

Gitterskall i tre

Konseptuell Design av Moderne
Konstruksjoner

Mari Seip Furunes

Bygg- og miljøteknikk

Innlevert: juni 2015

Hovedveileder: Anders Rönquist, KT

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Institutt for konstruksjonsteknikk

Problemformulering

Masteroppgave for Stud.techn. Mari Seip Furunes, våren 2015

Ingeniørarkitektur – Konseptuell design av moderne konstruksjoner

Gitterskall

Engineering Architecture - Conceptual design of modern structures

Gridshell

For å utvikle nye og gode konstruksjoner i et samfunn under stadig utvikling er det stort behov for kunnskap om, og interesse for konseptuell design av konstruksjoner. For at vi som ingeniører skal bidra på beste måte i dette, må vi trene oss i å håndtere komplekse funksjonelle og kontekstuelle parametere i tillegg til relevant konstruksjonsteknikk fra våre tradisjonelle prosjekteringsfag. Her ønsker vi å videreutvikle kompetanse i skjæringsområdet mellom ingeniørfaget og arkitektur. En naturlig del av arbeidet vil være å sette seg godt inn i aktuelle referansebygg og sentral arkitektur innen den konstruksjonstypen som er valgt. I tillegg til konstruktive egenskaper vil begrep som funksjonalitet og form som visuelt uttrykk stå sentralt i oppgaven. Vi jobber under flere mulige hovedkonsepter:

Gitter skall: nye metoder for å designe og bygge frie former i en enhetlig prosess. Det vil være masterstudenter på arkitektur med tilsvarende oppgave. Vi oppfordrer til et tetsamarbeid; gjerne med modellbygging og modelltesting i lab

Hvordan finne form: direkte inngrep med arkitektonisk formgivning – frigjøre potensiale i komplekse konstruksjoner.

Formens funksjonalitet: lete etter og utnytte former i naturen til nye konstruktive elementer i bygninger – dine egne konsepter.

Oppgaven gjennomføres i samarbeid med fakultet for arkitektur og billedkunst i form av veiledning og midtsemesterevalueringen sammen med masterstudenter i arkitektur på AB fakultetet.. Gode overslagsberegninger og sammenlikninger av ulike konstruksjonsløsninger vil bli tillagt større vekt enn detaljert dimensjonering av en enkelt løsning.

Type oppgave: Konseptutredning, bygningsprosjektering; tegning, beregning, rapport

Samarbeid med: Fakultet for Arkitektur og Billedkunst ved Bendik Manum

Kontaktperson: Anders Rönnquist

Forord

Denne oppgaven utgjør den avsluttende delen av mitt masterstudie ved Norges Teknisk-Naturvitenskaplige Universitet (NTNU) i Trondheim. Oppgaven er skrevet over 19 uker i løpet av vårsemesteret 2015 i samarbeid med Institutt for Konstruksjonsteknikk.

Oppgaven er en foreslått samarbeidsoppgave mellom Institutt for Konstruksjonsteknikk, ingeniørarkitektur – konseptuell design av moderne konstruksjoner og Fakultet for Arkitektur og Billedkunst. Vi var 4 masterstudenter fra Konstruksjonsteknikk som assisterte to arkitektstudenter med deres masteroppgave som gikk ut på å konstruere et gitterskall i tre.

Jeg ønsket å jobbe med et samarbeidsprosjekt fordi jeg synes det er spennende å jobbe sammen om ett konkret mål. Jeg var også interessert i å lære mer om tre som byggemateriale. Tre er det mest brukte byggematerialet i Norge, og er absolutt det mest bærekraftige. Det blir derimot ofte valgt bort fordi det opptrer mye mer ustabil enn for eksempel stål og betong.

Jeg ønsker å takke Anders Rønnquist og Bendik Manum for veiledning, arkitektstudentene Steinar Hillersøy Dyvik og John Haddal Mork og ingeniørstudentene Henrik Treseng, Martin Kjellesvik, Marius Bakkejord for samarbeidet. Jeg vil også takke Mott MacDonald for bidrag til forståelse bak prosjektering og beslutningsprosessen i et prosjekt. Jeg ønsker også å takke Tresenteret for materialer og Nathalie Labannotte for assistanse med Abaqus.

Trondheim, juni 2015

Mari Seip Furunes

Sammendrag

Gitterskall består av ordene gitter og skall. Ordet gitter presiserer at konstruksjonsformen har en bærekonstruksjon bestående av et gitter og dermed ikke kontinuerlige flater. Ordet skall betyr at det er en trykkonstruksjon bygget opp av dobbelkrummede flater. Dette innebærer en rekke utfordringer, men også en rekke fordeler. Blant annet en mulighet til å oppnå et stort spenn samtidig som konstruksjonen ikke blir oppfattet som massiv. Jeg har valgt å fordype meg i dette temaet fordi denne konstruksjonsformen har et potensial som er verdt å sette fokus på.

Denne oppgaven er delt i 5 hovedkapitler, der det første er en enkel innledning til gitterskallets opprinnelse. Kapittel 2 omhandler et utvalg relevante konstruksjoner det har vært nødvendig å sette seg inn i. Uten forståelsen de har gitt hadde det vært særs utfordrende å jobbe med en egen modell. Kapittel 3 består av materialtester utført på tre, både i enkeltlekter og segmenter. Kapittel 4 omhandler vår prosess fra småskala bøyingsforsøk til fullskala modell, og hvilke avgjørelser vi tok underveis og hvilke erfaringer vi tilegnet oss. Det siste kapittelet oppsummerer vår erfaring med både gitterskall og tre som materiale. Jeg diskuterer også noen relevante problemstillinger relatert til denne konstruksjonen.

Abstract

Gridshell is a word consisting of the terms grid and shell. The term grid specifies the form of construction that has a support structure consisting of a grid and not continuous surfaces. The word shell means that there is a pressure structure constructed of a double-curved surface. This involves a number of challenges, but also a lot of benefits. For instance, a possibility to achieve a great span without the construction perceived as massive. I have chosen to immerse myself in this subject because this form of construction has a potential that is worth focusing on.

This thesis is divided into five main chapters, the first of which is a basic introduction to the origin of the gridshell. Chapter 2 deals with a few relevant structures it has been necessary to analyze. Without understanding them, it would have been especially challenging to work with a model. Chapter 3 consists of material tests conducted on the timber, both in individual barge and segments. Chapter 4 discusses our process from small scale bending experiments to full-scale model, and what decisions we made along the way and what experiences we have gained. The final chapter summarizes our experience with both lattice shell and wood as a material. I also discuss some relevant issues related to this construction.

Innholdsfortegnelse

Problemformulering	1
Forord	3
Sammendrag	5
Abstract	6
Innholdsfortegnelse	7
Kapittel 1: Innledning.....	9
1.1 Gitterskallets opprinnelse	9
1.2 Lette konstruksjoner	13
1.3 Ny overskrift.....	14
Kapittel 2: Referansebygg	16
2.1 Canopy structure.....	16
2.2 Mannheim Multihalle	21
2.3 Japan Pavilion Expo 2000	23
2.4 Downland Gridshell	24
2.5 Savill Building.....	26
2.6 Toledo Gridshell Napoli:.....	27
Kapittel 3: Materialtesting.....	31
3.1 Nedbøyning enkeltlekt.....	31
3.2 Nedbøyning i enkeltlekt	34
3.3 Segmentnedbøyning manuell	40
3.4 Segmentnedbøyning Sintef.....	45
3.5 Segmentbjelke oppbøyning	52
3.6 Kommentar.....	55
Kapittel 4: Bygging	57
4.1 Utvikling av egen modell	57
4.2 Buegang.....	58
4.3 Forsøk i lab.....	62
4.4 Skalltesting	67
4.5 Hovedmodell	68
Kapittel 5: Diskusjon.....	76
5.1 Erfaring.....	76
5.2 Utfordringer ved parametrisk modellering	78
5.3 Naturlaster	78
5.4 Tett tak.....	78
5.5 Arkitekt vs. ingeniør.....	79

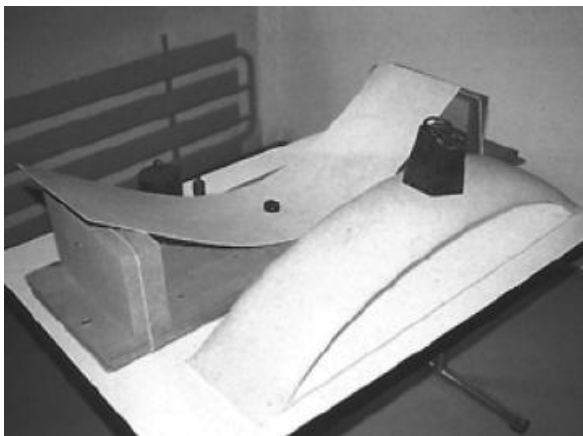
Referanseliste	82
Bilder:.....	83
Vedlegg	85

Kapittel 1: Innledning

1.1 Gitterskallets opprinnelse

Ved utformingen av en bygning må ingeniøren og arkitekten komme opp med et fysisk objekt for å løse et bestemt problem. Dette problemet har utallige aspekter, blant annet urban integrasjon, strukturell effektivitet, miljøprestasjoner, estetikk og kostnader. Utformingen av det endelige objektet innebærer valg av form, kostnader og strukturell effektivitet [1].

Rette elementer har vist seg å være mindre effektive enn buede elementer i form av ren strukturell ytelse. Heinz Isler utførte et eksperiment som illustrerer at et buet plastelement kan bære opptil 30 ganger belastning i forhold til et flatt (Figur 1) [2].



Figur 1: Viser styrken av et buet element [1]

Denne egenskapen ble kjent av byggmestere og designere som kom opp med ulike buede strukturelle systemer. Med etableringen av nye materialer, beregningsmetoder og forbedring av teorier ble nye løsninger funnet.

Armert betong som tåler både trykk og strekk førte til tynne skall (Figur 2 og 3). På tross av elegansen og effektiviteten spredte ikke disse konstruksjonene seg vidt. Å bygge et skall krever å bygge en kurvet og kompleks form som kun kan brukes til denne konstruksjonen. Konstruksjonen er heller ikke økonomisk effektiv hvis det involverer mye arbeidskraft, noe som gjør tynne skallkonstruksjoner vanskeligere å bygge i dag.



Figur 2: Tennishall bygget i 1982 av Heinz Isler [II]



Figur 3: City of Arts and Sciences i Valencia, Spania av Felix Candela [III]

På 60-tallet utviklet Frei Otto og *Institut für leichte Flächentragwerke* i Stuttgart (Institute of lightweight structures) et innovativt konstruksjonssystem som gikk ut på å transformere enkel geometri til kompleks ved hjelp av elastisk deformasjon av materialet. Ideen om å bruke deformasjon av materialet til å oppnå kurvatur har faktisk blitt brukt tidligere i andre kulturer. Madanfolket brukte denne teknikken til å bygge en ”mudhif”, et stort kommunalt hus med kurvet tak. Hovedmaterialet var strå, og myke søyler blir først reist og deretter deformert (Figur 4 og 5).



Figur 4: Under byggingen av en mudhif [IV] Figur 5: Innsiden av en mudhif [IV]

Gitterskallet ble beskrevet av Edmund Happold som en dobbelkrum overflate formet av et gitter boltet sammen. Når gitteret er flatt er det en mekanisme med én frihetsgrad [3]. Dette betyr at det kreves en spesiell monterings-teknikk som takler kompleksiteten av den endelige formen, fordi det flate gitteret er såpass enkelt. Gitteret er uten skjærstivhet i planet og blir dermed elastisk deformert til en dobbelkrum overflate. Det deformerte gitteret blir deretter avstivet for å oppnå skjærstivheten i planet og øke knekkingskapasiteten. For mer klarhet brukes begrepet ”elastisk gitterskall” når denne teknikken benyttes.

Potensialet for denne type konstruksjon ble først fullstendig demonstrert ved Multihalle i Bundesgartenschau i Mannheim i 1976 (Figur 6). Gitterskallet i tre spenner over 55 meter med en egenvekt på bare 20 kg/m^2 . Montering av det $9\,500 \text{ m}^2$ taket tok kun tre uker. Dette skallet kommer jeg tilbake til i neste kapittel.



Figur 6: Mannheim Multihalle, Frei Otto 1976 [V]

1.2 Gitterskall i stål og glass

På 90-tallet utviklet Hans Schober og Jörg Schlaich innglassete gitterskall i stål. I dette tilfellet involverer ikke monteringen deformasjon av gitteret, men flere andre utfordringer oppstår under designet av et slikt bygg. Spesielle hensyn måtte tas for å lage et gitter med fire

sider og unngå kostnader ved kurvet glass. En av løsningene for denne utfordringen er å bruke overflater som ikke nødvendigvis matcher formen.

Taket i et svømmeanlegg i Neckarsulm bygget i 1989 (Figur 7) er et av de første eksemplene på et gitterskall i stål utviklet ved hjelp av teknikken til Hans Schober og Jörg Schlaich. Skallet er laget av elementer i samme lengde, bortsett fra kantene. Formen er kuleformet, noe som impliserer at glasset har samme form. Gitteret var ikke i stand til å bære all lasten alene, så diagonale forspente kabler ble brukt for å spenne opp konstruksjonen.



Figur 7: Taket av en svømmehall i Neckarsulm 1989 [VI]

Digital modellering og fabrikkeringsteknikker som gjør det mulig å produsere enkeltkomponenter i unik geometri, har gjort disse konstruksjonene akseptable fra et økonomisk synspunkt [4]. Utfordringen med kledningen er ofte løst ved å bruke tresidede panel, se figur 8, 9 og 10.



Figur 8: British Museum



Figur 9: Milano Trade Fair [VII]



Figur 10: My Zeil i Frankfurt [VIII]

1.3 Lette konstruksjoner

Med egenvekt fra 7 kg/m^2 til 20 kg/m^2 kan elastiske gitterskall anses som lette konstruksjoner. I *Leicht Weit*, ramser Jörg Schlaich opp tre hovedgrunner til å rettferdiggjøre byggingen av lette konstruksjoner [5]:

1. Den første er økologisk: ved å redusere mengden materiale, reduseres også miljøpåvirkningen av bygget. Disse konstruksjonene er også enkle og forandre og resirkulere.
2. Den andre er økonomisk: å bygge lette konstruksjoner krever ingeniører og kvalifisert arbeidskraft som er verdifullt for samfunnet.
3. Den siste er kulturell: letthet og gjennomsiktighet er ofte bedre ansett enn tyngde.

Disse argumentene viser at en lett konstruksjon generelt, og spesielt et elastisk gitterskall, kan ha en betydningsfull plass i byggeindustrien. Dets egenskaper fører til flere fordeler, og innehar et stort potensial. Gitterskall er en måte å kombinere letthet og fri form, og derfor ha evne til å ta for seg omfattende og kompleks design. Gitterskall danner karakteristiske former og rom der lettheten skaper en gjennomsiktighet og større bruksområde. De kan brukes til å dekke over eksisterende rom (Figur 11) eller nye områder for eksempel Savill Building (kapittel 2.5).



Figur 11: Taket over Odeon i München [IX]

1.4 Prosjektering av gitterskall

Prosjekteringen av et gitterskall utfordrer samspillet mellom arkitektur og byggeteknikk. Konstruksjonen henter sin styrke ved å la seg deformere til en bestemt form med bestemte konstruktive egenskaper. Da blir det essensielt å finne en form som gir de etterspurte styrkeegenskapene og dermed også slankheten og spennet som er mye av motivasjonen for å velge en slik konstruksjon [6].

For å finne en statisk ideell form er det ulike måter å optimalisere konstruksjonen på. Man kan eksperimentere seg frem til en sterk form, eller man kan stegvis tilnærme seg den ved hjelp av numeriske beregninger. De store deformasjonene som opptrer i denne prosessen gjør at det ikke er et lineært forhold mellom deformasjon og lastpåvirkning. Lastene får en annen effekt på konstruksjonen etter hvert som deformasjonene blir større og større. Dermed oppstår det

effekter som vanskelig lar seg beskrive ved hjelp av vanlige analysemetoder. Målet er å skape en form som utnytter buens evne til å føre ytre vertikale krefter ut til opplagerpunktene uten at konstruksjonen blir utsatt for membraneffekt.

Et viktig ledd i undersøkelsen av prosjekteringsteknikker for gitterskallet blir derfor å studere hvilke metoder man har til rådighet for å jobbe seg frem til et slikt skall. Er det en spesiell metode som peker seg ut som den beste? Hvordan kan digitale modelleringsverktøy best utnyttes? Hvilke egenskaper i treverket blir det mest utslagsgivende? Vil en god bøyeevne være viktigere enn materialets styrke (Tabell 1)?

Tabell 1: Styrkeklasser for tre. C står for bartrær og D betyr løvtrær [7]

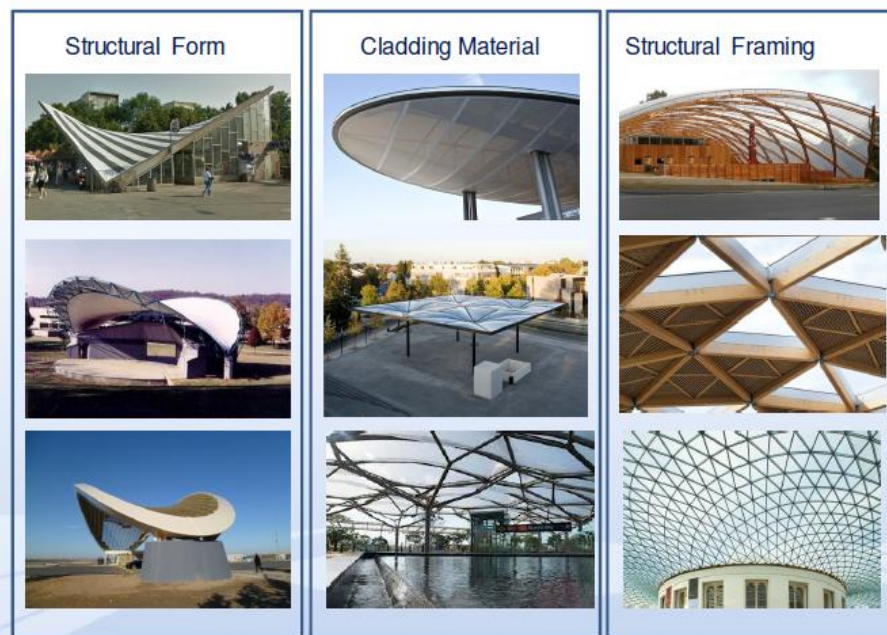
Styrkeklasse	Karakteristisk bøyespenningskapasitet f_m [N/mm ²]	Elastisitetsmodul E
C16	16	8 000
C24	24	11 000
C30	30	12 000
D30 (eik)	30	10 000
D70	70	20 000

Kapittel 2: Referansebygg

I dette kapitlet tar jeg for meg ulike referansebygg som jeg mener er viktige som utgangspunkt for å forstå hvordan et gitterskall skal bygges. De er utformet med forskjellige detaljer og hensikter som er nyttige å merke seg med tanke på hvilke løsninger man er ute etter selv. I det første delkapitlet beskriver jeg et prosjekt prosjektert av fasadeingeniørbedriften Mott MacDonald [8] og hvordan samarbeidet med arkitekter og byggherre har foregått.

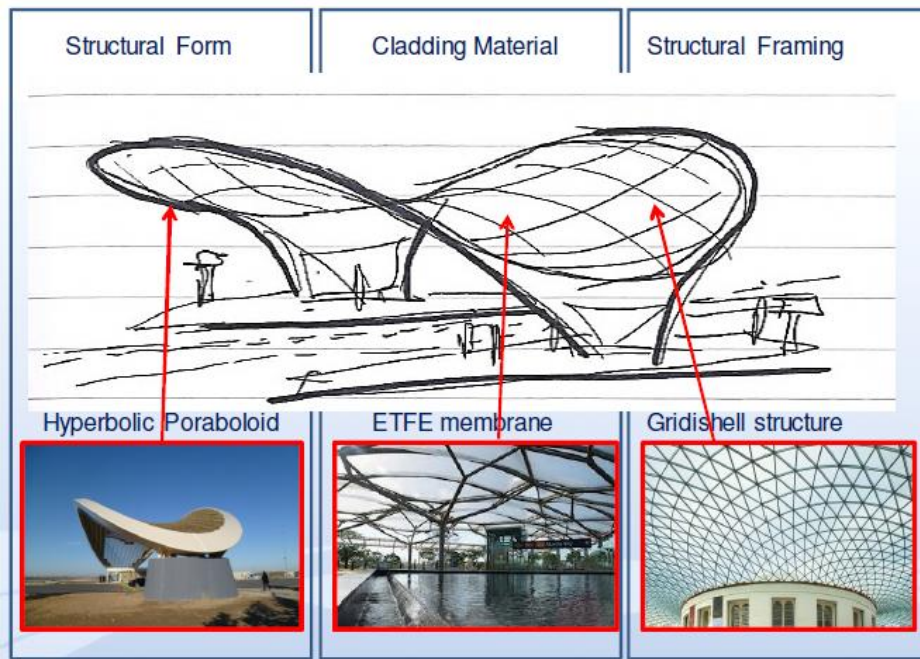
2.1 Canopy structure

Det interessante med dette prosjektet er at man kan hele veien se hvordan samarbeidet mellom arkitekt, byggherre og rådgiverne har vært. Hvilke vurderinger som har blitt gjort i forhold til hvilke alternativer som har vært tilgjengelige. Rådgiverne får mulighet til å utvikle noen ideer på en enkel måte, uten å bruke mye tid på analyser og detaljberegninger.



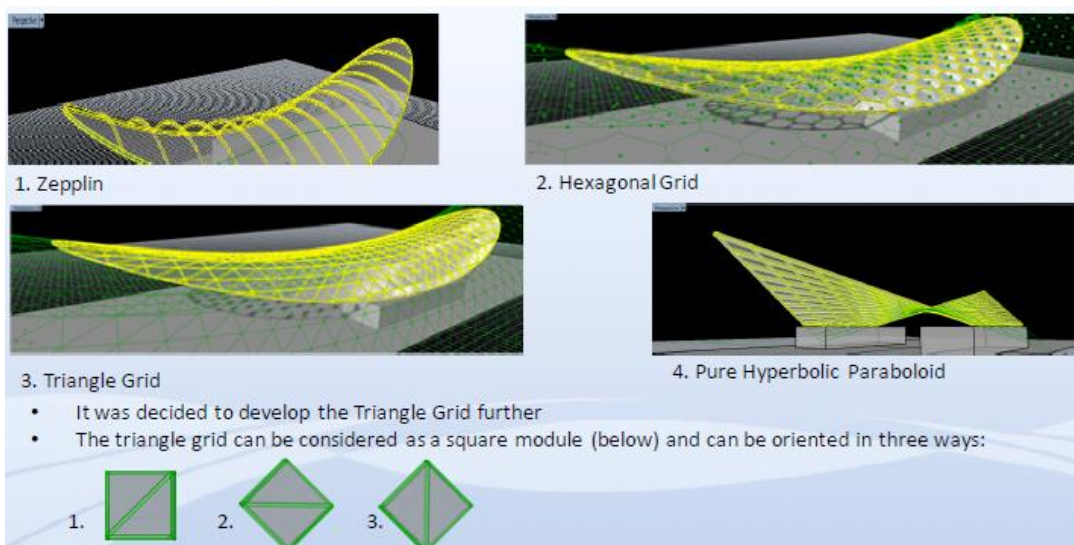
Figur 12: Alternative konstruksjonsformer og kledning

Det skulle prosjekteres et tak over en togstasjon, og de første avgjørelsene som måtte tas handlet om konstruksjonens form og kledningsmateriale (Figur 12). Byggherre og arkitekt gjorde et valg på grunnlag av de foreslåtte alternativene, og ingeniørkontoret laget en skisse (Figur 13).



