

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP



Parametrisk modellering av kinematiske gitterskall

Thomas Schiøtz

17. desember 2012

Kapittel 1

Sammendrag

Oppgaven tar utgangspunkt i et paradoks: gitterskallene er en sterk og material-effektiv konstruksjon, men likevel har den begrenset utbredelse. Dette kan endre seg med nye parametriske modelleringsverktøy som kan bidra til å senke barrierer. Oppgaven søker å utforme en parametriske modell for å formgi gitterskall. For å utvilke en parametriske modell starter oppgaven med en studie av skallteori, historiske eksempler og materialeegenskaper som fører frem til en refleksjon over hvilke kvaliteter en slik modell bør ha. Mulige teknikker studeres og testes med henblikk på modellutforming. Et nyere eksempel basert på forflytning bøyedefomsjon av kontrollpunkterdiskuteres og testes. Evalueringen gir enpresis men tungrodd modell. Denne oppgaven utforsker en alternativ strategi der en fjærmodell basert på aksialtøyninger danner en digital forskaling som draperes med et geometrisk korrekt rutenett. Dette rutenettet kan i sin tur etterbearbeides og optimaliseres ved hjelp av blant annet dynamisk relaksasjon.

Kapittel 2

Abstract

The thesis starts with a paradox: gridshells are strong and material efficient structures. Nevertheless, they are not very numerous. This could change, however, with the arrival of new design tools based on parametric design. The thesis aims at designing a form-finding model based on the principles of parametric design. In order to establish a useful model, the first part of the thesis consists of a study of gridshell theory, history and material requirements. Various modelling techniques are studied and tested. A recently developed technique based on bending deformation and adjustable control points is tested and an alternative strategy is proposed. The thesis suggests a particle - spring system based on axial deformation as a form finding tool. In order to establish a grid with equidistant edges, the form finding procedure of the first simulation is complemented by a draping technique. Finally this geometrically correct grid structure is optimized by means of dynamic relaxation.

Innhold

1	Sammendrag	i
2	Abstract	ii
3	Innledning	1
4	Metode - gangen i oppgaven	4
5	Teoretisk del	6
5.1	Konstruksjonsprinsipp og virkemåte	6
5.2	En formsterk konstruksjon	8
5.3	En trekonstruksjon	11
5.3.1	Krumme bjelker	12
5.3.2	Treets achilleshæler	19
5.4	Noen eksempler fra historien	21
5.4.1	De første pionerarbeidene	22
5.4.2	Et institutt for lette konstruksjoner	25
5.4.3	Mannheim - en studie av det mulige	26
5.4.4	Downland – et konkurransekraftig alternativ	31
5.4.5	The Lothian Gridshell - et gitterskall på dugnad	38
5.4.6	The Savill Garden Gridshell - gitterskallet som takkonstruksjon	42
5.5	Dagens tilstand - mot det enkle og det intrikate	45
5.5.1	Mot det komplekse og sofistikerte	45
5.5.2	Mot det enkle og gjennomførbare	46
5.6	Analysemetoder	47
5.6.1	På sporet av den optimale formen	47
5.6.2	Fysisk modellering	49
5.6.3	Kraftdensitetsmetoden	57
5.6.4	Dynamisk relaksasjon	59
5.6.5	Partikkel-fjær-systemer	60
5.6.6	Finite elementers metode	63

5.7	Formgivning og formgenerering - geometriske metoder	65
5.8	En oppgave for parametrisk modellering	69
6	Anvendelsen - Et parametrisk gitterskall	75
6.1	Introduksjon	75
6.2	Modelleringsverktøy	76
6.2.1	Rhinoceros3d 5.0	76
6.2.2	Grasshopper 09.0014	77
6.2.3	Kangaroo Physics 0.080	78
6.2.4	Karamba 1.02	79
6.2.5	Galapagos	79
6.3	Modelleringsteknikker	80
6.3.1	Modellering av bue	80
6.3.2	Modellering av gitter	92
6.4	Modelleringsstrategier	99
6.5	Et Modelleringseksempel	103
6.5.1	Bakgrunn for prosjektet	103
6.5.2	Analyse av tomte – beliggenhet og spesielle kvaliteter	103
6.5.3	Simuleringer for utforskning av form	108
7	Resultater	114
8	Diskusjon av resultater	115
9	Konklusjon	116
10	Videre forskning	117
A	Definisjoner i Grasshopper	122

Kapittel 3

Innledning

Gitterskall i tre er en til nå lite utbredt konstruksjonsform i de fleste deler av verden, Norge inkludert. Skallformens styrkeegenskaper er veldokumenterte, men skallkonstruksjonens utbredelse hemmes av dyr og komplisert forskaling og oppføringssteknikk generelt. Gitterskallet klarer seg uten forskaling og det kan dermed synes som et paradoks at denne konstruksjonstypen har fått så liten utbredelse. Gitterskallet er lite omtalt i den norskspråklige litteraturen. Så sjelden er den at den heller ikke har fått ordentlig fotfeste i det norske språket. Denne oppgaven lar seg inspirere av den tyske termen Gitterschale for å gi et norsk navn til det som på engelsk (og på mange andre språk) går under navnet Gridshell. Norge har lange tradisjoner for å velge tre som konstruksjonsmateriale, også for bygninger med store spenn. Tre har også vært førstevalget for mange av de gitterskallene som er blitt oppført. Likevel er denne konstruksjonsteknikken et nokså ubeskrevet blad her på berget. Denne oppgaven søker å belyse muligheten for å bygge dobbelkrummede konstruksjoner med denne gitterskallteknikken. Konstruksjonstypen er ikke radikalt ny av dato, og den har resultert i meget slanke og sterke konstruksjoner med store spenn. Likevel har den hatt begrenset utbredelse, mye fordi formgivningsprosessen har vært tid- og kompetansekrevede. På verdensbasis er det inntil nylig bare en håndfull arkitektfirmaer og ingeniørfirmaer som har hatt befatning med denne konstruksjonstypen. Disse firmaene har ofte basert formgivningsprosessen på egenutviklede analyseprogrammer som ikke har vært tilgjengelig på det åpne markedet. I kjølvannet av nye tenkemåter innen DAK-programmer har imidlertid denne konstruksjonstypen fått økende interesse og tilgjengelighet. Denne oppgaven ønsker å finne ut av hvorvidt gitterskallet nå er blitt en aktuell kandidat for dagens og morgendagens byggeprosjekter. Oppgaven søker å kombinere utfordringene som gitterskallprosjekteringen medfører med mulighetene som den parametriske modelleringsteknikken byr på. Oppgavens *målsetting* er en å lage et modelleringsverktøy.

Oppgavens mål er å lage en parametriske modell som kan brukes som ledd i en prosjekteringsfase til å finne en skallform som best mulig forener konstruktive og

funksjonelle hensyn. På bakgrunn av modellens skal brukeren være i stand til å vurdere om gitterskallkonstruksjonen er en aktuell konstruksjonstype for et forestående byggeprosjekt. Oppgavens mål tar altså ikke for seg alle etappene i en tradisjonell prosjekteringsprosess, men fokuserer på stadiet der man søker å *finne en form*. Forut for den konkrete utformingen av en slik modell vil oppgaven undersøke hvilke kvaliteter en slik modell bør ha, og om en parametrisk modell er i stand til å utstyres med disse kvalitetene, eller er denne konstruksjonsteknikken forbeholdt spesialiserte firmaer og enkeltstående signalbygg? En hypotese som testes på veien omhandler gitterskallets aktualitet og gjennomførbarhet med de verktøy som er tilgjengelig i dagens digitale prosjekteringslandskap. *Test: er gitterskallet en gjennomførbar konstruksjonstype med dagens teknologi og prosjekteringsteknikker til rådighet?* Hvis svaret er nei, hvor butter det? Hvilke ledd i prosessen ødelegger for dette alternativet? Oppgaven føyer seg inn i en gruppe av masteroppgaveprosjekter innen parametrisk design på UMB. Fra før har blant annet Tor Øistein Andresen skrevet oppgaven Prosjektering og dimensjonering av kompleks bygningskonstruksjon ved hjelp av parametrisk DAK og FEM-design der parametrisk modellering bidro til å utforme en elegant og materialeffektiv takkonstruksjon i stål[2]. Som ideer til videre forskning peker han blant annet en mulighet som en studie av gitterskall innbyr til å se nærmere på: «For programvareutvikling er det spennende å se på løsninger der strukturanalyse og overordnet design er linket nærmere sammen. På den måten kan designeren tidlig i prosessen ta hensyn til konstruksjonen.»[2] Ved utformingen av konstruksjonstypen som denne oppgaven omhandler spiller styrkeberegningene en avgjørende rolle allerede i formgivningsprosessen. Analysen av konstruksjonens likevekt er ikke en stabilitetskontroll som utføres i etterkant av prosjektets utforming men et styrende prinsipp i selve utformingen av konstruksjonens form. En oppgave om gitterskall egner seg derfor til å bygge videre på T.Ø. Andresens arbeider for å utforske ytterligere styrkeberegningsprogrammernes formgivende funksjon som den parametriske tenkemåten åpner opp for. Oppgavens hovedeksperiment er å bruke styrkeberegningsprogrammet til å finne en form, snarere enn å bestemme dimensjonene til en allerede prosjektert form. Formen vi skal finne er en skallform, en form som vi skal se senere henter mye av sin styrke fra evnen til å føre krefter fra dekket og ut til opplagrene i form av aksialspenninger. Et optimalt utformet skall er en trykkonstruksjon med en membraneffekt. En membran kan ikke overføre krefter i form av bøyepenninger, kun strekkspenninger. Dermed kan vi også sette opp et kvantifiserbart suksesskriterium som styrkeberegningsprogrammet kan gi tilbakemelding på: *Optimaliseringen av formen skal føre til at bøyedeformasjonen reduseres når konstruksjonen belastes med en jevnt fordelt vertikallast.* For å teste denne hypotesen skal vi simulere formgivningsprosessen for en konkret konstruksjon, et forslag til et takkonstruksjon som dekker en restaurant med tilhørende uteområde.

Like mye som å presentere et ferdig produkt søker oppgaven å belyse særtrekk for formgivningsprosessen når en slik konstruksjonstype møter dagens analyse- og formgivningsteknikker. Like mye som et utkast til en ny gangbro er resultatet av undersøkelsen en studie av hvilke muligheter som ligger i en prosjekteringsprosess basert på parametrisk modellering.

Kapittel 4

Metode - gangen i oppgaven

Det endelige målet med denne studien er å lage en parametrisk modell som kan generere gitterskallkonstruksjoner. Før selve modelleringen starter undersøker vi hva som er blitt gjort på dette området hittil, hvilke verktøy som er tilgjengelige og hvilke analysemetoder som egner seg for dimensjoneringen av et slikt byggverk. Studien av gitterskallet deles derfor inn i to hoveddeler. Først en undersøkende del der vi studerer denne bygningstypens oppbygning og virkemåte, og deretter følger en anvendelsesdel der vi fokuserer på praktisk fremgangsmåte. Litteraturen er sparsommelig på dette området, særlig når det gjelder fremstillinger I norsk språkdrakt. Derfor starter vi studien med en presentasjon av de viktigste arbeidene som er blitt gjort hittil. Vi plasserer bygningene i en teknologihistorisk kontekst og ser på hvilke hovedutfordringer som møtte pionerne etter hvert som de tok fatt på oppgaven med å formgi og oppføre disse konstruksjonene. Den beskrivende deler starter i kapittel 3 med en historisk oversikt hvor vi særlig konsentrerer oss om de løsninger som ble brukt for å løse de bygningstekniske utfordringene. Deretter ser vi nærmere på analysemetodene som er blitt brukt for å dimensjonere gitterskallene. Gitterskallene baserer hele sin formgivning på deformasjon av rette elementer. Konstruksjonstypen er utpreget ikke-lineær i sin geometri og må analyseres deretter. Analysemetoder som ikke er standard lærebokstoff er blitt utviklet for å finne en optimalisert form. Vi innlemmer derfor en fremstilling av disse analysemetodene i denne studien. Gitterskallet starter som et flatt rutenett og ender opp som et tredimensjonalt rom. Hvordan går man frem for å projisere et rutenett med konstant lengde på sidekantene ned på en amorf dobbelkrummet overflate? Problemstillingen minner om beregningsmetoder innen tekstilkunst der flate tøyestykker skal bearbeides og settes sammen slik at plagget finner en ønsket naturlig form. Derfor diskuteres fremgangsmåter som er blitt brukt i denne sammenheng og hvilke muligheter som ligger i den parametriske tenke- og formingsmåten som ennå befinner seg i den digitale støpeskjeen. Når gitterskallets konstruksjonsprinsipp, historie og analysemetoder studeres er det hele tiden med det formål å oppnå en forståelse

av hvilke kvaliteter en parametrisk gitterskallmodell bør inneha. Hvilken type informasjon er spesielt relevant for brukeren? Hvordan utformer man en fleksibel og anvendelig modell som kan brukes i flere prosjekter? Dermed er vi rustet til å ta fatt på oppgaven med å utforme en parametrisk modell og eksemplifisere den med en konkret gitterskallkonstruksjon. Like viktig som det endelige resultatet er en illustrasjon av hvordan interaksjonen mellom de tre etappene kan foregå når man prosjekterer med parametrisk verktøy og tenkemåte. I konklusjonsdelen av del to søker vi derfor å tydeliggjøre hvordan denne tenkemåten kan hjelpe de involverte i prosjekteringsfasen til å *finne* en form, snarere enn å lage en form som deretter dimensjoneres. Som et resultat av den generelle undersøkelsen og den konkrete anvendelsen søker oppgaven å gi et svar på spørsmålet som opprinnelig ble stilt: Er gitterskallet et attraktivt alternativ til dagens konstruksjonstyper? Hvilke andre problemstillinger må også tas med i betraktning før dette spørsmålet kan gis et tilfredsstillende svar? Hvilke utfordringer som undersøkelsen av de historiske eksemplene stiller oss overfor kan den parametriske modellen *ikke* svare på? Hvor er begrensningene? En stor del av oppgaven er undersøkende istedenfor demonstrerende i formen. En ukjent konstruksjonstype skal studeres og presenteres, relativt ukjente analysemetoder likeså. Så selv om oppgaven er skrevet av kun en person tar den derfor i enkelte partier i bruk et litterært "vi", som er ment å skulle invitere leseren inn i gitterskallenes spennende verden og ikke at den er skrevet i tospann.

Kapittel 5

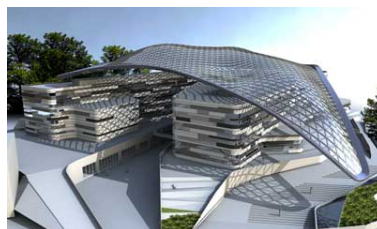
Teoretisk del

5.1 Konstruksjonsprinsipp og virkemåte

Termen gitterskall rommer to begreper, gitter og skall, som henspiller både på konstruksjonens form og struktur. “Skall”-delen forteller oss at det dreier seg om en trykkonstruksjon bygget opp av dobbelkrummede flater, mens “gitter”-prefikset presiserer at denne konstruksjonsformen har en bærekonstruksjon som består av et gitter snarere enn kontinuerlige flater. Skallkonstruksjonen er et velkjent konstruksjonsprinsipp som ble utførlig utforsket på 1900-tallet men som har røtter tilbake til den antikke historien. Skallkonstruksjoner formet av et gitter har først i nyere tid markert seg som en egen konstruksjonstype. I dag er det et mangfold av konstruksjonstyper og –former som bærer merkelappen *Gridshell*. Hvis vi legger



(a) La Fiera di Milano av M. Fuksas (Wiki-
media Commons)



(b) Kunsthogskolen i Bergen (Foto: Stats-
bygg)

Figur 5.1: Gitterskall

en videre betydning av begrepet til grunn, er gitterskallkonstruksjonen blitt en konstruktiv følgesvenn til mye av fri-form-arkitekturen som prosjekteres og oppføres i dag. Blant annet Snøhettas planlagte tak over Kunsthogskolen i Bergen og handelscenteret La Fiera di Milano, tegnet av arkitekten Massimiliano Fuksas er eksempler på denne byggeteknikken (se figur 5.1). Gitteret brukes her til å dele

konstruksjonen inn i mindre, plane elementer som sammen danner silhuetter av dobbelkrumme overflater. Et vell av ulike prinsipper for overflatens inndeling i plane elementer er blitt utviklet i kjølvannet av fri-form-arkitekturen og er gjenstand for flere forskningsarbeider i dag, se for eksempel Tonelli [44] eller Dimcic[15]. På denne måten kan organiske, bølgende former oppnås ved hjelp av rette staver og plane overflater. Disse konstruksjonene oppfyller imidlertid ikke kravet til å bli definert som et gitterskall hvis vi legger en snevrere definisjon til grunn, en definisjon som vi henter fra den tyske arkitekten Frei Otto, som vi skal møte igjen ved en rekke anledninger senere i denne oppgaven. Sammen med *Institut für leichte Konstruktionen*¹ i Stuttgart var han i 1974 redaktør for verket *IL10: Gitterschallen*[35], et verk viet til utforskning av gitterskall. Her får gitterskallets definisjon en mer avgrenset form: “Et gitterskall er en stavkonstruksjon som er buet i rommet. Stavene danner et plant gitter med et rektangulært maskenett og konstant avstand mellom hvert knutepunkt. Gitterskallets form bestemmes ved å snu opp ned et hengende nett av tråder. Slik kjedet danner en ideell kurve for en bue uten bøyebelastning, danner også nettet, når det vendes om, en buet overflate hvor gitterskallet ikke utsettes for bøyebelastning”[35]. Gitterskallet er altså basert på et flatt rutenett av staver som er festet til hverandre ved hvert møtepunkt. Det er altså ikke nok at konstruksjonen er bygget opp av et gittersystem. Avstanden mellom to tilstøtende knutepunkter må være konstant over hele skallets overflate. I sin utgangsposisjon har gitterskallet ikke låst frihetsgraden for rotasjon i knutepunktene. Gitterskallet har dermed i prinsippet ingen evne til å ta opp skjærspenning i planet. Dermed er rutenettet egnet til å kunne formes om fra et flatt rutenett til krumme overflater. Først når deformasjonsprosessen er fullført og gitterskallet har fått sin endelige form stives konstruksjonen av slik at rotasjon i knutepunktene forhindres. Spørsmålet om hvorvidt en konstruksjon skal defineres som et gitterskall i snever eller vid forstand er ikke bare en pertentlig akademisk øvelse. Frei Ottos gitterskall er i mange henseender vesensforskjellig fra de øvrige gitterskallene. Den viktigste forskjellen er at gitterskallet slik Frei Otto definerer det har bestemte geometriske egenskaper som gir det en spesiell virkemåte. Med et rutenett av firkanter der avstanden mellom knutepunktene er konstant kan gitteret i motsetning til Snøhettas og Fuksas eksempler ovenfor brettes ut til et flatt rutenett. Avhengig av hvilket konstruksjonsmateriale som benyttes, kan bærekonstruksjonen nå sin tiltenkte form ved at et gitter bestående av kontinuerlige lameller settes sammen til et todimensjonalt rutenett som deretter bøyes på plass. Av den grunn kalles denne formen for gitterskall også et *kinematisk gitterskall*[40]. For at det ikke skal bli stabilt må gitteret stives av, enten ved å innføre momentstive ledd i knutepunktene eller ved å trekke stålkabler diagonalt over rutenettet. Legger vi Frei Ottos definisjon til grunn sitter vi igjen med en mer eksklusiv familie av skallkonstruksjo-

¹*Institut für leichte Flächentragwerke*

ner som alle har en bestemt konstruksjonsform og en bestemt virkemåte til felles. Motivasjonen for denne konstruksjonsteknikken er en materialøkonomisk, lett og elegant konstruksjon som er lett å oppføre.

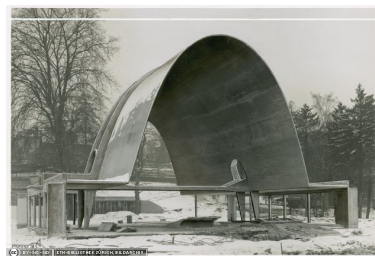
5.2 En formsterk konstruksjon

Frei Ottos definisjon finner vi i et verk som er tilknyttet en institusjon og et forskningsmiljø hvor letthet er et gjennomgangstema. I 1964 var Frei Otto med på å opprette et institutt for utforskning av lette konstruksjoner ved Det tekniske universitetet i Stuttgart. Instituttet var en videreføring av forskningsgruppen *Biologie und Bauen* hvor Frei Otto var del av et samarbeid på tvers av tradisjonelle fagmiljøer og hvor formålet var utforskning av byggemetoder inspirert av naturens egne konstruksjonsprinsipper[20]. Instituttet har blant annet gitt ut en serie med forskningsarbeider med lette konstruksjoner som det tematiske tyngdepunkt. *IL10 Gitterschalen* er det tiende utgivelsen i serien og den første som i sin helhet dreier seg om gitterskall. For bedre å forstå motivasjonen for denne interessen for lette konstruksjoner kan vi fortøttenne innom et av arbeidene til Jörg Schlaich, en instituttkollega av Frei Otto fra og med 1974. I utgivelsen *Leicht Weit* er han en ivrig talsmann for videre utforskning og oppføring av lette konstruksjoner. Lette konstruksjoner, sier han, er økologiske i den forstand at de krever mindre konstruksjonsmaterialer. Videre er de ofte enklere å demontere og mer egnet til å resirkuleres. Ut fra en økonomisk synsvinkel hevder han at lette konstruksjoner krever høyere grad av innovasjon og forskning på komplekse konstruksjonsteknikker, noe som i større grad krever kvalifisert arbeidskraft, som igjen bidrar til samfunnets økonomiske utvikling. Han argumenterer også for de lette konstruksjonenes kulturelle verdi. Lett og tynt er positivt ladede adjektiv sammenlignet med motpolene tungt og tykt[39]. Det er ikke vanskelig å finne eksempler som understøtter denne påstanden på mange områder. I forbindelse med et trebro-prosjekt over Mjøsa uttaler for eksempel en av de involverte arkitektene at en stor utfordring for trebroene er at de har lett for å bli veldig “tunge i uttrykket”[41]. Med en lett konstruksjon mener vi et bæresystem som kan bære en stor nyttelast sett i forhold til konstruksjonens egenlast. Man kan også skille mellom en estetisk og en fysisk letthet. En konstruksjon kan være lett i uttrykket hvis den har en slank fremtoning selv om den er laget av tunge materialer. Et gitterskall av tre søker imidlertid å tilfredsstillende begge disse oppfatningene av letthet. Gitterskallet henter mye av sin letthet fra trykkbuens konstruktive egenskaper. Hvis oppgaven til bæresystemet er å overføre vertikale krefter fra et spenn og ut til opplagringspunktene er buen langt mer økonomisk enn den horisontale bjelken. Her ligger også kilden til trykkbuens skjønnhet vil mange hevde. I en fritt opplagt bjelke som er belastet med en jevnt fordelt last vil spenningene følge et buformet mønster. Den maksimale

spenningen opptrer på midten av spennet og kun i det øverste og nederste laget av bjelken. Bjelken har en betydelig andel masse som ikke bidrar til å ta opp de ytre kreftene. Et bøyemoment skaper langt større spenninger enn en ren trykkraft. Hvis vi ønsker å redusere bjelkens vekt må vi utnytte materialets kapasitet til å ta opp aksialkrefter. Bjelkens nøytralakse formes slik at den følger trykkspenningenes bueform og de resulterende horisontalkreftene tas opp i opplagringene. Hvis oppgaven er å stå i mot jevnt fordelte vertikallaster, er buen altså en materialmessig langt mer effektiv og dermed lettere konstruksjon. Gitterskallet består av mange trykkbuer, men det er tredimensjonalt i sitt vesen, det kan ikke tenkes, formes eller analyseres som et todimensjonalt tverrsnitt som “ekstruderes” til ønsket lengde. Likevel deler det mange av trykkbuens statiske fortrinn. Når vi beveger oss over til den tredimensjonale verden er det skallkonstruksjonene som har overtatt buens posisjon. En skallkonstruksjon overfører kreftene i form av trykk, mens tilsvarende konstruksjoner som overfører strekk kjenner vi som membrankonstruksjoner.



