



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet

Masteroppgave 2018 30 stp Fakultet for realfag og teknologi Themistoklis Tsalkatidis

Numerisk studie av parametere i et spider-system

Parametric numerical study of a spider system

Magne Moastuen Byggeteknikk og arkitektur Fakultet for realfag og teknologi

Forord

Denne masteroppgaven har blitt skrevet ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet (NMBU) i løpet av vårsemesteret 2018, ved fakultetet for realfag og teknologi.

Problemstillingen for denne oppgaven ble lagt frem av førsteamanuensis Themistoklis Tsalkatidis, som også har veiledet meg i arbeidet med oppgaven.

Konstruksjoner av glass punktfestet med spidere blir anvendt i økende grad, men det foreligger relativt lite undersøkelser omkring de konstruksjonsmessige egenskapene til slike systemer. I det meste av den eksisterende litteraturen, er det glasset som har hovedfokus. I denne oppgaven er også glasset med, men hovedfokuset er satt på spideren.

Spideren er en konstruksjonsdel der høy ytelse skal kombineres med en liten form, samtidig som den skal være tiltalende i et arkitektonisk perspektiv. Derfor er det viktig å vite hvilke faktorer som påvirker spiderens egenskaper. Meningen med denne oppgaven er å være med på å utvikle kunnskapen om nettopp det.

En del tid ble brukt i den innledende fasen, for å undersøke markedet og finne en spider med tilstrekkelig dokumentasjon for bruk ved utarbeidelse av modellen. Det var også avgjørende at produsenten kunne vise til laboratorietester av sitt produkt, slik at det var et sammenlikningsgrunnlag for FEM-analysene.

Arbeidet med denne oppgaven har vært meget interessant. Det har samtidig vært krevende, siden det var mye nytt å sette seg inn i. Min kunnskap om glass som konstruksjonsmateriale var fra før minimal, og erfaringene med bruk av finite elementers metode begrenset. Jeg har heller ikke brukt FEM-programmer tidligere. En del tid gikk derfor med på å lære dette, før arbeidet med selve oppgaven kunne starte.

Jeg vil takke min veileder, førsteamanuensis Themistoklis Tsalkatidis, som hele veien har gitt god oppfølging og motivasjon, og interessante vinklinger og diskusjoner.

Jeg vil også takke Sadev for deres bidrag med informasjon om sitt spiderprodukt, S3001EVO, som har dannet basisen i denne oppgaven.

Til slutt vil jeg takke min familie for all støtte, og min kjæreste for hennes tålmod i denne tidkrevende prosessen.

I

Sammendrag

Spidere er mye brukt til punktinnfesting av glass i fasader. Det er også en økende bruk av glass i gulv og gangbruer. Det er derimot gjort relativt lite forskning på slike systemer. Det foreligger ingen endelig standardisering for dimensjoneringen, så det er flere metoder som blir anvendt i de ulike europeiske landene. I enkelte tilfeller er det så langt bare eksperimentell testing som brukes når konstruksjonens kapasitet skal verifiseres. I denne oppgaven har det blitt utført FEManalyser ved hjelp av ANSYS Workbench, der hovedfokuset har vært å undersøke spideren. Dette omfatter i alt 12 casestudier for realistiske brukssituasjoner under norske forhold. Både fasade- og gulvsystemer har her blitt undersøkt. Det ble gjort ved først å verifisere en tredimensjonal modell av finite elementer opp mot testresultater for produktet, for så å benytte denne modellen til å modellere de nevnte systemene. Spideren som ble valgt, S3001EVO, lages av det franske selskapet Sadev. Denne spideren er kun tiltenkt bruk i fasader. Med denne spideren som bakrunn, ble det utført studier for å undersøke hvilke geometriske parametere som mest påvirker spiderens kapasitet. Parameterendringene ble holdt relativt små, for at de endrede utgavene skulle være sammenliknbare med den opprinnelige, og ikke likne andre spidertyper i utforming. Basert på dette studiet har det blitt foreslått et effektivisert design av spideren, som gjør det mulig å bruke et slikt system i gulv eller øke arealet på glassene i en fasade. S3001EVO har allerede en utforming som skiller den fra de mest vanlige spiderene på markedet. Derfor ble det også utført en analyse for å vurdere om dette designet skiller den fra de konvensjonelle typene også i strukturell prestasjon. Resultatene fra ANSYS-analysene er vist i form av en rekke figurer, grafer og tabeller. Til slutt er diskusjons- og konklusjonsdelene lagt frem .

Abstract

Spiders are widely used for point-fixing of glass in facade systems. The use of glass in flooring and walkways is also increasing. There is, however, relatively little research made on these systems. There are no established standarization. On the contrary, various methods are used in design. In some cases, the only accepted way to verify the structural capacity of spiderglass systems, is by experimental tests. In this thesis, there has been conducted FEM-analyses using ANSYS Workbench, where the main focus has been to investigate the spider. To do this, there has been made a total of 12 case studies for realistic situations in Norway. Systems for both facade and floor have been included in this study. First step was to verify a three-dimentional model of finite elements against results from experimental testing provided by the producer. The spider was then used to model the mentioned systems. The spider that was chosen, S3001EVO, is made by the french company Sadev. S3001EVO is only supposed to be used in facade systems. Using this spider as a basis, analyses were conducted to investigate which geometric parameters affect the structural capacity of the spider the most. The parametric changes were kept rather small, so that the modified spiders would be comparable to the initial one, and not be similar to other spider types in design. Based on this study, a more effective design for the spider has been proposed. Furthermore, this design allows the use of the spider in flooring systems, and makes it possible to increase the size of the glass panels in the facade systems. The S3001EVO already has a design that differs significantly from most spiders on the market. Therefore, an analysis was also conducted to measure its performance compared to the more conventional types of spiders. The results from the analyses in ANSYS are shown in a series of figures, graphs and tables. Finally, the discussion and conclusion parts are presented.

Innholdsfortegnelse

Forord	I
Sammendrag	II
Abstract	III
Figurliste	VI
Tabelliste	XI
Symbolliste	XII
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Problemstilling	1
1.3 Omfang	1
2 Teori	
2.1 Fasadesystemer og andre konstruksjoner med konstruksjonsglass	
2.2 Materialer	6
2.2.1 Stål	7
2.2.2 Glass	
2.2.3 Polyetylen	
2.3 Spider-glassystem	
2.4 Bruddteori	
2.5 Finite elementers metode (FEM)	
2.6 ANSYS	
2.7 Eksisterende litteratur	
3 Metode	21
3.1 Etablering av modell	
3.2 Laboratorietester	
3.2.1 Vertikal test	
3.2.2 Horisontal test	
3.2.3 Testresultater	
3.3 Verifikasjonsanalyser	
3.3.1 Vertikal verifikasjonsanalyse	
3.3.2 Horisontal verifikasjonsanalyse	
3.4 Verifiseringsresultat	
3.5 – Casestudier	

3.5.1 – Casetype fasade	31
3.5.2 – Casetype gulv	32
3.5.3 – Oversikt over casestudier	32
3.6 – Parameterstudier	33
3.6.1 – Parameterstudie 1	33
3.6.2 – Parameterstudie 2	34
3.6.3 – Parameterstudie 3	35
3.6.4 – Parameterstudie 4	35
3.7 – Oppsummering av spiderene i parameterstudiene	36
4 Resultater	. 37
4.1 – Case 1: S3001EVO med 20 mm glass og belastning fra vindtrykk	37
4.2 – Case 2: S3001EVO med 30 mm glass og belastning fra vindtrykk	40
4.3 – Case 3: S3001EVO med 20 mm glass og belastning fra vindsug	42
4.4 – Case 4: Spider 1 med 20 mm glass og belastning fra vindtrykk	45
4.5 – Case 5: Spider 1 med 30 mm glass og belastning fra vindtrykk	47
4.6 - Case 6: Bruk av S3001EVO og 30 mm glass i et gulvsystem	50
4.7 – Case 7: Spider nr. 1 og 30 mm glass under gulvbelastning	54
4.8 – Case 8: Spider nr. 2 og 30 mm glass under gulvbelastning	56
4.9 – Case 9: Spider nr. 3 og 30 mm glass under gulvbelastning	58
4.10 – Case 10: Spider nr. 4 og 30 mm glass under gulvbelastning	60
4.11 – Case 11: Spider nr. 4 og 35 mm glasstykkelse under gulvbelastning	62
4.12 - Case 12: Spider nr.4 og 40 mm glasstykkelse under gulvbelastning	64
4.13 – Oppsummering av analyseresultater etter spidertype	66
4.14 – Belastning-spenning-grafer	67
4.15 – Belastning-deformasjon-grafer	73
5 Diskusjon	. 81
5.1 Om analysene	81
5.2 Casetype fasade	82
5.3 Casetype gulv	84
5.4 Oppsummering	86
6 Konklusjoner	. 87
7 Videre arbeid	. 88
8 Referanseliste	. 89
Vedlegg	i

Figurliste

Figur 2.1 – Berlin sentralstasjon (Hauptbahnhof)	4
Figur 2.2 – Glassfasade på Berlin sentralstasjon	4
Figur 2.3 – Lovre-pyramiden	5
Figur 2.4 – Louvre-pyramidens bæresystem	5
Figur 2.5 - Zhangjiajie-brua i Hunan, Kina	б
Figur 2.6 - Floatprosessen	9
Figur 2.7 – Brudd i fullherdet glass (sikkerhetsglass)	10
Figur 2.8 – Spenningsfordeling i varmeherdet glass	10
Figur 2.9 – SADEV S3001EVO	13
Figur 2.10 – S3001EVO med glass	14
Figur 2.11 - Elementtyper	
Figur 2.12 - Kontaktelementer	
Figur 3.1 – Oppsett av vertikal bøyetest	22
Figur 3.2 – Oppsett av horisontal bøyetest	22
Figur 3.3 – Opplagerbetingelser vertikal analyse	25
Figur 3.4 - Meshing	25
Figur 3.5 – Vertikal deformasjon 1	
Figur 3.6 – Vertikal deformasjon 2	
Figur 3.7 – Opplagerbetingelser horisontal analyse	27
Figur 3.8 – Horisontal deformasjon 1	
Figur 3.9 – Horisontal deformasjon 2	
Figur 3.10 – Case-bygning	
Figur 3.11 – Modell av spider og glass	
Figur 3.12 – Parameterendringer 1	

Figur 3.13 – Parameterendringer 2
Figur 3.14 – Parameterendringer 3
Figur 4.1 – Oppsett av fasademodell med vindtrykk
Figur 4.2 – Meshing av fasademodell
Figur 4.3 – Ekvivalente spenninger i spider
Figur 4.4 – Deformasjon av spider
Figur 4.5 – Maksimal hovedspenning i glass
Figur 4.6 – Nedbøyning av glass
Figur 4.7 – Ekvivalent spenning i spider
Figur 4.8 – Deformasjon av spider
Figur 4.9 – Maksimal hovedspenning i glass
Figur 4.10 – Nedbøyning av glass
Figur 4.11 – Oppsett av fasademodell med vindsug 42
Figur 4.12 – Ekvivalente spenninger i spider
Figur 4.13 – Deformasjon av spider
Figur 4.14 – Maksimal hovedspenning i glass 44
Figur 4.15 – Nedbøyning av glass
Figur 4.16 – Ekvivalent spenning i spider
Figur 4.17 – Deformasjon av spider
Figur 4.18 – Maksimal hovedspenning i glass
Figur 4.19 – Nedbøyning av glass
Figur 4.20 – Oppsett av fasademodell
Figur 4.21 – Ekvivalent spenning i spider
Figur 4.22 – Deformasjon av spider
Figur 4.23 – Maksimal hovedspenning i glass
Figur 4.24 – Nedbøyning av glass

Figur 4.25 -	- Oppsett av gulvmodell	. 50
Figur 4.26 -	- Meshing av gulvmodell	. 51
Figur 4.27 -	- Ekvivalent spenning i spider	. 51
Figur 4.28 -	- Deformasjon av spider	. 52
Figur 4.29 -	- Maksimal hovedspenning i glass	. 52
Figur 4.30 -	- Nedbøyning av glass	. 53
Figur 4.31 -	- Ekvivalent spenning i spider	. 54
Figur 4.32 -	- Deformasjon av spider	. 54
Figur 4.33 -	- Maksimal hovedspenning i glass	. 55
Figur 4.34 -	- Nedbøyning av glass	. 55
Figur 4.35 -	- Ekvivalent spenning i spider	. 56
Figur 4.36 -	- Deformasjon av spider	. 56
Figur 4.37 -	- Maksimal hovedspenning i glass	. 57
Figur 4.38 -	- Nedbøyning av glass	. 57
Figur 4.39 -	- Ekvivalent spenning i spider	. 58
Figur 4.40 -	- Deformasjon av spider	. 58
Figur 4.41 -	- Maksimal hovedspenning i glass	. 59
Figur 4.42 -	- Nedbøyning av glass	. 59
Figur 4.43 -	- Ekvivalent spenning i spider	. 60
Figur 4.44 -	- Deformasjon av spider	. 60
Figur 4.45 -	- Maksimal hovedspenning i glass	. 61
Figur 4.46 -	- Nedbøyning av glass	. 61
Figur 4.47 -	- Ekvivalent spenning i spider	. 62
Figur 4.48 -	- Deformasjon av spider	. 62
Figur 4.49 -	- Maksimal hovedspenning i glass	. 63
Figur 4.50 -	- Nedbøyning av glass	. 63

