyestyrke, økt resistens for temperaturendringer og forbedret røpefasthet. På tross av dette kan det ikke klassifiseres som et sikkerhetsglass, da det ved brudd knuses som vanlig glass i store skarpe biter, se Fig. 2.1 (Mirit glas, u.d.b). Klassifisering som sikkerhetsglass er derimot mulig hvis glasset lamineres (Mocibob, 2008).

*Termisk herdet glass* kan deles inn i fullstendig herdet glass og delvis herdet glass.

*Fullstendig herdet glass* produseres ved å varme opp glass til transformasjonspunktet, normalt ved 630 – 650 °C. Når denne temperaturen er nådd bråkjøles glasset normalt med bruk av kald luft. Den raske avkjølingen vil resultere i at overflaten avkjøles og trekker seg raskere sammen enn kjernen i glasset. Når kjernen senere avkjøles og trekker seg sammen, vil det trekke yttersjiktet sammen ytterligere og skape trykkspenninger i overflaten og strekkspenninger i midtsjiktet og glasset blir forspent. Siden glasset går til brudd ved strekk, vil glasset tåle større påkjenninger enn et ikke-forspent glass (Schittich et al., 2007).

I motsetning til kjemisk herdet glass kan ikke glasset bearbeides etter herdeprosessen (Mirit glas, u.d.b). Fullstendig herdet glass må kuttes til riktig størrelse og presses til riktig form før temperering. Det må også være ferdig polert i kantene og eventuelle hull må være laget på forhånd (Mocibob, 2008).

Ved brudd vil glasset knuses i små biter med sløve kanter, noe som reduserer risikoen for skade og gjør glasset velegnet som sikkerhetsglass (Schittich et al., 2007). Fullstendig herdet glass brukes når det er viktig med høy styrke, varmemotstand og sikkerhet (Mocibob, 2008).

*Delvis herdet glass*, også kalt varmemotsterket glass, fremstilles vanligvis på samme måte som fullstendige herdet glass, men med en langsommere avkjøling. Dette fører til lavere indre spenninger. Følgelig blir bøyestyrken noe lavere, og vil være en mellomting av fullstendig herdet glass og glødet glass (Mocibob, 2008).

Ved laminering kan delvis herdet glass ha et fortrinn da bruddstykkene blir større. Dette fører til at glasset kan beholde noe av bæreevnen etter brudd. De større bruddstykkene vil i tillegg føre til bedre gjennomsiktighet (Mocibob, 2008).

### 2.1.5 Glassprodukter

For å endre eller bedre egenskapene til glass er det mulig å kombinere ovennevnte glasstyper til glassprodukter. Dette gjøres for å kombinere forskjellige funksjoner. Ulike produkter er beskrevet i dette delkapittelet.

#### Laminert glass

Laminert glass ble først fremstilt i 1903 av den franske kjemikeren Eduard Benedictus (Mocibob, 2008) og består av minst to lag glassruter som er bundet sammen av et mellomsjikt som vist i Fig. 2.2 (Schittich et al., 2007). Mellomsjiktet er en gjennomsiktig plastfolie som blir varmet opp til 140 °C og klemt mellom glassplatene. For å få ut alle luftboblene blir det presset sammen med et trykk på opp til 14 bar.

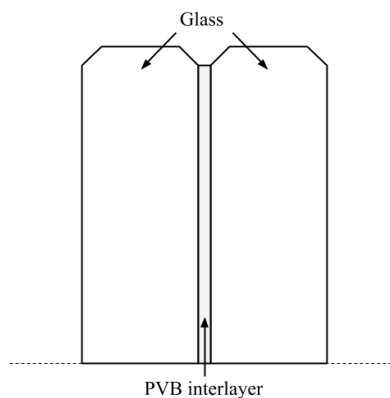


Fig. 2.2: Glass laminated with PVB layer (Mocibob, 2008)

Den mest benyttede folien består av PVB (polyvinylbutyral) og har en tykkelse på 0,38 mm. Ved brudd i glasset holder folien fragmentene sammen og hindrer glasset fra å bryte opp i store skarpe stykker. På denne måten kan laminert glass klassifiseres som et sikkerhetsglass. PVB-mellomsjiktet gir god isolasjon og blokkerer delvis UV-lys (Mocibob, 2008).

Når to glass er laminert vil kreftene fordeles likt mellom de to glassene. Selv om laminert glass kan benyttes som sikkerhetsglass er ikke to-lags laminert glass like sterkt som tilsvarende tykkelse på en hel glassplate. For eksempel vil to laminerte glassruter med tykkelse 15 mm ha tilsvarende styrke som en glassrute på 21 mm, ikke 30 mm. Et annet eksempel er hvis tre glass med tykkelse på 10 mm lamineres. Da vil styrken på det laminerte glasset tilsvare styrken til et 17 mm tykt glass. Det vil si at jo flere lameller, desto mer styrke mister glasset (Schittich et al., 2007) (Loughran, 2003).

## Isolerglass

Isolasjonsenheter består av minst to separate ruter som blir holdt fra hverandre ved hjelp av avstandsstykker montert rundt kanten som vist i Fig. 2.3 (Schittich et al., 2007). Dette mellomrommet er til for å forbedre glassrutens termiske ytelse. Mellomrommet kan fylles med luft eller gass, som for eksempel argon eller krypton, noe som vil hindre kondensering og forbedre isoleringsevnen.

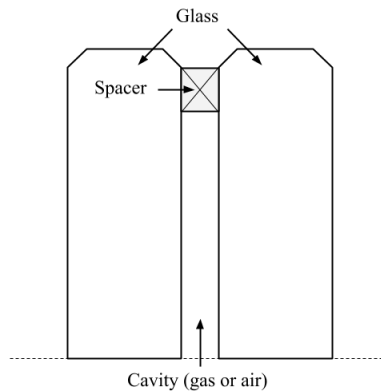


Fig. 2.3: Glass isolated with gas or air

Et mellomrom på 16 mm er ofte betraktet som den optimale bredden, men dette avhenger av mange faktorer, som blant annet størrelsen på vinduet og temperaturforskjellen mellom rutene (Mocibob, 2008). Det vanligste er to-lags isolerruter, men det finnes også ruter med tre lag som er mer vanlig i områder med veldig kaldt klima. For at glassene skal tilfredsstillte gitte krav må det settes sammen på fabrikk, med riktig utstyr, slik at det får rett størrelse og de rette egenskapene (Mocibob, 2008).

## Brannglass

En av de største fordelene med brannglass er at de fungerer som et passivt branntiltak - en brannbeskyttelse som ikke er avhengig av batterier eller igangsettelse. Eksempler på dette er brannvegger og branndører, som skal hindre brannen i å spre seg til andre deler av bygget eller tilstøtende bygg. Brannsikre glass åpner for muligheten med gjennomsiktige brannvegger, som vil ha den effekten av at brannen kan oppdages tidligere (TGP, 2014).

En brann gir elektromagnetiske bølger som beveger seg med lysets hastighet. Det er derfor viktig at glasset er godt isolert for at det skal kunne brukes som en brannvegg. Hvis glasset ikke er isolert mot disse bølgene vil de treffe gjenstander i andre rom som vil absorbere bølgene og omforme dem til varme. Denne varmen, hvis den blir høy nok, vil føre til at gjenstanden antennes, og må derfor forhindres (Glazette, 2014).



Det finnes flere leverandører av brannsikre glass. De to største er Pilkington og Saint Gobain. Likheten mellom leverandørene er at de begge har glass som kan stå i mot brann opp til 120 minutter.

Et brannsikkert glass kan ha flere sjikt. Fig. 2.4 viser et eksempel på hvordan et brannglass kan være bygd opp. De isolerende sjiktene består av et vannstoff eller gel, hvor det ytterste av sjiktene vil ekspandere ved brann og danne et opak. Dette er en ugjennomsiktig barriere som enten absorberer eller reflekterer elektromagnetisk stråling. Ekspanderingen vil føre til at det ytterste glasset knuses, men det sørger i tillegg for at glasset holder seg oppe i konstruksjonen (Vaagan, 2007). Når opak dannes vil fordelene med gjennomsiktighet mistes, men Pilkington har også produkter som sørger for gjennomsyn og kontakt med tilstøtende rom. De resterende sjiktene vil fremdeles være intakte og temperaturen på siden som vender vekk fra brannen vil aldri bli høyere enn 100 grader. Det isolerende sjiktet kan sammenlignes med brannisolerende maling som blir benyttet for å dekke til stålsøyler (Pilkington, 2015).

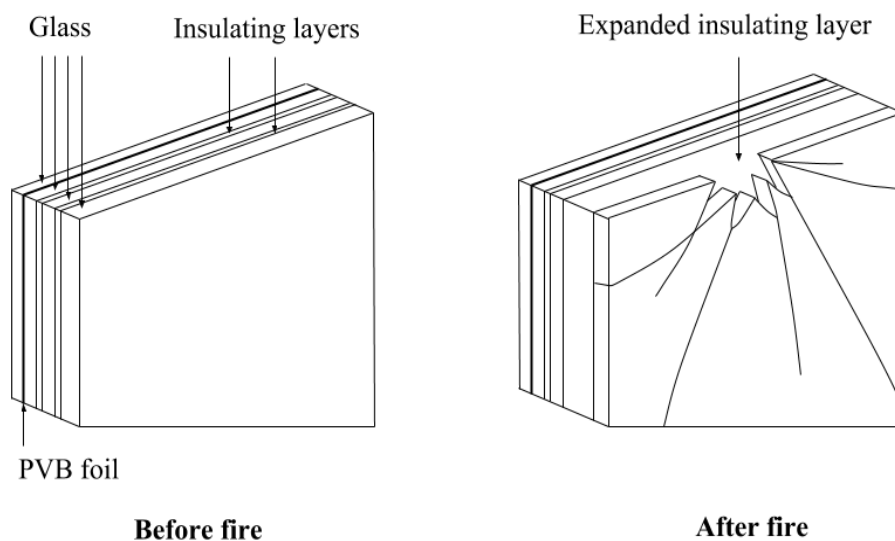


Fig. 2.4: Example of a fire glass (Pilkington, 2015)

## 2.1.6 Sammenligning

I Tab. 2.2 er de ulike glasstypenes styrke og bruddmønster listet opp.

Tab. 2.2: Comparison of glass types and products

Glass type	Strength	Crack pattern
<i>Float glass</i>	Proportional to thickness	Large and sharp shards
<i>Annealed glass</i>	Between float glass and partially tempered glass	Large and sharp shards
<i>Chemical tempered glass</i>	Very high 3 - 5 times float glass strength	Large and sharp shards
<i>Fully tempered glass (Thermally toughened)</i>	High 3 - 5 times float glass strength	Small shards with dull edges
<i>Partially tempered glass (Thermally toughened)</i>	Between fully tempered and annealed glass	Large and sharp shards, but smaller shards than annealed glass
<i>Laminated glass</i>	A bit lower than annealed glass with the same thickness	Stays together after damage
<i>Insulating glass</i>	Depends on glass type	Depends on glass types
<i>Fire glass</i>	Depends on glass type, but usually very large strength	Stays together after damage

## 2.2 Kompositter av tre og glass

Kombinasjonen av glass og tre for å få et lastbærende komposittelement er som nevnt utfordrende. Type binding og bindemiddel er derfor de viktigste parameterne å ta til betraktning da det har stor innflytelse på lastkapasiteten og stivheten til elementet (Ber et al., 2014b).

Glass er et transparent, sprøtt materiale, med lav deformasjonskapasitet. Dets lave motstand mot brudd er avhengig av at tilstøtende materialer ikke deformerer seg (Loughran, 2003). Derimot har glass høy styrke og stivhet som trerammer kan ta fordel av. Ettersom tre er et elastisk materiale kan det oppstå deformasjoner. For å ta opp disse deformasjonene er det ideelt med et tøyelig og fleksibelt festemiddel som samtidig opprettholder den statiske motstanden (Stepinac et al., 2016). På en annen side vil halvstive og stive lim gi høyere stivhet og styrke (Nicklisch et al., 2014). Type feste og bindemiddel mellom materialene er derfor avgjørende for å oppnå høyest mulig utnyttelse (Ber et al., 2014b).

Andre parametere som har en betydelig innvirkning på responsen til et tre-glasskompositt veggelement under statiske og dynamiske laster er (Ber et al., 2014b):

- Holdbarhet av festemiddelet
- Tykkelse og bredde på festemiddelet
- Glasstype
- Tykkelsen på glasset
- Posisjonen til glasset

Tre har nesten lik kapasitet når det kommer til trykk som betong, men har betydelig høyere strekkkapasitet. I tillegg har trevirket betydelig lavere vekt, men på en annen side lav elastisitetsmodul (Leskovar & Premrov, 2013).

I likhet med glass er også tre et miljøvennlig materiale og CO<sub>2</sub>-utslippene under produksjon er lave. Sammenlignet med betong og stål er utslippene henholdsvis tre og seks ganger lavere (Leskovar & Premrov, 2013). I tillegg til ekstremt høy estetisk og økologisk verdi, vil systemer sammensatt av tre og glass også utmerke seg med tanke på kostnadseffektivitet, og er preget av en betydelig god lastoverføringsevne (Stepinac et al., 2016).

Med kompositter av tre og glass vil det også være store muligheter for prefabrikkering. Oppgradering av bygninger med prefabrikkerte elementer i tre er allerede tatt i bruk av norske produsenter, og det er forventet en økende interesse fremover (Time, 2014). Prefabrikkering kan bidra til å tilfredsstille dagens høye krav til produksjonskostnader og feilfrie bygg. I tillegg kan en høyere grad av prefabrikkering senke byggetiden betraktelig, spesielt på byggeplass (Berg, 2008).

### **2.3 Forbindelser**

Det skilles mellom to ulike typer forbindelser, lineær bæring og punktbæring (Huveners, 2009).

Punktbæring kan være festeklemmer eller punktfester. Festeklemmene er lokalt plassert langs glassets kanter og i hjørnene. Klemmene festes på begge sider av glasset og har et elastisk materiale som er i kontakt med glasset. Punktfestene består av bolter som er posisjonert langs glassets kanter, hvor lastene overføres til støttestruksjonen gjennom bolten i form av bøyning og skjær (Huveners, 2009).

Den andre typen forbindelse er lineær bæring. I motsetning til punktfester kan et kontinuerlig feste mellom glass og ramme overføre krefter i planet. Dette kontinuerlige festet introduserer lasten gradvis inn i glassruten og sprer lastene jevnt fordelt i planet mellom glassruten og rammen. I tillegg former det et tynt lag som hindrer direkte kontakt mellom rammen og glasset, se Fig. 2.5 (Huveners, 2009).

På tross av ulempene med limte forbindelser, som for eksempel aldring, konkluderer Huveners (2009) at en limt forbindelse er riktig teknikk for glasskonstruksjoner - med feste på to, tre eller fire sider av glasset. På bakgrunn av dette og det faktum at punktbæring ikke overfører laster i planet, er det valgt å se videre på lineær bæring med kontinuerlig limforbindelse i denne oppgaven.

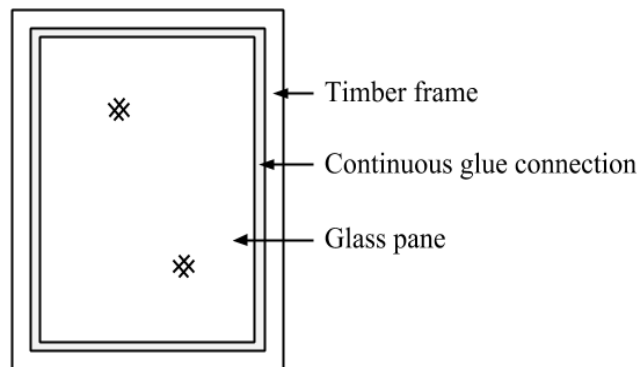


Fig. 2.5: Continuous glue connection (Huveners, 2009)

## 2.4 Lim

Lim binder sammen materialer med ulike mekaniske egenskaper og sørger for en jevn overføring av last. Det er derfor et mye brukt bindemiddel mellom glass og tre (Ber et al., 2013). Med et kontinuerlig limfeste oppnås en jevn lastoverføring, samt en lineær spenningsfordeling som gjør at glasset blir en del av bærekonstruksjonen (Winter et al., 2010).

Nicklisch & Serrano (2014) klassifiserer limene i tre grupper:

- **Fleksibelt lim:** Lav stivhet og styrke, men med stor deformasjonskapasitet (silikon)
- **Halvstivt lim:** Balanse mellom styrke og fleksibilitet (polyuretan)
- **Stivt lim:** Svært motstandsdyktig, men ufleksibelt (akryl og epoksy)

De *fleksible limene* vil gi en betydelig lavere stivhet enn de stive limene da de tillater større deformasjoner mellom glassplaten og trerammen. På en annen side er dette nødvendig, spesielt ved høy temperatur og endring i luftfuktighet, da det påvirker trevirkets dimensjoner. Endringen vil skape termiske tøyninger mellom trerammen og glassplaten som vil tas opp av limet hvis det er tilstrekkelig fleksibelt (Piculin et al., 2014).

*Stive lim* vil derimot ha høy stivhet. Den høye stivheten gir mulighet for høyere lastoverføring sammenlignet med de fleksible limene. På en annen side vil dette føre til problemer ved høye temperaturer og endring av luftfuktighet da trevirket utvides. Utvidelsen vil føre til at den stive bindingen skaper overspenninger og dermed brudd i glasset (Piculin et al., 2014).

Videre i dette kapittelet følger generelle fakta om de mest vanlige limtypene. Deler av teorien er hentet fra ulike artikler hvor det er gjennomført forsøk på tre- og glasskompositter.

#### **2.4.1 Silikon**

Silikon er et tilpasningsdyktig lim som kommer i flere varianter. En av de største fordelene er at selv etter herding er limet fremdeles formbart uten å miste sin styrke eller heft (Notmywar, 2016a). Det er i tillegg et romtemperaturherdnende materiale med svært bra motstandsdyktighet mot høye temperaturer, kjemikalier, fukt, vær og UV-lys. Det fester seg lett på metaller, glass, silikongummi og enkelte fete plaster som ellers er vanskelige å lime (Tribotec, u.d.). En annen fordel er at det har god motstand mot splittekrefter i temperatursjiktet -60 til 270 grader (Ber et al., 2013).

Hvis en tre-glasskompositt skal benyttes som stabiliserende komponent bør derimot et stivere lim benyttes. Mislav Stepinac med flere (2016) har utført tester med både silikon og akryl som viste at bjelker limt med silikon har 20 % lavere stivhet enn de limt med akryl.

#### **2.4.2 Akryl**

Komponenter som er satt sammen ved bruk av akryl er å regne som strukturelt forbundet, noe som gjør det mulig å forenkle konstruksjonen. Ved bruk av akryl kan en i tillegg spare kostnader da tradisjonelle mekaniske festemidler som skruer, nagler og sveising kan erstattes. Det er også mulig å opprettholde lastoverføringsegenskapene selv om materialtykkelsen reduseres (Loctite, u.d.). Akrylbaserte lim bidrar til en jevn overføring av last, som hindrer materialtretthet og materialsvikt, og kan i likhet med silikon festes lett på ulike materialer (Ber et al., 2013).

Forsøk utført av Blyberg (2011) har vist at akryl har høyere spennings- og skjærkapasitet enn silikon- og polyuretanbaserte lim og kan i tillegg oppnå 75 % høyere horisontal lastbærende kapasitet (Blyberg, 2011).

Dr. Boštjan Ber et al. (2013) har utført mange ulike tester på tre-glasselementer. De har blant annet sammenlignet kraftoverføringene til silikon og akryl. Ved bruk av en 10 mm tykk glassplate festet til en treramme med mål 1.2 x 2.4 meter viste testene at akrylet overførte 180 kN vertikallast og 70 kN horisontallast, mens systemet med silikon overførte omtrent 40 % lavere laster (Ber et al., 2013).

### **2.4.3 Polyuretan**

Polyuretan er en hvilken som helst polymer som består av en repeterende kjede av organiske enheter bundet sammen av uretan-koblinger. De dannes som et resultat av komplekse kjemiske reaksjoner og utgjør en rekke forskjellige former. Noen av disse polymerne blir til polyuretanlim. De kan ofte være ekstremt sterke og har blitt stadig mer aktuelt for husholdnings- og industribruk. Superklebende polymerer er rapportert å ha best balanse mellom styrke og duktilitet (Blyberg, 2011).

I likhet med de andre limtypene kan det benyttes i sammenheng med et bredt spekter av materialer, men i motsetning til de fleste andre limtypene har ikke porøsiteten til materialet noe å si. Det er også svært vannbestandig, motstandsdyktig mot ekstreme temperaturer og er fleksibelt etter det er herdet (Notmywar, 2016b).

En av ulempene er at det ikke er like sterkt som epoksy, men i kombinasjon med tre vil ikke dette være et problem da limet er sterkere enn trevirket. Selv om det ofte annonseres som en fugefylling viser tester at limets styrke reduseres når fugen er tykk (Demerchant, udatert).

### **2.4.4 Epoksy**

Epoksy består av harpiks og herdemiddel (Ber et al., 2013). Limet har høy skjærstivhet, men motstand mot miljøpåvirkninger som temperatur og langtidslast er det forsket lite på (Huveners, 2009). Epoksy har derimot gode fuktegenskaper. Når epoksy har herdet oppnår det høy styrke, som kan overskride styrken til både trevirket og glasset. Limet er ikke utsatt for betydelig kryp, som er spesielt bra med liming av lange og store overflater. Epoksy er et stivt lim, hvor tøyningene kan være opp til 100 ganger lavere enn tøyningene i silikon og polyuretan (Ber et al., 2013).

## **2.5 Avstivning**

Den vanligste årsaken til brudd i byggefasen er ustabilitet. Ustabilitet er oftest forårsaket av mangelfull eller ikke tilstrekkelig avstivning, som regel i forbindelse med midlertidig avstivning i byggefasen. Dette kan føre til kollaps og ulykker på byggeplass. Det forekommer også kollaps av bygninger etter de er ferdigstilte som følge av for dårlig stabilitet. I tilfellene der ustabilitet var et problem var det avstivningen som var for dårlig (Frühwald, Serrano, Toratti, Emilsson & Thelandersson, 2007). Videre i oppgaven vil det derfor fokuseres på glassfelt og dets mulighet til å fungere som horisontal avstivning i en trekonstruksjon.

### **2.5.1 Glass som avstivning**

Gjennom arbeidet med denne oppgaven har flere forskningsartikler konkludert med at glassfelt som horisontal avstivning har et stort potensiale. Dette kapittelet presenterer derfor et sammendrag av de ulike artiklenes konklusjoner og funn.

Konstruksjonsmessig har glass kapasiteten til å stabilisere et bygg, men dette er fortsatt uvanlig i bygninger på over to etasjer. En av grunnene er, som nevnt tidligere, mangelen på tilgjengelige dimensjoneringsregler i litteratur eller standarder (Huveners, 2009).

Stepinac, Rajčić og Žarnić (2016) viste gjennom sin forskning at formbarheten til tre-rammen og strekkspenningsfordelingen i glasset var avhengig av sammensetningen av komposittene, samt limtype. Ulike komposittfeil ble demonstrert, og det ble konkludert med at de fleste sammensatte systemene mislykkes ved kontakt mellom tre og glass som følge av limsvikt. Likevel anses det at glassfelt kan brukes som lastbærende konstruksjonselement (Stepinac et al., 2016).

### **2.5.2 Test av rammer**

Tidligere forskningsrapporter har testet stivheten til tre-glassrammer med positive funn. Undersøkelser utført av Cruz P. og Pequeno (2008) viste at den maksimale horisontale lasten en tre-glassramme tåler er 30 % høyere enn trerammer uten glassfelt.

Ber, Premrov, Strukelj og Kuhta (2014a) sammenlignet rammer med forskjellig plassering av glasset og forskjellig limtype opp mot trerammer med 15 mm tykke trebaserte plater (OSB og fibergips), spikret til rammen på begge sider (Ber et al., 2014a).

Bruddlasten til rammene med glass var overraskende høy og i enkelte tilfeller kunne den sammenlignes med rammene med OSB- og fibergipsplater. Ved bruk av silikon som festemiddel og 6 mm tykke glass på begge sider av rammen oppnådde rammen tilsvarende lastkapasitet som en ramme med fibergipsplater, men stivheten var derimot betydelig lavere på grunn av silikonets sin høye fleksibilitet (Ber et al., 2014a).

Når et 10 mm tykt glass ble festet i senter av rammen og limt med epoksy som en dobbel overlappskjøt oppnådde den tilsvarende lastkapasitet som en ramme med OSB-plater, men stivheten var 30 % lavere. Stivheten til rammen ervervet derimot samme stivhet som en ramme med en vindusåpning på 1272 x 572 mm i fibergipsplatene. Benyttes silikon eller polyuretan som festemiddel og en T-skjøt, vil også styrken tilsvare rammen med fibergipsplater og vindusåpning (Ber et al., 2014a).