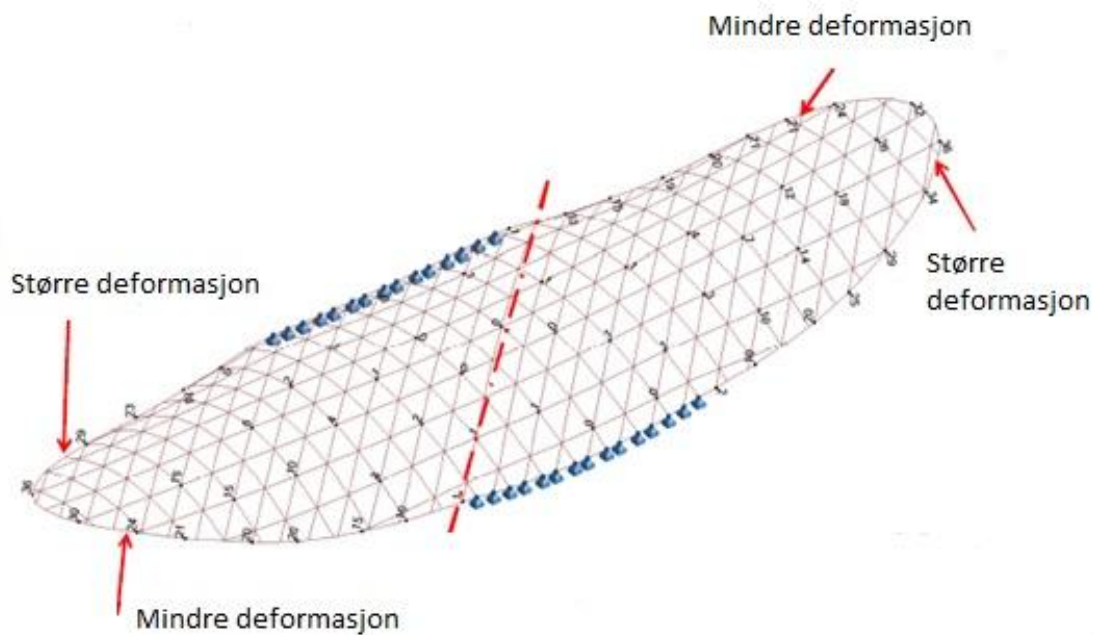
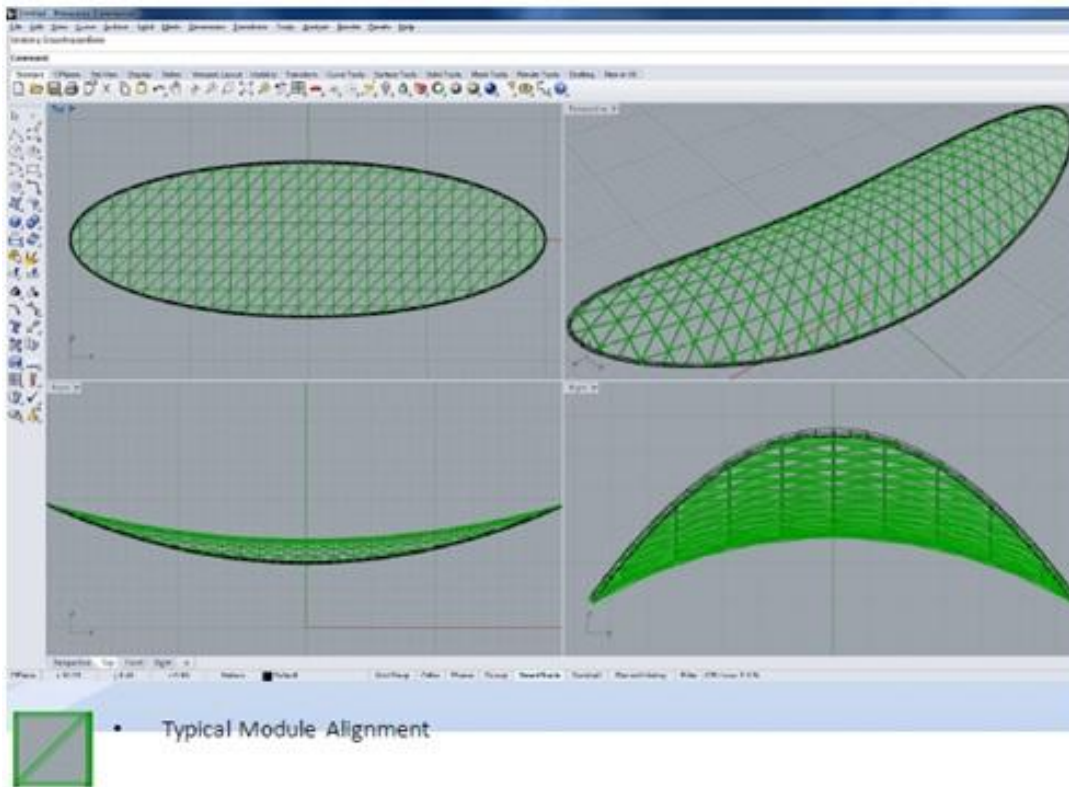
Figur 13: Enkel skisse av takkonstruksjonen

Den neste avgjørelsen var hvilken form rutemønsteret skulle ha (Figur 14). Alternativet kalt triangel rutemønster ble valgt, det kunne også roteres på tre ulike måter.



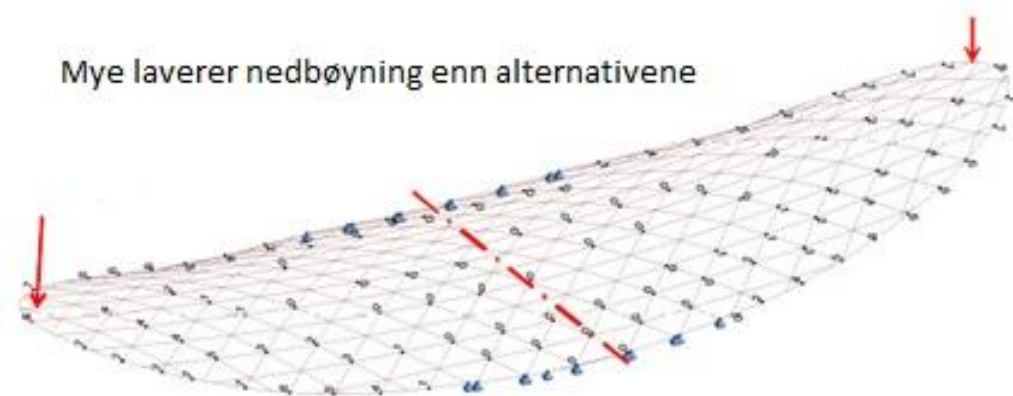
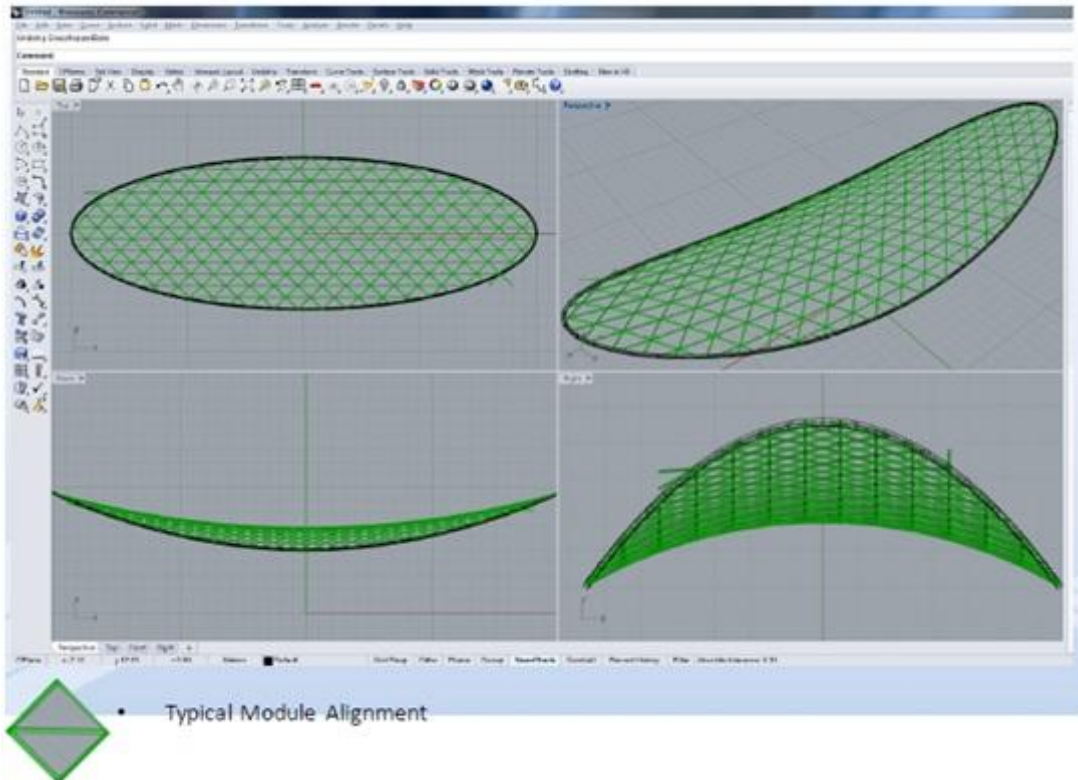
Figur 14: Alternative rutemønstre

Når de tilslutt kommer til analysen av rutemønsteret kan både arkitekter og ingeniører se hvilket alternativ som er åpenbart å velge. Her kan man lett se at hvilken vei rutene er plassert er essensiell for å bevare en sterk konstruksjon.



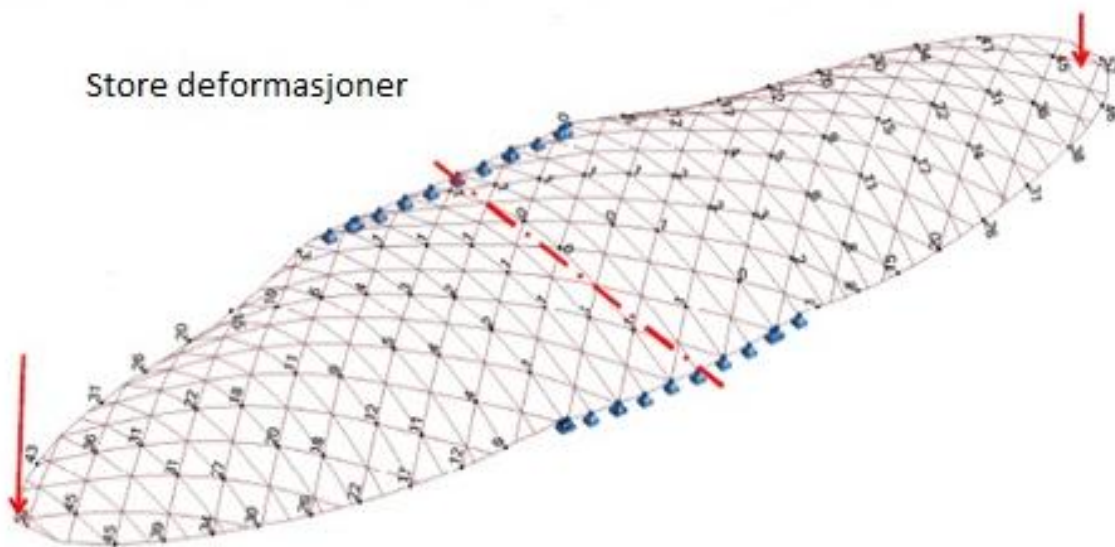
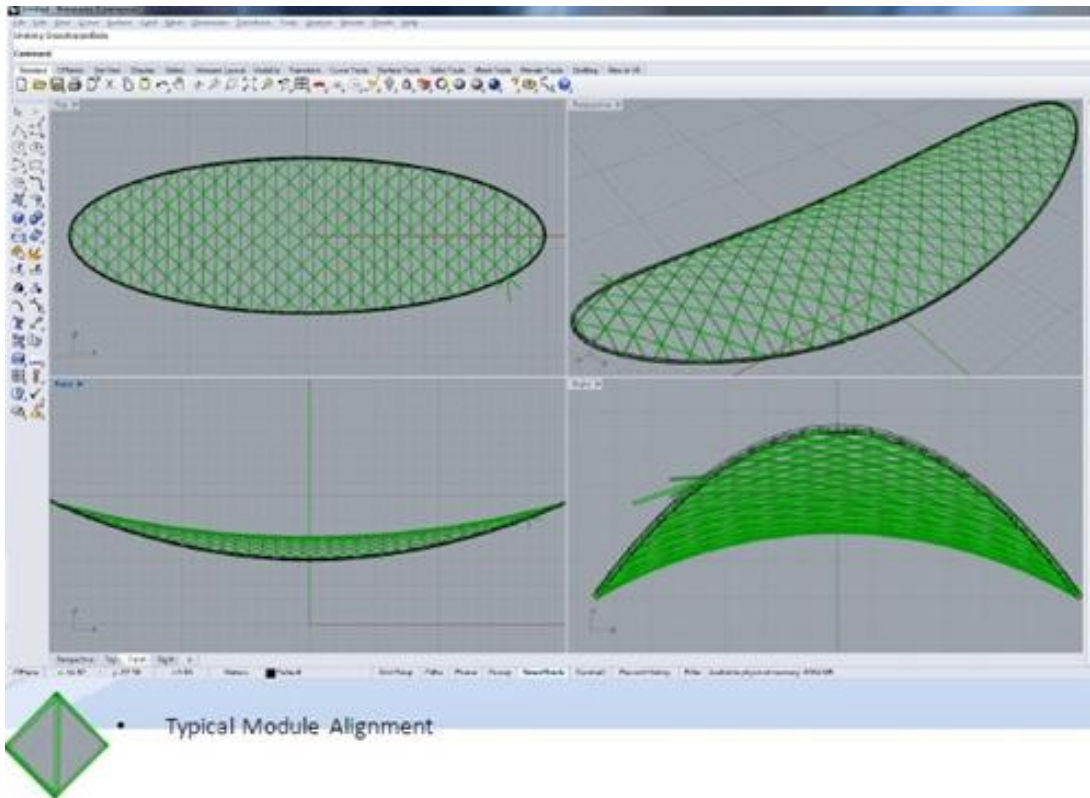
Figur 15: Analyse av alternativ 1

Alternativ 1(Figur 15) har et asymmetrisk mønster noe som resulterer i asymmetrisk nedbøyning og spenning. Dette vil gjøre optimering av design utfordrende, dessuten er ikke asymmetri nødvendigvis det mest estetiske alternativet.



Figur 16: Analyse av alternativ 2

Alternativ 2(Figur 16) er et meget effektivt alternativ fra et konstruksjonsmessig synspunkt. Dette alternativet vil trenge et gitter bestående av tynnere stenger, noe som gjør konstruksjonen både slankere og lettere. Dette er absolutt en fordel med tanke på kostnad av material og randbetingelser.



Figur 17: Analyse av alternativ 3

Alternativ 3 (Figur 17) er også symmetrisk men endekantene får store deformasjoner.

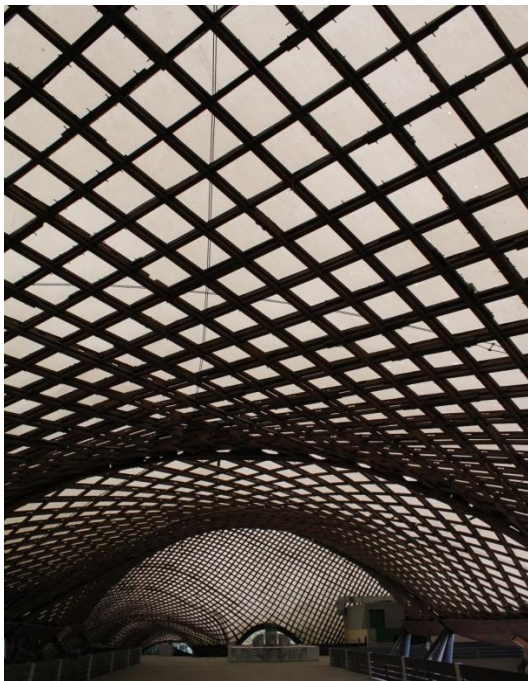
I korte trekk betyr det at det blir minst deformasjon når rutene har en linje i lengderetningen av konstruksjonen, dessuten er det også fordelaktig at kreftene fordeles jevnt ut mot kanten, altså i et trekantmønster.

For både estetiske og strukturelle grunner ble alternativ 2 valgt. Modellen ble utviklet i Autodesk Robot for å bestemme randbetingelser (Figur 18). Flere bilder i vedlegg.



Figur 18: Ferdig skisse av takkonstruksjonen

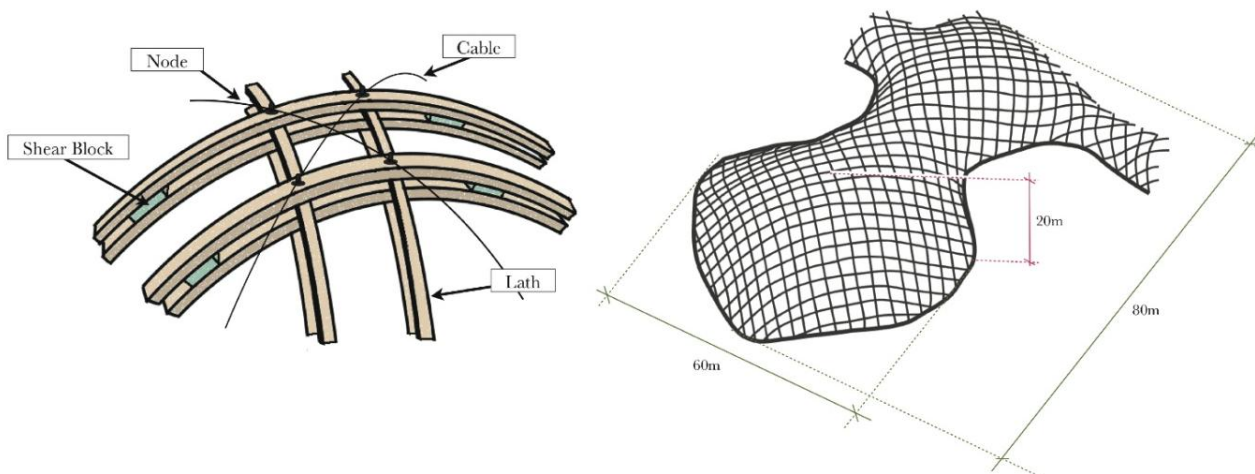
2.2 Mannheim Multihalle



Figur 19: Mannheim Multihalle [X]

Mannheim Multihalle (Figur 19) var tidligere et av Tysklands største industrielle sentre, og ble derfor et mål under andre verdenskrig [9]. Men det var under rekonstruksjonen i 1976 at arkitekt Frei Ottos visjon endelig ble oppfylt. Formen ble funnet ved hjelp av en hengende kjede-modell, altså at lenker ble hengt opp, og formen ble den kurvaturen lenkene tok. Hemlokk-tre fra vestkysten av Amerika var tilgjengelig i opptil 60 m lengde og derfor ideell til denne konstruksjonen. Jeg antar at det er meget kostbart og ikke spesielt bærekraftig siden det tar årevis for et tre å bli så stort.

Otto ønsket opprinnelig ett lag med 50x50 mm lekter, men dette ville bli for tynt for en konstruksjon av denne størrelsen. Å øke tverrsnittet ville øke bøyespenningen i tillegg til å gå imot arkitektenes ønske. Derfor ble det bestemt å bruke to lag med lekter over hele konstruksjonen (Figur 20). Dette ville også øke konstruksjonens stivhet. Irregulær form og asymmetrisk last gjorde det nødvendig med stålkabler for å øke diagonal stivhet. De låste forbindelsene ble boltet etter at skallet var i formen. Da Multihalle ble bygget var det ikke mulighet til å teste lastkapasiteten til skallet på forhånd. De testet den derimot etter at den var bygd ved å henge tunge tanker i snorer fra taket.



Figur 20: Skisse av knutepunktsdetaljer og hallen ovenfra [X]

Jeg observerer at kurvaturen er relativt flat noe som kan være en ulempe og føre til unødvendige spenninger og sparkekrefter. Dette kommer jeg mer tilbake til i kapittel 4.5. Det kan altså øke påkjenningen i randbetingelsene, noe som kan unngås ved å oppnå en optimal kurvatur på treverket.

Selv om Mannheim Multihalle originalt var ment som midlertidig, står det enda - 37 år etter fullførelse. Gitterskallet er en viktig milepæl i dens uvanlige form og store spenn, men også for den innovative bruken av tre for å lage et komplekst og fleksibelt gitter. Flere gitterskall har blitt laget siden, blant annet Japan Paviliov, Weald og Downland Gridshell og Savill Gridshell. Disse blir laget av andre materialer enn Mannheim, inkludert papirruller, eik og lerk. Mens både Japan Pavilion og Savill oppnår imponerende spennvidder, kan de ikke måle seg meg Mannheim.

2.3 Japan Pavilion Expo 2000



Figur 21: Japan Pavilion Expo 2000 [XI]

Japan Pavilion ligger i Hannover, Tyskland, laget av resirkulerte papir formet i ruller (Figur 21) [10]. Det ble bygget i år 2000 av arkitekt Shigeru Ban med veiledning av blant annet arkitekt Frei Otto og rådgivende ingeniørbedrift Buro Happold. Det tok tre uker frakonstruksjonen var et flatt nett til den hadde riktig form. Det måtte tilføres et statisk system av tre fordi tyske myndigheter mente det ikke var forsvarlig med et tak laget kun av papirruller. Arkitekten mente dette var unødvendig siden papir som statisk system var godkjent i Japan. Dette var derimot første bygg av denne størrelsen, 72x35 m.



Figur 22: Knutepunktsdetaljer [XI]

Japan Pavilion utfordrer det miljøvennlige perspektivet ved å bruke gjenvunnet materiale, og motstrider for eksempel Mannheim (kapittel 2.2) som er bygget av eksklusiv hemlokk. Skallet er dekket av en transparent membran som gjør at naturlig lys slipper inn. Gitteret synes dermed ikke så godt fra utsiden, noe som er synd med en slik konstruksjon. Knutepunktene er montert med tråd rundt rullene (Figur 22), og lager ikke hull på materialet. Dette er en fordel med tanke på bruddutsatte punkter. Det bevarer også helheten i materialet som øker materialets bøyelighet.

2.4 Downland Gridshell



Figur 23: Downland Gridshell [XII]

I Weald and Downland Open Air Museum i England ble det bygget et gitterskall i 2002 på 50x35 m (Figur 23). Arkitekten var Edward Cullinan og rådgivende ingeniør Buro Happold som også har jobbet med både Japan Pavilion og Savill Building [11]. Green Oak Carpentry Company Ltd har en årelang erfaring med eik som byggemateriale, og ble tidlig hentet inn i planleggingsfasen av dette prosjektet [12]. Dette tror jeg var veldig taktisk, fordi en slik kunnskap er essensiell for å få et optimalt resultat.

Knutepunktet er laget ved at en skive blir festet på utsiden av krysset (Figur 24). Dette er for å bevare bevegeligheten i knutepunktet noe som er gunstig når skallet bøyes i form. Det er også en fordel å ikke lage hull i materialet, da unngår man dette mest bruddutsatte punktet. Man risikerer at en slik løsning blir voldsom og ødelegger slankheten av konstruksjonen, men i dette tilfellet er de tynne skivene ikke et forstyrrende element. Skjærbløkkene er i dette tilfellet små og jeg vil påstå at dette er meget elegant.



Figur 24: Knutepunktsdetaljer [XIII]

Det jeg derimot synes er synd er at den utvendige kledningen dekker skallet nesten fullstendig. Gitterstrukturen er overhodet ikke synlig fra utsiden selv om den interessante fasongen er bevart (Figur 25). Dette er sannsynligvis gjort for å forlenge ideen om treverk som hovedmateriale, og for å lage bedre festemuligheter for glasset.



Figur 25: Gitterskallets fasade [XIV]

2.5 Savill Building



Figur 26: Savill Building [XV]

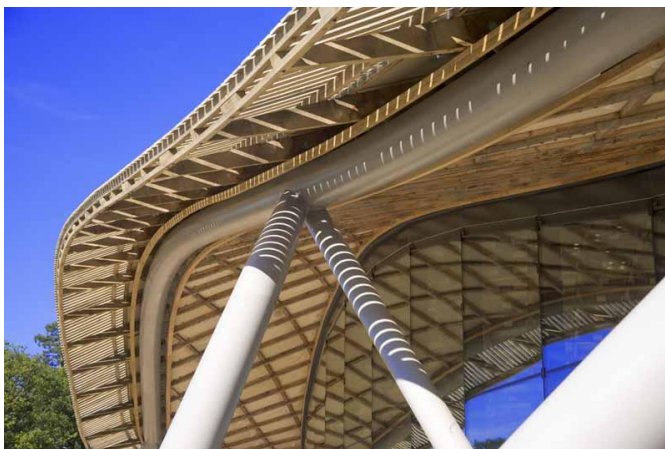
Besøkscenteret i Savill Garden i Windsor Great Park i England har et sinuskurvet tak bestående av et to-lags gitterskall i tre (Figur 26). Bygget ble ferdigstilt i 2006, og arktikten bak var Glen Howells Architects. Rådgivende ingeniør var igjen Buro Happold. Treverket som er brukt er bærekraftig lerk som er et relativt kostbart materiale med høy bøyestivhet [13].

Siden gitteret bare skulle fungere som tak, slapp det dermed innspennings- og oppspenningsproblematikken. Det er likevel et viktig gitterskall i utnyttelsen av spennvidde og åpent areal på hele 90x25 m. Det er nettopp på grunn av mye stivhet i gitteret at det kan ligge utover fasaden uten å miste formen.



Figur 27: Bjelker og skjærblokker under byggeprosessen [XVI]

Skjærblokker forhindrer bevegelse inn og ut av planet, og grunnen til at dimensjonene på både bjelker og skjærblokker er så store (Figur 27) er fordi dette taket skulle brukes av et nyttebygg med krav til både kledning og isolasjon. Større dimensjoner blir derfor nødvendig for å minske nedbøyning på grunn av last i tillegg til egenlast. Dette er imidlertid de største tverrsnittene av eksemplene, og alt annet enn en slank konstruksjon. Taket blir støttet av noen voldsomme stålsøyler (Figur 28), noe som heller ikke virker særlig slankende.



Figur 28: Stålsøylene som støtter taket av Savill Building [XVII]

2.6 Toledo Gridshell Napoli:

Toledo Gridshell representerer en praksis der undervisning og forskning fungerer sammen ved bruk av konstruktiv eksperimentering. Forskning på etter-formet gitterskall av tre har pågått i omtrent et tiår på grunn av forskerteamet, og har allerede produsert noen vitenskapelige resultater og en rekke eksperimentelle gjenstander [14].