Figur 4.51 – Ekvivalent spenning i spider	64
Figur 4.52 – Deformasjon av spider	
Figur 4.53 – Maksimal hovedspenning i glass	65
Figur 4.54 – Nedbøyning av glass	66
Figur 4.55 – Spenning-last case 1	67
Figur 4.56 – Spenning-last case 2	
Figur 4.57 – Spenning-last case 3	
Figur 4.58 – Spenning-last case 4	
Figur 4.59 – Spenning-last case 5	
Figur 4.60 – Spenning-last case 6	
Figur 4.61 – Spenning-last case 7	
Figur 4.62 – Spenning-last case 8	71
Figur 4.63 – Spenning-last case 9	71
Figur 4.64 – Spenning-last case 10	72
Figur 4.65 – Spenning-last case 11	72
Figur 4.66 – Spenning-last case 12	
Figur 4.67 – Deformasjon-last case 1	73
Figur 4.68 – Deformasjon -last case 2	74
Figur 4.69 – Deformasjon -last case 3	74
Figur 4.70 – Deformasjon -last case 4	75
Figur 4.71 – Deformasjon -last case 5	75
Figur 4.72 – Deformasjon -last case 6	76
Figur 4.73 – Deformasjon -last case 7	76
Figur 4.74 – Deformasjon -last case 8	77
Figur 4.75 – Deformasjon -last case 9	77
Figur 4.76 – Deformasjon -last case 10	

Figur 4.77 – Deformasjon -last case 11	. 78
Figur 4.78 – Deformasjon -last case 12	79

Tabelliste

Tabell 2.1 – Materialparametere for stål	7
Tabell 2.2 – Materialparametere for herdet glass	11
Tabell 2.3 – Materialparametere for polyetylen	12
Tabell 3.1 – Resultater av laboratorietest	
Tabell 3.2 – Resultater av verifikasjonsanalyser	
Tabell 3.3 – Case-studier	
Tabell 3.4 – Oversikt over parameterstudier	
Tabell 4.1 – Oppsummering av resultater	66

Symbolliste

E	-	Elastisitetsmodul
E_y	-	Tangentmodul
F _{h1}	-	Kraft ved 1 mm nedbøyning for horisontal belastning i laboratorietest
F _{h1,avg}	-	Gjennomsnittlig kraft ved 1 mm nedbøyning for horisontal testlast
F _{h2}	-	Kraft ved 1 mm nedbøyning for horisontal belastning i laboratorietest
F _{h2,avg}	-	Gjennomsnittlig kraft ved 2 mm nedbøyning for horisontal testlast
F_{v1}	-	Kraft ved 1 mm nedbøyning for vertikal belastning i laboratorietest
F _{v1,avg}	-	Gjennomsnittlig kraft ved 1 mm nedbøyning for vertikal testlast
F_{v2}	-	Kraft ved 2 mm nedbøyning for vertikal belastning i laboratorietest
Fv2,avg	-	Gjennomsnittlig kraft ved 2 mm nedbøyning for vertikal testlast
$f_{b;k}$	-	Karakteristisk bøyekapasitet herdet glass
$f_{g;d}$	-	Dimensjonerende bøyekapasitet annilert glass
$f_{g;k}$	-	Karakteristisk bøyekapasitet annilert glass
$\mathbf{f}_{\mathbf{u}}$	-	Bruddspenning
$\mathbf{f}_{\mathbf{y}}$	-	Flytespenning
G	-	Skjærmodul
k _{mod}	-	Lastvarighetsfaktor
k _{sp}	-	Faktor for overflateprofil
k _v	-	Faktor for herding
n	-	Tøyningsherding-indeks
R _d	-	Dimensjonerende materialkapasitet
R _k	-	Karakteristisk materialkapasitet
δ_d	-	Dimensjonerende deformasjon
δ_{h1}	-	Deformasjon i verifikasjonsanalyse tilsvarende 1 mm deformasjon i horisontal

test

δ_{h2}	-	Deformasjon i verifikasjonsanalyse tilsvarende 2 mm deformasjon i horisontal test
$\delta_{\max, gla}$	uss -	Største deformasjon analysert for glasset
δ _{max,spi}	der -	Største deformasjon analysert for spideren
δ_{v1}	-	Deformasjon i verifikasjonsanalyse tilsvarende 1 mm deformasjon i vertikal test
δ_{v2}	-	Deformasjon i verifikasjonsanalyse tilsvarende 2 mm deformasjon i vertikal test
ε _u	-	Bruddtøyning
γм	-	Materialfaktor, stål og polyetylen
γ _{м;А}	-	Materialfaktor for annilert glass
γ _{M;v}	-	Materialfaktor for herdet glass
ρ	-	Materialtetthet
$\sigma_{max,gla}$	ass –	Største maksimale hovedspenning analysert for glasset
σ _{max,spi}	ider -	Største ekvivalente spenning analysert for spideren
σ_{vm}	-	von Mises spenning, ekvivalent spenning
σ_1	-	Største hovedspenning
σ_2	-	Mellomliggende hovedspenningen
σ_3	-	Minste hovedspenningen
ν	-	Poissons tall
[F]	-	Systemets fleksibilitetsmatrise
[K]	-	Systemets stivhetsmatrise
[K] ⁻¹	-	Den inverterte system-stivhetsmatrisen
[k]	-	Elementets stivhetsmatrise
[R]	-	Matrise for systemets nodekrefter
[S]	-	Matrise for elementkrefter
[r]	-	Matrise for systemets nodeforskyvninger
[v]	-	Matrise for elementets nodeforskyvninger

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bygningsmarkedet etterspør i økende grad glassfasader der glasset er mest mulig kontinuerlig. Derfor er spider-systemer ettertraktet, siden minimalt av bæresystemet er synlig på utsiden. Det er også en økende bruk av horisontale glasskonstruksjoner, som gulv og gangbroer.

Disse konstruksjonene består av metall og glass, to materialer med svært ulike egenskaper. Bygging med glass er generelt forbundet med utfordringer og risiko, og god kompetanse på glass er ikke like utbredt som på stål. Den minimale tilstedeværelsen av bærende elementer i slike systemer, gjør at det må stilles ekstra høye krav til hele konstruksjonen. Spiderene må være tilstrekkelig dimensjonerte til å motstå store belastninger, motstå korrosjon, og gi rom for relative bevegelser mellom konstruksjonsdelene. Samtidig må glasset tåle å være festet i små punkter, og gi tilstrekkelig sikkerhet ved og etter brudd.

1.2 Problemstilling

Det skal utføres numeriske analyser av en boltet spider i ulike case-studier. Dette skal gjøres ved bruk av FEM-programmet ANSYS. Bruk av spider i både fasadesystem og gulvsystem skal belyses. Det skal også utføres parameterstudier, der målet er å finne ut hva som påvirker spiderens kapasitet. Resultatene fra de ulike parameterstudiene skal til slutt vurderes, og ut fra dette skal det foreslås et effektivisert design av spideren.

1.3 Omfang

Denne oppgaven omhandler spider for boltfesting av glass. Dette er den mest utbredte spidertypen i konstruksjonsverdenen. Oppgaven tar for seg ett eksisterende spider-produkt. Denne spideren skal velges som grunnlag for parameterstudien. Det er kun utført statiske konstruksjonsberegninger, og termiske effekter er neglisjert. Case-studiene skal utføres på en fiktiv bygning. Vindlastene på denne bygningen skal brukes i analysene av fasadesystemet. Gulvsystemet er også lokalisert i bygningen, og skal dimensjoneres i henhold til kravene for kontorareal. Først skal en modell av spideren lages og verifiseres opp mot laboratorietester. Disse testene inngår ikke i studien, men er fremlagt av produsenten. Deretter skal denne modellen brukes til å lage en modell av hele systemet.

2 Teori

2.1 Fasadesystemer og andre konstruksjoner med konstruksjonsglass

Glass er et ettertraktet materiale til bruk i fasadesystemer, særlig på grunn av det arkitektoniske uttrykket det kan gi en bygning. Det kan brukes for eksempel monolittisk glass, laminert glass, farget glass, speilglass og sikkerhetsglass. Glassene kan ha form av trekanter eller mangekanter, være orientert i et utall forskjellige mønstre, og være vertikale eller hellende. Mulighetene er mange. Det samme gjelder for konstruksjonen som holder glassfasaden oppe. Disse sekundære bæresystemene, som igjen bæres av bygningens eget bæresystem, kan deles inn i to hoveddeler; rammesystem og punktinnfestingssystem. Det er ofte et ønske om en mest mulig transparent konstruksjon og innslipp av lys som er bakgrunnen for å bygge en glassfasade. Derfor er punktinnfesting av glassene et ettertraktet alternativ. Slik unngås det at glassflatene blir avbrutt av rammeelementer. Glassflatene framstår mer kontinuerlige, samtidig som de blir trukket litt frem fra det primære bæresystemet. I mange tilfeller kan det også være aktuelt med et eget, slankere bæresystem som et mellomledd mellom det primære og sekundære bæresystemet. Slik vil det primære bæresystemet fremstå slankere fra utsiden. Dette kan være fremtrukkede søyler av slanke profiler, bærende glassprofiler, eller opphenging med wire (Patterson 2011).

Det finnes også flere varianter av brakettene som brukes til punktinnfesting av glassene. I lette glasskonstruksjoner kan det brukes enkelt-fester i form av en bolt i en utkraget, sylindrisk bæredel. I vanlige og tyngre konstruksjoner er det mer vanlig å bruke braketter med flere armer, såkalte spidere. Disse kan deles inn i to hovedgrupper; klemmeinnfesting og boltinnfesting.

Spidere med klemfeste penetrerer fasaden gjennom fugen mellom glassene, og klemmer fast fasaden fra både inn- og utsiden. Spidere med boltfeste penetrerer selve glasset gjennom hull som ofte er forsenkede. Sistnevnte er den mest vanlige i bruk, selv om boringen av hullene ofte gjør det til det dyreste alternativet (Patterson 2011).

Konstruksjonsglass er ikke utelukkende brukt i fasader. Det blir også brukt i horisontale konstruksjoner som gulv, tak, utkragede overbygg, trapper og innen- og utendørs gangbruer. Enkelt sett kan dette være akkurat den samme konstruksjonen som i en fasade, bare rotert 90°. Men lastsituasjonen er annerledes, og det er større risiko forbundet med svikt av slike konstruksjoner. Økt risiko følger i hovedsak av økte konsekvenser ved sammenbrudd.

3



Figur 2.1 – Berlin sentralstasjon (Hauptbahnhof)



Figur 2.2 – Glassfasade på Berlin sentralstasjon

Sentralstasjonen Hauptbahnhof i Berlin, vist på figur 2.1 og 2.2 (Pixabay 2018), er et godt eksempel på bruk av glass i flere av systemene nevnt tidligere. Fasaden på det sentrale bygget er en glassfasade med boltede spidere, som igjen er støttet av et system av wire og glassbjelker. Over denne fasaden er et takutstikk med stor utkraging. Her er glassene svakt buede og anlagt på rammer. Sidefløyene har et gardin-veggsystem (curtain wall), som lenge har vært dominerende i høyere bygninger. Noe som ikke er så vanlig ved fasadesystemet på sentralbygget, er at spiderene er på utsiden av glassene.

Mange bygninger med slike store utvendige glasskonstruksjoner, får gjerne et monumentalt preg. I enkelte tilfeller kan bygningen framstå mer som et monument, enn som et bygg. Et eksempel på dette er den kjente Louvre-pyramiden vist på figur 2.3 (Pixabay 2018). For mange er den først og fremst kjent som en stor pyramide av glass, mens det faktisk er hovedinngangen til Louvre-museet. Bildet under viser Louvre-pyramiden foran Louvre-museet.



Figur 2.3 – Lovre-pyramiden

Louvre-pyramiden består av store stålrammesystemer oppspent med strekkstag. Glasset er festet til dette bæresystemet med silikonbasert adhesiv, slik at det ikke er mekanisk kontakt mellom glass og stål (Patterson 2011). Konstruksjonen er vist på figur 2.4 (Pixabay 2018).



Figur 2.4 – Louvre-pyramidens bæresystem

I enkelte tilfeller blir glass også brukt til å skape konstruksjoner av den mer ekstreme sorten, ekstreme nettopp på grunn av bruken av glass. Et eksempel på dette er høye gangbruer, der det transparente glasset gir en følelse av å ha lite eller ingenting mellom seg og avgrunnen. En del slike bruer har i nyere tid blitt bygd i Kina, for eksempel Zhangjiajie-brua i Hunan-provinsen. Denne brua har en lengde på 430 meter og henger ca. 300 meter over en canyon, og skal med dette være verdens lengste og høyeste bru med glassdekke. Zhangjiajie-brua er vist på figur 2.5 (Pixabay 2018).



Figur 2.5 - Zhangjiajie-brua i Hunan, Kina

2.2 Materialer

I en spiderglass-fasade finnes en rekke materialer med svært forskjellige egenskaper. I spiderene brukes det som oftest stål, men aluminium er også et alternativ. Platene er av typen floatglass. Mellom glassplatene og spiderene er det beskyttende foringer av plast, i dette tilfellet polyetylen. Disse materialene ble inkludert i FE-modellene i denne oppgaven. En fuge av et silikonbasert adhesiv brukes i de aller fleste tilfeller i buttskjøten mellom glassplatene. Dette ble derimot utelatt fra modellene for å gjøre dem litt enklere. Silikonfugen bidrar ikke først og fremst med strukturell styrke, men fungerer som en fleksibel klimaforsegling som forblir intakt under midlertidige deformasjoner i konstruksjonen (Patterson 2011).

2.2.1 Stål

Stål er et isotropt og duktilt materiale, og er en legering av flere typer metaller. Spiderene betraktet i denne oppgaven er produsert av det franske selskapet Sadev, og er støpt. Til dette er det ifølge Sadev brukt legeringen 19Cr-11Ni-2Mo, som i støpt form betegnes CF8M. Dette betyr at hovedelementene i legeringen, i tillegg til jern, er krom, nikkel og molybden. Innholdet av disse er henholdsvis 19%, 11% og 2% av vekten. Dette er et rustfritt stål, hvilket innebærer at det har et maksimalt karboninnhold på 0,08% (Steel Founder's Society of America 2004). Den smidde eller varmvalsede varianten av CF8M betegnes S316.