Da rammene limt med silikon og polyuretan har en betydelig lavere stivhet enn rammene med treplater uten hull vil det være vanskelig å tilfredsstille kravene til bruksgrense i praksis. Piculin et al. (2014) finner at grunnen til den lave stivheten i en tre-glassramme ligger i at limet er fleksibelt. Epoksy, som er et stivere lim, viser høyere styrke og stivhet enn de to andre, men når det kommer til stivhet kan det ikke helt måle seg med rammer med plater uten hull. På en annen side er det nødvendig med en viss form for fleksibilitet i limet, spesielt ved høye temperaturer og endringer i fuktighet, siden de to materialene har betydelig ulike mekaniske egenskaper. Spesielt med tanke på fuktighet og utvidelsen av tre. Som følge av temperaturforskjeller oppstår det termiske tøyninger mellom trerammen og glassruten, som bør assisteres av et tilstrekkelig fleksibelt lim (Ber et al., 2014a).

Ber, Premrov, Strukelj og Kuhta (2014b) konkluderte blant annet med at en treramme med et stort glassfelt er stivere enn en treramme som er like stor, men har to glassfelt. På en annen side viste rammen med to glassfelt høyere duktilitet (Ber et al., 2014b). Videre presenteres ulike festetyper, samt forsøk utført med de ulike festene.

### **2.5.3 Festetyper**

Eksperimentell testing gjort av Piculin et al. (2016) viser at en eller flere glassruter forbundet med lim til en treramme kan bære laster i og ut av planet. For at trerammen skal ha fordel av glasset er det viktig at de to materialene danner en samlet motstand. Et kontinuerlig limfeste mellom glasset og rammen er avgjørende for å oppnå dette (Piculin et al., 2016).



Generelt sett er det tre måter å danne et kontinuerlig limfeste mellom tre og glass. Arenas og Guillamon (2007) klassifiserer disse som T-skjøt, dobbel overlappskjøt og enkel overlappskjøt. Se Fig. 2.6. I tillegg til de tre typene som er mest benyttet har Kozłowski, Serrano og Dorn (2015) benyttet et feste der glasset er festet som en kombinasjon av T-skjøt og dobbel overlappskjøt. (Kozłowski et al., 2015). Denne sistnevnte skjøten vil, med bakgrunn i sin geometri, bli omtalt som U-skjøt videre i rapporten.

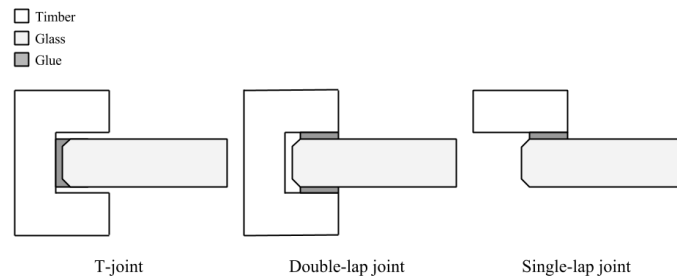


Fig. 2.6: Lap joints (Arenas & Guillamon, 2007)

### T-skjøt

T-skjøt er et fleksibelt feste over hele glassets tykkelse. Hvis denne skal benyttes anbefales det å benytte et lim med høy elastisitets- og skjærmodul, da dette øker stivheten av rammen i planet. Bredden på festet, som samsvarer med glassets tykkelse, påvirker også stivheten av systemet, da den øker lineært med bredden og festelengden. I tillegg vil et tykkere glass i seg selv være med på å øke stivheten (Huveners, 2009).

I Huveners (2009) er det testet en T-skjøt mellom glass og en stålramme. Det ble konkludert med at det var limet som først gikk til brudd, etterfulgt av stål- glasskontakt og dermed knusing av glasset. Styrken og stivheten til denne typen feste er derfor avhengig av limtype (Huveners, 2009).

### Dobbel overlappskjøt

Dobbel overlappskjøt er et dobbeltsidig stivt limfeste langs glassrutens kanter. Tykkelsen av glassruten og limets skjærstivhet vil ha innvirkning på systemets stivhet i planet. Huveners (2009) konkluderte med at en dobbel overlappskjøt har et stort potensiale når det kommer til å stabilisere og avstive en én-etasjes bygning. I tillegg er det festetypen som anbefales til videre bruk, da den gir en høyere stivhet i planet. Det kommer også frem at kapasiteten til avstivningssystemet øker hvis skjærstivheten til limet velges mellom  $10 \text{ N/mm}^3$  og  $100 \text{ N/mm}^3$  (Huveners, 2009).

Med denne typen feste var det glasset som gikk til brudd i forsøket utført av Huveners (2009). Det var derfor glassets styrke, i tillegg til limets styrke, som ble dimensjonerende. Forsøket innebar også testing av glassets bruddmønster, vist i Fig. 2.7 (Huveners, 2009).

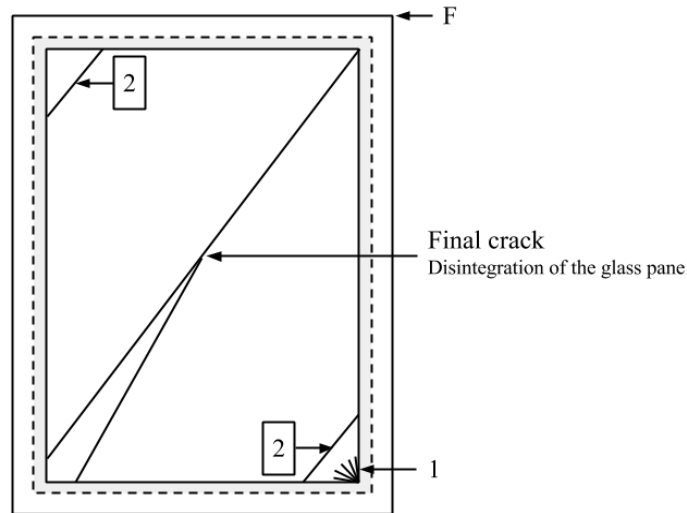


Fig. 2.7: Crack pattern for glass fastened with double lap joint: (1) First crack, (2) Second crack and (3) Final crack (Huveners, 2009)

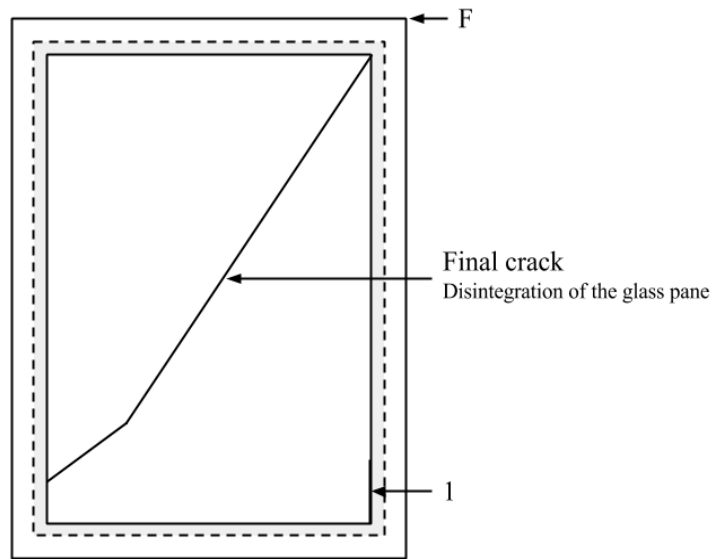
Når glass er limt kontinuerlig til tre vil, i følge Ber et al. (2014a), en dobbel overlappskjøt med et stivt lim gi høyere stivhet enn T-skjøt og enkel overlappskjøt.

### Enkel overlappskjøt

Enkel overlappskjøt er et ensidig stivt limfeste i enden av glassets overflate. Huveners (2009) har kommet frem til at mange av de samme konklusjonene kan trekkes for en enkel overlappskjøt som for en dobbel. På den andre siden er en enkel overlappskjøt mer utsatt for bøyning langs kantene og i hjørnene, samt mer utsatt for forskyvninger ut av planet, spesielt hvis glasset er slankt. Dette gjelder for en glassrute festet til en stålramme (Huveners, 2009). Ved feste til en treramme vil en dobbel overlappskjøt være mer avstivende enn en enkel overlappskjøt (Ber et al., 2014a).

Med høy skjærstivhet i Epoksy-limet og lav skjærleksibilitet i stålet gav det en ugunstig fordeling av hovedspenningene i hjørnene av glassruten. Da limet ikke kan ta opp deformasjoner førte dette til kontakt mellom stål og glass i øvre høyre hjørne og nedre venstre hjørne, som igjen førte til at kreftene ble overført fra stålrammen og til hjørnet i glasset, i stedet for en mer jevn fordeling. På grunn av glassets egenskaper vil en helst unngå punktlast, da dette fører til brudd ved en betydelig lavere last (Huveners, 2009).

Huveners (2009) utførte også her tester for glassets bruddmønster som er vist i Fig. 2.8.



*Fig. 2.8: Crack pattern for glass fastened with single lap joint: (1) First crack and (2) Final crack (Huveners, 2009)*

### **U-Skjøt**

Den siste festetypen ble presentert av Kozłowski et al. (2015), og er en kombinasjon av en T-skjøt og en dobbel overlappskjøt. Her blir glasset festet over et område med form som en U, derav navnet. Konseptet virker lovende, mye på grunn av at limet er avgrenset på tre sider slik at både strekk- og skjærkapasiteten utnyttes. Med denne typen feste utgjør det ingen store forskjeller mellom stive og veldig stive lim. Til og med fleksible lim viser en høyere bruddlast enn ved andre type fester (Kozłowski et al., 2015).

Skjærveggen som ble testet tålte en høy last før brudd, noe som gjør at slike vegger kan tillates å brukes både som avstivning av horisontale og vertikale lasttilfeller. Kozłowski et al. (2015) konkluderer derfor med at dette er et feste det bør forskes videre på (Kozłowski et al., 2015).

I tillegg til det kontinuerlige limfestet vil type lim og dets styrke og stivhet ha sterk innflytelse på egenskapene og oppførselen til en tre-glassvegg (Piculin et al., 2016). Dette vil derfor være fokuset videre.

## 2.6 Skjær- og strekkapasitet av limet

Nicklisch og Serrano (2014), Piculin et al. (2016) og Blyberg et al. (2012) har skjærtestet og strekktestet forskjellige typer lim for å finne kapasitetene. Nicklisch og Serrano (2014) og Piculin et al. (2016) har gjennomført strekktesten på små prøvestykker av herdet lim, utsatt for strekk. På den andre siden har Blyberg et al. (2012) gjennomført strekktesten med to trebiter festet med en T-skjøt som deretter blir dratt fra hverandre. Skjærtestene gjennomføres på små elementer, hvor glasset er festet til trevirket med en enkel overlappskjøt. Resultatene fra testene blir presentert i dette kapitlet.

I alle testene er limene herdet som anvist på produktet. Herdetiden er forskjellig for de forskjellige produktene. For eksempel var normal herdetid på de fleste limene testen av Nicklisch og Serrano (2014) 7 dager, mens limet Nolax hadde 21 dager herdetid og silikonet OTTOCOL S660 28 dager.

### 2.6.1 Strekktest

Nicklisch og Serrano (2014) har sammenlignet forskning utført av Department of Building Technology and Institute of Building Construction in Linnaeus University, Sweden (LNU) hvor de har benyttet kryssfiner og Technische Universität Dresden, Germany (TUD) hvor bjørk er brukt. Testene er gjennomført med tilnærmet like forhold, størrelser og metode. Dette er gjort for å kunne sammenligne resultatene (Nicklisch & Serrano, 2014).

Før sammenligningen ble det satt opp en oversikt over limenes antatte stivhet, se vedlegg A. Med bakgrunn i forsøkene ble limene klassifisert etter faktisk stivhet og det viste seg at ikke alle limene havnet under den antatte kategorien. De tre kategoriene limene er delt inn i er som følger (Nicklisch & Serrano, 2014):

- A: Fleksibelt lim < 10 MPa
- B: Halvstivt lim mellom 100 – 500 MPa
- C: Stivt lim > 1000 MPa

Resultatene fra strekktesten er vist under i Fig. 2.9. Legg merke til at det er samsvar mellom TUD og LNU sine resultater. En kan i tillegg se at limet SF7710 ikke hører til kategori C som først antatt, men under kategori B, se vedlegg A (Nicklisch & Serrano, 2014).

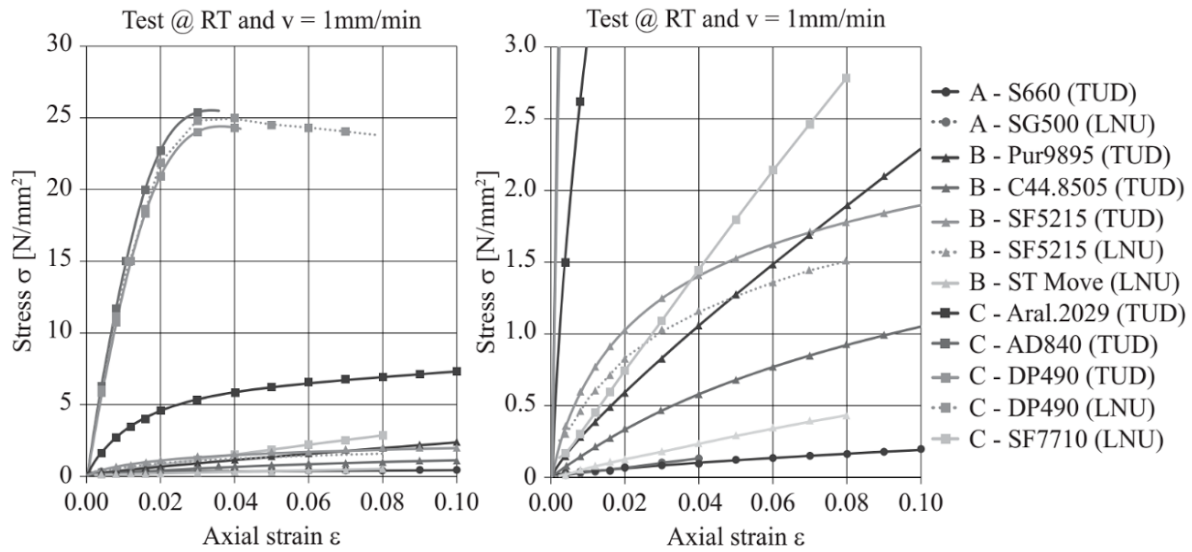


Fig. 2.9: Averaged stress-strain diagrams for the tested adhesives under standard conditions. The graphs are shown in two different stress scales for better comparability of the results (Nicklisch & Serrano, 2014)

I tillegg til å strekkteste alle limene med lastrate 1 mm/min, ble det halvstive limet SikaFast 5215 testet med forskjellige lastrater og temperaturer. Lastratene var 1/5/50 mm/min og temperaturene  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , romtemperatur og  $+80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Resultatene viser at limet oppfører seg stivere med økende lastrate, og ved minkende temperatur. Ved høyere temperaturer var saken en annen, da stivheten avtok betraktelig (Nicklisch & Serrano, 2014).

Med bakgrunn i funnene i Nicklisch og Serrano (2014) valgte Piculin et al. (2016) å teste det epoksybaserte limet Nolax-C44.8505, da de anså dette som det limet med størst potensiale. Limet ble kategorisert som et halvstivt lim. Det vil si at det tilbyr tilstrekkelig konstruksjonsstivhet i tillegg til en viss grad av deformasjonskapasitet, som er avgjørende for styrken og stivheten til en ramme av materialer med forskjellige egenskaper (Piculin et al., 2016).

Piculin et al. (2016) gjennomførte strekktesten med tilsvarende lastrater som ble benyttet i strekktesten av SikaFast 5215 gjennomført av Nicklisch og Serrano (2014), altså 1/5/50 mm/min. Minimum fem elementer ble testet for hver rate. Testresultatene viser at Nolax-C44.8505 er følsom med tanke på lastraten, og at materialresponsen er stivere for høyere lastrater (Piculin et al., 2016). Dette er det samme resultatet som kom frem i Nicklisch og Serrano (2014) for det halvstive limet SikaFast 5215.

En annen forskningsgruppe, Blyberg et al. (2012), gjennomførte et omfattende forsøk på tre forskjellige typer lim. Strekktesten ble gjennomført på prøvestykker bestående av to trebiter som var limt sammen med en T-skjøl. De benyttet limene silikon (Sikasil SG-20), akryl (SikaFast 5215) og polyuretan (Prefere 6000) og alle lime er testet på minst 15 elementer. Silikon-elementene ble testet med en lastrate på 1 mm/min, akryl 0,5 mm/min og polyuretan 0,25 mm/min (Blyberg et al., 2012).

Resultatene viser en strekkapasitet på 0.77 MPa for silikon, 3.04 MPa for akryl og 1.56 MPa polyuretan. I tillegg til å teste strekkapasiteten til limene, ble kapasiteten til det benyttede trevirket testet vinkelrett på fibrene og det gav en kapasitet på 2.3 MPa (Blyberg et al., 2012).

I tillegg til å sjekke strekkapasiteten har Blyberg et al. (2012) presentert bruddmekanismer som oppstår ved bruk av de forskjellige limene, se vedlegg B. I elementene festet med silikon var det i alle elementene brudd i festet mellom lim og tre, samt i selve limet. I de fleste elementene var det i tillegg brudd i trevirket og i et element var det brudd i festet til glasset. I elementene festet med akryl var det i alle elementene brudd i trevirket og i omtrent halvparten var det i tillegg brudd i festet mellom tre og limet. Grunnen til andre bruddmekanismer er at akryl har høyere strekkapasitet enn silikon og trevirke, og trevirke vil derfor ikke være det som fører til brudd. I festene med polyuretan ble det i de fleste elementene brudd på grunn av festet til glass. Noen av elementene ble det også brudd i trevirket og festet til trevirket. Heller ikke i disse elementene var det limet som ble dimensjonerende (Blyberg et al., 2012).

### **2.6.2 Skjærttest**

Nicklisch og Serrano (2014) benyttet resultatene fra skjærttesten sammen med den tidligere nevnte strekktesten til å avgjøre hvilken kategori de forskjellige limene hører under, se vedlegg A. Skjærttesten er utført ved forskjellige temperaturer (-20 °C, romtemperatur og +80 °C). Resultatene viser at det ved romtemperatur er de stive epoksy-limene DP 490 og Delo-DUOPOX AD840 som har høyest skjærkapasitet. Ved -20 °C og +80 °C minker kapasiteten betraktelig, spesielt ved høy temperatur. I motsetning til de stive limene økte skjærekapasitet til de halvstive limene ved lave temperaturer. Limet Nolax-C44.8505 kom best ut ved 80 grader, men også dette mister mye kapasitet ved denne temperaturen. Temperaturen limet blir utsatt for har derfor stor innvirkning på konstruksjonen (Nicklisch & Serrano, 2014).

I romtemperatur ble elementene testet til brudd og bruddmekanismene ble observert, se vedlegg C. Glasset ble ikke skadet i noen av testene. Ved bruk av halvstive lim ble bruddmekanismen i festet mellom limet og trevirket, eller en kombinasjon av det og brudd i selve trevirket. For det stive limet DP490 ble det brudd i trevirket ved feste til massivtre, mens det ved festet til kryssfiner ble en kombinasjon av brudd i trevirket og i festet mellom lim og tre. Dette er et tegn på at massivtre har lavere skjærkapasitet enn kryssfiner (Nicklisch & Serrano, 2014).

En skjærttest er også gjennomført av Piculin et al. (2016) med bruk av limet Nolax-C44.8505. Også i dette forsøket kommer det frem til at bruddmekanismer er brudd i festet mellom lim og trevirket eller en kombinasjon av dette og brudd i trevirket, se vedlegg D. I tillegg konkluderes det med at type trevirke har påvirkning på skjærkapasiteten til elementet, da trevirket kan bli den avgjørende komponenten med tanke på kapasiteten. Bjørkefiner har høyere kapasitet enn furu (Piculin et al., 2016).

Blyberg et al. (2012) testet alle limene på 15 elementer. Som tidligere nevnt er det her limene silikon (Sikasil SG-20), akryl (SikaFast 5215) og polyuretan (Prefere 6000) som blir benyttet. Silikon-elementene ble testet med en forskyvningsrate på 1 mm/min, akryl 0,5 mm/min og polyuretan 0,25 mm/min (Blyberg et al., 2012). Resultatene viser en skjærkapasitet på 0.93 MPa for silikon, 4.48 MPa for akryl og 3.82 MPa for polyuretan. Også her kan vi se at det er akryl som har den høyeste kapasiteten. Trevirkets kapasitet ble målt til 6.1 MPa, som i motsetning til strekktesten er høyere enn alle limene.

Også i denne testen observerte de bruddmekanismene for elementene med de ulike limene. I elementene festet med silikon oppstod det brudd i festet til tre og i selve limet. 5 av 15 elementer hadde i tillegg brudd i festet til glass. I akryl-elementene oppstår det brudd i trevirket og i festet til trevirket. I 5 av 15 elementer blir det også her brudd i glasset. Polyuretan-elementene går til brudd på grunn av trevirket (bare noen av fibre blir hengende igjen på limet), festet til trevirket og festet til glasset. Seks elementer får i tillegg brudd i glasset. (Blyberg et al., 2012). Det påpekes at de ikke er sikre på hvorfor det blir brudd i glasset, ved bruk av polyuretan, men de antar at det kan ha noe med oppsettet av testen å gjøre, eller på grunn av bøyning (Blyberg et al., 2012).

Blyberg et al. (2012) konkluderer med at en av de viktige faktorene ved liming av glass er limets evner til å overføre last. Silikon er det beste alternativet med tanke på deformasjonskapasitet, men styrken og stivheten er for lav til å kunne muliggjøre høy belastning av en komponent uten å bruke et bredt limfeste. Av de tre limene som er testet er det det akrylbaserte limet SikaFast 5215 som anses verdt videre forskning. Et potensielt problem med dette festemiddelet er dets termostabilitet. Den lave overgangstemperaturen på 52 grader, kan resultere i betydelig reduksjon av stivhet ved temperaturer som kan nås på en glassfasade en varm sommerdag. Den drastiske endringen ved høy temperatur underbygges av funnene gjort av Nicklisch og Serrano (2014), hvor limet er testet ved 80 °C (Blyberg et al., 2012).

## **2.7 Konklusjon bakgrunnsteori**

Av forskningsrapportene som ligger til grunn for denne rapporten kan det konkluderes med at glasspaneler kan anvendes som lastbærende konstruksjonselementer og viser stort potensiale som avstivning av en treramme. Likevel er det fortsatt uvanlig, mye på grunn av mangelen på tilgjengelige dimensjoneringsregler i litteratur og standarder. For at glass skal benyttes som konstruksjonsmateriale er festet til andre materialer avgjørende da de fleste av de sammensatte systemene ofte mislykkes på grunn av kontakt mellom tre og glass som følge av svikt i limet. På tross av ulempene med limte forbindelser, som for eksempel aldring, er en kontinuerlig limt forbindelse den beste teknikken for glasskonstruksjoner.

Det er flere parametere som har innvirkning på stivheten til en tre-glassramme. Type feste, limtype, holdbarhet av festemiddelet, tykkelse og bredde på festemiddelet, glasstype, tykkelsen på glasset og posisjonen til glasset.

Glass kan avstive en treramme og gjøre den mer stabil, sammenlignet med en ramme uten glass. Skal en derimot sammenligne det mot rammer med treplater, har ikke glass den samme kapasiteten. Forskning viser i tillegg at ved to like trerammer, hvor den ene glassruten er hel og den andre delt i to, vil rammen med en enkel glassrute ha høyere stivhet, mens rammen med to glass vil ha høyere duktilitet.



Type feste er en av de viktigste parameterne som avgjør rammens stivhet. De tre mest vanlige typene er T-skjøt, dobbel overlappskjøt og enkel overlappskjøt. En dobbel overlappskjøt vil være å foretrekke da den vil gi den høyeste stivheten. Den mindre benyttede U-skjøten, viser også høyt potensiale når det kommer til stivhet, da både strekk- og skjærkapasiteten til limet utnyttes. Med denne typen feste utgjør det ingen store forskjeller mellom stive og veldig stive lim. Til og med fleksible lim viser en høyere bruddlast enn ved andre type fester. Denne typen feste anses verdt videre forskning på lik linje med en dobbel overlappskjøt.