Etter-formet gitterskall av tre vil si at den kontinuerlige skalloverflaten og sin dobbelkrumning blir realisert gjennom deformasjon av et vanlig rutenett bestående av liten

størrelse trelekter, plassert ortogonalt (Figur 29). Den viktigste funksjonen av gitterskallet er den unike byggeprosessen for å realisere det. Det flate gitteret er montert på gulvet, enten på bakken eller på et spesiellaget høyere nivå, med lektene plassert ved en gitt avstand (0,5 x 0,5 m), og senere deformert til den endelige form er nådd. Denne prosessen fører til to fenomener som gradvis endrer det flate utgangsgitteret. Det første tilsvarende en lokal rotasjon hvor kvadratene omdannes til et nett av diamanter, mens det andre fører til bøyedeformasjon av stengene. Kombinasjonen av disse to mekanismene tillater gitteret å ta dobbelkrum form. Når formingsprosessen på stedet er fullført og gitterskallet tar designet form, fortsettes monteringen av de diagonale elementene som øker konstruksjonens stivhet.



Figur 29: Toledo Gridshell under byggeprosessen [XVIII]

Forskerteamet vektla den doble funksjonen av gitterskallet. På den ene siden bærekraft, på den andre, den enkle konstruksjonen og rimelige pris. Strukturen, laget av små segmenter, er kompatibel med produksjon av sertifiserte halvfabrikata fra italienske skoger.

Denne type konstruksjon er garantert å unngå bruk av limte forbindelser, og naturlige overflatebehandlinger eller vannoppløselig baserte impregneringsmidler. Å avvise hjelp av kjemiske produkter genererer en rekke komplikasjoner, men forskerteamet tillot ikke å gå på akkord med bærekraft av hele prosessen fra bygging til riving.

Byggeprosessen basert på arbeidskraft i stedet for dataassistert produksjon, genererte en rekke forsøk der designere ikke unngikk rollen som snekkere og var i stand til å oppnå en praktisk kunnskap som var svært verdifull for reell forståelse av konstruksjonen. Blant annet bygging

og strukturell oppførsel, forventede effekter og fysisk oppførsel gjennom muskelstyrke og følelse av kontroll.

Denne holdningen gjorde gitterskallet spesielt egnet som oppgave der studenter eller nyutdannede arkitekter og ingeniører er involvert i design og konstruksjon. I alle erfaringene gjennomført til nå, har studenter funnet svært innovative tilnærminger til en ny og kompleks konstruksjon og ender opp aktivt deltagende i prototypen av bygget. For en student er dette kanskje en måte å forkorte den paradoksale avstanden som eksisterer mellom seg selv og de bygningene som beundres i arkitektoniske magasiner, mellom deres begrensede kunnskap og den stadig økende kompleksiteten i en konstruktiv prosess.

Byggingen av prototypen i Napoli School of Architecture Courtyard hadde en bred appell. Det lille teamet, opprinnelig bestående av forskerteamet og de nye rekruttene, hadde vokst dag for dag med frivillig bidrag fra andre elever, lærere, og lokale innbyggere og forbipasserende. Toledo Gridshell synes i praksis å ha skissert en mulighet til å materialisere sjansen til å bygge på en ny måte i det kollektive byrom. I en prosess der konstruksjonen tar form takket være felles arbeid av designere og brukere, private bedrifter og offentlige institusjoner.

Denne metoden er realistisk å kopiere med tanke på skall i mindre skala. På grunn av små segmenter vil det være lettere å sortere treverket og skallet vil dermed ikke være avhengig av høykvalitets, kostbart treverk. Skallet har derimot ikke løst spørsmålet om hvilken kledning som er mest ideell (Figur 30).



Figur 30: Toledo Gridshell ferdigstilt [XVIII]

Kapittel 3: Materialtesting

Jeg har foretatt materialtester på to forskjellige typer materiale. Dette for å prøve å finne ut av hvordan materialet oppfører seg, og å prøve å bestemme en E-modul. Segmenttesten hos Sintef ble utført med det ene materialet, resten av testene ble utført med det andre. Grunnen til at segmentbjelkene er bygget på den måten kommer jeg tilbake til i kapittel 4.

3.1 Nedbøyning enkeltlekt manuell

Nedbøyning av 1 m lang enkeltlekt, vi brukte måleuret og vektskiver slik vist i figur 31.10 prøvestrykker ble brukt, vil påstå at resultatene var relativt samsvarende. Bjelkene ble ikke nedbøyd til brudd, noe som kan være en innvirkende faktor på resultatene. E-modul ble beregnet ved bruk av formel (1) [15]. Tabell 2 inneholder målte verdier og materialets dimensjoner.

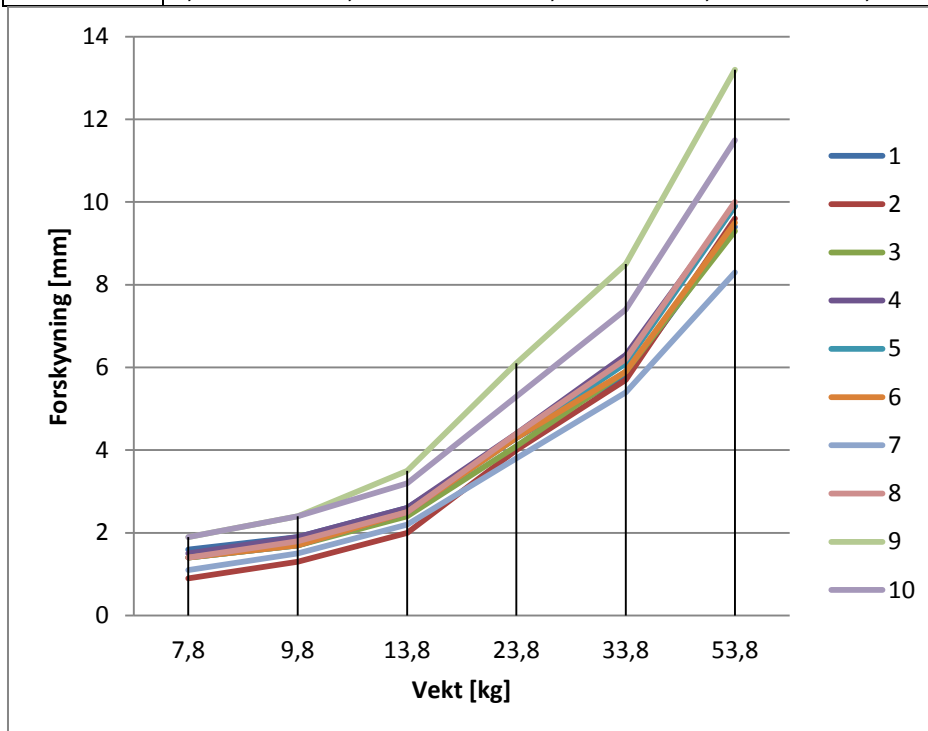


Figur 31: Vi utførte testen ved hjelp av to oppheng med vektskiver. Måleuret hang vi over bjelken, surret en ståltråd rundt spolen og knyttet den til bjelken. Vi var nøye med å nullstille måleuret før start og passe på at ståltråden hang vertikalt. Dette var derimot det mest ustabile ved gjennomføring av forsøket. Nødvendige avstander og dimensjoner er listet opp i tabell 2.

Tabell 2

L =	900	mm	a =	250	mm
Vekt utstyr	3,9	kg			
Tv.snitt					
b	48	l	48668		
h	23				

	7,8	9,8	13,8	23,8	33,8	53,8	[kg]
1	1,6	1,9	2,6	4,3	5,8	9,4	[mm]
2	0,9	1,3	2	4	5,7	9,6	
3	1,4	1,7	2,4	4,1	5,9	9,3	
4	1,5	1,9	2,6	4,4	6,3	9,9	
5	1,4	1,7	2,5	4,3	6,1	9,9	
6	1,4	1,7	2,5	4,3	5,9	9,5	
7	1,1	1,5	2,2	3,8	5,4	8,3	
8	1,4	1,8	2,5	4,4	6,2	10	
9	1,9	2,4	3,5	6,1	8,5	13,2	
10	1,9	2,4	3,2	5,3	7,4	11,5	

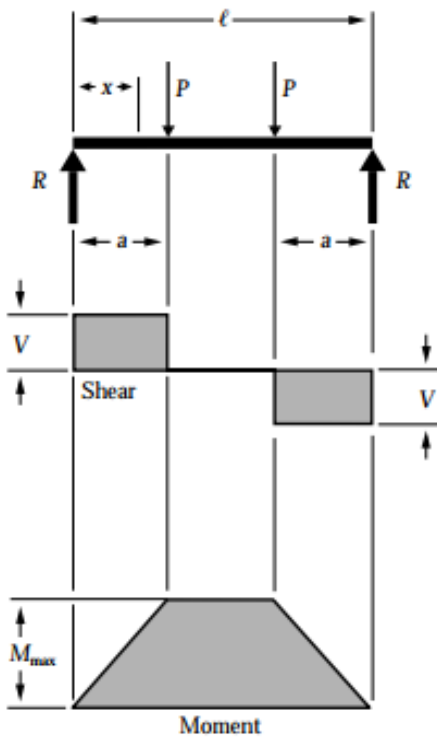


Figur 32: Grafen viser vekt plottet mot forskyvning på bakgrunn av måledata fra tabell 2

Grafen (Figur 32) viser nedbøyning i lektene. Her ser man hvordan lektene varierer i forhold til hverandre.

Etter at målingen ble gjort brukte jeg de avmålte verdiene til å beregne kraften, P (Tabell 3), og dermed E-modulen ved hjelp av formel 1 [15].

$$E = \frac{Pa}{24 I \Delta} (3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$



Figur 33: [15]

P = kraft (se figur 33)

$$I = \frac{1}{12} b * h^3$$

b = bredde av tverrsnitt

h = høyde av tverrsnitt

l = lengden av bjelken (se figur 33)

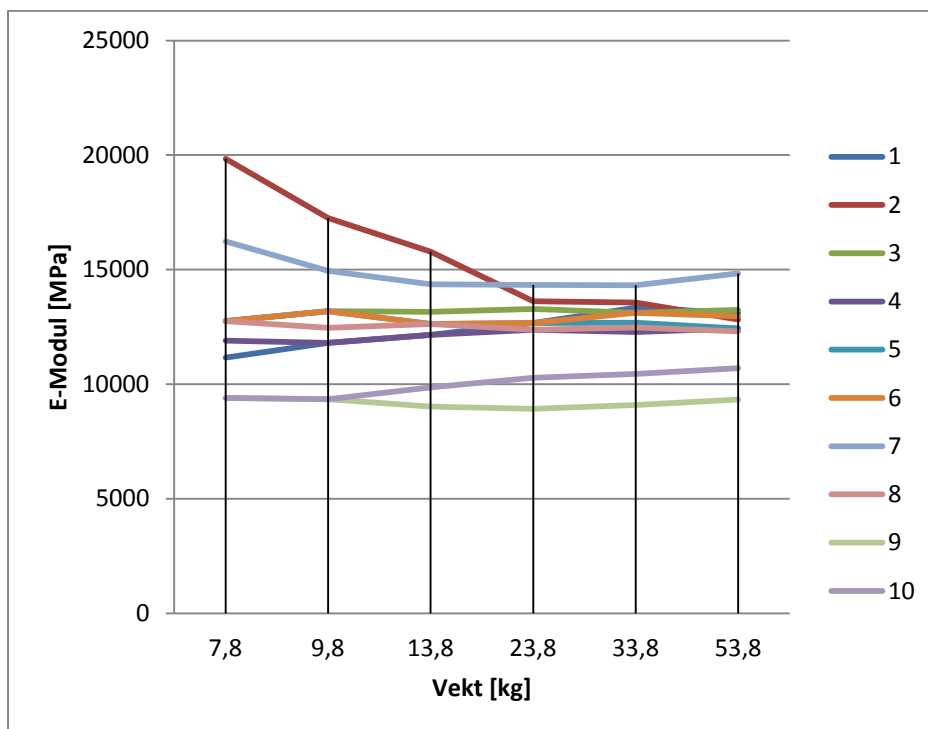
a = avstand mellom opplager og kraft (se figur 33)

Δ = max nedbøyning

Tabell 3

P	38,259	48,069	67,689	116,739	165,789	263,889	[N]
E	11157	11805	12147	12667	13337	13099	[MPa]
	19835	17253	15792	13618	13571	12826	
	12751	13193	13160	13285	13111	13240	
	11901	11805	12147	12380	12279	12437	
	12751	13193	12633	12667	12681	12437	
	12751	13193	12633	12667	13111	12961	
	16229	14953	14356	14334	14325	14835	
	12751	12460	12633	12380	12477	12313	
	9396	9345	9024	8930	9101	9328	
	9396	9345	9870	10277	10454	10707	

Deretter satte jeg opp en graf for å få bedre oversikt over E-modulene og om det var en åpenbar trend (Figur 34).



Figur 34: Grafen viser hvordan E-modulen fordelte seg i forhold til kraft. Ser at det er store spredninger blant testbjelkene.

Gjennomsnittlig E-modul ble beregnet til 12 760 MPa.

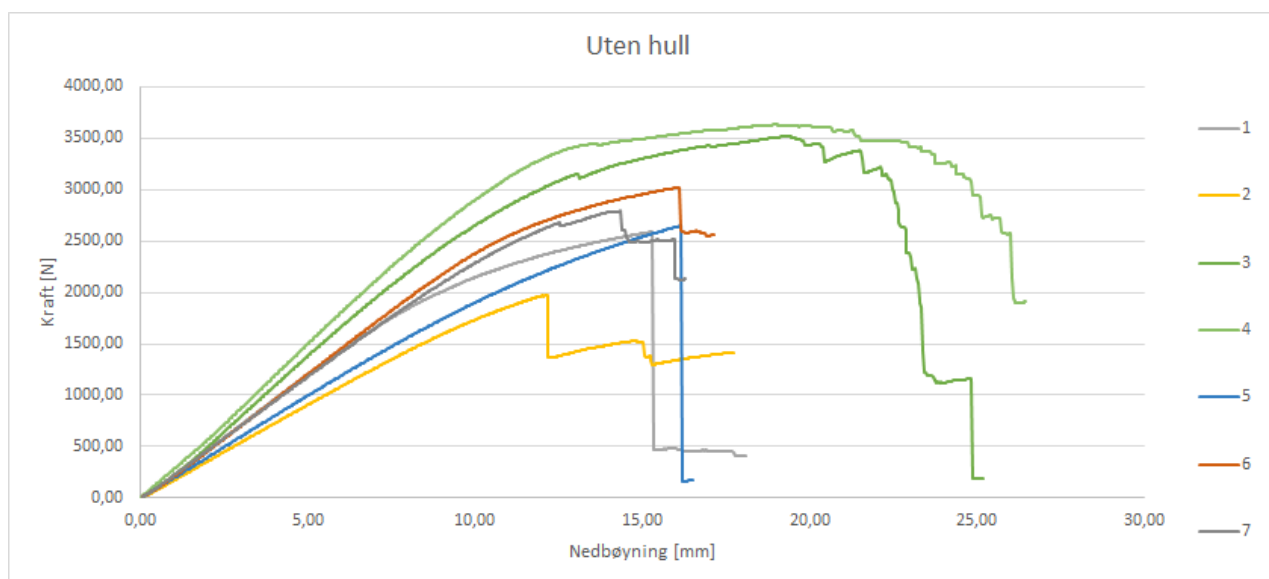
3.2 Nedbøyning i enkeltlekt

Vi gjorde en 3 punkts nedbøyningstest i maskin for enkeltlekt for å prøve å finne en E-modul for materialet. Prøvene ble gjort på 7 lekter uten hull og 7 med. Bjelkene ble fritt opplagt med

en avstand på 460 mm mellom opplagerne (Figur 35). Testen ble gjennomført ved at bjelken ble bøyd 2 mm per minutt.

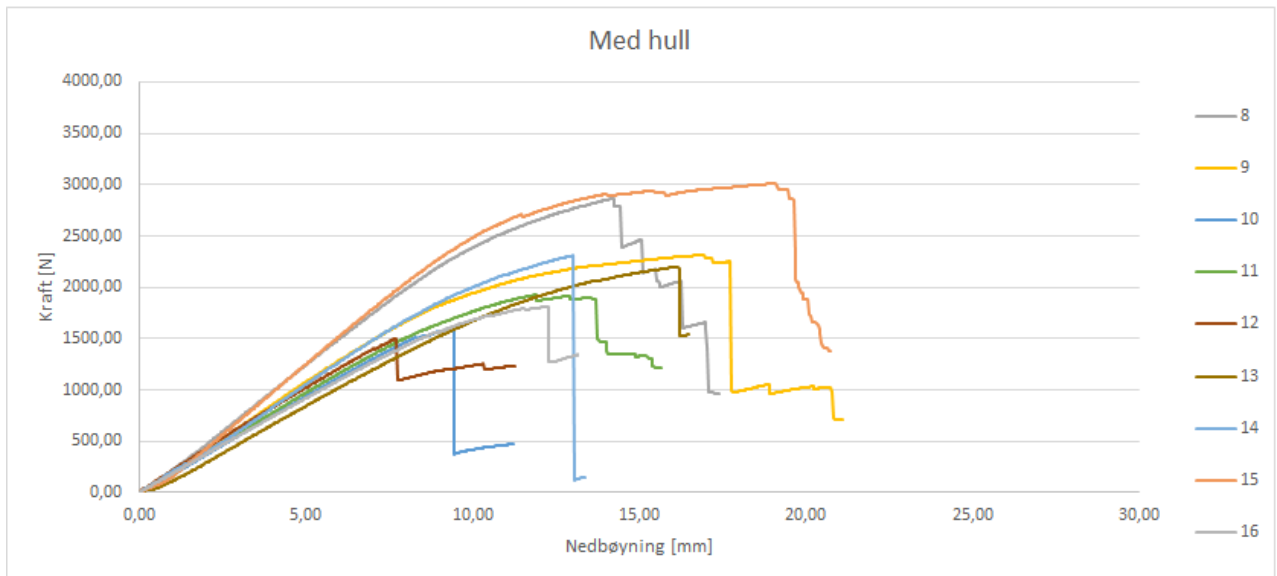


Figur 35: Bjelkene ble nedbøyd i midtpunktet med en jevn kraft



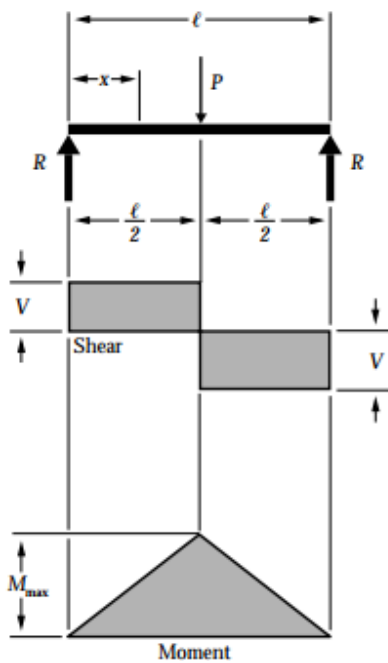
Figur 36: Viser kraft plottet mot nedbøyning i prøvene uten hull

Av prøvene uten hull kan vi slå fast at de i gjennomsnitt tåler mer enn de med. Hvor mye og hvor sprøtt bruddet blir er veldig varierende. Vi ser også at begynnelsen av kurvene er omtrent sammenfallende, og øker jevnt fram mot brudd (Figur 36). Holder minst ca 2 kN og 12 mm nedbøyning (max 3,5 kN).



Figur 37: Viser kraft plottet mot nedbøyning i prøvene uten hull

I prøvene med hull (Figur 37) er det minimalt med sammenheng mellom prøvene. Holder minst 1,5 kN (og max 3 kN), altså litt lavere enn prøvene uten hull. Det kan også se ut som bruddet er sprøere og oppstår ved lavere nedbøyning. Ut ifra disse testene kan vi prøve å beregne E-modulen til materialet. (2). Nødvendige dimensjoner står i tabell 4.



Figur 38 [15]

$$E = \frac{1}{48} \frac{Pl^3}{\Delta I} \quad (2)$$

P = kraft (se figur 38)

$$I = \frac{1}{12} b * h^3$$

b = bredde av tverrsnitt

h = høyde av tverrsnitt

l = lengden av bjelken (se figur 38)

Δ = max nedbøyning

Tabell 4: Bjelkens dimensjoner

L	460	mm
---	-----	----

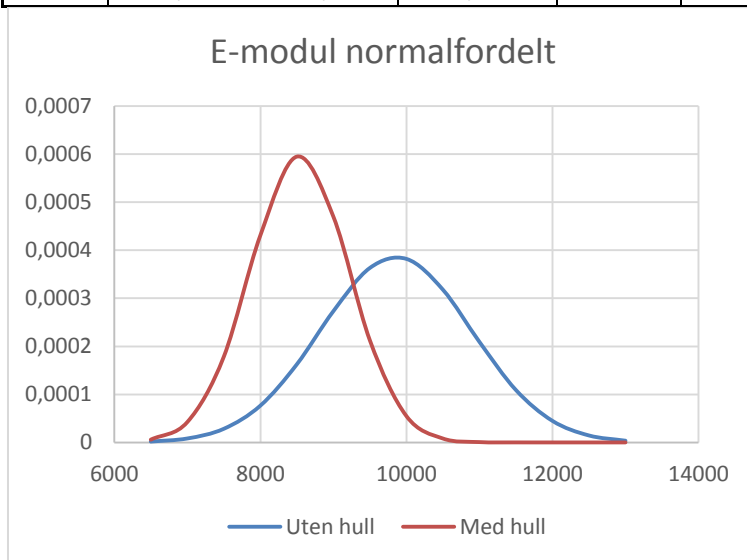
Tv.snitt		
b	48	mm
h	23	mm
l	48668	mm ⁴

Tabell 5

E-modul uten hull						
	E* [Nmm]					
Prøve	3mm	6mm	E [Nmm]	xi	(x-xi)^2	s
1	9865,0	9957,4	9911,2	9857,9	2836,9	1033,6
2	7509,6	7534,6	7522,1		5456301,2	
3	10993,5	11568,8	11281,2		2025617,5	
4	12071,8	12558,0	12314,9		6036647,3	
5	8288,6	8268,8	8278,7		2494003,6	
6	9719,9	10102,7	9911,3		2847,1	
7	9736,1	9836,4	9786,2		5142,0	

Tabell 6

E-modul med hull						
Prøve	E* [Nmm]		E [Nmm]	xi	(x-xi)^2	s
	3mm	6mm				
8	10079,7	10404,2	10242,0	8539,0	2900062,7	669,1
9	8848,4	8937,3	8892,8		125191,4	
10	7754,2	7797,8	7776,0		582163,0	
11	8099,8	8079,4	8089,6		201980,2	
12	8806,8	8425,3	8616,0		5934,8	
13	6585,1	7088,1	6836,6		2898047,7	
14	8327,2	8835,0	8581,1		1770,6	
15	9702,2	10573,4	10137,8		2556244,9	
16	7739,4	7618,7	7679,1		739495,8	

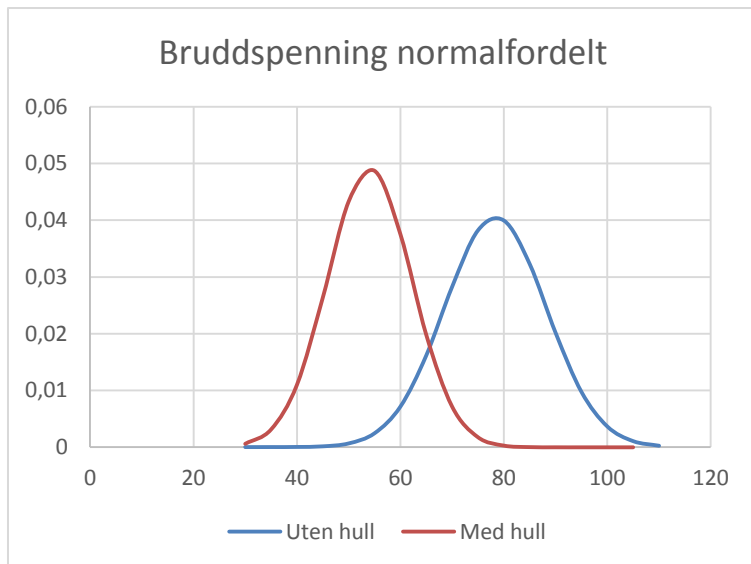


Figur 39 Beregnet E-modul med utgangspunkt i tabell 5 og 6

E-modulen ble betydelig mer konsentrert for lektene med hull (Figur 39), og usikkerheten mye større for lektene uten. Observerer også at den synker betydelig når materialet tas hull på og helheten i treverket brytes.