Dette stålet er austenittisk. Austenittisk stål er veldig duktilt, men har relativt lav flytegrense. Krom er det legeringselementet som i størst grad bidrar til stålets korrosjonsmotstand. Nikkel bidrar til å holde strukturen i stålet austenittisk, og gjør stålet sterkere og mer duktilt. Molybdenet gjør legeringen ekstra motstandsdyktig mot korrosjon, og gjør at stålet også kan tåle kontakt med sjøvann.

Materialparameterne for dette stålet varierer litt fra kilde til kilde, så de som er brukt her representerer et snitt av disse (MakeItFrom 2018).

Materialparametere			
Tetthet	ρ [kg/m ³]	7800	
Elastisitetsmodul	E [MPa]	200 000	
Tangentmodul	E _y [MPa]	18 770	
Flytegrense	fy [MPa]	290	
Bruddstyrke	f _u [MPa]	540	
Bruddtøyning	ε _u [%]	50	
Skjærmodul	G [MPa]	78 000	
Poisson-tall	ν	0,28	

 $Tabell \ 2.1-Material parametere \ for \ st \ral$

Tangentmodulen E_y er beregnet ut fra følgende formel (Tylek & Kuchta 2014):

$$E_y = \frac{E}{1 + \left(\frac{0,002 \text{ n } E}{f_y}\right)}$$

(Formel 2.1)

der

- $E \text{ og } f_y \text{ som i tabellen over}$
- n er tøyningsherding-indeksen, n = 7 (Tylek & Kuchta 2014).

Stålets dimensjonerende kapasitet er beregnet i henhold til NS-EN 1993-1-1:2005+NA:2008, kapittel 2.4.3:

$$R_{d} = \frac{R_{k}}{\gamma_{M}},$$
 (Formel 2.2)

der $\gamma_M = 1,05$. R_k er i dette tilfellet stålets flytegrense, som gir

$$R_d = \frac{f_y}{\gamma_M} = \frac{290 MPa}{1,05} = 276,19 MPa.$$

Det er ikke ønskelig at spideren får permanente deformasjoner, og derfor er flytegrensen den dimensjonerende spenningskapasiteten.

2.2.2 Glass

Glass er et sprøtt, amorft og isotropt materiale. Det er et sterkt materiale med stor trykkapasitet, men lav strekkapasitet. Under belastning deformeres det elastisk til brudd brått oppstår. Den svært sprø bruddformen gjør at glass er forbundet med utfordringer når det kommer til bruk i konstruksjoner. Hovedbestanddelen i glass er silika (sand). I floatglass er det også tilsatt kalk og natriumkarbonat.

Floatglass, som er en produksjonsmetode for glassplater, står for over 90% av verdens produksjon av flatt glass. Første steg i produksjonen er å smelte blandingen av råmaterialer. Deretter helles blandingen utover et bad av smeltet tinn. Slik blir begge overflatene plane og fine, i motsetning til ved tidligere års bruk av mer tradisjonelle støpeformer. Når den smeltede massen har flytt utover til ønsket tykkelse, blir det avkjølt til det er ganske stivt, til ca. 600°C. Deretter flyttes glasset over til herding, der det blir rullet på keramiske ruller. Dette er en prosess der glasset annileres ved at det blir avkjølt jevnt og kontrollert. Slik unngås uheldige interne spenninger i glasset, som fort oppstår ved rask og ujevn avkjøling. Siste steg i denne produksjonsprosessen, er å kutte og maskinere glasset til et ferdig produkt. Dette er kun mulig å gjøre med glass som er herdet på denne måten. Glass som skal være delvis eller fullt herdet, må derfor gå igjennom en ny herdingsprosess etter bearbeidingsfasen. På grunn av begrenset størrelse på produksjonslinja og herdeovnene, er maksimal kantlengde på glassplatene som regel 5182 mm (Patterson 2011).

Figur 2.6 viser floatprosessen og de resulterende glassproduktene.



Figur 2.6 - Floatprosessen

1) Annilert glass er det opprinnelige produktet som følger av floatprosessen. Det er det mekanisk svakeste og billigste av de tre glasstypene. Som nevnt tidligere har glass god trykkapasitet, men heller dårlig strekkapasitet. Det gjør at det er vanlig å bruke en bruddspenning for annilert glass på 45 MPa ved bøyning. Dette er glass uten interne spenninger, hvilket gjør det ømfintlig for termiske påvirkninger. Ved brudd deles glasset i store biter. Det er derfor forbundet med særlig stor fare å benytte slikt glass der det kan falle ned på mennesker ved brudd, siden bitene er store, skarpe og tunge.

2) Delvis herdet glass er det mellomste av de tre glassene når det kommer til de mekaniske egenskapene. Dette glasset skal være herdet slik at det har en overflate-trykkspenning på mellom 24 og 52 MPa. Når glasset går i brudd, blir fragmentene litt mindre enn hos det annilerte glasset.

3) Det fullherdede glasset er det sterkeste av glasstypene, og det som er mest motstandsdyktig mot termiske påvirkninger. Kravet her er at glasset skal ha en overflate-trykkspenning på 67-69 MPa. Når dette glasset går i brudd deles det i mange små biter, som vist på figur 2.7 (Pixabay 2018). Disse bitene er vesentlig mindre enn hos de andre glassene. På grunn av de store interne spenningene, kan bruddet opptre nærmest eksplosjonsartet. Glassfragmentene er så små at de er mer eller mindre ufarlige, og glasset kan derfor betegnes som sikkerhetsglass (Patterson 2011).



Figur 2.7 – Brudd i fullherdet glass (sikkerhetsglass)

Når delvis og fullt herdet glass avkjøles under herdeprosessen, avkjøles overflatene raskt og stivner. Kjernen avkjøles langsommere mens den trekker seg sammen. Dette gjør at kjernen drar sammen delene av glasset som ligger lengst mot overflaten, slik at disse får en resulterende trykkspenning. Samtidig blir det en resulterende strekkspenning i kjernen (Patterson 2011).

Det at glasset har best trykkapasitet, forklarer hvorfor herdingen gir det vesentlig bedre bøyningskapasistet. Ved bøyning blir den høye trykkapasiteten utnyttet optimalt, samtidig som trykkspenningene reduseres. Spenningsfordelingene i figuren under er forenklet (Khorasani 2014).



Figur 2.8 - Spenningsfordeling i varmeherdet glass

I konstruksjonene som skal studeres i denne oppgaven er det kun aktuelt å bruke delvis eller fullt herdet glass, da det vil være nødvendig med høy spenningskapasitet på grunn av konsentrasjoner ved hullene. Det er ulike hensyn å ta for vertikale og horisontale glasskonstruksjoner. Hvis monolittisk sikkerhetsglass brukes i en fasade, vil det ved brudd bare falle ned små glassbiter som ikke utgjør noen fare. Dersom det benyttes laminert sikkerhetsglass, kan det etter brudd forekomme utrivning av punktfestene, slik at hele glassruten faller ned. Laminert delvis herdet glass har derimot bedre kapasitet mot gjennomlokking av festene etter brudd. Derfor bør det i fasader benyttes enten monolittisk sikkerhetsglass (Feldmann & Kasper et.al. 2014).

I gulv-glasskonstruksjoner er det nødvendig at glasset fortsatt har en gjenværende bærekapasitet etter brudd, derfor er kun laminert glass aktuelt. Også her er det laminert delvis herdet glass som best møter dette kravet. For gulv er det også anbefalt minst 3-lags laminering (Feldmann & Kasper et.al. 2014).

Det vil altså bli benyttet laminert delvis herdet glass i modelleringen av både fasade og gulv. Denne glasstypen har følgende materialparametere:

Materialparametere			
Tetthet	ρ [kg/m ³]	2500	
Elastisitetsmodul	E [MPa]	70 000	
Bruddstyrke delvis herdet glass	f _{b;k} [MPa]	70	
Bruddstyrke annilert glass	f _{g;k} [MPa]	45	
Poisson-tall	ν	0,23	

Tabell 2.2 - Materialparametere for herdet glass

Flere fremgangsmåter for å bestemme den dimensjonerende kapasiteten for glass er nevnt i en rapport (Feldmann & Kasper et.al. 2014), der standarder fra flere europeiske land er representert. En av disse metodene er også brukt i utkastet til ny europeisk standard fra 2009 for bestemmelse av styrken til glassruter, prEn 13474-3:

$$f_{g;d} = \frac{k_{mod}k_{sp}f_{g;k}}{\gamma_{M;A}} + \frac{k_{\nu}(f_{b;k} - f_{g;k})}{\gamma_{M;\nu}}$$
(Formel 2.3)

der

- lastvarighetsfaktoren kmod er 0,74 for vindlast og 0,29 for egen- og brukslast
- k_{sp} er faktor for overflateprofil, som er 1,0 for floatglass

- k_v er faktor for herding, = 1,0 for glass som er herdet liggende, som her antas
- $\gamma_{M;A} = 1.8$ er materialfaktoren for annilert glass
- $\gamma_{M;v} = 1,2$ er materialfaktoren for herdet glass

Dette gir en dimensjonerende bøyekapasitet $f_{g:d} = 39,3$ MPa for vindpåkjenning og 28,1 MPa for brukslast.

I bruksgrensetilstanden (SLS) angis største tillatte nedbøyning av glasset, $\delta_d = L/100$ for fasade og L/200 for gulv. L er den effektive spennlengden. På bakgrunn av Sadevs tekniske spesifikasjoner for sitt spiderprodukt, er det valgt glass med dimensjoner 2500 x 1845 mm. Dette gir dermed $\delta_d = 18,6$ mm for fasade og 9,3 mm for gulv.

2.2.3 Polyetylen

Polyetylen er et plastmateriale av polymerisert etylen. Det er en myk plasttype som fungerer som en demper mellom spideren og glassene. Det har en lav varmeledningsevne, og fungerer også som et isolerende lag mellom spider og glass. Materialparameterne (Vinidex 2016) er vist i tabell 2.3.

Materialparametere		
Tetthet	ρ [kg/m ³]	950
Elastisitetsmodul	E [MPa]	700
Flytegrense	f _y [MPa]	20
Poisson-tall	ν	0,4

Tabell 2.3 – Materialparametere for polyetylen

2.3 Spider-glassystem

Spideren som skal undersøkes og som danner grunnlag for parameterstudiene, kalt S3001EVO, er levert av Sadev. Glassene er ikke hentet fra noen spesiell leverandør, men på Sadevs liste over godkjente glassfabrikanter står blant andre Saint-Gobain Glass Solutions (SGGS). Sadev har satt et maksimalt areal av glassrutene på 4,65 m², og det er dette arealet som blir benyttet i denne oppgaven. På neste side følger detaljer og illustrasjoner hentet fra Sadevs produktbrosjyrer og tekniske spesifikasjoner.



Figur 2.9 – SADEV S3001EVO

Layouten til fasadesystemet og flere mål på spideren er som vist på figuren under. Boringen av hullene gjør at glassene er hengt ned fra de nederste armene på spideren over, med ett hjørne som er helt fikset og ett som kan bevege seg i én retning. Bunnen på glassene er holdt fast kun inn og ut av planet, der hullene i spideren gir en viss vandring mellom hullkant og bolt.



Figur 2.10 - S3001EVO med glass

2.4 Bruddteori

Når en konstruksjonsdel skal dimensjoneres, må det i tillegg til materialets dimensjonerende kapasitet også fastsettes hvilken opptredende spenning som er den kritiske. De ulike bruddteoriene som brukes, avhenger av om materialet er sprøtt eller duktilt. I denne oppgaven er det brukt stål, som er duktilt, og glass, som er sprøtt. Derfor må det brukes to forskjellige bruddteorier. Kun de valgte teoriene vil nevnes her.

Maksimal formendringsenergi-teorien ble fremsatt av M. Huber i 1904 og senere revidert av R. von Mises og H. Hencky. Denne teorien brukes som grunnlag for dimensjonering av duktile materialer, og kalles von Mises flytkriterium. Teorien sier at når den beregnede formendringsenergien i et materiale er like stor som formendringsenergien materialet har ved flyt i en strekktest, vil materialet oppleve flyt (Hibbeler 2011). Kort fortalt er von Mises-spenningen, σ_{vm} , en ekvivalent spenning gitt som resultanten av de delene av hovedspenningene som forårsaker formendringsenergi. I en tredimensjonal spenningstilstand er (Larsen 2010):

$$\sigma_{\rm vm} = \frac{\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}}{\sqrt{2}}$$
(Formel 2.4)

der

 σ_1 er den største hovedspenningen

 σ_2 er den mellomliggende hovedspenningen

 σ_3 er den minste hovedspenningen

Altså vil stålet gå i flyt når σ_{vm} = flytespenningen f_y. Von Mises-spenningen vil derfor være den dimensjonerende spenningen for spideren i FEM-analysene.

Maksimal normalspenning-teorien blir anvendt for sprø materialer. Sprø materialer er generelt forbundet med å ha en vesentlig dårligere strekkapasitet enn trykkapasitet. I slike materialer er det mange uregelmessigheter på mikronivå, som hulrom og sprekker. Særlig for glass er det veldig viktig overflaten ikke for mikrosprekker. at har store Det er strekkspenningskonsentrasjoner i slike mikrosprekker som initierer brudd, og dette er derfor den kritiske bruddmekanismen for glass (Ross et.al. 1999). Teorien sier derfor at den maksimale strekk-hovedspenningen som er beregnet for geometrien, ikke må overskride materialets bruddspenning når det utsettes for enkelt strekk (Hibbeler 2011). Siden dimensjonerende bøyespenning er lik dimensjonerende strekkspenning for glasset, vil derfor kriteriet i FEM-analysene være at hovedspenningene i strekk må være mindre enn $f_{g;d}$.