Den andre viktige parameteren er type lim. Limene klassifiseres i tre grupper:

- Fleksibelt lim: Lav stivhet og styrke, men med stor deformasjonskapasitet (silikon)
- Halvstivt lim: Balanse mellom styrke og fleksibilitet (polyuretan)
- Stivt lim: Svært motstandsdyktig og ufleksibelt (akryl og epoksy)

Forsøkene utført av Blyberg et al. (2012) viste at strekkkapasiteten til limene var henholdsvis 0.77 MPa for silikon, 3.04 MPa for akryl og 1.56 MPa for polyuretan, mens skjærkapasiteten var 0.93 MPa for silikon, 4.48 MPa for akryl og 3.82 MPa for polyuretan. Gjennom forskning viser det seg at det er de halvstive limene som egner seg best til feste av glass til en treramme. Dette fordi det gir både styrke og fleksibilitet. Lastrate og temperatur har også innvirkning på stivheten. For de halvstive limene vil en lavere temperatur øke stivheten og en høyere temperatur det motsatte. Benyttes et stivt lim som for eksempel epoksy, gir den høyest styrke, men tar ikke opp deformasjoner fra tilstøtende konstruksjon som vil føre til at glasset går til brudd når trevirket deformerer seg. Når det gjelder de fleksible limene, vil disse gi god deformasjonskapasitet, men vil ikke ha tilstrekkelig stivhet. Det er derfor de halvstive limene som anses verdt videre forskning, spesielt Sikafast 5215 (akryl) og Nolax-C44.8505 (epoksy). Til slutt påpekes det at den mest vanlige bruddformen er en kombinasjon av brudd i limet og festet mellom limet og trevirket, men dette var likevel avhengig av type lim.



### 3 Numerisk modellering

I dette kapittelet vil teori knyttet til numerisk modellering i Abaqus presenteres. Abaqus er et komplekst program med uendelig mange metoder og alternativer ved modellering. Det vil derfor kun bli gjennomgått teori som anses nødvendig for å kunne ta valg i modellen som blir modellert i neste kapittel. Resterende valg er basert på standard avgjørelser, men vil nevnes hvis nødvendig. Programmet Abaqus er på engelsk, men da denne oppgaven er skrevet på norsk er det valgt å oversette alle ordene knyttet til Abaqus. Oversettelsene finnes i vedlegg E.

#### 3.1 Elementer

Valg av type element kan ha stor innvirkning på modellen, spesielt med tanke på beregningstid. Å ta riktig valg krever en del generell kunnskap om teori og applikasjon av Finite Element Analysis, FEA. Dette er nødvendig for å kunne bygge en så nøyaktig matematisk modell som mulig, for å oppnå den korrekte generelle oppførselen og bruddmekanismene (Ber et al., 2016).

Først skal noen av problemene som kan oppstå i ved bruken av forskjellige typer elementer presenteres. Deretter gis en kort introduksjon til skall- og solidelementer, samt innblikk i hva som bør vurderes ved valg av de forskjellige typene.

##### 3.1.1 Skjærlåsning og timeglasskontroll

Et problem som kan oppstå i elementene er skjærlåsning. Dette forekommer når programmet ikke klarer å gjengi krumning av materialet på en korrekt måte, når det utsettes for bøyning. Kreftene introduseres da i stedet som skjærspenninger som egentlig ikke er der i praksis. Disse skjærspenningene vil føre til at elementet når likevekt ved en lavere forskyvning, og det vil fremstå som stivere enn det egentlig er (Haugestøyl & Selliken, 2015).

For å få en mer korrekt modell og redusere effekten av skjærlåsning er det to ting som kan gjøres; benytte redusert integrasjon eller øke antallet elementer, da spesielt i tykkelsen. Problemet med for mange integrasjonspunkter er at elementet vil oppføre seg stivere enn det i realiteten er. Med redusert integrasjon utføres beregningene med et integrasjonspunkt mindre, altså vil Fig. 3.1 være utsatt for skjærlåsning og oppføre seg stivere enn Fig. 3.2, som er den reduserte versjonen av Fig. 3.1. I tillegg vil bruk av redusert integrasjon spare beregningstid uten betydelig påvirkning av nøyaktigheten. (Haugestøyl & Selliken, 2015). For å vise at redusert integrasjon er benyttet legges en R til på slutten av element-navnene (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.2).

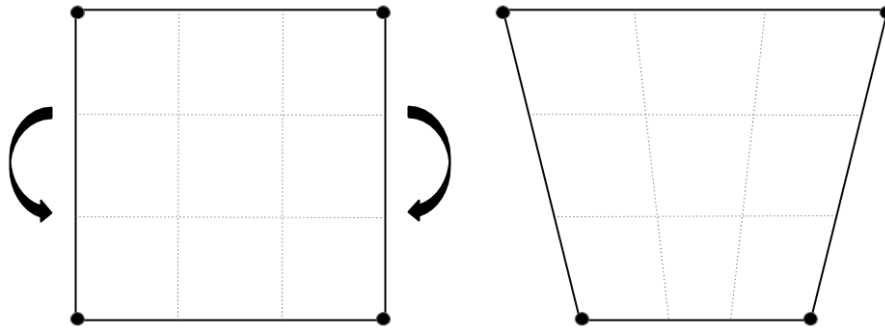


Fig. 3.1: *Shear locking* (Haugestøyl & Selliken, 2015)

Ved bruk av redusert integrasjon vil det derimot oppstå et nytt problem, da et element som utsettes for et moment kan deformeres slik Fig. 3.2 viser, der verken lengden eller vinkelen mellom de stiplede linjene har endret seg. Denne deformasjonen kalles zero-energy-mode og virker slik at tøyningene som følge av deformasjonen ikke fanges opp ved integrasjonspunktene. Derfor bør timeglasskontroll benyttes. Timeglasskontrollen kontrollerer forskyvningene av nodene i forhold til tøyningen, slik at disse samsvarer (Haugestøyl & Selliken, 2015).

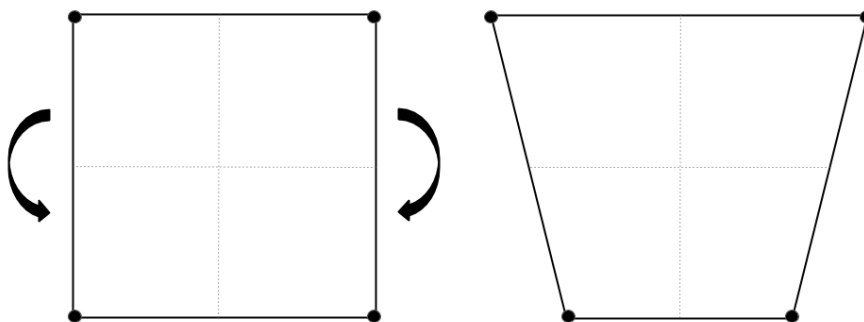


Fig. 3.2: *Hourglass* (Haugestøyl & Selliken, 2015)

På bakgrunn av dette er det valgt å benytte redusert integrasjon, timeglasskontroll og flere elementer i tykkelsen i alle modeller som utarbeides i denne oppgaven.

### 3.1.2 Skallelementer

Det finnes to ulike tilnærminger for modellering av skallelementer, konvensjonelle skallelementer og kontinuum skallelementer, som vist i Fig. 3.3. Konvensjonelle skall kan modelleres i 2D og 3D, men geometrien forblir i 2D, altså ingen synlig tykkelse. Den andre tilnærmingen er kontinuum skall som modelleres som 3D solidelementer, men med skall-tverrsnitt og elementtype som kontinuum skall (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.1).

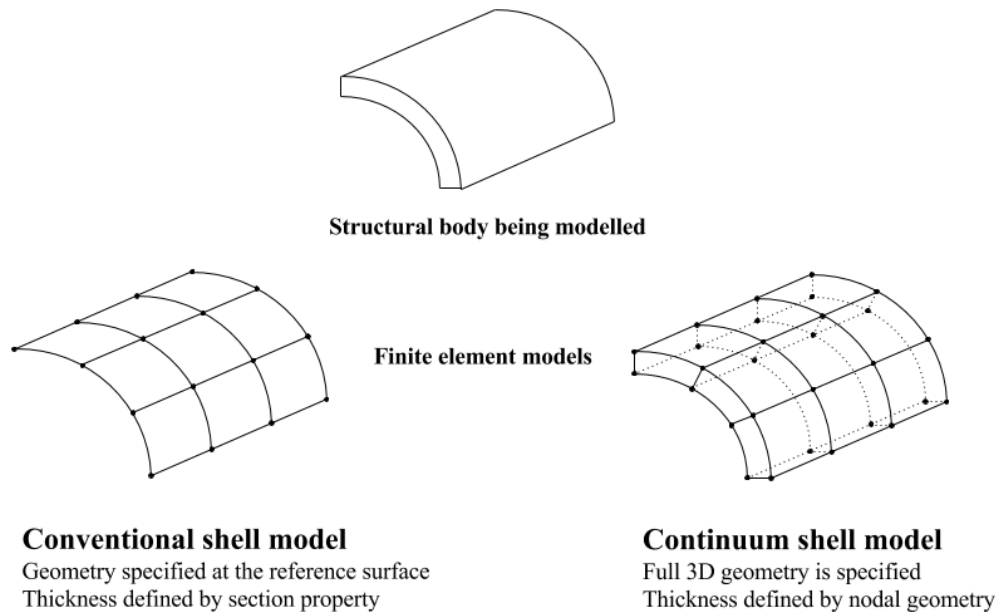


Fig. 3.3: Conventional og continuum shell model (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.1)

### Konvensjonelle skallelementer

Med konvensjonelle skallelementer modelleres det fysiske elementet som et element med 2D-geometri, hvor tykkelsen blir tatt høyde for gjennom tverrsnittsegenskapene og en referanseoverflate. Referanseoverflaten til skallet defineres med elementets noder og normalretning, og er vanligvis det fysiske elementets midtflate. I flere situasjoner er det derimot mer fordelaktig å definere overflaten i en gitt avstand fra midten (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.1).

Abaqus tilbyr trekantede og firkantede elementnett-konfigurasjoner av skallelementer med lineær interpolasjon som benytter både store og små tøyning-formuleringer. De trekantede elementene, S3R, kan få problemer som skjærlåsning og er derfor ikke anbefalt å benytte på krumme flater. De firkantede robuste skallelementene, S4R, er på en annen side egnet for generell bruk. Redusert integrasjon og timeglasskontroll blir benyttet (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.2).

Elementer med liten tøyning (S4RS, S3RS og S4RSW) er effektive for problemer som involverer små membran-tøyninger med vilkårlige store rotasjoner. S4RS og S3RS er effektive elementer, men virker dårlig ved vridning - kontra S4RSW som er et mindre effektivt element, men som igjen virker bedre ved vridning. Et problem med elementene med små tøyninger er at det ikke vil vise noen advarsler hvis de brukes feil (for eksempel hvis tøyningen blir for stor). For å vurdere om det er liten eller stor tøyning er det anbefalt å se om det er signifikante forskjeller mellom den logaritmiske og den nominelle tøyningen. Hvis forskjellene er store vil det mest sannsynlig være store tøyninger. Skallelementer med stor tøyning bruker Mindlin-Reissner bøyeteori som inkluderer tverrgående skjærkraft (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.2).

### **Kontinuum skallelementer**

Kontinuum skallelementer modelleres som 3D solidelementer, med skalltversnitt og kontinuum skall som elementtype. Tykkelsen defineres av node-geometrien, som er det som gjør elementet til et 3D-element. Denne typen elementer benyttes for å modellere slanke konstruksjonsdeler med skall-lignende respons, men med kontinuum element-topologi. Kontinuum skall gir ulike fordeler sammenlignet med konvensjonelle skallelementer. Blant annet kan det brukes til modellering av både lineær og ikke-lineær oppførsel. En av de viktigste egenskapene og fordelene er derimot geometrien. 3D-geometri fører til mulighet for tosidig kontakt og dermed en mer korrekt kontakt-modellering, samt at elementets tykkelse vises visuelt. Elementene gjør det i tillegg mulig å fange opp deformasjonen gjennom tykkelsen, så lenge antall elementer er tilstrekkelig. Redusert integrasjon og timeglasskontroll bør også benyttes da 3D-elementer ofte lider av skjærlåsning (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.2).

To vanlige kontinuum skallelementer er SC6R og SC8R, som begge benytter seg av redusert integrasjon og timeglasskontroll. Geometrien består henholdsvis av et triangulært prisme og et heksaeder, med kun forskyvning som frihetsgrad. Disse tar hensyn til membrantøyninger, vilkårlig stor rotasjon og tillater endring i tykkelsen, noe som gjør dem passende til analyser med stor tøyning. På grunn av tykkelsen er det viktig at elementene orienteres korrekt (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.2).

SC6R er en degenerert elementversjon av SC8R. Det gir nøyaktige resultater i de fleste lastsituasjoner, men på grunn av dets konstante bøye- og membrantøyninger kreves et svært fint elementnett for å fange opp bøyedeformasjonene. SC8R kan derfor spare beregningstid da det ikke kreves et like fint elementnett (Abaqus Analysis User's Guide, 29.6.2).

### 3.1.3 Solidelementer

Solidelementer kan modelleres i både 2D og 3D. De benyttes for lineære og ikke-lineære komplekse analyser som involverer kontakt, plastisitet og store deformasjoner. Elementene er tilgjengelig for beregning av spenning, varmeoverføring, akustikk og mye mer (Abaqus Analysis User's Guide, 28.1.1).

For 2D-modellering blir trekantede og firkantede elementer ofte brukt, mens for 3D-modellering kan tetraeder- og heksaeder-elementer benyttes. Generelt anbefales bruken av firkant- og heksaeder-elementer ved modellering av kontinuum solidelementer, selv om de geometrisk sett er mindre fleksible enn trekant- og tetraeder-elementer, og dermed vanskelig å bruke ved kompliserte geometrier. Det skal derimot bemerkes at ved effektiv bruk av ulike dekomponeringsteknikker (for eksempel partitioning) er det mulig å bruke disse elementene også i komplekse geometrier (Abaqus Analysis User's Guide, 28.1.1).

C3D8R er et eksempel på et mye brukt element. Det er et 8-nodet lineært heksaeder-element som benytter seg av redusert integrasjon og timeglasskontroll. Et godt elementnett av heksaeder-elementer gir vanligvis en nøyaktig løsning i tillegg til raskere beregningstid sammenlignet med andre element-typer (Abaqus Analysis User's Guide, 28.1.1).

## 3.2 Kohesiv sone-modellering

Neste punkt som er en viktig faktor ved modellering av en tre-glassramme, er festet mellom limet og trevirket. Blyberg et al. (2012), Piculin et al. (2016) og Nicklisch og Serrano (2014) sine forsøk viste at årsaken til brudd vanligvis er festet mellom limet og trevirket. Det er derfor viktig å prøve å finne en måte å modellere egenskapene til festet for å oppnå en modell som er så nøyaktig som mulig. En metode er kohesiv sone-modellering (Piculin et al., 2016).

Kohesiv sone-modellering (CZM) er en metode som benyttes i FE-analyser for å modellere egenskapene til festet mellom to overflater og få innsikt i bruddmekanismene. Selve basisen for metoden kan spores tilbake til arbeid utført av Dugdale (1960) og Barenblatt (1962). FE-analyser kan forutsi oppførselen ved brudd av materialer, der CZM er et mye brukt numerisk verktøy for å simulere brudd som oppstår mellom kontaktflater (Kregting, 2005).

Ved kohesiv modellering av egenskaper, brudd og feil mellom kontaktflater benyttes en **traksjon-separasjonslov**. For å beskrive denne er det tre hovedpunkter som er viktige (Carlsson, 2013):

- I. *Materialeegenskapene til kontaktflaten før brudd.* Området fra null til punkt a i Fig. 3.4. Abaqus støtter bare lineærelastisk traksjon-separasjonslov før brudd. Dette er likevel ikke en stor begrensning ettersom mange materialer har en lineær respons før brudd.
- II. *Bruddinitieringskriteriet:* definerer starten av bruddutviklingen. Punkt a i Fig. 3.4.
- III. *Bruddutviklingen:* Egenskapene til materialenes kontaktflater etter *Bruddinitieringskriteriet* er oppfylt. Intervall b i Fig. 3.4. Det beskriver hvordan degraderingen av stivheten til kontaktflatenes feste utvikles mens materialenes overflater separeres mer og mer.

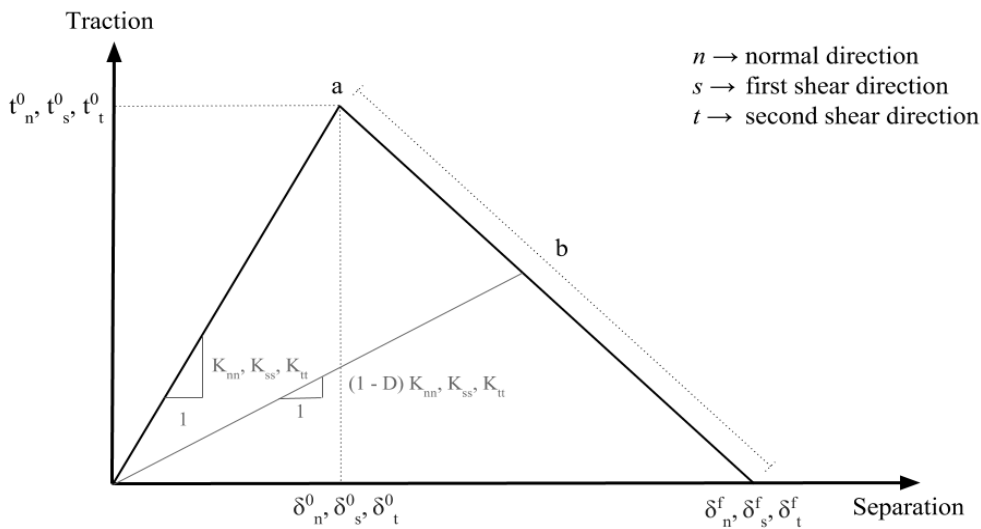


Fig. 3.4: Traction-separation law (Piculin et al., 2016)

### I. Oppførsel før brudd

I denne oppgaven ble uavhengige komponenter (standard) benyttet, og ulikheter mellom skjærretningene ble neglisjert, altså vil  $K_{tt} = K_{ss}$  (Carlsson, 2013). Med disse forutsetningene vil traksjonskreftene før bruddkriteriet er nådd antas å være lineære, fra null til punkt a i Fig. 3.4, og kan beskrives med følgende matrise (Piculin et al., 2016):

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (1)$$

$t_n$ ,  $t_s$  og  $t_t$  er de nominelle kohesive traksjonskreftene (en normal og to skjær traksjons krefter) og de relateres til separasjonene  $\delta_n$ ,  $\delta_s$  og  $\delta_t$  i den elastiske delen av traksjon-separasjonen.



## II. Bruddinitiering

Bruddinitieringskriteret er det punktet der ødeleggelsen av materialets kontaktflate starter, punkt a i Fig. 3.4. Kriteriet kan enten beskrives som en funksjon av tøyningen eller traksjon. I tillegg er det to mulige funksjoner som kan brukes til både tøyning og traksjon i Abaqus. En er basert på maksimum komponenten av tøyning eller traksjons, mens den andre er basert på lengden av tøyningen eller traksjonsvektoren (Carlsson, 2013). De to funksjonene hvor traksjon er benyttet er vist under, likning (2) for maks-komponenten (Piculin et al., 2016) og likning (3) for lengdevektoren (Carlsson, 2013):

$$\max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{|t_s|}{t_s^0}, \frac{|t_t|}{t_t^0} \right\} = 1 \quad (2)$$

$$\left( \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right)^2 + \left( \frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 + \left( \frac{t_t}{t_t^0} \right)^2 = 1 \quad (3)$$

$t_n^0$ ,  $t_s^0$  og  $t_t^0$  beskriver bruddstyrken ved brudd. Macaulay-parentesene  $\langle \rangle$  begrenser kriteriet brudd på grunn av strekk, ved at  $\langle t_n \rangle = t_n$  for  $t_n \geq 0$  og  $\langle t_n \rangle = 0$  for  $t_n < 0$  (Piculin et al., 2016). Dette gjøres for at det ikke skal oppstå skade i festet mellom kontaktflatene i modellen ved rent tykk i normalretningen (negativ normal-traksjon) (Carlsson, 2013).

Når bruddinitieringskriteriumet (2) er møtt, starter den lineære bruddutviklingen mellom kontaktflatene.

## III. Bruddutviklingen

Bruddutviklingen beskriver ødeleggelsen av festet mellom kontaktflatene som en funksjon av den effektive separasjonen,  $\delta_m = \sqrt{\langle \delta_n \rangle^2 + \delta_s^2 + \delta_t^2}$ , området mellom punkt (b) og (c) i Fig. 3.5. Bruddutviklingen betegnes med bruddvariabelen  $D$ . Verdien av  $D$  vil være 0 frem til bruddkriterium (2) er møtt og lik ligning (4) etterpå (Piculin et al., 2016):

$$D = \frac{\delta_m^f (\delta_m^{\max} - \delta_m^0)}{\delta_m^{\max} (\delta_m^f - \delta_m^0)} \quad (4)$$

$\delta_m^f$  er den effektive bruddseparasjonen,  $\delta_m^{\max}$  maksimum verdi av den effektive separasjonen oppnådd under last historien og  $\delta_m^0$  er den effektive separasjonen ved initieringen av damage, som er når bruddkriterium (2) er møtt (Piculin et al., 2016).

Under dette stadiet vil traksjonskreftene bli beskrevet annerledes ved at brudd-variabelen legges til i funksjonen.  $D$  starter på null i punkt (b) i Fig 3.5, etter dette punktet vil  $D > 0$  i flere og flere av festepunktene, før total separasjon ved punkt (c) (Piculin et al., 2016).

Traksjonskreftene defineres som (Piculin et al., 2016):

$$\begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \\ t_t \end{Bmatrix} = (1 - D) \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 & 0 \\ 0 & K_{ss} & 0 \\ 0 & 0 & K_{tt} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \delta_n \\ \delta_s \\ \delta_t \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Med den økende separasjonen vil den korresponderende kohesive traksjonen avta mot null. Ved totalt brudd vil traksjonen være lik null, punkt (c) i Fig. 3.5, og limet gjennomgå en elastisk avlastning tilbake til sin originale posisjon (Piculin et al., 2016).

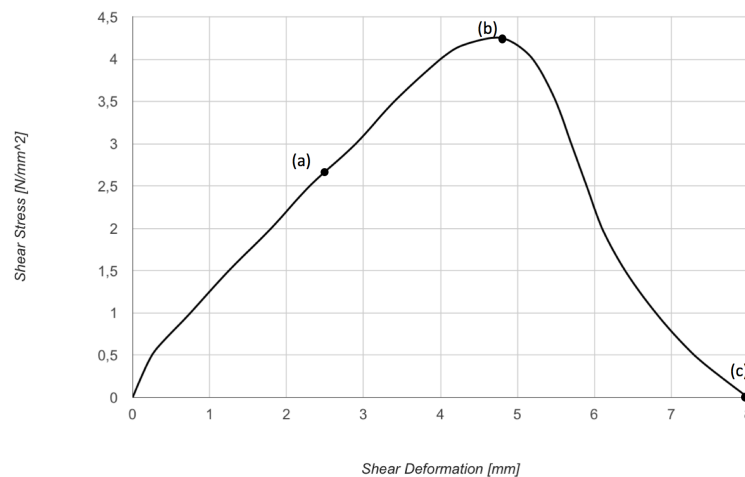


Fig. 3.5: Different stages of analysis: (a) undamaged behaviour  $D=0$ , (b) damage-initiation  $D > 0$  in more and more points, (c) total collapse  $D=1$  (Piculin et al., 2016)

Kohesiv sone-modellering har noen begrensninger. Blant annet at skaden kun beskrives med en skalar. Det gir den effekten at det er vanskelig å fange eventuelle differanser i traksjon-separasjonsloven for normal- og skjærseparasjoner. Dette er en ulempe da det kan være nyttig i noen sammenhenger å fange opp differansene i skaden i materialets overflate. Dette er sannsynligvis mulig ved å skrive et brukerdefinert element der en koder hvordan traksjonen kalkuleres fra separasjonen, men dette er det ikke tatt stilling til i denne oppgaven.

Vi skiller mellom to ulike måter å modellere den kohesive oppførselen på. Den første er **kohesive elementer**, hvor en modellerer et element med svært liten tykkelse (0.0001 mm) og gir det egenskapene til festet mellom kontaktflatene. Dette gjøres for å få frem den faktiske oppførselen (Carlsson, 2013). Oppførselen beskrives ved hjelp av traksjon-separasjonsloven som defineres i materialeegenskapene til elementet (Kregting, 2005). Ved brudd vil elementet

tøyes for å simulere sprekken som vist i Fig. 3.6. Ettersom sprekken kun kan følge elementene er retningen der sprekken skal forplantes sterkt avhengig av elementet, noe som også betyr at sprekken er avhengige av elementnettet (Hermes, 2010).