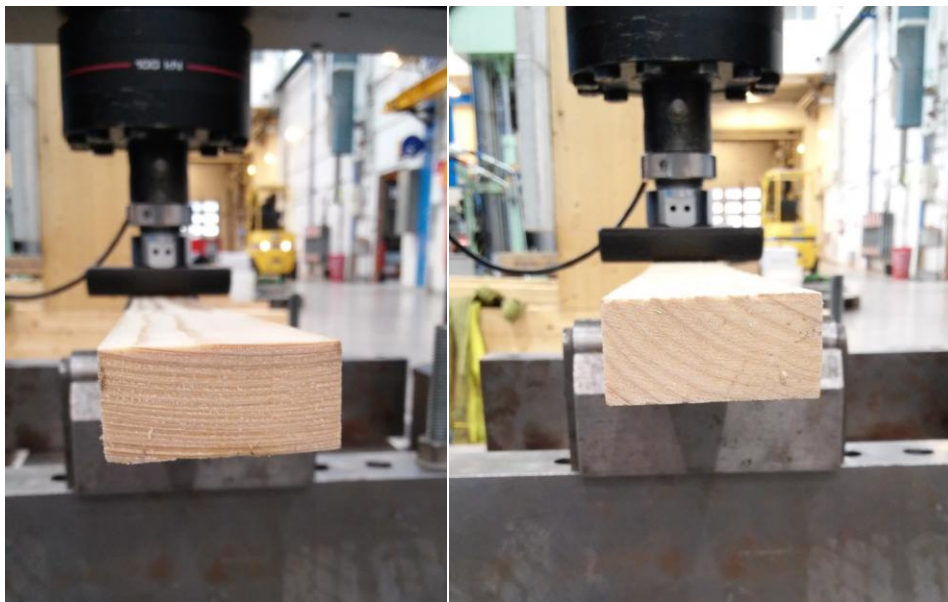
Det regnes som en fordel at bruddspenningen er høy i forhold til den lave E-modulen siden vi er ute etter materiale med stor bøyelighet (Figur 40).

$$\sigma = \frac{3PL}{2(bh)^2} \quad (3)$$



Figur 40 Bruddspenningen, σ , ble beregnet med utgangspunkt i formel 4

Alle prøvestykkene oppførte seg forskjellig, og det var vanskelig å se noe mønster i testen. Etter å ha testen 16 forskjellige stykker kom vi fram til at materiale med mange liggende årringer (Figur 41) mest sannsynlig tålte mer enn stykkene med større mellomrom mellom årringene. Nå viste det seg at prøven til høyre tålte mer enn vi gjettet på, men likevel mindre enn prøven til venstre.



Figur 41: Bjelken til venstre har mange årringer, bjelken til høyre har få

Årringer oppstår i vinterhalvåret når veksten stopper opp [16]. Ved gunstige vekstforhold blir toppskuddene lange og brede årringer oppstår av lys og mørk ved. Den lyse vårveden består

av tynnveggede celler med store hulrom. Utenfor ligger den mørkere sommerveden som har tykkveggede celler med små hulrom.

Hos bartrærne er det vårvedsonene som varierer mest i bredde. Trevirke med brede årringer vil derfor ha lav sommervedandel, dårligere styreegenskaper og lavere densitet enn trevirke med smale årringer.

Hos løvtrærne er forholdet annerledes. For spredtporige løvtrær har varierende årringsbredde ingen innvirkning på densitet og styrke. For ringporige treslag som eik, ask og alm er det sommervedsonen som varierer mest i bredde. Rask vekst med brede årringer gir derfor stor andel sommerved med høy densitet og stor styrke.

Teorien vår om årringer stemmer altså, men for løvtrærne oftest brukt i gitterskall andre steder i Europa, for eksempel lerk, vil ikke dette ha noe å si. Dette kan være en av grunnene til at bartrær ikke har vært å foretrekke i sånne typer konstruksjoner.

3.3 Segmentnedbøyning manuell

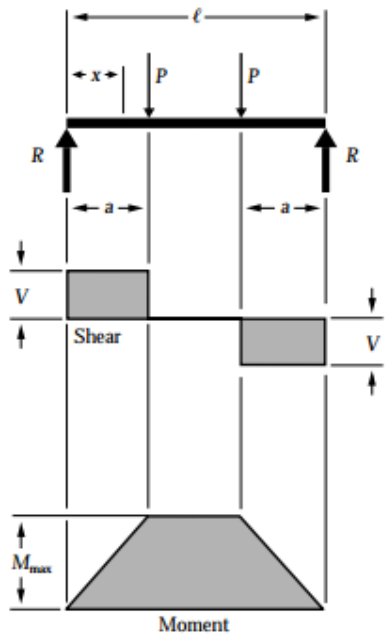
Nedbøyning av segmentbjelke (Figur 42) med last i to punkter. Lengden mellom opplagerne er 3 m og lengden mellom lastene er 1 m. Denne testen ville vi kjøre til brudd, altså legge på vekter til bjelken knakk. Dette gjorde vi for å få en følelse av tøyelighet i segmentbjelken på en mer kontrollert måte enn vi prøvde i det første forsøket.

Figur 42: Illustrasjon av en segmentbjelke. Det var betydningsfullt hvilke knutepunkt som har hel bjelke øverst eller nederst med tanke på hvor bruddet kom til å oppstå.



Figur 43: Segmentbjelke med påført last. Vi valgte å bruke tre måleure for å få en bedre oversikt over nedbøyningen dersom det skulle dukke opp lokale forskjeller i treverket

Bjelken viste seg å tåle ganske mye last, samtidig som den var tøyelig (Figur 43). Noen lokale forskjeller i krysspunktene. Beregninger ble utført ved bruk av formel 1 og tabell 7.



Figur 44 [15]

$$E = \frac{Pa}{24 I \Delta} (3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

P = kraft (se figur 44)

$$I = \frac{1}{12} b * h^3$$

b = bredde av tverrsnitt

h = høyde av tverrsnitt

l = lengden av bjelken (se figur 44)

a = avstand mellom opplager og kraft (se figur 44)

Δ = max nedbøyning

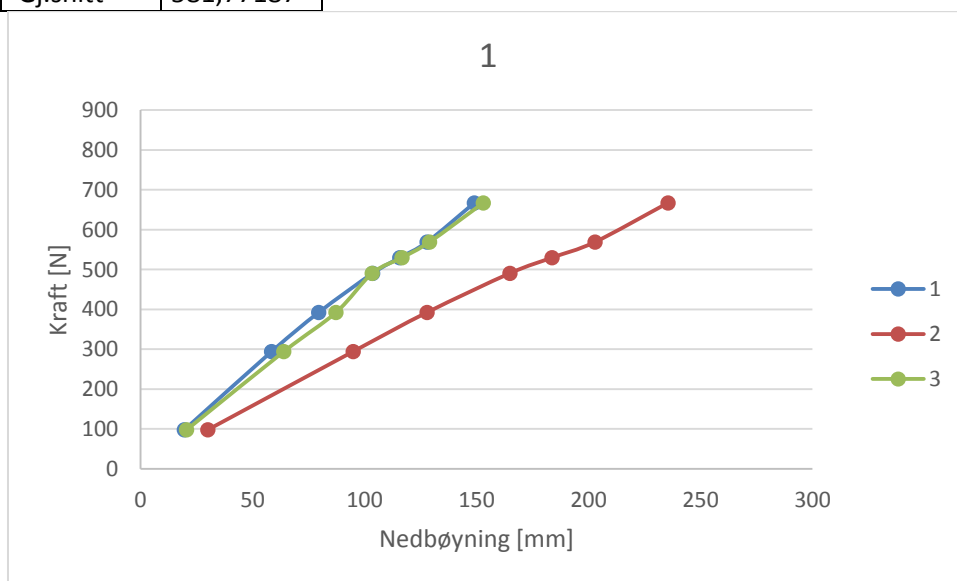
Tabell 7: Segmentbjelkens dimensjoner

L	3000	mm
a =	1000	mm
Vekt utstyr	3,9	kg
Tv.snitt:		
b	48	
h	92	
I	3114752	

Målte resultater av forsøk 1 blir presentert i tabell 8.

Tabell 8: Forsøk 1, maksimal nedbøyning i punkt 2

Last [kg]	1	2 [mm]	3
8,9	19,5	30	20,50
18,9	58,45	94,9	63,9
23,9	79,5	127,9	87,2
28,9	103,6	164,9	103,4
30,9	115,7	183,7	116,7
32,9	127,9	202,9	129
37,9	149	235,5	153
P1 [N]	E1 [MPa]		
87,309	895,428432		
185,409	601,115214		
234,459	564,013481		
283,509	528,980077		
303,129	507,705013		
322,749	489,413539		
371,799	485,747335		
Gj.snitt	581,77187		



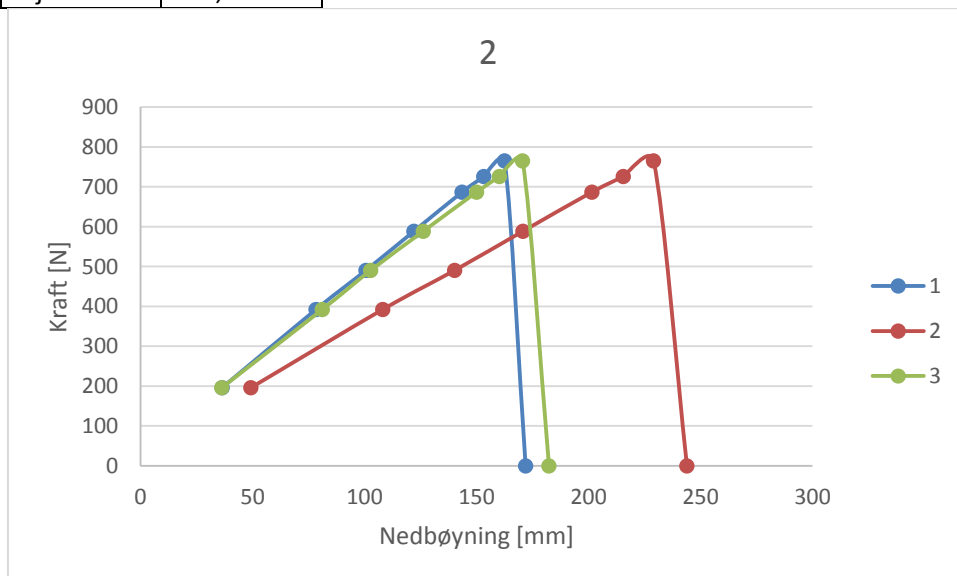
Figur 45: Kraft plottet mot nedbøyning. Rød linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Siden dette var første test var vi usikre på hvor mye last bjelken kom til å tåle. Siden vi hadde begrenset med vektskiver, endte det opp med at vi lastet på med litt ujevn vektøkning (Figur 45). Dette kan være grunnen til at grafen er den mest ujevne av testene. Vi har også en mistanke om at bjelken hadde tålt mer om vi hadde økt vekten på en mer gjennomtenkt måte. Derfor valgte vi en litt annen rekkefølge av vekter i de videre testene.

Målte resultater av forsøk 2 blir presentert i tabell 9.

Tabell 9: Forsøk 2, maksimal nedbøyning i punkt 2

Last [kg]	1	2 [mm]	3
13,9	36,4	49,2	36,2
23,9	78,3	108,1	81,1
28,9	100,6	140,2	102,7
33,9	122	170,7	126,2
38,9	143,5	201,5	150
40,9	153,2	215,5	160,2
42,9	162,5	229	170,5
44,4	171,9	243,9	182,3
P2 [N]	E2 [MPa]		
136,359	852,730557		
234,459	667,320298		
283,509	622,174142		
332,559	599,415964		
381,609	582,688812		
401,229	572,846365		
420,849	565,436628		
Gj.snitt	637,51611		



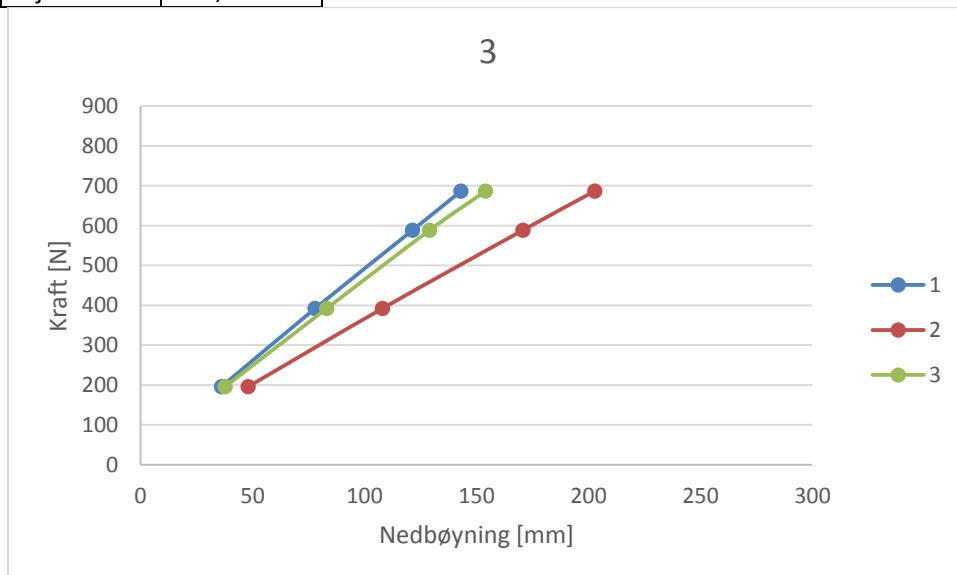
Figur 46: Kraft plottet mot nedbøyning. Rød linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Her har vi lagt på de tyngste vektene først, og lettere vekter mot slutten av testen. Vi ser at grafen har blitt relativt lineær (Figur 46), så jeg vil si at bruddet skjedde ved rett tidspunkt.

Målte resultater av forsøk 3 blir presentert i tabell 10 og figur 47.

Tabell 10: Forsøk 3, maksimal nedbøyning i punkt 2

Last [kg]	1	2 [mm]	3
13,9	36,1	48	37,7
23,9	77,9	108	83,1
33,9	121,4	170,7	129
38,9	143	202,8	154
P3 [N]	E3 [MPa]		
136,359	874,048821		
234,459	667,938188		
332,559	599,415964		
381,609	578,953627		
Gj.snitt	680,08915		



Figur 47: Kraft plottet mot nedbøyning. Rød linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Dette ga en gjennomsnittlig E-modul på 633 MPa.

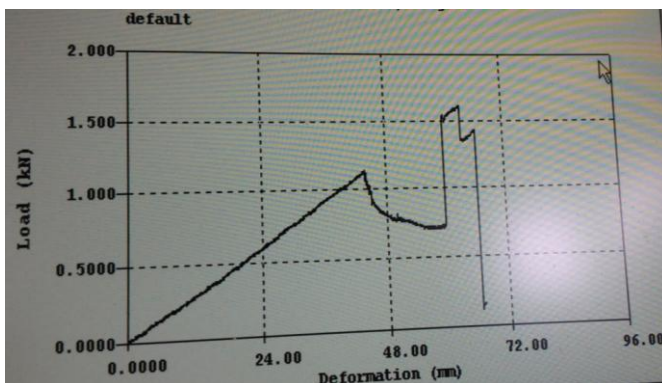
3.4 Segmentnedbøyning Sintef

Lagde en segmentbjelke av fire kryss slik at vi fikk et oppspenn på 1325 mm, og lagde et lite stativ slik at lasten ble fordelt i to punkter med 325 mm mellom. Måleurene hang vi opp ved hjelp av en bjelke på toppen av maskinen (Figur 48). De viste seg å være mer nødvendige enn vi hadde trodd.



Figur 48: Segmentbjelketest hos Sintef

Da vi begynte å kjøre maskinen oppdaget vi kjapt at det oppsto et lite problem med avmålingen. Her ser det nemlig ut som om bjelken har hatt et lite brudd for etterpå å gå tilbake til den lineære kurven (Figur 49). Bjelken har i midlertid hatt en lineær nedbøyning, og det er bare grafen som har fått denne formen. Dersom det hadde oppstått et brudd ville ikke nedbøyningen gjort et så dramatisk hopp opp på omtrent 1,5 kN, men hatt en slak kurve. Derfor har jeg valgt å se bort fra den verdien i mine egne grafer.



Figur 49: Slik grafen egentlig så ut

Det krysset uten hel bjelke nederst viste seg å være mest utsatt for brudd (Figur 50).

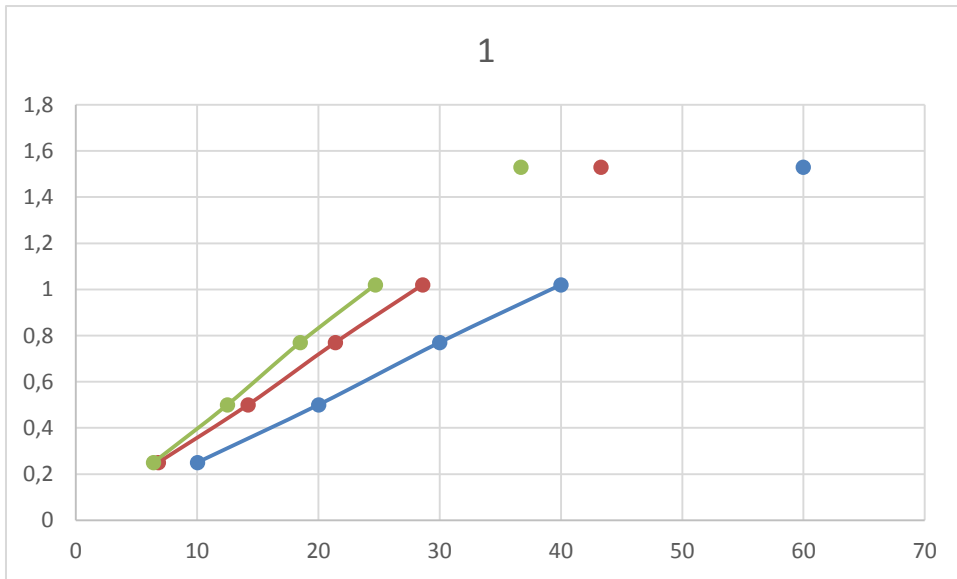


Figur 50: Bjelken med provisorisk fordeling av last. Brudd oppsto på samme sted i alle forsøkene

Målte resultater av forsøk 1 blir presentert i tabell 11.

Tabell 11

Test 1	[mm]		
P [kN]	1	2	3
0,25	6,8	10,03	6,4
0,5	14,2	20,02	12,5
0,77	21,4	30	18,5
1,02	28,6	40	24,7
	35,8	50	30,7
1,53	43,3	59,98	36,7



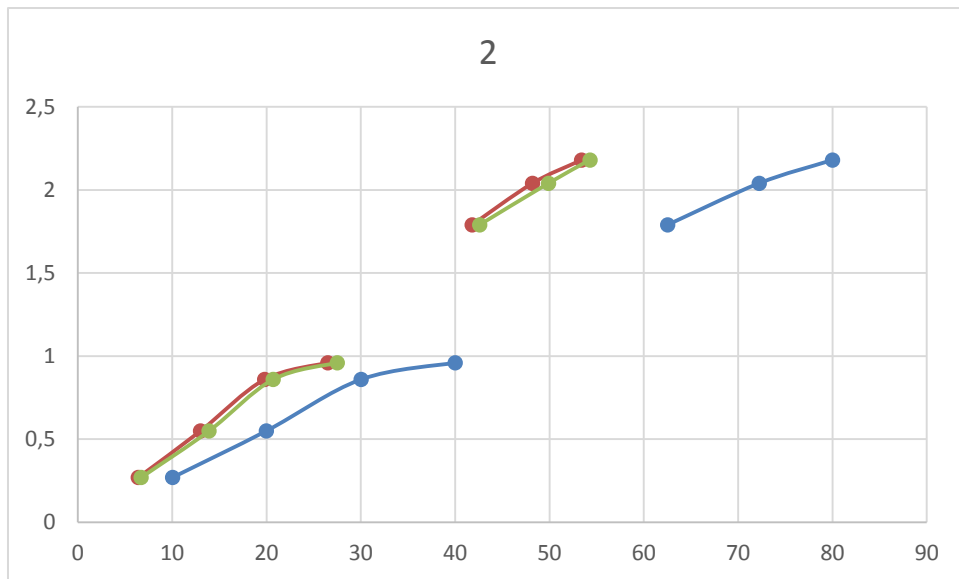
Figur 51: Kraft plottet mot nedbøyning. Blå linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Den blå linjen er nedbøyningen i midten av bjelken, mens den grønne og rød er hhv høyre og venstre måleur (Figur 51). Grafene oppfører seg ganske lineært, og grunnen til at nedbøyningen på høyre og venstre side ikke var lik, skyldes hvilken side som hadde hel bjelke øverst eller nederst i knutepunktet.

Målte resultater av forsøk 2 blir presentert i tabell 12.

Tabell 12

Test 2	[mm]		
P [kN]	1	2	3
0,27	6,4	10,04	6,7
0,55	13	19,98	13,9
0,86	19,8	30,03	20,7
0,96	26,5	40	27,5
	33,4	50,03	34,2
1,79	41,8	62,53	42,6
2,04	48,2	72,24	49,9
2,18	53,4	80,01	54,3



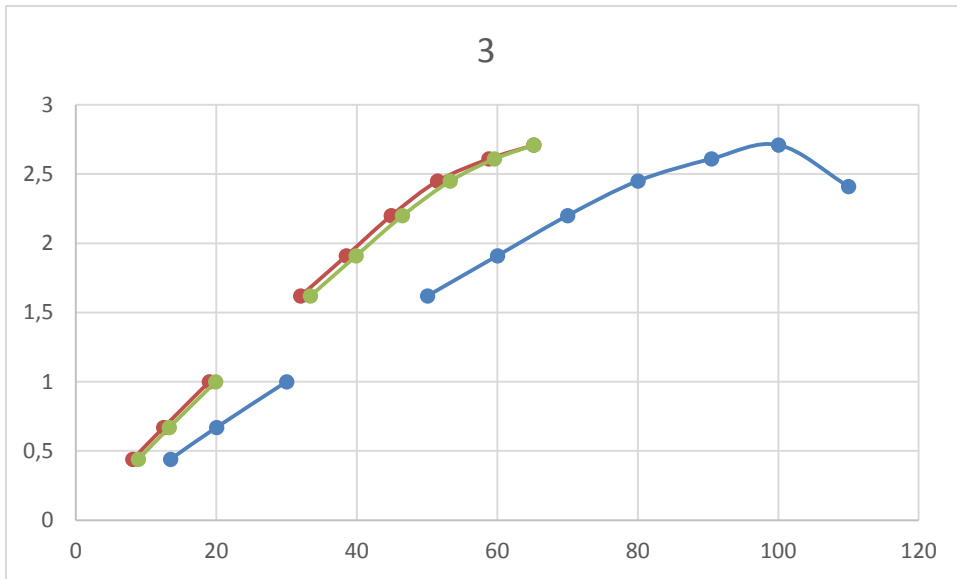
Figur 52: Kraft plottet mot nedbøyning. Blå linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Den andre testen tålte mer last, og grunnen til at det fjerne punktet ser mindre lineært ut er fordi dette punktet er i nærheten av maskinens unøyaktighet (Figur 52). Nedbøyning på høyre og venstre side er ganske lik.

Målte resultater av forsøk 3 blir presentert i tabell 13.

Tabell 13

Test 3	[mm]		
P [kN]	1	2	3
0,44	8,1	13,49	8,9
0,67	12,5	20,04	13,3
1	19	30,02	19,9
	25,6	40,23	26,8
1,62	32	50,08	33,4
1,91	38,5	60,04	39,9
2,2	44,9	70,03	46,5
2,45	51,5	80,04	53,3
2,61	58,8	90,51	59,6
2,71	65,2	100,05	65,2
2,41		110,02	



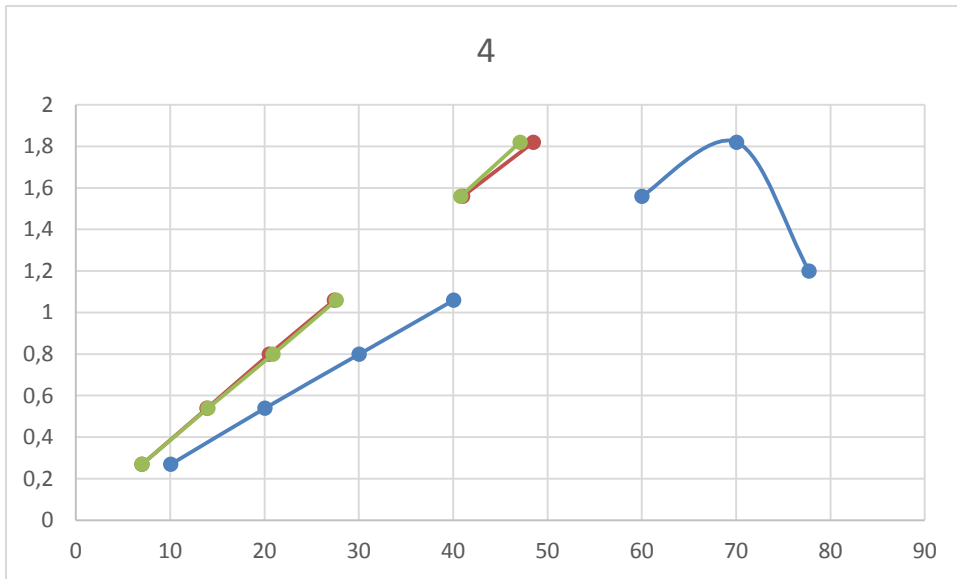
Figur 513: Kraft plottet mot nedbøyning. Blå linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Test nummer tre tålte mest last, og hadde et mindre sprøtt brudd. Observerer at grafen er lineær, og at punktet uten verdi har mindre betydning (Figur 53).

Målte resultater av forsøk 4 blir presentert i tabell 14.

Tabell 14

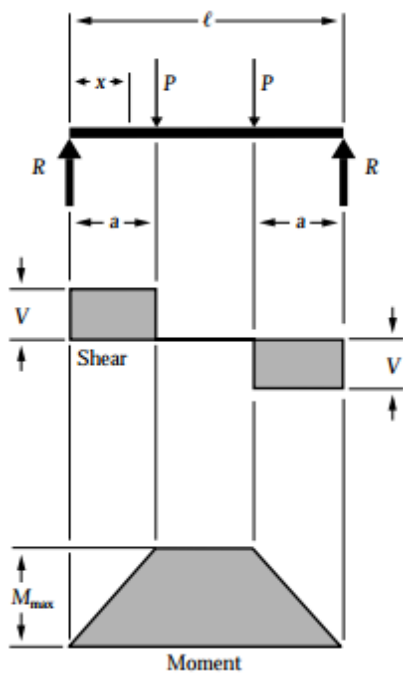
Test 4	[mm]		
P [kN]	1	2	3
0,27	7	10,05	7
0,54	13,9	20,04	14
0,8	20,5	30,03	20,9
1,06	27,4	40,05	27,6
	34,1	50,03	34,3
1,56	41	60,01	40,8
1,82	48,5	70,05	47,1
1,2		77,73	



Figur 54: Kraft plottet mot nedbøyning. Blå linje representerer nedbøyning i midtpunktet

Test nummer fire hadde den jevneste nedbøyningen på høyre og venstre side (Figur 54). Materialet oppførte seg som forventet.