2.5 Finite elementers metode (FEM)

Finite elementers metode går ut på å gjøre en numerisk tilnærming av et systems globale oppførsel under ytre påvirkning, som for eksempel påført last, ved å dele det opp i et endelig antall enkle elementer og først betrakte hvert av disse. Dersom randbetingelsene er gode og oppdelingen er fin nok, vil den numeriske analysen samsvare bra med det virkelige problemet. Hvert elements hjørnepunkter kalles noder, der de er koplet sammen med de omkringliggende elementene. Det er disse nodenes reaksjon på de ytre påvirkningene som i første omgang er ukjent, og fysiske lover og matematiske likninger tildeles deretter nodene for å beskrive elementenes oppførsel lokalt, og deretter hvordan det påvirker systemet globalt. Dette resulterer i en matematisk modell av algebraiske likninger. Den matematiske modellen løses i FEM-analysen ved en numerisk prosess. Dersom løsningen ikke ar av tilfredsstillende nøyaktighet, repeteres den numeriske prosessen med justerte løsningsparametere. Kilden til unøyaktighet kan ligge i at modellen er for grovt oppdelt (meshet), eller at de ytre påkjenningene ikke påføres gradvis nok. Derfor kan en finere inndeling av meshen eller kraftpåføring i flere steg gi en mer nøyaktig tilnærmet løsning (Liu 2013).

Elementenes oppførsel beskrives av matrisestatikk. Nodekreftene [S] som virker på et element, beregnes ved å multiplisere elementets stivhetsmatrise [k] med elementets nodeforskyvningsmatrise [v] (Bell 2011):

[S] = [k][v].

Størrelsen på matrisene avhenger av antall frihetsgrader elementet har, som er summen av alle nodenes frihetsgrader. Matrisene på elementnivå settes deretter systematisk sammen til en tilsvarende matrise for hele systemet. Løsning av det globale matrisesettet vil gi systemets totale respons på de ytre påkjenningene. Dette gir for systemet:

[**R**] = [**K**][**r**].

Kreftene som er påført systemet og systemets stivhetsmatrise er kjent, og *systemets* nodeforskyvninger er resultatet som ønskes. Dette gir:

$$[\mathbf{r}] = \frac{[\mathbf{R}]}{[\mathbf{K}]} = [\mathbf{K}]^{-1} [\mathbf{R}].$$

Siden stivheten er den inverse av fleksibiliteten F, kan dette, dersom matrisene er inverterbare, skrives (Bell 2011):

[**r**] = [**F**] [**R**].

2.6 ANSYS

I denne oppgaven har FEM-analysene blitt utført i ANSYS version 18.2 Educational Teaching Introductory. Analysene har blitt satt opp ved hjelp av Workbench og løst i Mechanical. Analysene er tredimensjonale, og geometrien er lagd i ANSYS CAD-modul SpaceClaim. Denne studentversjonen av ANSYS har en størrelsesbegrensning på det numeriske problemet som kan løses. Dette innebærer at maksimalt nodeantall er satt til 32 000.

Likningsløseren Sparse Direct Solver er brukt i analysene. Dette er den eneste løsningsmotoren som ikke bruker iterasjon, men løser matrisene direkte ved eliminasjon av likninger. Den bruker mye minne, men er samtidig robust og gir lettere konvergerte analyser (ANSYS 2018).

Analysene er utført som ikke-lineære, elastisk-plastiske, ved å bruke et bi-lineært forhold mellom det elastiske og plastiske området (BISO) for stålet.

Elementene som er benyttet i FEM-modellene er SOLID186 og SOLID187. Førstnevnte er et 20-noders heksaeder, og det siste et 10-noders tetraeder. Hver node har tre translatoriske frihetsgrader. Det vil si at SOLID186 har 60 frihetsgrader, og SOLID187 har 20. Element SOLID187 er brukt i spideren og SOLID186 i glasset, automatisk valgt av programmet på bakgrunn av de gitte materialparametere. Elementene er vist på figur 2.11 fra ANSYS Help Viewer (ANSYS 2018).



Figur 2.11 - Elementtyper

Kontakt mellom objektene i FE-modellen er definert ved paring av kontakt- og målflater. Disse kontaktelementene er lagt utenpå de solide elementene i den delen av modellen der det skal være kontakt. For kontaktflatene er elementtypen CONTA174 brukt, og TARGE170 for målflatene. CONTA174 kan ha trekantet eller firkantet form, mens TARGE170 har 10 mulige former. Kontaktbetingelsene er satt til «bonded», slik at glidning forhindres. Kontaktalgoritmen er satt til augmentert Langrange. Denne algoritmen sørger for minimal penetrering mellom materialene, slik at kontakten opprettholdes (ANSYS 2018). Kontaktstivheten er satt til å bli oppdatert ved hver iterasjon. Kontaktpar-elementene er vist på figur 2.12 (ANSYS 2018).



Figur 2.12 - Kontaktelementer

2.7 Eksisterende litteratur

Det foreligger lite forskning på spider-glassfasader, sammenliknet med andre deler av konstruksjonsfaget. Mye av arbeidet som er utført, er mest fokusert på glasset.

Wang et.al. (2012) undersøkte ulike spidertyper og fremsatte et forslag til nytt formelverk for dimensjonering av spidere. Formlene inkluderte faktorer for spenningskonsentrasjoner, basert på sammenlikninger av elastiske lineære FE-analyser, teoretiske beregninger og testresultater. Ifølge artikkelen skal disse faktorene korrigere problemet med at teoretiske, elastiske beregninger gir en tendens til underdimensjonering. De kom også fram til at spidere av aluminium er bedre enn stål, grunnet lavere egenvekt.

Sivanerupan et.al. (2016) gjorde en undersøkelse av spider-glass-fasadesystemer i sin helhet, både ved testing av fullskala-modeller og FE-analyser i ANSYS. Her ble systemet utsatt for last parallelt med glassplanet for å simulere seismiske påkjenninger. De kom fram til at brudd typisk oppsto i glasset ved en maksimal toppdrift på 2,1%. Faktoren som i størst grad bidro til systemets kapasitet for drift i planet, var vandringen mellom boltene og de over-dimensjonerte hullene i spiderarmene. Parameterstudier av glassgeometri, glasstykkelse, fugetype og fugetykkelse viste at følgende gav systemet bedre egenskaper for denne typen last:

- reduksjon av fugens stivhet
- økt tykkelse på fugen
- større forhold mellom høyde og bredde for glassene
- tykkere glass.

En eksperimentell undersøkelse ble i 2015 utført av Renes et.al., der punktfestede glassplater på 360x460 mm og 360x860 mm ble trykktestet. Konklusjonen var at de store glassene opplevde to til tre ganger større deformasjon enn de små ved samme last, og at bæreevnen ble redusert med 50%. De fant også ut at et knust glasslag i et laminert glass ikke hadde noen betydelig bæreevne, og at graden av herding har mye å si for bøyemotstanden.
3 Metode

3.1 Etablering av modell

Første steg for å lage en modell til den numeriske analysen, var å tegne den tredimensjonale geometrien. Til dette ble CAD-programmet SpaceClaim brukt, som er en modul integrert i ANSYS-programpakken. Som grunnlag for konstrueringen ble det brukt todimensjonale digitale tegningsfiler (.dwg). En spider er, sammenliknet med mange andre konstruksjonsdeler, meget detaljert. Detaljene er viktige for å få modellen så lik produktet som mulig, slik at analysene av realistiske brukssituasjoner blir gode. De er også viktige for parameterstudiene som bygger på modellen. Endringene av parametere i disse studiene er små, for å unngå å havne for langt fra den opprinnelige modellen. For at dette skal ha noe poeng, må derfor detaljene også være gjenskapt. Detaljer som ikke fremgikk av tegningene, ble etter beste evne supplert fra bilder.

3.2 Laboratorietester

For å få modellen så lik det virkelige produktet som mulig, ble den sammenliknet med en laboratorietest utført av CTDEC for Sadev. CTDEC er sertifisert i henhold til ISO 9001-standarden. Testen omfatter 20 testeksemplarer, 10 for last parallelt med glassplanet og 10 for last vinkelrett på glassplanet. Testene er utført på en kompresjonsmaskin av typen ZWICK Z600E som har en stempelfart på 1 mm/min (Sadev 2018).

3.2.1 Vertikal test

Spideren er festet til en brakett med en M12 bolt gjennom kjernen, mens de to nedre armene er anlagt på en plate festet til kompresjonsmaskinens ramme. Trykk påføres på toppen av armen med hullet på 17 mm av en flatbunnet sylinder med 12 mm diameter.

Oppsettet av forsøket er vist på figur 3.1 (Sadev 2018).



Figur 3.1 – Oppsett av vertikal bøyetest

3.2.2 Horisontal test

Spideren er festet til en brakett med en M12 bolt gjennom kjernen, mens de to nedre armene er anlagt på en plate festet til kompresjonsmaskinens ramme. Trykk påføres på toppen av armen med hullet på 17 mm av en flatbunnet sylinder med 12 mm diameter.

Oppsettet for påkjenninger vinkelrett på glassplanet er vist på figur 3.2 (Sadev 2018).



 $Figur \ 3.2-Oppsett \ av \ horisontal \ b \\ øyetest$

3.2.3 Testresultater

Laboratorietestene er gjort med fokus på nedbøyning. Testene viser nødvendige krefter for nedbøyning på 1 mm og 2 mm, hhv. F_1 og F_2 . Subindeks *v* angir vertikal test, h angir horisontal. Det er disse resultatene modellen har blitt verifisert opp mot. Testene inneholder også resultater for plastisk deformasjon, men det har ikke blitt fokusert på i modellen. Nedbøyningsresultatene for hvert forsøk er vist i tabell 3.1.

Forsøk	Fv1 [N]	F v2 [N]	Fh1 [N]	F h2 [N]
1	1996	3694	2345	4150
2	2205	4213	2193	3880
3	2553	4624	2231	4047
4	2350	4382	2345	4165
5	2363	4417	2334	4195
6	2283	4431	2313	4057
7	2222	4231	2729	4556
8	2253	4218	2536	4347
9	2333	4452	2481	4250
10	2538	4578	2284	4046
Gj.snitt	2310	4324	2379	4169

Tabell 3.1 - Resultater av laboratorietest

3.3 Verifikasjonsanalyser

I analysene for å verifisere modellen, ble testene fra CTDEC forsøkt gjenskapt med størst mulig nøyaktighet. En del forhold ved testene var derimot ukjente, hvilket innebærer at det ble gjort en del antakelser. Dette diskuteres i det følgende.

I den vertikale testen er det oppgitt at spideren er festet til braketten med en bolt, men det står ikke i hvilken grad dette fastholder spideren mot rotasjon. I tillegg vil også, ettersom deformasjonen fremskrider, glidning forekomme mellom trykksylinderen og det opprinnelige angrepspunktet, og mellom armene og anleggsplaten.

I den horisontale testen er spideren anlagt på to halvsylindriske opplegg. Kontaktpunktet mellom disse og spideren må også kunne antas å endres noe i løpet av deformasjonen.

De fysiske oppleggene og festebolten fra testene ble ikke gjenskapt i modellanalysen. I stedet ble de opprinnelige kontaktflatene i testene modellert som fastholdte i den grad det er rimelig å anta. Disse kontaktflatene er derfor konstante gjennom hele analysen, men kan ha flyttet seg litt i laboratorietestene.

Kreftene brukt i analysene er gjennomsnittsverdiene fra tabell 3.1. Lastpåføringen følger samme hastighet som CTDECs trykkmaskin, 1 mm/min.

3.3.1 Vertikal verifikasjonsanalyse

Kraften (A) ble påført langs en linje på toppen av spiderens øverste venstre arm. Dette angrepspunktet er konstant gjennom hele analysen, selv om det i testen kan ha forekommet glidninger ettersom deformasjonen øker.

Opplager B er kun fastholdt i y-retning, for å simulere platen armen er anlagt på. Fri glidning i x-retning er en forenkling da det vil være en friksjon mellom armen og plata.

Opplager C (gul pil) forestiller innfestingen av spideren til braketten og virker på overflaten med de to små hullene. Her er alt fastholdt, med unntak av rotasjon om z-aksen. Det kan tenkes at det kan oppstå en liten rotasjon, avhengig av hvor hardt bolten er dratt til. Derfor er det innlagt en liten rotasjon i pilens retning, fordelt på de 121 tidsstegene.

Nederste høyre arm har ikke fått noen randbetingelser. I testen vil den mest sannsynlig løftes fra støtteplaten, dersom rotasjon mot klokka forekommer.



Figur 3.3 - Opplagerbetingelser vertikal analyse

Modellen er meshet med en elemet-kantstørrelse på 6,2 mm. Totalt har modellen 17 545 elementer og 30 830 noder.



Figur 3.4 - Meshing



Figur 3.5 – Vertikal deformasjon 1

Deformasjon tilsvarende CTDECs 1 mm-deformasjon.



 $Figur \ 3.6-Vertikal \ deformasjon \ 2$

Deformasjon tilsvarende CTDECs 2 mm-deformasjon.

3.3.2 Horisontal verifikasjonsanalyse

Kraften (A) ble påført som et trykk på toppoverflaten av spiderens kjerne.