(a) Den vest-tyske paviljongen ved Verdensutstillingen i Montreal, 1964 (Wikimedia Commons)

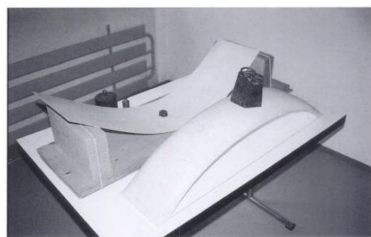


(b) Gunit-Zementhalle für die Landesausstellung in Zürich, 1939 (Wikimedia Commons)

Figur 5.2: Slanke konstruksjoner med membraneffekt

Til trykkbaserte konstruksjoner å være kan skallkonstruksjonene gjøres nesten uvirkelig tynne og lette i uttrykket hvis utformingen føyer seg etter statikkens formaninger. Som eksempel kan nevnes sveitserne Robert Maillart og Heinz Isler som på 1900-tallet eksperimenterte med ekstremt tynne betongkonstruksjoner. H. Isler viet hele sin karriere til utforskningen av skallkonstruksjoner og hadde en modell på kontoret som viste et dobbelkrummet skall som kunne ta opp en 30 ganger så stor last som en tilsvarende konstruksjon laget med flate elementer [12]

Skallkonstruksjonen er en *formsterk* konstruksjon. Den henter sin styrke fra en iboende motstand mot deformasjon. En krum bjelke blir en bue først når den får opplagerbetingelser som kan stå i mot horisontalkrefter. Uten denne ytre betingelsen er det bare materialets bøyestivhet som forhindrer den å brette seg ut til en horisontal bjelke når en vertikal kraft påføres. Et skall kan ikke brettes ut på samme måte som en krum bjelke. En krum bjelke kan ekstruderes til en sylinderformet konstruksjon, som et papirark der to av sidekantene føres mot hverandre. For å



Figur 5.3: Heinz Islers modell som viser skallformens styrke [11]

lage en skallform må alle sidekantene føres mot hverandre. Det er en *dobbelkrum* form. Skallformen kan bare dannes ved å klippe i arket, ved å *skjære* ut biter av arket. Skallformen gir en formsterk konstruksjon ved at formen selv yter motstand mot skjærdeformasjon. Til tross for både et formmessig og språklig slektskap med skallkonstruksjonene er det imidlertid viktige forskjeller mellom gitterskallet og de rene, kontinuerlige skallkonstruksjonene. I en skallkonstruksjon bestående av en kontinuerlig dobbelkrummet flate vil et skallelement ta opp en ytre belastning både som normal- og skjærspenninger. Gitterskallet har i utgangspunktet ikke samme muligheter for å ta opp skjærkrefter slik et skall er i stand til. Et rektangulært gitterelement overfører krefter gjennom lamellene i form av normalkrefter. For å temme skjærdeformasjontendensene må den ferdige konstruksjonen stives av, ofte ved hjelp av en diagonalt festet kabel som låser det ustabile rektangelet slik at gitteret kan oppnå skallegenskaper. Ferdig avstivet oppfører gitterskallet seg som et skall som er diskretisert i knutepunkter i sammenkoblingen mellom de krummede stavelementene. Statisk sett kan gitterskallet virke som en litt grovformet og uferdig versjon av det kontinuerlige skallet. Men den tilsynelatende skjærdefekten gir det kinematiske gitterskallet også viktige fordeler sammenlignet med den kontinuerlige skallkonstruksjonen. Nettopp fordi gitterskallet er deformerbart, er det også formbart på en måte som gir det en spesiell virkemåte også i oppføringsfasen. Mens de rene skallkonstruksjonene krever intrikat og dyr forskaling, gjør det kinetiske gitterskallets deformerbarhet det mulig å oppføre på en helt annen og enklere måte. Oppføringsprosessen starter med å legge et flatt rutenett på bakken. Rutenettet heises deretter opp på utvalgte støttepunkter og lamellenes elastiske bøyeegenskaper sørger deretter for at gitterskallet kan nå sin tiltenkte form. Når formen er nådd kan gitteret låses fast i opplagringspunktene og stives av for skjærdeformasjoner. Ikke bare de kontinuerlige skallkonstruksjonene men også gitterkonstruksjonene som faller utenfor Frei Ottos definisjon fordrer en helt annen oppføringsteknikk. Ser vi for eksempel på takkonstruksjonen som er blitt oppført ved British Museum, oppdager vi fort at et slikt gitter ikke kan brettes ut på samme måte som Frei Ottos versjon av denne konstruksjonstypen. Heller ikke Buckminster Fuller konstruksjonsteknikken, som også består av formlike elementer, er et gitterskall

i snever forstad. Det kinematiske gitterskallet har helt spesielle og unike egenskaper som krever en særegen formgivningsprosess, spesielle analysemetoder og oppføringsmetoder. Alle tre aspekter som på en like unik måte er sammenvevd i hverandre. Både formgivningsprosessen og oppføringsprosessen starter med et todimensjonalt nett som tar form etter statikken, dynamikken og elastisitetens prinsipper. Et stikkord for å forstå det kinematiske gitterskallets særegenhet er bøyedeformasjon. Helt avgjørende for de geometriske mulighetene er materialets bøyeegenskaper. Det kinematiske gitterskallet danner et ubrytelig bånd mellom materialegenskaper, kraftlinjer og arkitektonisk ide. Helt grunnleggende for formgivningsprosessen er derfor konstruksjonsmaterialenes egenskaper. Mens de stive gitterskallene gjerne består av stålstaver som sveises sammen i knutepunkter har det kinematiske gitterskallet en sterk affinitet til tre som konstruksjonsmateriale

5.3 En trekonstruksjon

Hvilke materialegenskaper krever et gitterskall? Med dagens digitale hjelpemidler innen formgivning og modellering er det lett å glemme det formgivende potensialet som ligger i de ulike materialenes egenskaper. I en ovenfra-og-ned formgivningsprosess risikerer man å glemme de kreative mulighetene som materialegenskapene kan tilføre utformingsprosessen. Moderne DAK-verktøy skiller ofte strengt mellom form og innhold, der materialet er en parameter som legges inn i en allerede eksisterende form. Med dagens "Free-form" modelleringsverktøy er denne fallgruben mer aktuell enn noensinne. Man kan risikere å isolere seg i en platonsk ideverden i formgivningsprosessen hvor materialet velges i etterkant for å gestalte ideen. Men er man var for materialegenskapene allerede i formingsprosessen kan disse verktøyene også være et hjelpemiddel til å la materialene virkelig komme til sin rett i bærekonstruksjonene. En kreativ formingsprosess kan starte med å studere konstruksjonsmaterialenes fysiske egenskaper for å skape konstruksjoner der disse egenskapene utnyttes i formgivningsprosessen. Gitterskall så vel som stive skallkonstruksjoner utmerker seg som konstruksjoner som i særlig grad henter sin styrke fra samspillet mellom form og materiale. Gitterskallet ble opprinnelig modellert som en inversjon av et hengende kabelnett. Strekkraftene blir til trykkrefter, men ellers deler begge modellene den egenskapen at maskenettet tillater skjærdeformasjon for å finne en form hvor de tar opp ytre påvirkning (egenvekt og opplagring) i form av aksialkrefter. Hvis et materiale kan ta opp trykkrefter på samme måte som kablene tar strekk og det ellers har tilsvarende bøyeegenskaper kan det hengende kabelnettet snus på hodet og danne en meget slank skallkonstruksjon. Materialet må være i stand til å tåle trykkspenninger samtidig som det lar seg forme i buer, men en kabel er som kjent ikke velegnet i en trykkonstruksjon. Et gitterskall i den snevrere definisjonen formulert over av Frei Otto krever derfor visse spesielle materialegenskaper. I et

forskningsmiljø for komposittmaterialer ved ENPC (Ecole nationale des ponts et chaussées) i Paris har Cyril Douthe forsket på mulige komposittmaterialer som kan være egnet som konstruksjonsmateriale for deformerbare gitterskall, et arbeid som resulterte i doktoravhandlingen *Undersøkelse av slanke oppspente konstruksjoner i komposittmaterialer: Anvendelse på utforming av gitterskall*². Som utgangspunkt for oppbygningen av komposittmaterialet, lister han opp 7 kriterier for å vurdere egnetheten som konstruksjonsmateriale for gitterskall: deformasjonsegenskaper, stivhet, bruddegenskaper (bruddseighet), bedriftsøkonomisk kostnad, samfunnsmessig kostnad, miljøvennlighet, og holdbarhet[16]. Det viser seg at treet hevder seg godt i konkurransen med mer raffinerte komposittmaterialer, og utpeker seg som det beste alternativet blant de allment tilgjengelige konstruksjonsmaterialene. Øverst på lista over materialeegenskaper står ikke overaskende materialenes deformasjonsegenskaper. På grunn av den spesielle oppføringsprosessen må materialet kunne utsettes for tildels store bøyedeformasjoner. Deformasjonene må ikke bare kunne være store, de må også være jevne og de må kunne beregnes for å kunne fungere i formgivningsprosessen. Det er derfor grunn til å se nærmere på treet bøyeegenskaper.

5.3.1 Krumme bjelker

Hvor fritt står vi til å tegne inn dobbelkrummede flater med en bærekonstruksjon bestående av et slikt deformerbart rutenett som beskrevet over? Svaret avhenger ikke bare av hvor sterk krumningen materialet tåler, men også hvordan materialet oppfører seg når det blir utsatt for bøyedeformasjon. Vi ser først på hvilke materialeegenskaper som avgjør hvor stor krumningen kan være. Krumningen i en bue, også kalt kurvatur, defineres som den inverse av krumningssirkelens radius.

$$\kappa = \frac{1}{R} \quad (5.1)$$

der: κ = krumning, evt. kurvatur R = krumningsradius

For å finne et uttrykk for den maksimale verdi for krumningen ser vi på bjelkens differensialligning med spesiell interesse for de passasjer som berører bjelkens krumning[34]. Betrakter vi et infinitesimalt element av en bjelke under påvirkning av en jevnt fordelt last kan vi finne et uttrykk for den maksimale kurvatur som en bjelke kan utsettes for.

(fig bjelke og element)

En horisontal bjelke belastet med en jevnt fordelt vertikal last vil over et horisontalt intervall dx deformeres slik at et punkt forskyves dw i y -retning (se fig.

²Etude de structures élancées précontraintes en matériaux composites: Application à la conception des gridshells

FXXX). Det vertikale planet som går gjennom punktet på enden av bjelkeelementet har nå rotert slik at bjelkeelementet har en helning. Ved små deformasjoner kan vi anta at plane snitt forblir plane. Helningen kan dermed uttrykkes som forholdet mellom forskyvning i y - og x -retning.

$$\theta = \frac{dw}{dx} \quad (5.2)$$

der: θ = helning

Krumningen i et punkt er endringen i planenes rotasjonsvinkel over en avstand, helningsendringen.

$$\kappa = \frac{d\theta}{dx} \quad (5.3)$$

Krumning er et rent geometrisk begrep. For å finne et uttrykk for den maksimale kurvatur som et gitterskallelement kan tåle må vi se på de indre spenningene som denne krumningen forårsaker i en gitt bjelke. For å skape en krumning i et faktisk materiale, kreves det en momentkraft, og graden av krumning som en gitt momentkraft er i stand til å skape avhenger igjen av bjelkens bøyestivhet. Fra den elastiske linjes teori (se f.eks. [34]) kjenner vi krumningen av en bjelke som en funksjon av momentbelastningen og bøyestivheten

$$\kappa = \frac{M}{EI} \quad (5.4)$$

der: M = moment E = elastisitetsmodul I = treghetsmoment

Krumningen må ikke være større enn at momentkraften produserer en bøyepening som ikke overskrider den tillatte bøyepeningen. Bøyepeningen er en funksjon av forholdet mellom momentkraften og motstandsmomentet.

$$\sigma_m = \frac{M}{W} \quad (5.5)$$

der: W = motstandsmoment σ_m = opptredende bøyepening

Motstandsmomentet uttrykker et forhold mellom treghetsmomentet og bjelketverrsnittets høyde. Dermed kan maksimalt opptredende bøyepening også uttrykkes ved hjelp av treghetsmomentet og tverrsnittshøyden. I vår gitterskallmodell er det kun aktuelt med et rektangulært tverrsnitt. Da kan motstandsmomentet, W , uttrykkes som $I * \frac{1}{2}$ og vi får:

$$\sigma_m = \frac{Mh}{2I} \quad (5.6)$$

der:

h = tverrsnittshøyde

Setter vi (5.6) inn i (5.4), får vi en sammenheng mellom kurvatur og bøyespennning.

$$\kappa = \frac{2\sigma_m}{Eh} \quad (5.7)$$

Setter vi (5.7) inn i (5.1) får vi et uttrykk for krumningsradien, som kan være en mer håndgripelig størrelse når man vurderer ulike former i en tidlig idéfase.

$$R = \frac{Eh}{2\sigma_m} \quad (5.8)$$

Når vi skal utforme et gitterskall er vi interessert i å kunne bøye materialene mest mulig for å oppnå størst mulig formbarhet for gitteret. Setter vi inn materialets bøyespenningskapasitet som opptredende bøyespennning i (5.8), får vi et uttrykk for den minste tillatte krumningsradius for et valgt materiale med et valgt tverrsnitt.

$$R_{min} = \frac{Eh}{2f_m} \quad (5.9)$$

der: f_m = materialets bøyespenningskapasitet

For et gitt materiale er alle størrelsene i (5.9) unntatt tverrsnittshøyden materialkonstanter. Det kan være nyttig å få et inntrykk av forholdet mellom tverrsnittshøyde og minste krumningsradius for noen av de mest anvendte styrkeklassene. Basert på verdier fra European Committee for Standardization kan vi se på noen av styrkeklassenes materialegenskaper.

Styrkeklasse	Karakteristisk bøyespenningskapasitet f_m [N/mm ²]	Elastisitetsmodul E_0
C16	16	8 000
C24	24	11 000
C30	30	12 000
D30 (eik)	30	10 000
D70	70	20 000

Tabell 5.1: Materialegenskaper for konstruksjonstre, fra EN 338

Vi setter inn verdiene for materialkonstantene i (5.9) og får en minste krumningsradius som i våre eksempler varierer med tverrsnittshøyden h med en faktor fra 143 til 250.

For en bjelke med et tverrsnitt på 1" blir altså minste krumningsradius omtrent 4 meter for konstruksjonstre med høy fasthet (C30). Dette er imidlertid en teoretisk verdi basert på materialets karakteristiske bøyefasthet, $f_{m,k}$. For praktisk

Styrkeklasse	Minste krumningsradius, R_{min}
C16	250 h
C24	229 h
C30	200 h
D30 (eik)	167 h
D70	143 h

Tabell 5.2: Minste krumningsradius som funksjon av tverrsnittshøyden for ulike typer konstruksjonstre

dimensjonering etter gjeldende standarder må den karakteristiske bøyepenningen i tillegg reduseres med ulike faktorer som tar hensyn til materialujevnheter og bruks- og belastningstype. I det europeiske Eurocode-regimet opereres det med en dimensjonerende bøyepenning, $f_{m,d}$, som vil redusere krumningsradien ytterligere (EN 1995-1-1)[18].

$$f_{m,d} = \frac{k_{mod} f_{m,k}}{\gamma_M} \quad (5.10)$$

der:

k_{mod} = modifikasjonsfaktor som tar hensyn til virkningen av lastvarighet og fuktinnhold.

γ_M = materialfaktor som tar hensyn til usikkerhet ved måling av $f_{m,k}$

Eurocode 5 angir en materialfaktor for heltre på 1,3, og en modifikasjonsfaktor på 0,9 for kortidslast under oppføringsfasen. Videre kan den karakteristiske bøyepenningen for heltre med densitet lavere enn $700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ multipliseres med en høydefaktor, k_h , hvis tverrsnittet er lavere enn 150 mm (EN 1995-1-1)[18].

$$k_h = \min \left\{ \left(\frac{150}{h} \right)^{0,2}, 1, 3 \right\} \quad (5.11)$$

Den maksimale verdien for k_h er 1,3 og nås ved et tverrsnitt på 2". Bjelkens minste krumningsradius setter en svært viktig betingelse for utformingen av et kinematisk gitterskall. Men kan denne egenskapen alene fortelle oss hvilke materialer som er aktuelle og hvilke som ikke kan brukes? Vi ser at for å kunne tillate kurvatur er forholdet mellom bøyepenning og elastisitetsmodul avgjørende. Som så ofte ellers er det ønskelig med høy dimensjonerende bøyepenningskapasitet, men i denne sammenhengen kan man altså i tillegg dra nytte av en relativt lavere elastisitetsmodul. Det er ønskelig med et materiale som ikke genererer mye bøyepenning ved en gitt bøyedeformasjon sett i forhold til materialets maksimalt tillatte bøyepenning. Vi sammenligner dataene for tre over med konstruksjonsstål av en vanlig

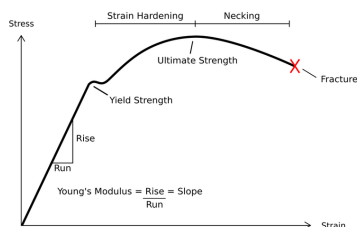
fasthetsklasse, S235. Den karakteristiske flytspenningen, f_y , for denne stålqualiteten er 235 N/mm^2 , og elastisitetsmodulen, E , er $207\,000 \text{ N/mm}^2$. Med tilsvarende verdier for stål i (5.10) får vi en dimensjonerende bøyespenning på 214 N/mm^2 , og setter vi disse verdiene inn i (5.9) får vi en minste krumningsradius proporsjonal med tverrsnittshøyden med en faktor 484. Når vi så tar i betraktning stålets høyere fasthet og dermed dets potensiale for tynnere profiler synes ikke minste krumningsradius alene å kunne forklare hvorfor man bør velge tre som konstruksjonsmateriale i et kinematisk gitterskall. Forholdet mellom elastisitetsmodul og bøyespenning taler isolert sett til fordel for konstruksjonstre på grunn av den spesielle oppføringsfasen. Men andre hensyn spiller også rolle. Ser man utelukkende på minste krumningsradius som kriterium ville for eksempel silikon og andre elastomerer hevde seg godt. Når konstruksjonen først er oppført ønsker man materialer med en viss bøvestivhet som kan sørge for den ferdige konstruksjonens stivhet. Da blir selvsagt silikon utelukket men vi ser også at stål hevder seg bedre enn tre. Profilene kan gjøres tynnere, noe som også åpner opp for å bruke glassdekker på gitterskallkonstruksjoner av stål.



Figur 5.4: British Museum (N. Foster). Stålgitter med glassdekke (Wikimedia Commons)

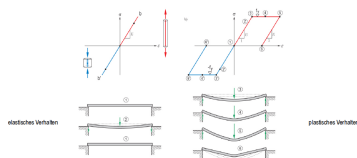
Også når det gjelder bruddegenskaper hevder stålet seg sterkt. Stålet er et utpreget duktilt materiale som kan deformeres uten å gå i brudd, noe som er viktig når gitteret formes trinnvis og stedvis i oppføringsfasen. Man kunne dermed tenke seg stålet som en god kandidat til et slikt skall. Likevel ville det være så godt som umulig å konstruere et gitterskall av stål på samme måte en et gitterskall av tre. Når stålet når en viss spenningsnivå går den elastiske deformasjonen over i plastisk deformasjon før materiale går i endelig brudd. Denne kvaliteten er i

mange sammenhenger er fordel, men skal man forme et flatt rutenett om til en skallkonstruksjon skaper stålets forhold mellom elastisk og plastisk deformasjon problemer.



Figur 5.5: Spennings-/tøyningkurve for stål. Når spenningen når terskelen for flytspenning oppstår det plastisk deformasjon før materialet går i brudd (Wikimedia Commons)

Et formsterkt skall krever en deformasjon av gitteret som følger en bestemt kurve slik at skallkonstruksjonen oppnår en membraneffekt lik den vi har sett på tidligere i kapittelet. Men det ville være tilnærmet umulig å forme lange stålstaver til denne skallformen fordi stålet ville svare på lokale lastkonsentrasjoner ved å deformeres plastisk og man ville få en bulkete bue som ville gjøre skallkonstruksjonen spesielt utsatt for bukling. En trebjelke derimot vil svare på en slik punktlastpåføring med en jevn elastisk deformasjon langs hele bjelkelengden.



Figur 5.6: Elastisk og plastisk deformasjon. Plastisk deformasjon kan etterlate seg ikke bare varig men også ujevn deformasjon[?]

Skulle man ha lagd denne type gitterskall av stål ville man bli nødt til å prefabrikere elementene og deretter transportere dem til byggeplassen. For å prefabrikere elementene ville man også være nødt til å beregne skallets geometri eksakt før oppføring, mens for et gitter i tre ville det holde å vite lengden på lamellene og posisjonen til knutepunkthullene[7]. Hvordan er det så med bruddegenskapene til konstruksjonstre? For å vurdere et materiales seighet, opererer man med en materialenes bruddseighet, K_c , målt som en kritisk verdi av en spenningskonsentrasjonsfaktor, K [10]. Denne faktoren angir i korthet forholdet mellom spenningen i ujevnheter, kjerver, σ_m og spenningen ellers i tverrsnittet, σ_0 . Denne faktoren kan vi finne igjen i uttrykket for den kritiske spenningsverdi for bruddannelser.

$$\sigma_c = \frac{K_c}{Y\sqrt{\pi a}} \quad (5.12)$$

Vi behandler ikke alle detaljene her, men interessant for tre som byggemateriale er hulromsarealet, a . Alle materialer inneholder urenheter, mikroskopiske brudd, som svekker fastheten. Trevirke slik vi finner det i naturen har store og ikke minst svært varierende urenheter i form av kvisthull, markhull kvaelommer for å nevne noen eksempler. Slike urenheter kan føre til store spenningskonsentrasjoner når krumningen øker. Gitterskallene kan deformeres tildels kraftig og det blir derfor ekstra viktig å unngå trevirke med urenheter som fører til store spenningskonsentrasjoner ved bøyedeforrasjon. Denne materialsvakheten skal fanges opp av reduksjonsfaktorer i standardene. Ønsker man å oppnå bedre verdier kan man søke å eliminere flest mulig av disse «virkefeilene». Dette kan imidlertid resultere i en nitid sorteringsprosess som kan være fordyrende hvis tilvirkningsprosessene ikke er lagt til rette for det fra før. Som vi skal se senere, var problemet med sprøbrudd ikke ubetydelig ved oppføringen av de første gitterskallene. Bruddseigheten for tre er mer komplisert å bestemme enn for andre tilvirkede byggematerialer og baserer seg på kunnskap som kanskje ikke er like utbredt i dag som hos våre forfedre. Vikingene laget sine skip med tildels svært krummede overflater, og det er mye som tyder på at de hadde inngående kjennskap til de ulike treforekomstenes seighetsegenskaper. Vikingskipfunnene har inspirert våre dagers entusiaster til å lage kopier av skipene. Men til tross for inngående studier av skipenes oppbygning, har samtlige kopier som har vært testet i rom sjø endt i skipsforlis. En teori for å forklare skipsbruddene er at det er blitt brukt trevirke med for høy E-modul[8].



Figur 5.7: Forsøk på å seile vikingskipkopier i rom sjø har endt i forlis (Foto: Lofotr)

Akkurat som det finnes høyfasthetsstål med langt bedre mekaniske egenskaper enn vanlig konstruksjonsstål tilgjengelig hvis man ønsker å betale for det, kan man også sortere seg fram til trevirke med bedre egenskaper.

Det tidligere omtalte karakteristiske bøyespenningen representerer en fraktilverdi av normalfordelingen for materialklassen. Den gjennomsnittlige verdien er langt høyere. Det er også store forskjeller mellom tretypene hva gjelder bruddseighet, representert ved størrelsen slagbruddarbeid i 5.3. I konstruksjonstyper hvor materialdimensjonene er avgjørende for hvilke former som kan prosjekteres kan

Egenskaper	Eik	Gran	Furu
Bøyefasthet, N/mm ²	88	78	87
Slagbruddarbeid, kJ/m ²	75	40	40
Densitet (basis), kg/m ³	550	380	440

Tabell 5.3: Noen mekaniske egenskaper for eik sammenlignet med gran og furu (Trefokus nr.30)

det lønne seg å legge ekstra ressurser i materialutvelgelse og materialforbedringer, for eksempel ved å fjerne virkesfeil og lime høykvalitetspartiene sammen til høyfasthetstrevirke.

5.3.2 Treets achilleshæler

Uttrykket for den minste krumningsradius i (3.9) er en teoretisk maksimalverdi. Eksperimentelle forsøk ar vist at den virkelige verdien må reduseres noe[17]. Når krumningsradien blir for liten har det vist seg at vi risikerer at bjelken deler seg mellom de øvre og de nedre fiberlagene idet den blir utsatt for *tverrstrekk*. Siden de ytre aksialkreftene ikke har samme retning krever likevekten i et krumt element en indre spenning som går på tvers av fiberretningen. Med denne krafttrekanten blir bjelken utsatt for spenninger som går på tvers av fiberretningen. Hvis denne spenningen er en strekkspenning utsettes bjelken for en påkjenning hvor den har sine dårligste fasthetsegenskaper. Den karakteristiske strekkfastheten på tvers av fibrene for konstruksjonstre varierer fra 0,4 til 0,6 for de vanligste styrkeklassene (EN 338)[19].



Figur 5.8: Tverrstrekk i buet limtrebjelke [5]

Hvor store konsekvenser får så denne svakheten for gitterskallets egenskaper? Eurocode 5 angir reduksjonsfaktorer som skal ta hensyn til tverrstrekk i krumme bjelker. Spesielt utsatt er krumme limtrebjelker med varierende tverrsnitt. En tverrsnitthøyde (på hele limtrebjelken) som er høy sett i forhold til lamellenes krumningsradius gir også en betydelig reduksjonsfaktor. Med de dimensjoner og

utforminger som er aktuelle i denne oppgaven blir imidlertid denne reduksjonen av minste kurveradius ikke av betydelig art. Denne problematikken blir mer fremtredende for den alternative utformingsmetoden i denne oppgaven. Tverrstrekk er mer tilbøyelig til å oppstå i en mer tradisjonell buekonstruksjon med limtrebjelker (EN 1995-1-1 pkt. 6.4.3)[18]

Som organisk materiale er treet altså et utpreget anisotropisk materiale. Fastheten på tvers av fibre er langt lavere enn fastheten i fiberretningen. Men treet er også organisk i den forstand at fiberretningen kan ta noen “organiske” retningsendringer. Denne problemstillingen er desto mer relevant for gitterskallet, som er bygget opp av relativt slanke, lange lameller. Limtrebjelken har den fordel at den består av flere lag med lameller der ujevnheter jevner seg noe ut og spres til ulike deler av bjelken – det er lite sannsynlig at alle lamellene har en lignende defekt på samme sted i limtrebjelken. Ved lokale svekkelser i én lamell vil spenningsstrømmen kunne kanaliseres til en sterkere del av bjelken[3]. Gitterskallens lameller drar ikke nytte av et slikt solidarisk samvirke. Gitterskallkonstruksjonen blir dermed mer sårbar for virkefeil og individuell variasjon mellom lamellene enn hovedkonkurrenten blant trekonstruksjoner. Hvis fiberretningen endrer vinkel vil derfor aksialkapasiteten til bjelken forringes betraktelig. Aksialkapasiteten svekkes fordi med en fiberretning som ikke er parallell med senteraksen vil medføre at en aksialkraft vil medføre aksialspenninger som har en komponent som går på tvers av fiberretningen. For å få en sterkere konstruksjon kan det derfor lønne seg å kappe vekk partier med uheldig fiberretning for deretter å skjøte dem sammen igjen ved hjelp av for eksempel limte fingerskjøter (se kapittel 3.3 for eksempler). Ved utformingen av en konstruksjon basert på limtrebuer kan man også velge en statisk bestemt opplagring som holder et annet viktig problem i sjakk, nemlig tvangsspenninger. Limtrebuene kommer ferdig krummet fra fabrikk og kan settes opp enten som en to-leddet eller en tre-leddet bue.



Figur 5.9: Treleddede statisk bestemte buer. Kjøpesenter le-bolle, Epoli (foto: Rubner Holzbau)

Den tre-leddede buen har det fortrinn at den er ytre statisk bestemt. Små geometriske unøyaktigheter og ikke minst utvidelser som følge av fuktighet (for

tre) eller temperatur (for stål og aluminium) kan kontrolleres ved å velge denne utformingen. I en statisk ubestemt bue kan utvidelse av materialet føre til stabilitetsproblemer, både sideveis (vipping) og i planet (bukling). Sammenligner vi med gitterskallet støter vi her på en fundamental forskjell mellom de to konstruksjonsteknikkene. Gitterskallet får ikke sin form fra ferdigformede komponenter fra fabrikk. Gitterskallets opplagring tjener nettopp til å “tvinge” den tre-dimensjonale formen på plass som en fastlåsing av det todimensjonale gitterets deformasjon. Tvangsspenninger er dermed ikke til å unngå da det er en grunnleggende del av selve konstruksjonsprinsippet. Hva tre angår, er det særlig fuktighetsforandringer som fører til slike tvangsspenninger i en statisk ubestemt konstruksjon. Temperaturen, som kan være et stort problem for andre konstruksjonsmaterialer, er mindre kritisk. Utvidelsen på grunn av fuktvariasjoner er også svært ulik i ulike retninger for konstruksjonstre. Med treets oppbygning i årringer er det hensiktsmessig å måle lengdeutvidelsen i radiell, tangentiell og i lengderetning. For gitterskallenes del er det særlig utvidelse i langsgående retning som kan volde mye bry i form av stabilitetsproblemer. Hvis vi studerer de ulike tresortene som kan brukes som konstruksjonstre, ser vi at de kan ha tildels svært ulike hygroskopiske egenskaper. Utvidelsen i langsgående retning er imidlertid den klart mest beskjedne. Gjennomsnittsverdier for norsk konstruksjonstre er på 0,3 prosent målt fra tørr til mettet tilstand (Trefokus 40)

Av de lett tilgjengelige konstruksjonsmaterialene er det tre som er det naturlige valget for gitterskall bygget opp av kontinuerlige elastiske bjelker. I tillegg til de mer allmenne hensyn som f.eks. økologi har treet mekaniske egenskaper som gjør det spesielt egnet til nettopp denne bygningstypen. Men treet som konstruksjonsmateriale har også sine begrensninger som legger formmessige skranker for fri-form-arkitekturen. For å få et bedre innblikk i de utfordringer som oppstår ved prosjektering og oppføring av denne konstruksjonstypen skal vi i neste kapittel studere tilblivelsesprosessen til noen av de mer kjente eksemplene fra arkitekturhistorien.

