



Bacheloroppgave:

Bærende glass

Forfattere:

Mads B. Fjeld

H. Eirik L. Haakenstad

Sigurd Fossum

Dato:

15.5.2013

Sammendrag

Tittel:	Bærende glass	Dato : 15.5.2013
Deltakere	Mads Brandt Fjeld Hans Eirik Lund Haakenstad Sigurd Fossum	
Veileder:	Harald Fallsen	
Oppdragsgiver:	Norconsult	
Stikkord/nøkkelord (3-5 stk)	Glass, Lastbærende glass, glassfasade, laminert glass, herdet glass.	
Antall sider/ord:69/14420	Antall vedlegg:6	Publiseringsavtale inngått: ja
<p>Kort beskrivelse av bacheloroppgaven:</p> <p>Denne rapporten ser på mulighetene for hvordan glass kan brukes som en del av en bærende konstruksjon. Prosjektgrunnlaget har vi fått tildelt av Norconsult på Gjøvik, og er en vertikaldelt tremannsbolig med en glassfasade som strekker seg over tre etasjer og opp i takkonstruksjonen. I oppgaven ser vi på glasset som en del av den bærende konstruksjonen i det spesifikke bygget.</p> <p>Problemstillingen i oppgaven dreier seg om hvordan glass kan anvendes som bærende bygningsdel. For å løse denne problemstillingen har vi delt inn en rekke underproblemstillinger som tar for seg de viktigste aspektene for bruk av bærende glass. Teorien er innhentet fra litteratur, forskningspublikasjoner og standardverk.</p> <p>Glass brukt som bærende bygningsselement er ikke utbredt, så for å svare på problemstillingen er det blitt undersøkt metoder og prinsipper for hvordan glass oppfører seg under belastning, og lastkapasiteten til forskjellige typer glass. Dette er gjort ved å se på materialegenskapene, hva slags belastning som er tillatt i standardene og forskningspublikasjoner angående dimensjonering av glass. Dimensjonering er gjort ved hjelp av en analytisk metode og elementanalyse i <i>Ansys</i>.</p> <p>Vår konklusjon er at det er mulig å benytte glass som bærende bygningsselement, men det er usikkerheter på grunn av at glassets lastkapasitet svekkes over tid. Glass som bærende konstruksjon er et relativt nytt konsept, og det gjenstår mye forskning på området.</p>		

Førord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet våren 2013 ved avdelingen Teknologi, Økonomi og ledelse ved Høgskolen i Gjøvik, og er avsluttende for en 3-årig ingeniørutdanning. I denne perioden har vi prøvd å finne ut om det er mulig å lage en glassfasade hvor det er selve glasset som bærer de horisontale og vertikale lastene som oppstår.

Prosjektgrunnlaget er et reelt byggeprosjekt vi har fått utdelt fra Norconsult AS avd. Gjøvik. De ga oss fritt spillerom på hva vi ville ta for oss ved det aktuelle bygget. I samråd med faglærere og veileder fant vi ut at det ville bli en spennende oppgave hvis vi tok for oss en bærende glassfasade. Vi har vært i møte med seniorrådgiver i Glass og fasadeforeningen Martin Borg, som ga oss råd om hvilke bedrifter vi burde ta kontakt med for å løse vår problemstilling. Videre har vi snakket med Gjermund Haugestøl fra Sagstuen AS som har hjulpet oss med mulige løsninger. Vi vil rette en takk til disse for nyttige innspill til oppgaven.

Temaet i oppgaven har vært helt nytt for oss, og all fagkunnskap har vi måtte tilegne oss gjennom faglitteratur og forskningspublikasjoner. Temaet er lite utbredt, og oppgaveskrivingen har vært en spennende og lærerik prosess for oss.

Til slutt vil vi takke veilederne på Høgskolen i Gjøvik, og Odd Magne Nørjordet ved Norconsult AS avd. Gjøvik.

15.05.2013

Dato

Gjøvik

Sted

Sigurd Fossum Mads B. Fjeld H. Eirik L. Haakenstad

Sigurd Fossum

Mads B. Fjeld

H. Eirik L. Haakenstad

Innhold

Sammendrag	2
Forord	3
Figuroversikt	6
Formeloversikt.....	8
Tabelloversikt	9
Definisjoner og ordforklaringer	10
1. Innledning.....	11
1.1 Bakgrunn for prosjekt	11
1.2 Målsetting	11
1.3 Problemstilling	11
1.4 Avgrensinger/Omfang.....	12
2. Bakgrunn	13
2.1 Bygget	13
2.2 Lastbilde.....	14
3. Metode	17
4. Teori.....	18
4.1 Glass.....	18
4.2 Materialeegenskaper for glass.....	24
4.3 Innfesting av glass.....	27
4.4 Glass-standarder	31
4.5 Bærende glass.....	35
4.6 Referanseprosjekt - Glasshuset i Santa Fe.....	40
5 Beregninger og resultat.....	44
5.1 Analytisk modell.....	44
5.2 Elementanalyse.....	47
6 Drøfting/Analyse	52
6.1 Valg av glass	52
6.2 Kapasiteten til glass	52
6.3 Generelt om dimensjonering av bærende glass.....	53
6.4 Takkonstruksjon.....	53
6.5 Løsning med kontinuerlig glass.....	54
6.6 Løsning med glass i mellom dekkene	56
6.7 Risiko forbundet med bærende glass i bygget.	57
6.8 Resultater.....	59

7. Konklusjon	64
7.1 Hvor store påkjenninger tåler glass?	64
7.2 Hvilken glasstype bør brukes i byggets bærende glasskonstruksjon?	65
7.3 Hvilke risikoer oppstår ved bruk av bærende glass i bygget, og hvilke forhåndsregler bør gjøres for å tillate risikoene?	65
7.4 Hvordan dimensjonere bærende glass?	66
7.5 Hvordan løser vi innfestning av glasselementene i bygget?	66
7.6 Er det mulig å lage byggets glassfasade bærende?	66
Hvordan kan glass anvendes som bærende bygningsdel?	67
8. Litteraturliste.....	69

Vedlegg

Vedlegg A – Snølast	I
Vedlegg B – Vindlast	II
Vedlegg C – Lastbilde.....	V
Vedlegg D – Beregninger fra glasstandarder	IX
Vedlegg E – Beregninger av glassvegger	XI
Vedlegg F – Elementanalyse i Ansys.....	XXX

Figuroversikt

Figur 1 - Fasade, Vest (<i>Gjengitt med tillatelse av Norconsult AS</i>)	13
Figur 2 – Snitt (<i>Gjengitt med tillatelse av Norconsult AS</i>).....	13
Figur 3 – Plantegning (<i>Gjengitt med tillatelse av Norconsult AS</i>)	15
Figur 4 - Produksjon av floatglass, fritt gjengitt fra Glassfakta 2012. (PilkingtonNorge).....	20
Figur 5 – Spenningsforskjeller i ubehandlet glass og varmeherdet glass, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)</i>	21
Figur 6 – Bruddmønstre i ubehandlet, varmemforsterket og herdet glass, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)</i>	22
Figur 7 - Faktorer som påvirker glassets strekkapasitet, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Wurm 2007)</i>	24
Figur 8 - Mikrosprekk utsatt for strekk og trykk, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Wurm 2007)</i>	25
Figur 9 - Spenning/Tøyning for Glass, stål og tre, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Wurm 2007)</i> ...	26
Figur 10 - Aluminiumsprofil for innfeste av glass, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)</i>	28
Figur 11 – Eksempel på klemte innfestninger, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)</i>	29
Figur 12 - Klemte innfesting ved laminert sikkerhetsglass, <i>Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)</i>	30
Figur 13 - Fasade. Foto: Frank Oudeman	40
Figur 14 - Innvendig. Foto: Frank Oudeman	41
Figur 15 - Innfestedetalj i bunn. Foto: Dewhurst Macfarlane.....	42
Figur 16 - Gjenget stag, med fjær. Foto: John Jones.....	43
Figur 17 - Glassystemet. Foto:John Jones	43
Figur 18 - Modell for analyse.....	47
Figur 19 - Deformasjon i elementet. <i>Alle enheter er i meter.</i>	48
Figur 20 - Spenninger i elements fremside. <i>Alle enheter er i N/m^2.</i>	49

Figur 21 - Spenninger i elementets bakside. <i>Alle enheter er i N/m²</i>	49
Figur 22 - Spenninger i elementets tverrsnitt. <i>Alle enheter i N/m²</i>	50
Figur 23 - Spenninger i elementets hjørne. <i>Alle enheter i N/mm²</i>	51
Figur 24 - Forslag til overgang vegg/tak.....	54
Figur 25 - Forslag til glidesystem.....	55
Figur 26 - Forslag til innfestning topp og bunn.	57

Formeloversikt

Formel 1 – Maks tillatt overflatespenning – ASTM1300E	32
Formel 2 – Tillatt spenning i behandlet glass etter prEN13474-3	33
Formel 3 – Effektiv tykkelse av laminert glass	34
Formel 4 – Eulers formel for knekklast	36
Formel 5 – Maks spenning for monolittisk søyle av glass	37
Formel 6 – Utbøying for monolittisk søyle av glass	37
Formel 7 – Maks strekkspenning for 2-lags laminert glass	38
Formel 8 – Aksiallast på grunn av utbøying	38
Formel 9 – Kurvaturen av glasselementet	39
Formel 10 – Lagdelt stivhet (Ingen forbindelse i laminatet)	39
Formel 11 – Utbøying på grunn av vertikallast	39
Formel 12 – α^2 -parameter for laminatets skjæregenskaper	39
Formel 13 – K-parameter for laminatets skjæregenskaper	39
Formel 14 – Ekvivalent aksialstivhet	39
Formel 15 – Monolittisk stivhet (Perfekt sammenføring av laminatet)	40
Formel 16 – Kritisk last	40
Formel 17 – Nedbøying av bjelke med jevnt fordelt last [Vedlegg E]	XI
Formel 18 – Tregghetsmoment av rektangulært tverrsnitt [Vedlegg E]	XI
Formel 19 – Motstandsmoment av rektangulært tverrsnitt [Vedlegg E]	XI

Tabelloversikt

Tabell 1 – Snølast på tak	15
Tabell 2 – Dimensjonerende laster for glassvegg i 1. etasje og 2. etasje	17
Tabell 3 – Tillatte spenninger "3-sekunders" last	32
Tabell 4 – Maks tillatte spenninger herdet glass	33
Tabell 5 – Sikkerhetsfaktor K_{mod}	34
Tabell 6 – Tillatt spenning i behandlet glass for forskjellige lasttilfeller	35
Tabell 7 – Innledende deformasjon, W_0	38
Tabell 8 – Kritisk last og maks strekkspenning. Glassvegg 3.etg	46
Tabell 9 – Innledende deformasjon og utbøyning. Glassvegg 3.etg	46
Tabell 10 – Kritisk last og maks strekkspenning 1.etg	46
Tabell 11 – Innledende deformasjon og utbøyning i 1.etg	47
Tabell 12 – Tillatt aksialkrefter for glassvegg i 3.etg	47
Tabell 13 – Tillatt aksialkrefter for glassvegg i 1. og 2. etg.	47
Tabell 14 – Materialeegenskaper brukt i modell	49
Tabell 15 – Snølast på tak [Vedlegg A]	I
Tabell 16 – Vindlast [Vedlegg B].....	II
Tabell 17 – Dimensjonerende last, glassvegg 3. etg. [Vedlegg C].....	VI
Tabell 18 – Dimensjonerende last, glassvegg 2. etg. [Vedlegg C].....	VII
Tabell 19 – Dimensjonerende last, glassvegg 1. etg. [Vedlegg C].....	VIII

Definisjoner og ordforklaringer

Glasspanel:	En av rutene i en glassfasade.
Flussmiddel:	Tilsetninger som benyttes for å endre smeltepunktet i stoffer.
Viskositet:	Hvor tyktflytende en væske er.
Stabilisator:	Stoff som tilsettes blandingen for å hindre uønskede kjemiske forandringer.
Duktilt:	Seighet i materialet.
Monolittisk:	Består av enhetlig masse, i denne sammenheng homogent glass.
Spontangranulere:	Plutselig brudd i en glassrute som resulterer i at glassruten blir delt opp i mange små biter.
Floatglass:	Glass produsert med <i>floatglass</i> produksjonsmetoden.
Ubehandlet glass:	Vanlig <i>floatglass</i> som ikke er herdet eller behandlet.
Behandlet glass:	<i>Floatglass</i> som er behandlet for å forandre egenskapene. For eksempel varmeherdet glass.
Målsetting laminert glass:	Tykkelse glass/Tykkelse laminering/Tykkelse glass [mm] Eks: 20/1,52/20
Meshing:	Oppdelingen av Ansys modellen, som matrisene og utregningene er basert på.
Noder:	Punktene i Ansys som er grunnlaget for meshingen
Heat-soak test:	En metode for å teste herda glass mot nikkelsulfid. Testen provoserer fram spontangranulering.

1. Innledning

1.1 Bakgrunn for prosjekt

Grunnlaget for vårt prosjekt er en vertikaldelt tremannsbolig som etter planen skal bygges på Lambertseter i Oslo. Vi samarbeider med Norconsult AS avdeling Gjøvik om prosjektet, og har blitt tildelt arkitekttegninger av det aktuelle bygget. Bygget er en vertikaldelt tremannsbolig med en spesiell glassfasade. Bygget skal oppføres i 3 etasjer pluss kjeller. Glassfasaden er kontinuerlig fra bakkeplan og strekker seg opp i takkonstruksjonen. På bakgrunn av dette ønsker vi å se nærmere på hvordan glass og glassfasader kan utnyttes som en del av den bærende konstruksjonen. Bærende glass er svært lite brukt i denne sammenheng. Arkitekten ønsker ofte mest mulig dagslys inn bygget, og ved å utnytte glass som bærende element vil dette gi nye muligheter. Til forskjell fra tradisjonell bruk av glass som er ofte avhengig av sjenerende innfestninger, kan en bærende glassfasade kunne gi en helt ren og åpen fasade.

1.2 Målsetting

Målet med prosjektet er å undersøke om glassfasaden kan anvendes som en bærende del av konstruksjonen. Oppgaven er knyttet til tremannsboligen som nevnt, men vi vil også se generelt på materialet glass, og mulighetene for bærende glasskonstruksjoner. Hovedmålsettingen for prosjektet er å undersøke mulighetene for lastbærende glasselementer, og undersøke løsninger som kan være nyttige for oppdragsgiver og eventuelt andre aktører som vil vurdere bruk av glass som bærende elementer.

1.3 Problemstilling

Prosjektets problemstilling tar utgangspunkt i den vertikaldelte tremannsboligen. Glassfasaden går fra bakkenivå og opp i husets takkonstruksjon, og på bakgrunn av denne, ønsker vi å se nærmere på hvordan glass kan anvendes konstruksjonsteknisk. Derfor ønsker vi å jobbe oss frem mot hovedproblemstillingen:

”Hvordan kan glass anvendes som bærende bygningsdel?”

For å svare på hovedproblemstillingen må det undersøkes både generelt og inn mot det spesifikke bygget. For å besvare denne problemstillingen har vi delt opp i følgende underproblemstillinger:

- Hvor store påkjenninger tåler glass?
- Hvilken glasstype bør brukes i byggets bærende glasskonstruksjon?
- Hvilke risikoer oppstår ved bruk av bærende glass i bygget, og hvilke forhåndsregler bør gjøres for å tillate risikoene?
- Hvordan dimensjonere bærende glass?
- Hvordan løser vi innfestning av glasselementene i bygget?
- Hvordan løse overgang mellom den gjennomgående glassfasaden og takvindu i bygget?
- Er det mulig å lage byggets glassfasade bærende?

1.4 Avgrensinger/Omfang

Prosjektet er i hovedsak todelt. Første del vil handle generelt om materialet glass, og hvordan dette oppfører seg under belastning. I andre del skal det vinkles konkret inn mot tremannsboligen som er nevnt tidligere. Vi skal fokusere på løsninger, der vi anvender glassfasaden som bærende elementer i byggets bæresystem. Oppgaven konsentrerer seg i hovedsak om det konstruksjonstekniske. Andre aspekter som kostnader, isoleringsevne, lysskjerming og ut/innsyn kan bli vurdert, men vil ikke være hovedfokuset. Det vil ikke tas hensyn til brann og seismiske laster i beregningene.

Vi velger å se bort ifra glass i takkonstruksjonen, da det finnes systemløsninger for glass i tak. For eksempel Pilkington Planar Systemet. (Pilkington 2012) Vi velger heller å fokusere på glassfasaden som en del av den bærende konstruksjonen siden dette er en utradisjonell og mer forskende løsning. Arkitekt tegningen av bygget viser planlagte dører i fasaden. Disse velger vi å se bort ifra fordi vi ønsker kun å fokusere på det konstruksjonstekniske og bæreevnen til glass.

2.2 Lastbilde

Tak:

Glasset i taket har en helning lik takvinkelen på 30° . I den ene enden er glasset opplagt på den vertikale fasaden, og i den andre enden innfestet i resten av takkonstruksjonen. Glasset får et spenn på ca. 2,5 meter, hvor vi antar det som en fritt opplagt plate med jevnt fordelt last. Kreftene som vi må ta hensyn til i dette lastbildet er den karakteristiske snølasten i området. Vindlast vil også ha en innvirkning, men denne kraften har så liten betydning på taket at vi i samråd med faglærer Harald Fallsen, har valgt å neglisjere denne. I henhold til *NS-EN 1991-1-3 - Laster på konstruksjoner - Del 1-3: Allmenne laster – Snølaster*, vil snølast på tak være:

Tabell 1 – Snølast på tak

Karakteristisk snølast	Formfaktor	Sikkerhetsfaktor	Dimensjonerende snølast
3,5 kN/m ²	0,8	1,5	4,2 kN/m ²

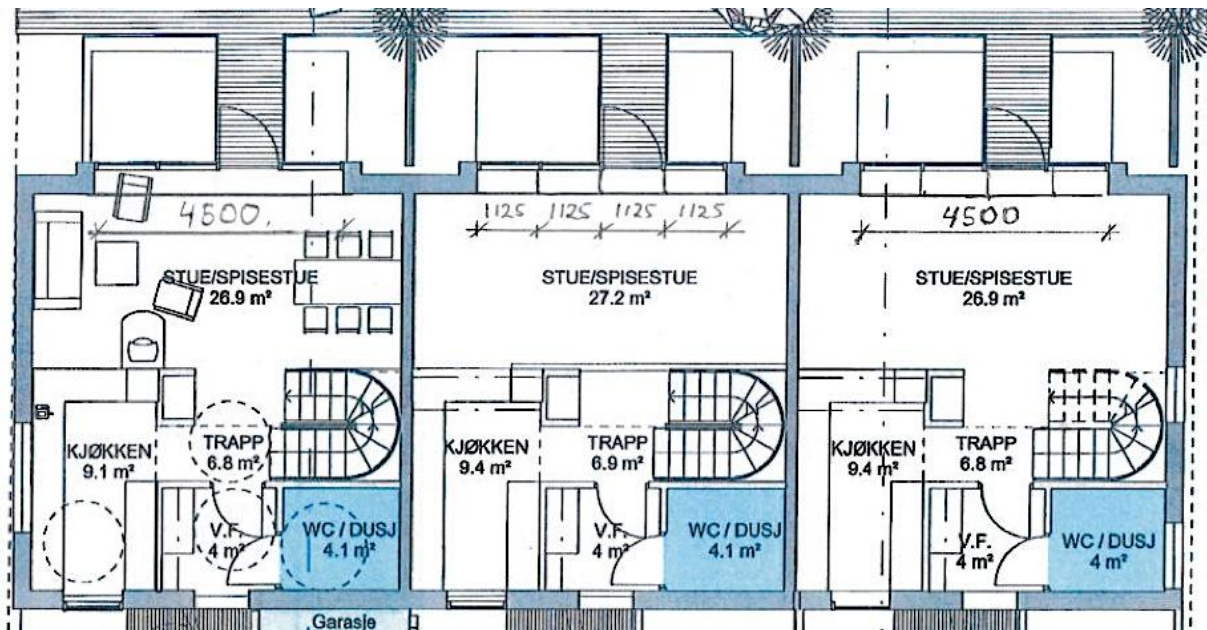
For detaljert beskrivelse av snølastberegning se vedlegg A

Fasade:

Ser vi på tilfellet der vi prøver å utnytte glassfasadens bærende kapasitet til det ytterste, blir glassfasaden plassert mellom etasjeskillerne, og opptrer som lastoverførende glassvegger. Vi tar utgangspunkt i at etasjeskillere er flatdekke av betong, slik at glasset vil ta deler av dekkets egenvekt, nyttelast for bolig, og vindlaster. I samråd med veileder Harald Fallsen, har vi fastsatt hvor stor andel av dekkets egenvekt som overføres til glassveggene. Se vedlegg C, figur 1. En alternativ løsning for mindre belastning på glasset, er at glassfasaden blir hengt på byggets utside i ett glidesystem. Fasaden vil da bestå av et kontinuerlig glassystem, der glasset tillattes å forskyves vertikalt, slik at glasset må bære dets egenvekt fra glasset plassert i etasjen over, samt snølast fra taket, og horisontale vindlaster.

Videre i oppgaven velger vi å konsentrere oss om tilfellet der glasset er plassert mellom etasjeskillerne. Dette er en løsning der glasset blir utsatt for størst belastning, og vi kan undersøke hvor gode bæreegenskapene til glass er under større lastoverføringer, og antar at dette er det "verste" tilfellet av de to.

I boligens toppetasje vil glassveggen fungere som opplagg for takvindu. Laster som belaster denne vil være takvinduetts egenvekt, og snølast. Glassveggene utformes som vist på arkitekttegning i fire elementer med størrelse 1125 mm x 1000 mm. Se figur 3.



Figur 3 – Plantegning (Gjengitt med tillatelse av Norconsult AS)

I 1. og 2. Etasje består glassveggen av fire elementer i størrelsesforhold 1125 mm x 2450mm. Disse glasselementene vil oppta størst belastning. Laster som påvirker disse er lastoverføring fra etasjen over i form av egenvekt av flatdekke, nyttelast for bolig, egenvekt av glasselementer og snølast fra tak. I tillegg vil vindlasten påvirke glasselementene horisontalt. Glasselementene i 2. etasje dimensjoneres for samme laster som i 1. etasje, da dette blir "verste" lasttilfelle. Uten noen form for tommelfingerregler for dimensjonering av glass, har vi måtte anta glasselementenes tykkelse, for videre lastberegninger. Vi ser på antagelsene vi har gjort som forsiktige.

Tabell 2 - Dimensjonerende laster for glassvegg i 1. etasje og 2. etasje:

Last	Karakteristisk last, [kN/m]	Sikkerhetsfaktor	Dimensjonerende last, [kN/m]
Snølast fra tak	3,03	1,5	4,55
Egenvekt, takvindu	0,63	1,2	0,76
Egenvekt, glassvegg 3.etg	0,74	1,2	0,89
Egenvekt, dekke 3.etg	13,75	1,2	16,50
Nyttelast, 3.etg	4,40	1,5	6,60
Egenvekt, glassvegg 2.etg	3,06	1,2	3,67
Egenvekt, dekke 2.etg	13,75	1,2	16,50
Nyttelast, 2.etg	4,40	1,5	6,60
Egenvekt, glassvegg 1.etg	3,06	1,2	3,67
		SUM	59,74

For detaljert beskrivelse av lastberegning se vedlegg C

3. Metode

Informasjonshenting til teoridelen i oppgaven er hentet i sin helhet fra litteratur, standarder og forskningsartikler. Boken "*structural use of glass*" av Haldimann, Luible og Overend dekker de fleste aspektene med bruk av bygningsglass. Denne har vært nyttig i bestemmelsen av prinsipper og metoder for bruk av glass i bærende konstruksjoner. Materialeegenskapene til forskjellige typer glass er hentet fra diverse litteratur, men mye fra boka *Glass structures, design and construction of self-supporting skins*. Denne tar grundig for seg glass som materiale. Vi har også hatt kontakt med fagfolk i bransjen som har gitt oss råd og veiledning til oppgaven.