Opplager B og C virker begge langs hver sin linje på undersiden av armene. Siden spideren er anlagt på sylindriske opplegg i testen, bør dette samsvare bra med den faktiske kontaktflaten. B er helt fastholdt mot translatoriske bevegelser mens rotasjonen er fri. C er fastholdt i z- og yretning, men ellers fritt i x-retning og til å rotere. Her gjelder det sekundære koordinatsystemet vist midt på figuren (aksefarge og akse er like som for det globale). Valget av randbetingelser for B og C er vilkårlig, det kunne like godt vært omvendt.

Linjene B og C virker på, er konstant gjennom hele analysen. Også her vil det kunne oppstå glidning mellom armene og oppleggene ettersom deformasjonen skrider frem, og således spennet øke. Det hadde vært et alternativ og modellert oppleggene som helt stive objekter og brukt kontakt med friksjon mellom dem og spideren, men det ble ikke tid nok til å sette seg inn i hvordan disse kontaktbetingelsene fungerer i ANSYS. Denne forenklingen bør likevel ikke være av betydningen, siden deformasjonene uansett er små.



Figur 3.7 – Opplagerbetingelser horisontal analyse

Meshingen er identisk som i den vertikale analysen.



Figur 3.8 – Horisontal deformasjon 1

Deformasjon tilsvarende CTDECs 1 mm-deformasjon.



Figur 3.9 – Horisontal deformasjon 2

Deformasjon tilsvarende CTDECs 2 mm-deformasjon.

På grunn av definisjonen av positiv retning, er det «Min.»-etiketten som viser den største nedbøyningen. Det oppstår også et vesentlig oppløft i endene av de armene som er opplagt.

3.4 Verifiseringsresultat

Vertikal test		Vertikal	Avvik	Horisontal test		Horisontal	Avvik
		analyse	[%]			analyse	[%]
Fv1,avg [N]	2310	2310		Fh1,avg [N]	2379	2379	
δ_{v1} [mm]	1	1,045	+4,50	δ_{h1} [mm]	1	0,962	-3,8
Fv2,avg [N]	4324	4324		Fh2,avg [N]	4169	4169	
δ _{v2} [mm]	2	2,110	+5,50	δh2 [mm]	2	1,706	-14,7

Tabell 3.2 - Resultater av verifikasjonsanalyser

Modellen er stivere enn testobjektene for horisontal belastning, mens den er mindre stiv for vertikal belastning. Avvikene i modellen i forhold til laboratorietestene er innenfor det aksepterte området, med unntak av den største nedbøyningen i den horisontale testen. Avvik opp til 5% mellom modellen og eksperimentene anses som bra, 5-10% anses som akseptabelt. Modellens oppførsel opp til 1 mm deformasjon er viktigst å fange opp. Over dette punktet vil den bevege seg inn i plastisitetsområdet. Feilkilden for avvikene ved 2 mm deformasjon ligger sannsynligvis nettopp i den ikke-lineære delen av analysen. Plastisk oppførsel er så klart ønskelig å unngå i analysene av de realistiske brukssituasjonene, og således kunne de største nedbøyningene vært utelatt fra verifikasjonen. Siden de neste analysene ikke skal omfatte plastisk oppførsel og brudd, anses derfor modellen som god.

Videre ble det undersøkt hvordan disse nedbøyningene blir i realistiske brukssituasjoner, ved ulike case-studier. Der ble det fokuseres på spenninger og deformasjoner.

3.5-Case studier

For å undersøke spiderens egenskaper, ble det utført 12 casestudier med numeriske analyser for ulike brukssituasjoner. Dette omfatter to overordnede case-typer; en case for fasadesystem og en for gulvsystem. Under hver av disse typene ble det utført en referansecase med spideren S3001EVO. I tillegg ble det også utført parameterstudier under hver case, for å få et bilde av hvordan endring av de ulike parameterne påvirker spiderens kapasitet, og om det er mulig å lage en bedre spider med utgangspunkt i Sadevs S3001EVO.

Alle casene er utført på en tenkt bygning. Denne bygningen er spesielt viktig for casene som omfatter fasadesystem, siden vindbelastningen er beregnet for denne bygningen. Bygningen er enkelt utformet, med rektangulær grunnflate = 15x24 m og høyde 12 m. Dette kan være et kontorbygg på 3 eller 4 etasjer, beliggende i f.eks. Vågsøy i Sogn og Fjordane. Dette er et av stedene i landet med størst referansevindhastighet. Størst vindtrykk vil forekomme på den største fasaden, enten som trykk- eller sugekrefter. Denne fasadens areal er 288 m². Vindkreftene er beregnet i henhold til NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009. Beregningene er vist i «Vedlegg».

Gulvet i casene ligger i 2. etasje og er beregnet som kontorareal. Plasseringen av gulvet i bygget spiller igjen stor rolle, det kan også tenkes å være en gangbro i 3. etasje. Lastberegningene er vist i «Vedlegg».

I fasadecasene opptrer krefter både vinkelrett på og parallelt med glassplanet, henholdsvis fra vind og glassenes egenvekt. I gulvcasene virker både gulvlasten og egenlasten vinkelrett på planet.



Figur 3.10 - Case-bygning

3.5.1 - Casetype fasade

Denne casetypen ble brukt på case 1-5. Case 1 er referansecase for fasade-casene. Modellen som er analysert omfatter fire loddrette ruter av floatglass og en spider. I tillegg til spideren og glassene, er også polyetylenforingene mellom spideren og glassene tatt med i modellen. Svivelboltene som fester glassene til spideren er utelatt. I stedet er fleksibiliteten disse boltene gir forsøkt simulert ved å la foringene være festet til glasset med en fast kopling, og foringene deretter fast opplagt i de 12 ytre festepunktene. Samme koblingstype er også brukt mellom spider, foring og glass. Siden polyetylen er et mye mykere materiale enn stål og glass, vil det derfor ikke oppstå større spenninger i innfestingspunktene grunnet bøyning. Muligheten for bevegelse mellom glass og spider grunnet de ekstra store hullene, bør også til en viss grad være ivaretatt ved å modellere foringene på denne måten. Den faste innspenningen av ytterpunktene er en forenkling, og er gjort for å holde modellen på en brukbar størrelse. I realiteten vil alle ytterpunktene være festet til hver sin spiderarm, som vil deformeres slik som spideren i modellen. Fugemassen mellom glassene er også utelatt. Denne er svært viktig for fasadesystemer som fungerer som klimaskjerm, men det er her antatt at fugene ikke vil bidra med noen vesentlig strukturell kapasitet i systemet. Modellen er vist under, målene er i mm.



Figur 3.11 - Modell av spider og glass

3.5.2 – Casetype gulv

Denne casetypen ble brukt på case 6-12. For å gjøre denne casen sammenliknbar med fasadecasen, ble det brukt like store glassruter her. Dermed er modellen lik som for fasade-casene, men rotert 90°. For å gjøre det mulig å bruke så store glassruter i gulvsystemet har analysene blitt utført med en gulvlast på 2 kN, selv om NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2008 angir 3 kN nyttelast for gulv i kontorarealer i Norge. Det kunne så klart blitt anvendt 3 kN nyttelast, men da måtte rutene blitt mindre, og mye av sammenlikningsgrunnlaget ville falt bort. Case 6 er referansecase for gulv-casene.

3.5.3 – Oversikt over casestudier

De uthevede feltene i tabellen viser referanse-casene. I disse casene ble spideren fra Sadev brukt. I de øvrige casene ble ulike parametere ved spideren og glassene endret. Glassene fikk kun forskjellige tykkelser, mens spiderenes parametere ble endret i varierende omfang.

Case	Modell	Glasstykkelse	Belastningstype	
1	\$3001EVO	20 mm	Vindlast trykk	
2	S3001EVO	30 mm	v monost, u yrrr	
3	S3001EVO	20 mm	Vindlast, sug	
4	Parameterstudie 1	20 mm	Vindlast trykk	
5	Parameterstudie 1	30 mm	v monost, u yrrk	
6	S3001EVO	30 mm		
7	Parameterstudie 1	30 mm		
8	Parameterstudie 2	30 mm	Gulvlast	
9	Parameterstudie 3	30 mm	Guiviust	
10	Parameterstudie 4	30 mm		
11	Parameterstudie 4	35 mm		
12	Parameterstudie 4	40 mm		

3.6 – Parameterstudier

Med utgangspunkt i Sadevs S3001EVO-spider, ble fire forskjellige nye spidere utarbeidet ved å endre ulike parametere. Enkelte endringer er små, mens andre er heller store og utført for å sammenlikne S3001EVO med de mer vanlige spiderene på markedet.

3.6.1 – Parameterstudie 1

Modifisert spider nr. 1 er den spideren som er mest lik S3001EVO. Den har fått 1,4 mm tykkere gods i nedre del av kjernen, mens øvre del av kjernen er uendret. I tillegg er uthulingen på undersiden av spiderens armer 2,4 mm lavere, slik at godstykkelsen i øvre del av armene dermed øker tilsvarende.



Figur 3.12 – Parameterendringer 1

3.6.2 – Parameterstudie 2

I spider nr. 2 er endringen av godstykkelsen i kjernen videreført fra spider nr. 1. Høyden av kjernen er også endret, og derfor også høyden av armene. Denne høydeendringen avtar mot armenes ende, der høyden er lik som før. Bredden på toppen av armene er også endret, mens bredden i bunnen er uendret. I tillegg er uthulingen under armene igjen endret.



Figur 3.13 – Parameterendringer 2

3.6.3 – Parameterstudie 3

Spider nr. 3 er lik nr. 2, bortsett fra at den ikke har noen uthuling under armene. Derfor er denne spideren vesentlig tyngre enn Sadevs spider, som vist i tabell 3.4. Hovedårsaken til å lage en parameterstudie helt uten uthulinger, er at det er slik majoriteten av spiderene på markedet er utformet. Målet er derfor å danne et bilde av hvor mye disse uthulingene har å si for spiderens prestasjoner. Bildet på neste side viser spiderens underside.



Figur 3.14 – Parameterendringer 3

3.6.4 – Parameterstudie 4

Spider nr. 4 er også lik nr. 2, med unntak av at uthulingene er mindre. Her er de trukket 2,4 mm ned, slik som i spider nr. 1. Dette er altså en krysning mellom nr. 1 og nr. 2, og parameterendringene kan ses på disses illustrasjoner.

3.7 - Oppsummering av spiderene i parameterstudiene

Spidertype	Endrede parametere	Stålvekt	Differanse	
S3001EVO	Referansemodell	1,428 kg	Referansemodell	
Parameterstudie 1	- Tykkere gods i kjerne	1,529 kg	0,100 kg / 7,0 %	
	- Lavere ununing	- Lavere utnuling		
	- Tykkere gods i kjerne			
Parameterstudie 2	- Økt høyde	1,788 kg	0,360 kg / 25,2 %	
	- Bredere armer	, ,	0,000 ng / 20,2 /0	
	- Rotert uthuling			
	- Tykkere gods i kjerne			
Parameterstudie 3	- Økt høyde, bredere armer	2,109 kg	0,681 kg / 47,7 %	
	- Ingen uthuling			
	- Tykkere gods i kjerne			
Parameterstudie 1	- Økt høyde	1 847 kg	0 118 kg / 20 3 %	
i arameterstudie 4	- Bredere armer	1,047 Kg	0,410 Kg / 29,5 %	
	- Lavere uthuling			

Tabell 3.4 – Oversikt over parameterstudier

4 Resultater

4.1 – Case 1: S3001EVO med 20 mm glass og belastning fra vindtrykk

Illustrasjonen under viser oppsettet for fasademodellen med den originale spideren, S3001EVO. Det er her brukt 20 mm floatglass. Polyetylet-foringene er festet til glasset, og foringene deretter fast opplagt (A) i de 12 ytre festepunktene. Opplag B er innfestingen av spideren til fasadens bærekonstruksjon, også denne er helt fastholdt mot bevegelse. C er vindtrykket som virker på glasset i z-retning (ut av papirplanet). Kreftene D og E er egenvekten av de to nederste glassene, og virker som en linjelast på disse glassenes øverste kant. Egenvekten av de to øvre glassene tas opp av spiderene i raden over.



Figur 4.1 – Oppsett av fasademodell med vindtrykk

Spideren har en elementstørrelse på 10 mm, mens glassene er meshet i elementer på 140 mm. Den grove meshen for glassene skyldes programversjonens begrensning i antall elementer og noder. Dessuten er glassenes plateform en enkel geometri sammenliknet med spideren, så det har blitt prioritert å holde spiderens mesh finest mulig.



Figur 4.2 – Meshing av fasademodell



Figur 4.3 – Ekvivalente spenninger i spider

Den største ekvivalente spenningen, 315,4 MPa, oppstår på undersiden av armene, innerst ved kjernen. Spenningene er relativt store utover hele undersiden av armene og i buene på kjernen.



Figur 4.4 – Deformasjon av spider

Figuren over viser deformasjonen av spideren i z-retning. Deformasjonen øker fra kjernen og utover armene, og den største deformasjonen på 1,29 mm oppstår helt i enden av armene.



Figur 4.5 – Maksimal hovedspenning i glass

Den største maksimale hovedspenningen er på 66,6 MPa og oppstår i kanten av hullene, hvor det er en spenningskonsentrasjon. Over det meste av glasset er spenningen vesentlig lavere.



Figur 4.6 – Nedbøyning av glass

Den største opptredende nedbøyningen av glassrutene er 13,2 mm. Det er også et tydelig oppløft i hjørnene.

4.2 – Case 2: S3001EVO med 30 mm glass og belastning fra vindtrykk

Oppsettet er likt som i case 1, men kreftene D og E er økt til 4104,5 N pga. økt glasstykkelse.



Figur 4.7 – Ekvivalent spenning i spider

Største ekvivalente spenning er på 288 MPa, og er lokalisert på den buede kanten av kjernen.