Beregninger ble utført ved hjelp av formel 1 og tabell 15 og resultater presentert i tabell 16.



Figur 55

$$E = \frac{Pa}{24 I \Delta} (3l^2 - 4a^2) \quad (1)$$

P = kraft (se figur 55)

$$I = \frac{1}{12} b * h^3$$

b = bredde av tverrsnitt

h = høyde av tverrsnitt

l = lengden av bjelken (se figur 55)

a = avstand mellom opplager og kraft (se figur 55)

Δ = max nedbøyning

Tabell 15

Tv.snitt:				
b	48	mm	l	3114752
h	92	mm		
L	1325	mm		
a	500	mm		

Tabell 16: Beregnet E-modul [MPa] med testenes gjennomsnittlige verdi nederst

E1	E2	E3	E4
355,6757774	383,74724	465,43168	383,365402
356,3864183	392,809895	477,081196	384,513203
366,2559462	408,656426	475,34018	380,145513
363,8776608	342,473093	461,600115	377,675279
363,9989938	408,488483	453,949871	370,950692
	402,965294	448,284547	370,747697
	388,801057	436,79154	220,296599
		411,489878	
		386,515942	
		312,579589	
361,2389593	389,705927	432,906454	355,384912

Beregnet en gjennomsnittlig E-modul på 385 MPa.

3.5 Segmentbjelke oppbøyning

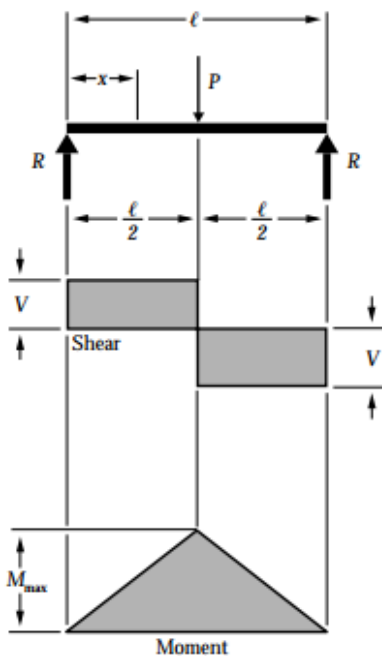
Denne testen ble gjennomført ved at vi brukte en ca 5 m lang segmentbjelke, og bøyde den oppover ved hjelp av jekkestropper. Vi målte samtidig lengden mellom de to endepunktene, høyden og kraften som ble påført. Målet var å bøye bjelken til brudd. Denne testen utførte vi

bare én gang fordi vi nødvendig ville knekke for mye materiale. Det var også en test som var vanskelig å gjennomføre fordi påført kraft måtte være så jevn som mulig, og bjelken måtte hjelpes til å få en riktig bøy. Når bjelken knakk var det aldri noen splinter som fløy, men det kunne oppstå skader dersom den knakk veldig brått (Figur 56).



Figur 56: Oppbøyningstest [XIX]

E-modul ble beregnet ved hjelp av formel 2 på grunnlag av data i tabell 16. Oppbøyningen blir illustrert i figur 58.



Figur 57: Denne figuren blir litt unøyaktig i dette tilfellet, men er brukt for å gi en illustrerende verdi

$$E = \frac{1}{48} \frac{Pl^3}{\Delta I} \quad (2)$$

P = kraft (se figur 56)

$$I = \frac{1}{12} b * h^3$$

b = bredde av tverrsnitt

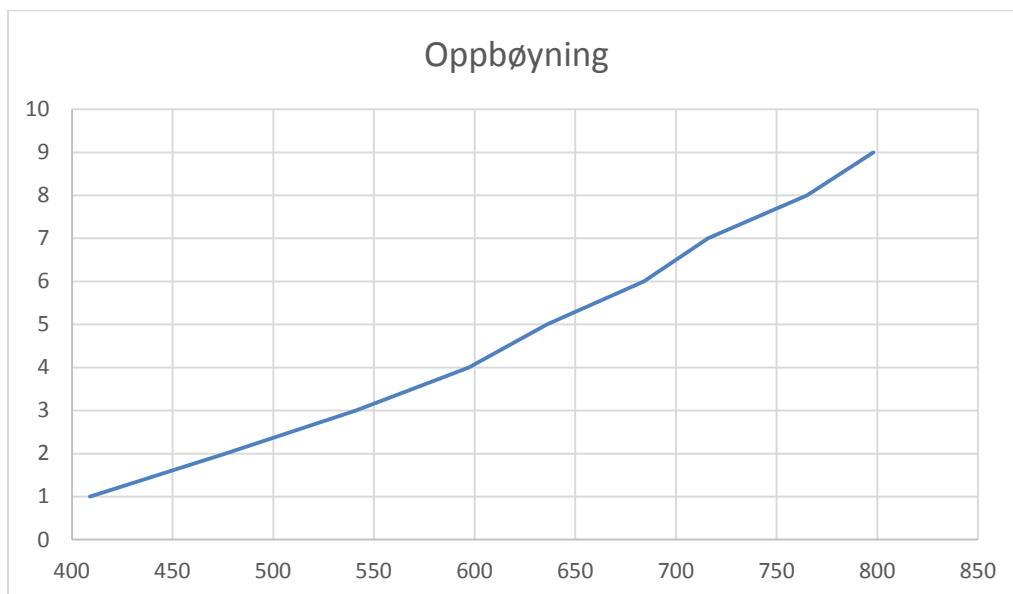
h = høyde av tverrsnitt

l = lengden av bjelken (se figur 56)

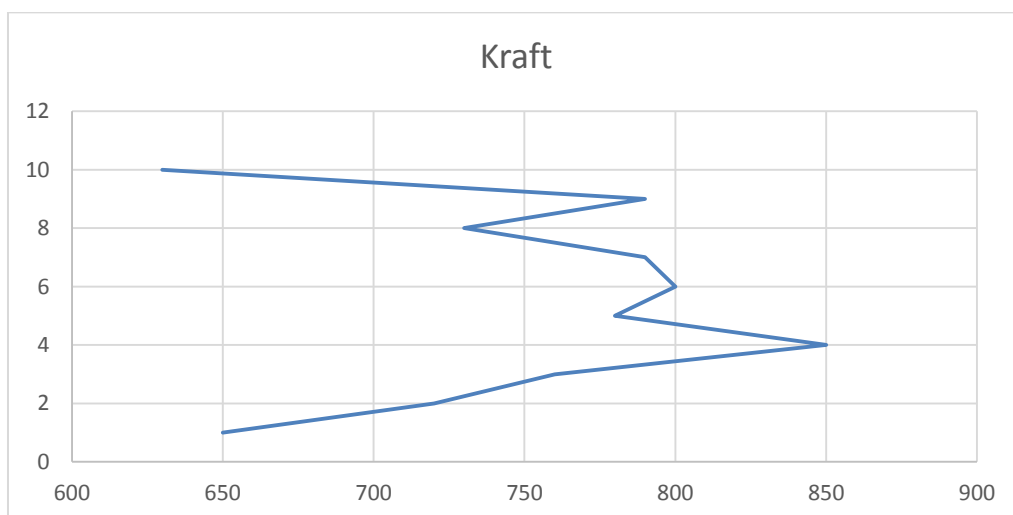
Δ = max nedbøyning

Tabell 17: Målte verdier, tverrsnittsverdier og utregnet E-modul med gjennomsnittsverdi.

Punkt	Kraft [N]	Lengde [mm]	Oppbøyning midt [mm]	Høyde ende [mm]	Oppbøyning tot. [mm]
1	650	4600	589	180	409
2	720	4580	676	200	476
3	760	4520	761	220	541
4	850	4490	822	225	597
5	780	4470	876	240	636
6	800	4430	944	260	684
7	790	4400	986	270	716
8	730	4350	1045	280	765
9	790	4320	1088	290	798
10	630				
Tv.snitt:					
b	48				
h	92				
l	3114752				
E					
1034,663					
984,7689					
914,5872					
926,9437					
798,4473					
761,4522					
718,3281					
621,2554					
644,5149					
822,7734					



Figur 58: Segmentbjelkens oppbøyning i cm, jeg vil påstå at dette viser stor bøyelighet i materialet



Figur 59: Påført kraft

Siden vi manuelt bøyde bjelken med jekkestropper er det naturlig at den målte kraften er ujevn (Figur 59). Vi opplevde at det ble tyngre og tyngre å stramme stroppene helt til det nærmet seg brudd. Gjennomsnittlig kraft var 750 N, og gjennomsnittlig E-modul 823 MPa.

3.6 Kommentar

Jeg observerer at den gjennomsnittlige E-modulen varierer mye. I den første materialtesten ble ikke materialet pålastet til brudd, og etter å ha utført flere tester registrerer jeg at E-modul synker ved økt last og nedbøyning. Dermed vil ikke gjennomsnittsverdien fra denne testen være like lav som den sannsynligvis burde være. Vi opplevde også at tester gjort med

manuelle vekter og måleur har større usikkerhet fordi vektene ikke nødvendigvis veide det de skulle og måleurene var vanskelige å stille til null før nedbøyning. Avlesning ble dermed mer unøyaktig enn de testene gjort i maskin.

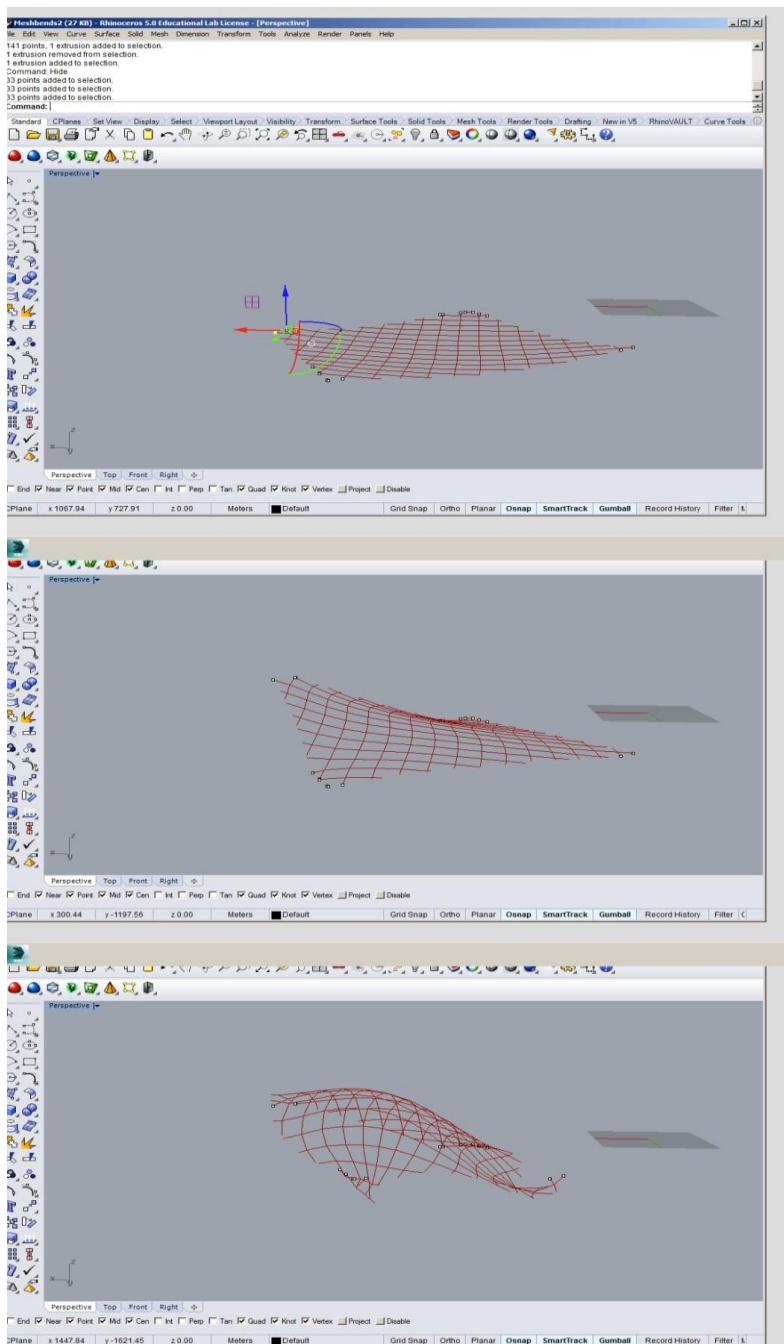
Testen gjort hos Sintef ble utført med materiale av litt lavere kvalitet, dette kunne vi se både fordi lektene hadde bredere årringer og økt hyppighet av kvist. Det er altså logisk at E-modulen er lavere enn i de andre segmenttestene. Målt kraft kan også være unøyaktig siden maskinen kun målte i kN. Maskinen hadde også en unøyaktighet der kraften plutselig viste lavere verdi (Figur 49), dermed er det naturlig å tenke at det kan være flere unøyaktigheter i målingene.

De forskjellige segmenttestene ble utført med bjelker i forskjellige lengder og med kraft påført på ulike steder. Dette skal ikke ha noe å si dersom materialet er homogent, men på et materiale som tre kan dette føre til lokale forskjeller. Testen utført hos Sintef hadde kun last på den midterste lekten, men segmenttesten utført manuelt hadde last påført på to forskjellige. Dette utgjør stor forskjell i bevegelse for bjelken, og dermed også nedbøyning.

Kapittel 4: Bygging

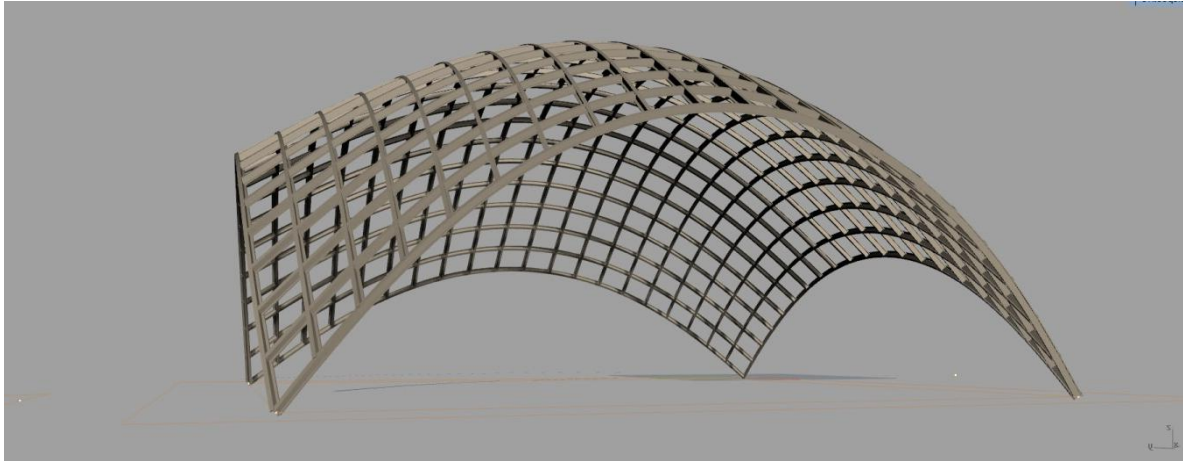
4.1 Utvikling av egen modell

Arkitektene brukte tegneprogrammet Grasshopper ved hjelp av plug-in-programmet Rhino. Der kunne man enkelt forme en figur for å forstå en form og dens begrensninger. De hadde et flatt gitter som utgangspunkt, og kunne dermed forme helt fritt (Figur 59). Materiale kunne velges etter at formen var gitt, og man fikk en illustrativ figur som var enkel å forstå (Figur 60).



Figur 59: Illustrasjon av formfinding i Grasshopper [XX]

Tegneprogrammets handikap var at treets egenskaper ble glemt under utforming. Der ingeniørprogrammet Abaqus var så detaljrik at det ble et hinder for utformingen ble Grasshopper for lite konsekvensanalytisk. Ved hjelp av våre egne praktiske tester fikk vi en utvidet forståelse av hva som i realiteten var en enkel eller kompleks form.



Figur 60: Illustrasjon i Grasshopper med riktige dimensjoner og materiale [XX]

4.2 Buegang

For enkelhets skyld begynte vi å studere en buegang. Dette var en form som var enkel for alle dataprogrammer og enkel for praktisk utforming. Vi ønsket å undersøke treverkets bøyeegenskaper rent fysisk, og vi ønsket å teste ideene vi hadde til oppstramming og knutepunkt. Det var viktig for arkitektene at skallet skulle være av gran fordi gran er det mest tilgjengelige treverket i Norge, det skulle være rimelig og kortreist i motsetning til treverk brukt i de mest kjente skallene i verden (kap 2.2, 2.4 og 2.5). Treverket vi brukte i denne testen var av billigste sort, styrkeklasse C16 (tabell 1) og flatt areal var 3x3 m.

Vi vurderte to alternativer til knutepunkt, men oppdaget kjapt av alternativ1(Figur 61) var mest gunstig. Alternativ 2 var ikke stabil nok og ville hindre bevegeligheten i knutepunktet ved oppstramming. Vi ville også unngå å lage hull i treverket da vi anså at dette kom til å bli et svakt punkt med tanke på brudd.



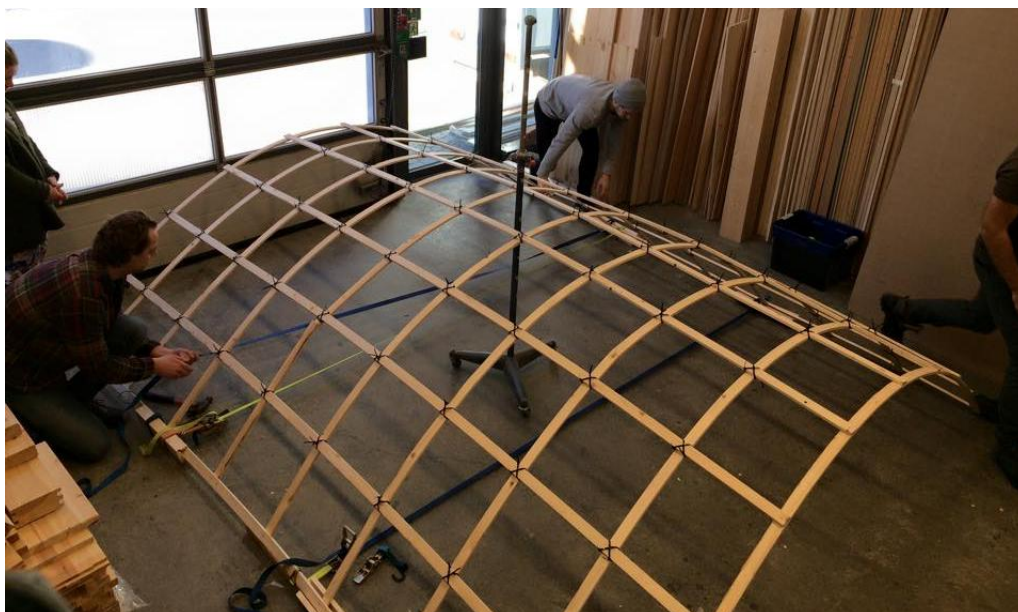
Figur 52: Alternativer til knutepunktløsninger, alternativ 1 til venstre og alternativ 2 til høyre

Vi valgte å bruke strips fordi det var et materiale som var enkelt å bruke, billig og få tak i og sterkt nok til vårt formål. Vi oppdaget også at dersom stripsene ble strammet for mye ville knutepunktet oppleves som låst, og bøyning ble utfordrende.



Figur 53: Gitter etter montering før bøyning

For å jobbe med formen brukte vi jekkestropper som vi festet i langsidene. Det var likevel vanskelig å få en jevn form så innstrammingen måtte skje forsiktig (Figur 62). Konstruksjonens ramme ble festet med skruer, og der jekkestroppene ble festet måtte rammen forsterkes for å fordele belastningen. Vi oppnådde en maksimal høyde på ca 90 cm før brudd (Figur 63).



Figur 54: Gitter bøyd diagonalt i buegang [XX]

Det ble ganske åpenbart at kvist ville være et avgjørende punkt spesielt utsatt for knekking (Figur 64). Vi opplevde ofte at dette ble kritisk punkt, og begynte å sortere med hensyn på dette, for eksempel brukte vi dem på langs der skallet ikke skulle bøyes.



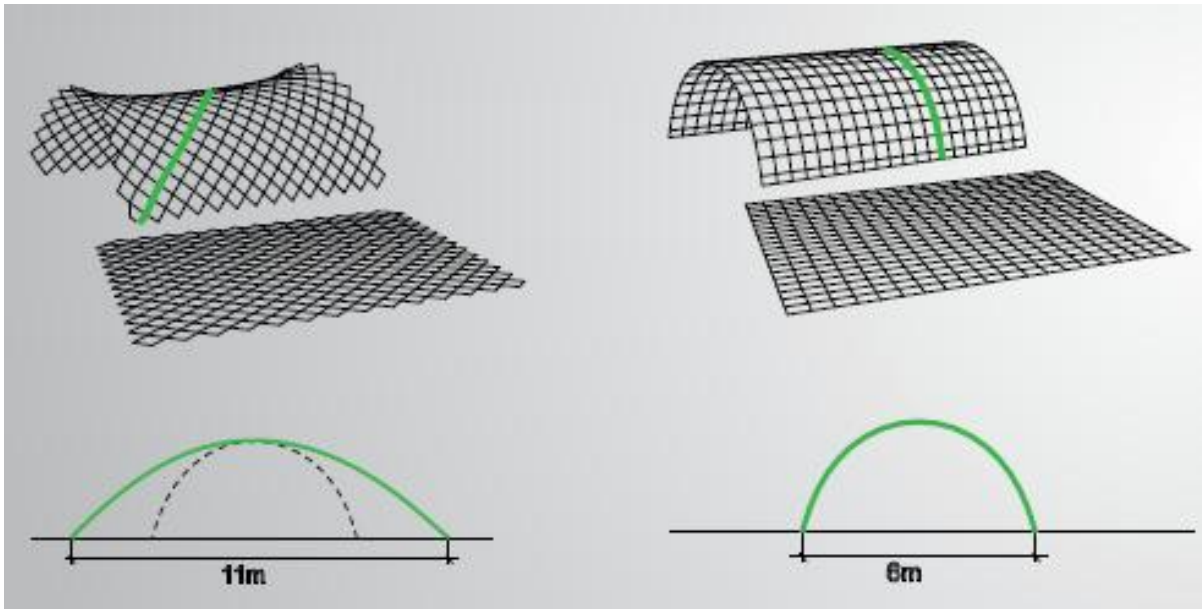
Figur 55: Kvist ble avgjørende for bjelkens bøyeegenskaper

Ingeniørene foreslo en buegang med gitter vridd 45° . Dette ville ligne mer på et fagverk, noe vi anså var mer optimalt. Treverket vi brukte denne gangen var av bedre kvalitet, C24 (Tabell 1) og betydelig færre kvist.



Figur 56: Gitteret bøyd ortogonalt i buegang

Her oppdaget vi at bøyelighet var mye større. Det er fordi ingen av plankene skal bøyes rett over, og alle plankene blir utsatt for like store krefter. Vi antar også at kreftene blir jevnere fordelt, og vil også tåle større ytre last. Maksimal høyde oppnådd var ca 120 cm. Siden plankene lå på skrå ville de ikke bøyes like mye som de som ble bøyd rett over (Figur 65).



Figur 57: Illustrasjon av buegang i henholdsvis ortogonal og diagonal form, den grønne linjen illustrerer én bjelkes bøy. Her kan man tydelig se hvilken form som utsetter en enkeltbjelke for mest press [XX]

Utfordringen var at lektene måtte være mye lengre, noe som var vanskelig å få tak i (Figur 66). Arkitektene ønsket å løse problemet med skjøting av bjelker for å lage et skall med dimensjoner 10x10 m.