5.4 Noen eksempler fra historien

Vi har til nå diskutert gitterskallenes oppbygging og konstruksjonsmaterialer ved å se på noen teoretiske betraktninger om gitterskallets oppbygning og materialkrav. Det kinematiske gitterskallet er den dag i dag fremdeles en eksperimentell konstruksjonstype og de allerede oppførte prosjektene rommer mye verdifull erfaring og problemløsning som ikke fanges opp av betraktningene i kapittel 3.1 og 3.2. For å få et innblikk heldige og mindre heldige oppbygginger av skallene ser vi derfor nærmere på noen av erfaringene som tidligere prosjekter kan gi oss.

5.4.1 De første pionerarbeidene

Den mest kjente gitterskallkonstruksjonen som er bygget etter Frei Ottos prinsipper (se kap.3.1) ble bygget på begynnelsen av 70-tallet i den tyske byen Mannheim. Der ble det oppført en Multihalle som skulle sikre seg en plass i bygningshistorien. Hallen i Mannheim har imidlertid en noe mystisk forløper i den russiske stålverksbyen Vyksa. Så tidlig som i 1897 oppførte den russiske ingeniøren Vladimir Sjukov det som regnes for å være det første eksempelet på et dobbelkrummet gitterskall da han tegnet en produksjonshallen (ikke utstillingshallen som mange kommentatorer synes å mene) i en fabrikk eiet av det lokale stålverksselskapet. Bygningen er av ikke ubetydelige dimensjoner. Den måler 73 x 39 meter og består av en rekke med fem dobbelkrummede skall som er forbundet med hverandre ved hjelp av fagverksbuer.



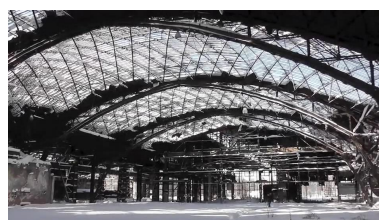
Figur 5.10: Oppføring av Sjukovs gitterskall i stål i Vyksa, 1897 (Wikimedia Commons)

Mens de senere gitterskallprosjektene gjerne ble ledsaget av utstrakt forskningsarbeid og eksperimentering, har det vært nesten umulig for bygningshistorikerne å finne dokumentasjon på formgivningsprinsippene og tilblivelsesprosessen når det gjelder dette pionerarbeidet. I tillegg til gitterskallet i fabrikkhallen har Sjukov oppført et knippe innovative konstruksjoner, gjerne basert på bestemte matematiske prinsipper, som ofte hadde det til felles at de var de første i sitt slag i verden.

Gitterskallet i Vyksa var del av en matematisk inspirert gruppe konstruksjoner, men som gitterskall var den en enslig svale i bygningshistorien i over et halvt århundre. På 1960-tallet oppstår de første veldokumenterte gitterskallprosjektene. Pioneren i moderne tid hva gitterskall angår er den tyske arkitekten Frei Otto. Har han vært involvert i en rekke prosjekter som har drevet kunnskapen om denne konstruksjonsteknikken fremover. Frei Otto var fra barnsben av fascinert av ulike konstruksjoner som involverer membraner i strekk, som seilfly og store telt, og han er kanskje mest kjent for sine teltformede kabelkonstruksjoner, som for eksempel



(a) Tårnkonstruksjon av basert på hyperboloiden, Nizny, Novgorod 1896



(b) Gitterskall i Vyksa

Figur 5.11: Flere av Sjukovs konstruksjoner var de første i sitt slag (Wikimedia Commons)

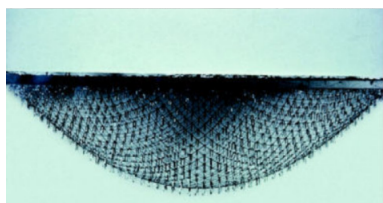
olympiastadion i Munchen fra 1972.

Han anvendte også tenkemåten som ligger til grunn for disse konstruksjonene på trykkbaserte konstruksjoner. Når denne kabelkonstruksjonen snus opp ned og kablene erstattes av komponenter som kan ta trykk har vi det konstruktive grunnlaget for en gitterskallkonstruksjon. I verket *IL 10: Gitterschalen*[35] omtales de første prosjektene som leder opp til Mannheims *Multihalle*. I 1962 ble det oppført et mindre gitterskall som del av et studentprosjekt under ledelse av Frei Otto på Berkeley-universitetet i California. Prosjektet var et rent forskningseksperiment og bygningen hadde ingen bruksverdi. Men litt senere i samme år ble det oppført et større gitterskall under byggmesse DEUBAU i Essen i Tyskland. Grunnflaten var på 198 kvm. Like viktig som størrelsen er materialvalg og prosjekteringsprosessen. Mens de foregående skallene var stålkonstruksjoner, var gitterskallet i Essen prosjektert som en trekonstruksjon. Formgivningsprosessen markerte også en viktig milepæl. Formen ble optimalisert ved hjelp av en fysisk modellering av prosjektet der konstruksjonen ble modellert opp ned og der trelamellene ble erstattet av tunne kabler uten bøyestivhet.

Fem år senere ble et nytt gitterskall i tre oppført i regi av Frei Otto. Anledningen var en tysk paviljong på en utstilling i Montréal. Gitterskallet var en den av



Figur 5.12: Teltformet kabelkonstruksjon. Olympiastadion, Munchen (Wikimedia Commons)



(a) Trådmodell



(b) Gitterskall i tre

Figur 5.13: Gitterskalleksperiment basert på fysisk modellering[33]

en større helhet dominert av strekkonstruksjoner. Grunnflaten økte til 365 kvm. Denne konstruksjonen skilte seg også ut idet den ble sammensatt av to gitterstrukturer som ble føyet sammen i et felles tverrsnitt, noe som ga en pekepinn på hvilke formmessige muligheter som lå i denne konstruksjonsteknikken.

Frei Otto var også involvert i en rekke gitterskallprosjekter som aldri kom lenger enn til prosjektstadiet. I tiden fra 1966 til 1974 ble det prosjektert bl.a. svømmehaller, tribunetak, paviljonger, konferansesaler ulike steder i Europa. Mange av dem sprang ut av forskningsmiljøet rundt Frei Otto, men noen var også initiert av andre miljøer som hadde begynt å fatte interesse for denne konstruksjonstypen.

5.4.2 Et institutt for lette konstruksjoner

Frei Otto startet eksperimenteringen med gitterskall i USA men det faglige tyngdepunktet skulle i større og større grad forflytte seg til Tyskland når vi går over i 70-tallet. Den tyske forfatteren Thomas Mann skal ha sagt at “Der jeg er, er også den tyske kultur” da han flyttet til USA. Frei Otto kunne kanskje ha sagt noe av det samme om seg selv og gitterskallforskningen. Han hadde vært med på å opprette *Institut für leichte Flächentragwerke* (IL) i Stuttgart og her oppstod det et miljø som skulle få avgjørende betydning for gitterskallenes utvikling. Instituttet ga ut en rekke forskningspublikasjoner som er blitt referanseverker. Og i presentasjonen av gitterskallene kommer vi ikke utenom denne forskerkretsens arbeider. I tillegg til Frei Otto har bl.a. Jörg Schlaich og Berthold Burkhardt levert viktige bidrag. *IL 10: Gitterschalen* er allerede nevnt. I tillegg har finner vi blant annet verket *IL 13: Multihalle Mannheim*, redigert av Berthold Burkhardt, der mange av de involverte aktørene deler av sine erfaringer fra formgivningen og oppføringen av gitterskallet i Mannheim[9]. I IL 10 beskrev forskerne den spesielle formgivningsprosessen som karakteriserer det kinematiske gitterskallet. Det skulle ikke gå lang tid før de fikk anledning til å leve som de lærte. I Tyskland arrangeres det en *Bundesgartenschau*, en hageutstilling som flyttes fra by til by annethvert år. I 1975 var turen kommet til den tyske byen Mannheim. Vi er nå kommet til et høydepunkt i gitterskallenes historie. Fra nå av vil vi stoppe opp en liten stund og zoome inn på noe utvalgte prosjekter som er av spesiell interesse for oss. Når vi studerer disse utvalgte prosjektene noe mer inngående er vi i denne oppgaven særlig interessert i forhold som kan ses på som en barriere for gitterskallets utbredelse:

- Hva var bakgrunnen for at gitterskallkonstruksjonen ble valgt fremfor alternative konstruksjonstyper? Var det snakk om helt spesielle forskningsdrevne eksperimenter eller var det funksjonelle kriterier som ble lagt til grunn?
- Hva slags utforming og dimensjoner er det snakk om? Er for eksempel store spenn mulige med denne konstruksjonstypen?
- Hva karakteriserte formgivningsprosessen? Var den basert på allment tilgjengelige verktøy eller var man avhengig av egenutviklede verktøy og analysemetoder?
- Hvilke byggematerialer ble brukt? Krevde konstruksjonene helt spesielle trykkkvaliteter eller kunne vanlig konstruksjonstre benyttes?
- Hvordan ble utfordringen med de mange knutepunktene og opplagringspunktene løst? Krevde gitterskallet konstruksjonsdetaljer utviklet spesielt for formålet eller kunne man basere seg på standardiserte løsninger og komponenter?

- Hvilke særtrekk var oppføringsfasen preget av? Er forestillingen om en komplisert oppføringsprosess reell eller er den overdrevet?
- Til slutt spør vi om prosjektet var vellykket. Er det fremdeles et signalbygg etter at innvielsen har funnet sted? Er det en funksjonsdyktig bygning?

5.4.3 Mannheim - en studie av det mulige

Med prosjektet i Mannheim fikk vi den første virkelig store testen på gitterskallets muligheter og begrensninger. Konstruksjonsmessig støtte de på uventede utfordringer underveis, noe som resulterte i en alternativ utforming med to gitterlag – en løsning som skulle vise seg å bli foretrukket og utviklet videre ved senere anledninger.

Bakgrunn

For å avvikle hageutstillingen trengte Mannheim et nytt lokale. Konkurransen ble utlyst og vinnerbidraget ble levert av et tysk arkitektfirma ved navn Mutschler and Partners. Det opprinnelige utkastet var en flerbrukshall som skulle romme bl.a. en stor utstillingshall og et noe mindre restaurantområde. Hallen var imidlertid basert på en strekkonstruksjon av samme type som Frei Otto hadde oppført tidligere. Han ble derfor hentet inn for å bistå i arbeidet med projekteringen. Etter at Otto fikk studert utkastet fikk han imidlertid penset prosjektet over til å bli et gitterskall av dimensjoner som overgikk med klar margin det verden hadde sett hittil. For dimensjoneringen ble det engelske ingeniørfirmaet Ove Arup engasjert. Utad var det Arup som var ansvarlig for prosjektet, men internt var det en ingeniør ved navn Edmund (Ted) Happold som var hovedansvarlig. E. Happold skulle senere starte egen praksis i firmaet Buro Happold. Dette firmaet skal vi møte Igjen senere da de har vært involvert i nesten samtlige gitterskallprosjekter som ble oppført etter Mannheim.

Konstruksjonen

Vinnerutkastet bestod nå av to haller med ulik størrelse som var forbundet med hverandre ved hjelp av passasjer med samme formspråk som hallene. Sammen med inngangspartiene skapte disse bygningsdelene en konstruksjon som var både sammensatt og helhetlig på en og samme tid. Bygningen har en grunnflate på hele 3600 kvm. og et maksimalt spenn på 85 meter. Hallen føyet seg inn i landskapet nærmest som et naturlig høyledrag. Den var dermed i en helt annen dimensjon sammenlignet med sine historiske forløpere. Dette prosjektet blir en viktig test for gitterskallets anvendbarhet og prosjektet følges naturligvis tett av IL-forskerne i Stuttgart. I *IL13: Multihalle Mannheim* gis en detaljert presentasjon av prosjektet

(Burkhardt). Gitteret ble bygget opp av to lag med lameller i hver retning. Materialet var furu som ble foretrukket på grunn av sine gode hygroskopiske egenskaper og fordi det var rikelig med tilgang på lameller i store lengder. Lamellene har et tverrsnitt på 50 x 50 mm og rutenettet har en senteravstand på 500 mm. Det gikk med omlag 72 000 meter med lameller i byggingen av skallet og konstruksjonen har hele 34 000 knutepunkter.

fig - plan

Modellering

For å finne den optimale utformingen av hallen ble det eksperimentert med fysiske modeller. Modellene baserte seg på hengende kabelnett. Slik det hengende kjedet er en inversjon av den optimale bueformen, er kabelnettet en speilvending av et optimalt utformet gitterskall. Så lenge det ikke påføres ytre krefter som f.eks. vind og snø vil formen gi en konstruksjon fri for indre bøyemoment, noe som åpner opp for slanke konstruksjoner med store spenn. Trådmodellen var en første, grovkornet modellering av den endelige formen. Modellen var i skala 1: 100 og for å gjøre modellen praktisk konstruerbar og håndterbar tok man kun med hver tredje lamell i modellen, slik at maskevidden i skalamodellen tilsvarte en maskevidde på 1,5 meter i virkeligheten. Etter at formen var blitt funnet ved hjelp av det hengende rutenettet, ble ekspertise fra landmålingsmiljøet på universitetet i Stuttgart engasjert for å perfektionere og kvantifisere modellen. Knutepunktene ble gitt romlige koordinater ved hjelp av fotogrammetri, en avansert fotograferingsteknikk der avstander og dimensjoner måles ved hjelp av perspektivforskyvninger, men som gjøres mer rasjonelt digitalt i dag. Koordinatene ble registrert og dannet grunnlaget for numeriske beregninger

Materialer

På grunn av sin størrelse var Mannheims Multihalle upløyd mark i mange henseender. Lastvirkningene måtte testes eksperimentelt med bl.a. skalamodeller i vindtunneler, og materialvalget måtte være nøye gjennomtenkt. Som vi har sett i kapittel 3.2 byr tre som konstruksjonsmateriale både på muligheter og på spesielle utfordringer når man skal konstruere et gitterskall. Valget falt på en spesiell furu-type som vi finner på vestkysten av USA. Trærne kan bli meget høye og tykke. En høyde på 60 m og stammediameter på 2 meter er ikke uvanlig, så disse trærne burde være i stand til å danne mange lange bjelker til prosjektet. Materialets mekaniske egenskaper ble testet med en grundighet som det sjelden vies tid og ressurser til i andre prosjekter. Gjennomsnittlig bøyefasthet ble målt til 83 N/mm². Konstruksjonen hadde rimeligvis høy grad av statisk ubestemthet og bestod av lange, slanke elementer. Spesielt viktig var derfor fuktighetens innvirkning på elas-

tisitetsmodulen og utvidelsen av materialet. Temperaturutvidelsene måtte også testes. Konstruksjonen har en tildels krevende kurvatur for materialene - enkelte steder i konstruksjonen er lamellenes bøyeradius nede i 6 meter - så bøyeegenskaper og bruddegenskaper ble også inngående testet. En av treets egenskaper er at det har en utpreget evne til å tilpasse seg endringer i omgivelsene. Spenninger som oppstår som følge av bøyedeformasjon vil etter hvert avta, kjent som fenomenet relaksasjon. Testing av den amerikanske furuen viste at bøyespenningen minket med opptil 40

Konstruksjonsdetaljer

Når det gjelder konstruksjonsdetaljene er det særlig knutepunktene og opplagringsteknikkene som interesserer oss. Mens gitterskallet i Essen var en enkel bobleform med samme opplagringsteknikk rundt hele omrisset, gjorde Mannheims Multihalle det mulig for det kinematiske gitterskallet å prøve seg mot fire ulike opplagringstyper. Gitterskallet i Essen var et eksperiment uten bruksverdi, og manglet elementære funksjoner som for eksempel et inngangsparti. Hallen i Mannheims hadde derimot flere inngangspartier. Videre hadde den soner der skallet ikke gikk helt ned til bakken men der den snarere fungerte som en takkonstruksjon, som for eksempel ved restaurantområdet. De aller fleste partiene av konstruksjonen var likevel forankret på betongfundamenter. Ved inngangspartiene kan lamellene nødvendigvis ikke føres helt ned til bakken. Ved inngangene ble lamellene festet til buer av kryssfinerplater, en på innsiden og en på utsiden av lamellene.



(a) Inngangsparti med kryssfinerplater



(b) Opplagring på limtrebjelker

Figur 5.14: Eksempler på opplagringstyper (Wikimedia Commons)

Ved restaurantområdet ble to teknikker valgt. Opprinnelig var det tenkt at skallet skulle understøttes av oppspente kabler festet til søyler. Denne løsningen ble imidlertid litt for dristig på steder for opplagerkreftenes resultantretning kunne la seg variere ettersom lastsituasjonen endret seg. Partier hvor resultantkreftene i opplageren kunne ha veldig variabel retning ble derfor utrustet med limtrebjelker istedenfor kablene. Etter at skallet har fått sin form ved hjelp av bøyedeforma-

sjon i lamellene og skjærdeformasjon i rutenettets kvadrater må konstruksjonen ikke bare forankres for å holde deformasjonen på plass men også stives av for å låse posisjonen til de skjærdeformerte rutene. Denne delen av prosjekteringen var det særlig Ted Happold som tok seg av. I artikkelen *The Timber Lattice Roof for the Mannheim Bundesgartenschau*, gjengitt i IL 13, (Burkhardt) deler han av sine erfaringer fra prosjektet. Ulike avstivningsteknikker ble testet eksperimentelt på skalamodeller. Først på en skalamodell av det allerede oppførte prosjektet i Essen, senere på en modell i skala 1:60. Denne modellen var ikke et hengende nett men en trykkonstruksjon som simulerte deformasjonen av lamellene. Antallet lameller var svært redusert sammenlignet med originalen, kun hver sjettede stav ble tatt med i modellen, men den tjente likevel som et viktig grunnlag for testing av skallkonstruksjonens mekaniske egenskaper.

(bilde av modell fra happold)

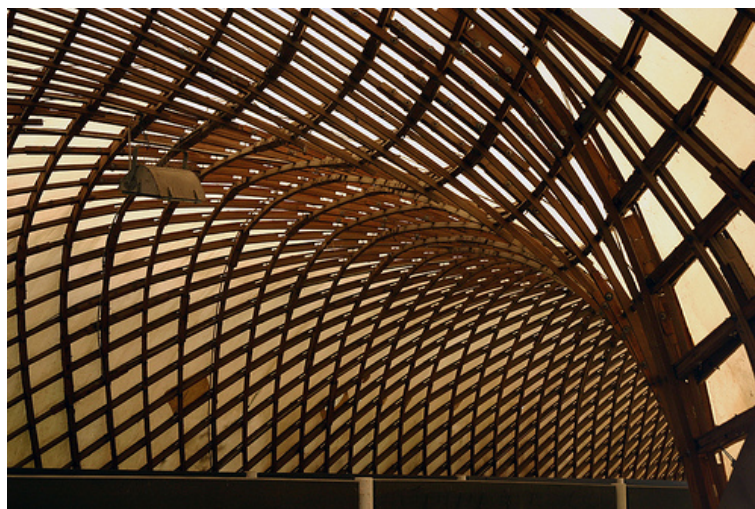
Testingen resulterte i at han ble grundig overbevist om at skråavstivning i form av kabler som strekkes diagonalt over rutenettet og som deler hvert rektangel i trekanter ville være den mest effektive teknikken. En annen mulighet var avstivning i form av skivekledning mens momentstive ledd ikke ble ansett som realistisk.



Figur 5.15: Edmund Happold er en sentral skikkelse i svært mange av gitterskallene som er blitt oppført (Burohappold.com)

Etter inngående testing ved hjelp av fysiske modeller, begynte ingeniørene å forberede seg til fullskalaprojektet. Modelleringen var i mange henseender en grovkornet representasjon av den virkelige konstruksjonen som skulle oppføres. Modellens kabler fanget ikke opp tvangsspenninger i bjelkene, ei heller bjelkenes kurvatur mellom knutepunktene, og den jevnt fordelte lasten ble modellert som punktlaster i knutepunktene. Et stykke ut i prosessen, etter inngående studier av konstruksjonens mekaniske egenskaper, ble det klart at buklingsmotstanden ikke var tilfredsstillende. Skallet får sin form etter prinsippet om det hengende rutenettet. Denne formen er fordelaktig men ikke absolutt nødvendig da lamellene har en viss bøyestivhet. Når konstruksjonen kun utsettes for en belastning med samme retning og konsentrasjon som egenvekten vil konstruksjonen være fordelaktig utformet for

bøyemoment. Når denne lasten øker i intensitet skal det stadig mindre til før en tilleggslast med en annen retning fører til kollaps i bærekonstruksjonen. Så selv om konstruksjonen er meget sterk i møte med belastninger med samme karakter som egenlasten, vil en økt belastning føre til at konstruksjonen blir mer og mer ustabil og fintfølede for laster med andre retninger, som for eksempel vind og ulike snøansamlinger. Her har gitterskallet som trykkonstruksjon en klar svakhet sammenlignet med den tilsvarende strekkonstruksjonen, det hengende kabelnettet. For en strekkonstruksjon vil tvert i mot en økt aksialbelastning føre til økt stabilitet, konstruksjonen blir mindre fintfølede for eksentriske laster hvis den er blitt godt strammet opp av de formende strekkraftene. Et godt stykke ut i prosessen kom teamet som jobbet med styrkeberegninger frem til at konstruksjonen ikke var tilstrekkelig stabil mot bukling. Bukling er skivekonstruksjonenes svar på bjelkenes knekking og kan oppleves for eksempel når man presser hånden mot et bilkarosseri helt til karosseriet gir etter og finner en skallform som buler innover istedenfor utover. Den viste seg at det prosjekterte gitterskallet bare så vidt var i stand til å bære sin egen vekt. En tverrsnittsdimensjon på 100 x 100 mm var ønsket fra ingeniørene, men denne dimensjonen ville være for stor for konstruksjonens kurvatur. Og som om ikke det var nok så var lamellene allerede bestilt. Løsningen ble å legge inn et ekstra lag med lameller slik at gitteret nå bestod av to gitre oppå hverandre.



Figur 5.16: To gitterlag ble til slutt valgt (Foto: Sofia Colabella)

Løsningen med to lag har vist seg å gi en god kombinasjon mellom styrke og fleksibilitet for de kinematiske gitterskallene og den har blitt anvendt i det store flertallet av gitterskall av tre oppført etter Mannheim-prosjektet. Løsningen med to lag introduserte imidlertid et nytt problem. For å bevare bøyeligheten under

oppføringsfasen måtte den øverste lamellen kunne bøye seg uavhengig av den nederste. Men samtidig måtte lamellene festes til hverandre på en eller annen måte før deformasjonsprosessen startet - mens rutenettet fremdeles var i to-dimensjonal form. Hvis lamellene låses til hverandre i knutepunktene slik at kun rotasjon ut av planet tillates, vil det oppstå store tvangsspenninger i lamellene når gitteret bøyes. Avstanden mellom knutepunktene vil bli kortere for den nederste lamellen enn for den øverste. For å unngå disse spenningene må et viss fleksibilitet tillates i knutepunktene i oppføringsfasen. Samtidig var det ønskelig med så stive knutepunkter som mulig. Løsningen ble å lage et avlangt hull i det øverste laget som tillot en liten vandring i bjelkenes lengderetning. (bilde som viser avlangt hull) Denne løsningen var et resultat av en endring fra ett lag til to lag et godt stykke ut i prosjekteringsprosessen. Det er ugunstig for konstruksjonens skjærkapasitet å svekke tverrsnittet i de senere prosjektene ble, som vi skal se, andre løsninger tenkt ut for denne problemstillingen. Den nye utformingen blir testet for aktuelle lastkombinasjoner og ingeniørene måler lastkapasiteten til en last som tilsvarer en sikkerhetsfaktor på 2,85 i bruddtilstanden.

Oppføringen

Bøyepeningene som oppstår når bjelkene deformeres avtar i betydelig grad etter at gitterskallet er blitt låst fast i sin endelige form. I motsetning til mange konstruksjonstyper er det under oppføringen at gitterskallet påføres noen av de mest kritiske belastningene. Opprinnelig var gitterskallet tenkt å bli løftet opp på plass og i riktig form av mange og store heisekraner, men økonomiske betraktninger mannet frem en annen fremgangsmåte. Gitteret ble i stedet dyttet oppover av jekker plassert på stillaser. Denne prosessen førte til mange lokale spenningskonsentrasjoner og mange brudd i både lameller og fingerskjøter som måtte repareres underveis.

Etter Mannheim-prosjektet dro ingeniøren Edumund Happold med seg en unik erfaring inn i sitt nystartede firma Buro Happold. Og da arkitektfirmaet Grant Associates i 1998 ønsket å utforme en park i Doncaster med flere slike gitterskallkonstruksjoner fikk Buro Happold sjansen til å bygge videre på denne erfaringen. For dette prosjektet var dimensjonene langt mer beskjedne og et langt enklere gitterkonsept med to lag lameller istedenfor fire ble utprøvd. Her kunne også konstruksjonene heises på plass slik planen var for Mannheim-prosjektet.

5.4.4 Downland – et konkurransekraftig alternativ

Etter en stille periode på vel 20 år, kom Frei Ottos gitterskall gradvis ut av dvalen rundt årtusenskiftet og en ny milepæl nås i 2002 ved et museum for gamle trekonstruksjoner i Sussex i det sørlige England. At denne renessansen skulle oppstå



(a) Earth Center, Doncaster (grant-associates.uk.com)



(b) Gitterskall i liten skala (grant-associates.uk.com)



(c) EXPO 2000, Den japanske paviljongen (Princeton architectural Press)



(d) Den japanske paviljongen, bæresystem (Shigeru Ban)

Figur 5.17: Gitterskallprosjekter i samarbeid med Buro Happold

nettopp i England er ingen tilfeldighet med E. Happolds sentrale rolle i Mannheim-prosjektet.

Bakgrunn

Foranledningen til prosjektet var et museum for gamle bygninger, “Weald and Downland Open Air Museum”, som trengte et nytt atelier for restaurering av sine gamle trebygninger. Fra oppdragsgivers side var det et ønske om en åpen og funksjonell verkstedsbygning som samtidig forholdt seg til stedet som et senter for trebygninger og håndverkskunst. Med disse betingelsene som bakteppe vant den engelske arkitekten Edward Cullinan gehør for sitt forslag om å bygge et nytt gitterskall[24] .