Figur 4.8 – Deformasjon av spider

Spideren deformeres på samme måte som i 1, men her er største deformasjon 0,79 mm.



Figur 4.9 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning i glassene er 19,6 MPa og opptrer i hullkantene. Spenningen over det meste av glassplatene er ellers vesentlig lavere.



Figur 4.10 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 4,9 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de foregående analysene.

4.3 – Case 3: S3001EVO med 20 mm glass og belastning fra vindsug

Oppsettet og meshingen er likt som i case 1, men vindtrykket er her erstattet med vindsug.



Figur 4.11 – Oppsett av fasademodell med vindsug



Figur 4.12 – Ekvivalente spenninger i spider

Største ekvivalente spenning er 181,5 MPa og oppstår i kanten av det nedre hullet til bolten som hindrer rotasjon, på den siden av spiderkjernen som er nærmest hovedbæresystemet.



Figur 4.13 – Deformasjon av spider

Største deformasjon er 0,65 mm. Den er her markert som negativ fordi retningen på belastningen er snudd i forhold til de tidligere analysene.



Figur 4.14 - Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 33,5 MPa. Spenningene er ellers relativt små.



Figur 4.15 – Nedbøyning av glass

Glassene får her en bøyning utover, som er størst midt på rutene med 7,2 mm. Hjørnene får en nedbøyning, inn mot bærestrukturen.

4.4 – Case 4: Spider 1 med 20 mm glass og belastning fra vindtrykk



Modelloppsettet er likt som i case 1, med unntak av spideren.

Figur 4.16 - Ekvivalent spenning i spider

Største ekvivalente spenning er på 312,2 MPa og oppstår på oversiden av spiderens armer, rett før overgangen til festepunktene.



Figur 4.17 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 1,2 mm.



Figur 4.18 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 63,9 MPa. Spenningene er ellers relativt små.



Figur 4.19 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 13,1 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de foregående analysene.

Den ekvivalente spenningen i modell nr. 1 er litt mindre enn i EVO-spideren i case 1. Men forskjellen er liten, og den modifiserte spideren holder ikke.

4.5 – Case 5: Spider 1 med 30 mm glass og belastning fra vindtrykk

Modelloppsettet er likt som i case 2, med unntak av spideren.



Figur 4.20 – Oppsett av fasademodell



Figur 4.21 – Ekvivalent spenning i spider

Største ekvivalente spenning er på 241 MPa, på toppen av spiderens armer, rett ved kjernen.



Figur 4.22 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 0,73 mm.



Figur 4.23 - Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 19,5 MPa. Spenningene er ellers relativt små.



Figur 4.24 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 4,9 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de tidligere analysene.

Med økt glasstykkelse er spenningene i den modifiserte spideren vesentlig mindre. Spenningen og nedbøyningen i glasset er også liten, og systemet holder for vindtrykket.

4.6 - Case 6: Bruk av S3001EVO og 30 mm glass i et gulvsystem

Illustrasjonen under viser oppsettet av gulvmodellen i de neste analysene. Her virker alle krefter i samme retning, som trykk (C) på glassenes overflate. I dette ligger både nyttelasten for gulv og egenvekten av glasset.

Som i fasadeanalysene, er modellen opplagt i de 12 perifere festepunktene (A). Opplegg B er også likt som i fasadeanalysene.

Meshingen er lik som i de foregående analysene. Grunnet begrensningen i antall elementer og noder, er mesh-størrelsen for spideren i noen av tilfellene opp til 0,2 mm større.



Figur 4.25 – Oppsett av gulvmodell



Figur 4.26 – Meshing av gulvmodell



Figur 4.27 - Ekvivalent spenning i spider

Den største ekvivalente spenningen, 367,3 MPa, oppstår på undersiden av armene, ytterst ved festepunktene. Spenningene er relativt store utover hele undersiden av armene og i buene på kjernen.



Figur 4.28 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 2,48 mm.



Figur 4.29 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 128,4 MPa. Spenningene i glasset for øvrig, er relativt små.



Figur 4.30 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 4,9 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de tidligere analysene.

Kapasiteten til EVO-spideren er kraftig overskredet, hvilket samsvarer med at den også var det i analysen av det første fasadesystemet. Kapasiteten til glasset er overskredet i enda større grad, og nedbøyningen er også stor.

4.7 – Case 7: Spider nr. 1 og 30 mm glass under gulvbelastning

F: Gulv_30m m_Mod.1 Equivalent Stress ANSYS Type: Equivalent (von-Mises) Stress Unit: MPa Time: 1 13.04.2018 03.23 322,18 Max 286,48 250,79 215,09 179,39 143.7 108 72,308 36,612 0,91688 Min 50.00 100.00 (mm) 0.00 25,00 75.00

Modelloppsettet er likt som i case 6, med unntak av spideren.

Figur 4.31 - Ekvivalent spenning i spider

Største ekvivalente spenning på 322,2 MPa oppstår på oversiden av armene, rett før overgangen til kjernen. Spenningen er også ganske høy videre langs toppen av armene.



Figur 4.32 – Deformasjon av spider

Den største deformasjonen er 1,29 mm og oppstår helt i enden av armene, som sett i de tidligere analysene.



Figur 4.33 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 41,2 MPa. Spenningene ellers i glassplatene, er vesentlig mindre.



Figur 4.34 – Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 8,9 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de tidligere analysene.

Spider nr. 1 har ikke kapasitet nok til å ta opp kreftene. Den er likevel bedre enn EVO, og særlig deformasjonen er mye mindre. Glasset får også mye mindre spenninger og nedbøyning.

4.8 – Case 8: Spider nr. 2 og 30 mm glass under gulvbelastning

Modelloppsettet er likt som i case 6 og 7, med unntak av spideren.



Figur 4.35 - Ekvivalent spenning i spider

Den største ekvivalente spenningen, 299,5 MPa, oppstår på undersiden av armene, innerst ved kjernen. Spenningene er relativt store også mellom armene, i buene på kjernen.



Figur 4.36 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 0,99 mm.


Figur 4.37 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 40,7 MPa. Spenningene ellers i glassplatene, er vesentlig mindre.



Figur 4.38 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 8,8 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de tidligere analysene.

Spider nr. 2 får mindre ekvivalente spenninger og deformasjon enn nr. 1 i case 7. Likevel overskrider spenningen spiderens kapasitet. Resultatene for glasset er nesten likt i case 7 og 8.

4.9 - Case 9: Spider nr. 3 og 30 mm glass under gulvbelastning

Modelloppsettet er likt som i case 6-8, med unntak av spideren.



Figur 4.39 - Ekvivalent spenning i spider

Største ekvivalente spenning på 332,6 MPa oppstår på oversiden av armene, rett før overgangen til kjernen. Spenningen er ellers relativt liten.



Figur 4.40 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 0,85 mm.



Figur 4.41 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 40,4 MPa. Spenningene ellers i glassplatene, er som tidligere vesentlig mindre.



Figur 4.42 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 8,7 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de tidligere analysene.

Spider nr. 3 får større spenninger enn mod. 1 og 2, men mindre enn EVO. Deformasjonen av spideren er litt mindre. Spenning og nedbøyning av glasset er også de minste så langt.

4.10 – Case 10: Spider nr. 4 og 30 mm glass under gulvbelastning

Modelloppsettet er likt som i case 6-9, med unntak av spideren.



Figur 4.43 – Ekvivalent spenning i spider

Den største ekvivalente spenningen, 299,5 MPa, oppstår på undersiden av armene, innerst ved kjernen. Spenningene er relativt store også mellom armene, i buene på kjernen.



Figur 4.44 – Deformasjon av spider

Den største deformasjonen er på 0,98 mm. Deformasjonen følger samme mønster som før.



Figur 4.45 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 40,6 MPa. Spenningene ellers i glassplatene, er som tidligere vesentlig mindre.



Figur 4.46 – Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 8,7 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de tidligere analysene.

Spider 4 har største ekvivalente spenning under stålets karakteristiske flytegrense, men over den dimensjonerende. Resultatet for glasset er nesten helt likt som i case 9.

4.11 – Case 11: Spider nr. 4 og 35 mm glasstykkelse under gulvbelastning

Modelloppsettet er likt som i case 10, men glasset er 5 mm tykkere. Dette gir en total gulvlast på 4,029 kPa.



Figur 4.47 – Ekvivalent spenning i spider

Den største ekvivalente spenningen, 274 MPa, oppstår på undersiden av armene, innerst ved kjernen. Dette er på samme sted som i case 10.



Figur 4.48 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 0,88 mm.



Figur 4.49 - Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 27 MPa. Spenningene i glasset for øvrig, er relativt små.



Figur 4.50 - Nedbøyning av glass

Største nedbøyning er på 6,1 mm midt på glassrutene. Nedbøyningen følger samme mønster som sett i de foregående analysene.

Spider nr. 4 får ekvivalente spenninger under flytegrensen, inkludert materialfaktoren. Dette til tross for økt glasstykkelse og dermed også økt belastning. Det tykkere glasset får vesentlig mindre hovedspenninger og nedbøyning. Denne kombinasjonen av spider og glass holder for bruk i gulvsystemet.

4.12 - Case 12: Spider nr.4 og 40 mm glasstykkelse under gulvbelastning

Modelloppsettet er likt som i case 10, men glasset er nå 10 mm tykkere. Dette gir en total gulvlast på 4,177 kPa.



Figur 4.51 – Ekvivalent spenning i spider

Den største ekvivalente spenningen, 280,8 MPa, oppstår på undersiden av armene, innerst ved kjernen. Dette er på samme sted som i case 10 og 11.



Figur 4.52 – Deformasjon av spider

Deformasjonen følger samme mønster som før, og den største er på 0,83 mm.



Figur 4.53 – Maksimal hovedspenning i glass

Største maksimale hovedspenning oppstår i glassenes hullkant, og er på 18,6 MPa. Spenningene i glasset for øvrig, er relativt små.



Figur 4.54 - Nedbøyning av glass

Med enda tykkere glass blir spenningene igjen for store i modifisert spider nr. 4. Glasset får mindre hovedspenning og mindre nedbøyning. Nedbøyningen av spideren er også litt mindre.

4.13 - Oppsummering av analyseresultater etter spidertype

Ekstremalverdiene er uthevet i **fet** skrift. Kolonnen i parentes viser resultatene for fasade under belastning fra vindsug.

Spider	EVO				Parameter- studie 1			Parameter- studie 2	Parameter- studie 3	Parameter- studie 4		
System	Fasade			Gulv	Fasade			Gulv	Gulv	Gulv		
t _{glass} [mm]	20	30	(20)	30	20	30	30	30	30	30	35	40
σ _{max,spider} [MPa]	315,4	288,0	(181,5)	367,3	312,2	241,1	322,2	299,5	332,6	276,8	274	280,8
$\delta_{max,spider}$ [mm]	1,29	0,798	(-0,65)	2,47	1,20	0,727	1,29	0,980	0,853	0,978	0,883	0,832
σ _{max,glass} [MPa]	65,56	19,56	(33,5)	128,37	63,95	19,48	41,70	40,66	40,36	40,62	27,00	18,60
$\delta_{max,glass}$ [mm]	13,23	4,90	(-7,24)	23,57	13,15	4,88	8,85	8,75	8,70	8,74	6,11	4,45

Tabell 4.1 - Oppsummering av resultater

4.14 - Belastning-spenning-grafer

De følgende grafer viser spenning mot overflatelast for hver case. Spenningen σ viser ekvivalent spenning for spider og maksimal hovedspenning for glasset, jfr. tabell 4.1.



Figur 4.55 – Spenning-last case 1

Forhold mellom last og spenninger for case 1 med S3001EVO og 20 mm glass.



Figur 4.56 – Spenning-last case 2

Forhold mellom last og spenninger for case 2 med S3001EVO og 30 mm glass.



Figur 4.57 – Spenning-last case 3

Forhold mellom last og spenninger for case 3 med S3001EVO og 20 mm glass.



Figur 4.58 - Spenning-last case 4

Forhold mellom last og spenninger for case 4 med Sider 1 og 20 mm glass.



Figur 4.59 – Spenning-last case 5

Forhold mellom last og spenninger for case 5 med S3001EVO og 30 mm glass.



Figur 4.60 – Spenning-last case 6

Forhold mellom last og spenninger for case 6 med S3001EVO og 30 mm glass.



Figur 4.61 – Spenning-last case 7

Forhold mellom last og spenninger for case 7 med Spider 1 og 30 mm glass.



Figur 4.62 – Spenning-last case 8

Forhold mellom last og spenninger for case 8 med Spider 2 og 30 mm glass.



Figur 4.63 - Spenning-last case 9

Forhold mellom last og spenninger for case 9 med Spider 3 og 30 mm glass.



Figur 4.64 - Spenning-last case 10

Forhold mellom last og spenninger for case 10 med Spider 4 og 30 mm glass.



Figur 4.65 - Spenning-last case 11

Forhold mellom last og spenninger for case 11 med Spider 4 og 35 mm glass.



Figur 4.66 – Spenning-last case 12

Forhold mellom last og spenninger for case 12 med Spider 4 og 40 mm glass.

4.15 - Belastning-deformasjon-grafer

De følgende grafer viser deformasjon mot overflatelast for hver case. Deformasjonen δ viser både spider og glass, jfr. tabell 4.1.



Figur 4.67 – Deformasjon-last case 1

Forhold mellom last og deformasjoner for case 1 med S3001EVO og 20 mm glass.



Figur 4.68 – Deformasjon -last case 2

Forhold mellom last og deformasjoner for case 2 med S3001EVO og 30 mm glass.



Figur 4.69 – Deformasjon -last case 3

Forhold mellom last og deformasjoner for case 3 med S3001EVO og 20 mm glass.