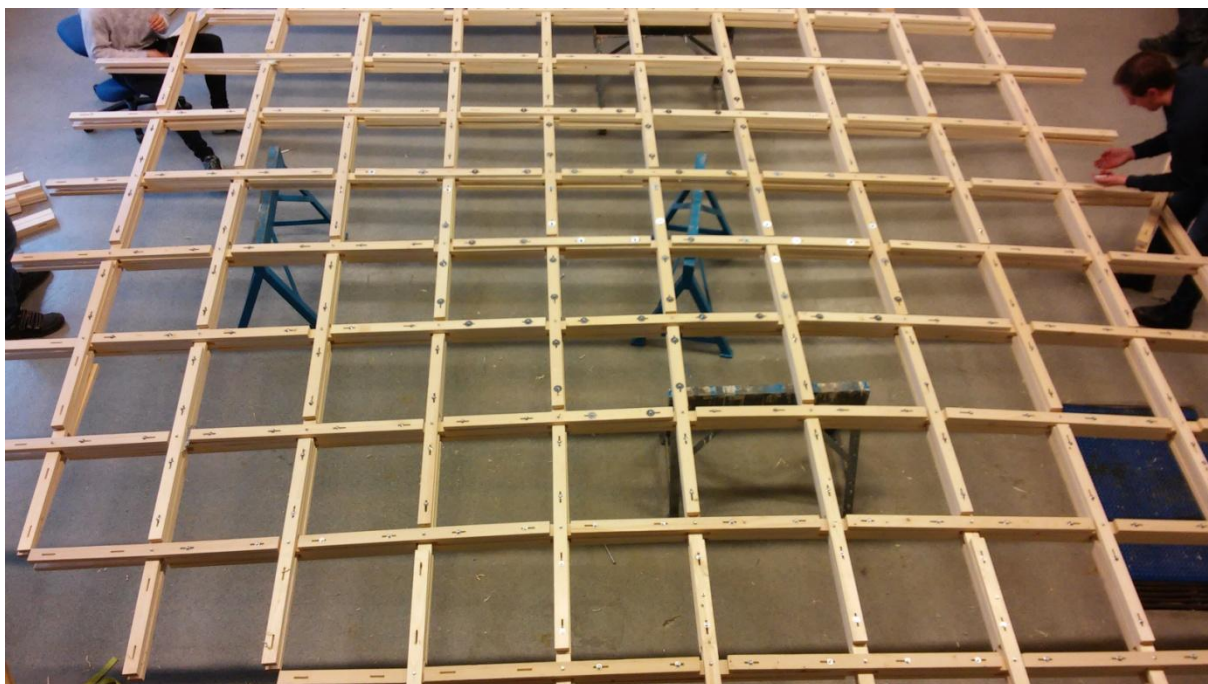
4.3 Forsøk i lab

Denne modellen skulle være i størrelse 5x5 meter, og er inspirert av Toledo Gridshell (kapittel 2.6) satt sammen av treverk delt i segmenter og skjøtet på en hensiktsmessig måte. Arkitektene fikk laget 90 cm lange planker som ble satt sammen i bunker på 4 med en bolt midt på og hull til en bolt på hver ende (Figur 67). Disse segmentene kunne sorteres slik at de hadde minimalt med kvist, og var lette å skjøte i hverandre. Hullene som var laget på endene av plankene var avlange slik at boltene fikk bevegelsesfrihet under formingen av konstruksjonen. Treverket som ble brukt var spesialbestilt yteved fra Stryn som skulle være av høyeste kvalitet med minimalt med kvist.



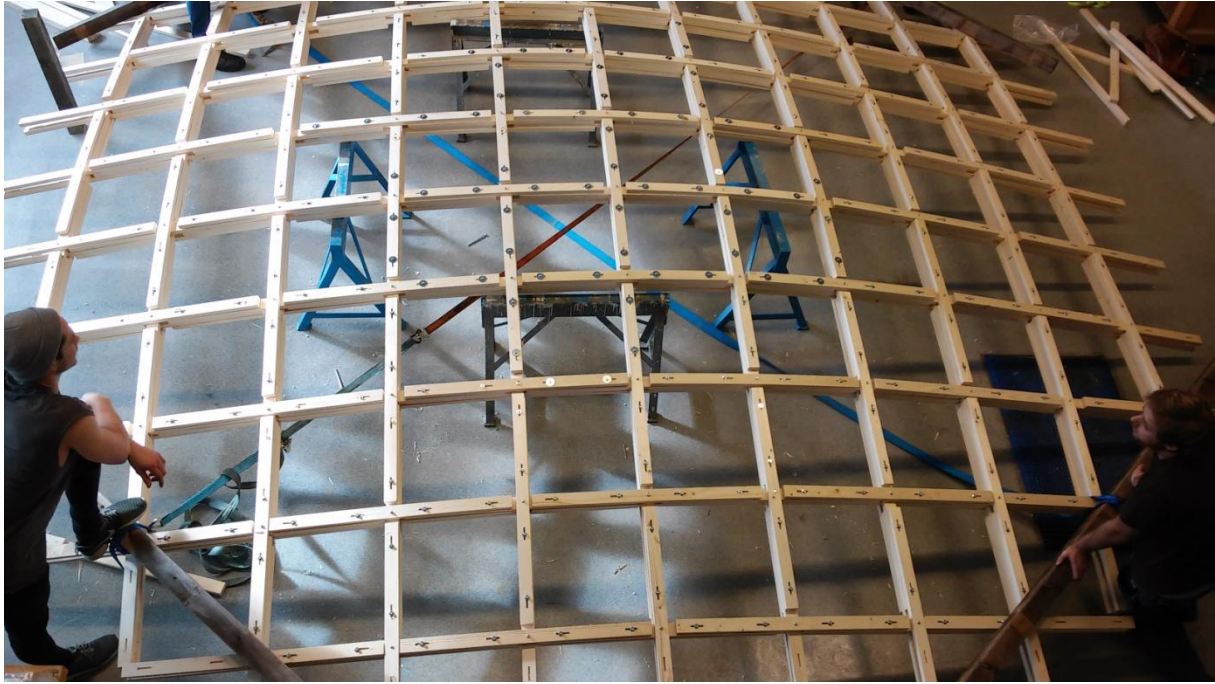
Figur 58: Bjelkesegmenter skåret til med fres, sortert i kryss og videre montert sammen med bolter med diameter 8 mm

Å sette sammen gitteret var en rask prosess, vi passet på å ikke stramme boltene for godt slik at formingen skulle gå lettere (Figur 68).



Figur 59: Gitteret monteres på bukker for en bedre arbeidsstilling

Bøyingen skulle likevel vise seg å være krevende, selv om vi var 6 stk på det meste. Skallet var på vei til å finne formen, men hvordan skulle vi klare å bøye tilstrekkelig mye? Først forsterket vi hjørnene med bjelker, deretter la vi på vektskiver på 100kg for å prøve å motstå sparkekrefter. Vi prøvde først med jekkestropper diagonalt under, men det ble vanskelig å få en jevn bøy og for tungt å stramme manuelt (Figur 69). Vi prøvde å presse skallet sammen slik at de avlange hullene ville tillate en bedre bøy, men vi oppdaget at dette hadde liten effekt.



Figur 60: Vi forsøker å bøye skallet, dette gjorde vi først og fremst for å oppleve hvordan det var å jobbe med segmentene og hvor stor krumning det var realistisk å oppnå

Vi lagde et form for oppheng der vi kunne heise opp den midtre delen av skallet (Figur 70). Først prøver vi å heise opp midtpunktet med en jekkestropp, men det blir for stor belastning for ett punkt. Vi festet deretter en pall under gitteret for å unngå for kraftig punktbelastning. Parallelt brukte vi jekkestropper diagonalt under gitteret. Dersom en lekt knakk kunne vi enkelt ”åpne” gitteret og erstatte den uten at det var fare for at verken bæring eller form. Siden dette var en test behandlet vi skallet ganske røft for å bli kjent med bøyning og knekking.



Figur 61: Stativ laget for å forsøke å heise skallet opp i form

Torsjon var et problem som kunne oppstå. Vi observerte at segmentene beveger seg i forhold til hverandre noe som kan føre til spenninger i boltene ved knutepunktene (Figur 71).



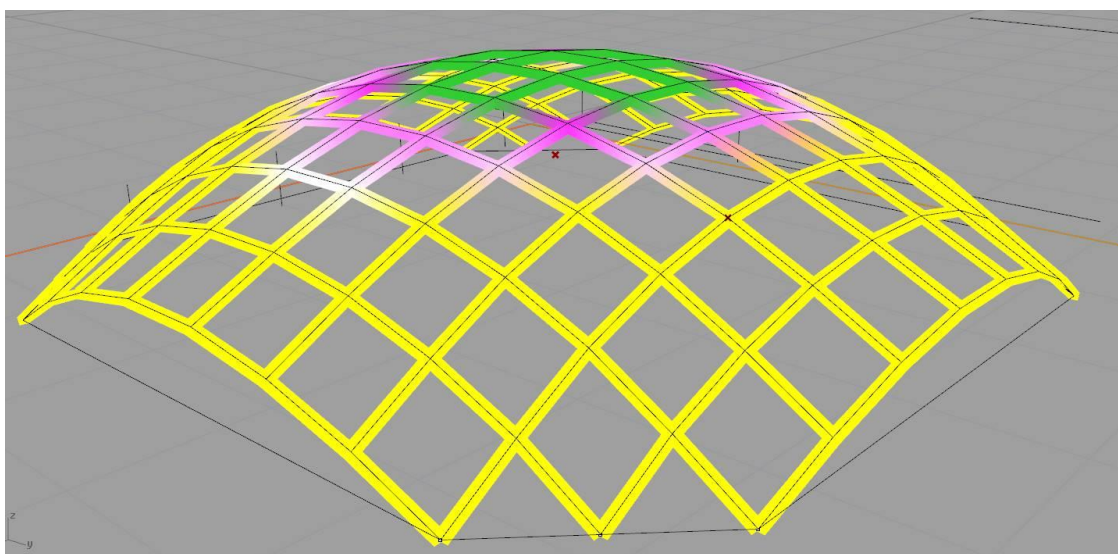
Figur 62: Følger en krum bjelke i skallet og observerer at segmentet prøver å holde en rett form. Ved hvert knutepunkt har segmentet vanskeligheter med å holde formen

Da vi endelig var fornøyde med kurvaturen monterte vi diagonale avstivere over hele skallet. Dette skulle i hovedsak hjelpe skallet med å holde formen (Figur 72).



Figur 63: Diagonale avstivere montert på utsiden av skallet

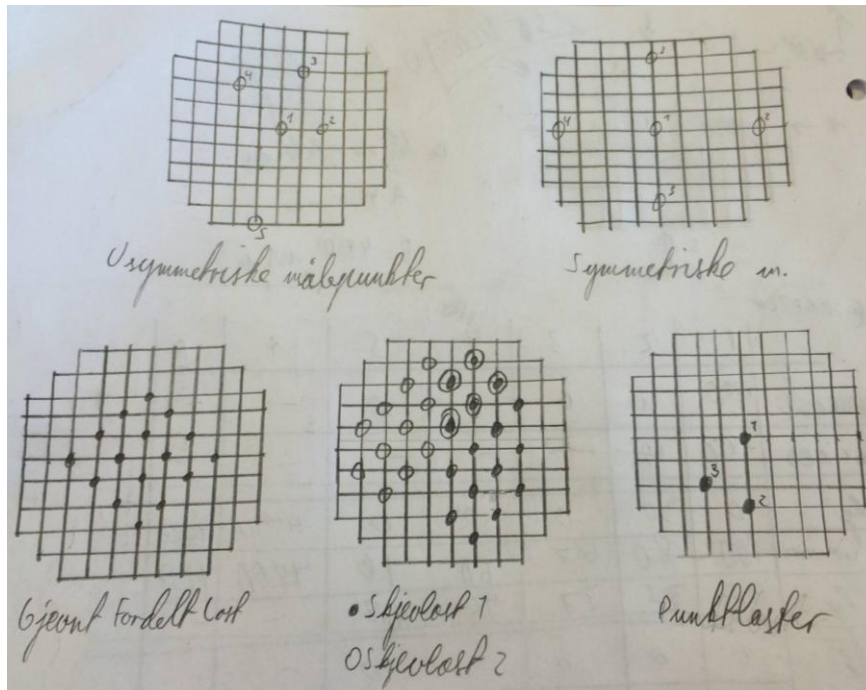
Modellen vi lagde var en 5x5 m modell, altså bare en liten del av en 10x10 m. Siden materialene var laget i opprinnelig størrelse fikk vi bare en liten krumning, tilsvarende den grønne og lilla delen av figuren (Figur 73). En 10x10 modell ville få en mye større krumning ved hjelp av mindre kraft. Vi innså at den lille krumningen vi hadde fått mest sannsynlig var større enn den vi ønsket, noe vi ikke hadde innsett da vi jobbet med formen.



Figur 64: Illustrasjon av skallet med dimensjoner 10 x 10 m [XX]

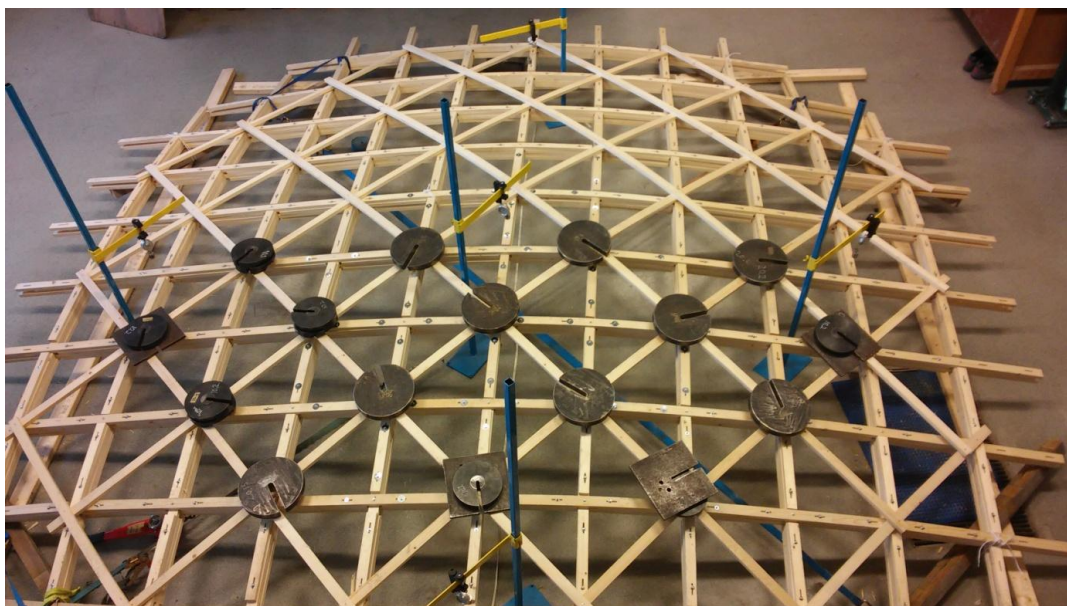
4.4 Skalltesting

Ingeniørene foretok skalltester gjort ved å legge 20-30 kg i de forskjellige knutepunktene. Dette gjorde vi for å se hvor symmetrisk skallet oppførte seg. Vi la på last både symmetrisk og asymmetrisk, i midtpunktet og ute ved sidene (Figur 74 og 75) og målte nedbøyningen med måleurl som var plassert symmetrisk.



Figur 65: Illustrasjon av de forskjellige nedbøyningstestene vi foretok [XXI]

Dette forsøket er relativt unøyaktig fordi skallet ikke var festet tilstrekkelig i hjørnepunktene. Vi oppdaget også at nedbøyningen ikke var fullstendig etter bare kort tid med belastning, og at nedbøyningen ville øke over tid, se eksempelet i tabell 17. Da vekten ble fjernet ville ikke skallet gå fullstendig tilbake til sin opprinnelige form. Siden dimensjonene var såpass små fikk ikke skallet den riktige kurvaturen. Dermed oppsto det store sparkekrefte, og skallet ville sparkes ut like mye som det ville bøyes ned ved påføring av last. Derfor ble disse resultatene veldig unøyaktige å bruke mot den numeriske Abaqusmodellen. Vi innså i ettertid at det hadde vært mer hensiktsmessig med en større modell, men den plassen vi var tildelt begrenset dette.



Figur 66: Asymmetrisk jevnt fordelt last, målte verdier i tabell 17

Tabell 11: Måledata vi fikk ut av asymmetrisk jevnt fordelt last. Vi oppdaget en betydelig forskjell i nedbøyning etter at lasten hadde ligget på skallet i en time

Alle mål i mm						
Asymmetrisk:	Last[kg] \ Måler#	1	2	3	4	5
Jevnt Fordelt Last:	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	10	7,0	7,8	6,6	6,2	1,7
	20	31,1	34,1	23,9	20,7	8,0
	[60min] 20	39,0	42,2	28,4	24,9	9,7
Avlastet	0	25,0	22,6	16,3	14,4	3,7

4.5 Hovedmodell

Arkitektenes idé bak skallet var at det skulle være en form for prototyp som var enkel og konstruere og enkel å variere (Figur 76). Gitterskallene som tidligere har vært laget andre steder i Europa har vært i høykvalitets løvtrær for eksempel lerk, men vi ønsket å bevise at det var mulig å bruke gran som er et kortreist materiale, tilgjengelig både i pris og levering. Svinn skulle være minimalt, det skulle være enkelt å produsere og montere for minst to personer. I tillegg er segmentene enkle å skifte ut dersom det skulle oppstå et brudd.

Vårt prinsipp:

- Enkelt å fjerne kvist: lite svinn
- Produserast på liten fres
- Mogleg å bytte ut ødelagde bitar
- Ein modul gir alle moglege grid-variantar.
- Transportvennleg
- Byggbar for to personar



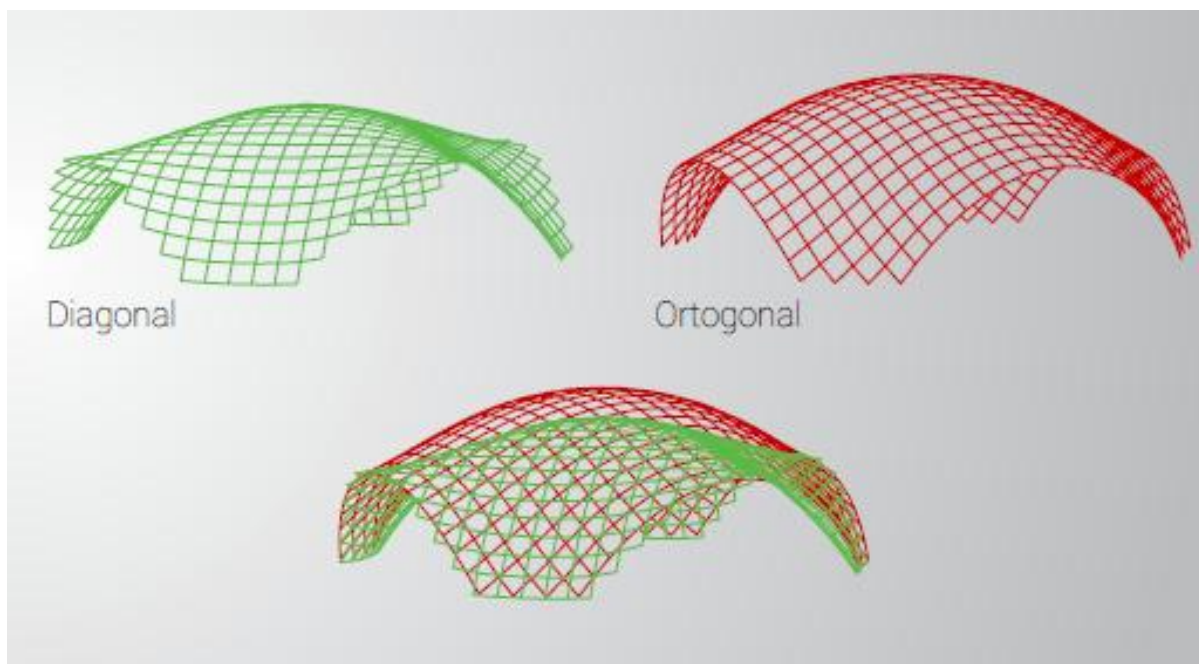
Figur 67: Prinsippet bak gitterskallet [XX]

Materialene ble kappet til og frest på hull, denne gangen ble bevegeshullene redusert betydelig sammenlignet med sist (Figur 77). De midterste lektene trengte ikke bevegelighet. Selv om nøyaktig samme type tre ble bestilt, oppdaget vi at kvaliteten ikke var like god. Hjørnesegmentene skulle være enda kortere igjen, så mer materiale kunne brukes selv om hyppigheten av kvist økte.



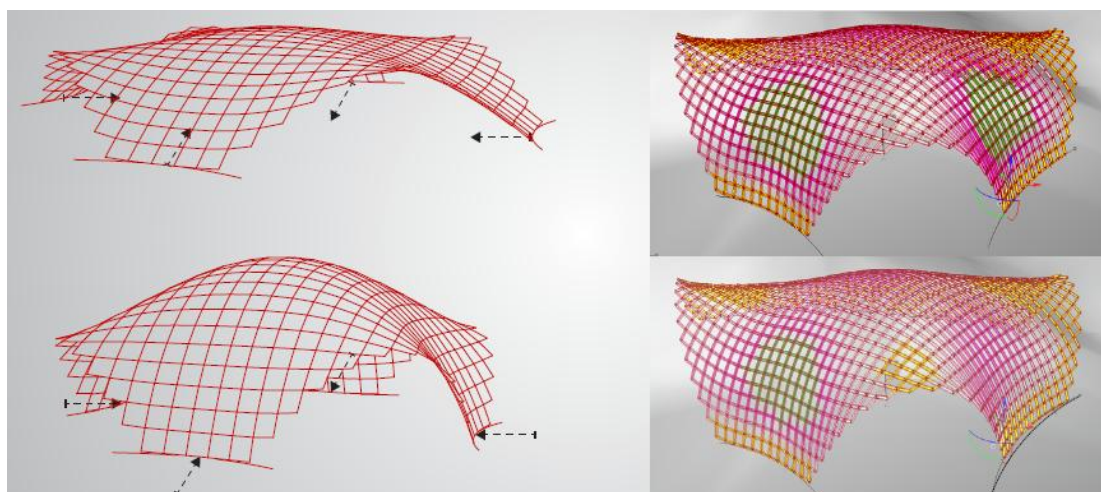
Figur 68: Til venstre er de opprinnelige segmenter brukt i forsøksskallet. Til høyre er de forbedrete utgavene brukt i hovedmodellen. Legg merke til at den øverste lekten ikke har bevegeshull og er de to segmentene midt i bjelken

Vi hadde tidligere jobbet med en ortogonal form (kapittel 4.3) etter erfaringene med buegangen (kapittel 4.2), men hovedmodellen skulle være diagonal (Figur 78). Dette var fordi det ville bli lettere å feste opplagerne når festebjelken var en hel rett bjelke. Dessuten ville ikke fordelene med ortogonal form være like store. Formen ville være litt annerledes, men ikke mye.



Figur 69: Diagonalform sammenlignet med ortogonal form [XX]

Kurvaturen var avgjørende for om det ble mye spenninger eller ikke. Dersom ikke skallet hadde riktig form ville det oppstå flere sparkekrefter og spenninger i figuren. Dette er illustrert i figur 79. Her ser vi at den øverste figuren har et større grønt område langs sidene, men dersom randen blir flyttet litt ser vi at det grønne området forsvinner. Dette er en stor fordel fordi lokale brudd kan unngås.



Figur 70: Illustrasjon av hvordan formen påvirker spenningsfordelingen i skallet [XX]

Vi visste at en modell på 10x10 ville gi en mye større krumning, derfor var det enda viktigere å lage et stativ, eller en seng, for å unngå å få en punktlasteffekt. Arkitektene bygget et stativ som enkelt kunne heises opp ved hjelp av paller (Figur 80 og 81). Dermed kunne gitterskallet lett finne formen helt naturlig og monteringen kunne holdes i en behagelig høyde. Materialene

ble lett dusjet under monteringen av en hageslange for å øke bøyeligheten, dessuten fikk hele modellen seg en regnskur mens den enda ble holdt oppe av pallene.



Figur 71: Sengen skallet skulle monteres på. Denne ble løftet opp av paller etter som arealet av gitteret økte [XX]



Figur 72: Skallet ble heist opp av paller ved bruk av jekketralle

Rendene skulle festes i betongblokker vi fikk låne midlertidig. På disse bildene er ikke rendene festet (Figur 81, 82, 83), de ligger bare med jekkestropper løst rundt betongblokkene.

Det var viktig å ikke tvinge materialet for mye for fort, heller gi skallet noen dager for å formes helt av seg selv. Skallet ble også vannet innimellom.



Figur 73: Betongblokkene lagt på plass men ikke festet til skallet enda. Vi oppdaget at formen var ganske nær den vi ønsket



Figur 74: Skallet har oppnådd en meget tilfredsstillende kurvatur

Etter å ha ligget i fred noen dager ble rendene festet til betongblokkene med jekkestroppene og diagonale avstivere montert (Figur 84). Disse ble plassert hovedsakelig der de var mest nødvendige, altså der det er mest behov for jevn fordeling av last. Det gikk enda noen dager før pallene ble fjernet, og da observerte vi at skallet hadde løftet seg fra pallene. Dette tyder på at skallet hadde funnet sin optimale kurvatur (Figur 79).



Figur 75: Randbetingelser er oppfylt og avstivere er montert

Erfaringen vi hadde fått både av Toledo Gridshell (kapittel 2.6) og av vår egen bygging var at de diagonale hjørneområdene måtte få bevare sin naturlige bøyde form for å slippe unna mye ekstra spenning (Figur 85 og 86). Denne fordelingen ble lettere bevart i den diagonale formen.



Figur 76: Observerer en lokal krumning i skallets bueganger



Figur 77: Observerer en lokal krumning i skallets bueganger

Observerer at kurven har forandret seg mye fra den spisse formet skallet hadde i starten av monteringen (Figur 87 og 88). Det er viktig å poengtere at dette i utgangspunktet er et flatt

gitter som er bøyd og ikke elementer som allerede er bøyd. Dette skallet har altså et flateareal på 10x10 m, og er bøyd til å oppnå en maksimal høyde på 4 m.



Figur 78: Skallet i begynnelsen av monteringen



Figur 79: Skallet ferdigstilt

Kapittel 5: Diskusjon

5.1 Erfaring

Den største fordelen man kan ha ved konstruering av gitterskall er plass nok til å bygge det i flat form. Det vil etter hvert finne sin naturlige bøy, og dermed spare inn litt av arealet, men en begrenset byggeplass kan potensielt være det største problemet. Materialene kan deformeres feil hvis det tvinges i form og uforutsette brudd kan oppstå siden tre er et veldig uberegnelig materiale.