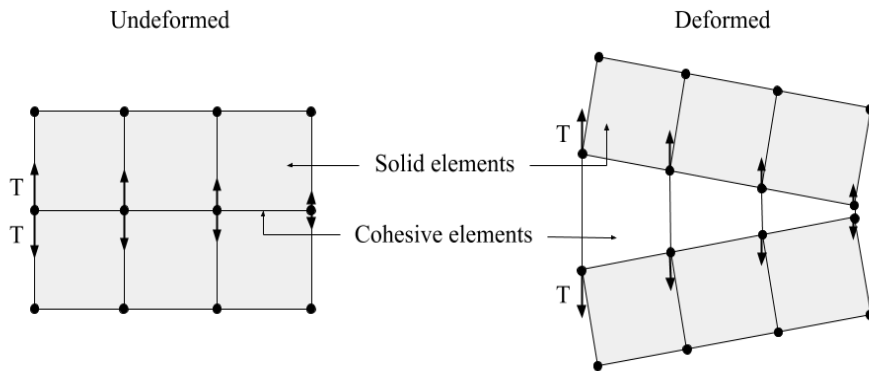


Fig. 3.6: Opening of cohesive element by a traction  $T$  (Hermes, 2010)

Den andre måten å modellere kohesiv oppførsel på er ***kohesiv overflate***. Dette er en overflatebasert metode som benytter seg av traksjon-separasjonsloven og gir en forenklet måte å modellere kohesive forbindelser på. Sammenlignet med kohesive elementer, som er fysiske elementer, defineres kohesive overflater som overflatekrefter i interaksjonsegenskaper. Fordelen med dette er at en slipper å lage plass til et kohesivt element mellom kontaktoverflatene.

### 3.3 Materialmodell - Lim

Lim kan modelleres med en elastisk, hyperelastisk eller visko-hyperelastisk materialmodell.

#### Elastisk materialmodell

Legemet deformeres under påvirkning av ytre krefter og vil ved fjerning av kreftene gjenvinne sin opprinnelige form (Ormestad, 2009). Lim kan ses på som en slags gummi. Elastisitet i gummi kjennetegnes ved store elastiske deformasjoner og lav elastisitetsmodul. Gummi kan strekkes elastisk til omtrent ti ganger av opprinnelig lengde (Ore, 2009a). Når limet modelleres elastisk, legges elastisitetsmodulen og tverrkontraksjonstallet inn i egenskaper.

### **Hyperelastisk materialmodell**

Hyperelastisitet beskriver tidsuavhengig oppførsel til gummi som er utsatt for store tøyninger. Det blir benyttet for å modellere materialer som responderer elastisk, når det utsettes for veldig store tøyninger. Den redegjør for både ikke-lineær material oppførsel og store endringer i form og fasong. Hovedanvendelsesområdet av teorien er å modellere gummiaktig oppførsel av et polymermateriale. Responsen til et typisk polymer er blant annet sterkt avhengig av lastrate, som tidligere nevnt under forsøk med limene, som var avhengig av lastrate. I tillegg er det avhengig av temperatur og tøyningshistorien (Bower, 2008).

En hyperelastisk modell er konstruert ved å definere relasjonen mellom spenning og tøyning ved å spesifisere tøyningsenergitetthet,  $W$ , som en funksjon av deformasjons gradientvekten:  $W = W(F)$ . Dette forsikrer at materialet er perfekt elastisk, og betyr at en bare behøver å arbeide med en skalar funksjon. Den generelle formen av tøyningsenergitetthet er guidet av eksperimenter; og formelen inneholder alltid materialeegenskaper som kan endres til å beskrive et spesifikt materiale (Bower, 2008).

### **Viskoelastisk materialmodell**

Viskoelastisiteten til et materiale beskriver tiden det tar fra materialet går fra å være deformert til opprinnelig form. Det vil si at elastisiteten er mer eller mindre «treg» på grunn av viskositet (indre friksjon) i materialet når det deformeres. Fullkommen elastisitet vil si at materialet går raskt tilbake til sin opprinnelige form. Dette gjelder for blant annet vulkanisert, ren naturgummi og noen syntetiske gummityper. Mange syntetiske gummityper er på en annen side mer viskoelastiske og det vil derfor ta lengre tid for slike materialer å få tilbake sin naturlige form etter deformasjon. Materialer kan også være elastoviskøse som innebærer at de til en viss grad er viskoelastiske, men at det i tillegg oppstår flyt. Dette vil føre til at materialet aldri får varige deformasjoner (Ore, 2009b).

## 4 Numerisk Modell

Resultatene fra arbeidet med denne oppgaven, hentet fra tidligere forskning, deriblant Ber et al. (2014a), konkluderer med at et glassfelt bidrar til en betydelig høyere stivhet i en treramme. Diskusjon og konklusjon fra disse er derimot basert på et begrenset antall testresultater, da det er foreløpig lite forskning på området. Det ble derfor interessant å lage en så nøyaktig numerisk modell som mulig ut fra tidligere forskning og det som fantes på internett. Ideen var å utarbeide en modell som kunne benyttes til parameterstudiet som omtales i neste kapittel.

I denne oppgaven anses glass som hovedelementet, da det er glassfeltet som skal fungere som horisontal avstivning. Store deler av fokuset ved resultatene er derfor rettet mot glasset. Glass er et ikke-duktilt, sprøtt materiale (Loughran, 2003), som er perfekt elastisk frem til brudd (Leskovar & Premrov, 2013). I denne oppgaven har det vært et fokus på hva som skjer frem mot brudd. Det er derfor kjørt en lineær-elastisk analyse. Som følge av dette er det derfor ikke lagt inn bruddkriterier i modellen. I tillegg er det et fokus på strekkspenninger i glasset, da det vanligvis er overskridelse av strekkspenningene som er årsaken til brudd (Winter et al., 2010). Når stivhet omtales er det snakk om kN/rad.

Som nevnt i kapittel 3 er det noen ting som er viktig å tenke på når en numerisk modell utarbeides. Kapittelet presenterer derfor småskalaforsøk som er gjort for å ta en beslutning på hva som er mest passende for denne oppgaven. Videre presenteres den endelige modellen som er så realistisk som det var mulig å få den, i tillegg til oppførselen og stivheten til rammen. Til slutt påpekes avvik i modellen.

Mesteparten av verdier benyttet i denne oppgaven og metoder for modellering er hentet fra Piculin et al. (2016). De har benyttet seg av forsøk, beskrevet tidligere i denne oppgaven, til å kalibrere modellen og metodene. På denne måten oppnås tilnærmet like resultater fra det fysiske forsøket og den numeriske modellen. Forsøkene som ble benyttet som sammenligningsgrunnlag for å kalibrere verdiene i modellen er strekktesten, skjærtesten og en fullskala veggtest, beskrevet i kapittel 2.6. Strekktesten ble benyttet for å utarbeide en hyperelastisk og viskoelastisk modell for limet, mens skjærtesten ble benyttet for å se nærmere på kohesiv overflate med bruk av traksjon-separasjonsloven. Til slutt ble alt benyttet for å simulere en fullskala vegg numerisk. I artikkelen har de med bakgrunn i resultatene til Nicklisch og Serrano (2014) valgt å benytte limet Nolax C44.8505, da begge har trukket den beslutningen at det er limet som er verdt videre forskning (Piculin et al., 2016). Det er derfor dette limet som er benyttet i modelleringen i denne oppgaven.

Programmet som benyttes til den numeriske modelleringen er Finite Element Method analyseverktøyet Abaqus 6.14. Det kan benyttes til å beregne både dynamiske og statiske problemer i både to og tre dimensjoner. Programmet kan brukes til å beregne et vidt spekter av ingeniørproblemer. I denne oppgaven benyttes Abaqus/CAE 6.14 for modellering og Abaqus/Standard for analysen og beregningene.

Glass har best motstand mot jevnt fordelte laster (Winter et al., 2010) og derfor er det benyttet et kontinuerlig limfeste rundt hele glasset i denne modellen. Bakgrunnen for valg av blant annet type lim, festemetode for glasset og elementtyper er presentert i kapittel 2. Det vil derfor i dette kapittelet bare presenteres det som er benyttet.

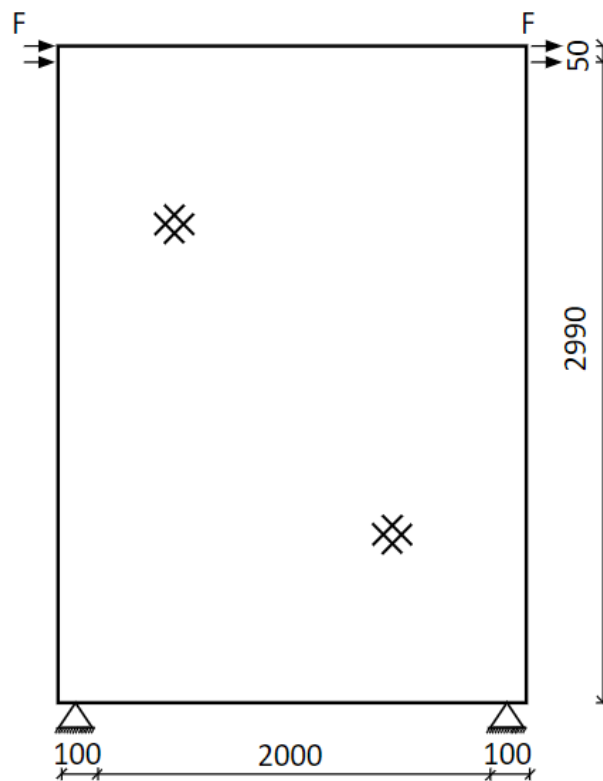
#### **4.1 Numerisk småskalaforsøk - Glasspanel**

Av alle delene som modelleres i hovedmodellen, er det glasset det kan være aktuelt å modellere som noe annet enn 3D-element. Dette er fordi tykkelsen er vesentlig mindre enn høyden og bredden. Det ble derfor gjennomført et numerisk småskala forsøk for å se om det kan være fordelaktig å benytte noe annet enn et 3D-element ved modellering av glasset. De forskjellige elementene som ble testet var:

- *3D solid*: Solid del, solid tverrsnitt, element type 3D spenning, C3D8R
- *Kontinuum skall*: Solid del, skall tverrsnitt, element type kontinuum skall, SC8R
- *Konvensjonelt skall*: Shell del, skall tverrsnitt, element type skall, S4R

3D solid ble testet da dette er elementtypen som er benyttet for de andre materialene og elementene i hovedmodellen, mens kontinuum og konvensjonelt skall ble testet for å se om det var mulig korte ned beregningstiden til Abaqus. Dette er på grunn av at solide 3D-elementer krevet et mer diskretisert elementnett over tykkelsen for å ta høyde for bøyning, noe som vil føre til en vesentlig høyere beregningstid. I tillegg er glasset betraktelig tynnere i forhold til bredde og høyde. Det kan derfor være fordelaktig å benytte kontinuum eller konvensjonelle skall, fremfor 3D solid. Parametere som er tatt til betraktning for valg av elementtype er derfor tiden det tar Abaqus å beregne modellen og egnethet i en modell hvor resten av elementene er av typen 3D solid, C3D8R. Spenningsfordelingen i de tre modellene er grunnlaget for vurdering av om resultatene blir like.

Elastisitettsmodulen og tverrkontraksjonstallet til glass er tilsvarende det som blir benyttet i hovedmodellen, henholdsvis 70 000 MPa og 0.2. Glassets tykkelse er 10 mm, for øvrige dimensjoner se Fig. 4.1. Kraften  $F$  er satt på som en total last på 10 kN på hver side av ruten. Glasset er festet i xyz-retning i nedre venstre og høyre hjørne over en flate på undersiden lik 10x100. I tillegg er hele platen forhindre i å bevege seg ut av planet i bakre del av glassets ytterkanter (z-retning). Elementnettet er henholdsvis 20 mm over helt glasset i planet og det er benyttet 5 elementer i tykkelsen, for å ta høyde for bøyning, ved bruk av solide 3D og kontinuum-elementer.



*Fig. 4.1: Dimensions of the glass models*

Når de tre modellene med forskjellige elementer for glasset er utarbeidet og beregnet i Abaqus, oppnås tilsvarende resultater for alle glassene. En kan derfor se på parametere som tid og samhandling med andre elementer for å avgjøre hva som egner seg best i hovedmodellen. Vedlegg F viser en oversikt over forskyvning og spenninger til glassmodellene.

Det er ingen tvil om at modellen med konvensjonelt skall er den som beregnes raskest, med en tid på 51 sekunder, når den kjører med 4 prosessorer. Modellene med 3D solid og kontinuum skall hadde en beregningstid på henholdsvis 2 min og 33 sekunder og 2 min og 16 sekunder. Dette er en liten modell og det antas derfor at forskjellene vil være betraktelig større i en større og mer omfattende modell. Beregningstiden varierte litt innenfor hver modell, men det konvensjonelle skallelementet utmerket seg hver gang. Variasjonen fører derimot til at det er tilnærmet ingen forskjell mellom beregningstiden til modellene med 3D solid og en kontinuum skall. Hvis tid ses på som den viktigste faktoren må konvensjonelt skallelement velges for glasset. På en annen side viste det seg at det var vanskelig å benytte denne typen element i kombinasjon med 3D solidelementer. Det var spesielt kontaktflatene mellom det konvensjonelle skallelementet og 3D-elementene som ikke ble optimal, da overflatene fikk en større avstand enn programmet tillater. Ved økning av tykkelsen på 3D solidelementene på hver side av det konvensjonelle skallelementet, kom kontaktflatene nærmere nok til at modellen kunne starte beregningen. På den andre siden tok det vesentlig lengre tid å beregne modellen enn modellen med bare 3D solidelementer. Siden fordelene med tid ikke lenger er tilstede og det ikke var betraktelige forskjeller på de to resterende elementtypene, er det i denne oppgaven valgt å benytte 3D solidelement for glasset.

## **4.2 Numerisk småskalaforsøk - Kohesivt element og kohesiv overflate**

For å avgjøre hva som skal benyttes senere i oppgaven er det valgt å utføre et småskala-forsøk i Abaqus som sammenligner kohesive elementer med kohesive overflater.

Spenningsfordelingen vil benyttes som grunnlag for å avgjøre om modellene er sammenlignbare. Videre vil beregningstid og utførelse bli tatt i betraktning for hva som velges.

Modellene består av en enkel overlappskjøt mellom trevirke og glass festet med det halvstive limet Nolax C44.8505. Glasset, limet og trevirket modelleres som 3D solidelementer, C3D8R, med parametere tilsvarende de som benyttes i hovedmodellen. Fig. 4.2 viser modellenes dimensjoner, samt randbetingelser og belastet område. Da det er skjærkreftene vi er ute etter, tillates trevirket kun å forskyve seg i y-retning. Lasten er påført på et område lik overflaten til trevirket (18 mm x 50 mm) med en total last på 1 kN.



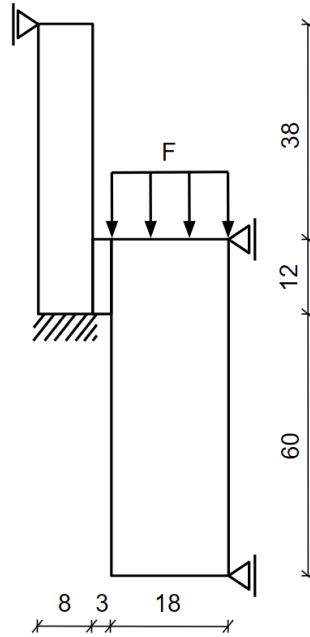


Fig. 4.2: Dimensions and boundary conditions for the test models, depth 50 mm

I modellen med kohesivt element modelleres det kohesive elementet som et 3D solidelement, C3D8R, med elastiske materialegenskaper og traksjon-separasjonslov. Verdiene som er benyttet vises i Tab. 4.1, der maks-komponenten til traksjonen er benyttet som bruddinitieringskriterium. Ved bruk av traksjon-separasjonslov oppstår det ofte problemer med konvergens. For å løse dette ble det lagt til en viskositetskoeffisient lik 0.0001 (Piculin et al., 2016). Det kohesive elementet legges så mellom limet og trevirket, før alle delene kobles til hverandre ved hjelp av overflate-til-overflatebasert tie. Tie kobler to separate overflater sammen slik at det ikke blir noen form for bevegelse mellom dem. Denne typen binding tillater at to flater tvinges sammen, selv med ulikt elementnett.

Tab. 4.1: Parameters of the cohesive traction-separation law with lower initial stiffness (Piculin et al., 2016)

	$K_{nn}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_{ss}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_{tt}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$t_n^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$t_s^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$t_t^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\delta_m^f$ [mm]
<b>Solid Wood</b>	$10^3$	3.0	3.0	$t_s^0 10^2$	4.6	4.6	6.5

$K_{nn}$ ,  $K_{ss}$  og  $K_{tt}$  er de elastiske stivhetsparameterne,  $t_n^0$ ,  $t_s^0$  og  $t_t^0$  de nominelle kohesive traksjonene (en normal og to skjær) og  $\delta_m^f$  defineres som den effektive bruddseparasjonen forklart i kapittel 3.2.

I modellen med kohesiv overflate blir de samme parameterne fra Tab. 4.1 lagt inn i interaksjonsegenskaper. Kohesiv overflate er enklere å modellere og krever kun overflate-til-overflatekontakt (interaksjon) mellom limet og trevirket, samt overflate-til-overflatebasert tie (binding) mellom limet og glasset.

Når modellene var utarbeidet og beregnet i Abaqus viste resultatene helt like spenningsfordelinger og forskyvning (se vedlegg G). Modellen med kohesiv overflate brukte derimot over dobbelt så lang beregningstid sammenlignet med kohesivt element. Selv med en så markant forskjell i beregningstid brukte modellen med det kohesive elementet bare 44 sekunder. Det vil si at beregningstiden til hovedmodellen som blir presentert i kapittel 4, mest sannsynlig bare vil være noen minutter lengre, da den i utgangspunktet ikke har så lang beregningstid. I tillegg må det også tas høyde for den ekstra tiden det tar å modellere og plassere det kohesive elementet. Da begge metodene gir like spenningsbilder og forskyvning, er det på grunnlag av enklere modellering valgt å benytte kohesiv overflate videre i oppgaven.

### **4.3 Hovedmodellen**

Tre-glassrammen som modelleres består i hovedsak av en større treramme med bjelker og søyler 140 mm x 450 mm, samt en mindre treramme som glasset festes til ved bruk av det halvstive limet Nolax C44.8505, Fig. 4.3 (venstre). Glasset er festet til den lille rammen med en dobbel overlappskjøt som vist i Fig. 4.3 (høyre), da Ber et al. (2014a) som tidligere nevnt har konkludert med at det vil gi større stivhet sammenlignet med T-skjøt og enkel overlappskjøt.

Den lille rammen er festet i ytterkant av den store rammen, som vist lengre ned i Fig. 4.5. Den store rammen representerer et utsnitt av bærekonstruksjonen til et større bygg. I praksis vil den lille rammen med glasset bli løftet opp og festet i bærekonstruksjonen. Derfor er også den store rammen med i modellen. Som Fig 4.5 også viser strekker søylene til den store rammen seg  $2 \times b = 280$  mm over og under resten av konstruksjonen. Dette er for å unngå lokale krefter i den lille rammen. På denne måten vil den lille rammen kun påvirkes av den totale forskyvningen til den store rammen, og ikke konsentrerte krefter og spenninger som følge av randbetingelser og lastpåføring.

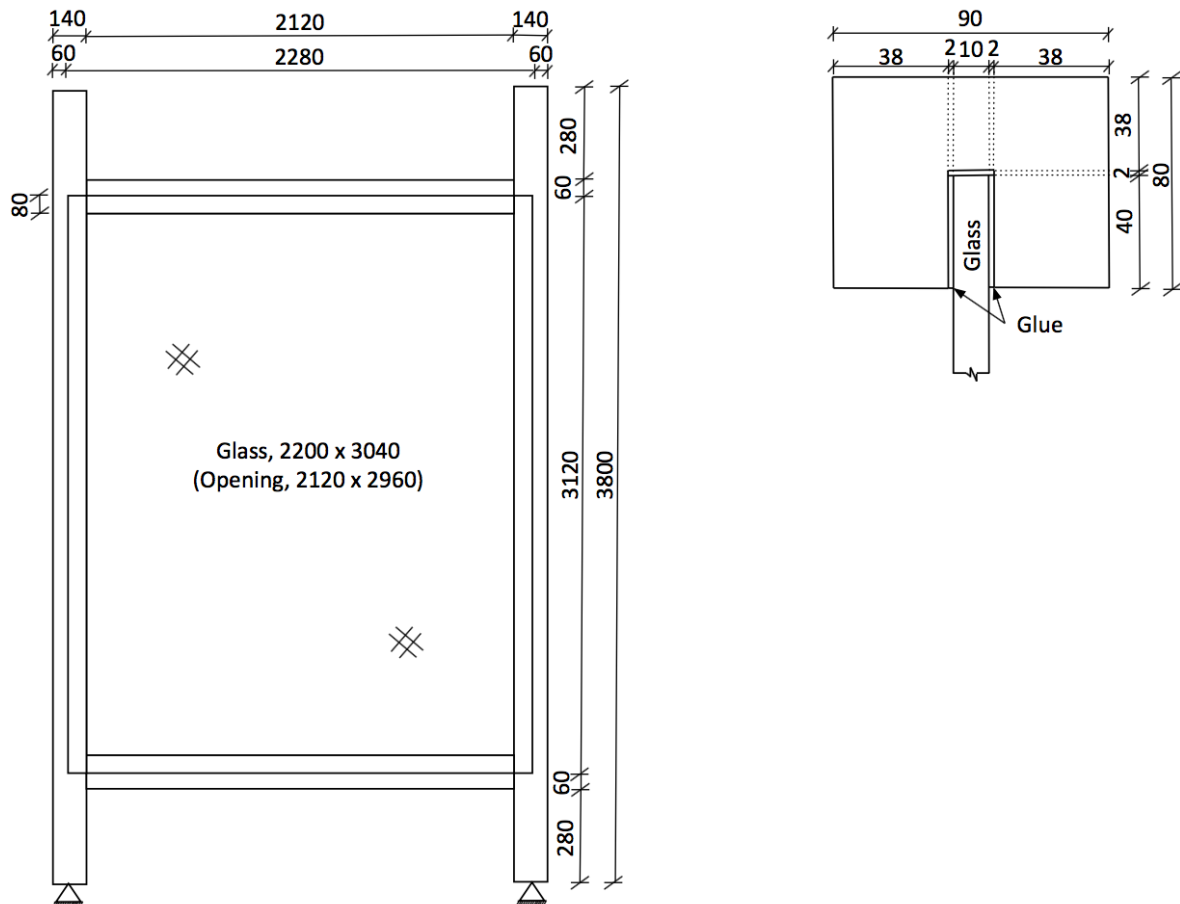


Fig. 4.3: (left) Dimensions of the timber-glass frame (right) Cross section of the little frame with glass and glue

Alle delene i rammen er modellert som solide 3D-elementer, C3D8R. Timeglassmoder forårsaket av redusert integrasjon i planet kontrolleres her effektivt ved hjelp av timeglasskontroll.

Da det er begrenset med tidligere forskning som går i dybden på modelleringen av en tre-glassramme, ble samme antakelser som i Piculin et al. (2016) tatt. Den numeriske modellen er derfor basert på følgende antagelser:

- Glasset og trevirket opptrer lineært elastisk
- Nolax opptrer elastisk eller hyperelastisk
- Nolax-glassfestet er ideelt (tie)
- Nolax-trefestet er representert med en kohesiv overflate-til-overflatekontakt beskrevet av en traksjon-separasjonslov

## Materialer

Glasset ble modellert som et lineær-elastisk isotropisk materiale med elastisitetsmodul lik 70 000 MPa og tverrkontraksjonstall lik 0.2 (Piculin et al., 2016). Trevirket ble modellert som et lineær-elastisk ortotropisk materiale, der egenskapene er definert med ingeniør-konstanter, vist i Tab. 4.2.

Tab. 4.2: Mechanical properties of timber C30 (EN 338:2009)(Kristian Dahl, 2010)

<b>E1</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>E2</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>E3</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>Nu12</b>	<b>Nu13</b>	<b>Nu23</b>	<b>G12</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>G13</b> [N/mm <sup>2</sup> ]	<b>G23</b> [N/mm <sup>2</sup> ]
12000	400	400	0.019	0.019	0.6	750	750	30

Rammen er ikke testet i laboratorium og er derfor ikke en gjenspeiling av et virkelig forsøk. Modellen er dermed utviklet som en generell modell når det kommer til trevirket og retning. Med bakgrunn i dette er forskjellen i tangentiell og radiell retning neglisjert, der retning 2 og 3 er orientert i trevirkets tverrsnitt og retning 1 er orientert i langsgående retning, for både søylene og bjelkene, se Fig. 4.4.