Figur 4.70 – Deformasjon -last case 4

Forhold mellom last og deformasjoner for case 4 med Sider 1 og 20 mm glass.



Figur 4.71 – Deformasjon -last case 5

Forhold mellom last og deformasjoner for case 5 med S3001EVO og 30 mm glass.



Figur 4.72 – Deformasjon -last case 6

Forhold mellom last og deformasjoner for case 6 med S3001EVO og 30 mm glass.



Figur 4.73 – Deformasjon -last case 7

Forhold mellom last og deformasjoner for case 7 med Spider 1 og 30 mm glass.



Figur 4.74 – Deformasjon -last case 8

Forhold mellom last og deformasjoner for case 8 med Spider 2 og 30 mm glass.



Figur 4.75 – Deformasjon -last case 9

Forhold mellom last og deformasjoner for case 9 med Spider 3 og 30 mm glass.



Figur 4.76 - Deformasjon -last case 10

Forhold mellom last og deformasjoner for case 10 med Spider 4 og 30 mm glass.



Figur 4.77 – Deformasjon -last case 11

Forhold mellom last og deformasjoner for case 11 med Spider 4 og 35 mm glass.



Figur 4.78 – Deformasjon -last case 12

Forhold mellom last og deformasjoner for case 12 med Spider 4 og 40 mm glass.

5 Diskusjon

5.1 Om analysene

Alle casestudier er utført med glass på 4,65 m² areal, som nevnt i kapittel 2.3. Dette er det maksimale arealet Sadev foreskriver for bruk sammen med deres spiderprodukt. For å undersøke hvordan spideren fungerer til bruk under norske forhold, er vindlasten som er brukt beregnet utfra den største opptredende referansevindhastigheten i Norge. Nasjonalt tillegg for Norge i NS-EN 1990 krever en nyttelast for kontorarealer på 3 kN/m², mens den generelle verdien er gitt til å være 2-3 kN/m². En last på 3 kN/m² ville, siden glassarealet i gulvcasene er likt som i fasadecasene, gitt en urealistisk konstruksjon. Den nødvendige glasstykkelsen ville blitt unormalt stor, og grunnet høy egenlast sammen med større brukslast, ville også spiderene måtte blitt vesentlig mye større. Derfor ble casestudiene for gulvsystem utført med en nyttelast på 2 kN/m².

Som i alle numeriske analyser, er modellene her forenklede i forhold til virkeligheten. Dette var nødvendig for å få modeller som gav et nøyaktig nok resultat, samtidig som de var så enkle som mulig, og med overkommelig beregningstid. Uansett er alle case-analyser gjort på samme måte, slik at sammenlikningene gir et godt bilde på hvilke betydninger de små parameterendringene mellom modellene har.

Boltene er utelatt fra modellene. Boltene som brukes har som regel et ledd, slik at innfestingen mellom spider og glass blir momentfrie. Disse boltene vil likevel overføre kreftene med en viss eksentrisitet, og vil kunne gi en hevarmseffekt som ikke blir tatt høyde for når de sløyfes. Likevel vil den momentfrie innfestingen ivaretas når glassene modelleres med polyetylenforingene som en type fjær.

En annen forenkling er at silikonfugen mellom glassene ikke er tatt med. I en slik analyse, der all bevegelse skjer inn i glassplanet, bør ikke dette påvirke resultatet i særlig grad. Fugen har lav stivhet i den retningen, sammenliknet med når bevegelsene er store parallelt med planet, som i undersøkelsen av Sivanerupan et.al. (2016), nevnt i kapittel 2.

Analysene er elastisk-plastiske, men utført med en beregningsmodell basert på en forenklet spennings-tøynings-kurve. BISO, bi-lineær isotropisk herding, bruker én lineær kurve for å definere det elastiske området, og én for det plastiske, med von Mises flyt-kriterium og en antakelse om isotropisk arbeids-herding (Gaertner & de Bortoli 2006). Dette ser for noen av analysene ut til å gi en flytegrense litt høyere enn det som faktisk er satt for stålet.

5.2 Casetype fasade

I casestudiene som omfatter fasadesystem, case 1-5, ble det utført analyser med to ulike glasstykkelser og to forskjellige spider-typer. I case 1, som er referanseanalysen for fasadesystemet, ble spider S3001EVO brukt sammen med 20 mm glass. Nyttelasten var her trykk fra vindlast. Spideren fikk en største ekvivalente spenning på 315,35 MPa, lokalisert på armenes underside. Spenningene er ellers relativt store på hele undersiden av armene og på den nedre kanten av kjernen. Dimensjonerende flytekapasitet er 276,19 MPa, så her er spiderens kapasitet overskredet med 14,2%. Den største deformasjonen i spideren er 1,29 mm, lokalisert i enden av armene slik som forventet. I tråd med laboratorieforsøkene fra CTDEC, bør en deformasjon på over 1 mm indikere at spideren oppnår flyt. Glassene får spenningskonsentrasjoner i hullene, der den største maksimale hovedspenningen i strekk er 65,6 MPa. Dette er en kapasitetsoverskridelse for glasset på nesten 70%, da dimensjonerende kapasitet f_{g:d} er 39,3 MPa. Spenningene i glassplatene ellers er mye mindre. På yttersiden ligger spenningen i overgangen mellom strekk og trykk, mens den går over til strekk på innsiden av glassrutene. Den største deformasjonen i glassrutene oppstår på midten, og er på 13,2 mm. Dette er under kravet i bruksgrensetilstanden på 18,6 mm.

I case 2 er eneste forskjellen på modellen at glasstykkelsen er økt til 30 mm. Dette har, til tross for større egenvekt av glasset, gitt en største ekvivalente spenning på 288 MPa. Dette er mindre enn i case 1. Lokasjonen av den største spenningen er flyttet fra oversiden av armene, til å ligge mellom armene på kjernens buede del. Spenningen er akkurat under stålets karakteristiske flytkapasitet, men over den dimensjonerende kapasiteten. Spiderens største deformasjon er på 0,79 mm. Glasset får naturligvis også mindre spenninger, siden det er tykkere. Spenningskonsentrasjonene rundt og i hullene gir en største maksimale hovedspenning på 19,6 MPa. Spenningene i glasset for øvrig er mye mindre, med samme spenningsfordeling over platas tverrsnitt som i case 1. Ytter-overflaten er i en omtrentlig nøytral spenningstilstand, mens innsiden er i strekk. Innbøyningen av glassrutene er med et maksimum på 4,9 mm vesentlig mindre enn i case 1.

I case 3 består systemet av S3001EVO og 20 mm glass som i case 1, men vindlasten er her den største sugekraften som oppstår på case-bygningen. Dette er det eneste av casestudiene der

spideren belastes i denne retningen, hvilket vil si i dens svake retning, siden den ikke er symmetrisk. Her blir det trykkspenninger på den siden der armene er uthult. Dette kunne ført til lokale knekkinger av disse relativt tynne delene, men spenningene ble ikke store nok til at det skjer. Den største ekvivalente spenningen oppstår på den smale toppkanten av armene, innerst ved kjernen. Denne er på 181,5 MPa, langt under spiderens dimensjonerende kapasitet. Derfor er ikke vindsug en kritisk lastsituasjon, og flere casestudier av denne typen ble derfor ikke utført. Deformasjonen er også liten, med 0,65 mm i enden av armene. Glassene fikk 33,5 MPa som største maksimale hovedspenning, i spenningskonsentrasjoner rundt hullene som i de første casene. På yttersiden av fasaden er det nå strekk over størstedelen av glassplatene, men spenningene her er relativt små. Utbøyingen av glassene er på maksimalt 7,2 mm, som også er relativt lite.

Case 4 er første case der det er gjort parameterstudier på spideren. Ellers er den helt lik case 1. Endringene på spideren er, som tidligere beskrevet, ganske små. Den største ekvivalente spenningen har heller ikke gått ned mye fra case 1, bare fra 315,35 til 312,2 MPa. Lokasjonen er derimot en helt annen, på den smale kanten av spiderarmen, lengre fram mot festehullene. Sammenholdt med at stålmengden i denne spideren er 7% større enn i S3001EVO, er ikke disse parameterendringene særlig effektive. Den største deformasjonen er 1,2 mm, som også er noe mindre enn i case 1. For glassene er resultatene også nesten like, med største hovedspenning på 63,9 MPa og største innbøying på 13,1 mm.

I case 5 er spideren lik som i case 4, men glasset er som i case 2 10 mm tykkere. Den største ekvivalente spenningen oppstår også nå på smalsiden av spiderarmen, men helt innerst ved kjernen. Denne spenningen er på 241 MPa, og spideren har derfor tilstrekkelig kapasitet. Deformasjonen er på 0,73 mm. Glassene får nesten identiske resultater som i case 2, med største spenning på 19,5 MPa og samme innbøying.

Ved å sammenlikne case 1, 2, 4 og 5 under ett, blir resultatene mer tydelige. Med 20 mm glass var gevinsten av å endre spiderens parametere liten. Med 30 mm tykt glass var spenningene i spiderene uansett mindre, men med 30 mm glass ble også forskjellen i spenning mellom S3001EVO og spider 1 mye større.

Forskjellen mellom case 1 og 4 var som nevnt på kun 3,15 MPa, da eneste forskjell mellom modellene var S3001EVO og spider 1. Mellom case 2 og 5 er forskjellen ca. 47 MPa. Dette tyder på at disse parameterendringene i spideren ikke er effektive nok i seg selv, og at hvor mye deformert glassene blir har like mye å si. En stor helning i glasset vil gjøre at kreftene overføres

til spideren på en annen måte. Det kan derfor være lurt å overdimensjonere glassene, selv om de tynnere glassene er tilstrekkelige både i ULS og SLS.

5.3 Casetype gulv

I casestudiene som omfatter gulvsystem, case 6-12, ble det utført analyser med til sammen fem ulike spidere og tre glasstykkelser. Her virker alle lastene i samme retning, ned mot spiderene. Gulvlasten er lik i alle tilfeller, mens egenlasten varierer noe med de ulike glasstykkelsene.

I case 6, som er referansecasen for gulv, ble S3001EVO brukt sammen med 30 mm glass. Dette gav alt for store spenninger i hele systemet. Spideren fikk en største ekvivalente spenning på 367,3 MPa og en nedbøyning på 2,47 mm. Det kritiske området for S3001EVO er fortsatt på den uthulede siden av armene. I glassene var største maksimale hovedspenning på 128,4 MPa, også her i spenningskonsentrasjoner rundt hullene. Nedbøyningen av glassene var også for stor, med 23,6 mm.

I case 7 er spider 1 brukt, ellers er modellen lik som i case 6. Her har parameterendringene fra S3001EVO til spider 1 gitt litt bedre resultater enn i den første fasade-casen, men hverken spider eller glass har tilstrekkelig kapasitet i bruddgrensetilstanden. Den største spenningen i spideren er på 322,2 MPa, og nedbøyningen er på 1,29 mm. Spenningene er relativt høye på hele undersiden (smalsiden) av armene, der den største er lokalisert innerst ved kjernen. Nedbøyningen er nesten bare halvparten av nedbøyningene i S3001EVO i case 1. Glasset har en største spenning på 41,2 MPa og en nedbøyning på 8,85 mm. Dette er innenfor kravene til SLS, men ikke ULS.

I case 8 er det gjort en ny parameterstudie, med spideren kalt spider 2. Ellers er modellen lik den i case 7. Her er den største ekvivalente spenningen 299,5 MPa, lokalisert på den uthulte siden av armene, lengst inn mot kjernen. Nedbøyningen er relativt liten, på 0,99 mm. Resultatene for glasset er ikke særlig endret fra case 7; den største spenningen er på 40,7 MPa, og nedbøyningen på 8,75 mm. Denne spideren er vesentlig modifisert fra S3001EVO, med ca. 25% større stålmasse. Den har ca. 18% mer stål enn spider 1. Spenningene gikk derimot mer ned fra S3001EVO til spider 1, enn spenningene fra spider 1 til spider 2. Tatt i betraktning økningen i stålmengde mellom spider 1 og 2, ser det derfor ut til at parameterendringene i spider 2 er mindre effektive enn i spider 1. I case 9 er spider 3 brukt. Denne er helt uten uthuling under armene. Dette gjør denne spideren mer lik majoriteten av spiderene på markedet, og er derfor en viktig parameterstudie. Siden den er massiv, er stålmengden nesten 50% større enn i S3001EVO. Største ekvivalente spenning er på 332,6 MPa, som er høyere enn i både spider 1 og 2 i tilsvarende casestudier. Den er lokalisert på smalsiden av armene, innerst ved kjernen. Det blir en spenningskonsentrasjon i disse punktene, og spenningen er ellers lav utover i armene. Spenningene fordeles ikke like jevnt i denne spideren som i de andre. Derfor er ikke dette et effektivt design, særlig når den store stålmengden tas i betraktning. Nedbøyningen er derimot den minste så langt, med 0,85 mm på det meste. Glassene får en største maksimale hovedspenning på 40,4 MPa, og en største nedbøyning på 8,70 mm. Dette er tilnærmet likt som i case 7 og 8.

Case 10, 11 og 12 omhandler siste parameterstudie, med spider 4. Case 10 er lik de foregående gulvcasene, med glasstykkelse 30 mm. Her er den største ekvivalente spenningen lokalisert ved uthulingen på armene, innerst ved kjernen. Den er på 276,8 MPa, hvilket betyr at den dimensjonerende kapasiteten er overskredet med 0,2%. Nedbøyningen er på 0,98 mm. Glasset får en største maksimal hovedspenning på 40,6 MPa og en nedbøyning på 8,74 mm. Disse resultatene er ganske like som i case 8.