En annen viktig erfaring vi gjorde oss var å ha en god plan for hvordan gitteret skulle formes. En kran kan også brukes, men da må den ikke heise formen fra få punkter, det vil føre til brudd i de aktuelle knutepunktene. Å heise opp midtpunktet vil fungere dersom kraften blir jevn fordelt. Men en kran er kostbar og krever både montering og demontering, kranfører, HMS-tiltak, i tillegg til ”plass i lufta”. Å bygge opp gitteret nedenfra vil være å foretrekke, dessuten kan denne metoden med paller og jekketralle benyttes av kun to personer. Når det er snakk om større konstruksjoner vil en kran være en nødvendighet, men det vil også være snakk om et annet budsjett.

Det kunne vært interessant å finne ut hvilken størrelse boltene optimalt burde hatt for å påvirke lengdeegenskapene til treverket minst mulig. Splitteeffekt må også unngås. Da vi oppdaget at bevegelseshullene i segmentene kunne reduseres valgte vi å gjøre det av nettopp denne grunnen.

Torsjon vil unngås ved at diagonalhjørnene av figuren får beholde sin naturlige form. Dette vil være gunstig for spenningen i treverket. Det ville også vært et større problem dersom det hadde vært to lag og ikke fire. I andre eksempler (kap 2.2) er det valgt fire lag nettopp av denne grunn, og fylt mellomrom med skjærblokker. Dette har vi valgt å unngå ved å lage segmenter som flettes inn i hverandre.

Vi ble åpenbart mest inspirert av Toledo Gridshell (Figur 89) av alle referansebyggene (kapittel 2), både av segmentsystemet og av monteringsteknikken. Dette er også skallet nærmest vår størrelsesskala, noe som gjør sammenligningen veldig naturlig. Vi har derimot valgt å løse noen detaljer annerledes. Toledo er et ortogonalt grid, og vårt er et diagonalt (Figur 90). Dette gjør også festepunktene i bakken forskjellige. Toledos render er meget elegant laget, men vi valgte en enklere løsning. Dette var mer gjennomførbart og tidsbesparende i og med at vi slapp å spesialbestille og – kappe materialet. Vi har også valgt å

montere noen avstivere på utsiden, mens Toledo har dem inkorporert i skallet. Dette valgte vi å gjøre for å slippe å lage kompliserte knutepunkt med enda flere segmenter. Avstiverne våre ble derfor bare brukt til å støtte formen etter at bøyningen var ferdig.



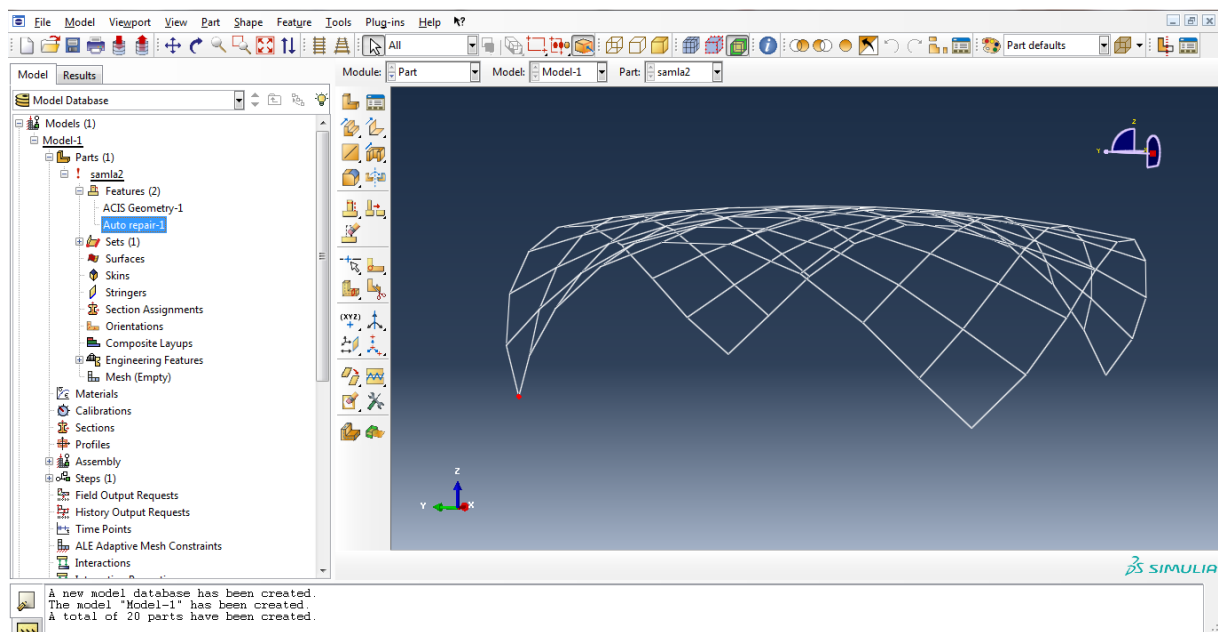
Figur 80: Toledo Gridshell [XVIII]



Figur 81: Hovedmodell

5.2 Utfordringer ved parametriske modellering

Vi opplevde en del utfordringer med parametriske modellering av skallet. Det hadde vært ønskelig om arkitektens program Rhino og Grasshopper kunne brukes til å tegne en modell som kunne overføres direkte til Abaqus. Det lot seg gjøre å overføre linjer, vist i figur 91, men herfra måtte hvert enkelt element markeres for å gi de riktige egenskaper og dimensjoner. Abaqus hadde heller ingen mulighet til å beregne dimensjonerende ”oppbøyning”, altså nedbøyning opp ned. En brukbar modell måtte lages fra bunnen av for å fungere tilnærmet optimalt.



Figur 82: Illustrasjon i Abaqus

5.3 Naturlaster

For jevn belastning, blir økningen i respons funnet å være tilnærmet proporsjonal med økningen i den totale belastningen strukturen [17]. Dette betyr at tynnere skall er mer sårbare enn tykkere skall for ekstra laster, f.eks. snø. Den foreslåtte snølasten i Oslo, gitt i Eurokode 1 [18] er ca $2,8 \text{ kN/m}^2$.

Når egenvekten av strukturen er den eneste belastningen, er effekten av økt tykkelse positiv, men begrenset. For ytterligere belastninger, er effekten mer omfattende, noe som betyr at omfanget av eksterne laster i stor grad bestemmer den nødvendige tykkelsen.

5.4 Tett tak

Et ønske fra arkitektens side var å gjøre gitterskallet til et tett tak. Hvis de kunne bevise at dette var en utfordring de hadde betraktet og løst ville dette gjøre gitterskallet til et mye mer

brukbart bygg, i hvert fall i Norge. De ønsket å fokusere på et brukbart bygg snarere enn et arkitektonisk byggverk. Det ville også være en fordel om takledningen ikke ville øke belastningen på taket i betydelig grad, samtidig som den ville slippe naturlig lys inn. Den umiddelbare tanken var å bruke glass i gitteret, som et skall bygd av mange små vinduer. Denne ideen var åpenbart umulig å gjennomføre, i og med at glasset ville måtte ha forskjellig kurvatur i hver rute og ta hensyn til treverkets naturlige bevegelser.

Et annet mulig forslag var å bruke gjennomsiktig hardplast lagt overlappende på en skifer/takstein-lignende måte. Fordelen med dette materialet er at vann enkelt ville renne av taket, og overlappingen ville gi treverket mulighet til bevegelse. Plasten ville ha gode muligheter til å festes i skallet så lenge plastrutene var i en brukbar størrelse.

Et tredje forslag som har dukket opp som ny teknologi er en membran som fungerer som vannbeskyttelse og isolasjon. Membranen er fullstendig tøyelig og tilfredsstillende krav om tett tak, mulig et enda bedre alternativ om det innvendige rommet skulle brukes aktivt på grunn av isolasjonsegenskapene. Membranen er derimot ikke helt gjennomsiktig, men transparent nok til å slippe naturlig lys inn i rommet. Mulig dette alternativet er det mest kostbare, og er mindre tilgjengelig enn de andre.

Det alternativet vi til slutt falt ned på var å bruke en 3D-printet plastduk. Den tegnede modellen i Grasshopper vil gi nøyaktige overflatedimensjoner av skallet noe som gjør printingen veldig enkel. Dette vil også være en demonstrasjon av ny teknologi i samarbeid med datamodeller, og bidra til å utnytte de mulighetene 3D-printing kan gi i byggesammenheng. Plastduk er definitivt det materialet som bidrar til minst belastning på skallet, men om materialet er det mest gunstige vil være en subjektiv bedømmingssak, men 3D-printing vil være en mulighet for flere av de nevnte materialene.

5.5 Arkitekt vs. ingeniør

For å oppsummere dette samarbeidet må jeg først og fremst peke på den økte forståelsen av prosessen arkitektene gå igjennom. Jeg har oppdaget at når man føler seg på utrygt grunnlag blir man nødt til å huske på de grunnleggende tingene man har lært og stole på seg selv i sin rådgivning. Det er lov å ikke ha et svar, men det er også lov å prøve. Når mitt personlige referansebyggbiblioteket har økt har jeg også hatt veldig stor nytte av å merke meg gode argumenter fra tidligere bygg. Da kan man selv forsvare og argumentere for sine ideer på samme måte.

Som student har man heller ikke opparbeidet den erfaringen om hvilke elementer det lønner seg å prioritere. Man er heller ikke helt stø på hvilke tekniske krav man skal forholde seg til, det som virker som en smart løsning for noen er upraktisk for andre.

Dette samarbeidet har bestått av mye eksperimentering, prøving og feiling. Vi har lært hvordan vi kan utnytte vår kunnskap, men vi har også lært hverandre begrensninger. I tillegg har vi lært hvor komplisert en byggeprosess kan være, og hvor avhengige vi er av andres kunnskap og hjelp, for eksempel materialprodusentene.

Et godt samarbeid skapes først og fremst av et engasjement og en felles interesse av å få til et optimalt resultat. En ingeniør utvikles ved å tenke nytt og å tørre og ta en sjanse, ikke gro fast i de metodene som alltid har fungert. Det kan til tider virke skummelt, men å oppnå et resultat der alle parter har gitt det lille ekstra vil være mer inspirerende og utviklende for flere, samtidig som utbyttet blir større både for deg personlig og for samfunnet.

Arkitekten Florian Kosche har laget en liste over faktorer han mener skiller arkitekter og ingeniører (tabell 18)[19], samtidig som han mener det er viktig å ikke generalisere. Han peker på at det beste samarbeidet er der man klarer å snakke sammen og utfylle hverandre faglig.

De to yrkesgruppene tilnærmer seg et prosjekt forskjellig. Arkitekter ser prosjektet ovenfra, hvilke funksjoner, hvordan det skal se ut, en helhetlig plan. Ingeniører begynner nederst, starter med en detalj, en bolt, og summen av alle boltene blir strukturen.

Ingeniører lærer ikke å presentere et tema, argumentere, de har alt i hodet. At arkitekter kan argumentere betyr ikke at de har rett. Kvalitet for en ingeniør handler om hvor mye en struktur kan bære. Kvalitet for en arkitekt dreier som om hvordan folk vil oppleve en bygning. Arkitekter er prosjektorienterte, ingeniører er interessert i kunnskap.

Kosche poengterer at arkitekter har mange referanser, mens ingeniører nesten ikke har kjennskap til andre ingeniører. Til gjengjeld har ikke en ingeniør så stort ego som en arkitekt. Arkitekten vil ha sitt navn på alt. Dette bidrar til å usynliggjøre ingeniører. Det største ingeniørselskapet i Norge har 1600 ansatte og jobber med prosjekter til milliardbeløp. De jobber sammen, deler ressurser, de er sterkere og har mye mer makt og innflytelse over prosjekter enn arkitekter. Dermed blir arbeidsbelastningen også bedre fordelt blant ingeniørene. Byggeprosessen har blitt mer komplisert enn før og det blir for vanskelig for én av yrkesgruppene å ha full oversikt og administrativt ansvar.

Arkitekter lærer noe om ingeniørarbeid, men i liten grad. Ingeniører jobber med så mange ulike arkitekter at de ofte har bedre forståelse av arkitektur enn arkitektene selv. For å lykkes kreves det et nært samarbeid bestående av gjensidig respekt og tillit.

Tabell 12 Florian Kosche om forskjeller mellom arkitekter og ingeniører [19]

Arkitekt	Ingeniør
Top down	Bottom up
Helhetlig	Detalj
Argumenterende	Analytisk
Prosjektorientert	Kunnskapsorientert
Personfiksert	Teamorientert
Forbilder	Ingen forbilder
Ekstrovert	Introvert
Kjent	Ukjent
Mange små aktører	Store aktører
Fra generalist til spesialist	Fra spesialist til administrator
2-5 mrd NOK	100 mrd NOK
Lavere inntekt	Høyere inntekt
Mye overtid	Overtid etter ønske
Konjunkturavhengig	Stabil etterspørsel
Åndsrett	Patent

Referanseliste

1. Mesnil R. Stability of Elastic Grid Shells [MsC]. Massachusetts: Massachusetts Institute of Technology; 2013.
2. Chilton J. *Heinz Isler's Infinite Spectrum Form-finding in Design*. John Wiley and Sons Ltd., 2010.
3. Happold E, Liddell WI. Timber Lattice Roof for the Mannheim Bundesgartenschau. *The Structural Engineer*, 1975.
4. Knippers J, Helbig T. Recent Developments in the Design of Glazed Grid Shells. *International Journal of Space Structures*. 2009.
5. Schlaich J m.fl. *Leicht Weit*, Pretsel 2003.
6. Schjøtz T. Parametrisk modellering av kinematiske gitterskall [MsC]. Ås: Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet; 2013.
7. European Committee for Standardization. *Structural Timber – Strength Classes, EN 338*. CEN, Brussel; 2005.
8. Mott MacDonald. Centenary Square Terminus Canopy. Vedlegg.
9. Princeton University. Department of Civil and Environmental Engineering. 2013. Tilgjengelig (08.06.15): <http://shells.princeton.edu/Mann1.html>
10. Wikiarquitectura.com Utgitt 09.19.13. Tilgjengelig (08.06.15): http://en.wikiarquitectura.com/index.php/Japan_Pavillion_Expo_2000_Hannover
11. Cullinan Studio. Tilgjengelig (08.06.15): <http://cullinastudio.com/project/download-gridshell>
12. Weald and Downland Open Air Museum: Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.wealddown.co.uk/explore/buildings/further-reading/download-gridshell-project-history-design-brief/>
13. Glenn and Howells Architecture. Tilgjengelig (08.06.15): <http://glennhowells.co.uk/project/savill-building/>
14. Pone S. The Toledo Gridshell. Magazine of Sustainable Design. Utgitt 07.04.11. Tilgjengelig (08.06.15): http://ecowebtown.eu/n_5/04_pone_en.html
15. American Forest & Paper Association. Beam Design Formulas with Shear and Moment Diagrams [2005]. Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.awc.org/pdf/DA6-BeamFormulas.pdf>
16. Takstol.com. Kapittel 15: Tre som Byggemateriale. Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.takstol.com/bok/trekonstruksjoner/trekonstruksjoner-kap15-h.pdf>

17. Haakonsen H. *The Function of Form: Conceptual Design of Modern Shell Structures* [MsC]. Trondheim: Norges Teknisk- Naturvitenskapelige Universitet; 2013.
18. European Committee for Standardization. *Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-3: General actions. Snow loads.* CEN, Brussel;2003
19. Drevon F. *Lever i hver sin verden.* Teknisk Ukeblad. Utgitt 20.10.11. Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.tu.no/bygg/2011/10/20/lever-i-hver-sin-verden>

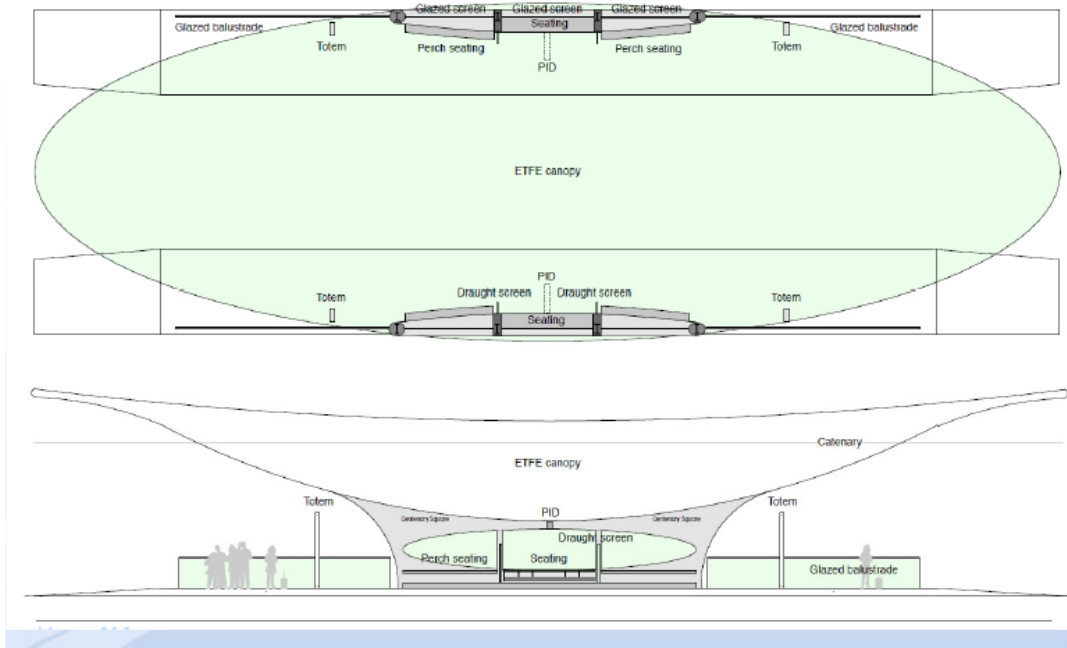
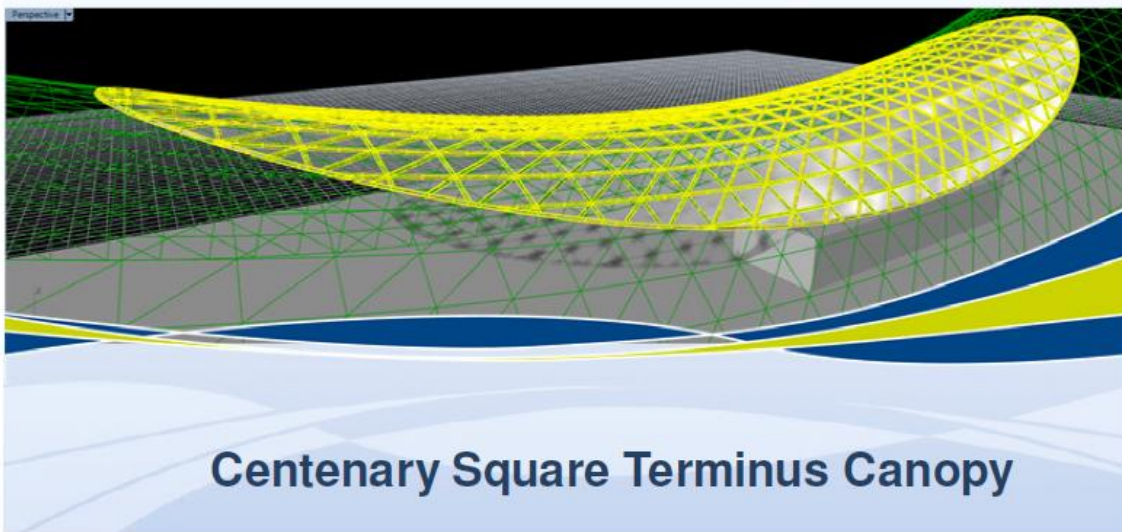
Bilder:

Bilder uten referanse er mine private

- I. Chilton J. *Heinz Isler: The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture.* Thomas Telford, London, 2000.
- II. Baunetz.de Utgitt 01.07.09. Tilgjengelig (08.06.15): http://www.baunetz.de/meldungen/Meldungen-Zum_Tod_von_Heinz_Isler_791805.html
- III. Gabaldón F. Utgitt 24.10.10.
- IV. Stewart C.
- V. Smd architects. Utgitt 22.10.09. Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.smdarq.net/case-study-mannheim-multihalle/>
- VI. Fischer H.
- VII. Architect Daily. Tilgjengelig (08.06.15): http://www.archdaily.com/248138/new-milan-trade-fair-studio-fuksas/a-ramon-prat_new-trade-fair_-fuksas_004/
- VIII. Monherjan K. Tilgjengelig (08.06.15): <http://detail-online.com/inspiration/myzeil-shopping-centre-in-frankfurt-on-the-main-103474.html>
- IX. Weber J. Schlaich Bergman und Partners. Tilgjengelig (08.06.15): www.sbp.de
- X. Princeton Univeristy. Department of Civil and Environmental Engineering. 2013. Tilgjengelig (08.06.15): <http://shells.princeton.edu/Mann1.html>
- XI. Wikiarquitectura.com Utgitt 09.19.13. Tilgjengelig (08.06.15): http://en.wikiarquitectura.com/index.php/Japan_Pavillion_Expo_2000_Hannover
- XII. Pallant House Gallery. Tilgjengelig (08.06.15): <http://pallant.org.uk/visiting/chichester-arts/chichester-arts/architecture/weald-downland-open-air-museum>
- XIII. Weald and Downland Open Air Museum: Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.wealddown.co.uk/explore/buildings/further-reading/downland-gridshell-project-history-design-brief/>

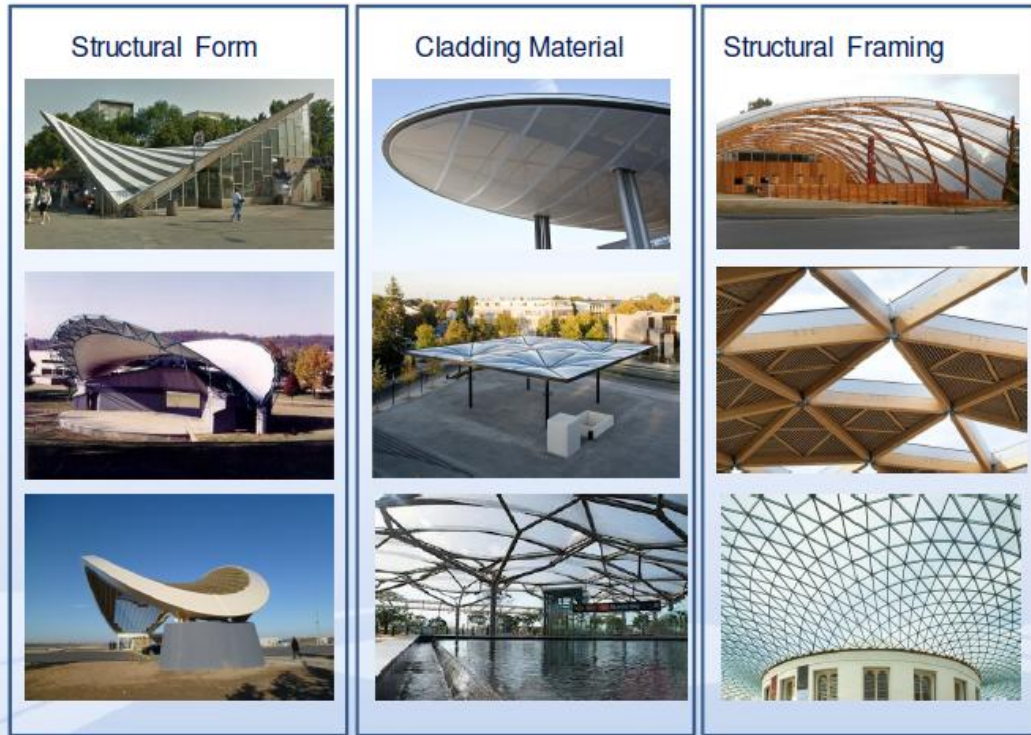
- XIV. Maskell C. Tilgjengelig (08.06.15): <http://www.panoramio.com/photo/7996737>
- XV. Wikipedia. Tilgjengelig (08.06.15): http://en.wikipedia.org/wiki/Savill_Building
- XVI. Glenn and Howells Architecture. Tilgjengelig (08.06.15):
<http://glennhowells.co.uk/project/savill-building/>
- XVII. Snipview.com. Tilgjengelig (08.06.15): http://www.snipview.com/q/Savill_Building
- XVIII. Pone S. The Toledo Gridshell. Magazine of Sustainable Design. Utgitt 07.04.11.
Tilgjengelig (08.06.15): http://ecoweatown.eu/n_5/04_pone_en.html
- XIX. Rønnquist A.
- XX. Mork J, Dyvik S.
- XXI. Bakkejord M.