Form og funksjon

Vinnerutkastet tegner opp et verksted med en ytre form som ligner en rekke med tre kuler som vokser inn i hverandre og danner et avlangt grunnplan. Dimensjonene er beskjedne sett i forhold til Mannheim-prosjektet. I sin endelige form måler hallen ca. 50 meter, bredden varierer mellom 12 og 16,5 meter og høyden varierer mellom 7 og 9,5 meter. Bygningen ble oppført i Eik. I tillegg til kledning i tre fikk den også et belte med gjennomsiktig polykarbonat på den øvre delen av taket for å slippe inn lys. Selv om konstruksjonsprinsippet er det samme, er det altså også mange forskjeller mellom disse prosjektene av bygningsteknisk art som er av interesse for oss. Prosjektet vakte stor oppmerksomhet i arkitekturpressen da det ble oppført og det er også beskrevet i flere artikler av de direkte involverte, særlig av R. Harris, som også er professor ved universitetet i Bath i tillegg til sitt engasjement i Buro Happold. Vi vil låne øre til noen av artiklene han har skrevet for å få et innblikk i dette prosjektets særegenheter sammenlignet med hallen i Mannheim[24] [23].



(a) Karakteristiske bølgeformer



(b) Overlys fra transparent kledning

Figur 5.18: The Weald and Downland Museum (Wikimedia Commons)

Mens Mannheim-hallen ble til som følge av en omfattende inngripen av F. Otto et stykke ut i prosessen, var Downland resultatet av en enkelt arkitekts fascinasjon for gitterskallet som konstruksjon. Han hadde satt seg godt inn i konstruksjonens virkemåte, og konkurranseutkastet skulle vise seg å ligge tett opp mot det endelige resultatet. For å føre prosjektet et steg videre mot virkeliggjøring, tar han kontakt med Buro Happold, som på dette tidspunktet har en unik erfaring med denne konstruksjonstypen.

Modellering

Etter å ha satt seg inn i rammene for dette prosjektet, ytre form, egenlast og nyttelaster innser prosjekteringsteamet at prinsippet om det inverterte kjedet ikke nødvendigvis vil lede frem til den optimale formen. Fremgangsmåten med det hengende “fiskegarnet” og etterjustering ved hjelp av kraftdensitetsmetoden som ligger

til grunn for Mannheimutformingen forlattes til fordel for en annen analyseteknikk som var blitt utviklet i England i mellomtiden. Chris Williams, også han professor ved universitetet i Bath, får i oppdrag å analysere konstruksjonens form og likevekt. Han lener seg til arbeidene til en annen kollega på, Michael Barnes, som på slutten av 70-tallet hadde studert og videreutviklet prinsippet om dynamisk relaksasjon som metode for å analysere sammensatte systemers likevekt (mer om denne metoden i kapittelet om dynamisk relaksasjon). Downland-museet ble altså prosjektert uten hjelp av fysiske kabelnettsimuleringer. Modeller ble likevel bygget. En viktig funksjon for modellene var å kommunisere utad – en fysisk modell hjalp til med å overbevise tiltakshaveren om prosjektets gjennomførbarhet. De bidro også til å avdekke uforutsette problemer i forbindelse med oppføringsfasen. Etter noen innledende skisseaktige trådmodeller ble det bygget en skalamodell i 1:30.



Figur 5.19: Skalamodell av bærekonstruksjonen (Foto:Buro Happold/Mandy Reynolds)

Nesten tretti år var gått siden Mannheim ble oppført og selv om det er et nært slektskap mellom disse prosjektene når det gjelder konstruksjonsteknikk tilhører museet i Downland en annen generasjon hva analyseverktøy angår. Programvare basert på elementmetoden kunne kontrollere konstruksjonen for lastberegninger. Etter mye testing ble flere av maskene i rutenettet øket til 1 meter bortsett fra de lavere partiene mellom halvkulene, her ble den opprinnelige maskevidden på 0,5 meter beholdt, noe som blant annet bidro til at byggekostnadene ble mer konkurransedyktige. Akkurat som i Mannheim ble det brukt to lag med rutenett for å kunne kombinere styrke og bøyelighet.

Materialer

Som et senter for historiske bygninger med forankring til lokalmiljøet, var lokal tilhørighet et hensyn som også skulle legges vekt på ved utformingen av prosjektet. Mens flerbrukshallen i Mannheim ble bygget med trevirke fra California, var det de lokale tresortene som ble lansert som aktuelle kandidater for Downland. Museets bygninger såvel som skogen rundt har et sterkt innslag av eiketrær og valget falt til slutt på eik og et anerkjent tømmerfirma, Green Oak Carpentry Company, ble

engasjert. Av de lokale tresortene var det eiken som hadde de beste mekaniske egenskapene. Eiken hadde riktignok en høy bøyestivhet, noe som gjorde at en større momentkraft måtte til for å forme lamellene, men det hadde også en høyere bøyespenningskapasitet, slik at krumningsradien var lav nok til å tilfredsstille 6-meters-kravet fra arkitektens side med god margin. Eik ble også vurdert ut fra seighetsegenskaper. Eiken tillot en viss plastisk deformasjon før den gikk i brudd, noe som er særlig viktig i oppføringsfasen hvor bøyepåkjenningen er stor. Eik har generelt gode bruddseighetsegenskaper og antall brudd i oppføringsfasen skulle vise seg å bli langt lavere enn for Mannheim-prosjektet. Som konstruksjonsmateriale hemmes trevirke av virkesfeil, i form av kvisthull, kvaelommer osv (se også kapittel 5.3). Dette hensynet er ekstra viktig for denne konstruksjonstypen som består av mange lange og relativt tynne lameller. Et kvisthull gjør langt mer skade her enn i for eksempel en limtrebjelke. Her var eiken underlegen de lange, rette furutrærne fra California. Områder med ulike typer virkesfeil måtte fjernes og trestykkene settes sammen igjen med fingerskjøter.

I analysen av gitterskallet ble det lagt til grunn at man kunne bruke trevirke i styrkeklasse D30 (Synbolet D står for løvtrær – *Deciduous* – i motsetning til bartrærnes C (*Conifer*)– som vi er mer vant til i Norge). Feilfrie stykker av eik klarte enkelt dette kravet, men på grunn av virkesfeil måtte lamellene kuttes ned til kortere stykker med en gjennomsnittlig lengde på 0,6 meter og skjøtes sammen igjen til lengder på 6 meter som ble fraktet til byggeplassen. I alt 10 000 fingerskjøter måtte dermed til for å produsere de 6 000 løpemetere med eik som gitterskallet krevde. Dette arbeidet kan synes overveldende, men med tilgjengelig spesialverktøy lot dette seg gjøre med automatiserte prosesser og resulterte i en billig og betydelig kvalitetsforbedring av trevirket og en langt mer effektiv materialutnyttelse. Også limingen i fingerskjøtene bød på ekstra utfordringer. Eik er et treslag med lav pH-verdi og byr på problemer for vanlig lim beregnet på konstruksjonstre men også her er det tilgjengelige limprodukter som gir et tilfredsstillende resultat. For å sikre at kvaliteten på lamellene ville bli tilfredsstillende ble det satt 4 krav til materialet:

- Den maksimale fiberhelningen kunne ikke overstige forholdet 1:10
- Ingen kvister
- Ingen sprekkdannelse eller splinter i trevirket.
- Ingen yteved (kjerneved har en høyere bestandighet og større motstandsdyktighet mot soppangrep).

Ved hjelp av spesialverktøy (optisk sag og fingerskjøtingsmaskin) kunne disse kravene innfris med de fleste typer eik. Velger man en eikesort med lavere kvalitet

vil det resultere i en lav enhetspris ved innkjøp men mye svinn. En slik økonomisk betraktning gjorde til slutt at eik fra Normandie i Frankrike ble foretrukket fremfor den lokale eikesorten (Normandie er forøvrig ikke mer enn 250 km unna Downland så den er fremdeles relativt kortreist.). I Normandie var det rikelig med tilgang på eiketrær som også utmerket seg med ekstra gode bruddseighetsegenskaper. De feilfrie emnene på 6 meter ble fraktet til byggeplassen der de ble satt sammen til kontinuerlige gitterbjelker med tverrsnittdimensjon på 50 x 35 mm og med lengder på opptil 37 meter. På byggeplassen ble det istedenfor fingerskjøting brukt gjæring som er en tradisjonell skjøteteknikk. Med en helning på 1:7 får skjøten omtrent den samme limoverflaten som en vanlig fingerskjøt.



(a) fingerskjøting



(b) Gjæring på byggeplassen

Figur 5.20: Skjøteteknikker (Foto:Buro Happold/Mandy Reynolds)

Konstruksjonsdetaljer

Den kanskje største nyvinningen sammenlignet med Mannheim er utformingen av forbindelsene. Det ble oppdaget et godt stykke ut i prosjekteringsprosessen at to lag var nødvendig i Mannheim, og det avlange hullet i den ytre laget var en konsekvens av denne reviderte utformingen. Museet i Downland var imidlertid prosjektert med dobbelt gitter fra første stund, og forbindelsesteknikken fra Mannheim ble ikke sett på som optimal da hullene svekket de allerede tynne lamellene på et svært ugunstig sted. Forbindelsene utgjør knutepunktene i det deformerbare gitteret. De må kunne tillate rotasjon ut av planet og også en viss glidning mellom indre og ytre gitterlag når det todimensjonale gitteret skal formes til den forespeilte formen. Men bjelkelengden mellom knutepunktene må holdes konstant. I den anledning ble en ny forbindelsesteknikk utviklet (og patentert) av entreprenør og prosjektør.

Forbindelsen unngår gjennom boring av lamellene. I stedet blir det brukt et system med tre skiver som holdes på plass av fire bolter som vist på figur ???. Korrekt stramming måtte beregnes for å tillate nødvendig rotasjon og glidning under oppføringsfasen. Skiven i midten har bulldogtenner som gjør at den danner knutepunktets sentrum og slik at lamellene innenfor og utenfor justeres relativt



Figur 5.21: Spesialutformede forbindelsesmidler (Foto: Wealddown.co.uk)

til denne skiven. I opplagringen ble det også benyttet en annen variant enn de vi finner i Mannheim. Lamellenes endepunkter holdes her på plass ved å plassere dem mellom to lag med kontinuerlige bånd av kryssfiner som deretter boltes sammen til en sandwichkonstruksjon.

Fremgangsmåten baserer seg på at gulvet og gulvbjelkene gis sin endelige form før oppføringen av selve gitteret. Det ene båndet festes til gulvbjelkene ved hjelp av vinkelbeslag. Etter oppføringen av gitteret festes det ytre båndet til lamellene og vinkelbeslaget på innsiden for å skape en fast innspent konstruksjon. Ved innspenningen ble også hulrommet mellom de to gitterlagene fylt ut slik at man får et massivt tverrsnitt ved innspenningen.

Oppføringsfasen

Mye arbeid ble viet til forberedelser av oppføringsfasen da det var denne det knyttet seg størst usikkerhet til. Som en generalprøve på gitterskallets gjenfødelse ble det bygget en prøvemodell på 5 x 2,5 meter på byggeplassen. Formålet var ytterligere testing av hvordan en slik konstruksjon ville oppføre seg i deformasjonsfasen. Hvert trinn i oppføringsfasen ble først simulert ved hjelp av den fysiske modellen for å avdekke eventuelle som kunne oppstå. Selve fremgangsmåten skiller seg fra Mannheim på et viktig punkt. I stedet for å legge gitteret på bakken ble hele gitteret heist opp til konstruksjonens maskimalhøyde på en plattform holdt oppe av et system av jekker. Dermed kunne de spille på lag med tyngdekraften etterhvert som sidekantene ble senket ned til bakkenivå. Med kunnskapen fra Mannheimprosjektet sammen med et knippe innovative løsninger gikk oppføringsfasen langt enklere for seg enn for pionerne i Mannheim. Antall brudd i oppføringsfasen ble redusert til 145, for det meste brudd i fingerskjøtene.



(a) lamellene festet til indre bånd



(b) ytre bånd påført



(c) innfesting uten synlige forbindelsesmidler

Figur 5.22: Innfestningsteknikk på langsiden (Foto: Wealddown.co.uk)

Evaluering

En av grunnene til at gitterskallet velges bort til fordel for andre konstruksjonstyper er nok at den fremstår som kompleks både i formgivnings- og utførelsesfasen. Interessant i denne sammenheng er det derfor å se på byggekostnadene til dette prosjektet. Ifølge tall fra Buro Happold[24], tilsvarte kostnadene for prosjektet en kvadratmeterpris på 1 097 £ per kvadratmeter (Pris gjelder hele bygningen - ikke bare taket). Sammenlignet med andre prosjekter av lignende format som det samme ingeniørfirmaet hadde vært involvert i plasserte denne bygningen seg midt på treet prismessig. Prisleiet for denne type bygninger hadde variert fra 780 til 1 520 £ per kvadratmeter. Ved å velge idéen til arkitekten Edward Cullinan fikk museet i Downland en spesiell bygning med spesielle kvaliteter til en vanlig pris.

5.4.5 The Lothian Gridshell - et gitterskall på dugnad

Bakgrunn

Gitterskallene vi har sett på hittil har alle et preg av kompleks formgivning og ustrakt bruk av tung ekspertise. Konstruksjonene er mer eller mindre spektakulære signalbygg som higer etter plass i toneangivende arkitekturmagasiner og “extreme



(a) flatt rutenett heises opp



(b) rutenettet senkes gradvis ned



(c) tyngdekraften former rutenettet

Figur 5.23: Etapper i oppføringsprosessen (Foto: Wealddown.co.uk)

engineering”-reportasjer. Omtrent samtidig med Downland museum ser imidlertid et annet gitterskallprosjekt av en ganske annen karakter dagens lys. I Pishwanton i Skottland ble det oppført et langt mer beskjedent gitterskall som for oss er interessant nettopp i kraft av sin enkelhet – for en av forestillingene denne oppgaven er ute etter å utfordre er gitterskallets iboende og kostnadsdrivende kompleksitet. Prosjektet har sitt opphav i antroposofibevegelsens ønske om et senter hvor de kunne dyrke sin Goethe-inspirerte holistiske lære [32].

Arkitekt og antroposof Richard Day ble engasjert for å “lytte til landskapet” – “listen to the land” - og utarbeide et forslag til et nytt senter etter arbeidsmetoder som for uinnvidde nok kan fremstå som esoteriske. Det opprinnelige prosjektet hadde en sofistikert men nokså fordyrende fagverkkonstruksjon som støtte for den ønskede takformen. Kompleksiteten førte til at prosjektet strandet inntil en ny ingeniør – antroposofen David Tasker - ble hentet inn for å trå til med en hjelpende hånd. Tasker hadde i studietiden blitt kjent med den tyske ingeniøren Florian Beigel som hadde jobbet som prosjektleder for Frei Ottos *Multihalle* i Mannheim. Tasker studerte prosjektet og den kompliserte takkonstruksjonen og kom – i god Steiner-ånd – frem til at “dette taket ønsker å være et gitterskall”.

Konstruksjonen

Taket er et gitterskall med to lag lameller som hviler som en sopphatt på en likesidet sekskantet bygning med en diameter på 9 meter. Gitterskallet består av lameller av lerk med et tversnitt på 35 x 25 mm som i udeformerbar tilstand danner kvadrater med et areal på 600 cm hver.



(a) gitterskall som takkonstruksjon

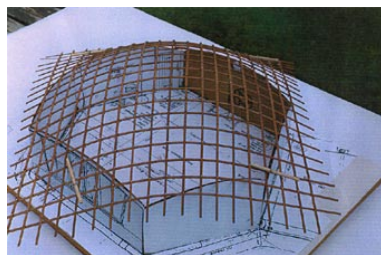


(b) flatt rutenett

Figur 5.24: Gitterskall på Steinerskole i Skotland (Foto: David Tasker)

Modellering

I klar kontrast til våre andre eksempelbygninger gjør ikke Day og Tasker seg avhengige av kompliserte modelleringsteknikker og enda mindre av egenutviklede analyseprogrammer. Prosjektet preges av fysisk modellering og av “backyard engineering” - og en god dose dugnadsånd fra ufaglærte men velvillige hjelpere.



Figur 5.25: Fysisk modellering (Foto: David Tasker)

Materialer

I tråd med antroposofiens økologiske fundament ble lerk fra de lokale skogene benyttet. Trær med gode bruddseighetsegenskaper ble håndplukket av et trenet øye og feilfrie emner ble skjøtet sammen til lameller ved hjelp av gjæringer.

Konstruksjonsdetaljer

Med kun to lag lameller i gitterskallet blir utformingen av knutepunktene langt mer håndterlig. Lamellene ble festet til hverandre med helt vanlige bolter til en samlet innkjøpspris på overkommelige 350 GBP.



(a) gitteret løftes på plass



(b) forming ved hjelp av støttepunkter

Figur 5.26: Oppføringsfasen (Foto: David Tasker)

Oppføringen

Med mye frivillig arbeidskraft tilgjengelig ble gitteret satt sammen og heist opp på plass i løpet av en dag. Gitteret ble formet rundt midlertidige støttebuer som holdt taket på plass i oppføringsfasen og barduner i endekantene sørget for å bøye taket nedover i sidekantene. Etter at taket var hevet på plass ble kledningen, som også sørget for avstivning festet til gitteret med skruer.

Evaluering

Taket ble testet i for maksimal last i bruddgrensetilstanden i den samme “low tech”- ånden som gjennomsyret prosjektet. Ved hjelp av 700 sandsekker på til sammen 13.4 tonn ble maksimal snølast simulert. En deformasjon på 25 mm ble registrert, noe som var innenfor det akseptable. Gitterskallet i Lothian har først og fremst vist at det er fullt mulig å oppføre en gitterskallkonstruksjon med svært enkle midler. Takkonstruksjonen kostet totalt ca. £ 2 500 , noe som også i 2002 var helt marginalt sammenlignet med de andre byggeprosjektene som denne oppgaven studerer. Prisen inkluderer imidlertid ikke alle de gratis arbeidstimene fra de frivillige hjelperne. Og her ligger kanskje mye av forklaringen til denne konstruksjonstypens begrensede utbredelse. I en artikkel om dette prosjektet magasinet *Building for a Future* hevder Oliver Lowenstein at hvis profesjonelle aktører skulle ha gjennomført dette prosjektet til gjeldende betingelser, ville de ha priset inn en risiko for at noe skulle gå galt som ville sende budsjettet fra den billige enden av skalaen og opp til et sted hvor prosjektet ville måtte skrinlegges (Lowenstein). Det

var en og annen som holdt pusten i de kritiske delene av oppføringsfasen, men det var først og fremst ildsjeler som var spente på resultatet, ikke prosjektledere som var engstelige for budsjettoverskridelser. Det hele forløp uten større uhell. Kun to knutepunkter ga etter ved oppføringen og de lot seg reparere.

5.4.6 The Savill Garden Gridshell - gitterskallet som takkonstruksjon

Bakgrunn

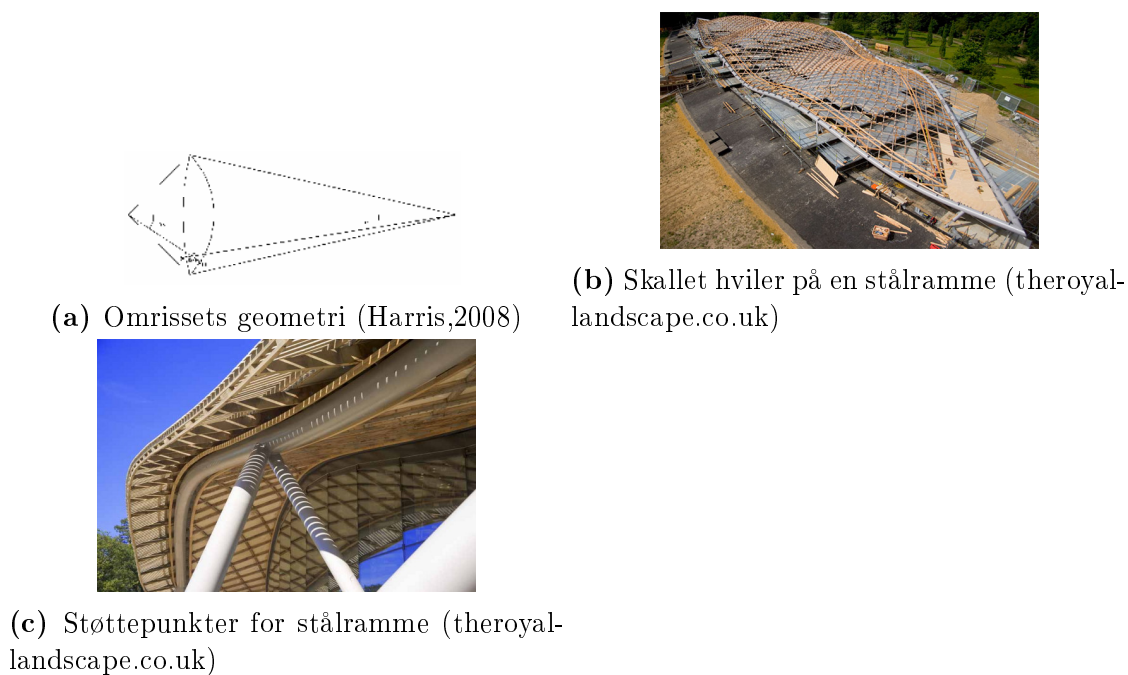
I Berkshire i England finner vi Savill Garden, et parkanlegg som er en del av Windsor Park. Etter mange års tjeneste, trengte besøkssenteret i parkanlegget en ny avløser som skulle romme blant annet informasjonssenter, butikker, bar og restaurant – med andre ord et nokså omfattende prosjekt. Valget falt på arkitekten Glenn Howells forslag, et gitterskall som ikke bare skulle bli Englands største, men som også utmerket seg med nye former og konstruksjonstekniske løsninger[25]. Mannskapet fra Downland-museet ble hentet inn. Buro Happold sto for dimensjoneringen av taket og The Green Oak Carpentry tok for seg tømrerarbeidet. Den mest iøynefallende forskjellen fra tidligere, større prosjekter er dets funksjon. Gitterskallet er her en takkonstruksjon uten direkte forankring til bakken. Bobleformen fra de andre prosjektene er mindre fremtredende til fordel for et buktende tak som føyer seg inn i landskapet nærmest som et gigantisk løvblad.



Figur 5.27: Langt og smalt. Savill Garden Gridshell i landskapet (Wikimedia Commons)

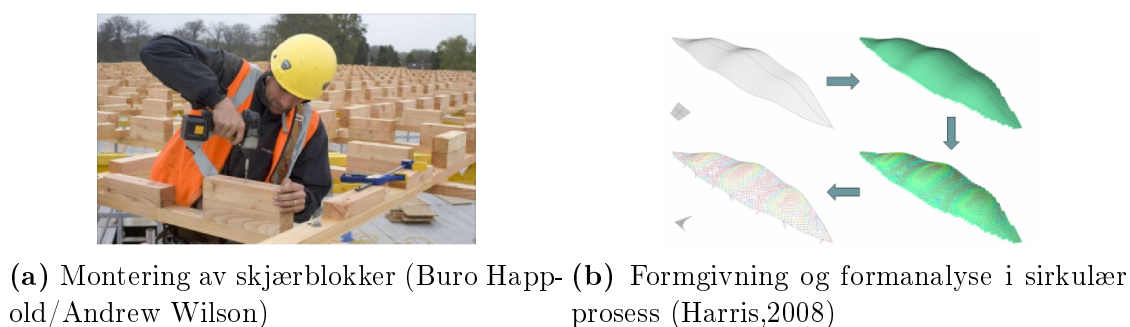
Konstruksjonen

Takkonstruksjonen er 90 meter lang og har en maksimal bredde på 25 meter. Høyden varierer fra 4,5 til 8,5 meter. Fra mange vinkler kan formen synes amorf og organisk, men den følger i virkeligheten et ganske enkelt oppriss. Takets omriss defineres av overlappingen mellom to buer med ulik radius som skjærer inn i hverandre. I et langsgående snitt danner takets senterlinje en sinuskurve med varierende amplitude. Takets snitt består av parabler med varierende form som binder endekantene sammen med senterlinjen. Taket hviler så på en stålkonstruksjon. Stålrør følger takets omriss og holdes oppe av fribente støttepunkter.



Figur 5.28: Grunnform og opplagring

Som for Mannheim og Downland, består også her gitteret av to lag kryssende lameller. Høyden er fremdeles 50 mm mens bredden er øket til 80 mm. De to lagene med lameller er koblet sammen med “steg”-elementer som måler 80x120x300 mm. Disse blokkene er tilstrekkelig korte for at ønsket kurvatur ikke hindres. Samtidig tar de opp horisontale skjærkrefter. Sammen med de kontinuerlige bjelkene danner de et tverrsnitt med en høyde på 190 mm. Avstivningen for skjærdeformasjon tas hånd om av skiver av kryssfiner. Triangulering med stålkabler kunne dermed unngås, noe som utgjorde både en økonomisk og en estetisk gevinst.



Figur 5.29: Prosjektering og oppføring

Modellering

Av de riktig store gitterskallene er Savill Garden det første som har støttet seg fullt og helt til de digitale formgivningsverktøyene. Med suksessen og erfaringene fra Downland i bagasjen og forbedret analyseverktøy tilgjengelig følte Buro Happold-teamet at fysisk modellering ikke lenger var nødvendig. Kun skisseaktige trådmodeller ble laget som et ledd i en idemyldringsfase.

Byggematerialer

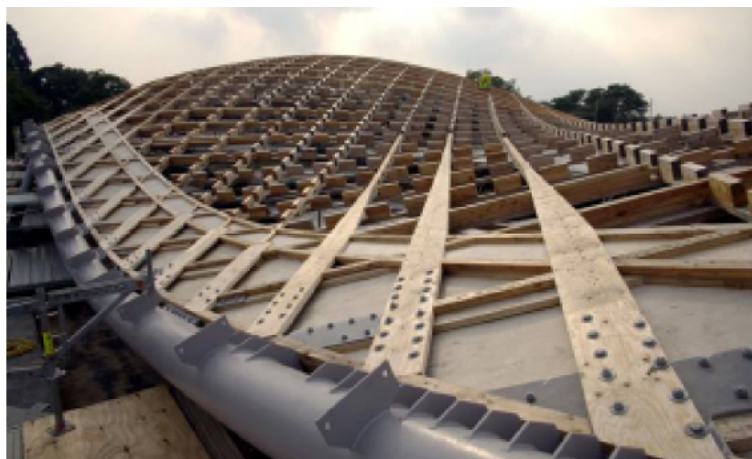
Mye av den samme møysomheten som preget materialutvelgelsen i Downland ble videreført i Savill-prosjektet, men Savill-garden-prosjektet ble imidlertid lerk fra den lokale Windsor Great Park benyttet. De samme aktørene var involvert her som i Downland-prosjektet og de samme arbeidsmetodene ble valgt så denne prosessen behandles ikke så inngående her. Den samme fremgangsmåten med optisk sag som fjernet virkesfeil ble benyttet. Også med lerk som byggemateriale endte man opp med segmenter av høykvalitetstre på 0,6 meter i gjennomsnitt. Disse ble skjøtet sammen til lameller ved hjelp av fingerskjøter. Utvelgelsen av byggematerialer var en tidkrevende prosess og prosjekteringen og dimensjoneringen måtte foregå parallelt med testresultatene fra prøvestykkene. De klarte til slutt å skaffe til veie tilstrekkelig mengder trevirke med høy kvalitet og dimensjoneringen kunne basere seg på trevirke i styrkeklasse D30 også her.