I case 11 har modellen 35 mm glasstykkelse, så egenlasten er 16,67% større enn i case 10. Likevel er den største spenningen i spider 4 nå litt mindre, med 374 MPa. Dette er under spiderens dimensjonerende kapasitet, med en utnyttelse på 99,2%. Glasset er nå også tilstrekkelig dimensjonert, med en største maksimale hovedspenning på 27 MPa. Nedbøyningen er på 6,11 mm. Dette er det første systemet som er tilstrekkeligdimensjonert for bruk i gulv. Spideren er akkurat under grensen, men glasset er godt innenfor sin dimensjonerende bruddkapasitet.

I case 12 ble glasstykkelsen økt med ytterligere 5 mm, til 40 mm. Dette gir 33% større egenvekt enn i case 10, og dette ble en for stor økning. Spideren fikk en største spenning på 280,8 MPa, som er større enn i både case 10 og 11. Nedbøyningen er derimot den minste av alle, med bare 0,83 mm. Glasset får naturlig nok mindre spenning og nedbøyning enn i case 10 og 11, henholdsvis 18,6 MPa og 4,45 mm.

5.4 Oppsummering

For fasadesystemet var det modellen i case 5 som var best, og den eneste som var tilstrekkelig dimensjonert. Det samme gjelder case 11 for gulvsystemet.

Den beste spideren for bruk i fasade er spider 1. Den er generelt bedre enn S3001EVO, men ikke uavhengig av hvilken glasstykkelse den brukes sammen med.

Den beste spideren for bruk i gulv er spider 4. Den er vesentlig modifisert i forhold til S3001EVO, med større høyde og bredere armer. Det fører til en økt stålmengde på 29,3%, men den er vesentlig mer effektiv.

Det er en tydelig tendens i alle casestudiene at tykkelsen på glasset også har mye å si for hvor godt spiderene fungerer, selv om glasset i seg selv har mer enn nok kapasitet. Dette gjelder ikke i like stor grad for spider 4, der spenningsforskjellen i spideren mellom 30 og 40 mm glasstykkelse er på bare 3,2 MPa. Derfor ser det ut til at de parameterendringene som er gjort på spider 4 gir en god og stabil spider.

Spider 3 representerer de mer typiske spiderproduktene på markedet. Resultatene for denne spideren viser at dette er et ineffektivt design, og at Sadevs S3001EVO med sine uthulede armer er en stor forbedring. Det er tydelig at denne utformingen gir en bedre fordeling av spenningene i hele spideren, slik at mer av materialet blir utnyttet.

6 Konklusjoner

Hovedkonklusjonene fra dette arbeidet er:

- Spidere med delvis uthulede armer er mer effektive enn de mer tradisjonelle, massive spiderene. Spenningene fordeles jevnere, og mer av spideren utnyttes. Den mest effektive spideren er spider nr. 4, og det beste resultatet oppnås med 35 mm glasstykkelse.
- Siden spiderens armer fungerer som utkragere, ligger det kritiske tverrsnittet i armene, nærmest kjernen. Dette er likevel avhengig av hvordan spideren er belastet. Siden den ytterste delen av spideren har et tynnere tverrsnitt, kan det kritiske tverrsnittet også flytte seg utover.
- Fasadesystemer utsatt for store vindlaster kan støttes av relativt slanke spidere. I gulvsystemer, der lastene er større og virker i én retning, kreves det spidere med høyere og bredere tverrsnitt.
- En økning av godstykkelsen på toppen av spiderens kjerne og armer, samt bredere, mindre trapesformede armer, gir en mer effektiv spider.
- En overdimensjonering av glassrutene gir en mer fordelaktig kraftoverføring til spiderene.
- Deformasjonen av spiderene er små når maksimal spenning oppnås, og bidrar lite til systemets deformasjon.
- Det er avgjørende at innfestingen av glassplatene til spideren er fleksibel, slik at det ikke oppstår unødig store momenter. De borede hullene i glasset gir spenningskonsentrasjoner, og er det klart kritiske området når glassene skal dimensjoneres.
- Stålmengden er økt i den optimerte spideren, men det eneste som må endres i produksjonsprosessen, er støpeformene. Spidere med større kapasitet muliggjør større glassruter, som igjen fører til færre spidere i en hel fasade. Derfor trenger ikke den totale kostnaden å øke.

7 Videre arbeid

For å få en mest mulig komplett vurdering av disse glasskonstruksjonene, er det nødvendig å også undersøke effekten av termiske påvirkninger. Dette gjelder særlig for fasadesystemer som skal brukes i Norge, siden temperaturene her kan svinge svært mye. I forbindelse med dette kan det også undersøkes hvilke konsekvenser feilmontasje gir, altså hvis boltene ikke plasseres i senter av de overdimensjonerte hullene i spideren, slik at alle muligheter til fri bevegelse tas bort.

Det er også en mulig problemstilling å undersøke systemets oppførsel etter at brudd har oppstått lokalt. For eksempel spiderens kapasitet mot asymmetrisk belastning ved sammenbrudd av en glassplate, eller hvor mye resterende kapasitet ulike glass-laminater har etter at et av glasslagene har gått i brudd. Modellen kan også videreutvikles, ved å inkludere flere detaljer.

Det kan også være interessant å gjøre en studie tilsvarende i denne oppgaven av spidere med klemme-innfesting, og sammenlikne disse to spider-typene.

8 Referanseliste

ANSYS (2018). ANSYS Help Viewer. ANSYS versjon 18.2. ANSYS, Inc.

- Bell, K. (2011). *Matrisestatikk. Statiske beregninger av rammekonstruksjoner*. Bergen: Fagbokforlaget.
- Feldmann, M. & Kasper, R. et.al. (2014). *Guidance for European Structural Design of Glass Components*. Luxemburg: Publications Office of the European Union
- Gaertner, E. L. & de Bortoli, M. D. G. (2006). Some Aspects for the Simulation of a Non-Linear Problem with Plasticity and Contact. Artikkel. Embraco S.A.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mechanics of materials, eighth edition in SI units*. Singapore: Prentice Hall, Pearson Education South Asia Pte Ltd.
- Khorasani, N. (2004). Design Principles For Glass Used Stucturally. Masteroppgave. Lunds Universitet.
- Larsen, P. K. (2010). *Dimensjonering av stålkonstruksjoner, 2. utg.* Trondheim: Tapir Akademisk Forlag.
- Liu, G. R. (2013). *The Finite Element Method. A practical course. Second edition.* Oxford: Butterworth-Heinemann.
- ACI-ASTM CF8M (SCS14, SCS14A, 1.4408, J92900) Cast Stainless Steel. Nettside. Tilgjengelig fra: <u>https://www.makeitfrom.com/material-properties/ACI-ASTM-CF8M-</u> SCS14-SCS14A-1.4408-J92900-Cast-Stainless-Steel. (29.04.2018).
- Patterson, M. (2011). *Structural glass facades and enclosures*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- Pixabay (2018). Bilder under fri lisens. Nettsted. Tilgjengelig fra: https://pixabay.com/
- Renes, M. et.al. (2015). *Laboratory experiments og point fixed glasses*. Artikkel. Ungarn: Scientific SOC Silicate Industry.
- Ross, C. T. F. et.al. (1999). *Strength of materials and structures, 4. utg.* Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Sadev (2018). *Attache S3001EVO Essais Mécaniques*. Testrapport. Tilgjengelig (ved forespørsel, passordbeskyttet) fra:

http://www.sadev.com/blog/gamme_brochure/essais-et-certificats/?lang=en. (22.02.2018)

Sivanerupan, S. et.al. (2016). Analytical study of point fixed glass facade systems under monotonic in-plane loading. Artikkel. Advances in structural engineering, vol. 16.

Steel Founder's Society of America (2004). Steel Castings Handbook.

- Tylek, I. og Kuchta, K. (2014). *Mechanical properties of structural stainless steels*. Cracow University of Technology.
- Vinidex Pty Ltd (2016). *Polyethylene properties*. Nettside. Tilgjengelig fra: <u>http://www.vinidex.com.au/technical/material-properties/polyethylene-properties/</u>. (29.04.2018).
- Wang, Y. et.al. (2012). Bearing Capacity of Non-linear Spiders used in Point Supported Glass Facades. Artikkel. International Journal of Steel Structures.

Vedlegg

For bygningen som ble studert, ble følgende data brukt:

Lastberegninger:

Størst vindtrykk vil forekomme på den største fasaden, enten som trykk- eller sugekrefter.

Denne fasadens areal = $24 \times 12 \text{ m} = 288 \text{ m}^2$.

Beregning av vindkrefter på fasaden i henhold til NS-EN 1991-1-4:2005+NA:2009:



Største opptredende referansevindhastighet i Norge, $v_{b,0} = 31$ m/s. (Finnes i en rekke kommuner rundt omkring i landet, spesielt langs kysten).

Terrengkategori 0: Kystterreng eksponert for åpent hav

 $z_0 = 0,003 \text{ m}$

$$z_{min} = 2 m$$
$$z = 12 m$$
$$z_{max} = 200 m$$
$$v_b = c_{dir} c_{season} v_{b,0}$$

Anbefalte verdier for cdir og cseason i hht. NS-EN-1991-1-4 er 1,

 $\Rightarrow v_b = v_{b,0} = \underline{31 \text{ m/s.}}$

Stedsvindhastigheten

 $v_m(z) = c_r(z) * c_0(z) * v_b$

der z er høyde over terrenget

c_r er ruhetsfaktoren

c₀ er terrengformfaktoren

z_{min}<z<z_{max} gir

$$c_r(z) = k_r * \ln(z/z_0)$$

 $k_r = 0.19*(z_0/z_{0,II})^{0.07}$, der $z_{0,II} = 0.05$ m for terrengkategori II.

 $k_r = 0,19*(0,003/0,05)^{0,07} = 0,156$

 $c_r = 0,156*ln(12/0,003) = 1,2939$

 $c_0 = 1$ (antatt <u>ikke</u> beliggende i en ås/ligger i flatt kystterreng)

 $v_m(z) = 1,2939*1*31 \text{ m/s} = 40,11 \text{ m/s}$

Turbulensfaktoren $k_l = 1$

Standardavviket $\sigma_v = k_r * v_b * k_l = 0,156*31*1 = 4,84 \text{ m/s}$

Turbulensintensiteten $I_v(z) = \sigma_v / v_m(z) = 4,84/40,11 = 0,12$
Vindhastighetstrykket

$$\begin{aligned} q_p(z) &= [1 + 7*I_v(z)]*0, 5*\rho_{luft}*v^2{}_m(z) \\ q_p(z) &= [1 + 7*0, 12]*0, 5*1, 225 \text{ kg/m}^{3*}40, 11^2 \text{ m}^2/\text{s}^2 = \underline{1813, 13 \text{ Pa}} \end{aligned}$$

$$z_e = h = 12 m \Rightarrow q_p(z_e) = q_p(z)$$

Vind vinkelrett på langsiden:

e = b = 2h = 24 m

h/d = 12/15 = 0.8

For sone D (lovegg):

 $c_{pe,10} = +0,773$

 $c_{pe,1} = +1,0$

- $c_{pe} = c_{pe,1} (c_{pe,1} c_{pe,10}) log_{10}A$
- $A >> 10 \ m^2 => c_{pe} = c_{pe,10} = +0,773$

Vindtrykket på sone D, $w_e = q_p(z) * c_{pe}$

w_e = 1813,13 Pa * 0,773 = 1401,55 Pa

For sone E (levegg):

 $c_{pe,10} = -0,447$

 $c_{pe,1} = -0,447$

 $c_{pe} = -0,447$

we = 1813,13 Pa * (-0.447) = - 810,47 Pa.

 $G_{glass} = 490,5$ Pa for 20 mm glasstykkelse

 $G_{glass} = 735,75$ Pa for 30 mm glasstykkelse

 $G_{glass} = 858,38$ Pa for 35 mm glasstykkelse

 $G_{glass} = 981$ Pa for 40 mm glasstykkelse

Nyttelaster og lastkombinasjoner er beregnet i henhold til NS-EN 1991-1-1:2002+NA:2008: Laster fasade:

$$\begin{split} Q_d &= \gamma_{Gj,sup} * G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1} \\ \gamma_{Gj,sup} &= 1,2 \\ \gamma_{Q,1} &= 1,5 \\ Q_d &= 1,2 * G_{glass} + 1,5 * w_{e,lo} \end{split}$$

Vindlasten virker vinkelrett på glassplanet, egenlasten parallelt.

 $Q_{lo} = 1,5*1401,55 Pa = 2102,325 Pa$ $Q_{le} = 1,5*(-810,47) Pa = -1215,705 Pa$ $G_{d,20} = 1,2*490,5 Pa = 588,6 Pa$ $G_{d,30} = 1,2*735,75 Pa = 882,9 Pa$

Laster for gulv:

 $Q_d = \gamma_{Gj,sup} * G_{kj,sup} + \gamma_{Q,1} * Q_{k,1}$

 $\gamma_{Gj,sup} = 1,2$

$$\gamma_{Q,1} = 1,5$$

Brukslast for gulv, $Q_{k,1} = 2 \text{ kN/m}^2$

 $Q_d = 1,2 * G_{glass} + 1,5*Q_k$

 $Q_{d,30} = 1,2{\ast}735,75\ Pa + 1,5{\ast}2000\ Pa = 3882,9\ Pa$

 $Q_{d,35} = 1,2*858,38 \ \text{Pa} + 1,5*2000 \ \text{Pa} = 4030,0 \ \text{Pa}$

 $Q_{d,40} = 1,2*981 \ Pa + 1,5*2000 \ Pa = 4177 Pa$



Norges miljø- og biovitenskapelige universitet Noregs miljø- og biovitskapelege universitet Norwegian University of Life Sciences Postbaks 5003 NO-1482 Ås Norway