Vedlegg



Architect's initial design





Mott MacDonald suggesting options



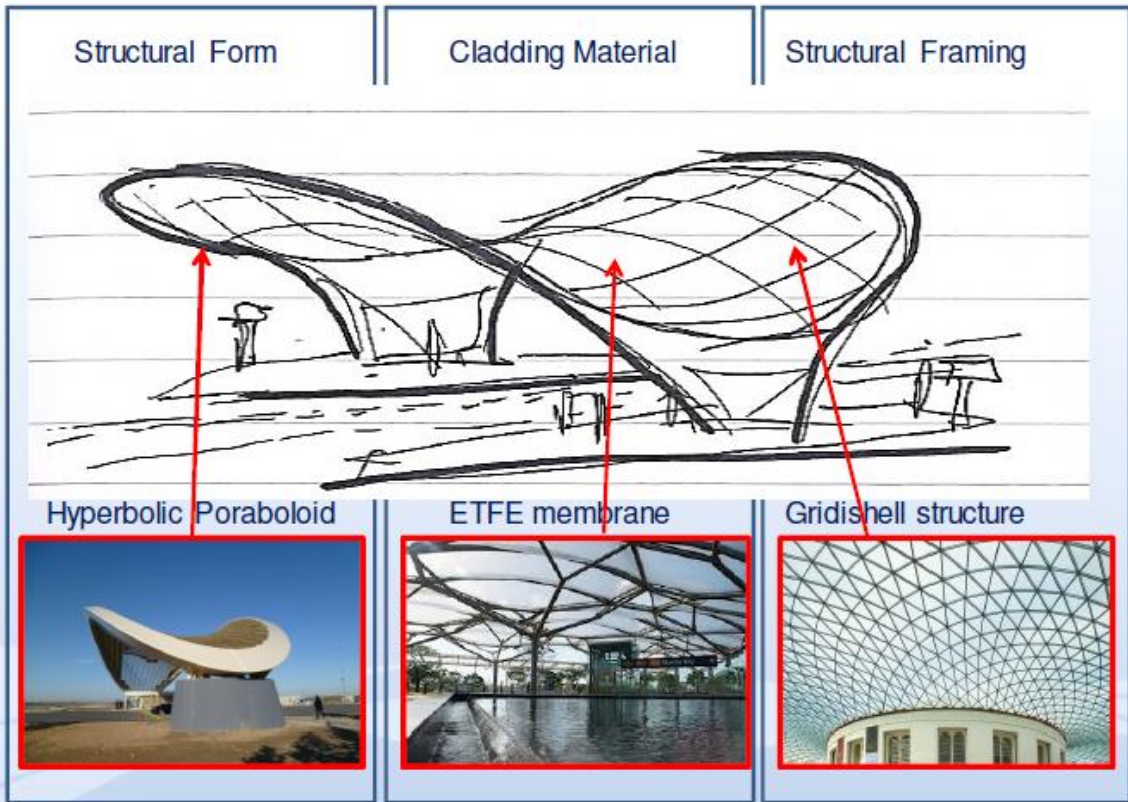
Hyperbolic Paraboloid

ETFE membrane

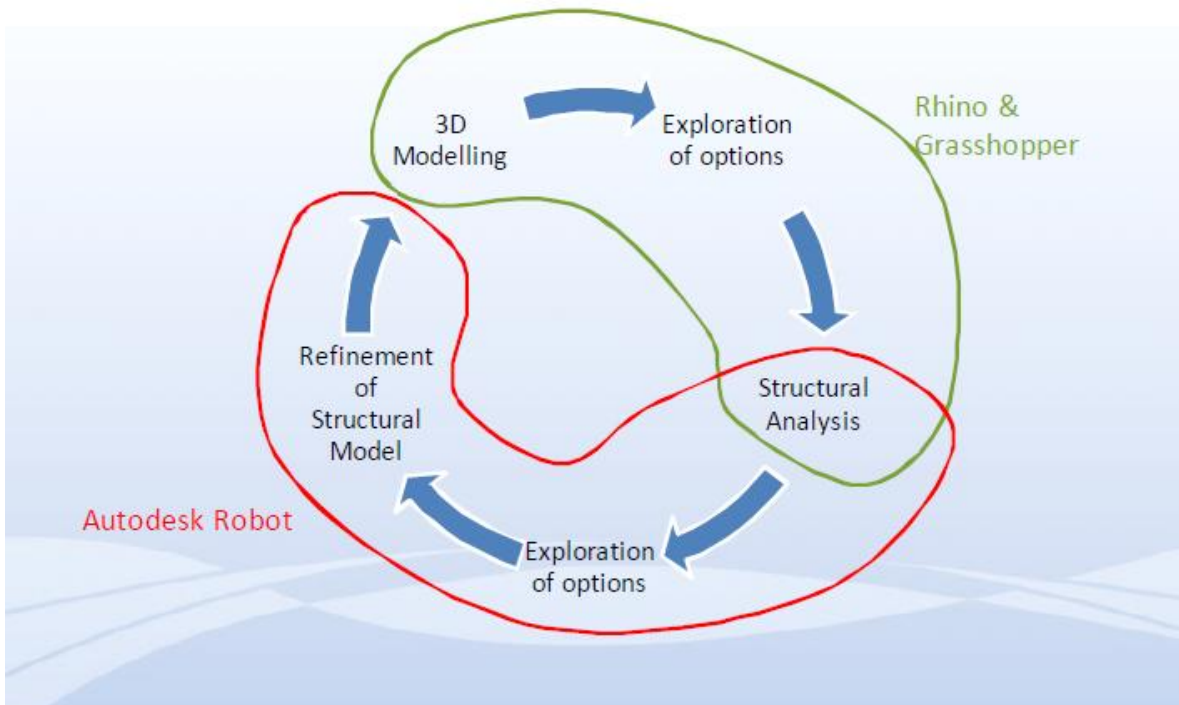
Gridshell structure

Mott MacDonald suggesting options





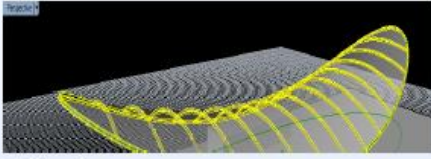
Mott MacDonald concept sketch



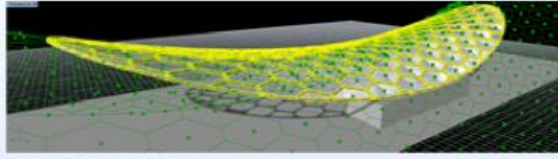
Considering potential workflow



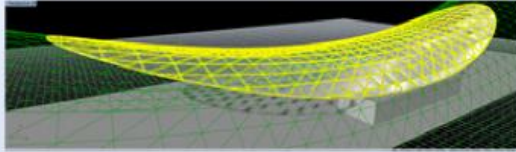
- 4 canopy geometries were considered -



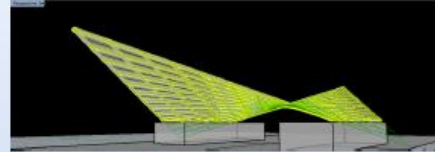
1. Zepplin



2. Hexagonal Grid



3. Triangle Grid



4. Pure Hyperbolic Paraboloid

- It was decided to develop the Triangle Grid further
- The triangle grid can be considered as a square module (below) and can be oriented in three ways:

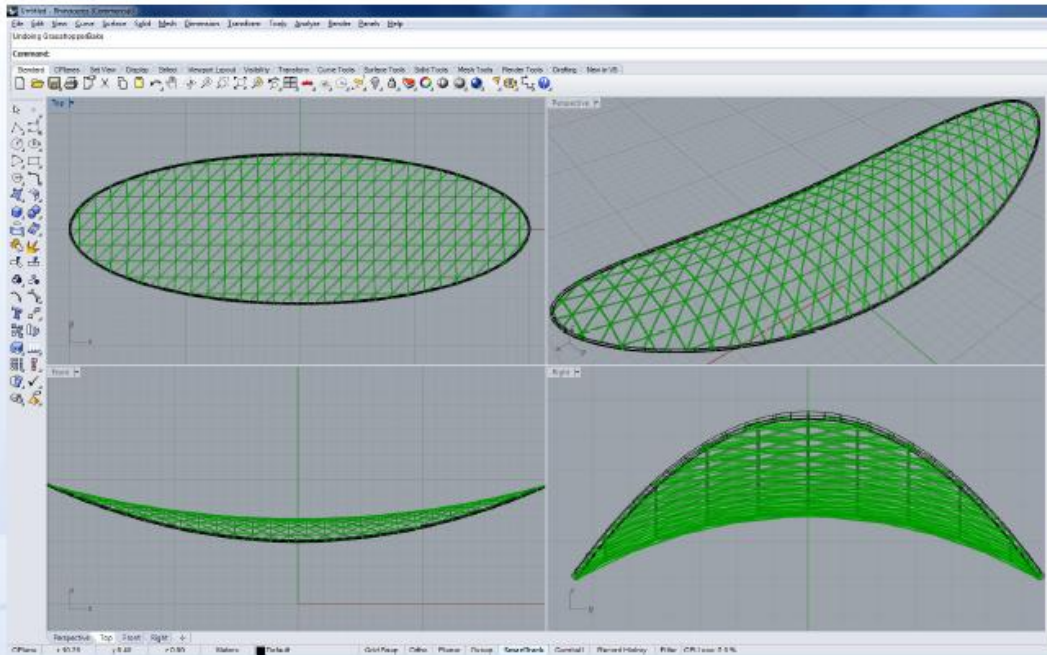


1.

2.

3.

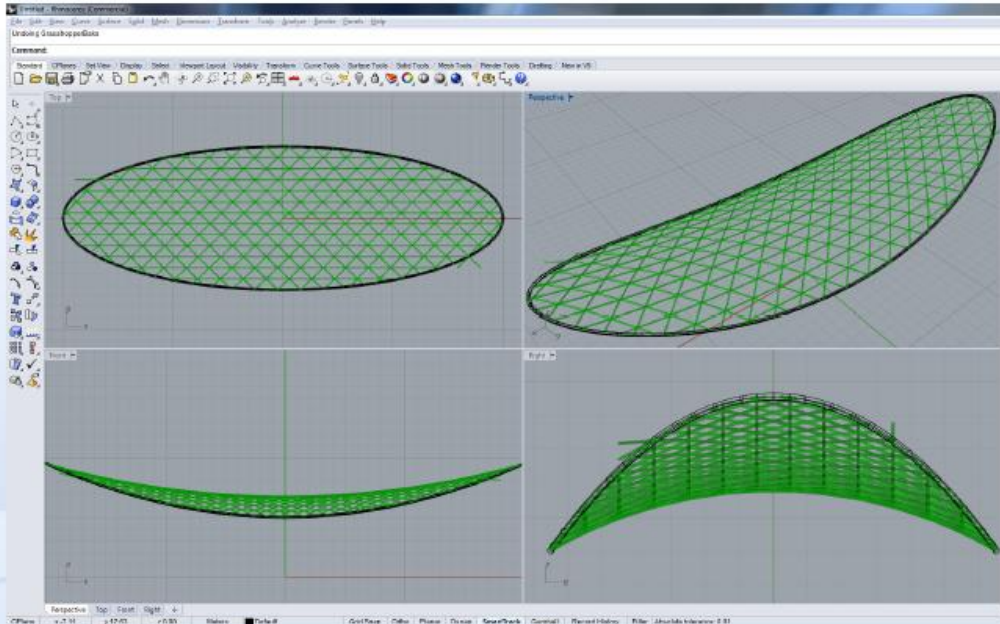
Initial modelling of concepts



- Typical Module Alignment

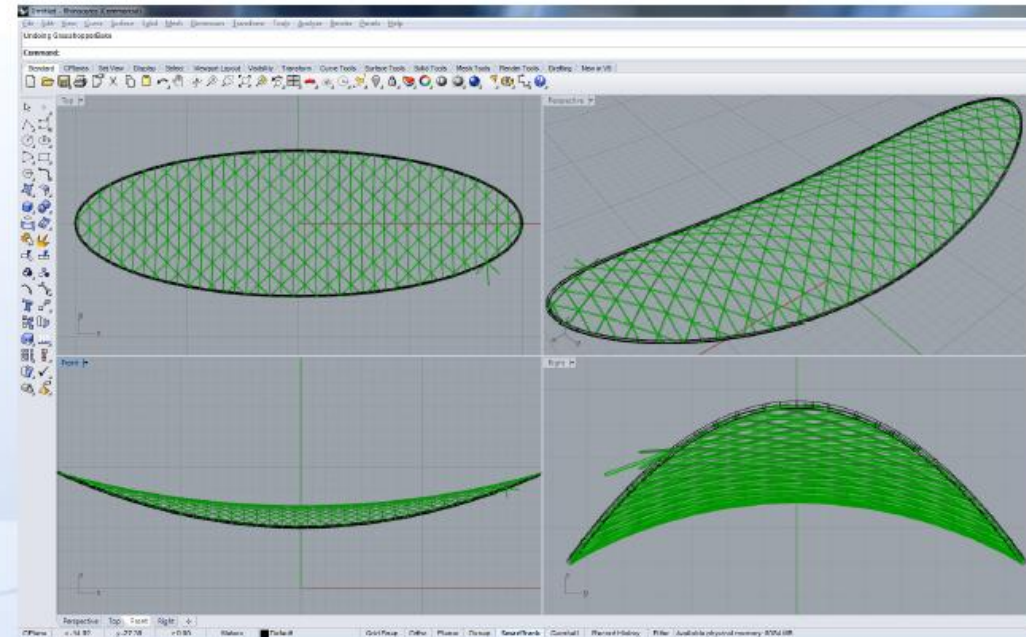
Module alignment - Option 1





- Typical Module Alignment

Module alignment - Option 2

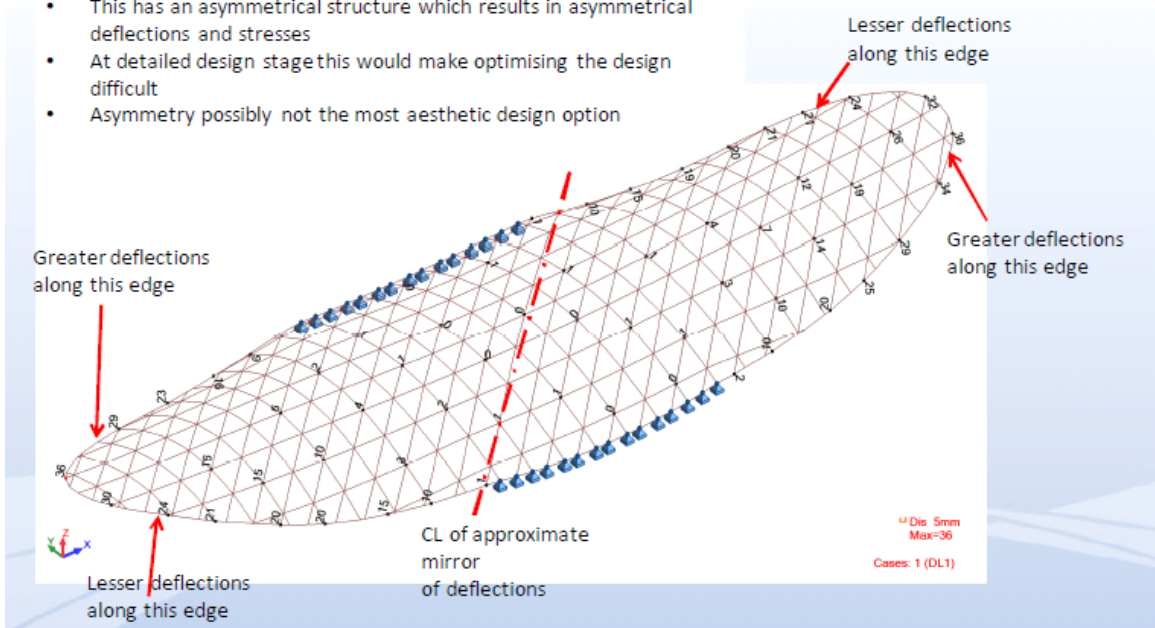


- Typical Module Alignment

Module alignment - Option 3



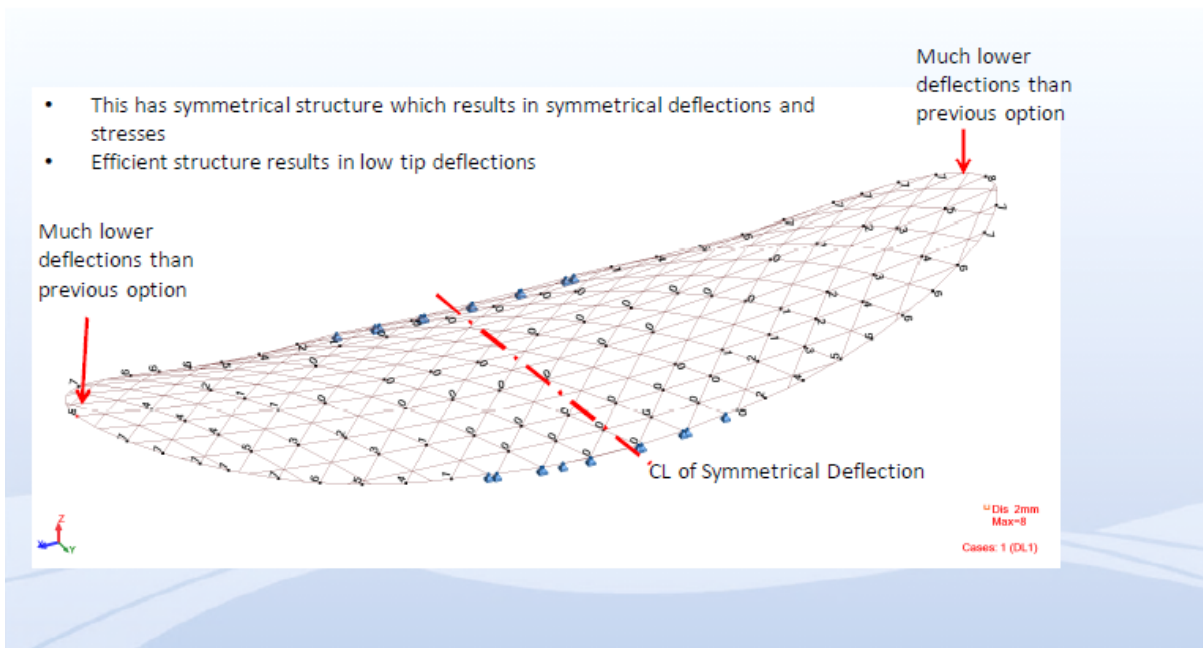
- This has an asymmetrical structure which results in asymmetrical deflections and stresses
- At detailed design stage this would make optimising the design difficult
- Asymmetry possibly not the most aesthetic design option



Structural comparison of concepts – Option 1

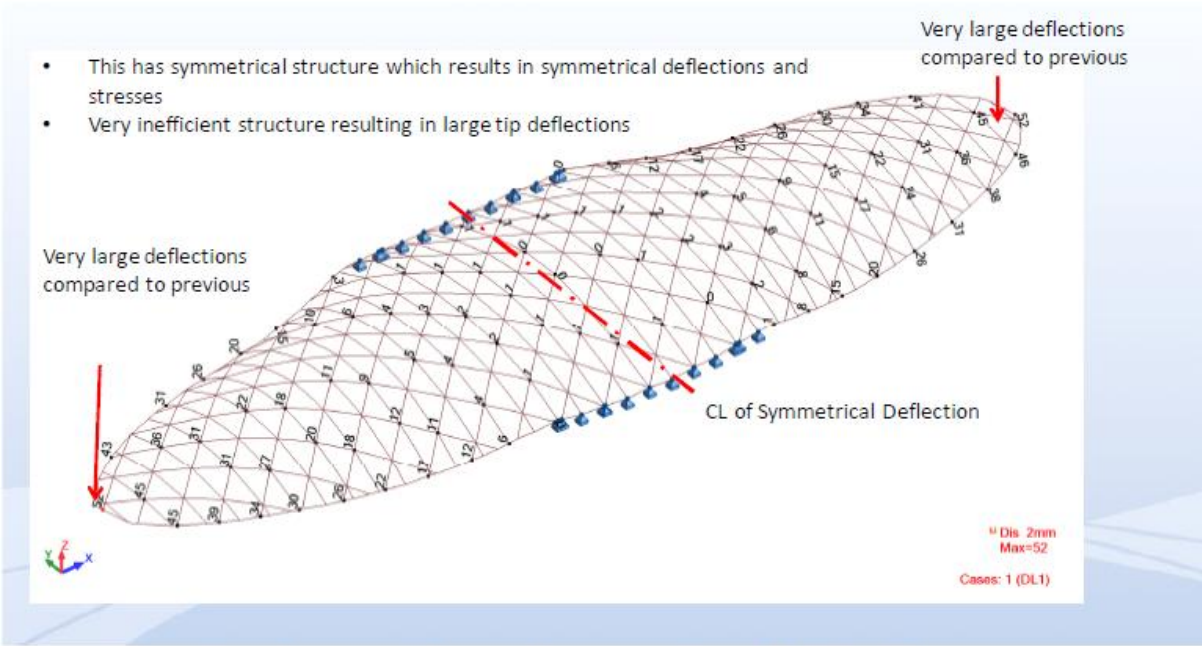


- This has symmetrical structure which results in symmetrical deflections and stresses
- Efficient structure results in low tip deflections



Structural comparison of concepts – Option 2

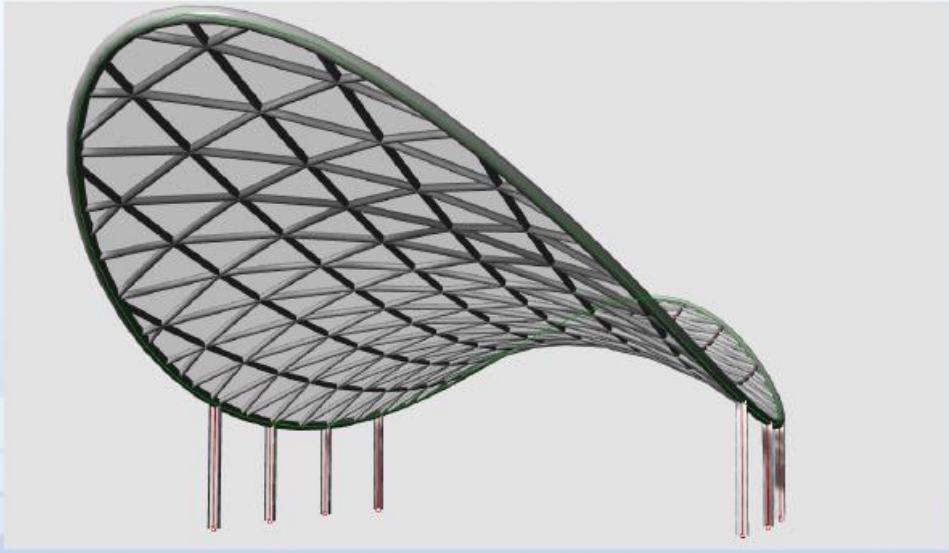




Structural comparison of concepts – Option 3



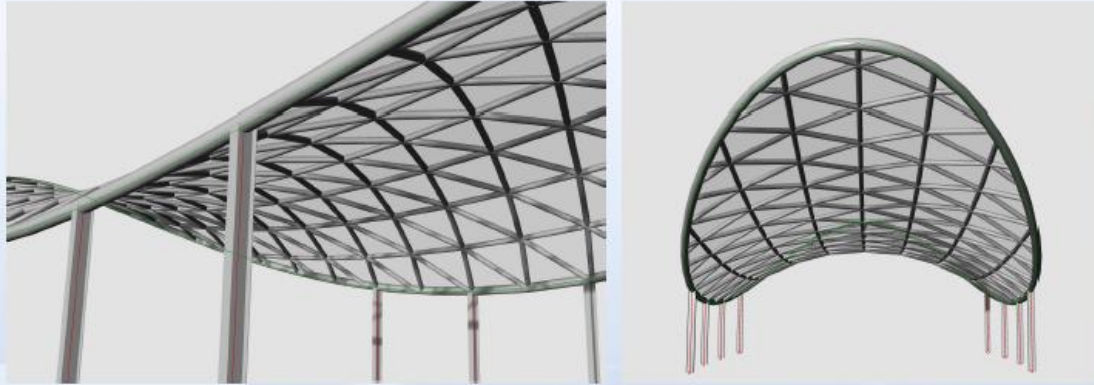
- For both aesthetic and structural reasons it was decided to progress Option 2
- The structural model was progressed with Autodesk Robot to consider support conditions and ETFE single skin panels



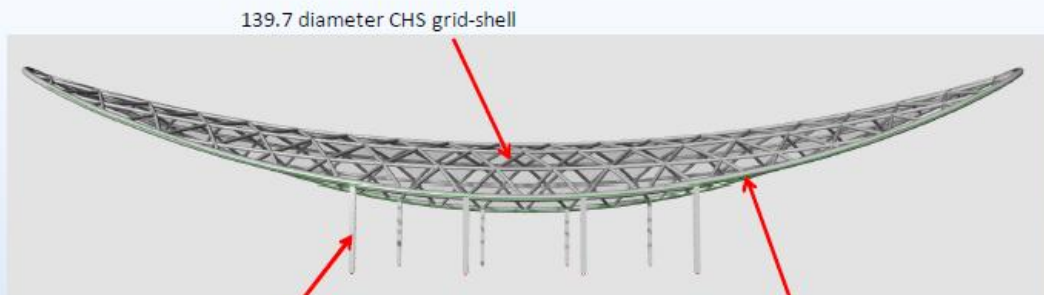
Option 2 - updated Rhino model



- Approximately 2m x 2m x 2m triangle gridshell
- Total length of canopy = 39.0m
- Total width of canopy = 12.8m
- Column locations approximately as suggested by Creative Design
- Column heights approximately 2.5m



Option 2 - updated Rhino model



- A variation of the ring beam is to be considered consisting of a three-way truss
- The ring beam can be clad to allow continuity to seating structure – and also to hide ring-beam-column connection

Option 2 - updated Rhino model





BY CREACTIVE DESIGN - STATION DESIGNER

Architectural renders from MM Rhino model