Vi har sett på den Amerikanske glasstandarden *ASTM E1300 - Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings*, og det europeiske standardutkastet *prEN 13474-3 Glass in building, determination of the strength of glass panes* for å se hva slags belastning som tillates for glass i standardene.

Problemstillingen løses ved å se spesifikt på en case vi har fått tildelt av Norconsult AS. Vi bruker bygget til å se hvordan man kan bruke glass i den bærende konstruksjonen, og ut i fra dette trekke slutninger for vår konkludering av oppgaven. Vi har også sett på ett referanseprosjekt der glass er brukt som en del av den bærende konstruksjonen. Der vi ikke har funnet løsninger, har vi laget egne forslag til hvordan det kan gjøres.

Beregninger og den analytiske modellen er hentet fra tidligere publiserte forskningsartikler som omhandler dimensjonering av bærende glasselementer. Den analytiske modellen til *Amadio og Bedon* er benyttet i de analytiske beregningene, da denne er dekkende for vår case. Det er gjort ytterligere beregninger ved å utføre en elementanalyse i programmet *Ansys*. Dette er for å kartlegge grundigere hvordan glass oppfører seg under belastning, og for å sammenligne resultater herfra med analytiske beregninger.

4. Teori

4.1 Glass

4.1.1 Glassets oppbygning

Glass er et uorganisk materiale som fremstilles ved størkning av en smelte, uten at krystallisasjon inntreffer. Hvis glass holdes ved høy temperatur i lengre tid blir glasset mykt, noe som vil føre til krystallisasjon. Ved en krystallisasjon blir glasset hvitt og helt ugjennomsiktig som porselen. Med andre ord er glass en underkjølt væske som er så tregtflytende at den oppfattes som et fast stoff. Kjøles det ned til vanlig romtemperatur blir glasset hardt og sprøtt. (Byggforsk 1993)

De kjemiske sammensetningene er avgjørende for glassets egenskaper. Silica forekommer fra sand, og er det viktigste kjemiske stoffet som danner en underkjølt smelte. Andre råvarer som er viktige for framstilling av plateglass, er soda og kalkstein. (Byggforsk 1993)

Det er vanlig med små mengder forurensninger som gir glasset en grønnfarge som kan kalles glassets egenfarge. Disse forurensningene består hovedsaklig av jernoksider og kromoksider. Alt bygningsglass har stort sett lik kjemisk sammensetning. Til tross for dette er det mulig at egenfargen på glass kan variere fra leverandør til leverandør, avhengig av mengden forurensninger. Derfor bør man være forsiktig med å bruke glass fra ulike leverandører på samme bygning.

(Byggforsk 1993)

4.1.2 Hvordan lages glass?

Glass lages ved å varme opp ingrediensene til smeltepunktet på 1600-1800°C, for så å kjøle det ned til 100-800°C. Når glasset er avkjølt blir det så tregtflytende at massen kan formes. Glass kan ha opptil 75 % silica, som er en av de vanligste bergartene i jordskorpa i form av kvarts sand. Denne glassdanneren kombineres med flussmiddelet natriumoksid som brukes til å kontrollere viskositeten og senke temperaturen til ca 550 °C, noe som gjør produksjonen enklere. Ved å tilsette flussmiddel forekommer det uheldige virkninger. Man må dermed motvirke disse ved å tilsette den mest brukte stabilisatoren kalsiumoksid. Andre tilsetninger som endrer de optiske egenskapene til glasset vil utgjøre mindre enn en prosent av blandingen. (Wurm 2007)

4.1.3 Typer glass

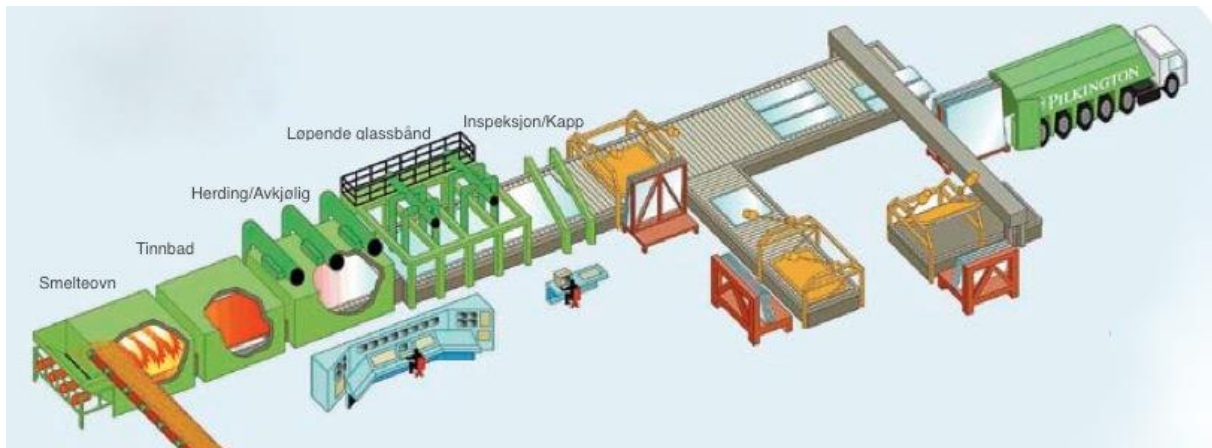
Plateglass, eller planglass, er en fellesbetegnelse på glass som produseres i plane flater. Det er denne typen glass som brukes i bygningsmessig sammenheng, som for eksempel vinduer, glassfasader, vindskjermer og lignende. Avhengig av produksjonsprosess, kan planglass deles inn i flere grupper:

- Blåst glass
- Valset glass
- Trukket glass

Glasset kan videre behandles/bearbeides i forskjellige prosesser for å påvirke glassets egenskaper avhengig av bruksområde. Har glasset krav til sikkerhet, energi, støy og lignende må det bearbeides slik at det dekker sitt funksjonskrav.

I dag produseres omtrent 90 % av den vestlige verdens planglass ved hjelp av *floatglassprosessen*. (PilkingtonNorge)

Floatglass, eller flytglass er en type valset glass som er foretrukket grunnet dets gode kvalitet. Glasset oppnår god optisk kvalitet og blir svært plant. Floatglassprosessen ble kommersielt utviklet av Pilkington på 1950-tallet. Råmaterialene smeltes i en ovn som holder en temperatur på opp mot 1550 °C. Glassmelten helles så kontinuerlig ned i ett tinnbad. Glassmelten flyter utover på tinnbadet og danner en jevn overflate, som gradvis nedkjøles for å unngå spenninger i glasset. Når glassets temperatur har sunket til omtrent 600 °C, blir glassflaten trukket opp fra tinnbadet og inn i en herdeovn ved hjelp av valser. Glassets tykkelse kontrolleres ved hjelp av valsenes hastighet. Saktere hastighet danner tykkere glass, og motsatt. I herdeovnen fortsetter temperaturen og gradvis synke, til glasset er ferdig herdet. Glassplaten blir så inspisert for defekter og kappet til ønsket størrelse. (Haldimann, Luible og Overend 2008) Se figur 4 for illustrasjon av produksjonsprosessen.



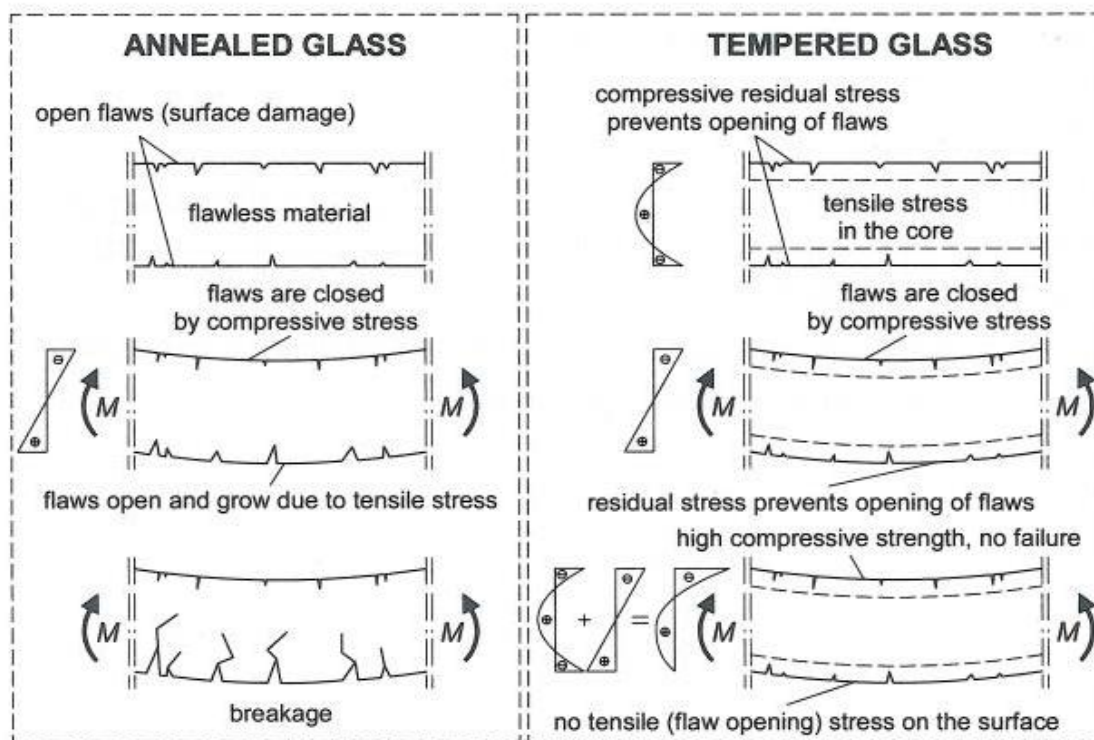
Figur 4 - Produksjon av floatglass, fritt gjengitt fra Glassfakta 2012. (PilkingtonNorge)

4.1.4 Herdet glass

Varmeherdet glass

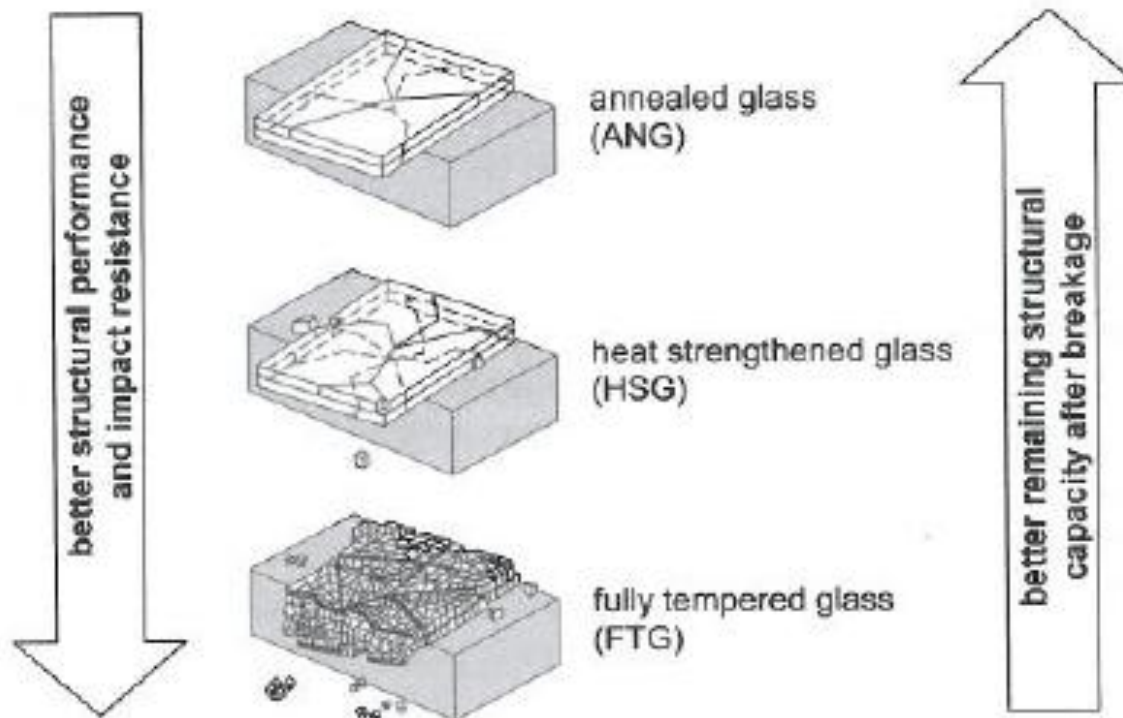
Små sprekker i glassoverflaten er det svakeste punktet til herdet glass. Når glasset belastes blir det trykk på den ene siden og strekk på den andre, og sprekken på strekksiden utvider seg og glasset sprekker. For å øke styrken til glasset er det derfor utviklet varmeherding av glassplater. Etter den vanlige produksjonen av glass, varmes glasset til ca 620-675 °C for så å kjøles raskt ned med kald luft gjentatte ganger. Dette gjør også at glasset får en liten bøy. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

Varmebehandlingen av glasset gjøres for å skape indre spenninger. Dermed oppstår det strekkrefter inne i glasset, og trykkrefter nær glassoverflaten. Når glasset da påkjennes vil trykkreftene nær glassoverflaten utligne kreftene på strekksiden, og de små sprekken i glassoverflaten vil ikke utvides før strekkreftene blir større enn de allerede eksisterende trykkspenningene. Se figur 5. Illustrasjonen til venstre viser et ubehandlet glass. Ved belastning vil det oppstå ytterligere sprekkevekst på strekksiden som fører til sprøtt brudd. Illustrasjonen til høyre viser et herdet glass med en trykksone nær overflaten. Ved belastning vil trykksonen utligne noe av strekkreftene og dermed gjøre glasset sterkere.



Figur 5 – Spenningsforskjeller i ubehandlet glass og varmeherdet glass, Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)

Glasset vil da tåle mer før det ryker, men når det ryker vil det sprekke opp i små glassterninger og gå i oppløsning. Disse terningene er relativt harmløse, men kan skape alvorlige skader hvis de faller fra store høyder. Derfor brukes det ofte laminering på herdet glass, slik at etter brudd sitter glasset fortsatt fast i lamineringen (Haldimann, Luible og Overend 2008). Martin Borg i *Glass og Fasadeforeningen* poengterer også at det er viktig å merke seg at med tykke glassplater av ulaminert glass kan terningene få feste i hverandre som et puslespill, å bli store blokker som er svært farlige hvis de faller på folk. Figur 6 illustrerer forskjellige bruddmønstre for forskjellige typer laminert glass.



Figur 6 – Bruddmønstre i ubehandlet, varmemersterket og herdet glass, Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)

På grunn av spenningene som oppstår i glasset i herdeprosessen, kan ikke glasset slipes, kuttes, eller bores hull i. På grunn av bruddmønsteret klassifiseres varmeherdet glass som sikkerhetsglass. Herdet glass kan i sjeldne tilfeller spontangranulere. Partikler av nikkelsulfid kan få glasset til å bryte pga. volumøkning ved tilstandsendring. Gjennom varmetest (heat-soak) påskyndes tilstandsendringen, hvilket avslører så godt som alle glassruter med nikkelsulfid ved at de granulerer. (PILKINGTON GLASSFAKTA)

Kjemisk herdet glass

Alternativt til varmemerding av glass, finnes det en kjemisk prosess. Herdes glasset kjemisk vil det dannes en annen spenningsprofil i glasset enn ved termisk herding. I den kjemiske prosessen legges glasset i ett bad av kalsiumklorid. Dette fører til en utveksling av kalsiumioner med sodiumioner, og skaper trykkspenninger i ett tynt lag av glassets overflate. Siden glasset ikke varmes opp under denne prosessen vil ikke glasset bli deformert som varmebehandlet glass. Hvis det oppstår mikrosprekker i glassets overflate som er dypere enn denne trykksonen, kan det resultere i ett spontant brudd. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

På grunn av en annen spenningsprofil i glasset, kan glasset bearbeides til en viss grad etter kjemisk behandling. Bruddprofilen er mer lik som ubehandlet glass, da det oppstår store skarpe glassplinter ved brudd. Kjemisk glass er derfor ikke klassifisert som ett sikkerhetsglass, så lenge det ikke lamineres. (Wurm 2007)

4.1.5 Laminert glass

Laminert glass er to eller flere glasskiver som er festet sammen med et innvendig lag av plastikkmateriale eller lignende. Når laminert glass sprekker, knuser ikke glasset på samme måte som vanlig glass, men glassbitene sitter fast i den innvendige lamineringen. Det minsker risikoen for personskader. (PilkingtonNorge)

Det vanligste lamineringsmaterialet er polyvinyl butyral (PVB). PVB stenger nesten for all UV stråling, og ett mellomsjikt er vanligvis fra 0,76 mm tykt i vanlig glass, til 2,28 mm tykt i varmeherdet og buet glass. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

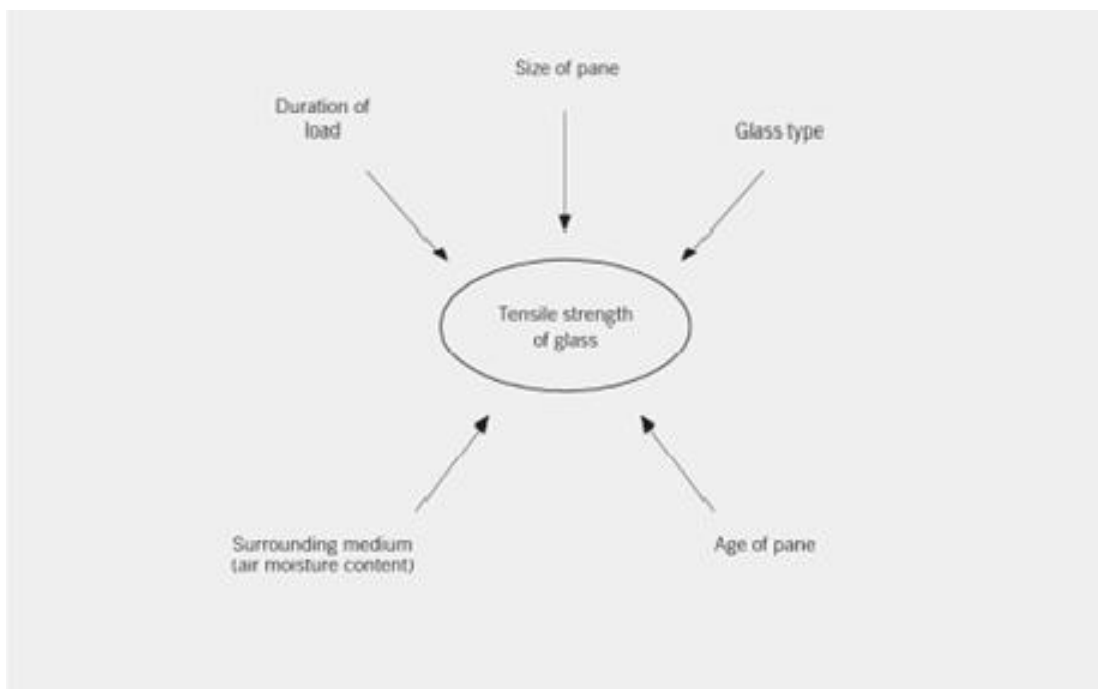
Når lamineringsmaterialet har samme brytningsindeks som glass, blir hele sammensetningen glassklar. Lamineringsmaterialet kan også inneholde spesielle komponenter for forskjellige egenskaper. For eksempel solreflekterende eller innsynsskjermende materialer, solceller og LED lys. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.2 Materialelegenskaper for glass

4.2.1 Strekk og trykkrefter i glass

Glass har en stor teoretisk strekkapasitet. Den høye teoretiske strekkapasiteten er basert på båndene mellom de kjemiske komponentene i glasset. Dette båndet kommer stort sett fra den sterke bindingen SiO₄ tetrahedron. I teorien har denne bindingen en strekkapasitet på 8 000 N/mm². I praksis er strekkapasiteten mye lavere enn denne verdien. Grunnen er at glass er ett sprøtt materiale, hvor styrken avhenger av svakheter i glassets overflate.

Glass er derfor ikke et helt kompakt materiale, men har små mikroskopiske uregelmessigheter og feil som gjør at styrken svekkes betraktelig. I tillegg til de mikroskopiske svakheterne kommer riper og hakk forårsaket av slitasje, vind og andre mekaniske effekter som vil dannes i ytterkanten av glasset ved bruk. Nedbøyninger fra lastoverføringer lager små mikroskopiske sprekker i overflaten på samme måte som i betong. Strekkrefter påført disse sprekkenes fører til en spenningskonsentrasjon. Se figur 7.