Konstruksjonsdetaljer og oppføring

Savill-prosjektet er nyskapende hva gjelder knutepunktene. Utformingen av knutepunktene er nært knyttet til en interessant variant hva angår oppføringsteknikken og disse aspektene behandles her samlet. Både Mannheim og Downland-gitteret ble begge gitterlagene bøyet på plass i samme operasjon. Denne operasjonen er en kritisk fase og resulterte i mange lamellbrudd for begge prosjektene og en knutepunktutforming i Mannheim som svekket lamellstyrken på en uheldig måte. I Savill-prosjektet valgte de derfor en alternativ fremgangsmåte. Først ble det nederste gitterlaget bøyet på plass. Deretter ble skjærblokkene skrudd fast til det nederste laget og til slutt ble det øverste laget skrudd fast til skjærblokkene og boltet sammen i knutepunktene. Denne teknikken tillot en større avstand mellom lagene, noe som bidrar til en høyere ut-av-planet stivhet.

Evaluerings

Etter to eksempler på gitterskall som har vært med på å drive denne konstruksjonstypen mot det gjennomførbare og økonomiske trekker Savill Garden-prosjektet gitterskallet tilbake til den øvre enden av prisskalaen. Prosjektet hadde en kostnads-



Figur 5.30: Nedre lag og skjærblokker venter på øvre lag (Harris, 2008)

ramme på £5,3 millioner, som gir en kvadratmeterpris på rett over £2 000, nesten det dobbelte av Downland Museum. På den annen side har Savill Garden utvidet formspråket til gitterskallet og vist vei for dagens forhåndskrummede gitterskall av tre. Videre skyldes ikke kostnadene bare den avanserte takkonstruksjonen. For eksempel er 8 meter høye vindusfasader og den krummede stålrammen med på å drive prisen oppover. Når det gjelder selve gitterskallutformingen var Savill Garden med på å redusere antall brudd i oppføringsfasen og gjøre konstruksjonen enda sterkere takket være sammenføyningsteknikken mellom de to gitterlagene.

5.5 Dagens tilstand - mot det enkle og det intrikate

Til slutt tar vi med noen helt moderne eksempler som gir oss en pekepinn på i hvilken retning gitterskallene utvikler seg. Utviklingen kan sammenfattes i to hovedretninger, den ene bringer gitterskallet for alvor inn i fri-form-arkitekturens verden av former med kompleks geometri. Den andre hovedretningen bringer det kinematiske gitterskallet mot det gjennomførbare og funksjonelle.

5.5.1 Mot det komplekse og sofistikerte

Shigeru Ban, arkitekten bak Den japanske paviljongen ved EXPO 2000-utstillingen (se figur 5.17c), har ført gitterskallet av tre i en retning som går mot det komplekse og sofistikerte. Disse gitterskallene bryter med noen av prinsippene for Frei Ottos gitterskall som også legges til grunn som en forutsetning i denne oppgaven. De får likevel en rask presentasjon her som en antydning om mulige retninger utviklingen som gitterskallteknikken kan ta i fremtiden. Prosjektene er gitterskall i den for-

stand at de består av et rutenett av elastiske lameller, men de er ikke utbrettbare til et todimensjonalt nett og krever derfor en annen oppføringsteknikk. Moderne CNC-teknikker og analyseredskaper gir oss muligheten til å skape stadig mer komplekse former ved hjelp av gitterskallteknikken. I dagens teknologiske verden kan vi se konturene av en ny type masseproduksjon der det ikke er nevneverdig dyrere å produsere 1 000 ulike komponenter enn 1 000 like komponenter. Denne trenden bryter med byggeindustriens utvikling mot standardisering av byggekomponenter og tilhørende modultenkning i prosjekteringen. CNC- maskinene gjør fordelen av standardiserte byggekomponenter mindre enn før og mens gitterskallene vi har studert hittil baserer seg på et kvadratisk rutenett med enkle, rette lameller baserer disse prosjektene seg på store mengder spesialformede og forhåndsbøyde byggekomponenter laget av moderne digitalt styrte maskiner. I Metz i Frankrike har Shigeru Ban tegnet et nytt Pompidou-senter i samarbeid med blant annet trespesialistene Création Holz og Bluhmer-Lehmann AG i Sveits [38]. Taket består av et treakset rutenett med en geometri som hittil er blitt forbeholdt stålkonstruksjoner. Særlig overgangen mellom søyler og takflater har en kompleks utforming. Til forskjell fra for eksempel Fuksas La feria (se 5.1a) er gitteret sammensatt av kontinuerlige, krummede lameller – ikke sammensveisede rette stavelementer. En lignende konstruksjon finner vi i et annet av Bans prosjekter – Yeosu Golfclub i Sør-Korea, også dette et signalbygg som setter nye standarder for hva som kan bygges med gitterskallteknikken bare man har tilgang på tilstrekkelig kompetanse og økonomiske midler. Slike bygninger kan være et trekkplaster for de arkitekturinteresserte, men kan også virke intimiderende for de arkitekturutøvende. Bygningene oser av dyr og vanskelig tilgjengelig ekspertise.

5.5.2 Mot det enkle og gjennomførbare

Frei Otto, det moderne gitterskallets far, var ikke bare opphavsmann til spektakulære konstruksjoner. Han var også levende opptatt av teltet, dets form og dets rolle i tidlige sivilisasjoner og for nomadestammer[20]. Interessant er det derfor å notere seg at gitterskallkonstruksjonene ikke bare utvikler seg mot det intrikate og det spektakulære, men også mot det enkle og funksjonelle. Gitterskallteknikken har også satt sitt preg på den moderne teltverdenen. Et telt bør være lett, søylefritt og enkelt å sette opp og ta ned. Kuppelteltene har vist seg som et attraktivt alternativ for turgåere som setter like stor pris på funksjonalitet som spektakulær, menneskeskapt arkitektur.

Ved ENPC i Paris har gitterskallet funnet veien til et forskningsprosjekt for midlertidige konstruksjoner som skal være lette å føre opp og demontere, som for eksempel et feltsykehus eller en flyktningeleir[16].

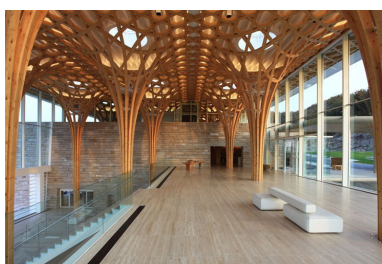
Et annet miljø som har eksperimentert med det kinematiske gitterskallet med det formål å gjøre denne konstruksjonsteknikken enklere og mer attraktiv å oppføre



(a) Centre Pompidou Metz (Wikimedia Commons)



(b) Kompleks geometri (Wikimedia Commons)



(c) Yeju Golfclub (solidform.uk.co)



(d) Forhåndskrummede bjelker (blumer-lehmann.ch)

Figur 5.31: Gitterskall av Shigeru Ban, Cr

finner vi ved Frederico II-universitetet i Napoli i Italia. Prosjektene er samlet på en nettside³ og de fleste prosjektene søker seg mot det enkle og gjennomførbare. Høsten 2012 ble det oppført et gitterskall på Sicilia som kanskje ikke utmerker seg så mye i formen som i materialvalget. Mens gitterskallene i kapittel 5.4 alle krevde en nøye sorterings- og foredlingsprosess av byggematerialene ble denne skallkonstruksjonen dimensjonert som en fullverdig bærekonstruksjon med helt vanlig konstruksjonstre skjøtet sammen til lameller ved hjelp av mekaniske forbindelser. Det er altså ingen fingerskjøter eller annen bruk av lim i konstruksjonen. Avstivningen i disse gitrene er en triangularisering som også er basert på ordinært konstruksjonstre og mekaniske forbindelser.

5.6 Analysemetoder

5.6.1 På sporet av den optimale formen

Prosjekteringen av et gitterskall utfordrer samspillet mellom arkitektur og byggeteknikk. Når konstruksjonen henter sin styrke ved å la seg deformere til en bestemt

³gridshell.it



(a) Kuppeltelt (hilleberg.com)



(b) Gitterskall i komposittmateriale (navier.enpc.fr)



(c) Selinunte, Sicilia (Foto: Francesca Gatello)



(d) Vanlig konstruksjonstre og ingen liming (Foto: Alessadro Cirillo)

Figur 5.32: Enkle gitterskallkonstruksjoner

form med bestemte konstruktive egenskaper, blir det en oppgave i en tidlig fase av prosjektet å finne en form som gir de etterspurte styrkeegenskapene og dermed også slankheten og spennene som er mye av motivasjonen for å velge en slik konstruksjon.

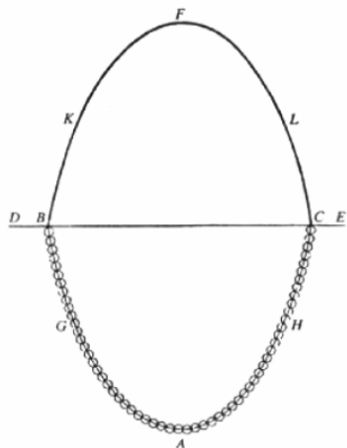
For å finne en statisk ideell form er det ulike måter å optimalisere konstruksjonen på. Man kan eksperimentere seg frem til en sterk form eller man kan stegvis nærme seg den ved hjelp av numeriske beregningsmetoder. De store deformasjonene som opptrer i denne prosessen gjør at det ikke er et lineært 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 de vanlige analysemetodene fra konstruksjonslæren. 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 bøyemoment. I en tredimensjonal konfigurasjon omtales denne egenskapen som membraneffekt.

Et viktig ledd i undersøkelsen av prosjekteringsteknikker for gitterskallet blir derfor å studere hvilke metoder de prosjekterende har til rådighet for å jobbe seg frem til et slikt skall som er formsterkt på grunn av sin membraneffekt. Er den en spesiell metode som peker seg ut som den beste? Er utviklingen mot nye analysemetoder en konsekvens av historiske fremskritt slik at de første metodene i dag er utdaterte? Eller oppstår de for eksempel som en konsekvens av nye arbeidsprosesser som krever nye angrepvinkler til de samme problemene? Utforskningen av ulike membranstrukturer har uansett ledet til analysemetoder som ikke er standard lærebokstoff i konstruksjonslæren. I tillegg til evaluering og bestemmelse av analysemetode hører derfor også en kort presentasjon av analysemetodene med i denne undersøkelsen.

5.6.2 Fysisk modellering

I gitterskallenes barndom var (kanskje ikke tilfeldig) også datamaskinene i sin barndom og man brukte fysiske modeller for å komme frem til en optimalisert form. Fysisk modellering var en helt grunnleggende del av prosjekteringsprosessen i Mannheim-prosjektet. Uten en fysisk modell, intet utgangspunkt for numeriske beregninger av geometri og spenninger. For å oppnå en slank konstruksjon, måtte momentpåkjenningen minimeres, og for å oppnå dette i en konstruksjon med kompleks geometri og dobbelkrummede flater måtte bygningens kraftoverføringer simuleres ved hjelp av en hengende strekkonstruksjon. Slike konstruksjoner hadde Otto allerede eksperimentert med i forbindelse med bl.a. olympiastadion i München. Selv om datamaskinene har overtatt mye av simuleringsarbeidet skal ikke metoden til Otto avfeies som en historisk digresjon. Som vi skal se, er det nettopp denne metoden som prosessmessig ligger den parametriske modellen nærmest. Både for olympiastadion og gitterskallet i Mannheim ligger konstruksjonsteknikkens prinsipper til grunn for den arkitektoniske utformingen av bygningen. Modellen med det hengende kabelnettet fremstår som en analog veiviser for dagens eksperimentering med den parametriske modellen. En fellesnevner for flere av ingeniørene som var spesielt opptatt av fysisk modellering, er fascinasjonen for det hengende kjedets form og egenskaper. Den samme fascinasjonen kan vi også spore hos flere arkitekter med spesiell interesse for konstruksjonsteknikk. Videre har den også vært en viktig inspirator for matematiske oppdagelser. Det kommer derfor ikke som en overraskelse at trykkbuens hemmelighet ble først formulert av en matematiker som også virket som arkitekt, og som har fasthetslærens grunnleggende lov oppkalt etter seg. I 1670 reiste han spørsmålet «hva er den ideelle form for en bue og hvor stor blir belastningen på opplagrene». Som svar på sin egen utfordring formulerte han i et anagram som senere ble desifrert til et velkjent engelsk sitat som lyder “As hangs the flexible line, so but inverted will stand the rigid arch”[26]. Uten å kunne forklare denne formen matematisk, hadde han en forståelse av den

fysiske formen som gjorde at han kunne instruere sin venn Sir Christopher Wren ved utformingen av St. Pauls Cathedral i London.

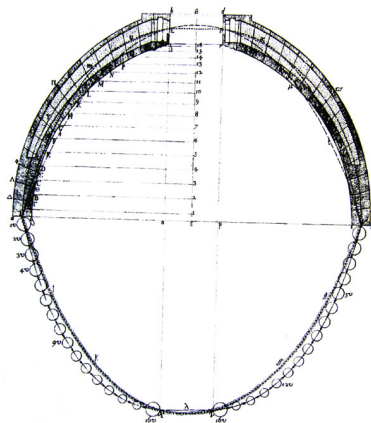


(a) Hookes kjedelinje, tegning av Poleni (b) The Gateway Arch, Eero Saarinen (Huerta) (Wikimedia Commons)

Figur 5.33: Hookes læresetning i teori og praksis

Bernoulli formulerte senere det samme prinsippet som et matematisk uttrykk. Det hengende kjede har en form som nå også kan uttrykkes analytisk som en hyperbolsk cosinusfunksjon. $Y(t) = a \cosh(t/a)$ Her uttrykker y den vertikale avstanden mellom punktet t og høydenivået som innfestningene befinner seg på. Snur vi denne formen på hodet får vi altså en trykkbue. Men uten å kjenne det matematiske grunnlaget kunne datidens vitenskapsmenn finne en ideell bueform ved hjelp av fysisk modellering. En trykkbue behøvde ikke være optimalt utformet, tilføyde Gregory, en kollega av Hooke, så lenge buen var tykk nok til å romme kjedelinjen. Basert på denne innsikten kunne man utføre stabilitetskontroller av f.eks. kupler. Denne innsikten gjorde Poleni i stand til å undersøke sikkerheten for kuppelen til Peterskirken ved hjelp av fysisk modellering – uten å kjenne til hverken Bernoullis oppdagelser eller begrepet bøyemoment. Han betraktet kuppelen som sammensatt av mange små segmenter. Vekten av hvert segment ble regnet ut og så festet han tilsvarende vekter på en snor med samme lengde som kuppelens tverrsnittssirkel. Snoren dannet en bue som når han speilvendte den befant seg innenfor kuppelens tverrsnitt. Dermed kunne han berolige kirkegjengerne med at kuppelen var sikker.

I Paris gjorde Soufflot den samme øvelsen ved prosjekteringen av Panthéon. Trykklinjen følger formen på konstruksjonen og bøyemoment unngås så lenge konstruksjonen påvirker av egenlast alene. I løpet av 1800-tallet når interessen for bruken av grafisk analyse nye høyder og når et høydepunkt med utgivelsen av



(a) Polenis analyse av Peterskirken [1748] (b) Panthéon, Paris av Soufflot, tegning av Huerta) Villeret (Wikimedia Commons)

Figur 5.34: Analyse og utforming av kupler ved fysisk modellering

Culmanns *Graphische Statik* i 1867.

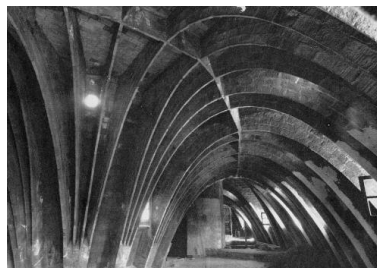
Antoni Gaudì

Arkitekten som for alvor trekker oss inn i den tredimensjonale modelleringsverdenen er den katalanske multikunstneren Antoni Gaudì. A. Gaudìs arbeider er interessante fra et vell av synsvinkler og hans innsikt i fysisk modellering er i seg selv omfattende nok til å fylle en doktorgrad. På det tidligere omtalte IL i Stuttgart viet Tomolov sitt doktorgradsarbeid til å rekonstruere den kanskje mest berømte modellen Gaudì lagde, den hengende modellen av Colonia Güell-kirken[43]. Relevant i denne sammenheng er undersøkelsen av det som forfatteren George R. Collins har kalt for Gaudìs "modellmaskin"[14]. Gaudì oppdaget ingen nye naturlover, men han oppdaget nye måter å bruke dem på. Gaudì var en pioner i måten han brukte fysisk modellering til å finne en form. For Gaudì var statikken og mekanikken styrende prinsipper for utformingen av byggverkene. Og for å la statikken og mekanikken komme til orde i utformingsfasen var han avhengig av fysisk modellering. Det matematiske fundamentet for arbeidene var velkjent. Et av Gaudìs mest berømte sitater er "den rette linje tilhører mennesket, buen tilhører Gud" og en grunnpilar i Gaudìs arkitektur er Hookes bue. Arbeidstegningene han etterlot seg vitner om inngående kunnskap om Cullman og den grafiske metoden i statikken, og allerede i hans tidligste arbeider finner vi igjen statisk optimaliserte bueformer som var med på å gi Gaudìs arkitektur et særpreg fra første stund.

Gaudì gikk nye veier da han brakte denne innsikten inn i selve formgivningsfasen. Han utforsket blant annet buer som skulle ta opp asymmetrisk last (se figur



(a) Inngangpartiet til Palacio Güell (Collins)

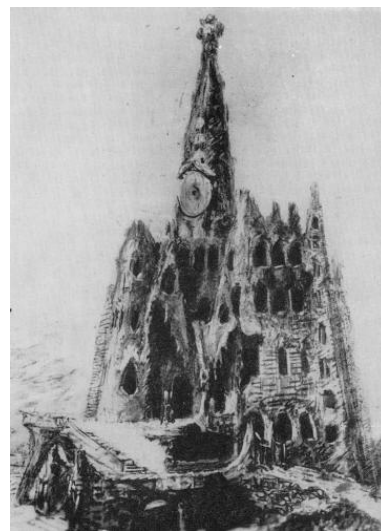


(b) Buer for asymmetrisk last, Casa Milà (Collins)

Figur 5.35: Optimaliserte buer ved hjelp av grafisk metode

5.35b), og buer med ulik høyde på innfestningene ved å lage fysiske modeller av lastsituasjonene. Disse buene lot seg representere i et todimensjonalt plan. Men han ønsket også å bringe Hookes prinsipp inn i arkitekturens romlige verden. Og for statisk ubestemte og tredimensjonale konstruksjoner kan vi ikke lenger støtte oss til en analytisk løsning for å bestemme formen. Før Gaudì var hvelvene i de gotiske katedralene allerede analysert ved hjelp av grafisk analyse. Teknikken var å dele hvelvene inn i mange buer som hver for seg ble gjenstand for en likevektbetraktning. Gaudì ville skape rom og hele bygninger basert på trykkreftenes vandringsmønster. Da han skulle utforme Colònia Güell-kirken, bygget han derfor en trådmodell som skulle illustrere den romlige bærekonstruksjonens virkemåte. Modellen ble påført laster trinn for trinn. Når en ny last ble påført fikk de tidligere påførte lastene en ny posisjon, så de måtte justeres slik at de fikk tilbake sin opprinnelige posisjon. På denne måten opererte han med en iterativ prosess med det mål for øye å finne en ønsket form som samtidig kunne absorbere de opptredende spenningene. Ved å snu modellen på hodet hadde han en bærekonstruksjon basert på trykkrefter.

Denne arbeidsmetoden har som vi skal se senere en slående parallell med formgivningsprosesser som den parametriske modellen innbyr til. Den altoverskyggende forskjellen er tidsperspektivet. Arbeidsmetoden var svært tidkrevende. Det er snakk om at oppføringen av Colònia Güell tok til sammen 18 år, og at av disse gikk 10 år med til prosjekteringsarbeidet. Endringer i randbetingelser på et sent tidspunkt var også uheldig. De innebar i prinsippet av utformingen måtte starte forfra. Men slike formendringer var likefullt mulige og kunne inngå som en del av eksperimenteringen. Til slutt endte Gaudì opp med et nettverk av laster forbundet med tau i strekk. Laster kunne tilføyes og fjernes, posisjoner kunne justeres og han hadde en “modellmaskin” som kunne generere stadig nye former.



(a) Fotografi av trådmodell snudd opp- (b) Skisse tegnet på fotografi av trådmodell ned (Collins)

Figur 5.36: Formutforskning av Colònia Güell

Heinz Isler

Prinsippet om det hengende kjedet fikk sin fullendte tredimensjonale form med sveitseren Heinz Islers skallkonstruksjoner. Heinz Isler (1926-2009) lagde tynne skallkonstruksjoner av betong som verden ikke har sett maken til. Tidligere i det 20. århundre hadde flere fremtredende ingeniør-arkitekter som f.eks. Nervi og Candella eksperimentert med dobbelkrumme betongkonstruksjoner. Likevel representerte Islers arbeider en ny epoke innen skallkonstruksjoner.



(a) Deitingen [1968]



(b) Wyss hagesenter [1961]

Figur 5.37: Skallkonstruksjoner av Heinz Isler

Man kan dele bæresystemer inn i to hovedkategorier ettersom det er basert på linjelaster eller flatelaster. Søylar og bjelker har det til felles at de overfører krefter fra et punkt til et annet i en linje. For skiver og plater kan spenningsstrømmene

forflytte seg i to dimensjoner. Mens Gaudì benyttet tråder for å finne trykklinjer, var Isler ute etter former som hadde en perfekt form for å ta opp membrankrefter. Han ville studere spenningenes oppførsel når de kunne bevege seg over flater, ikke bare langs linjer. Helt grunnleggende for Isler i denne sammenheng var arbeidene med den fysiske modellen. Det var særlig to metoder han benyttet seg av: En lukket membranform som ble fylt med lufttrykk, og forming ved hjelp av hengende tøystykker. Min metode, sier han, "...er for tredimensjonale problemer det som det hengende kjedet er for todimensjonale buer "[12].



(a) Formeksperimentering

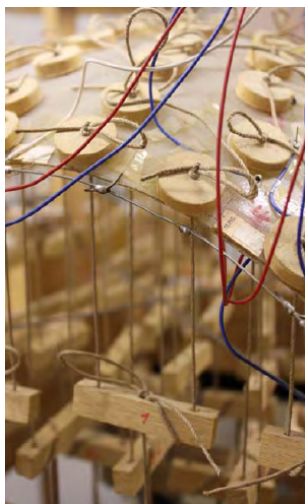


(b) Islers private samling

Figur 5.38: Isler viet sin profesjonelle karriere til utforskning av skallformen(Foto:Kotnik)

For Isler var modellen en søken etter en den optimale formen, snarere enn en forming av rommet, som man kanskje forbinder med arkitektens modelleksperimentering og det styrende prinsippet var membranefekten. For Isler var det en klar sammenheng mellom den statisk optimale og den estetisk vakre formen. Han var inspirert av naturens mange skjellformer. Etter å ha funnet en form å jobbe videre med, lagde han nøyaktige skalamodeller som ble empirisk testet for aktuelle lastkonfigurasjoner. Modellene ble laget i en spesiallaget referanseramme som gjorde at han kunne hente ut nøyaktige koordinater som beskrev formen.

Videre ble modellene blåst opp gjentatte ganger og små unøyaktigheter rettet opp før den virkelige konstruksjonen ble oppført. Det ferdige resultatet viser betongskall med en nesten uvirkelig slankhet. Skallene kunne være bare 10 cm tykke



(a) Modellering med nøyaktige koordinater (Kotnik)



(b) Isler-skall i Rechterswil (Wikimedia Commons)

Figur 5.39: Skallene ble dimensjonert av nøyaktige modeller

for spenn på 50 meter. En fysisk modell har den fordel at ingen virkende naturfenomener forsvinner i modelleringsprosessen, og Isler forteller at han mange ganger ble overasket over modellens oppførsel [28]. Han trodde først oppførselen skyldtes unøyaktigheter i modellen, men det viste seg at modellene hans fanget opp effekter som neppe ville ha blitt inkludert i en analytisk beregning. For eksempel viste det seg at hjørnene i modellen kanaliserte mye større spenningsstrømmer enn det han hadde ventet ut fra en ren membranoppførsel

Modellene til Isler var altså ikke utgangspunkt for numeriske beregninger, de var i seg selv både en formgivnings- og dimensjoneringsprosess. Skallene ble laget uten “inn gripen” fra CAD-verktøy og FEM-beregningsprogrammer. Det var kun én datamaskin på kontoret til Isler og den ble brukt til korrespondanseskriving [30]. Islers fysiske modellering rommer en form for kunnskap og forståelse som lett havner i en utsatt posisjon når forming og dimensjonering baserer seg på data som sendes inn i “sorte bokser” som igjen leverer et ferdig svar. Innsikten som en data-modell gir oss kan også gjøre oss blinde for forutsetninger som den hviler på. Som et eksempel kan forliset av Sleipner A-plattformen nevnes. Konstruksjonen brøt sammen delvis fordi det var blitt gal elementtype i finitt element-modellen [27]. Islers betongskall representerer sannsynligvis det ypperste vi har sett av prosjektering ved hjelp av fysisk modellering. I et foredrag på University of Michigan fremholder Andrew Bogart at Islers konstruksjoner ikke kunne ha vært modellert ved hjelp av moderne digitale verktøy. De har ikke høy nok presisjon til å måle seg med Islers håndlagde modeller. De krever for mange antagelser om kurvenes form

og materialenes oppførsel til at konstruksjonen kan analyseres[6].

Frei Otto

Frei Otto har vi allerede støtt på ved flere anledninger i forbindelse med den historiske gjennomgangen av gitterskallene. Enten han lager strekkonstruksjoner av kabelnett eller skallformede trykkonstruksjoner har jakten på den slanke og formsterke konstruksjonen vært en rød tråd som forener både de teoretiske og de praktiske arbeidene hans. Doktorgraden hans, «Das hängende Dach» - det hengende tak, ble fullført i 1957 og hele sitt profesjonelle yrkesliv har vært dominert av jakten på mer materialøkonomiske alternativer til de rådende konstruksjonsprinsippene – «hvordan oppnå mer med mindre»?[20].



Figur 5.40: Frei Otto (Wikimedia Commons)

Selv om han er utdannet arkitekt går han like gjerne under tittelen ingeniør når han involveres i prosjekter som for eksempel i Mannheim [40]. Hele hans utforskning av formsterke konstruksjonsprinsipper har vært ledsaget av fysisk modellering. Som for Gaudì og Isler har modellen ikke bare vært et arkitektonisk hjelpemiddel for å vurdere ulike formers funksjon ut fra volummessige betraktninger. Ved hjelp av fysisk modellering har han latt prinsippet om den minste potensielle energi være styrende for formingsprosessen. Ved å forandre opplagerbetingelser og opplagerpunkter kan nye former genereres ut fra de samme modellene til man finner en form som tilfredsstillende arkitektoniske kravene som danner rammene for prosjektet. Sentralt for denne arbeidsmetoden, eksemplifisert med tre fremtredende aktører i dette kapitlet, er at man lar modellen finne en form ut fra gitte betingelser som kan justeres parametriske. Denne arbeidsmetoden har ligget til grunn for utformingen av de historiske gitterskallene og danner rammene for en eventuell digital versjon av formingsprosessen.