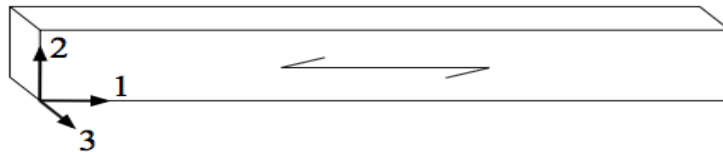


Fig. 4.4: Orientation directions

Når limet skal modelleres må det vurderes om det oppfører seg elastisk, hyperelastisk eller visko-hyperelastisk. Piculin et al. (2016) har testet alle de tre forskjellige typene. Ut i fra deres resultater er det i denne oppgaven hentet ut verdier for elastisk og hyperelastisk oppførsel. Verdier for det viskoelastiske tillegget er ikke funnet gjennom arbeidet med denne oppgaven og ble derfor heller ikke modellert. Begge ble modellert som et isotropisk materiale, hvor det elastiske limet ble modellert med elastisitetsmodul 60 MPa og tverrkontraksjonstall lik 0.39 og det hyperelastiske med en Marlow-funksjon med verdier vist i Tab. 4.3.

Piculin et al. (2016) benyttet enaksiale testdata fra strekktesten beskrevet i kapittel 2 til å kalibrere verdiene som gav grunnlaget for Marlow-funksjonen. Verdiene er gjengitt i en graf i artikkelen, som igjen er benyttet til å hente ut verdiene i Tab. 4.3. Dette kan føre til at det er små ulikheter mellom tallene som er benyttet i denne oppgaven og de benyttet av Piculin et al. (2016). Da antallet data som er hentet ut fra diagrammet er 13, ble smoothing anvendt med en verdi på 13.

Tab. 4.3: Values for the Marlow hyperelastic function

<b>Nom. stress</b>	0.0	0.9	1.0	1.3	1.5	1.8	2.0	2.2	2.8	3.15	3.6	4.1	4.5
<b>Nom. strain</b>	0.0	0.05	0.07	0.1	0.15	0.2	0.25	0.3	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3

## Fester

For å modellere festet mellom lim og trevirket ble kohesiv overflate-til-overflatekontakt (interaksjon) med traksjon-separasjonslov benyttet. Verdiene er vist i Tab. 4.3.

Tab. 4.3: Parameters of the cohesive traction-separation law (Piculin et al., 2016)

	$K_{nn}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_{ss}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$K_{tt}$ [N/mm <sup>3</sup> ]	$t_n^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$t_s^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$t_t^0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$\delta_m^f$ [mm]
<b>Solid Wood</b>	10 <sup>3</sup>	3.0	3.0	$t_s^0 10^2$	4.6	4.6	6.5

Nolax-glassfestet er som tidligere nevnt antatt å være ideelt. Derfor er tie benyttet for å feste kontaktflatene til hverandre. I tillegg er den lille rammen festet til den store trerammen ved hjelp av tie på den bakre flaten. Denne type feste mellom rammene gjør at rammen oppfører seg stivere enn den i praksis ville ha vært. På en annen side har det i denne oppgaven vært fokus på å lage en generell modell og det er ikke utført test i lab. Dette gjør at det ville vært vanskelig å modellere festet korrekt. Det antas at den lille rammen ved et forsøk limes og/eller skrus til den store rammen slik at den blir festet over hele bakre flate. Derfor er rammen festet med tie på tilsvarende flate. Dette er en av de tingene som bør ses nærmere på ved sammenligning av test i laboratorium og numerisk modell.

Når det kommer til festene mellom søylene og bjelkene på den store og lille rammen har flere mulige festemetoder blitt diskutert. Det ble først laget en modell der hjørnene ble festet ved hjelp av overflate-til-overflate tie. Problemet med bruk av tie festet over hele overflaten er at selve rammen blir for stiv. Flere mulige metoder ble derfor diskutert for å gjøre knutepunktet mindre stivt. For eksempel kan en liten del av endene nær festene (omtrent like lang som bredden til delen) gjøres svakere enn resten av trevirket, men dette krever nærmere testing i laboratorium for å få realistiske verdier. Det ble derfor valgt å feste delene med tie over en linje i stedet for hele overflaten som vist i Fig. 4.5. Ettersom Abaqus har problemer med å beregne modeller med felles feste-noder ble det valgt å ikke ha linjen helt ut til kanten, da punktene i kanten vil ha fire felles noder med festet mellom stor og liten ramme. I tillegg ble overflateegenskapene friksjonsløs og hard kontakt lagt til mellom bjelkene og søylene for at delene skal "vite" om hverandre og ikke gå gjennom hverandre.

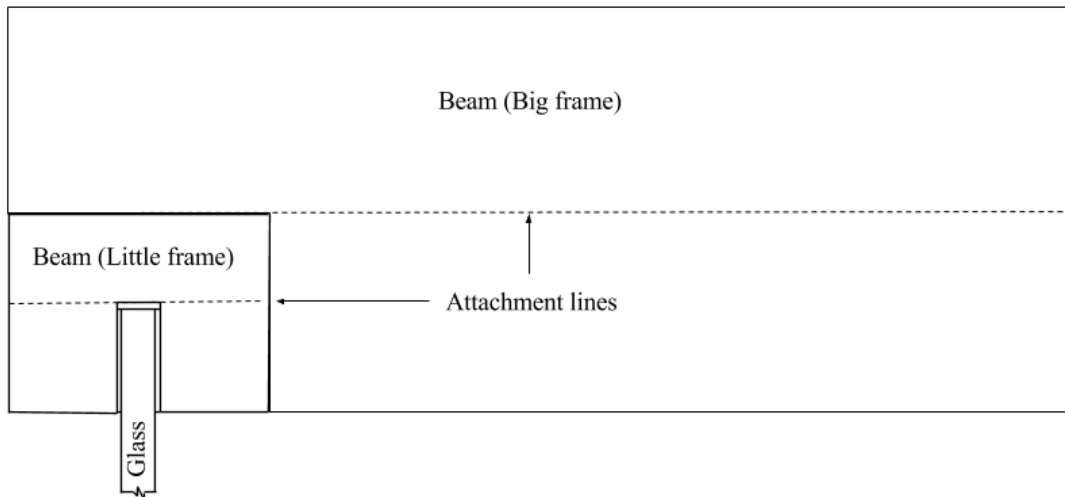


Fig. 4.5: Cross section of the frame where the dotted lines represent the attachment lines

### Randbetingelse og last

Rammen er festet over en linje midt under begge søylene og translasjonen er forhindret i x-, y- og z-retning. Oversiden av søylene er forhindret i å bevege seg ut av planet (z-retning), også her er det festet på en linje på midten av søylen. I modellen er det benyttet forskyvningskontroll. Forskyvningen er satt på overflatene på toppen av søylene til den store rammen, og er satt til 40 mm til høyre (positiv global x-retning). 40 mm er en høy forskyvning, men er benyttet likevel for å nå strekkapasitet til glasset.

### Elementnett

Elementnett kan være avgjørende for resultatene og det er derfor viktig at dette er nok diskretisert. Ved modellering av glasset og limet er dette spesielt viktig, da disse delene må ha mer enn ett element i tykkelsen for å kunne ta høyde for bøyning. I modellen er global seeds satt til 20 mm, og det er lagt til tre elementer over tykkelsen på limet og fem elementer over tykkelsen av glasset.

### Resultater

Resultatene, vist i Fig. 4.6 og 4.7 viser rammen som er modellert med en elastisk materialmodell for limet, da det er denne som er valgt å se videre på. Det ble ikke utført laboratorieforsøk i forbindelse med denne oppgaven og det er derfor vanskelig å si om den elastiske eller hyperelastiske modellen er mest realistisk for limet. Derfor ble det tilfeldig at det var den elastiske modellen som ble benyttet videre i resterende modeller presentert i kapittel 5.

Likevel ble rammen beskrevet i dette kapitlet testet med både en elastisk og hyperelastisk materialmodell for å se hvilken virkning det hadde på modellen, slik at den ved et eventuelt senere laboratorieforsøk kan justeres. Resultatet viser at rammen med den elastiske materialmodellen oppfører seg stivest. På en annen side vil denne rammen overskride strekkapasiteten til glasset ved en total forskyvning på 40 mm, mens rammen med den hyperelastiske materialmodellen holder seg under grensen.

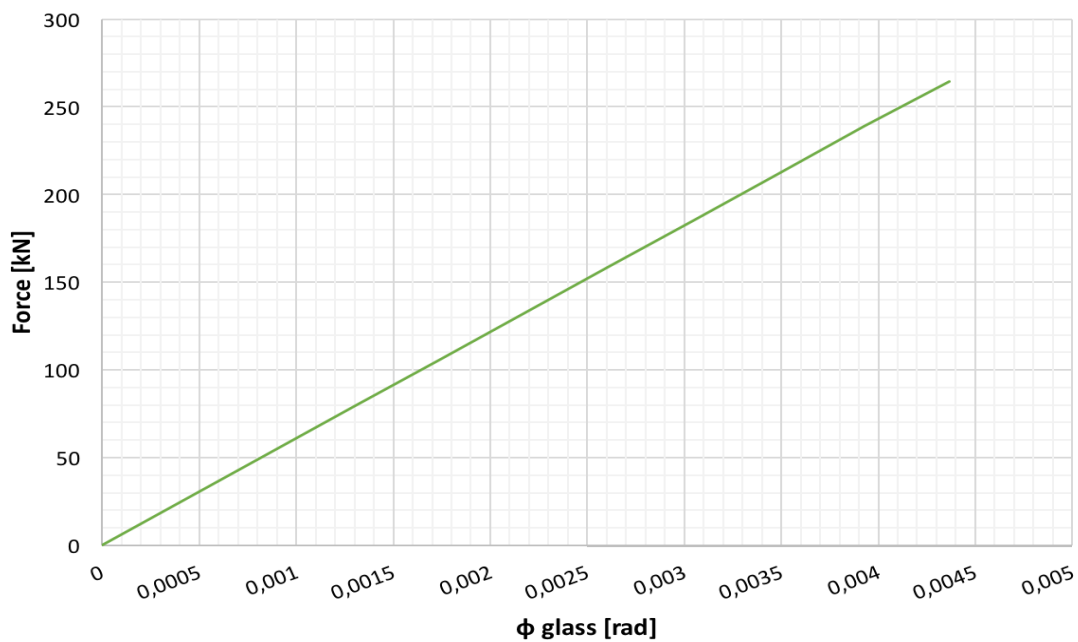


Fig. 4.6: Force-rotation curve

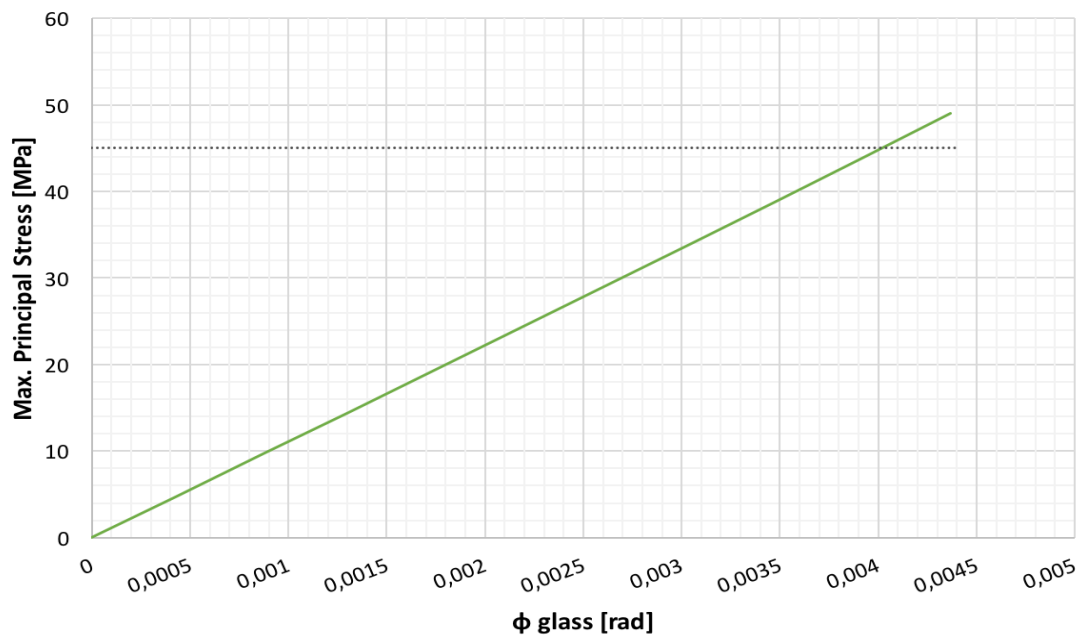


Fig. 4.7: Stress-rotation curve

Resultatene viser en stivhet på 60 524 kN/rad og en maks reaksjonskraft på 264 kN med en total forskyvning av rammen på 40 mm. Dette gir en forskyvning på 13,3 mm i glasset. På en annen side er strekkfastheten til glass lik 45 MPa (Winter et al., 2010). Ved maks reaksjonskraft som tilsvarer en forskyvningsvinkel i glasset på 0.00436 radianer, vil strekkkapasiteten til glasset være overskredet og glasset har gått til brudd, se Fig. 4.7. Strekkkapasiteten overskrides ved en vinkel på 0.004 radianer som tilsvarer en egentlig maks reaksjonskraft på 243 kN.

Fig. 4.8 viser spenningsfordelingen i glasset, der de høyeste spenningene finnes i nedre venstre hjørne og øvre høyre hjørne. Dette stemmer overens med Huveners (2009).

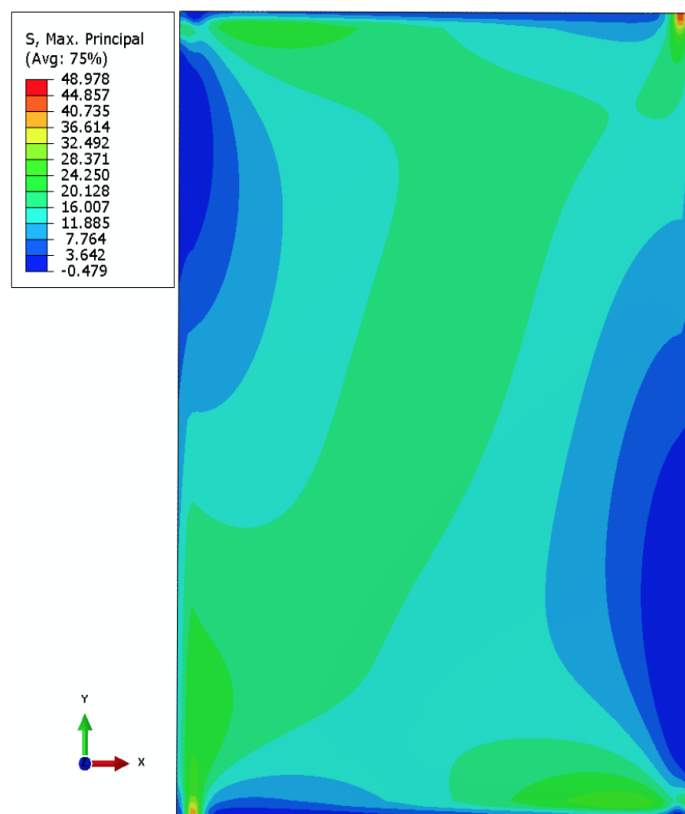


Fig. 4.8: Stress pattern in the glass



#### 4.4 Avvik

I denne oppgaven er det undersøkt hvordan glasset oppfører seg og hvordan man kan dra fordel av glassets egenskaper i en treramme. Det er derfor et stort fokus på glasset, men det er flere materialer i modellen som også kan ha innvirkning på resultatene.

Som nevnt og vist tidligere i Fig. 4.5 ble søylene og bjelkene koblet sammen over en linje. Denne linjen kunne ikke gå helt ut i kantene da nodene her vil bli festet i flere retninger. Det ble derfor laget en oppdeling av rammen 2 mm fra kanten på den siden den er festet til den store rammen. Når tre hjørnene ble festet på denne måten oppstod derimot høye lokale spenninger som vist i Fig. 4.9. Spenningene er valgt å se bort ifra, da hjørnene ikke er modellert på en måte som gjenspeiler virkeligheten og skaper spenninger som er mer konsentrert enn de vil være i praksis. Sett bort fra de lokale spenningene er de resterende spenningene i alle trerammene presentert i denne oppgaven innenfor kravene gitt i NS-EN 1995-1-1 punkt 6.1.2 - 6.1.5.

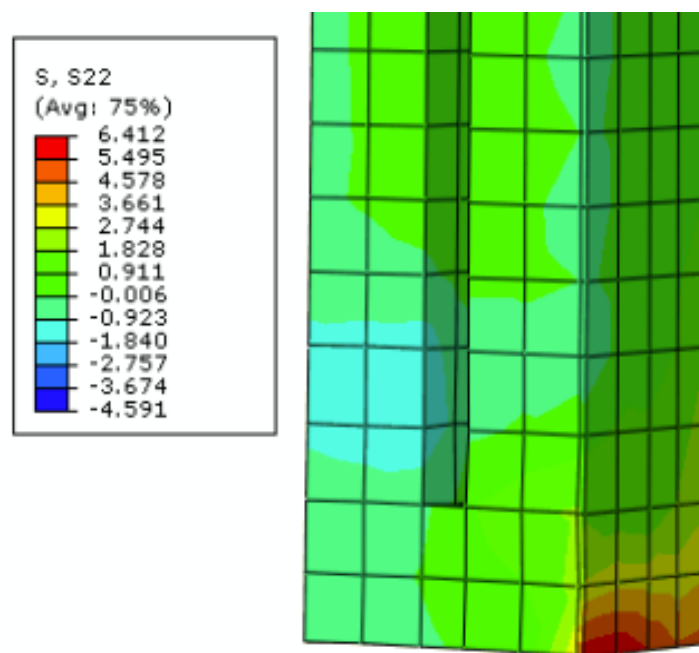
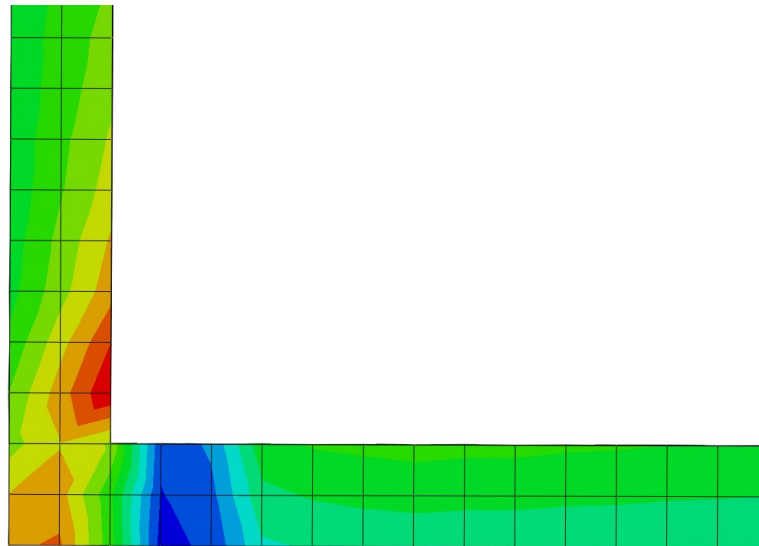


Fig. 4.9: Local stresses in the column due to partition

Det andre materialet som ikke er nevnt så mye er limet. Dette er nesten intakt i alle punkter, men i øvre høyre hjørne og nedre venstre hjørne er det høyere spenning enn strekk- og skjærkapasiteten til limet. Fig. 4.10 viser utredningen av spenningene. Selv om kapasiteten til limet i hjørnene er overskredet er resten av limet intakt. At limet ryker i noen punkter betyr ikke nødvendigvis at glasset og rammen vil kollapse. Det er derfor valgt å se på spenningene i glasset som dimensjonerende for rammen. Når det er sagt er det i de samme hjørnene som limet ryker at glasset får de høyeste spenningskonsentrasjonene. Det er derfor brudd i limet som fører til at glasset når sin strekkapasitet og går til brudd. Da det likevel er glasset som må ryke for at rammen skal miste sin stivhet, er det valgt å vurdere glassets maksimale spenninger videre i oppgaven, fremfor limet.



*Fig. 4.10: Adhesive stresses*

## 5 Parameterstudie

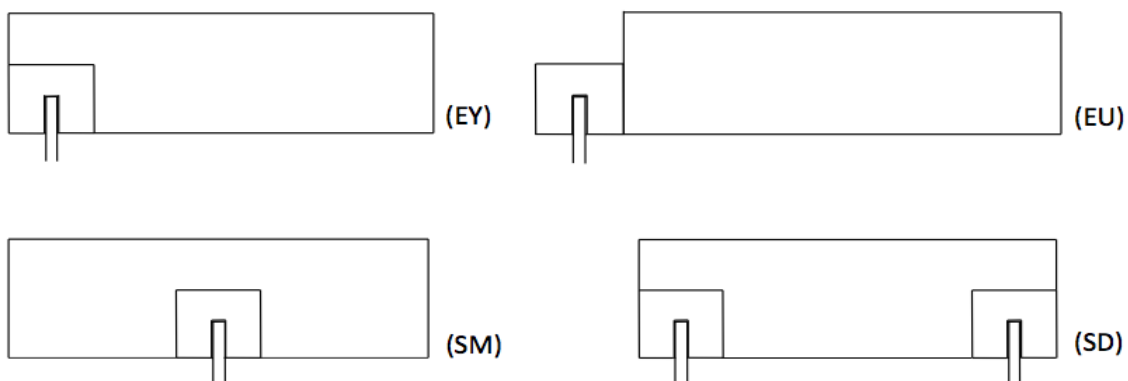
Dette kapittelet vil ta for seg ulike parametere som påvirker stivheten til en tre-glassramme. Det er med for å svare på oppgavens problem, altså hva som har innvirkning på stivheten til rammen. Ettersom dette er et fagfelt som det foreløpig er forsket lite på, er det mange parametere i modellen som kan endres. Det er derfor valgt å se på et bredt utvalg av parametere, fremfor å gå i dybden på en ting. Dette vil gi en indikasjon på hva som har den største betydningen på stivheten.

Modellen presentert i kapittel 4.3 vil bli benyttet som utgangspunkt, der endringer som må gjøres utover dette vil nevnes. Dette anses som nødvendig ettersom flere av parameterendringene vil påvirke resten av modellens geometri og/eller parametere, som igjen vil kunne være med på å bidra til den økte stivheten. Resterende verdier som ikke nevnes samsvarer med hovedmodellen.

Oppgavens hovedtema er horisontal avstivning med glassfelt. Derfor holdes hovedfokuset gjennom kapittelet på glassets krefter, forskyvning og spenninger. Resultatene vil presenteres og sammenlignes med hjelp av diagrammer som viser kraft i forhold til forskyvning i glasset representert ved vinkel. For å gi en mer oversiktlig fremstilling vil resultatene diskuteres etter hvert delkapittel, fremfor å samle opp til en diskusjon på slutten.

### 5.1 Plassering

Først er plassering av den lille rammen inni den store presentert og sammenlignet. Det er testet å sette rammen i ytterkant (EY), utenpå (EU), i midten (SM) og på begge sider (SD) av den store rammen, se Fig. 5.1.



*Fig. 5.1: Different locations of the little frame in the big frame (EY) along the edge, (EU) on the outside, (SM) in the middle and (SD) on both sides*

Rammen som er festet i ytterkant er den som er presentert i kapittel 4 og er den originale rammen. Den som er festet i midten skiller seg fra den originale ved at den er festet med tie til den store rammen på både venstre og høyre side, alt annet er helt likt.