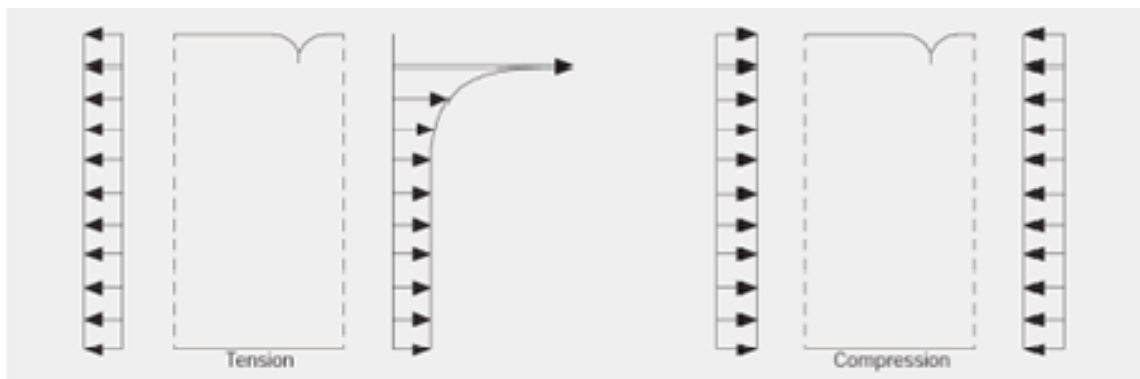


Figur 7 - Faktorer som påvirker glassets strekkapasitet, Gjengitt med tillatelse fra (Wurm 2007)

Når spenningstoppen overstiger det kritiske punktet, vil det oppstå brudd i glasset. Sprekken forplanter seg da i høy hastighet fra den ene enden til den andre, gjennom hele området i plata. Det knuste glasset kan ha noe gjenværende lastbærende kapasitet hvis glasset er satt

sammen av to eller flere individuelle laminerte glassplater. Strekk og bøyespenningen gjenspeiler seg derfor i overflatekvaliteten og er ikke en konstant verdi. Styrken på glasset har direkte sammenheng med størrelsen og alderen på plata. Desto større og eldre plata er, jo større er sannsynligheten for en kritisk feil. (Wurm 2007)

Som et resultat av glassets sprø sammensetning er trykkfastheten til glass høyere enn strekkfastheten. Dette kommer av at glassets styrke ikke reduseres ved trykkbelastning når det er sprekker og hakk i platas ytterkant. Se figur 8. (Wurm 2007)



Figur 8 - Mikrosprekk utsatt for strekk og trykk, Gjengitt med tillatelse fra (Wurm 2007)

4.2.2 Motstandsdyktighet mot slitasje

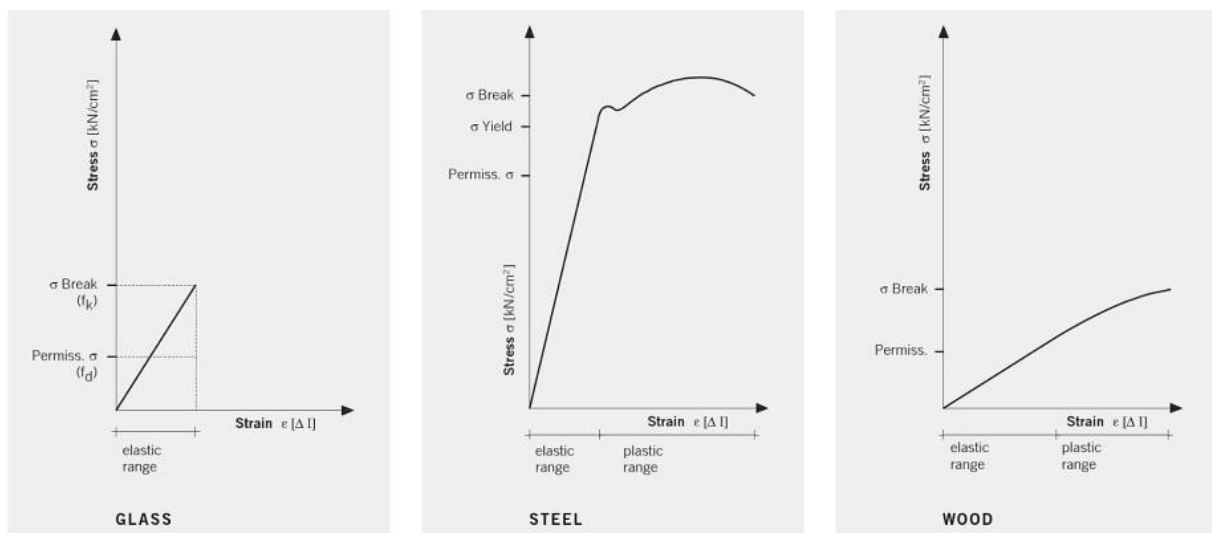
Belastning av glass fører til spenninger i glassets overflate. Over tid vil disse spenningene føre til sprekkvekst. Dette betyr at ved en tillatt belastning av glasset, vil det over tid kunne utvikles sprekker som fører til ett brudd i glasselementet. Denne egenskapen gjør at glass er ett uforutsigbart materiale, og er en viktig faktor å ta hensyn til ved dimensjonering og bruk av glass i bærende systemer. (Haldimann, Luible og Overend 2008) Sprekker og sprekkvekst i glassets overflate er praktisk sett umulig å unngå ved produksjon og vanlig håndtering av glass. (PANKHARDT og BALÁZS 2010)

I tillegg til belastning kan glassets overflate også påvirkes av det ytre miljøet. Vær og luftfuktighet gjør at overflaten stadig utsettes for kondens og ett fuktig miljø. Over tid kan selv vann føre til kjemiske prosesser i glassoverflaten som fremmer sprekkvekst. Det samme gjelder partikler i luften på grunn av luftforurensning. (PANKHARDT og BALÁZS 2010)

En matematisk modell kalt en *“lifetime prediction model”*, er utviklet for å bestemme kapasiteten til glass på grunnlag av denne sprekkveksten. Modellen baseres seg på kvasistatisk bruddmekanikk, matematiske modeller for glassoverflatens tilstand og sannsynlighetsmodeller. I kvasistatisk bruddmekanikk blir materiales egenskaper og kapasitet beskrevet ved å se på sprekker, og kan være en god modell for beregning av sprø materialers kapasitet. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.2.3 Deformasjon ved belastning og temperaturforandring

Elastisitetsmodulen til glass er $70\,000\text{ N/mm}^2$, bare en tredjedel av stål, men ca. fem ganger høyere enn tre. Glassmaterialet har en lineærelastisk deformasjon ved økning av lastene. Når bæreevnen overstiger lastkapasiteten vil glasset bryte uten forvarsel som et resultat av strekkspenningene. Se figur 9. (Wurm 2007)



Figur 9 - Spenning/Tøyning for Glass, stål og tre, Gjengitt med tillatelse fra (Wurm 2007)

Sammenligner man glass med stål og tre ser man at glass ikke har noen flytegrense. Ved tøyning deformeres glass lineærelastisk frem til bruddgrensen, for så å gå i oppløsning uten forvarsel når lastkapasiteten overskrides. I motsetning til stål, vil dette oppføre seg lineærelastisk til det når flytepunktet for så og plastisk deformeres. Tre har både elastiske og plastiske egenskaper. Rivning og splitting av fibre advarer om svikt i treverket. Se figur 9. (Wurm 2007)

Siden glass ikke kan opptre plastisk har det ikke mulighet til å spre pålagte spenninger som opptrer ved temperatursjokk. Derfor er det viktig å unngå direkte kontakt mellom glass og

stål. Utvidelseskoeffisienten ved temperaturforandring uttrykker utvidelsen av et legeme for hver grad temperaturen øker. Verdien for det mest brukte glasset i bygninger, sodaglass, er $9 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Dette er tre fjerdedeler av konstruksjonsstål. (Wurm 2007)

De forskjellige utvidelsene og sammentrekningene av ulike materialtyper må tas hensyn til i sammenføyingene. Titan har den samme utvidelseskoeffisienten som glass, noe som gjør det spesielt egnet til innfestning av glasskonstruksjoner til tross for den høye prisen. Det er også mulig å endre metallegeringen så den passer glassets utvidelseskoeffisient. (Wurm 2007)

Den maksimale temperaturdifferansen som man kan tolerere inne i en komponent uten at det blir brudd kalles for termisk motstand. Ubehandlet sodaglass har kun en termisk motstandsverdi på 40 Kelvin, mens borosilikatglass har mer enn dobbelt så stor verdi grunnet sin lave utvidelseskoeffisient. Herdet glass har en høyere termisk motstand. Sprøhet, høy trykkfasthet og den elastiske deformasjonsevnen til materialet er de viktigste faktorene når man skal beregne bærende glass. (Wurm 2007)

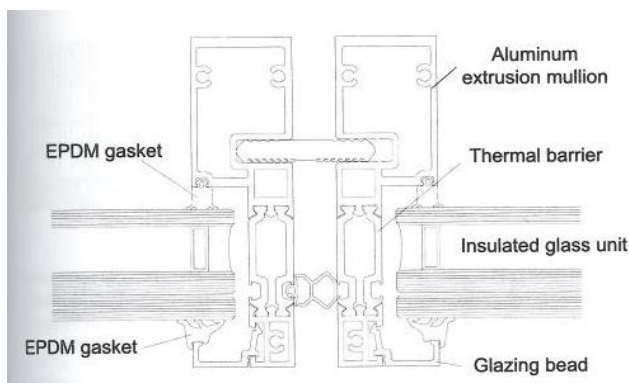
4.3 Innfesting av glass

Den tradisjonelle måten å håndtere forbindelser mellom glass og andre materialer er å unngå direkte kontakt mellom glasset og andre harde materialer for å videreføre laster og bevegelser bort fra glasset. Man må derfor ha et mellomliggende materiale som har den nødvendige styrken og stivheten for å kunne videreføre lastene og samtidig ha tilstrekkelig holdbarhet. Passende mellomliggende materialer er plastikk, harpiks, neopren, fugemasse, aluminium eller fiberpakninger. Utviklingen viser en gradvis reduksjon i størrelsen på forbindelsene og en økning av størrelsen og typene laster som blir overført til glasset. I nyere tid har man utviklet kjemiske, limte forbindelser for glass. Dette har åpnet for en rekke muligheter som ikke har vært mulig med mekaniske forbindelser. Ulempen er at man må ta hensyn til at holdbarheten til limfugene er dårligere enn de mekaniske forbindelsene. I noen tilfeller kan man kombinere mekaniske og limte forbindelser. Den kombinerte forbindelsen forbedrer ytelsen, og hvis det er brukt hardt lim vil forbindelsen bli betraktelig stivere enn med en ren mekanisk forbindelse. Limet vil dermed bære mesteparten av

lastene, mens den mekaniske forbindelsen tar over når kapasiteten til limet blir overskredet. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.3.1 Lineært støttet glass

Lineært støttet glass blir ofte brukt i rammeverk, som i systemer hvor rektangulære glassplater støttes til to eller fire sider. Se figur 10. Egenvekten til glasset er overført til rammene via plastinnfestninger som ligger horisontalt i bunn av glasskanten. Sug og trykkreftene som kommer fra vind blir holdt igjen mekanisk ved å fastholde glasset mellom rammesystemet på den ene siden, og en trykkplate på den andre siden. Lastene blir da overført fra glasset til ramma via neopren, silikon eller gummipakning. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

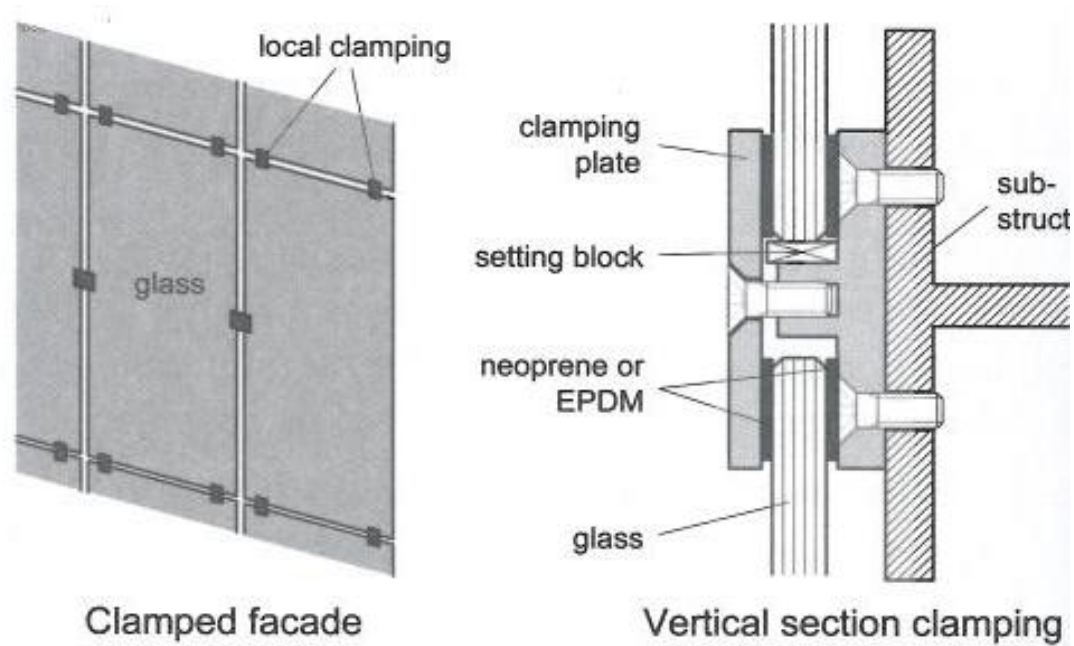


Typisk aluminiumsprofil for lineært støtte glass.

Figur 10 - Aluminiumsprofil for innfeste av glass, Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.3.2 Klemte innfestninger

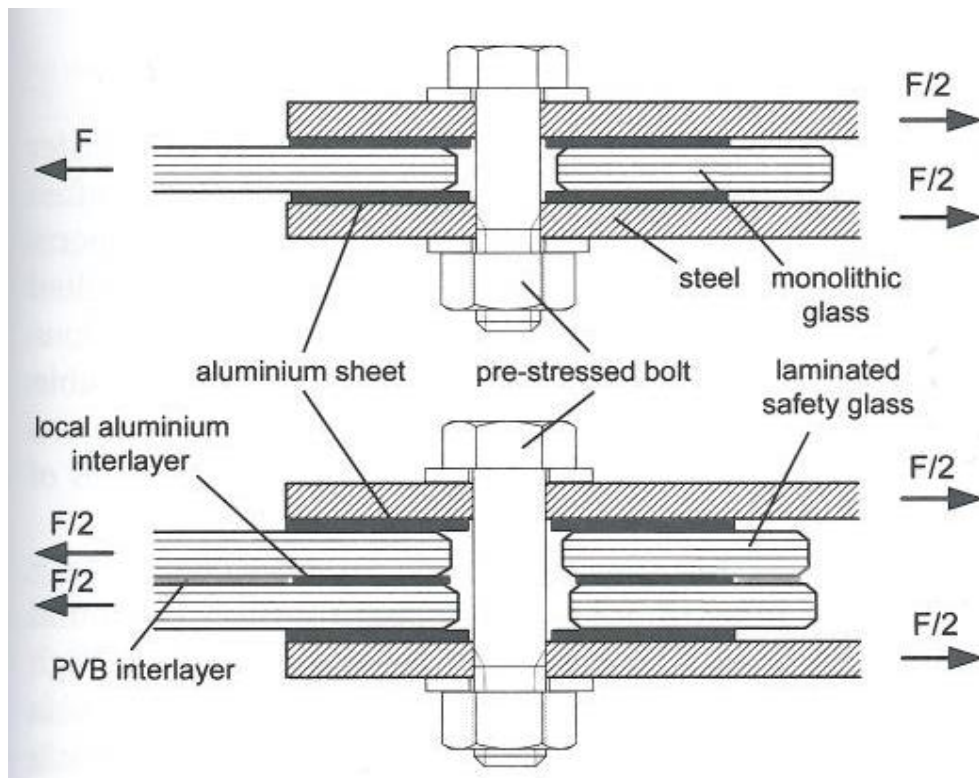
Klemte innfestninger ble utviklet for å minske størrelsen på aluminiumsprofilene. Innfestningene er laget slik at de først blir festet i konstruksjonen, for så å gjøre den synlige delen av klammeret minst mulig. Se figur 11. De holder glasset fast ved friksjon med et mykere lag som neopren som ligger mellom glasset og trykkplata. Friksjonsinnfestning er teoretisk velegnet for strekkrefter siden de fordeler kreftene over et større område enn for eksempel boltinnfestning.



Figur 11 – Eksempel på klemte innfestninger, Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)

Boltinnfestningen er bygd opp av stålplater på hver side, pakninger mellom glasset og stålplatene, og bolter som klemmer stålplatene sammen. Direkte kontakt mellom glass og ståldeler blir unngått ved å lage overdimensjonerte boltehull, og ved å bruke pakninger som fungerer som et mellomstøt mellom stålet og glasset. Pakningene må tåle normalspenningene, skjærspenningene og de forspente boltene uten å bli klemt i stykker. På samme tid kan ikke pakningene være for harde så de skader glasset. De må også være fleksible for å oppfylle toleransekravene til glasset og stålet. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

Hvis man skal bruke klemte innfestninger på et laminert sikkerhetsglass må man ta spesielle hensyn. Mellomstøtten i glasset er ikke i stand til å motstå klemmekraftene som oppstår uten at det oppstår deformasjon som reduserer kvaliteten i glasset. Dermed blir mellomstøtten i glasset i området hvor innfestningen er, byttet ut med et stivere materiale. Se figur 12. Dette kan være for eksempel aluminium med samme tykkelse som mellomstøtten i glasset. (Haldimann, Luible og Overend 2008)



Figur 12 - Klemt innfesting ved laminert sikkerhetsglass, Gjengitt med tillatelse fra (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.3.3 Bolter

Bruken av boltede forbindelser er ikke den mest effektive måten å overføre krefter gjennom et så sprøtt materiale som glass. Denne typen forbindelser er ofte brukt av estetiske grunner for å minske den synlige delen glassplattens innfestning. Når man bruker plastiske materialer er denne løsningen god siden kreftene blir fordelt til de forskjellige boltene på plata. Mens glass som er et sprøtt materiale har ikke muligheten til å fordele de lokale kreftene som et plastisk materiale vil klare. Derfor er den største utfordringen å finne en løsning som unngår de høye spenningskonsentrasjonene og direkte kontakt mellom stål og glass. Dette er delvis oppnådd med mellomliggende materialer i form av foringer som har en lavere elastisitetsmodul enn glass. Materialet som brukes i disse foringene burde ha tilstrekkelig styrke og stivhet for å overføre kreftene til og fra glasset uten å bli ødelagt, samtidig som det skal være mykt nok til og omfordele spenningskonsentrasjonene. Vanlige materialer som brukes i foringer er aluminium, plastikk, polyeter, polyamid eller harpiks som blir sprøytet inn. På denne måten klarer de mellomliggende materialene og omfordele trykkraftkonsentrasjonene før de når glasset. Det er viktig å huske at selv om denne løsningen er god på trykkrefter, har den bare mindre effekt på strekkreftene forårsaket av forlengelsen i hullet. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.4 Glass-standarder

4.4.1 American National Standard, ASTM E1300

American Society for Testing and Materials, ASTM, har utarbeidet en Amerikansk standard som inneholder metoder for å bestemme lastkapasitet til bygningsglass. Standarden inneholder omfattende diagrammer og tabeller for å bestemme den nødvendige tykkelsen av forskjellige typer glasspaneler. Standarden er forskjellig fra det Europeiske standardutkastet, da den baserer seg på maks tillatt last, og ikke maks tillat spenning. Standarden er basert på en såkalt *glass failure prediction model*. Dette er en statistisk anslagsmodell der glassets motstandsdyktighet mot belastning er fastsatt på grunnlag av en sannsynlighet for svikt på 0,8 %. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

Metodene i standarden for bestemmelse av glassets lastkapasitet dekker vertikale og skrånende bygningsglass, utsatt for vindlast, snølast og egenvekt, som kombinert ikke er større enn 15 kN/m². Disse metodene dekker derimot ikke metoder for å dimensjonere glasskonstruksjoner i rekkverk, gulv, akvarium og strukturelle elementer. (ASTM 2012)

For uavhengige analyser i tilfeller der glass anvendes annerledes enn spesifisert i standarden, er det gitt en formel for maks tillat overflatespenning i glasset. Formelen er lite utdypet i standarden i forhold til type laster og kvalitet på glass, men den anses å være til forsiktig side. Den baserer seg på en overflatespenning i glass som er utsatt for en 3 sekunders last. I tillegg til formelen, er det i standarden oppgitt en konservativ maks tillatt spenning for tre typer glass:

Tabell 3- Tillatte spenninger "3-sekunders" last

Glasstype	Tillatt overflatespenning for «3-sekunders» last
Ubehandlet	23,3 N/mm ²
Varmestyrket	46,6 N/mm ²
Herdet	93,1 N/mm ²

Maks tillatt overflatespenning etter ASTM E1300:

$$\sigma_{allowable} = \left(\frac{P_b}{[k (d/3)^{7/n} A]} \right)^{1/7} \quad (1)$$

P_b = Sannsynlighet for brudd

k = Overflateparameter. I Standarden satt til $2.86 \times 10^{-53} N^{-7} m^{12}$

d = Lastvarighet i sekunder

A = Glass overflateareal

n = 16 for ubehandlet glass

(ASTM 2012)

Parameteren, k er en faktor som tar hensyn til mikrosprekker og feil i glassets overflate.

Faktoren representerer vindu, utsatt for 20-års bruk/slitasje. (ASTM 2012)

Setter man inn en sannsynlighet for brudd på 0,8 %, og en lastvarighet på 3 sekunder på $1m^2$ ubehandlet glass, vil man av formelen få en tillatt spenning på:

$$\sigma_{allowable} = 16,1 N/mm^2 \quad (1)$$

Noe som kan sies å være på en veldig forsiktig side, i forhold til den oppgitte "konservative maksimum tillatte overflatespenningen" i standarden.

For laster med lengre varighet enn 3 sekunder, reduseres den tillatte spenningen med lastvarighetsfaktorer. For herdet glass blir da den tillatte spenningen for enkelte lastvarigheter:

Tabell 4 – Maks tillatte spenninger herdet glass

Lastvarighet	Lastvarighetsfaktor	Maks tillatt overflatespenning – Herdet glass
3 sekunder	1,00	93,1 N/mm ²
1 Mnd. (30 dager)	0,43	40,0 N/mm ²
< 1år	0,31	28,9 N/mm ²

(ASTM 2012)

4.4.2 Eurocode - prEN 13474-3

Per dags dato finnes det kun et utkast til en Europeisk glasstandard. *prEN 13474* omhandler metoder for å bestemme glasspanelers styrke, og prinsippene for å bestemme glassets evne til å motstå belastning. Standardutkastet baserer seg på den såkalte *design method of damage equivalent load and resistance, DELR metoden*. (Haldimann, Luible og Overend 2008) Metodikken tar utgangspunkt i spenningene som oppstår i glasset under belastning. Disse spenningene skal ikke overskride glassets kapasitet. På grunn av de spesielle materialegenskapene til glass, tar beregningene av glassets kapasitet blant annet hensyn til restspenninger, uregelmessigheter i overflaten, lastvarighet, miljøforhold og type last. Måten dette er anvendt i standarden, er ved bruk av reduksjonsfaktorer. Tabellen under gjengir de forskjellige reduksjonsfaktorene fra standarden, avhengig av lasttype og lastvarighet. Sammen med en materialfaktor, resulterer dette i en betydelig reduksjon av glassets kapasitet.

Tabell 5 – Sikkerhetsfaktor K_{mod}

Lasttype	Lastvarighet	K_{mod}
Personlast	Korttidslast	0,85
Vindlast	Korttidslast	0,74
Snølast	Kvartårslast*	0,44
Dødlast/Egenvekt	Permanent last	0,29

* Modifikasjonsfaktoren for snølast er representativ for snølaste med en varighet mellom 1 uke og 3 måneder. Andre verdier av k_{mod} kan anvendes, avhengig av lokale klimaforhold.

Standarden oppgir formler for utregning av spenningskapasitet, avhengig av type glass.

Tillatt spenning i behandlet glass:

$$f_{g,d} = \frac{k_{mod} k_{sp} f_{g,k}}{\gamma_{M,A}} + \frac{k_v (f_{b,k} - f_{g,k})}{\gamma_{M,V}} \quad (2)$$

$f_{g,k}$ = Karakteristisk bøyekapasitet

$\gamma_{M,A}$ = Materialfaktor for ubehandlet glass

$k_{s,p}$ = Faktor for glassoverflateprofil

k_{mod} = Tidsavhengig lastfaktor

$\gamma_{M,V}$ = Materialfaktor for forbelastet glass

$f_{b,k}$ = Karakteristisk bøyekapasitet for forbelastet glass

(Standardisation 2009)

Tabell 6 - Tillatt spenning i behandlet glass for forskjellige lasttilfeller

Lasttype	Varmeherdet glass	Termisk herdet sikkerhetsglass	Kjemisk herdet glass
Snølast	37,9 N/mm ²	73,5 N/mm ²	124,2 N/mm ²
Vindlast	49,6 N/mm ²	81,0 N/mm ²	149,2 N/mm ²
Dødlast/Egenvekt	32,1 N/mm ²	69,8 N/mm ²	111,7 N/mm ²

Standarden oppgir en formel for effektiv tykkelse av laminerte glasser for beregning av nedbøyning. Formelen inneholder en faktor mellom 0 og 1 som representerer skjærkrefter overført i lamineringssjiktet. Hva slags verdi som skal benyttes er ikke spesifisert, men det oppgitt en tabell med utregnede verdier, der den er satt til 0,05 for langtidslaster. (Standardisation 2009)

Effektiv tykkelse for laminert glass, for å beregne nedbøyning:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{(1 - \varpi) \sum_i h_i^3 + \varpi \left(\sum_i h_i \right)^3} \quad (3)$$

ϖ = Koeffisient mellom 0 og 1 som representerer skjærkrefter

0 – Ingen skjærgjennomgang

1 – Full skjærgjennomgang

h_i = Tykkelse på glasslag i

4.5 Bærende glass

4.5.1 Dimensjonering

Glassets sprø egenskaper gjør at det er visse faktorer man må ta ekstra hensyn til ved prosjektering. Overskrides glassets strekkapasitet oppstår det momentant brudd, noe som er lite ønskelig i bærende konstruksjoner. Materialer som stål, aluminium og tre er duktile materialer som ved store påkjenninger deformeres og gir ett forvarsel om ett eventuelt brudd. Siden glass ikke innehar disse egenskapene er det nødvendig med stor sikkerhet i beregningene og dimensjoneringen av bærende glasselementer. Risikoanalyse bør derfor gjennomføres ved bruk av bærende glasselementer. Det er alltid en viss risiko forbundet med bygninger, da det er umulig å dimensjonere en konstruksjon som kan motstå enhver tenkelig belastning. Målet er en konstruksjon som fungerer strukturelt tilfredsstillende under forutsigbare forhold. Risikoanalyse bør derfor gjennomføres med tanke på disse punktene:

- Konstruksjonen kan dimensjoneres for å motstå belastningene
- Tiltak for å redusere sannsynligheten for at belastningene kan oppstå
- Belastningen kan aksepteres som en usannsynlig risiko

(Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.5.2 Elastisk knekking

Knekkning er ett fenomen som kan opptre i elementer under trykk. Elementene mest utsatt for knekking er har ofte ett lite tverrsnitt i forhold til elementets lengde. I tillegg til elementets utforming, har innspenningstypen betydning for kapasiteten. Avhengig av innspenningstypen fastsettes knekk lengden, l_k .