5.6.3 Kraftdensitetsmetoden

Ved utformingen av de mange 3-dimensjonale strekkonstruksjonene baserte Frei Otto seg i stor grad på en fysisk modellering av hengende kabelnett. Med sin manglende evne til å yte motstand mot skjær- og bøyederformasjon av rutene, faller nettet til ro i en likevektsposisjon kun ved hjelp av strekkrefter. Denne fysiske modelleringen var også uvurderlig for formgivningsprosessen av Mannheims Multihalle. Modellene til Otto hadde imidlertid noen unøyaktigheter som kunne få dramatiske følger hvis man blåste dem opp til fullskala. Det ble bl.a. observert at noen av kablene i nettmodellene ikke var strekkbelastet. Parallelt med den fysiske modelleringen oppsto det dermed et behov for å finjustere knutepunktens posisjon. For å korrigere posisjonen til disse knutepunktene trengte Frei Otto en justeringsmetode som eliminerte de små unøyaktighetene som modellen førte med seg. Ut fra dette behovet utviklet kretsen rundt IL i samarbeid med geodesimiljøet på samme universitet en vektorbasert justeringsmetode som i ble omtalt av J.H. Scheck som kraftdensitetsmetoden⁴, og som det gjøres rede for i IL 13[9]. Denne metoden markerer første skritt over i den digitale verdenen hva gitterskallprosjektering angår. Felles for de påfølgende metodene som er beskrevet her er en numerisk optimaliseringsprosess som leder konstruksjonen over fra et gitt utgangspunkt over til en optimalisert form ved hjelp av iterative beregningssekvenser. Numeriske algoritmer foretar små geometriske justeringer inntil et definert kriterium er innfridd. Denne fremgangsmåten blir bare mer og mer anvendelig etter hvert som datamaskinene jobber raskere og raskere.

Formålet med kraftdensitetsmetoden er å forme et kabelnett i statisk likevekt. Kabelnettet består av staver i knutepunkter som tillater fri rotasjon. Der virker dermed kun krefter på selve knutepunktet og i stavene. Kraftdensitetsmetoden starter med å betrakte likevekten mellom indre og ytre krefter i et valgt knutepunkt i kabelnettet.

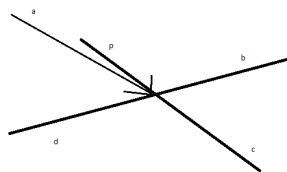
Likevekten betraktes i et romlig koordinatsystem. Den ytre kraften samt stavkreftene dekomponeres i x - y - og z -retning i tre uavhengige likevektsligninger.

$$\begin{aligned} S_a \cos(a, x) + S_b \cos(b, x) + S_c \cos(c, x) + S_d \cos(d, x) &= p_{xi} \\ S_a \cos(a, y) + S_b \cos(b, y) + S_c \cos(c, y) + S_d \cos(d, y) &= p_{yi} \\ S_a \cos(a, z) + S_b \cos(b, z) + S_c \cos(c, z) + S_d \cos(d, z) &= p_{zi} \end{aligned} \quad (5.13)$$

$\cos(a, x)$ kan uttrykkes som lengdeforholdet mellom avstanden $x_m \checkmark x_i$ og lengden til stav a :

$$\cos(a, x) = \frac{x_m - x_i}{a} \quad (5.14)$$

⁴Tysk: Kraftdichtemetode. Engelsk: Force Density Method



Figur 5.41: Likevekt i knutepunkt

Da kan vi skrive (5.13) uttrykt ved hjelp av forholdstall (ligninger for y - og z -retning utelates heretter).

$$S_a \frac{x_m - x_i}{a} + S_b \frac{x_m - x_i}{b} + S_c \frac{x_m - x_i}{c} + S_d \frac{x_m - x_i}{d} = p_{xi} \quad (5.15)$$

i ligningssystemet (5.15) er stavlengdene ikke-lineære funksjoner i koordinat-systemet. Med lineært elastiske tøyninger kan vi uttrykke stavkreftene som en funksjon av lengdeendringene i stavene.

$$S_a = EA \frac{a - a_0}{a_0} \quad (5.16)$$

Det strategiske grepet med denne metoden er å introdusere uttrykket for kraftdensitet i ligningssystemet i (5.15).

$$q_a = \frac{S_a}{a} \quad (5.17)$$

der: q_a = kraftdensitet i stav a .

Ved å introdusere kraftdensiteten som uttrykk for forholdet mellom stavkraft og stavlengde kan systemet i (5.15) omformes til et system av tre ligninger med tre ukjente, koordinatene x_i , y_i og z_i , som er likevektposisjonen til knutepunktet som metoden søker å lokalisere uttrykt i et globalt koordinatsystem. Ligningssettet løses for den posisjonen som gir statisk likevekt. Deretter gjentas operasjonen for et tilstøtende knutepunkt og slik fortsetter det gjennom en iterativ prosess helt til hele formen er blitt justert.

Kraftdensitetsmetoden er et effektivt hjelpemiddel for å utlede formen på et kabelnett når koordinatene til ankerpunktene og krafttettheten er spesifisert. Med

mange staver og knutepunkter blir denne metoden imidlertid raskt veldig omfattende regnemessig.

5.6.4 Dynamisk relaksasjon

Selv om tyngdepunktet for den tidlige eksperimenteringen med gitterskall lå i Tyskland, kom England også raskt på banen. Samtidig som kraftdensitetsmetoden ble utviklet i Tyskland, ble det i England forsket på de samme problemstillingene men fra en noe annerledes tilnæringsmåte. På sekstitallet publiserer de engelske forskerne A. S. Day og J. R. Otter en artikkel hvor de lanserer en analysemetode som døpes *dynamic relaxation*[4]. Mens kraftdensitetsmetoden tar utgangspunkt i en statisk likevektsberegning baserer dynamisk relaksasjon seg på dynamiske likevektsligninger som løses i en eksplisitt, lineær prosess. Likevektstilstanden nås nå som endepunktet for et dynamisk system med en påsatt dempning. Man undersøker i hvilken posisjon et system vil slå seg til ro når man lar systemet svinge fritt. Fra dynamikken har vi at hvis man påfører en bjelke en impuls vil den begynne å svinge helt til materialets dempningsegenskaper stabiliserer bjelken i sin statiske likevektsposisjon. Denne prosessen søker forfatterne av denne metoden å ta med seg inn i analysen av sammensatte systemer med ikke-lineær geometri. Den fysiske svingningen og dempningen erstattes av en fiktiv dynamisk kraft som modelleres slik at strukturens maksimale kinetiske energi identifiseres. Når punktet for den maksimale kinetiske energien er nådd, vet man at også har identifisert minimumspunktet for systemets potensielle energi. Dynamisk relaksasjon fikk for alvor et stort oppsving da det i løpet av få år på slutten av 70-tallet og begynnelsen av 80-tallet ble skrevet fire doktorgrader om emnet på universitetet i City i London. Først ute var Michael Barnes som anvendte metoden på strekkonstruksjoner. Barnes har også skrevet flere toneangivende artikler om emnet som fremstillingen i denne oppgaven henter sine momenter fra [4]. Dynamisk relaksasjon dreier seg altså om en dynamisk analyse som søker å identifisere svingemoder og svingedeforamasjoner i en konstruksjon. Det er en numerisk metode som ved hjelp av prinsippene i en dynamisk analyse søker å finne et mekanisk systems statiske likevektsposisjon. Den dynamiske oppførselen er i denne sammenheng utelukkende et middel for å komme frem til en statisk likevekt. Også her helliger målet middelet. Det er av underordnet betydning at veien frem til målet følger de virkelige svingene (og svingningene) så lenge den fører frem til det riktige endepunktet. Det er tvert i mot en fordel om man kan kutte noen svinger og nå fortrest mulig frem til målet, som er den statiske likevektsposisjonen. Derfor er parameterne som vanligvis er av stor betydning for analyses av en dynamisk respons, såsom treghetsmassen og dempningsegenskapene ikke viktige for å reprodusere virkelige fysiske svingninger. De kan tvert i mot velges slik at svingningene konvergerer fortrest mulig mot likevektsposisjonen. Massens oppgave er å gi hvert knutepunkt en akselerasjon i samme retning som re-

sultantkraften av alle kreftene som virker på et knutepunkt. Dempningsleddet i de dynamiske likevektsligningene har som oppgave å føre systemet over fra dynamisk likevekt til statisk likevekt. Dempningsleddet i den dynamiske analysen kan derfor gis helt spesielle og egenskaper som tjener denne analysens formål. Den viskøse dempningen (som også er en idealisert matematisk tilnærming) i den tradisjonelle dynamiske analysen kan erstattes av en “kinetisk dempning”. Grunnet dette begrepet ligger i vekslingen mellom kinetisk og potensiell energi i et system med frie svingninger. Prinsippet om bevaring av energi i et konservativt system forteller oss at det for hvert minimumspunkt for potensiell energi svarer et maksimumspunkt for den kinetiske energien. Finner vi et maksimumspunkt for den kinetiske energien har vi samtidig funnet et minimumspunkt for den potensielle energien. Istedenfor å søke å finne et statisk likevektspunkt ved hjelp av likevektsbetraktninger foreslo Cundall å lokalisere posisjonene der den kinetiske energien var størst, altså et dynamisk prinsipp. Systemet settes først i frie svingninger ved hjelp av en fiktiv impulslast helt til den kinetiske energien når et maksimumspunkt. Idet dette punktet nås stanses prosedyren. Hastigheten i alle nodene settes lik null. Hvis dette posisjonen er en likevektsposisjon er formålet med metoden nådd og prosedyren avbrytes. Hvis ikke, settes systemet på nytt i en tilstand av frie svingninger helt til et nytt maksimum nås og systemet låses på nytt. Slik fortsettes prosedyren fra node til node helt til energien fra alle svingemodene i systemet er blitt nøytralisert og systemet er i global likevekt. Når fart og akselerasjon introduseres i tillegg til forskyvning er også tidsdimensjonen etablert i analysen. For å kunne kjøre en slik analyse der prosessen stoppes på et foreløpig endepunkt for deretter startes på nytt fra dette nye utgangspunktet må tiden betraktes som en diskretisert tidsserie der man benytter numeriske beregningsteknikker basert på finitt differansemetode. Disse teknikkene dukker opp i neste analysemetode, partikkel-fjær-systemet, som er bygget på samme lest men som behandles som et eget kapittel i denne oversikten på grunn av funksjonen den kan ha i en formutforskningsprosess.

5.6.5 Partikkel-fjær-systemer

Både kraftdensitetsmetoden og dynamisk relaksasjon slik den er blitt beskrevet over tar utgangspunkt i en gitt form som man søker å forbedre. Fremgangsmåtene for begge metodene har det til felles at posisjonen til knutepunktene blir modifisert slik at det indre momentet til den globale formen minker. Disse metodene har imidlertid begrenset potensial hvis man ønsker å utforske nye former. For selve utforskingen av nye former måtte ikke bare de historiske skikkelsene vi har studert over (se kapittel 5.6.2) men også den nyere tids skallkonstruktører støtte seg til fysisk modellering for å ha et utgangspunkt å jobbe videre med. Hvis man på et senere tidspunkt ønsket å endre formen ville man være nødt til å starte hele prosessen på nytt. En ny fysisk modell ville være arbeidskrevende og fordrer i større

grad en viss forutinntatthet når det gjelder den endelige formen man er på jakt etter. For å ha muligheten til å endre form og optimalisere formen i en og samme prosess har man på 2000-tallet i økende grad brakt partikkelsystem-modellering fra fysikken inn i formgivningsprosessen [29]. Et partikkelsystem er en idealisert modell som betrakter sammensatte systemer som et sett av punkter, masser og krefter. En partikkel har en posisjon og en masse – men ingen utstrekning. Dermed forenkles beregningsmetodene vesentlig og mer kompliserte systemer kan beskrives effektivt. I kraft av å ha en masse er partikkelen tilbøyelig til å påvirkes av en kraft som gir den en akselerasjon. Akselerasjonen uttrykkes i Newtons 2. lov som proporsjonal med kraften og omvendt proporsjonal med massen, $F = ma$. I en formgivningsprosess er vi interessert i den geometriske formen som dette systemet danner. Posisjonen bestemmes ved en integreringsprosess med utgangspunkt i akselerasjonen som den førstederiverte av hastigheten og den annenderiverte av posisjonen til partikkelen.

$$\begin{aligned}v &= du/dt \\a &= dv/dt \\a &= ddu/dt\end{aligned}\tag{5.18}$$

der:

u = partikkelens posisjon

v = partikkelens fart

a = partikkelens akselerasjon

Ved hjelp av denne modelleringsteknikken kan man finne geometrien til et system i bevegelse som funksjon av tiden som en annenordens differensialligning der både akselerasjon, fart og posisjon uttrykkes som forhold mellom posisjonsforskyvning og tid. Kraften som virker på det hengende nettet som gitterskallet skal formes etter er en tyngdekraft som virker med like stor og vertikalt rettet kraft på alle partiklene. Motkraften som skal simuleres er opplagerkreftene som forhindrer stivlegemeforskyvning og systemets indre krefter som binder partiklene sammen. For å modellere et hengende nett er det essensielt at disse indre kreftene virker i aksialretningen. De indre kreftene modelleres derfor ved at det mellom hver partikkel er festet en lineært elastisk, masseløs fjær. Fjæren har en definert hvilelengde som den søker å opprettholde. Hvis den blir strukket eller trykket sammen som følge av en partikkelforskyvning oppstår det krefter i fjæren som simulerer et virkelig systems elastiske oppførsel. Ved hjelp av en slik idealisert modell kan man beskrive bevegelsene til analyseobjektet. På samme måte som for den dynamiske relaksasjonsprosessen over introduseres det et dempningsledd som vil føre systemet til en likevektsposisjon og anskueliggjøre en geometrisk form med samme egenskaper

som det hengende nettet. Systemet undergår en bevegelse som kan beskrives ved hjelp av en dynamisk bevegelsesligning.

$$m\ddot{u}(t) + c\dot{u}(t) + ku(t) = g(t) \quad (5.19)$$

der:

m = partikkelmassen

\ddot{u} = akselerasjon uttrykt som den annen tidsderiverte av partikkelens posisjon

c = dempningskoeffisienten til fjæren

\dot{u} = fart uttrykt som den tidsderiverte av posisjonen

k = fjærstivheten

g = tyngdekraften

Slike partikkelsystem-modeller med elastiske fjærer har vært anvendt innen datagrafikk og spillutvikling der de brukes til å beskrive bevegelsen til for eksempel hår som vaier i vinden eller klær som foldes og brettes når karakterene beveger seg. Disse modellene har i løpet av det siste tiåret også funnet veien inn til arkitektens verden. Man har søkt å innlemme en slik modell i en interaktiv digital prosess hvor man forsøker å *finne* en optimal form digitalt istedenfor å finpusse og justere en forhåndsutformet konstruksjon. I kjølvannet av denne utforskningen oppstår begrepet *form-finding* og fagfeltet *Computational Design* innen arkitekturen. Blant annet på MIT i USA har man forsket teoretisk og utarbeidet et praktisk verktøy, CADenary Tool, for å utforme tredimensjonale konstruksjoner ved hjelp av slike partikkelfjær-systemer [29]. For å modellere et hengende kjede uten bøyestivhet gis fjærene kun frihetsgrad i sin lokale aksialretning. De kan bare strekkes og sammentrykkes, ikke bøyes. Sammenkoblingene derimot betraktes som knutepunkter der fri rotasjon tillates. Man belaster et slikt system med vekter i knutepunktene og beregner en likevektsposisjon for systemet. Hvis den påførte kraften eller randbetingelsene varierer arbitrært med tiden, eller hvis systemet har høy kompleksitet, vil imidlertid denne likevekten beskrevet i (5.19) ikke la seg løse analytisk. Da kan man ty til numeriske løsningsmetoder basert på tidsserier [29], [22]. Det finnes en rekke slike mer eller mindre sofistikerte numeriske løsningsmetoder og det henvises til generell kommentarlitteratur for en mer detaljert presentasjon av disse (se for eksempel [13]). Her illustreres kun grunnleggende trekk i disse løsningsmetodenes virkemåte for å illustrere partikkelfjær-systemets anvendbarhet i forbindelse med interaktiv digital modellering. En tidsseriebasert numerisk løsningsmetode tar utgangspunkt i noen startverdier for variablene posisjon, fart og akselerasjon i tidspunktet t_i . Tiden, som er et kontinuum i den analytiske løsningen, deles inn i tidssteg der man har en kjent last ved alle stegene. Basert på ulike tilnæringsmetoder anslår man en verdi for de samme variablene ved tidspunktet t_{i+1} . Differansen $t_{i+1} - t_i$ utgjør tidsintervallet som tidsserien er

delt inn i og er for de fleste metodene konstant gjennom analysen. Basert på ulike numeriske metoder arbeider man seg fra tidssteg til tidssteg. Denne teknikken har den store fordelen at man kan endre randbetingelsene og lastbetingelsene for simuleringen mens den pågår. Dermed har man en digital modell som i stor grad ligner på det hengende nettet som Otto og hans kolleger eksperimenterte med. Etter at likevekten til en bestemt lastkonfigurasjon er funnet kan man for eksempel endre en opplagerposisjon eller fjærstivheten til systemet og de numeriske metodene vil lete seg frem kontinuerlig i en iterativ prosess til en ny likevektsposisjon for systemet. Denne partikkel-fjær-modellen har en rekke fellestrekk med metoden omtalt som dynamisk relaksasjon over. Den kan like gjerne sees på som en underkategori eller en videreutvikling av dynamiske relaksasjon. Begge tar utgangspunkt i dynamiske likevektsligninger for å finne en statisk likevekt istedenfor et matrisesystem som kraftdensitetsmetoden baserer seg på. Den store praktiske forskjellen er den interaktive prosessen mellom formgivning og formanlyse som denne modellerings-teknikken innbyr til. Med et partikkel-fjær-basert system av hengende kjeder som oppdaterer seg kontinuerlig ved hjelp av numeriske integreringsmetoder har man et digitalt nett på dataskjermen som man kan hale og dra i, flytte på, endre form og størrelse på, endre antall forankringspunkter og opplagerbetingelser. Alt dette kan man altså gjøre mens analysen pågår. Denne analysen er bygget opp etter samme prinsipper som dynamisk relaksasjon. Man kan si, uten å øve for mye vold mot begrepene, at man foretar en dynamisk relaksasjon når man behandler en gitt form i en slik partikkel-modell. Men i denne oppgaven er den praktiske forskjellen viktigere enn den teoretiske. Ved å ta steget fra dynamisk relaksasjon som beskrevet i kapitlet over til partikkel-fjær-modellering går vi også fra *iterativ* til *interaktiv* analysemodell. Som vi skal se senere, er denne modelleringsteknikken er slagkraftig verktøy i kombinasjon med parametrisk formgivningsverktøy, men den kan også by på noen feilkilder som demonstreres ved hjelp av noen praktiske eksempler i kapittel 4.

5.6.6 Finitte elementers metode

Finitte elementers metode (FEM), finitt element-analyse (FEA) eller bare element-metoden, har fått enorm utbredelse innen analyse av sammensatte konstruksjoner i løpet av de siste tiårene og er i motsetning til de ovennevnte metodene velkjent innen konstruksjonsteknikken. Her omtales derfor i første rekke de aspekter som er spesielt relevant for analysen av gitterskall. Ved utformingen av gitterskall kan FEM-programmer brukes på en noe utradisjonell måte som fortjener en liten drøftelse. En finitt element-analyse (FEA) deler, kort fortalt, en kontinuerlig, sammensatt konstruksjon inn i deler som enkelt kan analyseres separat som et kontinuerlig element. Analysen av delene og analysen av forholdet mellom delene settes sammen i en fullstendig analyse av de sammensatte konstruksjonens oppfør-

sel ved en ytre belastning. Den gamle devisen «Hvis man skal spise en elefant må man ta en bit av gangen» kan stå som en illustrasjon på metodens nedbrytning av et stort problem til mange små problemer. Elementmetoden analyserer kreftene som opptrer i en konstruksjon ved å basere seg på en arbeidsbetraktning av forholdet mellom deformasjoner og krefter. I et system med flere frihetsgrader ordnes krefter og forskyvninger i en matriseligning.

$$KD = R \quad (5.20)$$

der:

R = Kraftvektor

K = Stivhetsmatrise

D = Forskyvningsvektor

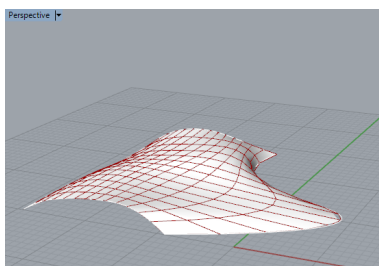
En tradisjonell bruk av FEA innebærer at man analyserer en allerede utformet konstruksjon for stabilitetskontroll for de aktuelle lastsituasjoner som konstruksjonen skal dimensjoneres for. Ved slike analyser må man ta stilling til hvorvidt man ønsker å ta hensyn til effekten av ikke-lineære forhold i konstruksjonens oppførsel når den blir utsatt for deformasjoner. De ikke-lineære effektene sorteres i to kategorier, en for form og en for innhold. Konstruksjonens oppførsel avhenger av materialegenskapene. Når tøyningene blir store vil de fleste materialer etter hvert i sterkere og sterkere grad oppvise et ikke-lineært forhold mellom tøyning og spenning (se kapittel 5.3 og figur 5.5). Når deformasjonene blir så store at det ikke-lineære forholdet mellom tøyning og spenning gjør seg gjeldende må man også ta hensyn til dette for å få et riktig forhold mellom krefter og forskyvninger i konstruksjonen. Den andre formen for ikke-linearitet er relatert til konstruksjonens geometri og er av spesiell interesse i forbindelse med prosjektering av gitterskall. Et vanlig eksempel for å illustrere forskjellen mellom lineær og ikke-lineær geometri i fasthetslæren er en utkragerbjelke som blir utsatt for en skjevlast. Denne lasten utsetter bjelken for et moment. Det er imidlertid kun y -komponenten av denne lasten som skaper indre moment i bjelken. x -komponenten har ingen eksentrisitet som kan lage et moment. En lineær analyse vil dermed beregne momentet som et resultat av bøyedeformasjonen som y -komponenten forårsaker. Når bjelken er blitt deformert av den påførte kraften vil imidlertid angrepspunktet for kraften få en ny posisjon. I denne posisjonen er ikke lenger kraftens x -komponent på samme akse som opplagerpunktet. Så snart deformasjonen i y -retning oppstår vil også x -komponenten begynne å skape moment. Momentet fra x -komponenten blir større og større etter hvert som y -komponenten presser bjelkeenden nedover. Dermed er stivhetsmatrisen og kraften blitt en funksjon av forskyvningen og vi kan ikke lenger løse (5.20) fordi informasjonen vi trenger for å etablere K og R ikke er kjent på forhånd. Ved FEA basert på ikke-lineær geometri vil programmet betrakte denne

forskyvningen i en iterativ prosess der lasten virker stegvis, i inkrementer, og analysere bjelkens oppførsel i hvert punkt etter hvert som den beveger seg nedover. Hvis deformasjonen som følge av kraften P er så stor at P_x skaper bøyepenninger av betydning risikerer man å underdimensjonere bjelken hvis man anvender FEA basert på forutsetningen om små deformasjoner. I Eksempelen over (fig *xxx*) brukte vi FEM for å dimensjonere en bjelke. En ikke-lineær analyse er tradisjonelt sett aktuell i forbindelse med analyse av knekning og bukling. Men ved å velge en analyse som tar hensyn til ikke-lineær geometri kan man også tenke seg at man kan bruke FEM-verktøy som et middel til å *finne* en form, ikke bare analysere en form. Hvis man løser (5.20) med hensyn på forskyvningen kan man studere hvordan en struktur lar seg forme av en gitt kraft, for eksempel en gravitasjonskraft. Utfordringen for en geometrisk ikke-lineær FEA er at likevekten til analyseobjektet må beregnes ut fra en deformert geometri som ikke er kjent på forhånd. Og for bruken av FEM som formingsverktøy er det nettopp den ukjente formen som er det primære målet for analysen. Måten FEM-programmet beveger seg fra et lasttrinn til neste har betydning for nøyaktigheten til denne formen. Det er ikke plass til en fremstilling av alle disse iterative metodene her, men de sorterer i tre hovedkategorier: Statisk ikke-lineær, dynamisk implisitt og dynamisk eksplisitt integrasjon. I de dynamiske analysene etablerer man en tidsserie der bevegelsesligningene brukes til å gå fra et tidssteg til den neste. Fjærmodellen i kapitlet over er i en enkel form for dynamisk eksplisitt FEM-analyse der fjærene representerer staver og massepunktene tilsvarer nodene i elementmetoden.

5.7 Formgivning og formgenerering - geometriske metoder

Metodene i kapittel 5.6 tar utgangspunkt i et nettverk av rette staver bundet sammen med knutepunkter. Sammen danner de en skallform basert på en statisk optimalisert posisjonering av knutepunktene. Dette gir formsterke konstruksjoner som muliggjør store spenn og en effektiv materialutnyttelse. Men i en tidlig formgivningsfase kan arkitekten ønske å frigjøre seg fra disse optimaliseringsprinsippene som dikterer en form. Det hengende nettet kan like mye fungere som en tvangstrøye som en idekilde. Noen ganger kan det være mer stimulerende å starte i andre enden, å starte med en form som gjerne er optimalisert ut fra ikke-statiske kriterier – det kan være funksjonelle eller estetiske kriterier, for deretter å tilpasse denne formen den aktuelle konstruksjonsteknikken og dens statiske virkemåte. Hvordan stiller det kinematiske gitterskallet seg som kandidat hvis denne fremgangsmåten foretrekkes av arkitekten? Når vi starter med en kontinuerlig, dobbelkrum flate og ønsker å representere den ved hjelp av et rutenett, må vi dele det inn i nettmasker,

en operasjon som i modelleringsverktøyene gjerne kalles *meshing*. Et *emphmesh* består av tre sentrale komponenter. Det består av flater som er avgrenset av sidekanter som møtes i hjørner. Som en representasjon av et gitterskall utgjør sidekanterne stavelementer og hjørnene danner knutepunktene i gitteret. Med formen som utgangspunkt søker man seg gjerne mot et rutenett som gir den beste gjengivelsen av den kontinuerlige formen. Inndelingen kan være underlagt ulike krav som følger for eksempel av materialegenskaper eller funksjonskrav. Hvis rutenettet skal kles med glass er det for eksempel en grense for hvor store rutene kan være. Hvis en funksjon er å gi lysinnslipp vil man på den annen side ikke tillate for små masker. Et maskenett bestående av trekanter gir stive, plane flater men gir mer kompliserte knutepunkter enn rektangulære flater. I motsetning til den kontinuerlige skallkonstruksjonen, som gjerne er en betongkonstruksjon, er et gitterskall diskretisert som følge av det virkelige skallets oppbygning. Den har bjelker som krysser hverandre og danner naturlige knutepunkter i et definert maskenett. Posisjonen til disse knutepunktene har en geometrisk betingelse da det må være konstant lengde langs lamellaksen fra et knutepunkt til det neste. Dette prinsippet må følges slik at skallkonstruksjonen består av parallellogrammer over hele overflaten. Moderne programvare har som oftest en hel palett med ulike teknikker for å dele inn en flate i mange små arealer som utgangspunkt for en analyse av overflaten. Men når man skal lage et maskenett som innordner seg det kinematiske gitterskallets prinsipper for inndeling av overflaten stenges som oftest konstruktøren ute fra denne verdenen. Standardiserte maskenettverktøy tar utgangspunkt i overflatens sidekanter og arbeider seg inn mot sentrum.