Videre i oppgaven vil rammene omtales i samsvar med Fig. 5.1 som:

- Ramme EY (eksentrisk - ytterkant)
- Ramme EU (eksentrisk - utsiden)
- Ramme SM (symmetrisk - midten)
- Ramme SD (symmetrisk - dobbel)

Resultatene er vist i Fig. 5.2 og 5.3:

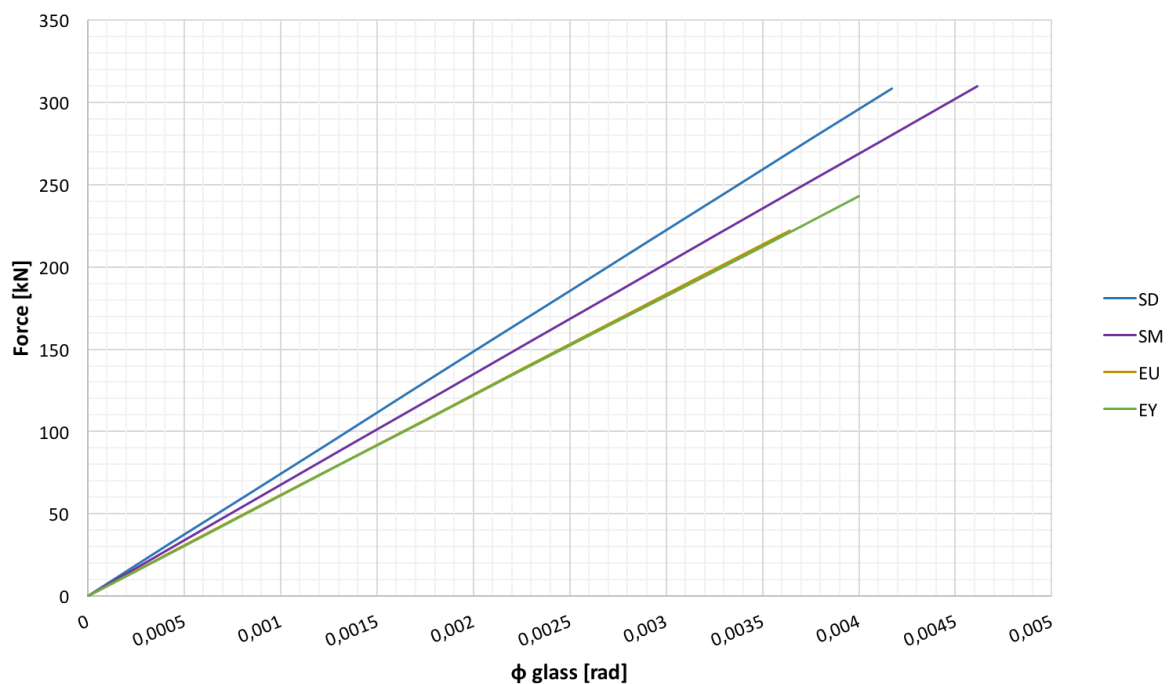


Fig. 5.2: Force-rotation curve for the different locations of the little frame

Fig. 5.2 viser sammenligningen, med tanke på stivhet, av de forskjellige plasseringene av den lille rammen. Vinkelen  $\varphi = \arctan\left(\frac{\delta_{glass}}{h_{glass}}\right)$ , hvor  $\delta_{glass}$  = forskyvningen i glasset og  $h_{glass}$  er glassets høyde. En kan se at Ramme EY og EU kommer vesentlig dårligst ut, og har tilnærmet lik stivhet. Ramme SM og SD utmerker seg og har betraktelig høyere stivhet enn de to resterende. Av disse to rammene er det den med to små rammer som utmerker seg mest. På en annen side krever dette dobbelt så mye glassmateriale, og vil kun gi en økt stivhet på 10 % sammenlignet med rammen med den lille rammen i midten.

Det ble på forhånd forventet en enda større økning i stivhet ved bruk av to små rammer. Om resultatene er realistiske er vanskelig å si helt sikkert, men det er viktig å huske på at dette er en numerisk modell der eventuelle feil i modellen vil påvirke resultatene.

Når vi sammenligner de forskjellige rammene er det ikke nok å bare se på stivheten. Stivheten må også ses i sammenheng med spenningene i glasset, da de forskjellige kombinasjonene gir store forskjeller i hvor fort glasset møter strekkapasiteten. Fig. 5.3 viser maks strekkspenning som oppstår i glasset på grunn av vinkelen glasset får ved forskyvning. Den stiplede linjen representerer glassets strekkfasthet. I figuren kan man se at Ramme EU er den som har høyest spenninger i forhold til vinkelen, og er derfor også den som når maks strekkspenning først av de tre rammene. I tillegg er den, som tidligere nevnt, en av de to som kommer dårligst ut når det kommer til stivhet. Ramme EY når også maks strekkspenning i glasset med en forskyvningskontroll på 40 mm. Overskridelsen av maks strekkspenning i både ramme EY og EU er vist i Fig. 5.2 ved at linjene er stoppet ved vinkelen som gir maks spenninger i glasset. På denne måten kan de maksimale kreftene rammene tåler før de går til brudd leses ut. Fig. 5.3 viser i tillegg at Ramme SM og SD ikke når maksimale strekkspenninger i glasset med en forskyvning av rammen på 40 mm.

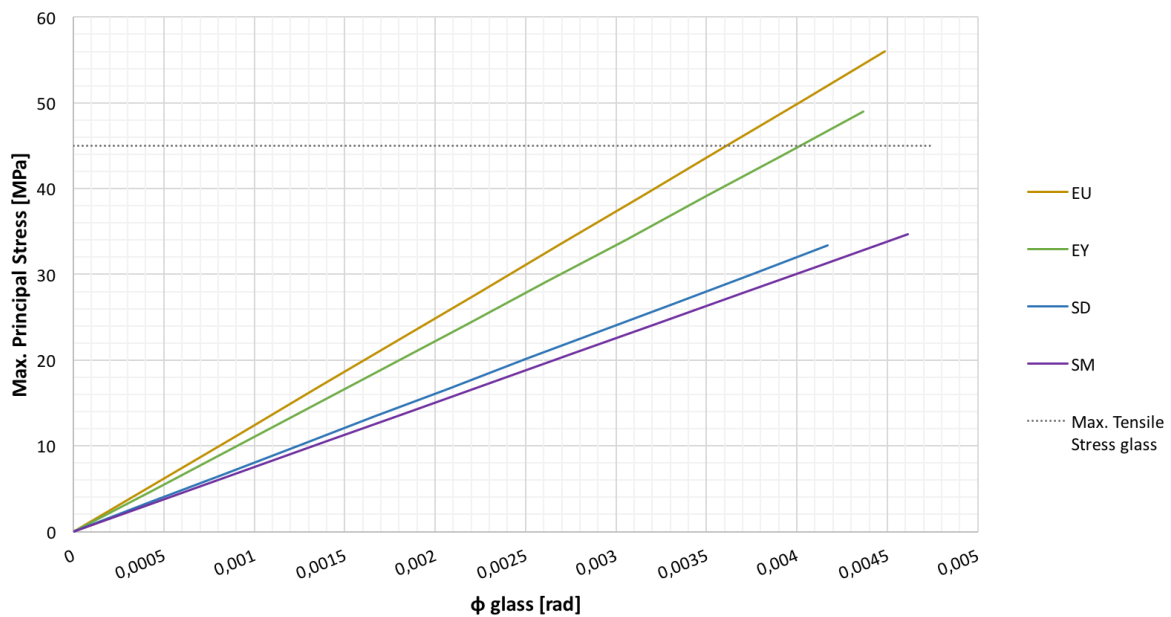
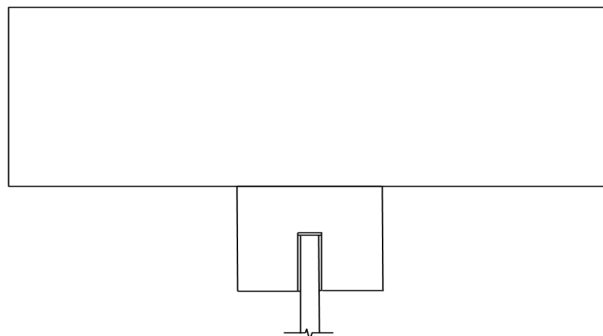


Fig. 5.3: Max. Principal Stress - Rotation curve for the different locations of the little frame

Resultatene viser at de symmetriske rammene er stivest og har lavest spenninger i glasset. Ber et al. (2014a) konkluderte med at posisjonen til glasset kunne påvirke stivheten. I dette tilfellet kan resultatene tyde på at rammene med symmetrisk tverrsnitt har høyest stivhet. Sett opp mot teorien virker dette sannsynlig da usymmetriske tverrsnitt har høyere torsjonskrefter (Meccanica, u.d.). Dette er heller ikke ønskelig da den ekstra bøyningen i glasset gjør det vanskelig å forutsi bøyepressingen grunnet mikrosprekker.

Ettersom Ramme SD vil koste vesentlig mer enn Ramme SM, anses Ramme SM, med liten ramme i midten, som rammen det er verdt å benytte videre. Ramme SD kan derimot være et godt alternativ i enkelte tilfeller med sin høye stivhet og ekstra tyngde. For eksempel er stabiliteten i fleretasjes bygg et stort problem. Denne kan bedres ved høyere vekt oppover i etasjene, noe Ramme SD kan bidra med.

Det er også viktig å se på den praktiske utførelsen til rammene. I praksis vil det være vanskelig å feste Ramme SM slik den numeriske modellen er utført. En bedre løsning er presentert i Fig 5.4 og vil i tillegg til lettere utførelse bidra til høyere stivhet, da den store rammen vil bli stivere uten kuttet. Uten kuttet oppnås en 16,5 % økning i stivhet [kN/rad] og en 7,3 % lavere spenning i glasset. I tillegg vil bærekonstruksjonen forbli hel.



*Fig. 5.4: Cross section of the little frame fastened inside of the big frame*

## **5.2 Tykkelse på glasset**

Glasset er i denne modellen hovedelementet når det kommer til stivhet. Det har derfor blitt valgt å undersøke hvor mye glassets tykkelse har å si på stivheten til rammen. Tykkelsene som ble testet er 5 mm, 10 mm og 15 mm. Ytre dimensjoner på den lille trerammen er uforandret, sett bort fra trevirket i den lille rammen som blir påvirket at glassets økte tykkelse som vist i Fig. 5.5.

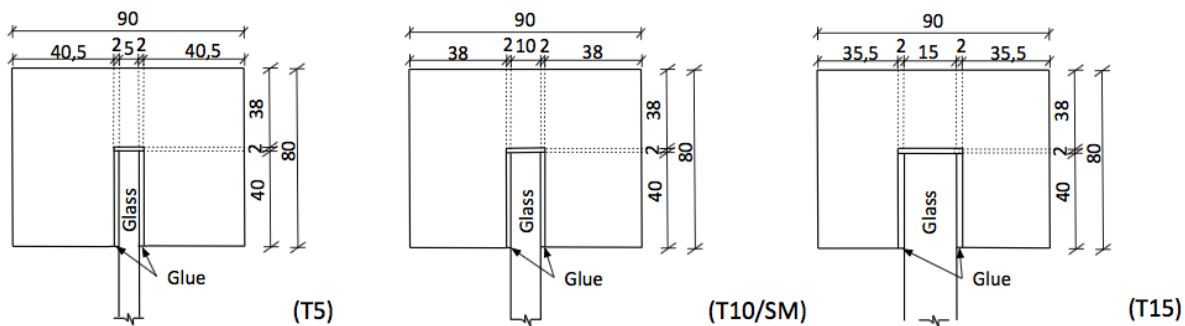


Fig. 5.5: Dimensions of the cross section for the little frame with different glass thickness  
 (T5) 5 mm glass (T10/SM) 10 mm glass (T15) 15 mm glass

Videre i oppgaven vil rammene omtales i samsvar med Fig. 5.5 som:

- Ramme T5 (Glasstykkelse 5 mm)
- Ramme T10/SM (Glasstykkelse 10 mm)
- Ramme T15 (Glasstykkelse 15 mm)

Resultatene er vist i Fig. 5.6 og 5.7:

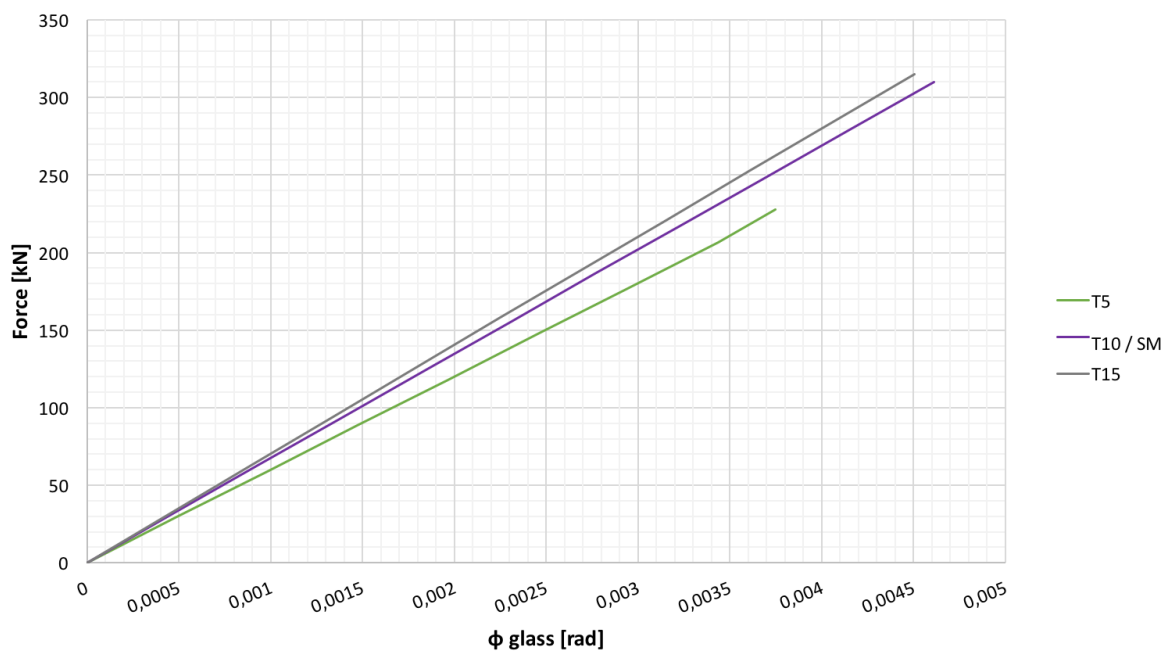


Fig. 5.6: Force-rotation curve for the different glass thickness

I Fig. 5.6 viser at stivheten øker med økende tykkelse på glasset, men forholdene mellom stigningstallene til Ramme T5, T10 til T15 er ikke like store og derfor ikke lineære. Når glassets tykkelse doubles (fra T5 til T10) oppnås en økt stivhet [kN/rad] på 12 %, mens det med en økning fra 10 mm til 15 mm oppnås en økt stivhet på bare 4 %. Dette kan tyde på at det finnes en maksimal tykkelse på glasset, hvor tykkelsen ikke lengre har noe å si for stivheten. Ut ifra resultatene kan det være hensiktsmessig å benytte et glass som er 10 mm fremfor 5 mm, men ikke nødvendigvis 15 mm da dette er dyrere, tyngre og ikke gir en betydelig gevinst. Tyngden kan derimot være fordelaktig i fleretasjes bygg. Resultatene stemmer også overens med forskning utført av Ber et al. (2014a) som mener at glassets tykkelse påvirker stivheten, selv om resultatene i denne oppgaven tyder på at det kun er opp til en viss tykkelse.

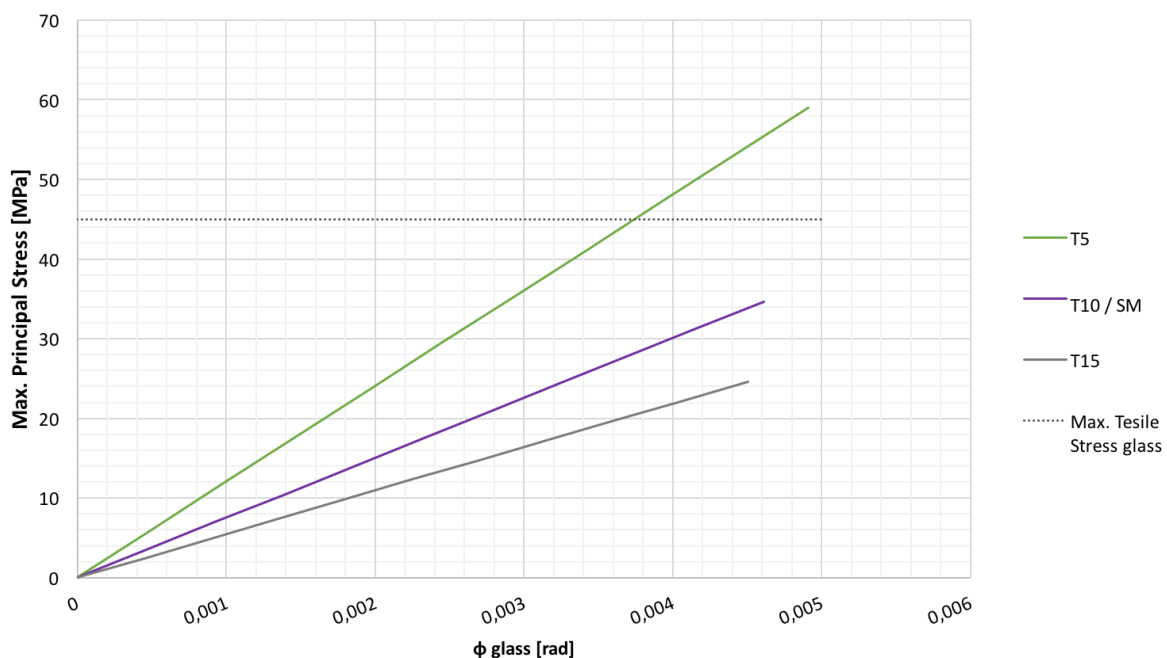


Fig. 5.7: Max. Principal Stress - Rotation curve for the different glass thickness

Fig. 5.7 viser at bruddspenningen til Ramme T5 er nådd ved gitt forskyvning. Dette er også representert i Fig. 5.6, hvor linjen for Ramme T5 er stoppet der maks strekkspenning er nådd. Her kan en se at det har stor betydning for kraften rammen tåler. Bruddspenningene er ikke nådd for Ramme T10 og T15, og selv om T15 har vesentlig lavere spenning vil ikke dette ha stor betydning for den totale lasten ved en forskyvning på 40 mm. Spenningen i glasset per radian øker med 71 % fra T15 til T10, og 28 % fra T10 til T5. Dette vil si at T10 vil nå maks strekkspenning før T15. På en annen side så er forskyvningen på denne modellen vesentlig høyere enn hva som er tillatt. Så lenge spenningene i T10 ikke er overskredet vil dette gi en bedre utnyttelse av glasset.



Resultatene viser altså en relativt liten forskjell i stivhet mellom Ramme T10 og Ramme T15. Siden strekkapasiteten til glasset ikke er overskredet i noen av modellene anses det at ved bruk av Ramme T10 oppnås en god utnyttelse av spenningene. Ut ifra dette kan det konkluderes med at høyere tykkelse gir høyere stivhet, men Ramme T10 anses som et like godt valg som T15, da rammen viser både høy stivhet og god utnyttelse av spenningene.

### 5.3 Størrelse på glassfeltet

Neste parameter det ble valgt å se på var størrelsen på glassfeltet. Her ble først bredden på glasset økt fra 2200 mm til 3040 mm, som også førte til at lengden på bjelkene i den store og den lille rammen måtte økes. Videre ble høyden redusert fra 3040 mm til 2200 mm, som førte til at høyden til søylene i den store og lille rammen måtte reduseres. I tillegg ble det modellert en ramme med b x h lik 3040 x 2200 mm, hvor bjelkene i rammene måtte økes i lengde og søylene kuttet. Alt annet er modellert på tilsvarende måte som beskrevet i kapittel 4.

Videre i oppgaven vil rammene omtales som:

- Ramme K2 (kvadratisk glassfelt: 2200 x 2200 mm)
- Ramme R23/SM (rektangulært glassfelt: 2200 x 3040 mm)
- Ramme R32 (rektangulært glassfelt: 3040 x 2200 mm)
- Ramme K3 (kvadratisk glassfelt: 3040 x 3040 mm)

Fig. 5.8 og 5.9 viser resultatene:

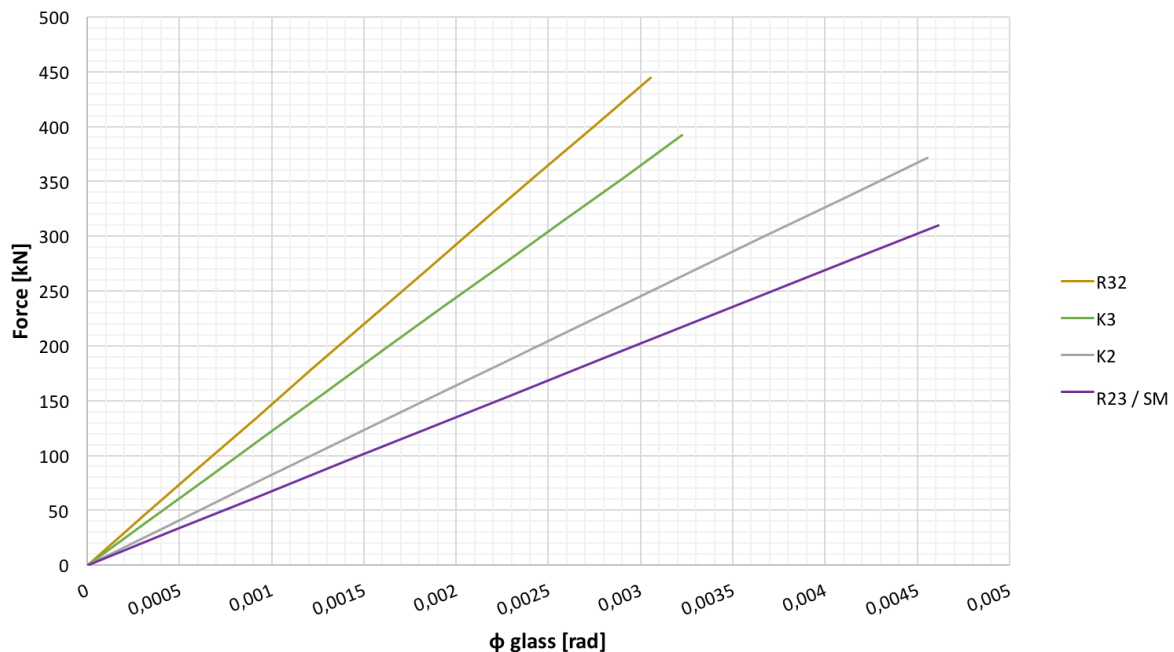


Fig. 5.8: Force-rotation curve for the different glass field sizes

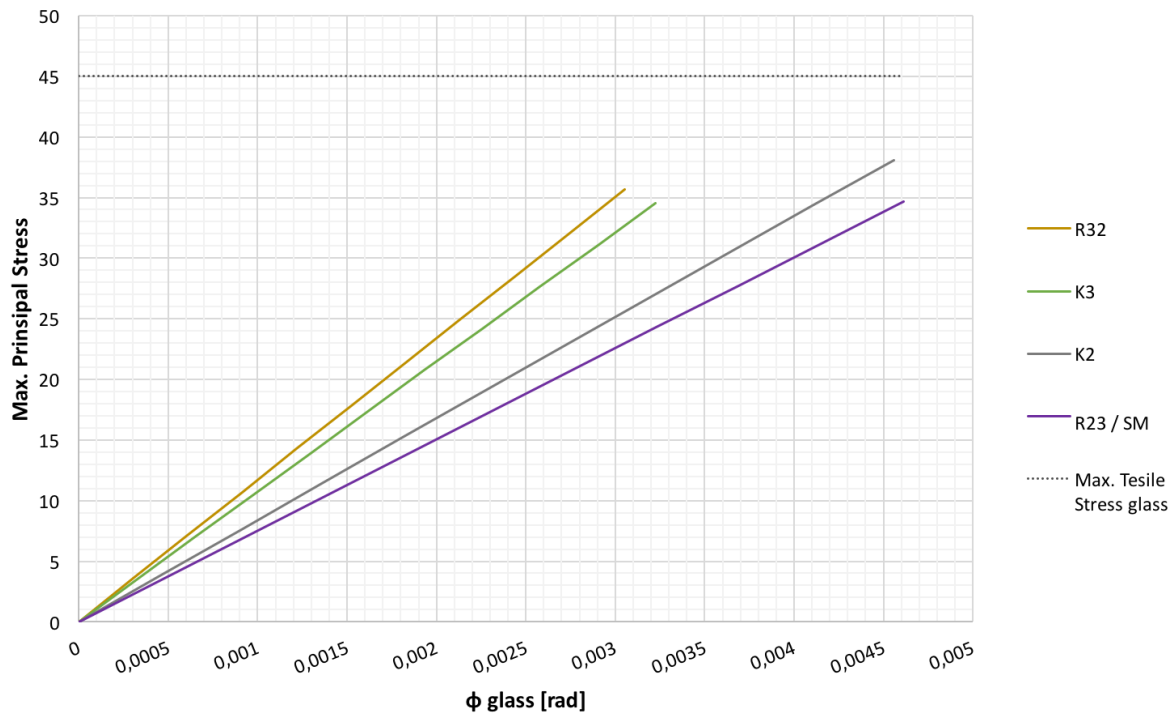


Fig. 5.9: Max. Principal Stress - Rotation curve for the different glass field sizes

Ved å se på Fig. 5.8 vises en betraktelig forskjell på glassene. En økning av glassets bredde på 38 % fra Ramme R23 til K3, tilsvarte en økning i stivhet på 80,9 %. Dette kan indikere at det er stor gevinst i å øke bredden og/eller størrelsen på glassfeltet. Når glassets bredde ble økt til 3040 mm, ble ikke bare bredden større, men glassfeltet ble også kvadratisk, i tillegg til at forholdet mellom bredde og høyde økte.