Blir ett element med høy slankhet utsatt for store aksiallaster fører dette til en utbøying. Utbøyingen følger en sinuskurve og det oppstår ett bøyemoment i elementet. Momentet belaster elementet ytterligere, og det vil fortsette å bøyes frem til brudd oppstår. Den største aksiallasten ett element kan belastes, uten at for stor utbøying og brudd oppstår kalles kritisk last eller knekklast, F_k

(Vollen 2010)

Eulers formel beskriver kritisk last i det elastiske området:

$$F_k = \frac{\pi^2 \times E \times I}{l_k^2} \quad (4)$$

E = Materialets elastisitetsmodul

I = Tverrsnittets minste treghetsmoment

(Vollen 2010)

4.5.3 Knekning av glasselementer

Glasselementer som er bygd opp av tynne glassplater er ustabile og er utsatt for brudd på grunn av elementets lave stabilitet. Glasselementer belastet i planet må derfor dimensjoneres for knekning og stabilitetsbrudd. Det finnes flere dimensjoneringsmetoder for ofte brukte materialer som stål og tre, men disse er lite anvendelige for glassmaterialer. Ved knekningsanalyse for glass må man ta hensyn til materialets sprøhet, imperfeksjoner i glasset og lamineringslagets materialegenskaper. Det er gjort flere studier på stabiliteten til glasselementer, men dette er ennå ikke tatt i bruk i dagens glasstandarder. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

Haldimann lister opp viktige faktorer som har innvirkning på knekning av glasselementer:

- Produksjonstoleranser
- Innledende deformasjon
- Den lineærelastiske egenskapen, uten mulighet for plastisk deformasjon
- Bruddstyrke
- Opplagerbetingelser

(Haldimann, Luible og Overend 2008)

I retningslinjene for bærende glassvegger og søyler i boken *structural use of glass in buildings*, oppgis det at det må legges til en sikkerhetsfaktor mot Euler knekking. Det finnes ingen standarder for hva slags verdi denne sikkerhetsfaktoren skal ha, så størrelsen på denne må fastsettes av ingeniøren. (IstructE 1999)

For en monolittisk søyle av glass, vil maks spenning være:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W} = \frac{N}{A} \pm \frac{N}{W} (w_{max} + w_0 + e) \quad (5)$$

w_0 = Innledene deformasjon

e = Eksentrisitet

$$w_{max} = \frac{e}{\cos(L_{cr}/2\sqrt{N/N_{cr}})} + \frac{w_0}{1 - N/N_{cr}} \quad (6)$$

N_{cr} = Kritisk last

(Haldimann, Luible og Overend 2008)

Der w_0 er innledende deformasjon. Denne deformasjonen kommer av at en glassflate i praksis aldri vil være perfekt plan. Kurvning i glasset oppstår på grunn av herdingsprosessen under produksjon og vil variere avhengig av type glass og produsent. *Ubehandlet* flatt glass har en veldig lav innledende deformasjon. Varmestyrket glass og fullherdet glass vil ha større innledende deformasjoner. Haldimann oppgir følgende verdier for de forskjellige glasstypene:

Tabell 7 – Innledende deformasjon, w_0

Glasstype	Innledende deformasjon, w_0
Ubehandlet	<L/2500
Varmeherdet glass	Opp til L/300
Fully tempered glass	Opp til L/300

Verdiene er gitt på bakgrunn av testforsøk. Resultatet fra testene viste at den innledende deformasjonen var normalfordelt med en 95 % fraktilverdi på L/386. Den innledende deformasjonen avhenger av produksjonsutstyret og kan variere fra produsent til produsent. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

4.5.4 Laminerte glasselementer i trykk og bøyning

Ved beregning av spenninger i laminerte glasselementer, vil lamineringsfolien i mellom glassene fungere som en skjærforbindelse. Forenklet kan lagvise elastiske materialer med konstant skjærstivhet for en gitt temperatur og lastvarighet beskrives ved hjelp av sandwich teori. (Haldimann, Luible og Overend 2008)

På bakgrunn av dette er det blitt gjort en rekke undersøkelser på hvordan laminert glass oppfører seg under trykk. Italienerene Claudio Amadio og Chiara Bedon utga i 2012 en analytisk modell for kapasiteten til laminerte glass under trykk og bøyning. Modellen tar hensyn til lamineringsfoliens forbindelse mellom glassene ved hjelp av to grenseverdier. Forbindelsen ses på som en perfekt sammenføyning, og som en "forbindelsesløs" sammenføyning. (Amadio og Bedon 2012)

For en 2-lags laminert glassplate utsatt for horisontale og vertikale laster er maks strekkspenning gitt som:

$$\sigma_{max} = \frac{N}{A} + \frac{Nw_{max}}{W_y} + \frac{qL_0^2}{8W_y} \frac{F}{A_{min}} \quad (7)$$

N = Vertikal last

A = Glasselementets totale tverrsnittsareal

w_{max} = Total nedbøyning/utbøyning

W_y = Glasselementets motstandsmoment

q = Horisontal linjelast

L_0 = Elementets kneklengde

A_{min} = Minste tverrsnittsareal av de to glasslagene

(Amadio og Bedon 2012)

F representerer aksiallasten som virker på hvert glasslag på grunn av utbøyningen:

$$F = \frac{(Nw_{max} + qL_0^2) + \chi_{max}EJ_{abs}}{d} \quad (8)$$

d = avstand mellom glasslagenes sentralakse

Kurvaturen av glasselementet:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} \quad (9)$$

Lagdelt stivhet (Ingen forbindelse i laminatet):

$$EJ_{abs} = \frac{Eb}{12} (t_1^3 + t_2^3) \quad (10)$$

$t_{1,2}$ = tykkelse på glasslag 1 og 2

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$w(z) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi z / L_0)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - NL_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - NL_0^2)} \quad (11)$$

der α^2 og K er parametere for laminatets skjæregenskaper:

$$\alpha^2 = \frac{K EJ_{full}}{EA^* EJ_{abs}} \quad (12)$$

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} \quad (13)$$

G_{int} = Lamineringsfoliens skjærmodul

t_{int} = Lamineringsfoliens tykkelse

b = Glasselementets bredde

Ekvivalent aksialstivhet:

$$EA^* = \frac{Ebt_1 t_2}{t_1 + t_2} \quad (14)$$

Monolittisk stivhet (Perfekt sammenføring av laminatet):

$$EJ_{full} = EJ_{abs} + Eb \left[t_1 \left(\frac{t_1}{2} + \frac{t_{int}}{2} \right)^2 + t_2 \left(\frac{t_2}{2} + \frac{t_{int}}{2} \right)^2 \right] \quad (15)$$

Den kritiske knekklasten er gitt ved:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EJ_{abs} EJ_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2} \right) \quad (16)$$

4.6 Referanseprosjekt - Glasshuset i Santa Fe

Det er en konstruksjon i Santa Fe, New Mexico hvor glasset tar opp vertikale laster fra taket og horisontale laster fra vind. Se figur 13 og 14. All informasjon i denne teksten er hentet fra en artikkel om denne konstruksjonen. (DuBois 2007)



Figur 13 - Fasade. Foto: Frank Oudeman



Figur 14 - Innvendig. Foto: Frank Oudeman

Det bærende glassystemet

I dette prosjektet er det ingen innfestninger eller sammenføyninger som ødelegger renheten i fasaden. Det ble studert flere forskjellige måter å løse utfordringene med et bærende glassystem. En løsning med to eller tre lag av laminert herdet glass ble foretrukket ettersom et sprukket lag kan beholde noe av styrken som en del av den laminerte sammensetningen. Fra startfasen var de enige om at modellering og testprogrammer var nødvendig i prosessen. Det var viktig å presisere for byggherren tidlig at det ville bli nødvendig å bygge en fullskala modell for å gjøre omfattende testing, og at prosessen for å designe det bærende glasset ville bli veldig annerledes i forhold til tradisjonell dimensjonering. (DuBois 2007)

Teknisk data

Glassplata består av et $\frac{3}{4}$ tomme herdet lag i midten, og et lag på $\frac{1}{4}$ tomme på hver side. Mellom lagene er det ca 1,5 mm med pvb. Se figur 15. Det innerste glassjiktet på $\frac{3}{4}$ tomme har nok trykkfasthet til å klare sikkerhetsfaktorkravene. Det ble sett på muligheter for å lage

isolerte lastbærende glass. Avstandsklosser og lim for å lage isolerende hulrom ville føre til synlige striper i glasset og ville forandret utseende til glassfasaden betraktelig. Hadde det vært utviklet gjennomsiktige systemer for å lage avstand i mellom glassene ville det blitt vurdert i dette prosjektet. (DuBois 2007)

Sammenføyninger

En dyp u-formet sko til hver glassplate holder glasset på plass i over og underkant. Se figur 15. Denne måtte utvikles spesielt for dette prosjektet for å passe dimensjonen på glasset. Skoen ble utviklet for at glasset skulle passe perfekt ved bruk av neopren som avstandsklosser på hver side. Hver sko i overkant glass har to gjenga stag som overfører lastene ned i glasset og gjør at det blir en jevn lastoverføring på endeflatene i det $\frac{3}{4}$ tommer tjukke glasset. Se figur 16. I hvert stag er det fjærer som sørger for at lasten blir nøyaktig jevnt fordelt over tid. Ved unormal belastning på taket eller hvis en glassplate skulle gå i stykker vil fjærene omfordele lastene til platene ved siden av. (DuBois 2007)



Figur 15 - Innfestedetalj i bunn. Foto: Dewhurst Macfarlane



Figur 16 - Gjenget stag, med fjær. Foto: John Jones

Testing

En glassplate i full størrelse og noen mindre testplater ble laget for testing. Glasset i full størrelse ble utsatt for økende aksiale laster, mens det ble utsatt for varierende horisontale laster som skulle simulere vind. De mindre platene ble testet helt til brudd. Grunnet designet og all testingen var prosjektet tidkrevende og dyrt. Dermed utviklet de et system som var så enkelt som mulig. Se figur 17.



Figur 17 - Glassystemet. Foto:John Jones

5 Beregninger og resultat

5.1 Analytisk modell

Glassveggene mellom etasjeskillerne er regnet på analytisk ved hjelp av *buckling verification of laminated glass* -modellen til Claudio Amadio og Chiara Bedon. Ved hjelp av denne modellen kan det beregnes maksimal strekkspenning og kritisk aksiallast for to-lags laminerte glasselementer under trykk og bøyning.

Beregningene som er gjort forutsetter bruk av herdet glass med en innledende deformasjon satt til $L_0/300$. Beregningene er gjort for flere glasstykker for å sammenligne resultater, da det ikke er funnet gode tommelfingerregler for å gjøre ett overslag for tykkelse på glasselementer brukt i denne sammenheng. Tykkelse på lamineringsjiktet er satt til 1,52 mm.

Formlene tar hensyn til både vertikale og horisontale laster ved beregning av spenning, men ikke utbøyning på grunn av de horisontale kreftene. Utbøyning på grunn av vind er da utført ved å se på glassveggen som en bred bjelke. Det europeiske standardutkastet oppgir en formel for effektiv tykkelse av laminert glass for bruk ved beregning av deformasjon. Denne er brukt i beregningene. Nedbøyningen er beregnet ved bruk av standard nedbøyingsformel for bjelke med jevnt fordelt last. Generelle formler som nedbøyning, treghetsmoment, og motstandsmoment er hentet fra *Haugans formelsamling*.

Beregningene på glassveggene er gjort med hensyn på å finne:

- Maksimum strekkspenning
- Utbøyning
- Knekking/Kritisk aksiallast

Resultatet av beregningene for de forskjellige glasselementene fremkommer av tabellene under. For detaljerte beregninger, se vedlegg E.

Glassvegg 3. Etasje

2-lags laminert herdet glass

Størrelse, b x h: 1125mm x 1000m**Tabell 8 – Kritisk last og maks strekkspenning. Glassvegg 3.etg.**

Dimensjon [mm]	N_{Ed}	Q_d	N_{cr}	σ_{maks}
5/ 1,52 /5	6,98 kN	1,0 kN/m ²	17,8 kN	217,4 N/mm ²
7/ 1,52 /7	6,98 kN	1,0 kN/m ²	47,2 kN	32,8 N/mm ²
10/1,52 /10	6,98 kN	1,0 kN/m ²	134,6 kN	5,8 N/mm ²

Tabell 9– Innledende deformasjon og utbøyning. Glassvegg 3.etg.

Dimensjon [mm]	w_0	w_{vind}	w	w_{maks}
5/ 1,52 /5	3,3 mm	6,9 mm	2,0 mm	12,2 mm
7/ 1,52 /7	3,3 mm	2,5 mm	0,6 mm	6,4 mm
10/ 1,52 /10	3,3 mm	0,9 mm	0,2 mm	4,4 mm

Glassvegg 1. Og 2. Etasje

For 1. og 2. etasje antar vi lik utforming av glassveggene. Lasttilfellet for 1. etg er derfor brukt i beregningene siden dette er tilfellet der glasset blir utsatt for størst belastning.

2-lags laminert herdet glass

Størrelse, b x h: 1125mm x 2450mm**Tabell 10 – Kritisk last og maks strekkspenning 1.etg**

Dimensjon [mm]	N_{Ed}	Q_d	N_{cr}	σ_{maks}
15/ 1,52 /15	67,21 kN	1,0 kN/m ²	82,9 kN	103,3 N/mm ²
20/ 1,52 /20	67,21 kN	1,0 kN/m ²	190,0 kN	25,3 N/mm ²
25/ 1,52 /25	67,21 kN	1,0 kN/m ²	363,6 kN	8,3 N/mm ²

Tabell 11 – Innledende deformasjon og utbøyning i 1.etg

Dimensjon [mm]	w_0	w_{vind}	w	w_{maks}
15/ 1,52 /15	8,2 mm	9,2 mm	35 mm	52,4 mm
20/ 1,52 /20	8,2 mm	3,9 mm	4,5 mm	16,6 mm
25/ 1,52 /25	8,2 mm	2,0 mm	1,9 mm	12,1 mm

Som nevnt tidligere er det ikke fastsatt noen form for sikkerhetsfaktorer i forbindelse med kritisk aksiallast. Av tabellene under fremkommer det hvordan forskjellige sikkerhetsfaktorer påvirker den kritiske lasten, og hva som da kan eventuelt fastsettes som tillatt aksialkraft.

Tabell 12 – Tillatt aksialkrefter for glassvegg i 3.etg.

	Sikkerhetsfaktor		
N_{cr}	1,5	2,0	2,5
17,8 kN	11,9 kN	8,9 kN	7,1 kN
47,2 kN	31,5 kN	23,6 kN	18,9 kN
134,6 kN	89,7 kN	67,3 kN	53,8 kN

Tabell 13 – Tillatt aksialkrefter for glassvegg i 1. og 2. etg.

	Sikkerhetsfaktor		
N_{cr}	1,5	2,0	2,5
82,9 kN	55,3 kN	41,5 kN	33,2 kN
190,0 kN	126,7 kN	95,0 kN	76,0 kN
363,6 kN	242,4 kN	181,8 kN	145,4 kN

5.2 Elementanalyse

På bakgrunn av de analytiske beregningene har vi valgt å modellere glassveggen i 1. etasje for elementanalyse i programmet Ansys. Glassveggen er modellert som ett laminert glasselement i størrelsesforhold 1125mm x 2450mm.

Glasselementet er bygd opp av to glassplater og ett PVB lamineringssjikt med tykkelse 25/1,52/25.

Det er utført en lineærelastisk analyse av elementet for å undersøke deformasjoner og spenninger som oppstår i glasset. Innledende deformasjon og uregelmessigheter i glassets overflate er ikke tatt med i modellen.

Tabell 14 – Materialelegenskaper brukt i modell

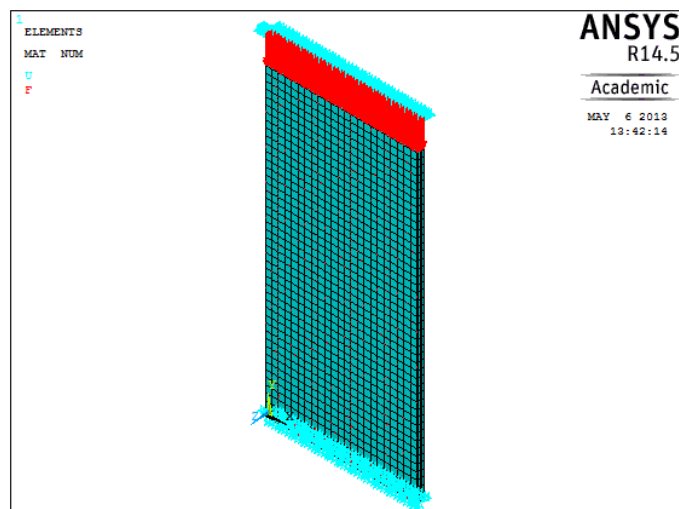
Materiale	Elastisitetsmodul
Glass	70 000 N/mm ²
PVB lamineringssjikt	1,5 N/mm ²

I analysen har vi brukt E-modul hentet fra (MOCIBOB 2008)

Elementet er modellert med fritt opplegg i endene og utsatt for vertikale og horisontale laster. Se figur 18. Lastene som er påsatt modellene er tilnærmet lik som for glassveggen i 1.etg med:

- $N_{Ed} = 67,2 \text{ kN}$
- $Q_d = 1,0 \text{ kN/m}^2$

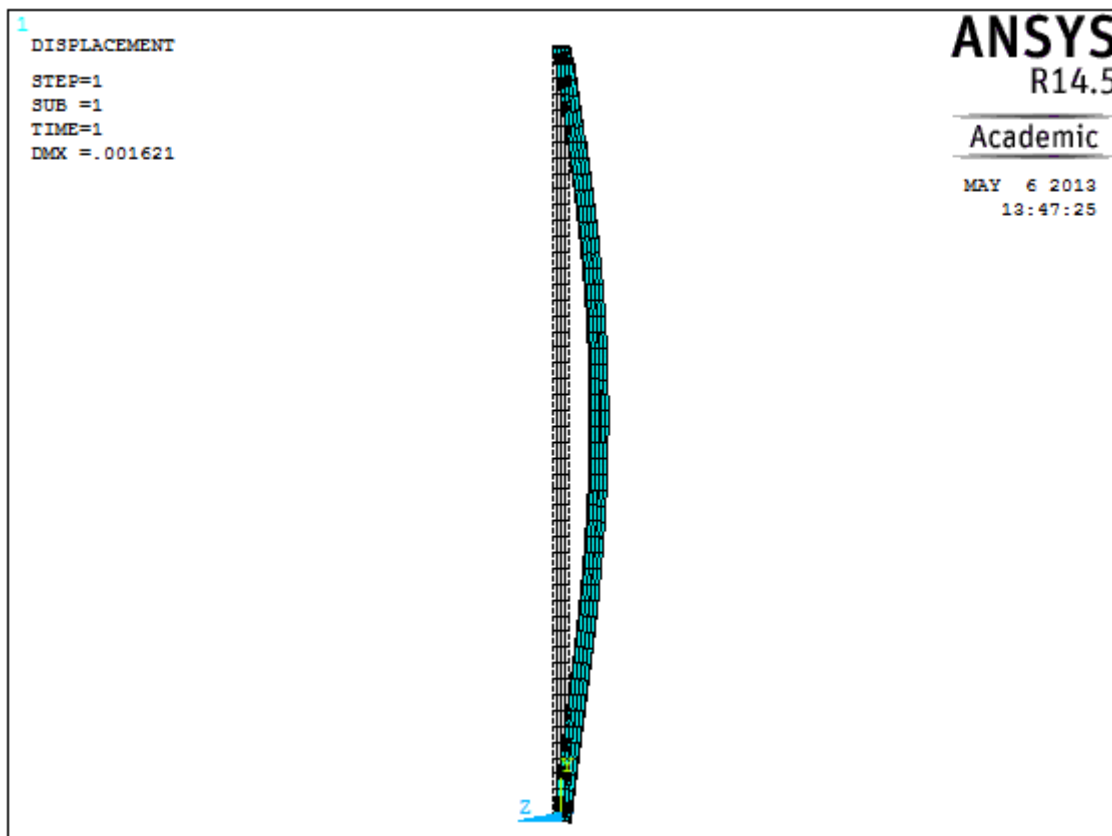
Modell for analyse, påsatt oppleggsbetingelser og laster.



Figur 18 - Modell for analyse.

Deformasjoner

For det aktuelle lasttilfelle er glasselementet utsatt for både horisontale vindkrefter og vertikale laster. Dette fører til en utbøyning på grunn av både 1. og 2. ordens effekter. Som det fremkommer av analysen bøyes elementet symmetrisk om midtaksen. Dette verifiserer grensebetingelsene med fritt opplagte ender. Maks utbøyning oppstår midt på elementet med en størrelse på $1,6\text{ mm}$. Dette er kun på grunnlag av laster uten innvirkning av imperfeksjoner i glasset. Se figur 19.

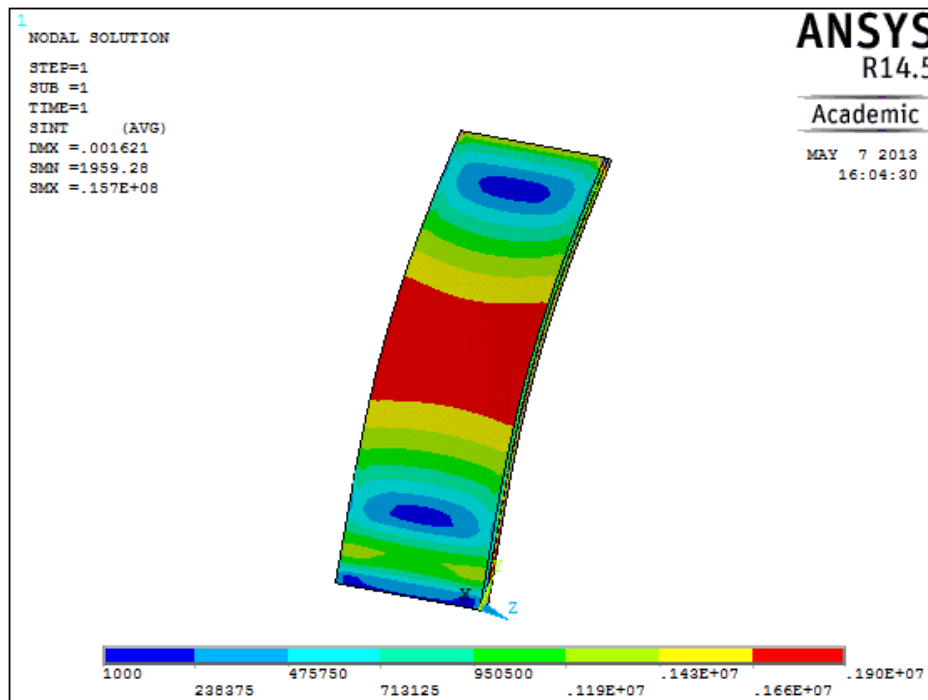


Figur 19 - Deformasjon i elementet. Alle enheter er i meter.