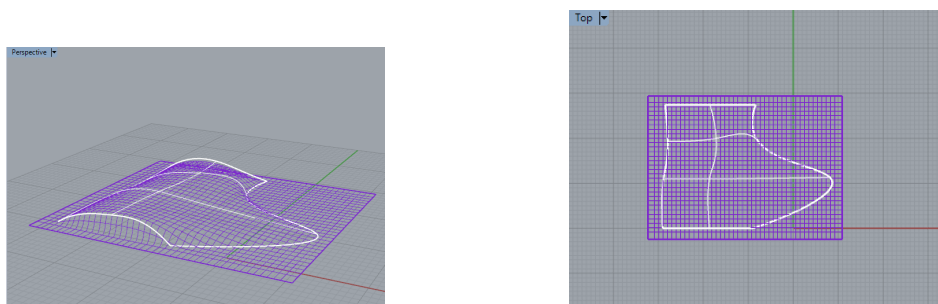


Figur 5.42: Røde linjer: sidekanter i rutenett generert av standard maskenettverktøy

For å bekle den ønskede formen med et rutenett som respekterer gitterskallets geometri trenges et *meshe*-verktøy hvor maskene har konstant sidelengde. Hvis man ønsker å forme et todimensjonalt rutenett om til en forhåndsdefinert tredimensjonal form står man overfor en geometrisk utfordring som ble behandlet av den russiske matematikeren Tshebysjov. I 1878 holdt han foredraget “On the Cutting of our Clothes” som tok for seg teknikker for å beregne kuttelinjene for todimensjonale tøyestykker som skulle passe inn i et tekstilplaggs tredimensjonale

form [36]. Som gitterskallets flate rutenett, består også stoffbitene av et rutenett med to fiberretninger som i utgangsposisjonen krysser hverandre i 90 graders vinkel. For å forme rutenettet om til en tredimensjonal form, er det to mulige veier å gå. Den ene muligheten er å beholde de rette vinklene i rutenettet og forlenge eller forkorte lengden på rutenes sidekanter. Et elastisk, tøyelig stoff kan formes på denne måten. Den andre muligheten er å beholde lengden på sidekantene og skape former ved å la vinklene mellom sidekantene variere slik at de danner parallelogrammer. Den sistnevnte kategorien fører til et Tsjebysjov-nett, som har de samme geometriske egenskapene som rutenettet i et kinematisk gitterskall. I det tidligere omtalte *IL 10: Gitterschalen* studeres også dette geometriske prinsippet. Prinsippet som ligger til grunn for utformingen av et Tsjebysjov-nett er at i et skjærdeformert rektangel der sidekantene beholder sin opprinnelige lengde, vil enhver sidekant alltid ha en motstående sidekant som er parallell til denne sidekanten. Denne egenskapen kan vi utnytte til å lage et Tsjebyvhev-nett med utgangspunkt i to vilkårlige ikke-parallele linjer på overflaten som krysser hverandre i et punkt på overflaten. I motsetning til de standardiserte maskenettverktøyene kommer denne metoden imidlertid til kort hvis man anvender den på omsluttete former som for eksempel en kule eller en toraks. Når man starter i midten og arbeider seg ut mot sidekantene etter fastlagte geometriske prinsipper vil man oppleve at mønsteret ikke passer inn med formen i randsonene og man blir nødt til å kutte flater langs sidekantene. Frei Otto løste gitterskallets geometriske utfordring delvis ved hjelp av fotografering av det hengende rutenettet. F Otto søkte i sin eksperimentering en ideell, momentfri form. Tsjebysjov hadde imidlertid viste at et slikt nett kunne tilpasses dobbelkrumme former i sin alminnelighet. Er man villig til å utnytte lamellenes momentkapasitet i større grad enn det ble gjort for Mannheim-prosjektet, kan man altså frigjøre seg noe fra det hengende kabelnett-formen – slik vi så det ble gjort ved utformingen av Downland-museet og Savill Garden. Passer-metoden beskrevet av Frei Otto fulgte et enkelt prinsipp men den var ikke særlig praktisk, i hvert fall ikke i sin analoge form. Det er en ganske omstendelig arbeidsmetode med opplagte feilkilder. I perioden 2007-2011 ble det skrevet flere masteroppgaver og doktoravhandlinger der man forsøkte å utarbeide digitale verktøy som kunne generere rutenettet til et gitterskall over en forhåndsdefinert dobbelkrum overflate [31],citetou,[7]. Et av arbeidene, Lina Bouhayas *Optimisation structurelle des Gridshells*, utforsker også en noe annerledes fremgangsmåte som har en praktisk anvendbarhet i mange digitale verktøy. Fremgangsmåten består i å senke et todimensjonalt rutenett over en tredimensjonal form som er forhindret fra all forskyvning og deformasjon og som fungerer som en digital forskaling for det tredimensjonale rutenettet som skal formes. Etter hvert som rutenettet senkes treffer det det høyeste punktet på forskalingsformen og rutenettet deformeres utfra fysiske egenskaper som det er blitt tillagt. Et slikt rutenett kan settes sammen av

digitale komponenter som man finner igjen, ikke bare i tegneverktøy men også i styrkeberegningsverktøy. Hennes avhandling etablerer et Tsjebysjov-nett ved hjelp av FEM-programmet Abaqus i en modul for store deformasjoner (Abaqus explicit). Denne metoden der man lar et «fiskenet» drapere en forhåndsdefinert form vinner på kompatibiliteten dette nettet kan ha med andre digitale verktøy. På den annen side dekker det ikke et like stort spekter av dobbelkrumme former. Det kan være en liten utfordring å få nettet til å dekke alle krinkelkroker av en kompleks form, men for de fleste aktuelle former for gitterskallkonstruksjoner lar det seg løse[7].



Figur 5.43: (a-b). Lilla linjer: Rutenettinndeling ved hjelp av draperingsfunksjon i tegneprogrammet Rhinoceros 3D.

En liten test av en slik draperingsfunksjon i et tegneverktøy viser også at draperingsfunksjonen her ikke er bygget opp med den samme betingelsen om konstant lengde, men beholder i stedet en konstant vinkel mellom sidekantene (se figur ??). Ved hjelp av passeren kan man altså innlemme dobbelkrumme former i det kinematiske gitterskallets geometriske betingelser. Man står dermed fritt til å tegne mer eller mindre eksperimentelle former og dekke formen med et kvadratisk rutenett hvor rutene kan undergå skjærdeformasjon. Også denne konstruksjonsteknikken synes dermed å kunne tilby en formfrihet som er attraktiv for arkitekten. Men når man jobber seg fremover med passeren får man ingen tilbakemeldinger fra modellen om at man er i ferd med å prosjektere en konstruksjonsmessig uheldig form. Hvis man rendyrker denne fremgangsmåten er det bare utøverens skjønn og tekniske gangsyn som melder i fra om at man er på ville veier statikkmessig. Det man vinner på formbarhet synes å gå tapt i ukontrollerbar statikk. For å gjøre gitterskallet til en mer attraktiv konstruksjonsform ville det være ønskelig med en formbar modell som samtidig beholder muligheten for å tilpasse seg statikken. Denne lille konflikten mellom det statisk optimale og det formmessig ønskelige som styrende prinsipp i utformingsprosessen kan bli til et fruktbart samarbeid hvis man bringer dem sammen i en modell utformet ved hjelp av nye prosjekteringsverktøy som går under merkelappen parametrisk design.

5.8 En oppgave for parametrisk modellering

Når en konstruksjons statiske egenskaper I så stor grad avhenger av dens form, men formens berettigelse likevel stammer fra andre funksjonskrav, I hvilken ende skal man begynne prosjekteringen? Eller er det mulig å behandle disse to aspektene parallelt I prosjekteringsprosessen? En utforskning av dagens utvikling innen prosjekteringsverktøy kan bidra til å gi et svar på disse spørsmålene. Mange av vår tids ikoniske bygninger kjennetegnes av en kompleks formgivning med dobbelkrumme flater og buktende bevegelser. For at disse bygningene skulle bli virkelighet har det foregått en rivende utvikling innen de digitale prosjekteringsverktøyene. Side om side med denne utviklingen mot det komplekse drives utviklingen av en industriell logikk som leder til standardisering, harmonisering og masseproduksjon og en rasjonell kommunikasjon mellom de involverte partene I prosjekteringsprosessen. Dagens BIM-verktøy er et uttrykk for denne utviklingen der alle typer bygnings-teknisk informasjon ligger lagret I en og samme modell. Hvis man setter seg ned med et tradisjonelt prosjekteringsverktøy for å tegne et gitterskall, eller I enda større grad, noen av de mer spektakulære formene som preger dagens arkitektur vil man oppdage at I hvert fall inntil nylig er programvaren ikke spesielt tilrettelagt for denne type prosjekter. Parallelt med utviklingen innen BIM har derfor prosjekteringsverktøy med en friere formgivningsteknikk fått innpass I arkitektenes verktøykasse. Uttrykket parametrisk design har etablert seg som et samlebegrep for et sett av tilnæringsmåter og prosjekteringsverktøy som er I ferd med å sette sitt preg på bygningsindustrien og utfordre samarbeidsformer mellom arkitekter og ingeniører.

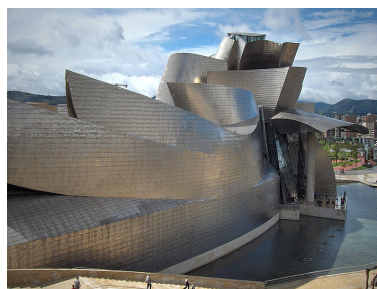
Dobbelkrumme former som frie former

Hvis man ikke er en trent tegner men likevel ønsker å illustrere en skallform ved hjelp av penn og papir merker man fort at det kreves en ekstra innsats. I barnas første tegninger gjenkjenner man fort sirkelbevegelsene og huset er som regel et av de første motivene som dukker opp. Huset lar seg representere på grunn av de klare konturene som de rette linjene lager. Men eggformen krever en gradvis overgang mellom lys og skygge I tillegg til sirkelbevegelsen for å komme til syne I et todimensjonalt format. Det er lettere å representere og produsere former som ordnes I rette linjer, men I naturen finner man ikke den samme rasjonaliseringstanken som ligger bak den rette linjen. Naturen rasjonaliserer I stedet etter prinsipper som følger av kreftenes virkning på formene. Vi har tidligere sett hvordan arkitekter som blant annet Frei Otto og Heinz Isler lot naturens prinsipper om minimering av potensiell energi og minste mulige overflate forme de fysiske modellene. Formene følger av enkle fysiske prinsipper men danner frie, irregulære former som er desto vanskeligere å representere grafisk, både på papir og på skjermen til et

tradisjonelt DAK-verktøy. Når vi skal jobbe med en skallform i en arkitektonisk ramme er det viktig å ha modell som kan representere og behandle irregulære, dobbelkrumme former. For å representere disse formene har modelleringsverktøy utviklet for blant annet fly- og skipsindustrien funnet veien til arkitektens verden. I denne sammenheng blir ofte Frank Gehrys arkitektur trukket frem som milepæler. Guggenheim-museet i Bilbao ble prosjektert på 90-tallet. Bygningen ble prosjektert, for ikke å si programmert, av dataverktøy knyttet til den franske Dassault-sfæren, som har et bredt spekter av egenutviklede prosjekteringsverktøy utviklet i forbindelse med deres jagerflyproduksjon. Jim Glymph fra Gehrys kontor forteller om problemet med tradisjonelle prosjekteringsverktøy: "*they array points in space and then there are massive holes in between But Catia, a program that deals with polynomials equations instead of polygons, is pretty much capable of defining any surface as an equation, which means that if you query the computer for any point on that surface, it knows it. . .*" (Van Bruggen)??



(a) Citroën DS



(b) Guggenheim-museet i Bilbao



(c) Dassault Rafale



(d) Plassen ved Palazzo Pitti, Firenze. Gradvis overgang mellom flat og dobbelkrum overflate

Figur 5.44: Dobbelkrumme overflater som kan by på problemer for tradisjonelle DAK-verktøy (Alle bilder: Wikimedia Commons).

Grunnidéen i disse prosjekteringsverktøyene er en måte å representere kurver på som stammer fra den franske bilindustrien. Grunnidéen i disse prosjekteringsverktøyene er en måte å representere kurver på som stammer fra den franske

bilindustrien. På 50-tallet utviklet Pierre Bézier og Paul de Casteljan, ansatt i henholdsvis Renault og Citroën teknikker som baserte seg på en representasjon av kurver som polynomer. Denne metoden går i dag i sin generaliserte form under merkelappen NURBS – Non Uniform Rational Basis Spline og er i dag den foretrukne teknikken for geometrisk representasjon av fri-form overflater, enten det er i forbindelse med industriell design, bildesign eller arkitektur. Den matematiske beskrivelsen av de ulike kurvene kan være kompliserte og langtekkelige, men med sine røtter fra skipsindustrien bruker programmene noen metaforer som kan illustrere hovedprinsippene bak denne tankegangen[21]. Skipsskrogene hadde former som ikke uten videre lot seg representere i form av polynomfunksjoner som f.eks. parabelen. I en tidlig formgivningsfase kunne man basere seg på frihåndstegninger for å lage kurvatur. Men dette ble straks umulig da fullskala arbeidstegninger skulle utarbeides. En jevn og grasiøs bue kunne ikke tegnes opp av et menneskes frie hånd når linjene ble mange meter lange. Løsningen ble å feste lange, tynne og bøybare elementer av plast eller tre, kalt splines til tegnebordet. Vekter ble festet til disse plankene slik at man fikk nøyaktig den formen man var ute etter. Ved å flytte vektene og legge til eller trekke fra masse, kunne man forme alle typer kurver. Senere ble virkningen av disse vektene beregnet slik at man kunne modellere de samme kurvene med den samme teknikken digitalt. For å representere disse kurvene matematisk bruker man en ligning på parametrisk form.

$$Q(t) = [X(t), Y(t)] \quad (5.21)$$

Her er $X(t)$ og $Y(t)$ funksjoner av parameteren t . For en gitt verdi av t , gir funksjonen $X(t)$ en verdi for x og $Y(t)$ en verdi for y . På denne måten kan man representere for eksempel en sirkel uten av det for en verdi av x tilsvarende flere verdier av y .



Figur 5.45: (a-b) NURBS-kurver med markerte kontrollpunkter..

Ved å justere antall kontrollpunkter, posisjon og tiltrekningskraft kan man lage alle typer kurver på en effektiv måte. Når den samme teknikken overføres til tredimensjonale flater har man et effektivt verktøy for å forme skallformene man er på jakt etter.

Linjene settes sammen til en overflate ved hjelp av «loft»-funksjonen – oppkalt etter «the loftsmen» som tegnet fullskala-tegningene i et stort åpent «loft» ovenpå.

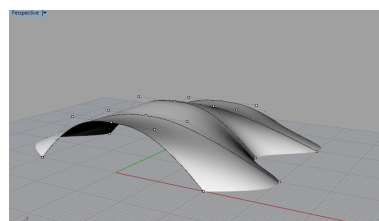
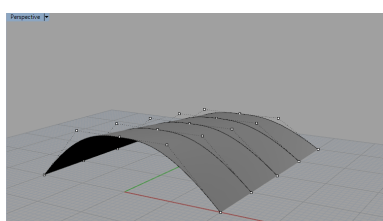


(a) En loftsman i arbeid (Gobbi)



(b) Vekting av kurver (Gobbi)

Figur 5.46: NURBS-kurvenes forløpere



Figur 5.47: Lofting av kurver til dobbelkrum overflate

En parametriske modell

NURBS kurve er en parametriske kurve. En parametriske modellering får vi når vi bringer den parametriske representasjonen opp på et høyere nivå. Når man lager en parametriske modell utformer man en konstruksjon ved å beskrive forholdet mellom parameterne som komponentene er bygget opp av. Modellen kan dermed redigeres og omformes ved at parameterne endrer verdi eller defineres annerledes. Objektene som konstruksjonen består av defineres ved hjelp av geometriske avgrensninger, frihetsgrader, dimensjoner og ligningssystemer som beskriver deres innbyrdes forhold. Man lager en modell som kan lage mange nye modeller, eller som det heter i et populært instruksjonshefte: "*it is now possible to sketch a model and generate hundreds of variations of project by adjusting very basic geometrical parameters*" [1]

Fysiske egenskaper

Hvis modellen kan lage «hundrevis av varianter» ved å justere noen geometriske parametere, hvilken input skal bestemme verdien på parameterne? NURBS-overflaten har uovertrufne muligheter til å representere skalloverflater på dataskjermen, men hva skal man bruke disse mulighetene til? Ved å definere fysiske egenskaper inn i NURBS-overflaten kan valg som i en tidlig idefase tradisjonelt har tilhørt desig-

nerens praktiske og estetiske sans utfordres av naturens formingsprinsipper. Den parametriske modellen åpner opp for å bruke styrkeberegningsprogrammer som et formingsverktøy istedenfor et dimensjoneringsverktøy. Ved å skyve analysen av konstruksjonens mekaniske egenskaper fremover i formgivningsprosessen utfordres også den tradisjonelle rolleinndelingen mellom arkitekt og ingeniør i prosjekteringsfasen. Med en vellykket modell kan arkitektene i langt større grad bruke styrkeberegningsprogrammer i den kreative prosessen. En fysisk egenskap som det er populært å utstyre komponenter i modellen med er manglende bøyestivhet. Da vil modellen falle på plass, den vil *finne* en form, hvor komponenten kun tar aksialkrefter, de samme prinsippene som Gaudì og de andre arkitektene i kapittel 5.6.2 jobbet etter. En digital variant av Gaudis modellmaskin integrert i den parametriske modellen åpner opp for en langt mer smidig justering av randbetingelser og lastsituasjoner enn i modellene i kapittel 5.6.2.

En optimaliseringsprosess

Nesten like sentralt som begrepet fri-form-arkitektur står ideen om en optimaliseringsprosess i den parametriske modellen. Igjen, her kreves det at man har et bevisst forhold til hva som skal være gitt i modellen og hvilke variabler som kan manipuleres underveis i formgivningsprosessen. For når man optimaliserer deler man samtidig inn variabler i midler og mål. Ved å optimalisere en form posisjonerer man variabler slik at de gir den beste formen. Men hva vil det si at en form er den beste formen? Best i hvilken henseende? Og hvilke variabler har en innvirkning på dette målet? Når man optimaliserer en form kan man for det første tenke seg at man justerer variabler slik at de gir den beste formen forstått som den *fineste* formen ut fra vår estetiske dømmekraft. Man kan for eksempel justere en forms høyde og bredde slik at de føyer seg etter ideen om det gyldne snitt. Andre eksempler er bruken av parametriske modeller innen skulptur- og smykkekunst. Smykkekunstnere har for lengst oppdaget den parametriske modellen og mulighetene den innbyr til. En form kan vurderes som den beste formen ettersom hvilket arkitektonisk rom den er med på å skape. Den beste formen kan være den mest *funksjonelle* formen. Arkitekter kan for eksempel lage utkast til romprogram og planløsninger basert på funksjoner som skal optimaliseres ut fra gitte betingelser, for eksempel minimering av gangareal. Innen ingeniørvitenskapen kan optimaliseringsprosessen omfatte for eksempel materialegenskaper, tverrsnittutforming og geometrisk optimalisering. Parametrisk modellering kommer særlig inn i bildet i forbindelse med en optimaliseringsprosess som skal lede frem til den *sterkeste* formen ut fra forhåndsdefinerte kriterier – for eksempel kriterier gitt av arkitekten. Her åpner den parametriske modellen opp for optimaliseringsstrategier som baserer seg på stokastiske metoder istedenfor kalkulus. Kalkulusbaserte beregningsmetoder kan levere gode svare hvis problemet kan representeres som en kontinuerlig,

deriverbar funksjon med en eller flere variabler. Gitterskallets komplekse geometri blir imidlertid vanskelig å representere på denne måten. En optimaliseringsprosess basert på stokastiske metoder er ikke avhengig av slike kontinuerlige funksjoner og kan lettere tilpasses en parametrisk oppbygd gitterskallmodell. Hvis variablene er mange nok blir en ren prøve-og-feile-strategi tidkrevende. I stedet er det naturlig å koble den parametriske modellen sammen med stokastiske metoder som etterligner prosessen ved naturlig evolusjon, såkalte genetiske algoritmer, som kan etter forhåndsdefinerte kriterier lete seg fram og finne den optimale formen⁵.

En parametrisk prosess – tegne og beregne

Et grunnleggende prinsipp Innen parametrisk design er å overlate et sett med beslutningsprosesser fra den prosjekterende til datastyrte optimaliseringsprosedyrer[38]. Denne overføringen av beslutningsmyndighet kan ved første øyekast virke som en ansvarsfraskrivelse fra menneske til maskin, men den leder snarere til et nytt refleksjonsnivå som omhandler beslutninger om hvordan optimaliseringsprosessene skal integreres I prosjekteringsfasen. På hvilket nivå I prosjektet skal optimaliseringsprosessene intervensere og, ikke minst, hvilke variabler skal man optimalisere og hvilken kvalitet skal man optimalisere for? Skal optimaliseringsprosedyren danne en form ut fra noen gitte randbetingelser og optimaliseringsfunksjoner (for eksempel et definert bygningsvolum og materialkostnad), eller skal man intervensere på et senere stadium for å finjustere en allerede prosjektert form? Den første strukturen minner mest om simuleringene som fjærmodellene legger til rette for, mens den sistnevnte kan kombineres med kraftdensitetsmetoder eller en dynamisk relaksasjon som foretas I etterkant for å gjøre et prosjekt mer materialeffektivt, om enn ikke statisk helt optimalt. Begge prosedyrene kan passe inn I gitteskallprosjekterings flytdiagram. Prosessen avhenger I stor grad av hvilken rettesnor man følger seg etter: *Form follows function* eller *Form follows force*. Som slank og formsterk konstruksjon krever gitterskallet at formen spiller på lag med kraftlinjene. Uansett hvilken rettesnor man velger først er det den parametriske modelleringsteknikkens styrke å kunne gjøre overgangen mellom disse tilnæringsmåtene mindre og mer smidig.

⁵Virkemåten til disse algoritmene er ikke så viktig for denne oppgavens foretagende. For mer om genetiske algoritmer, se for eksempel no.wikipedia.org/wiki/Genetisk_algorithme

Kapittel 6

Anvendelsen - Et parametrisk gitterskall

6.1 Introduksjon

I denne delen av oppgaven anvendes teorien som er blitt behandlet i det foregående kapitlet til å utforme et gitterskall ved hjelp av en arbeidsmetode basert på parametrisk design. Det skal utformes en takkonstruksjon på et tenkt prosjekt og vi følger beslutningsprosessen slik den kan arte seg når man benytter denne arbeidsmetoden. Det endelige målet er å utforme en formsterk takkonstruksjon som kan fylle forhåndsbestemte funksjonelle krav. På veien til dette målet ønsker vi å bli bedre kjent med den parametriske arbeidsprosessen og hvordan en modell for nettopp denne konstruksjonstypen kan se ut. I denne forbindelse er vi spesielt interessert i å utforske mulighetene som bruken av FEA kan fylle i denne prosessen. Modellens egenskaper Hvordan går man frem helt konkret når man skal utforme en konstruksjon ved hjelp av parametrisk design? Grunnleggende i denne arbeidsmetoden er oppgaven å finne en form ved å etablere en modell som kan generere varianter som hjelper formgiveren videre i beslutningsprosessen. Ved å ha et bevisst forhold til hvilke kriterier som bygningen må tilfredsstille kan den parametriske modellen hjelpe til med å finne en optimalisert form ut fra arkitektens gitte betingelser. Når man skal lage en parametrisk modell som hjelpemiddel er det derfor verdt å reflektere over hvilke egenskaper man ønsker at modellen skal ha. Det er nesten ikke grenser for hvilke parametere som kan gjøres justerbare, og det er lett å gå seg vill i alle mulighetene som modelleringsteknikken tilbyr. Nettopp derfor er det viktig å reflektere over prosjektets rammer og overordnede mål. Man må utforme modellen slik at man kan få svar på de spørsmålene som melder seg underveis i prosessen. Den parametriske modellen kommer til sin rett når den fungerer som et *undersøkelsesverktøy*. Man skal kunne starte modellerin-

gen uten å ha formen klar på forhånd. Modellen skal ikke bare generere konkrete modeller, den skal ideelt sett også kunne generere nye ideer. Nye perspektiver skal kunne gjøre seg gjeldende mens man prøver seg fram med forskjellige former. Modellen skal derfor være *fleksibel* i den forstand at man kan aktivt endre én eller noen få betingelser uten å måtte foreta etterjusteringer på resten av modellen, eller i verste fall være nødt til å begynne helt på nytt. Når man starter modelleringen uten å ha en klar ide om hvordan den endelige formen vil bli er det desto viktigere å kunne foreta formendringer på et sent stadium i formingsprosessen uten at dette medfører mye ekstraarbeid. Modellen må derfor ha en tilstrekkelig *formbarhet*. Konstruksjonen vi skal lage har videre helt spesielle mekaniske egenskaper, både i oppføringsfasen og som ferdig konstruksjon. Modellen må kunne inkorporere kreftenes virkning på former og materialer. Det er en stor fordel å kunne få tilbakemelding mens man undersøker ulike alternativer om man opererer med en form som har gode funksjonelle egenskaper men som har en statikkmessig uheldig form. Den bør gi brukeren relevant og presis *konstruksjonsteknisk informasjon* for den aktuelle utformingen som vurderes. Med en mekanisk presis og formmessig fleksibel modell vil man kunne foreta små justeringer som fjerner de formmessige problemene som en ellers attraktiv form har. Med en god vekselvirkning mellom formenes funksjonelle og konstruksjonstekniske egenskaper vil man kunne ledes inn på et riktig spor ved å prøve seg fram med modellen. Som hjelpemiddel til å finne en form bør den også være *brukervennlig* for ikke-spesialiserte utøvere. Oppgaven ønsker å behandle gitterskallkonstruksjonen i et parametrisk format for å gjøre denne konstruksjonstypen mer tilgjengelig. Da er det ikke til stor hjelp hvis modellen er presis hvis den ikke gjør prosessen enklere. En forenkling av modellens fysiske egenskaper kan derfor være ønskelig hvis denne forenklingen bidrar til å gjøre modellen mer anvendelig, intuitiv og fleksibel. Da blir det imidlertid desto viktigere å være seg bevisst disse forenklingene og hvilke feilkilder de kan romme. Presisjonsnivået til modellen er med på å avgjøre hvor langt i prosjekteringsprosessen den parametriske modellen fører oss. Liten presisjon er ikke nødvendigvis en ulempe hvis det fører til at modellen blir mer anvendelig som undersøkelsesverktøy.