Ramme K2, med et glassfelt på 2200 x 2200 mm ble også undersøkt. Forholdet mellom bredde og høyde er tilsvarende K3, lik 1, mens høyden er minket med 28 % i forhold til Ramme R23. Likevel er ramme K2 hele 21 % stivere enn ramme R23. Ramme K3 har et areal som er 91 % høyere enn K2, men stivheten økte med bare 38 %.

Ramme R23 og Ramme R32 har tilsvarende areal, men forholdet mellom bredde og høyde er forholdsvis 0,724 og 1,382. I tillegg er det stor forskjell på stivheten til de to rammene. Ramme R32 er litt over dobbelt så stiv som Ramme R23 med tanke på forholdet [kN/rad]. Dette indikerer at forholdet mellom bredde og høyde har mye å si for rammen sin stivhet - hvor høyere forhold mellom bredde og høyde gir høyere stivhet. Dette underbygges ved å se på Ramme K3 og Ramme R32. Ramme R32 har et lavere areal enn Ramme K3, men er stivere.

Resultatene tyder på at når forholdet mellom bredde og høyde til glassfeltet øker, gir dette en

betraktelig økning i stivhet. Ved likt forhold mellom bredde og høyde, men med forskjellig areal, økte stivheten i prosent betraktelig mindre enn arealet. Dermed har forholdet mellom bredde og høyde større betydning for stivheten enn arealet. Når det er sagt er det også viktig å ta til betraktning at glassets høyde ikke bør overskride takhøyden. I tillegg vil det også være begrensninger når det kommer til bredden på glasset, da det skal plasseres inn i bærekonstruksjonen. Dette er derfor faktorer som også bør tas med i vurderingen om type løsning.

Legg merke til at ingen av rammene overskrider glassets strekkfastheten med den gitt forskyvningen på rammen på 40 mm (Fig. 5.9). I tillegg påpekes det at det er Ramme R32 og K3 som har den bratteste stigningen når det kommer til spenning, men i gjengjeld så har de en lavere forskyvning og totalkraft enn de to andre.

#### 5.4 Skjøt vs. Dobbel overlappskjøt

Ber et al. (2014a) konkluderte med at en dobbel overlappskjøt er den typen feste som gir høyest stivhet, og det ble derfor benyttet i alle modellene. Likevel var det interessant å se hvilken innvirkning det hadde på rammen hvis den ble limt med en T-skjøt, resultatene er vist i Fig. 5.10 og 5.11, hvor SM-T og SM-D står for:

- Ramme SM-T (Symmetrisk Midten - T-skjøt)
- Ramme SM-D (Symmetrisk Midten - Dobbel overlappskjøt)

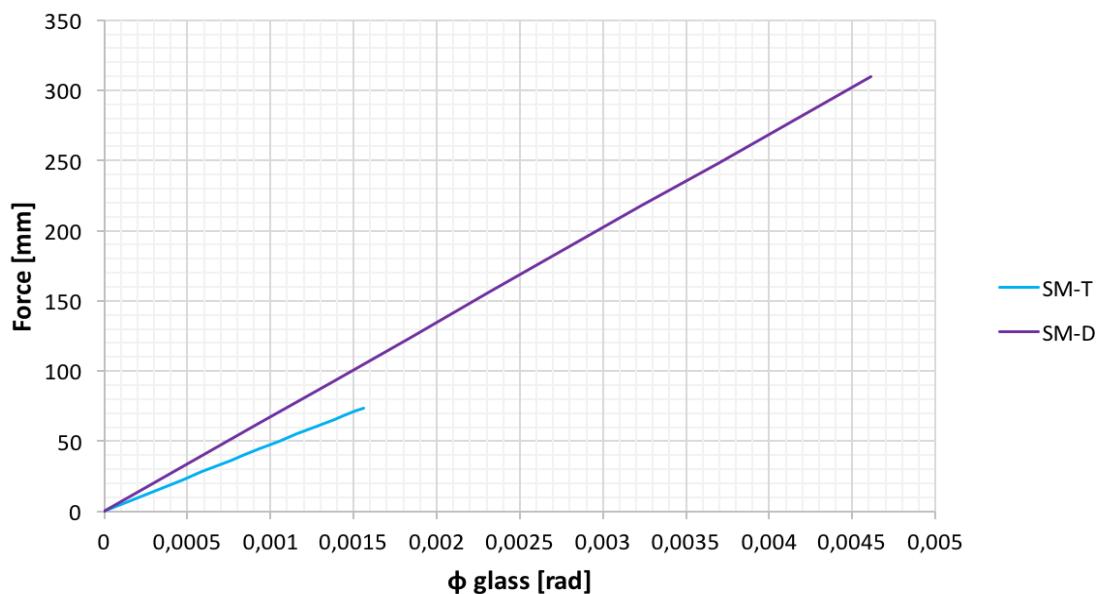


Fig. 5.10: Force-rotation curve for T-joint and double lap joint

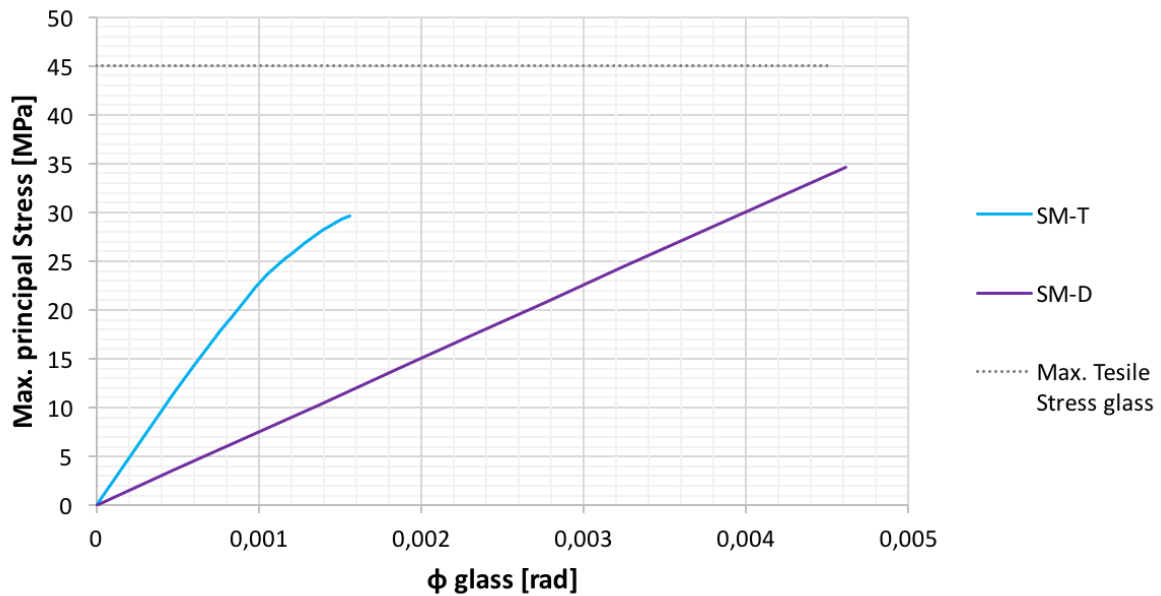


Fig. 5.11: Max. Principal Stress - Rotation curve for T-joint and double lap joint

Resultatene viser at rammen med dobbel overlappskjøt er 42,5 % stivere enn rammen med T-skjøt. Dette stemmer overens med forskningen til Ber et al. (2014a). I tillegg kan en se at kurven stopper ved en betydelig lavere vinkel og last. Dette er på grunn av verdien for den effektive separasjonen som er lagt inn i modellen. Den viser at forskyvningen har ført til at limet er så strukket ut at det ikke lengre er feste mellom glasset og trevirket. Som følge av dette stoppet beregningen av modellen. Bruddkriteriet for effektiv separasjon er det eneste bruddkriteriet som er i modellen. Dette bruddkriteriet fører til at spenningsøkningen i glasset ikke er lineær, men avtar etter at bruddinitieringskriteriet til limet er møtt. Spenningen i glasset når ikke strekkapasiteten i noen av tilfellene, men Ramme SM-T har en høyere spenning i glasset per radianer. En dobbel overlappskjøt anses derfor som den beste løsningen.

## 6 Konklusjon og videre forskning

Glass er i dag mest brukt som fasadeelement og vindu, men det viser seg at det også kan ha konstruksjonsmessige fordeler, som blant annet horisontal avstivning. Dette er noe som er relativt lite forsket på, men utrolig spennende å jobbe med.

Tre er et miljøvennlig materiale med lave CO<sub>2</sub>-utslipp gjennom produksjonen. Sammen med glass vil dette være en konstruksjon hvor store deler av materialene kan gjenbrukes, i tillegg til at begge materialer i seg selv er miljøvennlige. Dette kan føre til en grønnere byggeprosess. Dette er viktig da byggsektoren står for hele 40 % av dagens CO<sub>2</sub>-utslipp.

For at trerammen skal dra nytte av glassets stivhetsegenskaper er hvordan materialene festes sammen og med hva viktige faktorer. Det konkluderes med at det er halvstive lim, limt med en dobbel overlappskjøt som gir den beste utnyttelsen. Om limet bør modelleres elastisk, hyperelastisk eller visko-hyperelastisk, er vanskelig å si uten å ha gjort forsøk i laboratorium, men det nevnes at den elastiske materialmodellen gir en stivere ramme enn den hyperelastiske.

I tillegg har parametere som plassering av den rammen i bærekonstruksjonen, tykkelsen på glasset og forholdet mellom bredde og høyde på glasset stor innvirkning på stivheten. En symmetrisk plassering av den lille rammen vi gi den beste stivheten, hvor plassering i midten av bærekonstruksjonen er fordelaktig fremfor en ramme på hver side, da gevinsten i forhold til stivhet kanskje ikke veier opp for økt materialbruk og økonomi. Det neste som er testet er tykkelsen på glasset, hvor det viste seg at økt tykkelse ga økt stivhet. Hvor mye stivhet som oppnås ved å øke tykkelsen avtar derimot jo tykkere glasset blir, så det bør derfor finnes en balanse. Det som viste seg å ha størst innvirkning på stivheten var forholdet mellom bredde og høyde på glasset, hvor økt forhold gav stor økning i stivhet. Bredde og høyde på glasset har likevel en begrensning, da det skal plassers inn i bærekonstruksjonen.

## Videre forskning

Denne oppgaven begrenser seg til å modellere “vanlig” glass av typen floatglass på grunn av begrenset informasjon. Det kan derfor være fordelaktig å gjennomføre forsøk med andre typer glass som for eksempel kjemisk herdet og termisk herdet glass. Fordelen med disse glassene er at produksjonen skaper en trykksone i glassets ytterkanter og strekkspenninger i kjernen. Dette fører til at strekkspenningene som tilføres under lastpåføring utlignes av trykkspenningene, noe som vil forskyve tidspunktet for brudd og øke bruddlasten.

Fukt og temperatur kan ha stor innvirkning på hvordan trevirket utvider seg. Disse utvidelsene kan ha store konsekvenser for glasset, og bør derfor undersøkes nærmere.

Det er uendelig mange parametere som kan ha innvirkning på stivhet og det var derfor ikke mulig å teste alt i denne oppgaven. Det som ble testet er hvilken innvirkning parametere som plassering av glasset, tykkelse og dimensjoner på glasset har på den horisontale avstivningen. Andre parametere som derfor bør undersøkes nærmere er å lime på bare to eller tre sider, eller lime med en U-skjøt. I tillegg til dette hadde det vært interessant å se om materialet av den lille rammen har noe å si for stivheten og hvor stiv denne må være før videre økning av stivhet ikke har innvirkning på stivheten til rammen.

Videre vil det også være hensiktsmessig å gjøre forsøk i laboratoriet på en slik modell, for å kunne sammenligne resultatene og kalibrere modellen til å stemme bedre overens med virkeligheten. Hvis rammen viser seg å være mindre stiv enn den numeriske modellen viser anbefales det å se på modelleringen av hjørnene til trerammene og hvilken materialmodell som velges for limet.

Tilslutt nevnes det at det ville være interessant å se effekten av tre-glassrammer i fleretasjes bygninger.

## 7 Referanser

Abaqus Analysis User's Guide

Arenas, J. M., Guillamon, A. (2007) *Proposal for the graphical representation of structural adhesive joints in engineering drawings and their integration in a computer – assisted designing systems*. Hentet 30. september 2016 fra:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749606000327>

Barenblatt, G. I. (1962). *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. Hentet 6. april 2017 fra:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0065215608701212>

Ber, B., Premrov, M. & Strukelj, A. (2013) *Experimental study of timber-glass composite wall elements [Conference Paper]*. Hentet 27. september 2016 fra:

[https://www.researchgate.net/publication/301198245\\_Experimental\\_study\\_of\\_timber-glass\\_composite\\_wall\\_elements?enrichId=rgreq-f7356481c3783b4a7a2e1f7aa9a4fb4d-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMwMTE5ODI0NTtBUzozNDk2NDY3NDU1NTQ5NDRAMTQ2MDM3MzY4ODA3OA%3D%3D&el=1\\_x\\_2](https://www.researchgate.net/publication/301198245_Experimental_study_of_timber-glass_composite_wall_elements?enrichId=rgreq-f7356481c3783b4a7a2e1f7aa9a4fb4d-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMwMTE5ODI0NTtBUzozNDk2NDY3NDU1NTQ5NDRAMTQ2MDM3MzY4ODA3OA%3D%3D&el=1_x_2)

Ber, B., Premrov, M., Strukelj, A. & Kuhta, M. (2014a) *Experimental investigations of timber-glass composite wall panels*. Hentet 15. september 2016 fra:

[https://www.researchgate.net/publication/263202186\\_Experimental\\_investigations\\_of\\_timber-glass\\_composite\\_wall\\_panels](https://www.researchgate.net/publication/263202186_Experimental_investigations_of_timber-glass_composite_wall_panels) (Hentet: 15. september 2016)

Ber, B., Premrov, M., Strukelj, A. & Susterisc, I. (2014b). *Static and dynamic testing of timber-glass composite wall panels [Conference Paper]*. Hentet 20. oktober 2016 fra:

[https://www.researchgate.net/publication/272293677\\_Static\\_and\\_dynamic\\_testing\\_of\\_timber-glass\\_composite\\_wall\\_panels](https://www.researchgate.net/publication/272293677_Static_and_dynamic_testing_of_timber-glass_composite_wall_panels)

Berg, T. F. (2008). *Prosjektrapport 20 - Industrialisering og systematisering av boligproduksjon*. (Prosjektrapport, SINTEF Byggforsk). Oslo: SINTEF Byggforsk. Hentet 30. september 2016 fra:

[https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/bibliotek/publikasjonsdatabasen/sb\\_prosjektrapport\\_20.pdf](https://www.sintef.no/globalassets/upload/byggforsk/bibliotek/publikasjonsdatabasen/sb_prosjektrapport_20.pdf)

Blyberg, L. (2011). *Timber/Glass Adhesive Bonds for Structural Applications*. Hentet 19. oktober 2016 fra:

<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:447937/FULLTEXT01.pdf>

Blyberg, L., Lang, M., Lundstedt, K., Schander, M., Serrano, E., Silfverhielm, M. & Stålhandske, C. (2014). *Glass, timber and adhesive joints - Innovative load bearing building components*. Hentet 30. september 2016 fra:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814000798>

- Blyberg, L., Serrano, E., Enquist, B. & Sterley, M. (2012). *Adhesive joints for structural timber/glass applications: Experimental testing and evaluation methods*. Hentet 18. September 2016 fra:  
<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143749612000413>
- Bower, A. F. (2008a) *Applied Mechanics of Solids: Chapter 3 Constitutive Models - Relations Between Stress and Strain, Chapter 3.5*. Hentet 03. april 2017 fra:  
[http://solidmechanics.org/text/Chapter3\\_5/Chapter3\\_5.htm](http://solidmechanics.org/text/Chapter3_5/Chapter3_5.htm)
- Carlsson, K. (2013). *Modeling of three dimensional microstructures including grain boundary mechanisms*. Hentet 23. mars fra:  
<http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/179635/179635.pdf>
- Cruz, P. & Pequeno, J. (2008). *Timber–glass composite structural panels*. Hentet 12. oktober 2016 fra:  
[https://books.google.no/books?hl=no&lr=&id=Um1Hj90OQL8C&oi=fnd&pg=PA449&dq=Cruz+P,+Pequeno+J.+Timber–glass+composite+structural+panels&ots=VABZiILAfF&sig=czHoeasmvGNc9x4sfVlF-\\_bKFSU&redir\\_esc=y#v=onepage&q=Cruz%20P%2C%20Pequeno%20J.%20Timber–glass%20composite%20structural%20panels&f=false](https://books.google.no/books?hl=no&lr=&id=Um1Hj90OQL8C&oi=fnd&pg=PA449&dq=Cruz+P,+Pequeno+J.+Timber–glass+composite+structural+panels&ots=VABZiILAfF&sig=czHoeasmvGNc9x4sfVlF-_bKFSU&redir_esc=y#v=onepage&q=Cruz%20P%2C%20Pequeno%20J.%20Timber–glass%20composite%20structural%20panels&f=false)
- Cruz, P. & Pequeno, J. (2010). *Mechanical modelling of in-plane loaded glass panes*. In: Bos, F., Louter, C., Veer, F. (eds.) *Challenging glass 2*. Proceedings of Conference on architectural and structural applications of glass, Delft; 2010. Hentet 12. oktober 2016 fra:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.836.1564&rep=rep1&type=pdf>
- Dahl, K. (2010). *Hybrid model testing of deep-water moored structures by active control of simulated line forces* (Masteroppgave). Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet, Trondheim.
- Demerchant, C. (u.d.). *Polyuretan adhesives*. Hentet 4. desember 2016 fra:  
<http://www.christinedemerchant.com/adhesive-glye-polyurethane.html>
- Dugdale, D. S. (1960). *Yielding of steel sheets containing slits*. Hentet 6. april 2017 fra: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0022509660900132>
- Feldmann, M. & Kasper, R. (2013). *Guideline for a European Structural Design of Glass Components*. CEN/TC 250/WG 3 N 15, JRC Scientific and Technical Report



- Frühwald, E., Serrano, E., Toratti, T., Emilsson, A. & Thelandersson, S. (2007). *Design of safe timber structures - how can we learn from structural failures in concrete, steel and timber?*. Hentet 20. oktober 2016 fra:  
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.844.9478&rep=rep1&type=pdf>
- Glazette (2014). *Form, function and Fire Safety: A Clearer View of Fire Rated Glass and Framing [Videoklipp]*. Hentet 12. oktober 2016 fra:  
<https://www.youtube.com/watch?v=8xtx7PMN4B0>
- Haugstøyl, A. E. & Selliken, E. V. (2015). *Nytt konsept for bestandige betongbruer - Buebru med full forspenning i to retninger*. Hentet 15. mai 2017 fra:  
<https://daim.idi.ntnu.no/masteroppgaver/012/12680/masteroppgave.pdf>
- Hermes, F. H. (2010). Process zone and cohesive element size in numerical simulations of delamination in bi-layers. Hentet 23. mars 2017 fra:  
<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/12147.pdf>
- Hess, R. (2004). *Material Glass, Structural Engineering International*. Vol. 14. Number 2. p. 76-79. IABSE, Zurich, Switzerland
- Huveners, E. M. P. (2009). *Circumferentially adhesive bonded glass panes for bracing steel frames in facades*. (Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven) DOI: 10.6100/IR657800, Hentet 8. november 2016 fra:  
<https://pure.tue.nl/ws/files/3022741/200613161.pdf>
- Kozłowski, M., Dorn, M. & Serrano, E. (2015) *Experimental testing of load-bearing timber-glass composite shear walls and beams*. Hentet 8. november 2016 fra:  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:852756/FULLTEXT02.pdf>
- Kregting, R. (2005). Cohesive zone models: towards a robust implementation of irreversible behaviour. Hentet 27. mars 2017 fra:  
<http://www.mate.tue.nl/mate/pdfs/5169.pdf>
- Leskovar, V. Z. & Premrov, K. (2012). *Energy-Efficient Renovation Principles for Prefabricated Timber-Frame Residential Buildings*. Hentet 14. oktober 2016 fra:  
[hrcak.srce.hr/file/129474](http://hrcak.srce.hr/file/129474)
- Leskovar, V. Z. & Premrov, M. (2013). *Energy-Efficient Timber-Glass Houses*. London: Springer-Verlag
- Loughran, P. (2003). *Falling glass: problems and solutions in contemporary architecture*. Birkhäuser: Publishers for Architecture
- Meccanica. (udatert). *Bøyespenninger*. Hentet 1. juni 2017 fra:  
<http://meccanica.uit.no/fasthet/boyespenning.htm>
- Mirit Glas. (udatert, a). *Floatglas*. Hentet 5. november 2016 fra:  
<http://miritglas.com/no/floatglas/>

- Mirit Glas. (udatert, b). *Kjemisk herdet glass*. Hentet 5. november 2016 fra:  
<http://miritglas.com/no/kjemisk-herdet-glass/>
- Mocibob, D. (2008). *Glass Panel under Shear Loading - Use of Glass Envelopes in Building Stabilization*. Hentet 4. november 2016 fra:  
[https://infoscience.epfl.ch/record/125889/files/EPFL\\_TH4185.pdf](https://infoscience.epfl.ch/record/125889/files/EPFL_TH4185.pdf)
- Nicklisch, F. & Serrano, E. (2014). Joint study on material properties of adhesives to be used in load-bearing timber-glass composite elements [Conference Paper]. Hentet 30. september 2016 fra:  
[https://www.researchgate.net/publication/271824037\\_Joint\\_study\\_on\\_material\\_properties\\_of\\_adhesives\\_to\\_be\\_used\\_in\\_load-bearing\\_timber-glass\\_composite\\_elements](https://www.researchgate.net/publication/271824037_Joint_study_on_material_properties_of_adhesives_to_be_used_in_load-bearing_timber-glass_composite_elements)
- Notmywar. (2016a). *Hva er de forskjellige typene av silikon lim?*. Hentet 23. November 2016 fra: <http://www.notmywar.com/hva-er-de-forskjellige-typene-av-silikon-lim/>
- Notmywar. (2016b). *Hva er polyuretanlim?*. Hentet 4. desember 2016 fra:  
<http://www.notmywar.com/hva-er-polyuretan-lim/>
- Ore, S. (2009a). *Gummielastisitet*. Hentet 7. juni 2017 fra:  
<https://snl.no/gummielastisitet>
- Ore, S. (2009b) *Viskoelastisitet*. Hentet 03. april 2017 fra: <https://snl.no/viskoelastisitet>
- Ormestad, H. (2009). *Elastisitet - fysikk*. Hentet 7. juni 2017 fra:  
[https://snl.no/elastisitet\\_-\\_fysikk](https://snl.no/elastisitet_-_fysikk)
- Piculin, S., Ber, B., Premrov, M., Brank, B. (2014). *Simulation of experiments on timber-adhesive-glass walls by nonlinear finite element method*. In: Schneider J, Weller B. (eds.) Proceedings of International conference at Glasstec, Düsseldorf, 2014. p. 353–361. Hentet 24. oktober 2016 fra:  
[https://www.researchgate.net/publication/301198271\\_Simulation\\_of\\_experiments\\_on\\_timber-adhesive-glass\\_walls\\_by\\_nonlinear\\_finite\\_element\\_method](https://www.researchgate.net/publication/301198271_Simulation_of_experiments_on_timber-adhesive-glass_walls_by_nonlinear_finite_element_method)
- Piculin, S., Nicklisch, F. & Brank, B. (2016). Numerical and experimental tests on adhesive bond behaviour in timber-glass walls. Hentet 2. november 2016 fra:  
<https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-84979626549&origin=resultslist&sort=plf-f&src=s&st1=timber-glass+composite&nlo=&nlr=&nls=&sid=33771FCFD6C764E14902FB487BE079F9.wsnAw8kcdt7IPYLO0V48gA%3a10&sot=b&sdt=b&sl=37&s=TITLE-ABS-KEY%28timber-glass+composite%29&relpos=2&citeCnt=0&searchTerm=#>
- Pilkington. (2015). *Glassfakta*. Hentet 29. august 2016 fra:  
[http://www.pilkington.com/~/\\_media/Pilkington/Site%20Content/Norway/0570\\_Glassfakta2015\\_NO\\_1022.ashx](http://www.pilkington.com/~/_media/Pilkington/Site%20Content/Norway/0570_Glassfakta2015_NO_1022.ashx)