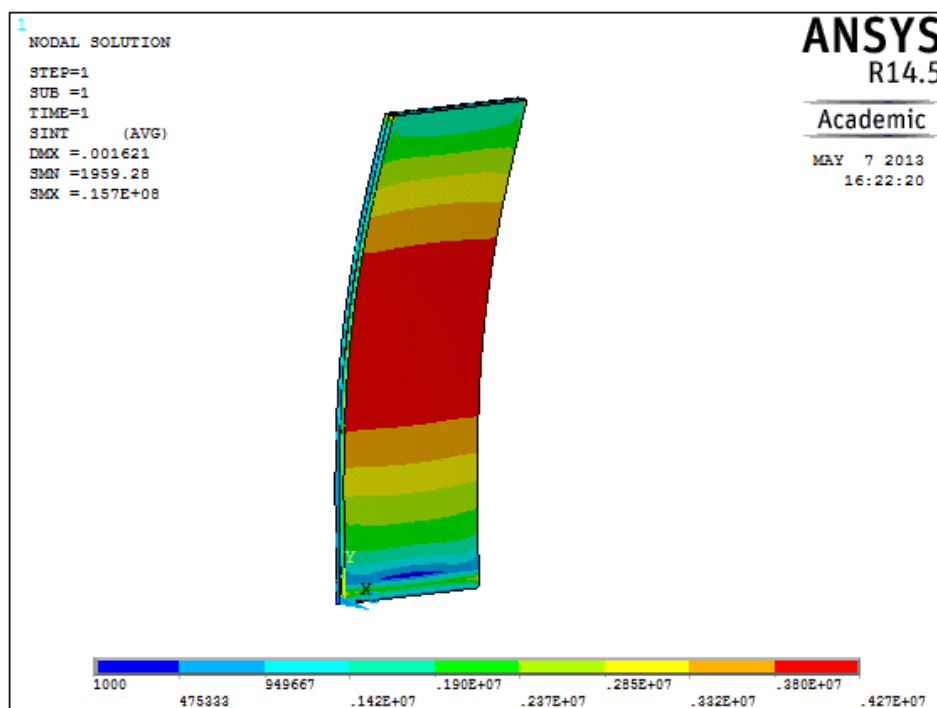
Spenninger

Elementets spenningsbilde er analysert på grunnlag av *stress intensity*. I Ansys programmets manual, er dette angitt som en absolutt spenningsverdi, definert som den største absolutte verdien av $\sigma_1 - \sigma_2$, $\sigma_2 - \sigma_3$, eller $\sigma_3 - \sigma_1$.

Spenningsbilde som fremkommer av analysen viser hvordan spenningene fordeler seg i elementet under de gitte grense- og lastbetingelsene. Det oppstår større spenninger i elementets hjørner og der elementet utsettes for størst bøyning. I elementets strekksone oppstår det spenninger opp mot $1,9 \text{ N/mm}^2$, og i trykksonen opp mot $4,3 \text{ N/mm}^2$. Se figur 20 og 21.

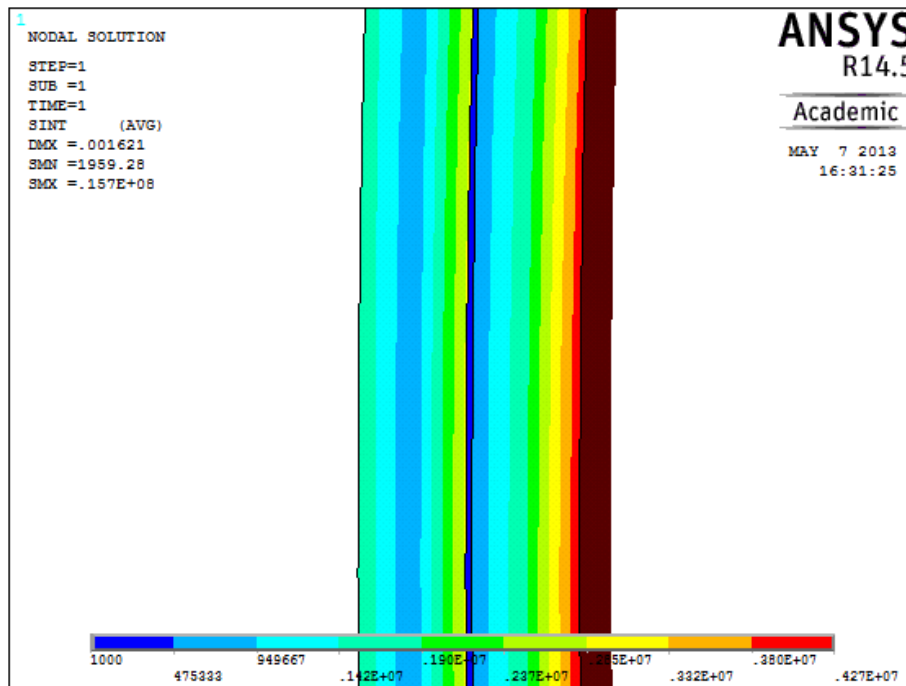


Figur 20 - Spenninger i elements fremside. Alle enheter er i N/m^2 .



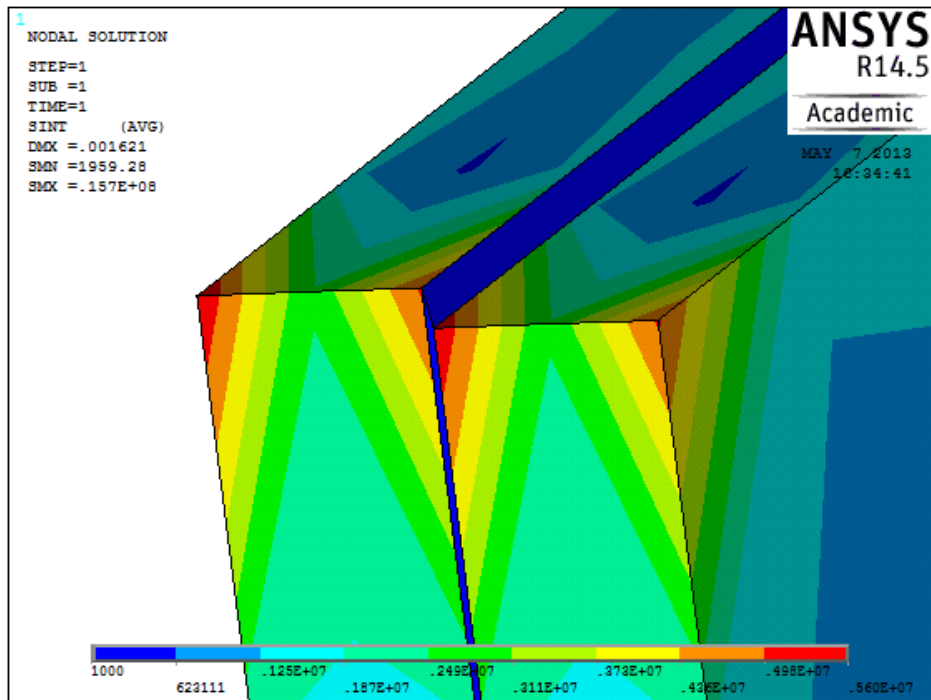
Figur 21 - Spenninger i elementets bakside. Alle enheter er i N/m^2 .

Glasselementets tverrsnitt viser at de spenningene som oppstår i glasset ikke påvirkes av glassets lamineringssjikt. Ettersom PVB-materialet har en såpass lav stivhet i forhold til glasset tillates glassene til å oppføre seg som to uavhengige plater. Se figur 22. Det oppstår høyere spenninger i glassets overflate med verdier opp mot $4,3 \text{ N/mm}^2$ i glassets trykkside, og $1,9 \text{ N/mm}^2$ i glassets strekkside.



Figur 22 - Spenninger i elementets tverrsnitt. Alle enheter i N/m^2 .

De største spenningene som fremkommer av analysen befinner seg i glasselementets hjørner. Se figur 23. Glassets materialegenskaper tilsier at glass er lite tilgivende for konsentrerte spenninger, og dette viser at innfestinger og opphengssystemer må utføres på en slik måte at ikke disse spenningene forsterkes. For elementet under de gitte last- og grensebetingelsene oppstår det spenningskonsentrasjoner i hjørnene på opp mot $5,6 \text{ N/mm}^2$.



Figur 23 - Spenninger i elementets hjørne. Alle enheter i N/mm^2 .

Lamineringssjiktets materialegenskaper har såpass lav stivhet at det ikke er utsatt for spenningskonsentrasjoner, men opprettholder en tilnærmet konstant spenning igjennom hele sjiktet. Figuren over viser sterkt overdrevet hvordan de to glassplatene forskyves i forhold til hverandre. Dette viser at PVB- materialet ikke påvirkes av bøyespenningene, og vil i hovedsak være utsatt for skjærbelastning.

6 Drøfting/Analyse

6.1 Valg av glass

Innledende deformasjon

Som beskrevet i teoridelen, finnes det flere forskjellige glasstyper med forskjellige egenskaper. Å velge riktig glasstype og eventuelt laminering er viktige valg både med tanke på styrken og bæreegenskapene til glasset, men også med tanke på oppførsel ved brudd. Ubehandlet glass har mindre styrke enn herdet glass, og hvis det ryker oppstår det store skarpe glassplinter som er farlig hvis de faller på folk. Siden det skal brukes glass som bæreelement, er styrken viktig. Varmeherdet glass har flere ganger styrken til vanlig ubehandlet floatglass, men når det ryker mister det all bærekapasitet og det granulerer i små biter. På grunn av bruddmønsteret er varmeherdet glass klassifisert som sikkerhetsglass. Herdet glass har også en høyere termisk motstandsevne enn ubehandlet glass. Som nevnt i teoridelen bør tykt glass lamineres, særlig hvis det plasseres i høyden, og hvis det er fare for at glassbiter faller på folk. Den lille deformasjonen som glasset får av varmeherdingen kalles innledende deformasjon, og er en faktor for dimensjoneringen av varmeherdet glass. Ubehandlet glass og kjemisk herdet glass er nærmest helt flate. Kjemisk herdet glass er sterkere enn varmeherdet glass, og en fordel er at det til en viss grad kan bearbeides etter herding. Bruddmønsteret til kjemisk herdet glass er mer lik vanlig ubehandlet glass, men klassifiseres som sikkerhetsglass hvis det lamineres. Ulempen med kjemisk herdet glass er faren for spontane brudd.

6.2 Kapasiteten til glass

Materialegenskapene til glass, gjør glass til ett uforutsigbart materiale. Det er mange faktorer som spiller inn, og styrer glassets kapasitet til å motstå belastning. Materialet oppfører seg elastisk under belastning frem til sprøtt brudd forekommer, men den nøyaktige bruddgrensen er vanskelig å fastsette.

Mikrosprekker og uregelmessigheter i glassets overflate er i praksis det som bestemmer materialets bruddgrense. Slike uregelmessigheter vil i praksis være umulig å unngå, da de oppstår allerede rett fra produksjon og håndtering av glasset. Det finnes modeller for å beregne styrkekapasiteten til glass på grunnlag av disse sprekkene, men disse er kompliserte og ressurskrevende å beregne. Ett annet viktig hensyn er når glasset skal belastes over tid,

eller permanent. På grunn av at glass er ett sprøtt materiale, vil belastning av glasset skape ytterligere sprekkevekst. Dette betyr at for glass under belastning vil kapasiteten avta over tid. Styrken til ett glasselement gjennom sin levetid vil derfor være vanskelig å anslå. Fremgangsmåten for å fastsette styrken på glass må derfor være av det forsiktige slaget, da det er vanskelig å fastslå den nøyaktige styrken med stor sikkerhet.

6.3 Generelt om dimensjonering av bærende glass

Dimensjonering av konstruksjonselementer tar utgangspunkt i å kartlegge kombinasjonen av de lasttilfellende som utgjør størst mulig belastning, og dimensjonere elementet deretter. Under belastning oppfører glass seg elastisk frem til sprøtt brudd forekommer. Det bør derfor være mulig å benytte en elastisk dimensjonering av materialet, der man ser på hvor mye ett glasselement kan belastes i forhold til elementets kapasitet. Det kritiske ved å bruke en slik fremgangsmåte er bestemmelsen av glassets kapasitet. Kapasiteten til glass fastsettes i praksis av uregelmessigheter i overflaten og av at det svekkes over tid. Kapasiteten bør derfor undersøkes grundig og fastsettes med stor forsiktighet.

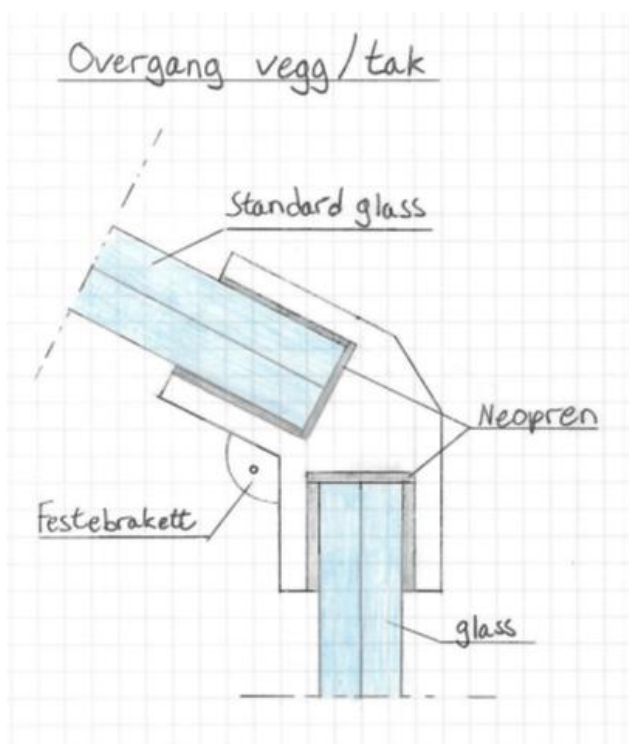
For glass som bærende bygningselement er det ikke utarbeidet noen form for standardverk som definerer metoder for dimensjonering. Den Amerikanske glasstandarden dekker tradisjonell bruk av glass i vinduer og fasader, men er veldig forsiktig med å beskrive kapasiteten til glass i andre strukturelle sammenhenger. Det europeiske standardutkastet er mer utfyllende for styrken til forskjellige typer glass, men oppgir ingen metode for dimensjonering. Standardutkastet er også forsiktig med fastsettelsen av kapasiteten ved å bruke reduksjonsfaktorer av forskjellig størrelse, avhengig av lastvarighet. Ettersom utkastet per dags dato ikke er utgitt som en ferdig standard kan man også forvente forandringer i den endelige standarden.

6.4 Takkonstruksjon

Vi antar at taket blir en standard løsning som er ganske vanlig og ikke spesielt avansert. Dermed går vi ikke mer inn på dette området. Sammenføyningen hvor taket festes i glassveggen er mer komplisert. I overgangen må det være en sammenføyning som gjør at lastene fra taket går ned i glassveggen. Vi har i samråd med Gjermund Haugestøl på Sagstuen AS kommet fram til at det ikke finnes en standard løsning som vil passe våre behov. Dette er på grunnlag av at dimensjonen på glasset går utover det som er vanlig å bruke, i

tillegg til at det ikke skal være karmen i glassveggene. Flere utfordringen med en slik sammenføring er at kreftene fra taket må kunne spres utover hele glassflata i vegg, i tillegg til at det vil oppstå et moment i leddet som vil prøve å knekke glasset.

Vi har laget et eksempel på en løsning som kan fungere i overgangen mellom vegg og tak. Dette er en sammenføring av aluminium eller stål som er vinklet 30° for å passe til takglasset. For å hindre direkte kontakt mellom ramme og glasset er det et gummilag som mellomsjikt. Dette er for å unngå konsentrerte spenninger i glasset. Festebraketten er sveiset på overgangen så rammene til takkonstruksjonen kan festes her. Se figur 24.



Figur 24 - Forslag til overgang vegg/tak

6.5 Løsning med kontinuerlig glass

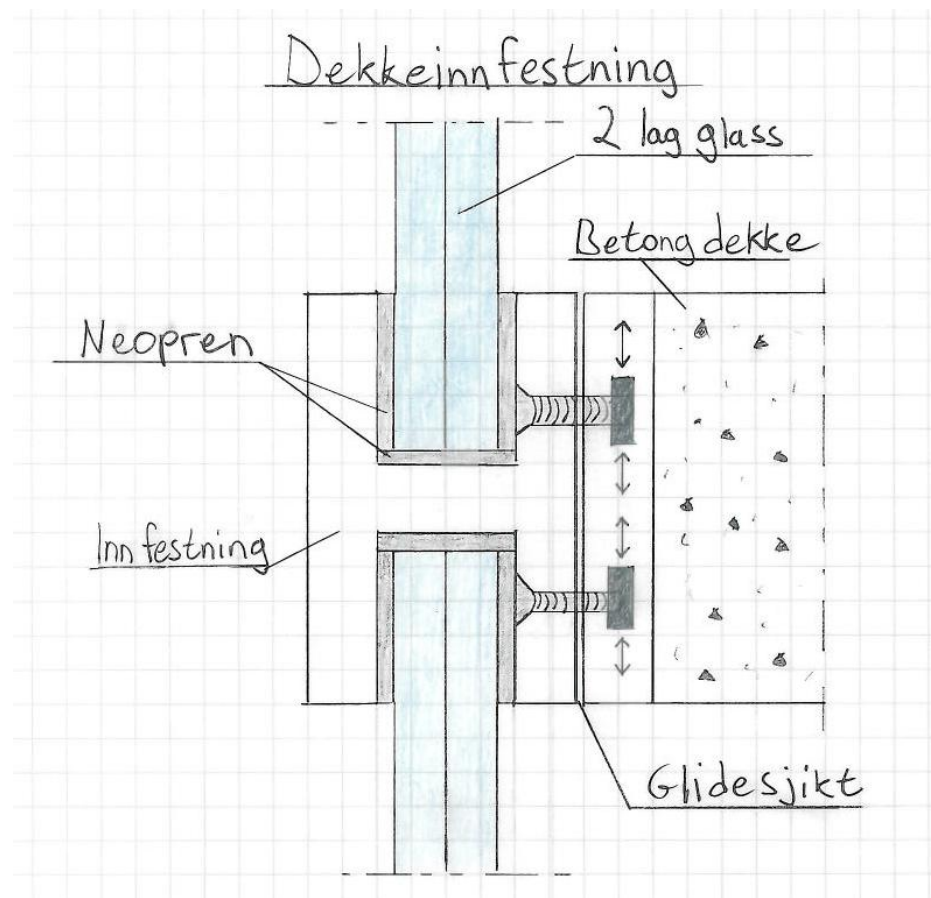
I oppgaven har vi fokusert på at det er selve glasset som skal være bærende og ta opp egenlast og nyttelaster. Vi så for oss at glasset skulle gå fra bakkenivå og helt opp til taket med horisontale skjøter ved etasjeskillerne, og vertikale skjøter for ca. hver meter. Det vertikale glasset skal ta en del av snølasten fra taket, samt vind- og egenlast.

Siden denne glassfasaden vil få mindre laster enn løsningen hvor glassene bærer dekkene, har vi valgt og ikke gå spesifikt inn på dette tilfellet. Vi ønsket å ta for oss den løsningen som hadde verst mulig lasttilfelle. Så vi antar at hvis glassene som tar opp lastene fra dekkene holder, klarer vi også å få glassene i denne løsningen til å holde.

Etter samtale med Gjermund Haugestøl fra Sagstuen AS fant vi ut at det ville bli en del problemer med løsningen med kontinuerlig glass. Han mente at det ville bli vanskelig å få en tett skjøt i overgangen mellom tak og vegg uten noen form for ramme. Et annet problem han nevnte var at glass i en bærende konstruksjon ikke er å anbefale ettersom glass vil slites over tid, og dermed svekke konstruksjonen.

Innfestning

Siden vårt kriterium er at glasset skal være bærende, vil vi ikke at glassinnfestningene i dekkene skal ta opp lastene fra glasset. Derfor må innfestningen i forkant av dekkene være et glidelager som kun tar opp sideveiskreftene og ikke vertikallastene. Dette er en innfestning vi ikke har funnet eksempler på, og det er sannsynlig at det må spesiallages og testes ut. Det vil muligens være en løsning å utvikle en H-formet skinne i horisontalskjøten på glasset som holder glasset på plass, samtidig som at kreftene blir ført videre ned i glasset under. Se figur 25.



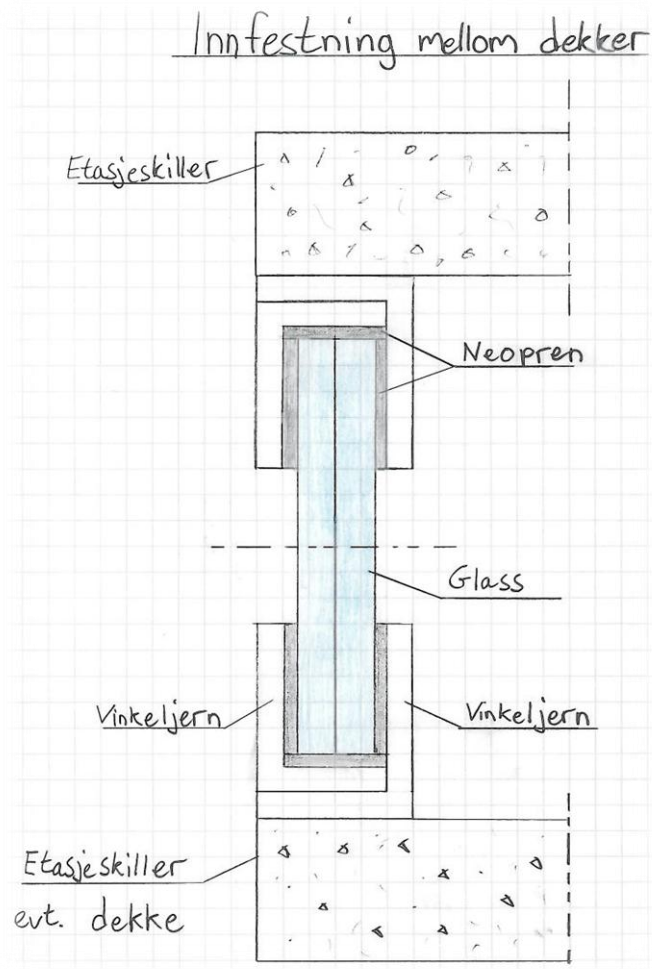
Figur 25 - Forslag til glidesystem

Denne løsningen er et eksempel på hvordan man kan lage innfestningen i dekkene. Det som er spesielt med denne løsningen er at innfestningen skal kunne bevege seg fritt vertikalt siden det er glasset som skal ta opp alle lastene. Horisontalt skal innfestningen være helt fastholdt. Glidesjiktet gjør at betongdekket og glasset kan bevege seg uavhengig av hverandre. Vi tillatter systemet å forskyve seg til en viss grad. Hvis glasset under skulle bli ødelagt, vil innfestningen stoppe etter en viss glidning og hindre at glasset over faller ned. Løsningen består av en ramme i stål eller aluminium med gummipakninger i sjiktet mellom glasset og ramma. Den er festet i ei plate med vertikale spor som gjør at skruen med mutter kan gli vertikalt, men er fastholdt horisontalt.

Innfestningen i bunn vil måtte ta opp alle lastene fra toppen. Det vil derfor være nødvendig å lage en mye mer robust innfestning enn standardløsningene som er nevnt i teoridelen. En innfestning som kan passe i dette tilfellet, og som allerede er beskrevet i "glasshuset", er en U-formet sko. Denne løsningen er relativt enkel og vi antar at en slik løsning utformes slik at den vil kunne ta opp lastene ovenfra. I den vertikale skjøten mellom glassplatene vil det bli en glippe for å forhindre kontakt mellom glassene. Det vil da være nødvendig med en form for tetting. Dette er kun en tetting, og vil ikke ha innvirkning på bæreegenskapene.

6.6 Løsning med glass i mellom dekkene

En annen løsning vi har vurdert er å dra glasset litt inn i bygget, så glassene ligger imellom dekkene. Se figur 26. Dette fører til et annet lastbilde hvor glassene i tillegg til vindlastene må ta opp egenlast og nyttelast fra etasjeskillerne. Dette vil gjøre innfestningssystemet annerledes, siden det da blir festet i topp og bunn av glasset for hver etasje. I toppen av glassene kan det være nødvendig å ha noe som gjør at lastene som kommer ovenfra fordeler seg jevnt utover glassene. Dette er for å unngå konsentrerte laster. Et forslag på en løsning står beskrevet i "Glasshuset". Der brukes det justerbare stag med fjærer som fordeler lastene utover glasset. Dette er en aktuell løsning for å fordele lastene. Også her vil det være nødvendig med en tettefuge i den vertikale skjøten.



Figur 26 - Forslag til innfestning topp og bunn.

6.7 Risiko forbundet med bærende glass i bygget.

I denne risikoanalysen ser vi på begge løsningene vi har vurdert som aktuelle alternativer. Både når glasset går kontinuerlig fra bakkenivå og opp til taket, og når glasset ligger mellom dekkene.

Sikkerhet ved brudd

Siden glass kan ryke uten forvarsel, er det viktig at det bærende systemet er utformet slik at laster kan omfordes. Det vil si at et glasselement kan "tillates" å ryke uten at det bærende systemet kollapser.

I løsningen hvor vi har valgt å kjøre glasset hele veien opp til taket med spesielle innfestninger i dekkeskjøtene, bør innfestningene kunne ta opp horisontale laster så

glassene holdes på plass. Mens vertikallastene vil kunne vandre fritt gjennom innfestningen. Om et glass skulle gå i stykker bør det gjøres slik at glasset ovenfor holder seg på plass og dermed ikke faller ned og går i stykker. Det vil si at alle glassplatene burde være uavhengige og skal tåle at et glass blir ødelagt.

I den andre løsningen hvor glassene får tyngden fra dekkene over, er det mulig å få tyngden til å omfordeles til de andre glassene ved et brudd. Dette vil dermed kunne forhindre at dekket over siger ned.

Kvalitetssikring

Det er viktig med kvalitetssikring når man dimensjonerer glass. Derfor bør alle beregninger bli gjort grundig for så å kontrolleres. Det bør stilles høye krav til glassprodusenten slik at kvaliteten på glassene som blir levert, har de egenskapene som er spesifisert.

Vedlikehold

Riktig vedlikehold er viktig for at glasskonstruksjonen ikke skal svekkes over tid. Det som er kritisk i denne konstruksjonen, er gummipakningene i innfestningene som kan eldes over tid og dermed føre til svekkelser i glasset. Dette er noe som må sjekkes etter noen år for å være sikker på at pakningene har den elastisiteten den er beregnet for.

Sikkerhet ved arbeide

Under transport og i byggeperioden må man passe på at bygningsdelene og spesielt glassplatene er tilstrekkelig beskyttet mot ytre påkjenninger som kan medføre både synlige og usynlige skader i glasset. I verste fall kan bæreevnen til glasset svekkes uten at man kan se noen skade på glassplata.

Ekstra sikkerhetstiltak

I enkelte bygninger vil det være nødvendig med tiltak for å forhindre at kjøretøy og andre ytre påkjenninger kan skade konstruksjonen. I dette bygget er glasset vendt ut mot hagen med en terrasse utenfor, noe som gjør at risikoen for større ytre skader er liten.

6.8 Resultater

I litteraturen og standardene er det beskrevet mye generelt om dimensjonering av glass, og viktige hensyn som må ivaretas ved dimensjonering, men det er beskrevet få konkrete modeller for utføringen av selve dimensjoneringsprosessen. *Buckling verification of laminated glass* – modellen til Claudio Amadio og Chiara Bedon, er den modellen som var mest anvendelig for vårt tilfelle. Den stammer fra en nylig publisert forskningsartikkel, og beskriver en metode for å bestemme kritisk last, nedbøyning og spenninger som oppstår i glass utsatt for trykk og bøyning. Vi ønsker å se på tilfeller der glasset blir utsatt for størst mulig belastning og hvordan dette påvirker glasselementene. I formelen for spenningsberegningene er den horisontale lasten medtatt i regnestykket, men den er ikke medtatt for utbøyning. Vi valgte derfor her å beregne utbøyningen på grunn av vindlasten separat, og legge dette som ett tillegg til utbøyningen som oppstår på grunn av vertikallasten. I praksis antar vi at vindlasten vil påvirke utbøyningen, og velger å inkludere dette i beregningene. I det Europeiske standardutkastet er det beskrevet at for nedbøyningsberegninger for laminerte glasselementer skal det brukes en effektiv tykkelse h_{eff} . Effektiv tykkelse for den laminerte glassveggen er beregnet ut ifra det Europeiske standardutkastet.

I modellen er også lamineringssjiktets skjærmodul en faktor. Det finnes lite data på nøyaktig hva slags verdier denne har under permanente lastforhold. Skjærmodulen er derfor satt til samme verdi som i publiseringartikkelen. Den er der oppgitt til $0,052 \text{ N/mm}^2$ for langtidslast og høye temperaturer. (Amadio og Bedon 2012)

Resultatene av beregningene viser deformasjonene og strekkspenningen som oppstår i 2-lags laminerte herdet glass med forskjellige tverrsnitt. Beregningene er gjort for løsningen med glass plassert mellom dekkene. Av beregningene kan man se at ved økende glasstykkelse synker maksimum strekkspenning i glasset relativt mye. Naturlig nok minsker også utbøyningen av glasset ved økende tykkelser. Etter det europeiske standardutkastet tillattes varmeherdet glass å tåle spenninger fra permanente laster opp mot $32,1 \text{ N/mm}^2$. Etter den Amerikanske glasstandarden har herdet glass en tillatt overflatespenning på $28,9 \text{ N/mm}^2$ for permanente laster (Lastvarighet lengre enn 1 år).

I standardene er disse verdiene oppgitt som forsiktige. Dette betyr at med bakgrunn i beregningene tilfredsstiller dimensjonen $20/1,52/20$ spenningskravet for glassveggen i 1.etg.

Av den kritiske aksiallasten med hensyn på knekking, fremkommer det at de forskjellige glasstverrsnittene har stor kapasitet. For glassveggen i 1.etg, vil dimensjonen $15/1,52/15$ ha kapasitet til å motstå en kritisk last på opp til 82,9 kN, som er høyere enn den dimensjonerende aksiallasten. Spørsmålet er hva slags sikkerhetsfaktor som er hensiktsmessig å bruke for denne typen konstruksjoner. Det er ikke fastsatt noen form for reduksjonsfaktorer som skal brukes i denne sammenheng, så det må en vurdering til for å avgjøre hva som kan fastsettes som tillatt aksiallast. For glass som en del av ett bærende system, vil brudd og kollaps være kritisk. På grunn av glassets materialegenskaper, og muligheten for brudd uten varsel anbefaler vi bruk av en høy sikkerhetsfaktor.

Utbøying er kritisk for glass da dette fører til ytterligere sprekkvekst i glassets overflate. Deformasjonen på grunn av belastningen bør derfor holdes til ett minimum. I standardene, eller litteraturen er det ikke fastsatt noen konkrete krav til minimum deformasjon for å minimere sprekkvekst, så dette blir også en vurderingssak for det enkelte tilfellet. I praksis er denne sprekkveksten umulig å unngå, men det er fordelaktig å prøve å redusere denne så mye som mulig for å opprettholde glassets bruddmekaniske egenskaper. Utbøyingen på grunn av belastningen bør reduseres ved å øke glassets tykkelse, eller eventuelt å utforme en form for avstivning for å hindre deformasjon der dette er mulig. Innledende deformasjon i glass vil alltid opptre, da denne oppstår under produksjon/behandling av glasset. Størrelsen på den innledende deformasjonen varierer etter type glass, og man må velge glasstype deretter.

Den analytiske modellen produserer kun teoretiske verdier, og i forhold til virkeligheten bør disse verdiene ansees som tilnærminger. Modellen tar heller ikke glassets levetid i betraktning, så denne faktoren må tas høyde for i bestemmelsen av glasstypens tillatte kapasitet. Når det gjelder nøyaktigheten av disse verdiene i forhold til virkeligheten, bør det derfor utføres videre analyse. Enten i form av numeriske analyser, fysiske tester eller begge deler.

Elementanalyse i Ansys

For statiske og mekaniske beregninger bruker elementmetoden numeriske beregninger for å beregne forskyvning av noder i ett system. På bakgrunn av disse forskyvningene kan det beregnes spenninger og deformasjoner i modellerte elementer. Dette regnes med å gi en bedre tilnærming av hvordan elementer oppfører seg under virkelige forhold, enn for eksempel tilnærmede analytiske modeller.

I vår modell er vi interessert i å kartlegge størrelsen på deformasjoner og hvor spenninger oppstår i glasselementet, og størrelsen på disse spenningene. En viktig faktor i vurdering av elementanalyser er kvaliteten på modelleringen, og om resultatene virker fornuftig.

Analysen som er utført er en lineærelastisk analyse, slik at det er materialenes elastisitetsmodul og geometri som påvirker hvordan elementet oppfører seg under belastning. Glasselementet er modellert uten innledende deformasjon og imperfeksjoner i glassets overflate. Dette vil si at glasset er modellert som «perfekt» glass, og kun er påvirket av materialets stivhet.

Nøyaktigheten i analyser i elementmetoder er også avhengig av *meshingen*. Det vil si antall noder som er grunnlag for modellen. Flere noder skal teoretisk sett gi ett mer nøyaktig resultat, men for mange eller for lite noder kan resultere i feilvurdering av resultatene. Vi har derfor gjort konvergenstudie på modellen, der vi har analysert samme modell med forskjellig antall noder. Den endelige modellen består av ca. 30 000 noder, men det var liten nevneverdig forskjell ved bruk av færre noder. Ansys versjonen vi har brukt har en maks grense på 30 000 noder. Noe vi kunne ha gjort for å få et nøyaktigere resultat selv med maksbegrensning på noder er å differensiere meshingen. Det vil si at vi lager finere mesh der vi forventer størst belastning. Terje Bokalrud ved Høgskolen i Gjøvik poengterer at glasset vi har modellert produserer ett ganske jevnt spenningsbilde, og at differensiering ikke vil gi noe nevneverdig utslag.

Grensebetingelsene for modellen er fastsatt for å simulere fritt opplagte opplagere. For å oppnå statisk likevekt og få ett resultat av analysen, er det i bunn av elementet fastlåst to

rekker med noder i x, y og z-retning. I toppen av elementet er alle noder fastlåst i x og z-retning for å låse forskyvningen horisontalt, men tillate vertikal forskyvning.

Resultatet av analysen gir noe nyttig informasjon om hvordan elementet deformeres, og hvordan spenningene fordeler seg i elementet. Som nevnt i resultatet, er spenningsbildet vist som *stress intensity*. Det vil si den summerte absoluttverdien av den maksimale hovedspenningen. Programmet gir også mulighet for å se på hovedspenningene enten i x, y eller z-retning, men det er den summerte virkningen av disse vi er interessert i å kartlegge. I og med at spenningene oppgis som absoluttverdi, skiller det ikke mellom strekk og trykkspenninger, så dette må selv vurderes ut ifra modellen.

Deformasjoner i modellen

Av analysen oppstår det en maks deformasjon på 1,6 mm på grunn av horisontale og vertikale laster. Utbøyingen av elementet er symmetrisk om midten, som viser at det er simulert fritt opplagte innfestinger i bunn og topp av modellen. Den relativt lave deformasjonen, kan virke liten i forhold til lastene som er påført elementet, men vi antar dette som sannsynlig da glass har en E-modul på $70\,000\text{N/mm}^2$, og er ett forholdsvis stivt materiale. Det oppstår også deformasjoner i glasselementets topp og bunn, ettersom elementet er sammensatt av to forskjellige materialer, som viser hvordan glassplatene forskyver seg i forhold til hverandre.

Spenninger i modellen

Spennningene som oppstår i modellene fordeler seg utover glassenes flater, og hjørner. Maksimum spenning som oppstår i modellen befinner seg i enden på glasselementet, der nodene er fastlåst i x, y og z-retning. Av modellen vurderer vi at maksimum spenning som oppstår her er på grunn av oppleggsbetingelsene, da det er relativt få noder som er fastlåst mot forflytning. I elementets topp, der elementet tillates å beveges vertikalt oppstår det også høyere spenningskonsentrasjoner, men på grunn av oppleggsbetingelsene her vil disse spenningene være mer representative i forhold til virkeligheten. Fra analysen leser vi en spenningskonsentrasjon opp mot $5,6\text{ N/mm}^2$ i glassets hjørner. Ut ifra vår vurdering av modellen, mener vi dette er trykkspenninger. Det er logisk å se at spenningsverdiene blir høyere i glassets overflate, der det er her materialet utsettes for størst strekk.

Vurdering av resultat

Resultatet av analysen viser at glass er kapabelt til å tåle store belastninger. Det kritiske er å avgjøre hvor stor kapasitet glasset reelt kan ha. I analysen er det ikke lagt inn imperfeksjoner i glasset, som vi vet vil oppstå i herdeprosessen av glass. Ubehandlet glass derimot, har en mye lavere innledende deformasjon, og denne modellen vil være mer anvendelig for denne typen glass.

Sprekker og sprekkvekst er heller ikke tatt i betraktning i analysen, men frem til det stadiet der brudd oppstår, har ikke disse mikrosprekkene særlig innvirkning på glassets mekaniske egenskaper.

Oppsummering

Av de analytiske beregningene kan man se at ved å benytte tykke glasselementer kan glassveggene belastes med store laster. Eksempelvis glassveggen med tykkelse 25/1,52/25 utsatt for en vertikallast på 67 kN, og en horisontallast på 1 kN/m². Maks strekkspenning på denne blir 8,3N/mm². Denne verdien er godt under hva som er tillatt for herdet glass både i den Amerikanske standarden og det Europeiske standardutkastet. Kritisk last holder seg også godt under dimensjonerende last, selv med høy sikkerhetsfaktor. Vertikallast og vindlast alene, gir en utbøying på ca. 4 mm. Dette er for absolutt verste lasttilfelle, så praktisk sett i bruksgrensetilstand antar vi en mindre utbøying.

Sammenlignet med elementanalysen, gir den analytiske metoden forskjellige resultater. Maksimum strekkspenning i glassoverflaten, og deformasjoner i elementanalysen er lavere enn i den analytiske modellen, som indikerer at den analytiske modellen produserer forsiktige resultater. Avviket kan til dels skyldes at modellen i *Ansys* er modellert uten innledende deformasjon, og er mer anvendelig for ubehandlet glass. Selv med ubehandlet glass oppstår det såpass lave spenninger at glasselementet skal tåle belastningen. Elementanalysen gir viktig informasjon om hvor de større spenningene oppstår. Spenningskonsentrasjoner oppstår i glasselementets hjørner, og understreker viktigheten med å utforme innfestingen slik at det ikke oppstår ytterligere spenningskonsentrasjoner.

7. Konklusjon

7.1 Hvor store påkjenninger tåler glass?

Teoretisk sett har glass stor kapasitet, men på grunn av materialets sprø egenskaper og uregelmessigheter i overflaten stemmer ikke dette med virkeligheten. Det finnes foreløpig få gode metoder for å kunne bestemme eksakt hvor god kapasitet glass har mot belastning. Modellene som er utviklet for å bestemme kapasitet på grunn av sprekker og sprekkevæst er kompliserte og ressurskrevende. Standardene gir ingen entydig svar på den eksakte kapasiteten. De oppgir tillatte verdier ved å bruke reduksjonsfaktorer basert på lastens varighet. Etter som kapasiteten er avhengig av lastvarighet, og svekkes over tid er det vanskelig å avgjøre hvor store påkjenninger glass tåler. På grunn av mikrosprekker i overflaten, er det strekkspenningene som er den kritiske faktoren. Trykkspenninger derimot tåler glass godt. Avhengig av glasstype og behandlinger varierer styrken på glass.

Det er utviklet en såkalt *Lifetime prediction modell* som tar hensyn til glassets kapasitet over dets levetid. Modellen er foreløpig veldig teoretisk og lite tilpasset praktisk bruk. Denne metoden er såpass komplisert og ressurskrevende at denne er lite anvendelig, og den er heller ikke nevnt i standardene.

Ved beregning av tillatt spenning etter den amerikanske standarden, gir en 3-sekunders last en tillatt spenning på $16,1 \text{ N/mm}^2$ for ubehandlet glass. Hvilket vil si at den vil være ytterligere redusert for permanente laster. Det europeiske standartutkastet, og den amerikanske standarden oppgir noenlunde like verdier på behandlet glass. Den europeiske oppgir en maks tillatt spenning på $32,1 \text{ N/mm}^2$ og den amerikanske oppgir $28,9 \text{ N/mm}^2$ for herdet glass under permanent laster.

Den eksakte verdien for hvor store påkjenninger glass tåler er derfor vanskelig å bestemme, men ved hjelp av forsiktige anslag er det mulig å fastsette en tillatt kapasitet.

7.2 Hvilken glasstype bør brukes i byggets bærende glasskonstruksjon?

Glasstypen som brukes i en bærende konstruksjon må velges ut ifra sine funksjonskrav. Brukes glass som bærende element må det ha kapasitet til å tåle større belastninger over tid. Herdet glass større lastkapasitet og større motstandsdyktighet mot støt. Personer vil oppholde seg i nærheten av glasset, og det må stilles krav til sikkerhetsglass. Herdet glass har ett bruddmønster som klassifiserer det som sikkerhetsglass, men for tykke glass kan det ved brudd oppstå større blokker og forårsake personskaide.

Glasstypen i byggets bærende konstruksjon bør derfor være laminert herdet glass.

7.3 Hvilke risikoer oppstår ved bruk av bærende glass i bygget, og hvilke forhåndsregler bør gjøres for å tillate risikoene?

På grunn av materialeegenskapene til glass er det en viss risiko forbundet med å bruke glass i en bærende konstruksjon. Brudd uten forvarsel er kritisk da elementet plutselig mister all sin bæreevne. H-innfestningen i løsningen med kontinuerlig fasade blir derfor laget slik at om et glass ryker vil glasset over fortsatt bli holdt fast av innfestningen. I løsningen med glass mellom dekkene, skal glassene dimensjoneres slik at om et glass ryker, klarer de gjenværende glassene å ta opp de ekstra lastene.

Glass skiller seg fra mange tradisjonelle materialer ved at bæreevnen til glass svekkes over tid. Dette utgjør en risiko da det er vanskelig å forutsi glassets levetid. Tiltak for å hindre dette er å skifte ut glasset etter en viss periode.

Det vil også være risiko med tanke på vedlikeholdet av glasset i konstruksjonen. Det som kan skje er at neoprensiktet eldes, og dermed blir mørkent og mister sin evne til å fordele spenningene i glasset. Jevnlig inspeksjon og vedlikehold er derfor nødvendig.

Ved transport og montering vil man kunne risikere å påføre glasselementene ytre skader som kan være vanskelig å se, men fortsatt svekke bæreevnen. Dermed må man ta ekstra hensyn ved transport og montering.

Det vil også være risiko for ytre påkjenninger. For eksempel kjøretøy eller andre objekter som kan påføre uforutsette skader. I dette tilfelle anser vi denne sannsynligheten som liten siden det er hage rundt glassfasaden. I dette tilfelle er det ikke nødvendig å gjøre ekstra tiltak.

7.4 Hvordan dimensjonere bærende glass?

Det finnes ingen standardiserte metoder for å dimensjonere bærende bygningselementer av glass. Ettersom materialet oppfører seg lineærelastisk under belastning kan glasselementene i utgangspunktet dimensjoneres etter en elastisk metode. Problemer med denne metoden er å fastsette en tillatt kapasitet for det gitte lasttilfellet, og kartlegge kritiske spenninger i glasselementet. Konsentrerte spenninger må unngås, da dette kan føre til brudd, og hvor disse oppstår og størrelsen på disse er vanskelig å fastslå med en analytisk metode.

Dimensjoneringsmetoden må utføres grundig. Anslag kan gjøres ved analytiske metoder, men resultatet her må etterprøves ytterligere. Enten ved hjelp av numeriske metoder, eller fysisk testing. Elementanalyse gir ett bedre bilde av hvor spenninger i glasset oppstår, og størrelsen på disse. Fysiske tester viser hvordan glasset oppfører seg i den virkelige verden.

7.5 Hvordan løser vi innfestning av glasselementene i bygget?

Innfesting av glasselementer er kritisk for å unngå konsentrerte spenninger og ytterligere belastning på glasset. Innfestingsdetaljene må utformes slik at glasset ikke kommer i direkte kontakt med andre harde flater, slik at man unngår konsentrerte spenninger.

Det eksisterer ingen standardløsning for innfestning av glasselementene i vårt bygg. Prinsippene for innfestning for de to lasttilfellene er drøftet i to forslag, men en detaljert løsning trenger ytterligere forskning.

7.6 Er det mulig å lage byggets glassfasade bærende?

Å utnytte glass som bærende element er mulig, men dette krever grundig prosjektering og stor kompetanse. Under våre forutsetninger, viser de analytiske beregningene og elementanalysen at glassveggene kan tåle belastningen. "Glasshuset" viser at det er mulig å benytte glass som bærende bygningselementer.

For bygget har vi vurdert to alternativer der glassfasaden opptrer som bærende element. Vi har fokusert på løsningen der glasset blir utsatt for størst belastning, og resultatet viser at glasset kan tåle belastningen. Vi antar da at løsningen der glasset utsettes for mindre belastning også kan utformes som en funksjonell bærende glassfasade.

Selv om det er muligheter for å benytte glassfasaden som bærende bygningsselement, er dette ut fra vår konkludering risikabelt. Glasstyrken svekkes over tid, og etter som dette blir en permanent løsning må det kunne garanteres at konstruksjonen skal være intakt i hele byggets levetid. Fastsettelse av glassets kapasitet over dets levetid er vanskelig å avgjøre. Hvorvidt det er forsvarlig å benytte glassfasaden som bærende element i dette bygget tør vi ikke garantere, før alle usikkerhetsmomentene nevnt i denne oppgaven rundt bruk av bærende glass er grundigere underøkt og forsket på.

Når det gjelder brannmotstand, isoleringsevne og andre tekniske krav trengs det mer forskning og videreutvikling av løsninger på området. Økonomi er helt sett bort ifra i denne oppgaven, men ut ifra vår vurdering vil realisering av ett slikt prosjekt være kostbart. Det krever store ressurser i prosjekteringsfasen, og utvikling av nye løsninger som vil dra opp kostnadene.

Hvordan kan glass anvendes som bærende bygningsdel?

Oppgaven viser at glass kan benyttes som bærende bygningsdel hvis det tas visse forhåndsregler. Det krever stor forkunnskap og grundig prosjektering. Materialelegenskapene til glass gjør at det er forbundet en større risiko ved lenger belastning, enn ved bruk av tradisjonelle bygningsmaterialer. Teoretisk sett er glass et ypperlig bygningsmateriale, men dessverre stemmer ikke dette med virkeligheten.

Foreløpig er det ikke god nok dokumentasjon på kapasiteten til permanent belastet glass, til å kunne si med sikkerhet holdbarheten. For hensiktsmessig bruk av bærende glasselementer trengs det mer forskning og standardiserte metoder, slik at prosjekteringen ikke er så ressurskrevende og risikofyllt.

Hvordan glass kan anvendes som bærende bygningsdel vil være ved å:

- Fastsette glassets nøyaktige kapasitet.
- Velge riktig glasstype til riktig funksjon.
- Vurdere risikoene som bærende glass innebærer, og gjøre nødvendige tiltak
- Være påpasselige med detaljering/Innfesting
- Fastsette standardiserte prosjekteringsmetoder.