- Remen, J. (2015). *Sparer tid med prefabrikkerte reisverkselementer*. Hentet 29. september 2016 fra: <http://fremtidensbygg.no/entreprenor/sparer-tid-med-prefabrikkerte-reisverkselementer/>
- Riksantikvaren. (u.d.). *Aktive og passive brannsikringstiltak*. Hentet 22. september 2016 fra: <http://www.riksantikvaren.no/Veiledning/Sikring-og-kriseberedskap/Brannsikring-av-fredet-og-verneverdig-bebyggelse/Aktive-og-passive-brannsikringstiltak>
- Rønquist, M., Kvinge, S. & Soldal, K. (2007). *Vindussprinkling for å motvirke utvendig vertikal brannspredning*. (Bacheloroppgave, Høgskolen Stord/Haugesund). Haugesund: Høgskolen Stord/Haugesund. Hentet 12. september 2016 fra: <https://brage.bibsys.no/xmlui/handle/11250/151583>
- Schittich, C., Staib, G., Balkow, D., Schuler, M. & Sobek, W. (2007). *Glass construction manual*. Basel - Boston - Berlin: Birkhäuser Verlag AS
- Stepinac, M., Rajcic, V. & Zarnic, R. (2016). *Timber-structural glass composite systems in earthquake environment*. Hentet 3. september 2016 fra: [hrcak.srce.hr/file/230035](http://hrcak.srce.hr/file/230035)
- Time, B. (2014) *Oppgraderer med prefabrikkerte treelementer*. Hentet 15. September 2016 fra: <http://www.sintef.no/siste-nytt/oppgraderer-med-prefabrikkerte-treelementer/>
- Technical Glass Products, TGP. (2014). *Form, Function & Fire Safety: A Clearer View of Fire-Rated Glass & Framing [Videoklipp]*. Hentet 29. august 2016 fra: <https://www.youtube.com/watch?v=8xtx7PMN4B0>
- Tribotec. (u.d.). *Silikonlim*. Hentet 30. november 2016 fra: <http://www.tribotec.se/silikon/silikonlim/>
- Vaagan, M. (2007). *Nye bruksområder for brannbeskyttende glass*. Hentet 31. oktober 2016 fra: [http://www.glassportal.no/no/teknisk\\_informasjon/sikkerhetsglass/trygghetsglass+ruter/brannglass/Nye+bruksområder+for+brannbeskyttende+glass.b7C\\_wBrQYE.ips](http://www.glassportal.no/no/teknisk_informasjon/sikkerhetsglass/trygghetsglass+ruter/brannglass/Nye+bruksområder+for+brannbeskyttende+glass.b7C_wBrQYE.ips)
- Winter, W., Hochhauser, W. & Kreher, K. (2010). *Load bearing and stiffening Timber-Glass-Composites (TGC)*. *World Conference on Timber Engineering*. Hentet 29. september 2016 fra: [https://www.researchgate.net/publication/267428670\\_Load\\_bearing\\_and\\_stiffening\\_Timber-Glass-Composites\\_TGC](https://www.researchgate.net/publication/267428670_Load_bearing_and_stiffening_Timber-Glass-Composites_TGC)

## 8 Vedlegg

Vedlegg A:	Lim gruppert etter antatt og faktisk stivhet (Nicklisch & Serrano, 2014)
Vedlegg B:	Strekk- og skjærttest - bruddmekanismer (Blyberg et al. 2012)
Vedlegg C:	Skjærttest - bruddmekanismer (Nicklisch & Serrano, 2014)
Vedlegg D:	Skjærttest - bruddmekanismer (Piculin et al., 2016)
Vedlegg E:	Numerisk ordliste
Vedlegg F:	Resultater - numerisk småskala-forsøk glasspanel
Vedlegg G:	Resultater - numerisk småskala-forsøk kohesiv element og kohesiv overflate

## Vedlegg A: Lim gruppert etter antatt og faktisk stivhet

Adhesive grouped after assumed and actual stiffness ( $A < 10$  MPa;  $B$  100 - 500 MPa;  $C > 1000$  MPa) (Nicklisch & Serrano, 2014)

<i>Name</i>	<i>Chemical basis</i>	<i>Assumed stiffness</i>	<i>Actual stiffness</i>
<b><i>Otto Chemie – OTTOCOLL S660</i></b>	Silicone	A	A
<b><i>Sikasil SG-500</i></b>	Silicone	A	A
<b><i>DELO-PUR 9895</i></b>	Polyurethane	B	B
<b><i>Nolax C44.8505</i></b>	Modifisert epoksy	B	B
<b><i>SikaFast 5215</i></b>	Acrylate	B	B
<b><i>SikaTack MOVE Transp</i></b>	Polyurethane	B	A
<b><i>Huntsman – Araldite 2029</i></b>	Polyurethane	C	Tensile B Shear A
<b><i>DELO-DUOPOX AD 840</i></b>	Epoxy resin	C	C
<b><i>3M – Scotch-Weld DP 490</i></b>	Epoxy resin	C	C
<b><i>SikaForce 7710 L100</i></b>	Polyurethane	C	B

# Vedlegg B: Strekk- og skjærttest - Bruddmekanismer (Blyberg et al., 2012)

## Tension and shear test - failure mechanisms (Blyberg et al., 2012)

Descriptions	Example pictures	Cohesion in wood	Adhesion to wood	Cohesion in adhesive	Adhesion to glass	Cohesion in glass
Type 1: only wood visible on both sides (8 AT)		x				
Type 2: small amount of wood and/or wood fibres on the adhesive, portions of adhesive have lost adhesion to wood (7 AT, 3 PT and 10 AS)		x	x			
Type 3: as type 2, but with some pieces of adhesive remaining on the wood (11 ST)		x	x	x		
Type 4: as type 2 but portions of the adhesive have lost adhesion to the glass (8 PS and 3 PT)		x	x		x	
Type 5: as type 4, but crack(s) have also appeared in the glass (6 PS)		x	x		x	x
Type 6: as type 2, but crack(s) have also appeared in the glass (5 AS)		x	x			x
Type 7: some adhesive remain on the wood surface, but portions of the wood are also visible (3 ST and 10 SS)			x	x		
Type 8: some portions of the adhesive have lost adhesion to glass and some have lost adhesion to wood, also some cohesive failure in the adhesive (1 ST and 5 SS)			x	x	x	
Type 9: the adhesive has lost adhesion to the glass (9 PT and 1 PS)					x	

# Vedlegg C: Skjærttest - Bruddmekanismer (Nicklisch & Serrano 2014)

Shear test - failure mechanisms (Nicklisch & Serrano, 2014)

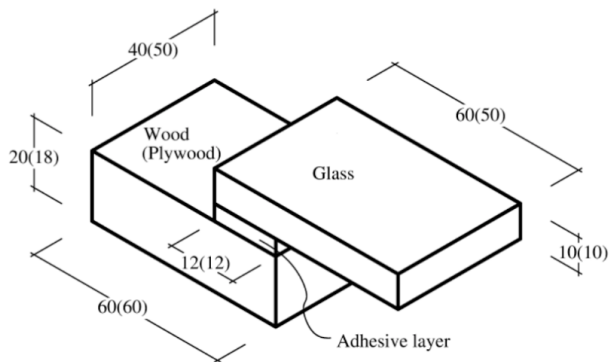


Figure 2: Dimensions of shear specimens (left) with thickness of the adhesive layer between 1 and 4 mm (values in brackets for specimens at TUD) and finished plywood-glass specimen prior to testing (right)

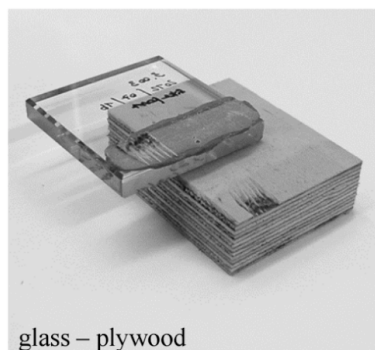
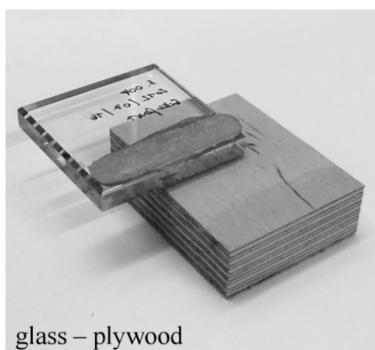


Figure 7: Typical failure pattern for SikaFast 5215 tested at room temperature: adhesive failure on plywood surface (left), mixed failure of the upper plywood layer and loss of adhesion to plywood (center), adhesive failure on the wood mixed with fracture of wood (early wood only, right)

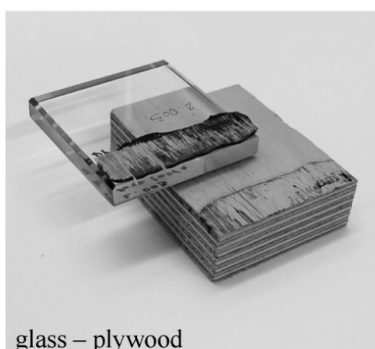
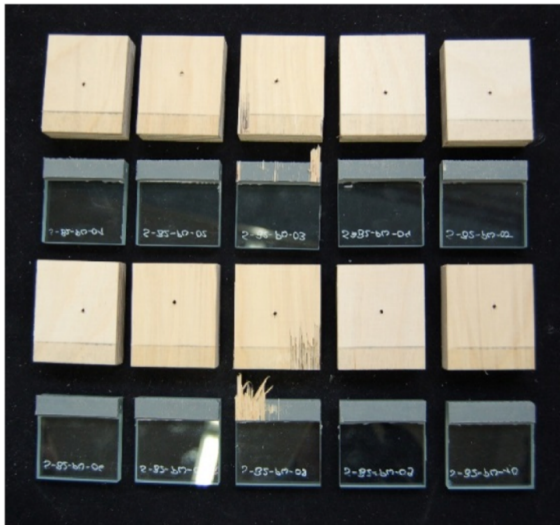


Figure 8: Typical failure pattern for DP 490 tested at room temperature: partial failure of plywood and loss of adhesion to plywood surface (left), failure of the one or more plywood layers (center), wood failure (right)

## Vedlegg D: Skjærttest - Bruddmekanismer (Piculin et al, 2016)

Shear test - failure mechanisms (Piculin et al., 2016)





## Vedlegg E: Numerisk ordliste

Numerical dictionary

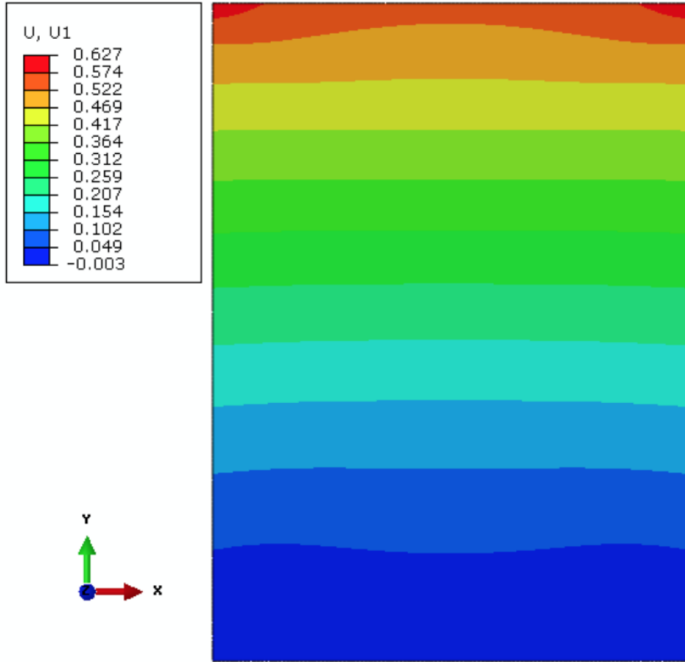
---

<b>I Abaqus</b>	
<b>Binding</b>	Tie
<b>Bruddinitieringskriteriet</b>	Damage initiation criterion
<b>Bruddutvikling</b>	Damage evolution
<b>Definerer elementets egenskaper</b>	Element type
<b>Del</b>	Part
<b>Diskreditering</b>	Partition
<b>Elementnett</b>	Mesh
<b>Interaksjon</b>	Interactions
<b>Interaksjonsegenskaper</b>	Interaction properties
<b>Kohesivt element</b>	Cohesive element
<b>Kohesiv overflate</b>	Cohesive surface
<b>Kohesiv sone-modellering</b>	Cohesive zone modelling
<b>Kontinuum skall</b>	Continuum shell
<b>Konvensjonelle skall</b>	Conventional shell
<b>Overflater-til-Overflate</b>	Surface-to-Surface
<b>Timeglasskontroll</b>	Hourglass control
<b>Traksjon-separasjonslov</b>	Traction-separation law
<b>Tverrsnitt</b>	Section
<b>Sammenbinding</b>	Constraints
<b>Solidelement</b>	Solid element
<b>Stivt feste</b>	Tie
<b>Viskositetskoeffisient</b>	Viscosity coefficient

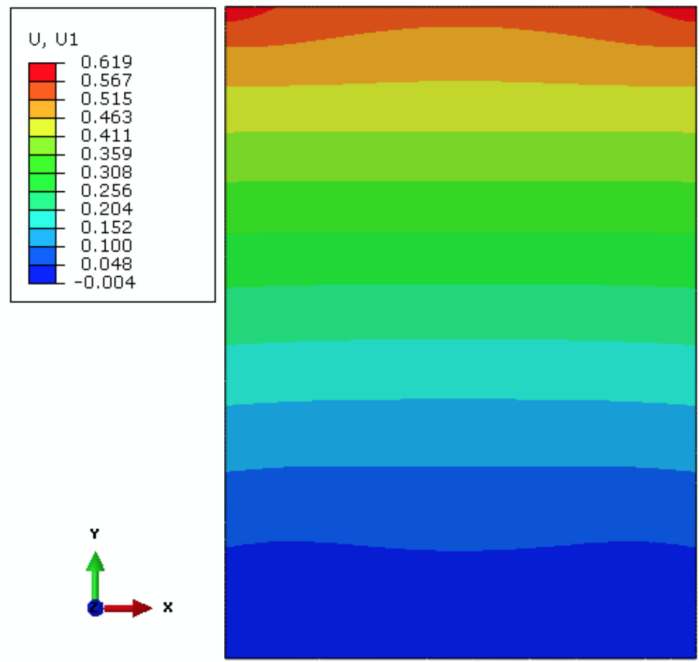
---

# Vedlegg F: Resultater for numerisk småskalaforsøk - Glasspanel Forskyvning

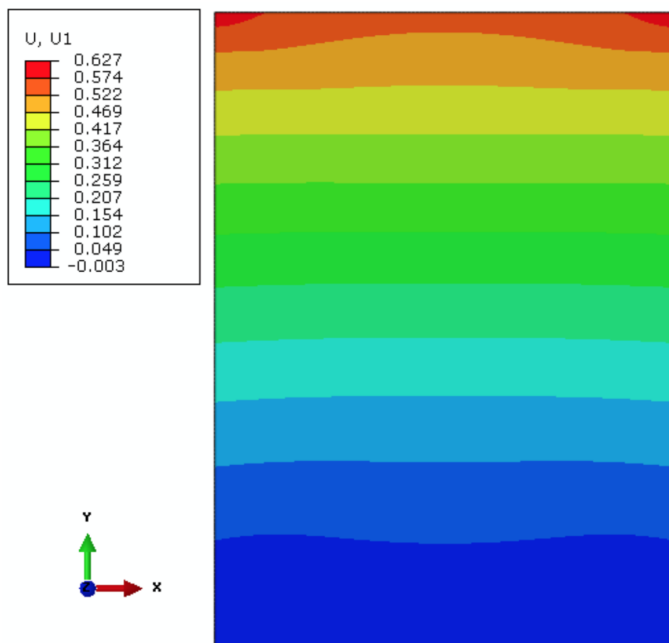
3D solid



Continuum shell

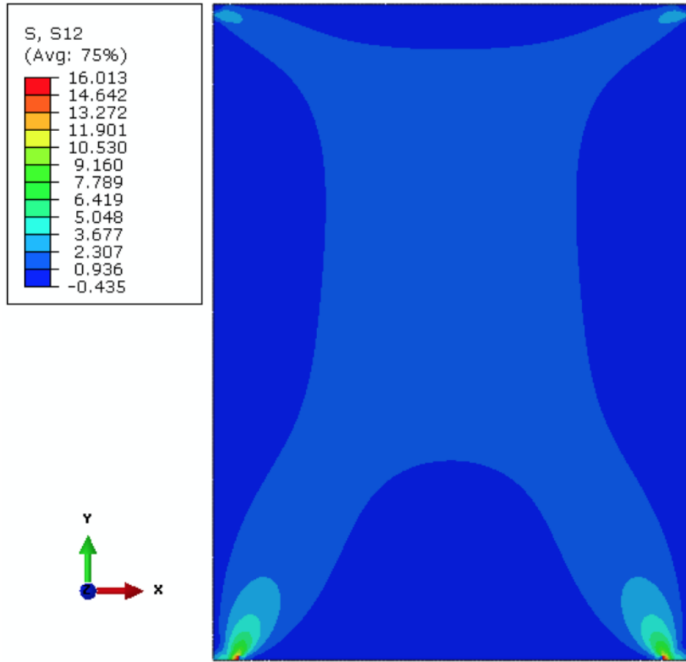


Conventional shell

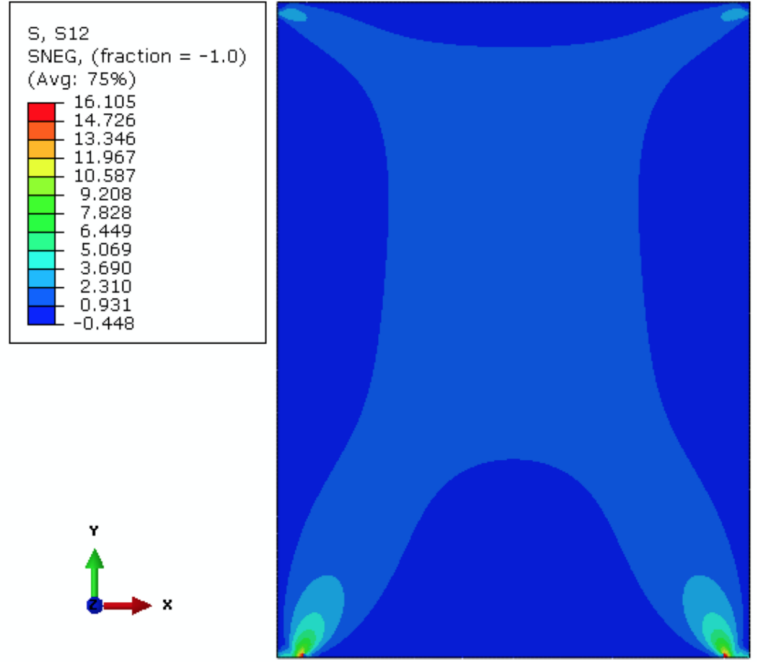


# Spinning - S12

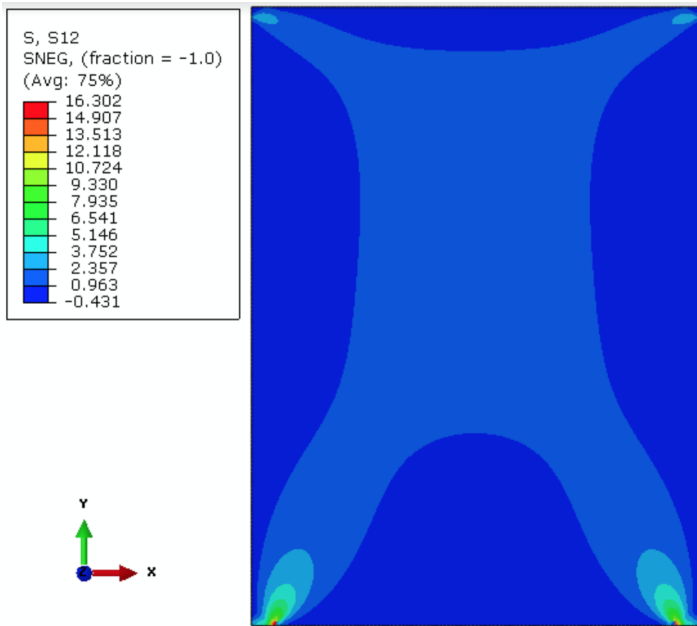
3D solid



Continuum shell



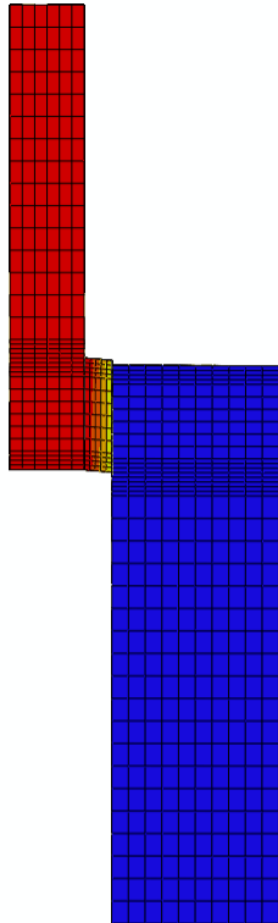
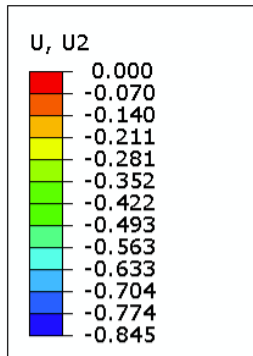
Conventional shell



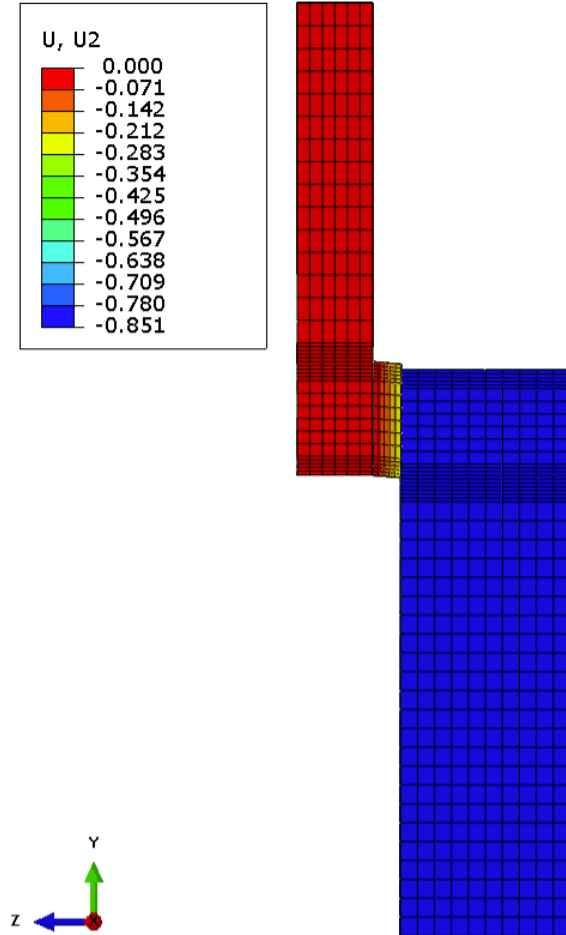
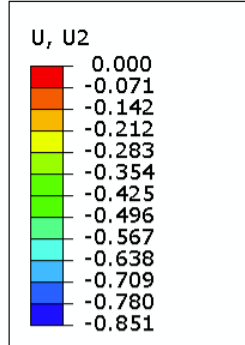
# Vedlegg G: Resultater for numerisk småskalaforsøk - kohesivt element og kohesiv overflate

## Forskyvning

Kohesivt element

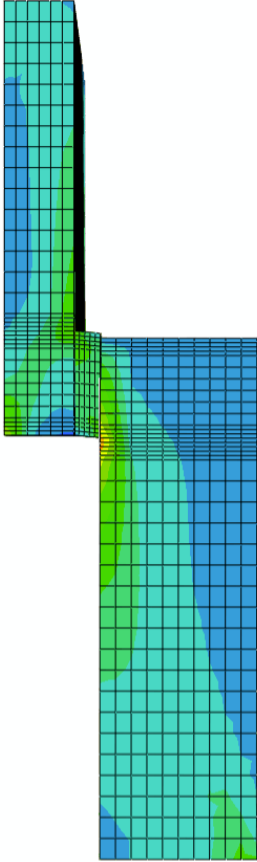
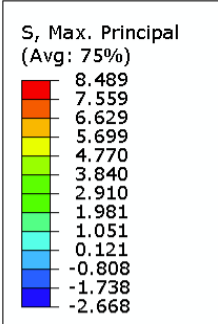


Kohesiv overflate



# Spinning - Max Principal

Kohesivt element



Kohesiv overflate