Oppgavens mål var å vise hvordan glass kan brukes som bærende bygningsselement ved å fokusere på ett spesielt tilfelle. Glass er ettertraktet av arkitekter, da dette materialet brukes for å sikre utsyn og naturlig lysinnslipp. Per i dag utnyttes ikke glass som bærende element i tradisjonelle byggemetoder. Oppgaven og forskning viser at dette kan forandres, men det krever mer forskning og utvikling. Med grunnlag i oppgaven ville ikke vi ha brukt en løsning med bærende glasselementer i bygget, fordi det er for stor usikkerhet forbundet med det, men grunnlaget ligger der for å bruke glass i videre sammenhenger i fremtiden.

8. Litteraturliste

Amadio, C. og C. Bedon (2012) **Buckling Verification of Laminated Glass Elements in Compression**: Department of Civil Engineering and Architecture, University of Trieste.

ASTM (2012) ASTM E1300 - Standard Practice for Determining Load Resistance of Glass in Buildings. I.

Byggforsk, S. (1993) Bygningsglass. I, s. A 571.951.

DuBois, M. (2007) *Glass bearing walls – a case study*. [online] (19.04).

Haldimann, M., A. Luible og M. Overend (2008) *Structural use of glass*. Zürich, Switzerland: International Association for Bridge and Structural Engineering.

IstructE (1999) *Structural use of glass in buildings*. London: The Institution of Structural Engineers.

MOCIBOB, D. (2008) Glass Panel under Shear Loading - Use of Glass Envelopes in Building Stabilization. I.

PANKHARDT, K. og G. L. BALÁZS (2010) LOAD BEARING GLASSES. I.

Pilkington (2012) *Pilkington Planar Brochure*.

PilkingtonNorge *Glassfakta 2012*. 5 utg.: Pilkington Norge as.

Standardisation, E. C. f. (2009) *prEN 13474-3 - Glass in building - Determination of the strength of glass panes*.

Vollen, Ø. (2010) *Mekanikk for ingeniører: statikk og fasthetslære*. Bekkestua: NKI forl.

Wurm, J. (2007) *Glass structures : design and construction of self-supporting skins*. Basel: Boston : Birkhäuser.

Vedlegg A: Snølast

Snølast på tak- I henhold til NS-EN 1991-1-3

Over glassfasaden er det et glassvindu som spenner 2,5 meter med en takvinkel på 30°.

Bygget ligger 145 meter over havet på bakkeplan, mens taket ligger 152 meter over havet.

Fra NS-EN 1991-1-3, tabell NA.4.1(901) er snølasten i dette Oslo-området 3,5 kN/m².

Det finnes en termisk reduksjonsfaktor for snølast på takvinduer p.g.a at snøen sklir av eller smelter i henhold til NS-EN 1991-1-3 pkt. NA.5.2(8)

Denne faktoren er tillatt å bruke så lenge glasset har en dårligere isolasjonsevne enn 1,0 W/m²K. Vi antar en bedre isolasjonsevne i glasset og ser bort fra denne reduksjonsfaktoren.

Tabell 15 – Snølast på tak

Data	Kar. snølast	Formfaktor	Sikkerhetsfaktor - Nyttelast
H _{m.o.h} = 145m Tak= 30	S _k = 3,5 kN/m ²	μ = 0,8 <i>(Tabell 5.2)</i>	1,5

Dimensjonerende last per kvadratmeter:

$$S_d = 0,8 \times 1,5 \times 3,5 \text{ kN/m}^2 = 4,2 \text{ kN/m}^2$$

Horisontalprojekson:

$$2500 \times \cos 30^\circ = 2165 \text{ mm}$$

Last som går ned i opplager (Glassfasade):

$$\text{Opplager} = 4,2 \text{ kN/m}^2 \times 2,165 \text{ m} = 4,55 \text{ kN/m}$$

VEDLEGG B: Vindlast

Vindlast på glassfasade – i henhold til NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009

Vindlast er beregnet for ett glasselement.

Mønehøyde: 8,8 m

Størrelse glasselement: 1,1 m x 2,7 m

Vindtrykk er beregnet for både trykk (D-sone) og sug (E-sone)

Tabell 16 - Vindlast

Data	Kommentar
Referansevind, $V_{b,0}$ - Oslo: 22 m/s	<i>50-års-vind</i>
Terrengruhetskategori: 3	<i>Sammenhengende småhusbebyggelse</i>
$z = 8,8$ m	<i>Mønehøyde</i>
$K_w = 1,08$	<i>Vindlastfaktor</i>
Areal glasselement: $2,7$ m x $1,1$ m = $2,97$ m ²	<i>Lastareale</i>

For utvendig vindlast er c_{pe} til dels avhengig av størrelsen på det belastede arealet. Lokalt kan det bli økt belastning på mindre flater, enn det som kan bli gjennomsnittsbetlastning på større flater. Det er derfor beregnet vindlast på ett glasselement for å finne største belastning som kan forekomme.

Vindhastighetstrykket:

$$q_p(8,8m) = k_w \times V_{b,0}^2 = 1,08 \times 22^2 = 523 \text{ N/m}^2$$

Sone D:

$$\frac{h}{d} = \frac{8,8}{8,2} = 1,07 \approx 1,0$$

h/d er forholdet mellom byggets høyde og bredde. Ved utregning gir dette et resultat på tilnærmet lik 1,0 som brukes videre i *tabell 7.1*.

Fra tabell 7.1:

$c_{pe,10} = 0,8$	$c_{pe,1} = 1,0$
-------------------	------------------

$$\log_{10} A_{glass} = \log_{10} x 2,97 = 0,473$$

$$c_{pe} = 1,0 - (1,0 - 0,8) x 0,473 = 0,905$$

For innvendig vindlast brukes ofte det ugunstigste av $c_{pi} = 0,2$ (overtrykk) og $c_{pi} = -0,3$ (undertrykk). I sone D blir det ugunstigste undertrykk på $c_{pi} = -0,3$. Denne faktoren legges til med faktoren $c_{pe} = 0,905$ ovenfor.

$$c_{pe} + c_{pi} = 0,905 + 0,3 = 1,205$$

$$q_d^{vind} = 523 \text{ N/m}^2 x 1,205 x (1,5 x 0,9) x 1,1 = 936 \text{ N/m}^2$$

Sone D får en q_d^{vind} på **936 N/m²**.

Sone E:

Fra tabell 7.1

$c_{pe,10} = -0,5$	$c_{pe,1} = -0,5$
--------------------	-------------------

$$\log_{10} A_{glass} = \log_{10} x 2,97 = 0,473$$

$$c_{pe} = -0,5 - [-0,5 - (-0,5)] x 0,473 = -0,973$$

I sone E blir den ugunstigste $c_{pi} = 0,2$ (overtrykk).

$$c_{pe} + c_{pi} = 0,973 + 0,2 = 1,173$$

$$q_d^{vind} = 523 \text{ N/m}^2 = 1,173 \times (1,5 \times 0,9) \times 1,1 = 911 \text{ N/m}^2$$

Sone E får en q_d^{vind} på 911 N/m^2 .

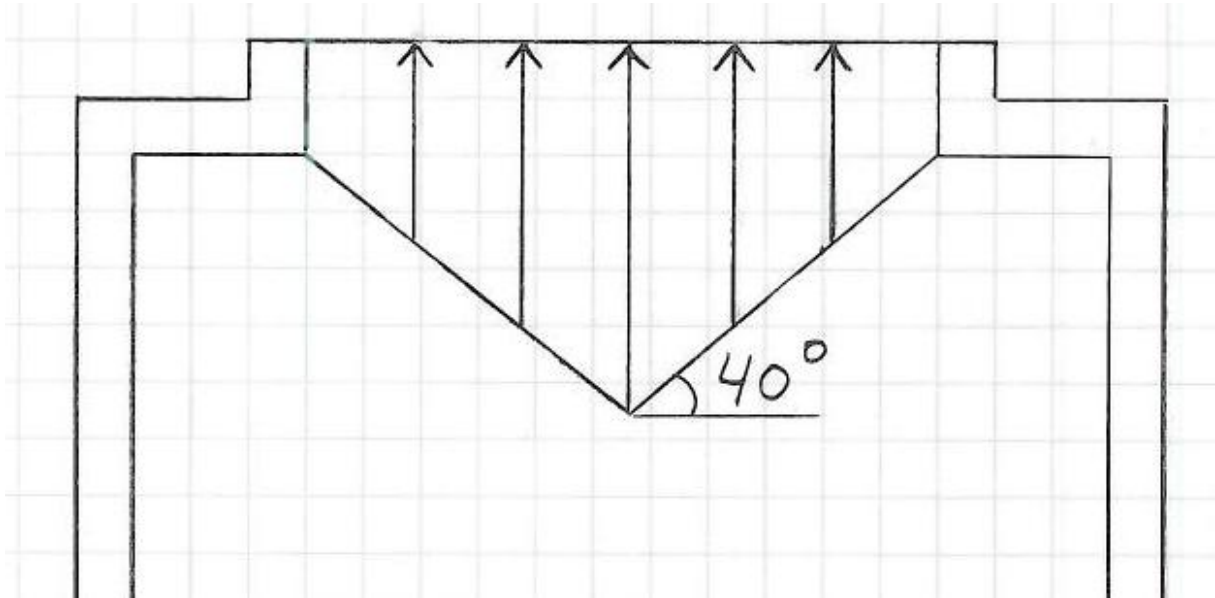
Det verste tilfellet oppstår i sone D når vindlastene jobber mot glasset, samtidig som det oppstår ett undertrykk innvendig. Den dimensjonerende lasten blir **936 N/m²**.

Vindlast på tak

Det er kun en liten del av taket som skal være av glass. Siden denne glassflaten er så liten i forhold til resten av takflaten, har vi i samråd med veileder Harald Falsen bestemt oss for å neglisjere vindlasten på taket.

VEDLEGG C: Lastbilde

I tilfellet der etasjeskillere består av flatdekker av armert betong og glassfasaden en del av den bærende veggkonstruksjonen, vil glasset ta opp egenvekt og nyttelaster fra betongdekke. I samråd med veileder Harald Fallsen, er det fastsatt ett lastbilde der glasset opptar ett lastareal lik figur under:



Figur 1- Lastareal fra flatdekke

Karakteristisk egentyngde:

Amert betong, $\gamma_k = 25 \text{ kN/m}^3$

Glass, $\gamma_k = 25 \text{ kN/m}^3$

3. Etasje

Snølast: $3,5 \text{ kN/m}^2$

Takvindu: $1,5 \text{ kN/m}$

Takvinkel	30°
Størrelse takvindu	1125mm x 2500mm
Horisontalprojeksjon	2165mm
Karakteristisk snølast (Inkl. formfaktor)	$2,8 \text{ kN/m}^2$

Antar en karakteristisk egenlast av takvindu:

$$q_{\text{Takvindu}}^{E.V} = 25 \text{ kN/m}^3 \times \frac{2,5}{2} \text{ m} \times 0,02 \text{ m} = 0,63 \text{ kN/m}$$

$$q_{\text{snø}} = 2,8 \text{ kN/m}^2 \times \frac{2.165}{2} \text{ m} = 3,03 \text{ kN/m}$$

Antar en karakteristisk egenvekt glassvegg:

$$h = 1000 \text{ mm}$$

$$t = 30 \text{ mm}$$

$$q_{\text{Glassvegg}}^{E.V} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 1,0 \text{ m} \times 0,03 \text{ m} = 0,75 \text{ kN/m}$$

Tabell 17 – Dimensjonerende last, glassvegg 3.etg

Last	Karakteristisk [kN/m]	Sikkerhetsfaktor	Dimensjonerende [kN/m]
Snølast	3,03	1,5	4,55
Egenvekt, takvindu	0,63	1,2	0,76
Egenvekt, glassvegg 3.etg	0,74	1,2	0,89
		SUM:	6,20 kN/m

2. Etasje

Antar 250mm betongdekke:

$$q_{\text{Betongdekke}}^{E.V} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,25 \text{ m} = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{N.L} = 2,0 \text{ kN/m}^2 \text{ -nyttelast for bolig, hentet fra tabell NA.6.2 i NS-EN 1991-1-1}$$

Antatt lastareal fra betongdekke, "verste tilfellet": $2,2 \text{ m}^2/\text{m}$

$$q_{\text{Betongdekke}}^{\text{Maks.}} = (6,25 \text{ kN/m}^2 \times 2,2 \text{ m}^2/\text{m}) = 13,75 \text{ kN/m}$$

$$q_{N.L}^{\text{Maks.}} = 2,0 \text{ kN/m}^2 \times 2,2 \text{ m}^2/\text{m} = 4,4 \text{ kN/m}$$

Antatt egenvekt glassvegg:

$h = 2450 \text{ mm}$

$b = 1125 \text{ mm}$

$t = 50 \text{ mm}$

$$q_{Glassvegg}^{E.V} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 2,45\text{m} \times 0,05\text{m} = 3,06 \text{ kN/m}$$

Tabell 18 – Dimensjonerende last glassvegg 2.etg

Last	Karakteristisk [kN/m]	Sikkerhetsfaktor	Dimensjonerende [kN/m]
Snølast	3,03	1,5	4,55
Egenvekt, takvindu	0,63	1,2	0,76
Egenvekt, glassvegg 3.etg	0,74	1,2	0,89
Egenvekt, dekke 3.etg	13,75	1,2	16,50
Nyttelast, 3.etg	4,40	1,5	6,60
Egenvekt, glassvegg 2.etg	3,06	1,2	3,67
		SUM:	32,97 kN/m

1. Etasje

Antar 250 med mer betongdekke:

$$q_{\text{Betongdekke}}^{E.V} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 0,25\text{m} = 6,25 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{N.L} = 2,0 \text{ kN/m}^2 \text{ -nyttelast for bolig, hentet fra tabell NA.6.2 i NS-EN 1991-1-1}$$

Antatt egenvekt glassvegg:

$$h = 2450 \text{ mm}$$

$$b = 1125 \text{ mm}$$

$$t = 50 \text{ mm}$$

$$q_{\text{Glassvegg}}^{E.V} = 25 \text{ kN/m}^3 \times 2,45\text{m} \times 0,05\text{m} = 3,06 \text{ kN/m}$$

Tabell 19 – Dimensjonerende laster glassvegg 1.etg

Last	Karakteristisk [kN/m]	Sikkerhetsfaktor	Dimensjonerende [kN/m]
Snølast	3,03	1,5	4,55
Egenvekt, takvindu	0,63	1,2	0,76
Egenvekt, glassvegg 3.etg	0,74	1,2	0,89
Egenvekt, dekke 3.etg	13,75	1,2	16,50
Nyttelast, 3.etg	4,40	1,5	6,60
Egenvekt, glassvegg 2.etg	3,06	1,2	3,67
Egenvekt, dekke 2.etg	13,75	1,2	16,50
Nyttelast, 2.etg	4,40	1,5	6,60
Egenvekt, glassvegg 1.etg	3,06	1,2	3,67
		SUM:	59,74 kN/m

VEDLEGG D: BEREGNINGER FRA GLASSTANDARDS

ASTM E1300

Maks tillatt overflatespenning

$$P_b = 0,008$$

$$k = 2,86 \times 10^{-53} N^{-7} m^{12}$$

$$d = 3 \text{ sekunder}$$

$$A = 1 m^2$$

$$n = 16$$

$$\sigma_{allowable} = \left(\frac{0,008}{[2,86 \times 10^{-53} (3/3)^{7/16} \times 1]} \right)^{1/7} = 16,1 N/mm^2 \quad (1)$$

prEN 13474-3

Tillatt spenning i behandlet glass

$$f_{g,k} = 45 N/mm^2$$

$$\gamma_{M,A} = 1,8 \text{ for bruddgrensetilstanden}$$

$$\gamma_{V,A} = 1,2 \text{ for bruddgrensetilstanden}$$

$$k_{s,p} = 1,0 \text{ for float- og emaljert glass}$$

$$k_v = 1,0 \text{ produksjonsmetode}$$

$$k_{mod}^{Sn\o} = 0,44$$

$$k_{mod}^{Vind} = 0,74$$

$$k_{mod}^{Egenlast} = 0,29$$

Termisk herdet sikkerhetsglass

$$f_{b,k} = 120 N/mm^2$$

$$f_{g,d}^{Sn\o} = \frac{0,44 \times 1,0 \times 45}{1,8} + \frac{1,0(120 - 45)}{1,2} = 73,5 N/mm^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Vind} = \frac{0,74 \times 1,0 \times 45}{1,8} + \frac{1,0(120 - 45)}{1,2} = 81,0 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Sn\emptyset} = \frac{0,44 \times 1,0 \times 45}{1,8} + \frac{1,0(120 - 45)}{1,2} = 73,5 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Egenvekt} = \frac{0,29 \times 1,0 \times 45}{1,8} + \frac{1,0(120 - 45)}{1,2} = 69,8 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Varmeherdet glass

$$f_{b,k} = 70 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{g,d}^{Sn\emptyset} = \frac{0,44 \times 1,0 \times 70}{1,8} + \frac{1,0(70 - 45)}{1,2} = 37,9 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Vind} = \frac{0,74 \times 1,0 \times 70}{1,8} + \frac{1,0(70 - 45)}{1,2} = 49,6 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Egenvekt} = \frac{0,29 \times 1,0 \times 70}{1,8} + \frac{1,0(70 - 45)}{1,2} = 32,1 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

Kjemisk herdet glass

$$f_{b,k} = 150 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{g,d}^{Sn\emptyset} = \frac{0,44 \times 1,0 \times 150}{1,8} + \frac{1,0(150 - 45)}{1,2} = 124,2 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Vind} = \frac{0,74 \times 1,0 \times 150}{1,8} + \frac{1,0(150 - 45)}{1,2} = 149,2 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

$$f_{g,d}^{Egenvekt} = \frac{0,29 \times 1,0 \times 150}{1,8} + \frac{1,0(150 - 45)}{1,2} = 111,7 \text{ N/mm}^2 \quad (2)$$

VEDLEGG E: Beregninger av glassvegger

Generelle formler brukt i beregninger, hentet fra Haugans formler og tabeller:

$$w = \frac{5ql^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (18)$$

$$W_y = \frac{b \times h^2}{6} \quad (19)$$

GLASSVEGG I 3.ETG

Prøv 5/1,52/5

$$b = 1125\text{mm}$$

$$h = L_0 = 1000\text{mm}$$

$$N_{Ed} = 6,20 \times 1,125 = 6,98 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,0 \text{ kN/m}$$

Effektiv tykkelse, laminert glass for beregning av Utbøying på grunn av vind:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{(1 - 0,05)(5^3 + 5^3) + 0,05(5 + 5)^3} = 6,6 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\varpi = 0,05 \text{ for langtidslast}$$

Utbøying på grunn av vindlast:

$$w = \frac{5qL_0^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh_{ef;w}^3}{12} = \frac{1125 \times 6,6^3}{12} = 26\,953 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_{vind} = \frac{5 \times 1,0 \times 1000^4}{384 \times 70\,000 \times 26\,953} = 6,9 \text{ mm} \quad (17)$$

Innledende deformasjon for herdet glass, w_0 :

$$w_0 = \frac{L_0}{300} = \frac{1000}{300} = 3,33mm$$

Lagdelt stivhet:

$$EJ_{abs} = \frac{70\,000 \times 1125}{12} (5^3 + 5^3) = 1,64063 \times 10^9 \text{ Nmm}^2 \quad (10)$$

Monolittisk stivhet:

$$\begin{aligned} EJ_{full} &= 1,64063 \times 10^9 + 70\,000 \times 1125 \left[5 \left(\frac{5}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 + 5 \left(\frac{5}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 \right] \\ &= 10,00987 \times 10^9 \text{ Nmm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} = \frac{0,052 \times 1125}{1,52} = 38,4868 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

$$EA^* = \frac{E b t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{70\,000 \times 1125 \times 5 \times 5}{5 + 5} = 1968,75 \times 10^5 \text{ N} \quad (14)$$

$$\alpha^2 = \frac{38,4868}{1968,75 \times 10^5} \frac{10,00987 \times 10^9}{1,64063 \times 10^9} = 1,19272 \times 10^{-6} \text{ mm}^{-2} \quad (12)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi/2)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - N L_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - N L_0^2)} \quad (11)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = 1,95mm$$

$$w_{max} = 6,9 + 3,33 + 1,95 = 12,18 \approx 12,2 \text{ mm}$$

Maks strekkspenning:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} = -\frac{\pi^2}{1000^2} \times 12,2 = 1,20409 \times 10^{-4} mm^{-1} \quad (9)$$

$$d = \frac{5}{2} + \frac{5}{2} + 1,52 = 6,52 mm$$

$$F = \frac{(6980 \times 12,2 + 1,0 \times 1000^2) + (-1,20409 \times 10^{-4} \times 1,64063 \times 10^9)}{6,52} \quad (8)$$

$$= 136\,136\, N$$

$$W_y = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{1125 \times 11,52^2}{6} = 24\,883\, mm^3 \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{6980}{(1125 \times 11,52)} + \frac{6980 \times 12,2}{24883} + \frac{1,0 \times 1000^2}{8 \times 24883} \frac{136\,136}{(1125 \times 5)} \quad (7)$$

$$= 217,4\, N/mm^2$$

Kritisk last:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{abs} E J_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 E J_{abs} L_0^2 + E J_{full} \pi^2} \right) \quad (16)$$

$$= \frac{\pi^2 1,64063 \times 10^9 \times 10,00987 \times 10^9}{1000^2} \left(\frac{1,19272 \times 10^{-6} \times 1000^2 + \pi^2}{1,19272 \times 10^{-6} \times 1,64063 \times 10^9 \times 1000^2 + 10,00987 \times 10^9 \pi^2} \right)$$

$$= 17\,797\, N = 17,8\, kN$$

Prøvn 7/1,52/7

$$b = 1125 \text{ mm}$$

$$h = L_0 = 1000 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = 6,20 \times 1,125 = 6,98 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,0 \text{ kN/m}$$

Effektiv tykkelse, laminert glass for beregning av Utbøying på grunn av vind:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{(1 - 0,05)(7^3 + 7^3) + 0,05(7 + 7)^3} = 9,24 \text{ mm} \quad (3)$$

$\varpi = 0,05$ for langtidslast

Utbøying på grunn av vindlast:

$$w = \frac{5qL_0^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh_{ef;w}^3}{12} = \frac{1125 \times 9,24^3}{12} = 73\,958 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_{vind} = \frac{5 \times 1,0 \times 1000^4}{384 \times 70\,000 \times 73\,958} = 2,52 \approx 2,5 \text{ mm} \quad (17)$$

Innledende deformasjon for herdet glass, w_0 :

$$w_0 = \frac{L_0}{300} = \frac{1000}{300} = 3,33 \text{ mm}$$

Lagdelt stivhet:

$$EJ_{abs} = \frac{70\,000 \times 1125}{12} (7^3 + 7^3) = 4,50188 \times 10^9 \text{ Nmm}^2 \quad (10)$$

Monolittisk stivhet:

$$\begin{aligned} EJ_{full} &= 4,50188 \times 10^9 + 70\,000 \times 1125 \left[7 \left(\frac{7}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 + 7 \left(\frac{7}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 \right] \\ &= 24,50961 \times 10^9 \text{ Nmm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} = \frac{0,052 \times 1125}{1,52} = 38,4868 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

$$EA^* = \frac{E b t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{70\,000 \times 1125 \times 7 \times 7}{7 + 7} = 27562,5 \times 10^4 \text{ N} \quad (14)$$

$$\alpha^2 = \frac{38,4868}{27562,5 \times 10^4} \frac{24,50961 \times 10^9}{4,50188 \times 10^9} = 7,60214 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad (12)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi/2)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - NL_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - NL_0^2)} \quad (11)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = 0,58 \approx 0,6 \text{ mm}$$

$$w_{max} = 2,5 + 3,33 + 0,6 = 6,4 \text{ mm}$$

Maks strekkspenning:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} = -\frac{\pi^2}{1000^2} \times 6,4 = -6,31655 \times 10^{-5} mm^{-1} \quad (9)$$

$$d = \frac{7}{2} + \frac{7}{2} + 1,52 = 8,52 mm$$

$$F = \frac{(6980 \times 6,4 + 1,0 \times 1000^2) + (-6,31655 \times 10^{-5} \times 4,50188 \times 10^9)}{8,52} \quad (8)$$

$$= 89\,238\, N$$

$$W_y = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{1125 \times 15,52^2}{6} = 45\,163\, mm^3 \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{6980}{(1125 \times 15,52)} + \frac{6980 \times 6,4}{45\,163} + \frac{1,0 \times 1000^2}{8 \times 45\,163} \frac{89\,238}{(1125 \times 7)} \quad (7)$$

$$= 32,75\, N/mm^2$$

Kritisk last:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{abs} E J_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 E J_{abs} L_0^2 + E J_{full} \pi^2} \right) \quad (16)$$

$$= \frac{\pi^2 4,50188 \times 10^9 \times 24,50961 \times 10^9}{1000^2} \left(\frac{7,60214 \times 10^{-7} \times 1000^2 + \pi^2}{7,60214 \times 10^{-7} \times 4,50188 \times 10^9 \times 1000^2 + 24,50961 \times 10^9 \pi^2} \right)$$

$$= 47\,187\, N = 47,19\, kN$$

Prøv 10/1,52/10

$$b = 1125\text{mm}$$

$$h = L_0 = 1000\text{mm}$$

$$N_{Ed} = 6,20 \times 1,125 = 6,98 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,0 \text{ kN/m}$$

Effektiv tykkelse, laminert glass for beregning av Utbøying på grunn av vind:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{(1 - 0,05)(10^3 + 10^3) + 0,05(10 + 10)^3} = 13,20 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\varpi = 0,05 \text{ for langtidslast}$$

Utbøying på grunn av vindlast:

$$w = \frac{5qL_0^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh_{ef;w}^3}{12} = \frac{1125 \times 13,20^3}{12} = 215\,622 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_{vind} = \frac{5 \times 1,0 \times 1000^4}{384 \times 70\,000 \times 215\,622} = 0,86 \approx 0,9 \text{ mm} \quad (17)$$

Innledende deformasjon for herdet glass, w_0 :

$$w_0 = \frac{L_0}{300} = \frac{1000}{300} = 3,33\text{mm}$$

Lagdelt stivhet:

$$EJ_{abs} = \frac{70\,000 \times 1125}{12} (10^3 + 10^3) = 1,3125 \times 10^{10} \text{ Nmm}^2 \quad (10)$$

Monolittisk stivhet:

$$\begin{aligned} EJ_{full} &= 1,3125 \times 10^{10} + 70\,000 \times 1125 \left[10 \left(\frac{10}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 + 10 \left(\frac{10}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 \right] \\ &= 6,53797 \times 10^{10} \text{ Nmm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} = \frac{0,052 \times 1125}{1,52} = 38,4868 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

$$EA^* = \frac{E b t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{70\,000 \times 1125 \times 10 \times 10}{10 + 10} = 39375 \times 10^4 \text{ N} \quad (14)$$

$$\alpha^2 = \frac{38,4868}{39375 \times 10^4} \frac{6,53797 \times 10^{10}}{1,3125 \times 10^{10}} = 4,86894 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad (12)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi/2)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - NL_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - NL_0^2)} \quad (11)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = 0,18 \approx 0,2 \text{ mm}$$

$$w_{max} = 0,9 + 3,33 + 0,2 = 4,4 \text{ mm}$$

Maks strekkspenning:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} = -\frac{\pi^2}{1000^2} \times 4,4 = -4,34263 \times 10^{-5} mm^{-1} \quad (9)$$

$$d = \frac{10}{2} + \frac{10}{2} + 1,52 = 11,52 mm$$

$$F = \frac{(6980 \times 4,4 + 1,0 \times 1000^2) + (-4,34263 \times 10^{-5} \times 1,3125 \times 10^{10})}{11,52} \quad (8)$$

$$= 39\,995\, N$$

$$W_y = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{1125 \times 21,52^2}{6} = 86\,833\, mm^3 \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{6980}{(1125 \times 21,52)} + \frac{6980 \times 4,4}{86\,833} + \frac{1,0 \times 1000^2}{8 \times 86\,833} \frac{39\,995}{(1125 \times 10)} \quad (7)$$

$$= 5,76\, N/mm^2$$

Kritisk last:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{abs} E J_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 E J_{abs} L_0^2 + E J_{full} \pi^2} \right) \quad (16)$$

$$= \frac{\pi^2 \times 1,3125 \times 10^{10} \times 6,53797 \times 10^{10}}{1000^2} \left(\frac{4,86894 \times 10^{-7} \times 1000^2 + \pi^2}{4,86894 \times 10^{-7} \times 1,3125 \times 10^{10} \times 1000^2 + 6,53797 \times 10^{10} \pi^2} \right)$$

$$= 134\,596\, N = 134,6\, kN$$

GLASSVEGG 1. OG 2. ETASJE

Prøv 15/1,52/15

$$b = 1125 \text{ mm}$$

$$h = L_0 = 2450 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = 59,74 \times 1,125 = 67,21 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,0 \text{ kN/m}$$

Effektiv tykkelse, laminert glass for beregning av Utbøying på grunn av vind:

$$h_{ef,w} = \sqrt[3]{(1 - 0,05)(15^3 + 15^3) + 0,05(15 + 15)^3} = 19,80 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\varpi = 0,05 \text{ for langtidslast}$$

Utbøying på grunn av vindlast:

$$w = \frac{5qL_0^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh_{ef,w}^3}{12} = \frac{1125 \times 19,8^3}{12} = 727\,724 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_{vind} = \frac{5 \times 1,0 \times 2450^4}{384 \times 70\,000 \times 727\,724} = 9,21 \approx 9,2 \text{ mm} \quad (17)$$

Innledende deformasjon for herdet glass, w_0 :

$$w_0 = \frac{L_0}{300} = \frac{2450}{300} = 8,2 \text{ mm}$$

Lagdelt stivhet:

$$EJ_{abs} = \frac{70\,000 \times 1125}{12} (15^3 + 15^3) = 4,42969 \times 10^{10} \text{ Nmm}^2 \quad (10)$$

Ekvivalent aksialstivhet:

$$\begin{aligned} EJ_{full} &= 4,42969 \times 10^{10} + 70\,000 \times 1125 \left[15 \left(\frac{15}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 + 15 \left(\frac{15}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 \right] \\ &= 20,54846 \times 10^{10} \text{ Nmm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} = \frac{0,052 \times 1125}{1,52} = 38,4868 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

$$EA^* = \frac{E b t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{70\,000 \times 1125 \times 10 \times 10}{10 + 10} = 39375 \times 10^4 \text{ N} \quad (14)$$

$$\alpha^2 = \frac{38,4868}{59062,5 \times 10^4} \frac{20,54846 \times 10^{10}}{4,42969 \times 10^{10}} = 3,02278 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad (12)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi/2)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - NL_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - NL_0^2)} \quad (11)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = 35,04 \approx 35,0 \text{ mm}$$

$$w_{max} = 9,2 + 8,2 + 35,0 = 52,4 \text{ mm}$$

Maks strekkspenning:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} = -\frac{\pi^2}{2450^2} \times 52,4 = -8,61586 \times 10^{-5} mm^{-1} \quad (9)$$

$$d = \frac{15}{2} + \frac{15}{2} + 1,52 = 16,52 mm$$

$$F = \frac{(67\,210 \times 52,4 + 1,0 \times 2450^2) + (-8,61586 \times 10^{-5} \times 4,42969 \times 10^{10})}{16,52} \quad (8)$$

$$= 345\,505\, N$$

$$W_y = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{1125 \times 31,52^2}{6} = 186\,283\, mm^3 \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{67\,210}{(1125 \times 31,52)} + \frac{67\,210 \times 52,4}{186\,283} + \frac{1,0 \times 2450^2}{8 \times 186\,283} \frac{345\,505}{(1125 \times 15)} \quad (7)$$

$$= 103,27\, N/mm^2$$

Kritisk last:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{abs} E J_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 E J_{abs} L_0^2 + E J_{full} \pi^2} \right) \quad (16)$$

$$= \frac{\pi^2 4,42969 \times 10^{10} \times 20,54846 \times 10^{10}}{2450^2} \left(\frac{3,02278 \times 10^{-7} \times 2450^2 + \pi^2}{3,02278 \times 10^{-7} \times 4,42969 \times 10^{10} \times 2450^2 + 20,54846 \times 10^{10} \pi^2} \right)$$

$$= 82\,938\, N = 82,9\, kN$$

Prøv 20/1,52/20

$$b = 1125 \text{ mm}$$

$$h = L_0 = 2450 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = 59,74 \times 1,125 = 67,21 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,0 \text{ kN/m}$$

Effektiv tykkelse, laminert glass for beregning av Utbøying på grunn av vind:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{(1 - 0,05)(20^3 + 20^3) + 0,05(20 + 20)^3} = 26,40 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\varpi = 0,05 \text{ for langtidslast}$$

Utbøying på grunn av vindlast:

$$w = \frac{5qL_0^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh_{ef;w}^3}{12} = \frac{1125 \times 26,40^3}{12} = 1\,724\,976 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_{vind} = \frac{5 \times 1,0 \times 2450^4}{384 \times 70\,000 \times 1\,724\,976} = 3,89 \approx 3,9 \text{ mm} \quad (17)$$

Innledende deformasjon for herdet glass, w_0 :

$$w_0 = \frac{L_0}{300} = \frac{2450}{300} = 8,2 \text{ mm}$$

Lagdelt stivhet:

$$EJ_{abs} = \frac{70\,000 \times 1125}{12} (20^3 + 20^3) = 1,05 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2 \quad (10)$$

Monolittisk stivhet:

$$\begin{aligned} EJ_{full} &= 1,05 \times 10^{11} + 70\,000 \times 1125 \left[20 \left(\frac{20}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 + 20 \left(\frac{20}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 \right] \\ &= 4,69699 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} = \frac{0,052 \times 1125}{1,52} = 38,4868 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

$$EA^* = \frac{E b t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{70\,000 \times 1125 \times 20 \times 20}{20 + 20} = 78750 \times 10^4 \text{ N} \quad (14)$$

$$\alpha^2 = \frac{38,4868}{78750 \times 10^4} \frac{4,69699 \times 10^{11}}{1,0500 \times 10^{11}} = 2,18621 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad (12)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi/2)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - NL_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - NL_0^2)} \quad (11)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) 4,49 \approx 4,5 \text{ mm}$$

$$w_{max} = 3,9 + 8,2 + 4,5 = 16,6 \text{ mm}$$

Maks strekkspenning:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} = -\frac{\pi^2}{2450^2} \times 16,6 = -2,72945 \times 10^{-5} \text{ mm}^{-1} \quad (9)$$

$$d = \frac{20}{2} + \frac{20}{2} + 1,52 = 21,52 \text{ mm}$$

$$F = \frac{(67\,210 \times 16,6 + 1,0 \times 2450^2) + (-2,72945 \times 10^{-5} \times 1,0500 \times 10^{11})}{21,52} \quad (10)$$

$$= 197\,596 \text{ N}$$

$$W_y = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{1125 \times 41,52^2}{6} = 323\,233 \text{ mm}^3 \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{67\,210}{(1125 \times 41,52)} + \frac{67\,210 \times 16,6}{323\,233} + \frac{1,0 \times 2450^2}{8 \times 323\,233} \frac{197\,596}{(1125 \times 20)} \quad (7)$$

$$= 25,3 \text{ N/mm}^2$$

Kritisk last:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E J_{abs} E J_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 E J_{abs} L_0^2 + E J_{full} \pi^2} \right) \quad (16)$$

$$= \frac{\pi^2 1,0500 \times 10^{11} \times 4,69699 \times 10^{11}}{2450^2} \left(\frac{2,18621 \times 10^{-7} \times 2450^2 + \pi^2}{2,18621 \times 10^{-7} \times 1,0500 \times 10^{11} \times 2450^2 + 4,69699 \times 10^{11} \pi^2} \right)$$

$$= 189\,955 \text{ N} = 190,0 \text{ kN}$$

Prøv 25/1,52/25

$$b = 1125 \text{ mm}$$

$$h = L_0 = 2450 \text{ mm}$$

$$N_{Ed} = 59,74 \times 1,125 = 67,21 \text{ kN}$$

$$q_d = 1,0 \text{ kN/m}$$

Effektiv tykkelse, laminert glass for beregning av Utbøying på grunn av vind:

$$h_{ef;w} = \sqrt[3]{(1 - 0,05)(25^3 + 25^3) + 0,05(25 + 25)^3} = 33,00 \text{ mm} \quad (3)$$

$$\varpi = 0,05 \text{ for langtidslast}$$

Utbøying på grunn av vindlast:

$$w = \frac{5qL_0^4}{384EI} \quad (17)$$

$$I = \frac{bh_{ef;w}^3}{12} = \frac{1125 \times 33,0^3}{12} = 3\,369\,094 \text{ mm}^4 \quad (18)$$

$$w_{vind} = \frac{5 \times 1,0 \times 2450^4}{384 \times 70\,000 \times 3\,369\,094} = 1,99 \approx 2,0 \text{ mm} \quad (17)$$

Innledende deformasjon for herdet glass, w_0 :

$$w_0 = \frac{L_0}{300} = \frac{2450}{300} = 8,2 \text{ mm}$$

Lagdelt stivhet:

$$EJ_{abs} = \frac{70\,000 \times 1125}{12} (25^3 + 25^3) = 2,05078 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2 \quad (10)$$

Monolittisk stivhet:

$$\begin{aligned} EJ_{full} &= 2,05078 \times 10^{11} \\ &+ 70\,000 \times 1125 \left[25 \left(\frac{25}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 + 25 \left(\frac{25}{2} + \frac{1,52}{2} \right)^2 \right] \\ &= 8,97399 \times 10^{11} \text{ Nmm}^2 \end{aligned} \quad (15)$$

Utbøying på grunn av vertikallast:

$$K = \frac{G_{int} b}{t_{int}} = \frac{0,052 \times 1125}{1,52} = 38,4868 \text{ N/mm}^2 \quad (13)$$

$$EA^* = \frac{E b t_1 t_2}{t_1 + t_2} = \frac{70\,000 \times 1125 \times 25 \times 25}{25 + 25} = 98437,5 \times 10^4 \text{ N} \quad (14)$$

$$\alpha^2 = \frac{38,4868}{98437,5 \times 10^4} \frac{8,97399 \times 10^{11}}{2,05078 \times 10^{11}} = 1,71087 \times 10^{-7} \text{ mm}^{-2} \quad (12)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = \frac{(\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 + EJ_{full} \pi^2) L_0^2 N w_0 \sin(\pi/2)}{\alpha^2 EJ_{abs} L_0^2 (EJ_{full} \pi^2 - NL_0^2) + EJ_{full} \pi^2 (EJ_{abs} \pi^2 - NL_0^2)} \quad (11)$$

$$w \left(\frac{1000}{2} \right) = 1,86 \approx 1,9 \text{ mm}$$

$$w_{max} = 2,0 + 8,2 + 1,9 = 12,1 \text{ mm}$$

Maks strekkspenning:

$$\chi_{max} = -\frac{\pi^2}{L_0^2} w_{max} = -\frac{\pi^2}{2450^2} \times 12,1 = -1,98954 \times 10^{-5} mm^{-1} \quad (9)$$

$$d = \frac{25}{2} + \frac{25}{2} + 1,52 = 26,52 mm$$

$$F = \frac{(67\,210 \times 12,1 + 1,0 \times 2450^2) + (-1,98954 \times 10^{-5} \times 2,05078 \times 10^{11})}{26,52} \quad (8)$$

$$= 103\,154 N$$

$$W_y = \frac{b \times t^2}{6} = \frac{1125 \times 51,52^2}{6} = 497\,683 mm^3 \quad (19)$$

$$\sigma_{max} = \frac{67\,210}{(1125 \times 51,52)} + \frac{67\,210 \times 12,1}{497\,683} + \frac{1,0 \times 2450^2}{8 \times 497\,683} \frac{103\,154}{(1125 \times 25)} \quad (7)$$
$$= 8,3 N/mm^2$$

Kritisk last:

$$\begin{aligned} N_{cr} &= \frac{\pi^2 E J_{abs} E J_{full}}{L_0^2} \left(\frac{\alpha^2 L_0^2 + \pi^2}{\alpha^2 E J_{abs} L_0^2 + E J_{full} \pi^2} \right) & (16) \\ &= \frac{\pi^2 2,05078 \times 10^{11} \times 8,97399 \times 10^{11}}{2450^2} \left(\frac{1,71087 \times 10^{-7} \times 2450^2 + \pi^2}{1,71087 \times 10^{-7} \times 2,05078 \times 10^{11} \times 2450^2 + 8,97399 \times 10^{11} \pi^2} \right) \\ &= \mathbf{363\ 639\ N = 363,6\ kN} \end{aligned}$$

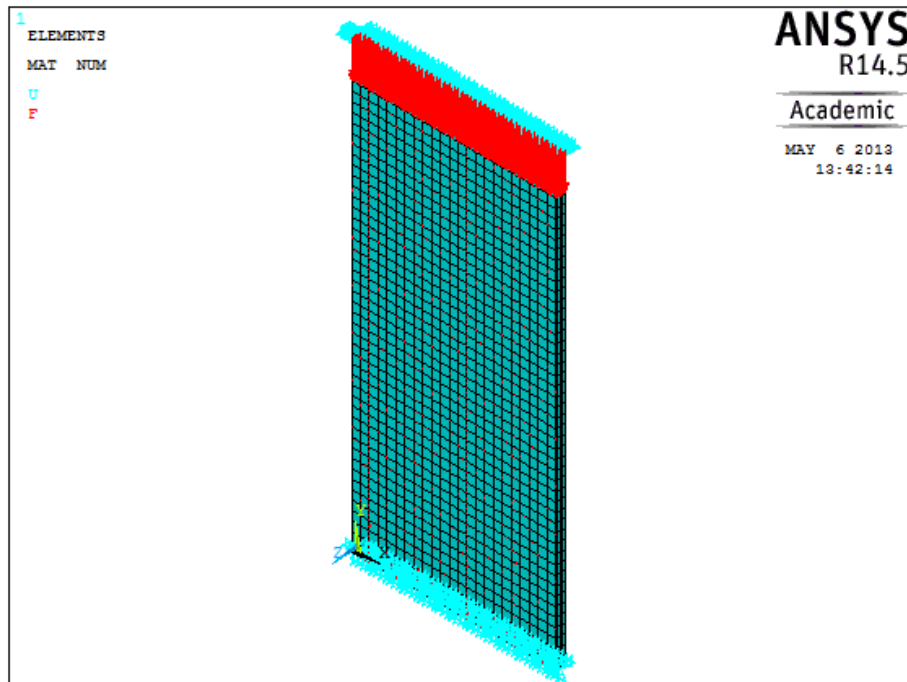
Glassvegg 1.etg

By Mads Fjeld, Sigurd Fossum

May 06, 2013

Bachelor 2013

Report Generated by ANSYS



Glassvegg –modell

Elementer

Entity	Number Defined
UNKNOWN	6762
Nodes	31882

M aterialegenskaper ~glass

M odulus of elasticity X-Direction	7e+010
---	--------

M aterialegenskaper ~PVB folie

M odulus of elasticity X-Direction	1.5e+006
---	----------

Grensebetingelser

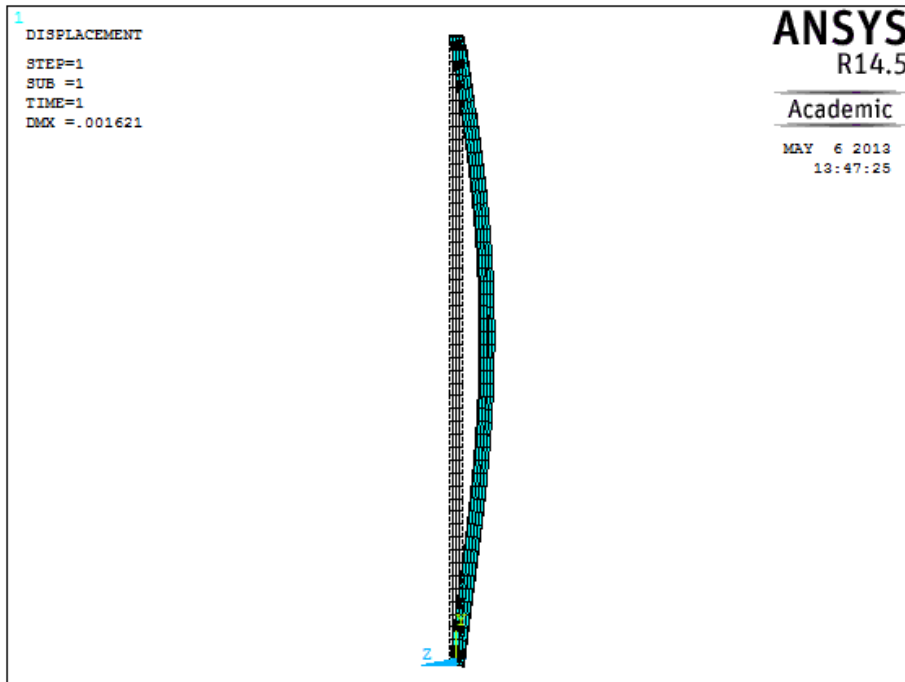
	Number of Constraints
Node	1228

	Number of Forces
Node	3904

Temperature	Value
Uniform	0
Reference	0

Summerte krefter

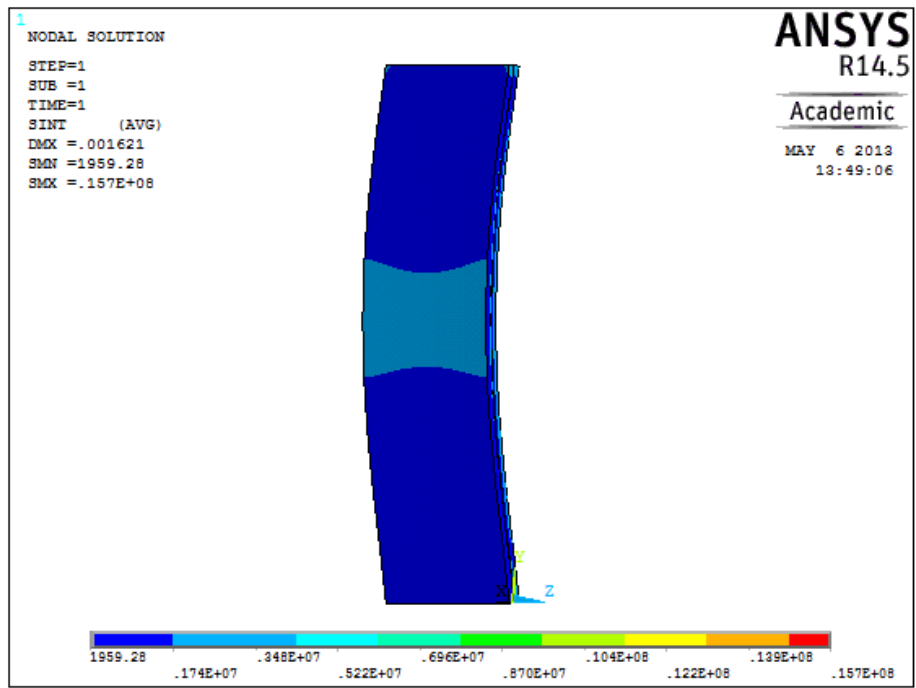
X	Y	Z
-1.203e-005	6.728e+004	3526.



Utbøyning

Forskyvning

	X	Y	Z	Vector Sum
Maximum	-9.087e-006	-7.31e-005	-0.001622	0.001622



Spenninger - Stress intensity