6.2 Modelleringsverktøy

6.2.1 Rhinoceros3d 5.0

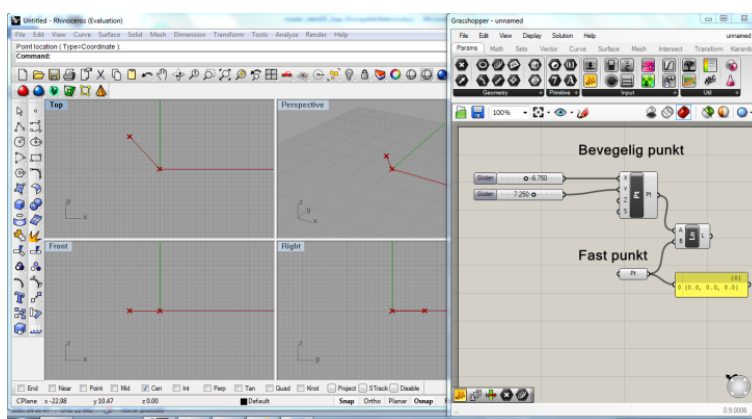
Prosjektet i denne oppgaven baserer seg på Rhinoceros3d (Rhino) som en plattform for å utvikle en parametrisk modell¹. Rhinoceros3d er et anerkjent tegneprogram basert representasjon av kurver og overflater på NURBS-form. Mye av dagens friform-arkitektur er blitt tegnet ved hjelp av dette programmet. Noen eksempler er

¹For mer informasjon: www.rhino3d.com

Fuksas og Bans prosjekter på figur 5.1a og 5.31c. Når den parametriske modellen etableres fungerer imidlertid Rhino mest som et visningsvindu for parameterne som blir definert ved hjelp av en plug-in-modul, eventuelt en skriptfil i C#-format som kjøres i Rhino.

6.2.2 Grasshopper 09.0014

Den viktigste av alle de tilgjengelige plug-ins er Grasshopper (GH)², som for Rhinos verktøypalett utgjør selve kjernen i den parametriske tenkemåten. Med Grasshopper som plug-in blir arbeidsteknikken ganske annerledes enn det man er vant til fra tradisjonelle tegneverktøy.



Figur 6.1: Grafisk brukergrensesnitt for modellering i Rhinoceros ved hjelp av Grasshopper.

Til venstre på figur 6.1 ser vi Rhinos visningsvindu mens høyre del av skjermen dekkes her av et redigeringsvindu som tilhører Grasshopper. Redigeringsvinduet brukes til å sette opp definisjonene av en modell som vises fortløpende i Rhino. Grasshopper har et karakteristisk grafisk brukergrensesnitt. Man arbeider på et lerret hvor man kan plassere ulike bokser som kan kobles til hverandre ved hjelp av kabler – man kan se på det som et programmeringsspråk tilpasset arkitekters visuelle tenkemåte istedenfor informatikerens kodespråk. Etter hvert som modellens kompleksitet vokser kan lerretet fort minne om gulvet i øvingslokalet til et rockeband med et virvar av bokser og kabler. For å gjøre illustrasjonene som kommer senere i oppgaven mer lesbare lager vi et innledende eksempel på Grasshoppers parametriske virkemåte. På høyre del av figur 6.1 er det plassert noen bokser koblet sammen med kabler. Kablernes funksjon er å overføre informasjon fra en boks til en annen, mens boksene er små programsekvenser som behandler

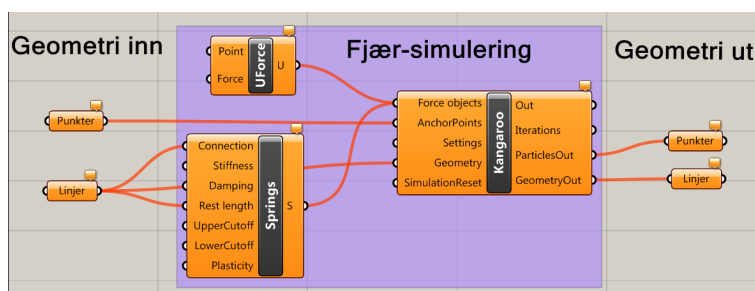
²For mer informasjon: www.grasshopper3d.com

informasjonen de mottar. Den inngående informasjonen kan enten være informasjon fra andre Grasshopper-komponenter eller allerede eksisterende informasjon som er lagt inn i Rhino og som importeres til Grasshopper-vinduet. I figuren over har vi hentet et fast punkt fra Rhino, definert et bevegelig punkt i Grasshopper og bedt Grasshopper definere en linje som går fra det bevegelige punktet til det faste punktet. Komponentene kobles sammen ved hjelp av kabler. Spakene til venstre i Grasshopper-vinduet er emblematiske for den parametriske tenkemåten i Grasshopper i det de gir oss muligheten til å endre verdien på parametere etter at modellen er definert. Justerer vi verdien på spaken som er koblet til x-verdien for det bevegelige punktet, vil punktet i Rhino-vinduet flytte seg tilsvarende. Kunsten å lage en klok parametrisk modell består til stor del i å ha et bevisst forhold til hvilke faste rammer modellen skal ha og hvilke parametere som skal være manipulerbare i modellen. Boksene i Grasshopper-vinduet lager et skript som sendes til Rhino. Grasshopper åpner opp for egenutviklede funksjoner basert på programmeringsspråkene VB DotNET og C#. Denne muligheten har tiltrukket mange dyktige utviklere som er med på å knytte stadig sterkere bånd mellom utviklingen innen informatikk og arkitektur. Samtidig er den med på å gjøre Grasshopper som arena for innovasjon og kreativitet til en ledende aktør på sitt felt. Det er også verdt å merke seg at den nyeste utgaven er versjon 09. Det betyr ikke at den er fra 2009 men at vi fremdeles venter på versjon 1.0. Grasshopper befinner seg i en verden som fremdeles er i den digitale støpeskjeen. Mange «bugs» kan dukke opp, standardfunksjoner kan mangle fordi de er uteglemt av utvikleren og den nyttigste «brukermanualen» er diskusjonsfora på internett hvor frustrerte brukere kan søke hjelp fra velvillige mentorer.

6.2.3 Kangaroo Physics 0.080

Kangaroo Physics (Kangaroo)³ er en tilleggsapplikasjon til Grasshopper som kan brukes til å lage partikkel-fjær-modeller basert på prinsippene omtalt i kapittel 5.6.5. Den er laget av Daniel Piker, utvikler i Fosters and Partners, og er et eksempel på Grasshoppers mange tilleggskomponenter utformet av tredjepart-utviklere. Sammenlignet med for eksempel Kilians CADenary Tool har Kangaroo den store fordelen at den kan brukes direkte på modellene laget i Grasshopper. Man kan sende linjer inn i Kangaroo, Kangaroo behandler dem som fjærer og den nye geometrien kommer ut av Kangaroo i form av linjer som kan inngå i en større, helhetlig modell.

³For mer informasjon: www.grasshopper3d.com/group/kangaroo



Figur 6.2: Input, output samt hovedkomponenter i Kangaroo fjær-modell

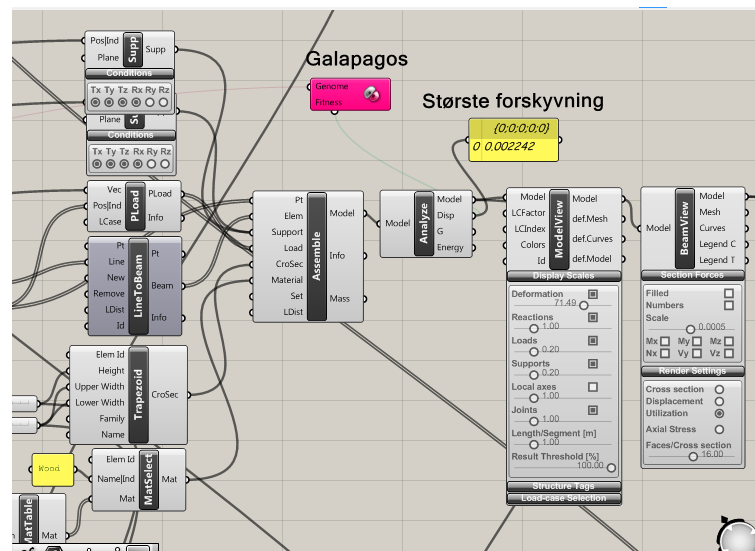
6.2.4 Karamba 1.02

Karamba⁴ er et FEM-program som, i likhet med Kangaroo, er laget av en tredjepart-utvikler og er tilpasset Grasshoppers funksjonalitet og brukergrensesnitt. Programmet utvikles av en gruppe ingeniører og arkitekter med tilknytning til Det tekniske universitetet i Wien og lanseres stadig i nye og forbedrede versjoner. Med Karamba kan finitt element-analyse utføres på modellene mens de er under utvikling i Grasshopper. Programmet er i en tidlig fase og fungerer i dag sjelden som et fullverdig dimensjoneringsprogram for den endelige dimensjoneringen. Til det må man fremdeles støtte seg til mer kompliserte (og dyrere) FEM-programmer som f.eks. ANSYS og ABAQUS. Men dette programmets anvendelighet i en parametriske modell tjener derfor til å illustrere i enda større grad det kreative potensialet som bor i et slikt program i en tidlig prosjekteringsfase, på et stadium hvor man vanligvis må sette sin lit til et konstruksjonsteknisk gangsyn og sunn fornuft. Karambas særegenhet ligger i dens interaksjonsmuligheter med formingsprogrammene. Slik en av utviklerne, Clemens Preisinger, selv sier det i introduksjonen til et veiledningshefte: “It is easy to use for non-experts, has been tailored to the needs of architects in the early design phase, works interactively and cost slightly less than the rest”[37].

6.2.5 Galapagos

Galapagos er ikke et selvstendig program men en funksjon i Grasshopper. Den tas likevel med i et eget punkt fordi den representerer en sentral etappe i den parametriske utformingsprosessen. Den er et verktøy, på lik linje med for eksempel Kangaroo eller Karamba. Med Galapagos kan man utføre optimaliseringsprosesser basert på stokastiske metoder på Grasshopper-modellen. Som navnet antyder er Galapagos’ virkemåte inspirert av evolusjonslæren og prinsippet om naturlig seleksjon. Mange parametere kan kobles til og Galapagos leter seg frem til den verdien

⁴For mer informasjon: www.karamba3d.com



Figur 6.3: Karambas oppbygning følger velkjente prinsipper innen FEM-programvare men er tilpasset Grasshoppers brukergrensesnitt. Til venstre finner vi geometriske betingelser, laster og materialegenskaper som settes sammen til et system (Assemble) som analyseres (Analyze) og bearbejdes for visning av ulike typer informasjon (ModelView).

av parameterne som gir en maksimums- eller minimumsverdi av parameteren som definerer fitnessfunksjonen.

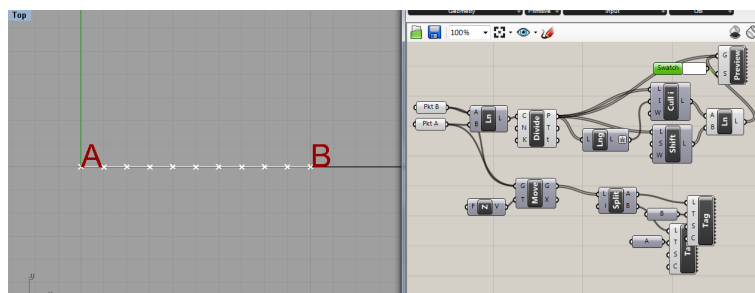
6.3 Modellerings teknikker

For å få en forståelse av de ulike verktøyenes virkemåte og anvendelsesteknikker, samt et inntrykk av mulige feilkilder i simuleringene gjør vi først noen studier av en enkel form som kan sammenlignes med en eksakt, analytisk løsning. Disse testene leder til et sett med teknikker, med sterke og svake sider, som kan settes sammen til en strategi for å utforme et gitterskall. Vi analyserer først en 10 meter lang stav. Deretter, for å føre testingen over i en dobbelkrum form, går testingen over til et kvadratisk rutenett som måler 10 x 10 meter og et rektangulært rutenett som måler 5 x 10 meter. Staven analyseres både som fjærmodell og ved hjelp av FEA, som beskrevet i kapittel 5.6.5 og 5.6.6.

6.3.1 Modelling av bue

Det hengende nettet som Otto eksperimenterte med er en tredimensjonal versjon av det hengende kjedet som Hookes brukte som illustrasjon, og i gitterskallet er det

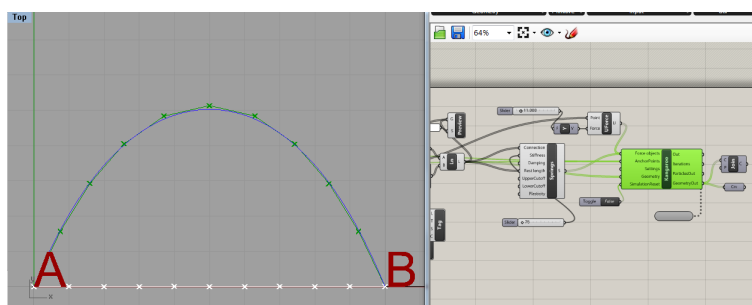
den deformerte bjelken som er den grunnleggende byggekomponenten. Vi starter med å se på hvordan vi kan forme en bue ved hjelp av et hengende kjede i digital, parametrisk form. Kjedet og dets lenker modelleres i GH som en linje delt inn i ti segmenter som hver måler 10 meter. Segmentinndelingen er parametrisk justerbar slik at effekten av ulik segmentinndeling kan vurderes. Fra kap 5.6.2 vet vi at vi kan vente oss en bue med en kurvatur lik det hengende kjede hvis vi belaster et kjede utelukkende med kjedets egenvekt.



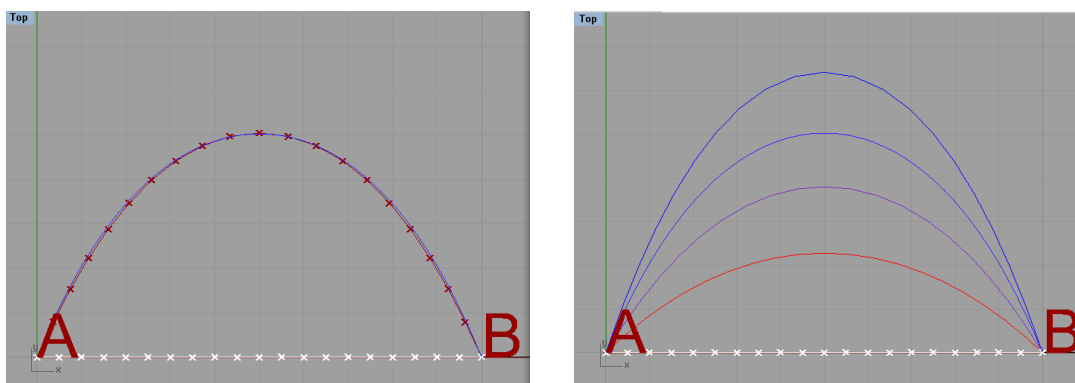
Figur 6.4: GH-skript (høyre vindu) og visning i Rhino av testkurve. $AB = 10$ m.

Testeksempel 1 - fjærmodell med aksialtøyning

I den første simuleringen omformes linjesegmentene i figur 6.4 til fjærer som kan tøyes i aksialretning og som er koblet sammen med rotasjonsfjærer som foreløpig er uten fjærstivhet. Dermed blir fjærene koblet sammen i momentfrie ledd slik at kjedet kun kan ta aksialkrefter, som i et hengende kjede. For å omdanne linjesegmentene sender vi Grasshopperdefinisjonen fra figur 6.4 inn i komponenter knyttet til Kangaroo partikkel-fjær-simulatoren. Det virkelige kjedet påvirkes kun av egenvekten. Den beste representasjonen av en slik lastsituasjon som er praktisk tilgjengelig får vi i Kangaroo ved å belaste hvert knutepunkt med en like stor vertikalkraft. I figur 6.5 ser vi det grafiske resultatet av en slik simulering. Den blå linja er en kontinuerlig funksjon som representerer den hyperbolske cosinusfunksjonen – funksjonen som et hengende kjede kun belastet av egenvekt vil nærme seg etter hvert som man introduserer flere og flere ledd i kjedet. Lengden på den analytiske buen er 15 meter. Ved å utforme det hengende kjedet som en parametrisk modell kan man enkelt justere antall linjesegmenter (se figur 6.6a) og fjærstivheten (se figur 6.6b) for å se hvordan disse variablene påvirker formen til det hengende kjedet. Ved å gjøre segmentinndelingen mindre, nærmer formen seg en kontinuerlig kurve, men dette krever også mer regnekraft fra datamaskinen. Når buen skiftes ut med et stort rutenett er dette en høyst relevant avveining. Ved å gjøre fjærstivheten til en justerbar variabel ser vi fort at vi kan lage mange ulike former som alle er gunstige momentmessig. Uten materialegenskaper er disse kreftene og fjærstivhe-



Figur 6.5: Grønn linje: Partikkelfjæremodell av hengende kjede. Blå linje: hyperbolsk cosinus-funksjon med lengde 15 m.



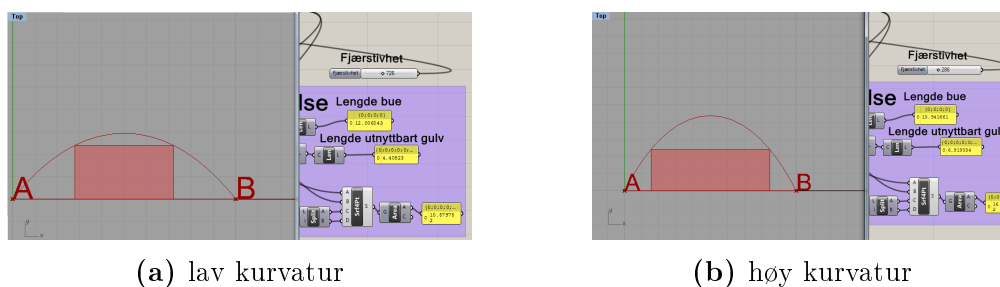
(a) Justering av antall segmenter

(b) Justering av fjærstivhet

Figur 6.6: Ulike varianter av kurven generert fra samme modell

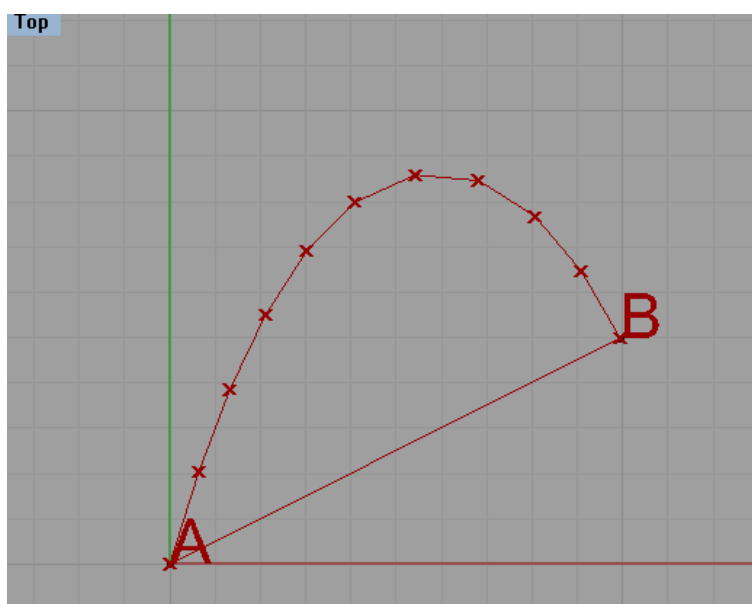
tene kun relative størrelser. Som illustrert i figur 6.2 leverer Kangaroo (i dagens versjon) kun geometrisk informasjon⁵. De har likevel en funksjon som parametrisert formingsverktøy. Det er for eksempel enkelt å evaluere utnyttbar sone for en gitt takhøyde for de ulike kurvene. Dette forholdet mellom buelengde og utnyttbart areal kan igjen kobles sammen med nye parametere som kan danne grunnlag for økonomiske og estetiske beslutninger, noe vi vil komme nærmere inn på senere i den praktiske delen av formingsprosessen. Igjen kan vi insistere på at i denne sammenheng er en slik simulering ikke ment å skulle være et presist regneverktøy men et praktisk hjelpemiddel i en formingsprosess. Man kan på en hurtig og interaktiv måte utforske ulike kjedeformers egnethet i et større prosjekt. Modellen er enkel å sette opp og den kan generere mange former ved å justere fjærstivhet

⁵Dette er resultatet av utviklerens prioriteringer snarere enn en teoretisk begrensning ved fjæremodellen. For en interessant nettdiskusjon mellom Daniel Piker og Clemens Preisinger, se også www.grasshopper3d.com/group/karamba/forum/topics/beam-deflection-stresses?, lest 01.12.2012



Figur 6.7: Evaluering av utnyttbart gulvareal og kurvatur

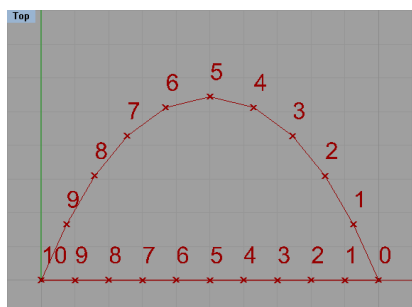
og andre parametere som for eksempel endepunktens posisjon. Av figurene ser vi



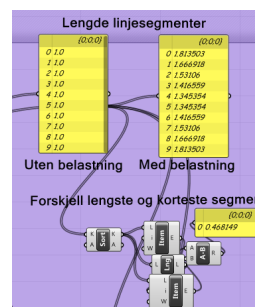
Figur 6.8: Nye former kan genereres under samme simulering ved å flytte endepunktens posisjon

imidlertid at kurven som genereres ved hjelp av fjærmodellen ikke legger seg helt presist på den kontinuerlige funksjonens kurve (se figur 6.5). Selv om linjen deles inn i et større antall segmenter blir ikke denne avstanden eliminert. Så, i hvilken grad er kurven en hyperbolsk cosinusform? I en tidlig formingsfase kan avstanden mellom disse kurvene synes bagatellmessig. Men er dette bare ett symptom på en alvorligere svakhet i modellen? Hvor ligger feilkilden, og har denne feilkilden også andre implikasjoner som vi må ta hensyn til? For å undersøke disse problemene kan vi starte med å se nærmere på modellens oppbygging. Det hengende kjedet er kun påvirket av sin egenvekt. Egenvekten er jevnt fordelt over hele buens lengde. I modellen er imidlertid fjærene masseløse. Egenvekten representeres ved hjelp av

partiklene som påvirkes av punktlasten. For at egenvekten skal være jevnt fordelt over hele buens lengde må også fordelingen av partiklene være jevnt fordelt over buens lengde. Men ser man på buen som partikkel-fjær-modellen har laget så ser man fort at det ikke er tilfelle. Ikke bare er buens lengde øket fra 10 til 15,5 meter



(a) Linje før og etter belastning



(b) Største lengdeforskjell

Figur 6.9: Evaluering av enkeltsegmentenes lengder

og linjesegmentene blitt lengre, men lengdeøkningen er i tillegg ikke konstant. Den er størst for segmentene som befinner seg nærmest forankringspunktene. Det er for lav tetthet av partikler ved endekantene og for høy tetthet mot midten av kurven. Dette er konsistent med observasjonen fra figur 6.5. Der ser vi at toppunktet er for høyt plassert slik at den midtre delen av kurven ligger ovenfor den analytiske løsningen. I tillegg ser vi at sidekantene ikke har beveget seg nok i høyderetning for å nå opp til den analytiske løsningen. Modellen er for tung i midten og for lett ved endekantene. Den har for høy tetthet av punkter mot midten og for lav tetthet mot sidekantene. En likevektsbetraktning av en partikkel hjelper oss å forstå hvorfor. Partikkelen i punkt 2 påvirkes av tre krefter. Punktlasten, som her er rettet oppover for å forme en trykkbue, og de to fjærkreftene. Ettersom fjærkreftene bare virker i aksialretning har disse kreftene samme retning som linjesegmentet de utgjør i modellen. En enkel grafisk løsning viser at fjærkraften fra det nedreste linjesegmentet må være større enn fjærkraften fra det øverste linjesegmentet. Vi ser videre at når vinkelen mellom den vertikale punktlasten og fjærene nærmer seg 90 grader blir forskjellen mellom fjærkreftene mindre. Siden fjærkraften er modellert til å være proporsjonal med lengdeendringen blir også linjesegmentenes lengdeforskjell mindre. Formen er altså ganske presis, men den har en liten unøyaktighet som følge av linjesegmentenes varierende lengdeendring. Hvis man kun er ute etter å modellere en buform kan denne teknikken synes som et godt hjelpemiddel. Den er fleksibel, man kan endre betingelsene mens analysen pågår og formen oppdateres umiddelbart. Et av aspektene som teknikkene skal evalueres etter er *presisjonen* de kan levere. Ved å studere segmentenes lengde før og etter deformasjon får vi en viktig kvantitativ indikator for teknikkenes presisjon. Pre-



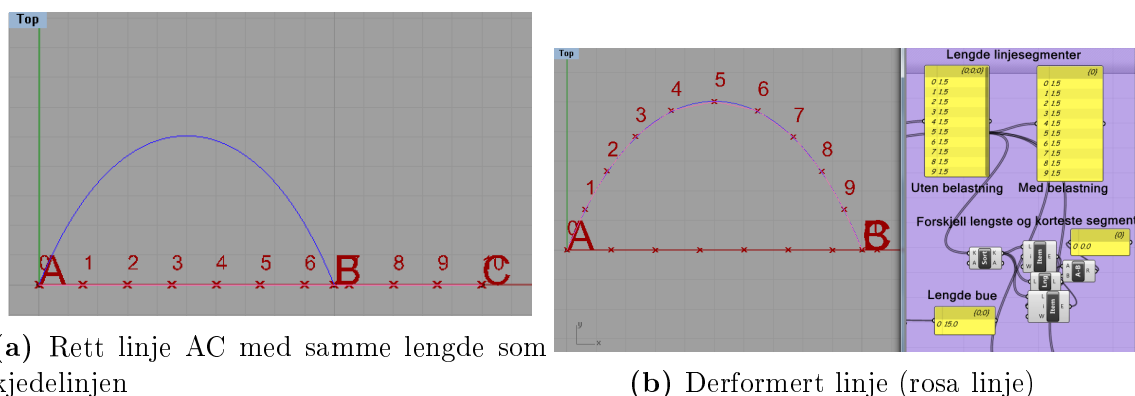
Figur 6.10: Likevektsbetrakning av to ulike knutepunkter

sisjonen evalueres videre etter to ulike kriterier: Hvor presis er kurveformen? Og hvor presis er partiklenes posisjon? Den største unøyaktigheten får vi i partiklenes posisjon mens kurvaturen er tilfredsstillende. Partiklenes posisjon har betydning for det kinematiske gitterskallet fordi partiklene representerer knutepunktene og avstanden mellom knutepunktene målt langs lamellene forblir konstant gjennom hele deformasjonsprosessen. Hvis ikke vil ikke skjærdeformasjonen av rutenettets kvadrater la seg gjennomføre. Testeksemplet startet med linjesegmenter som målte 1 meter. I et deformert kinematisk gitterskall vil disse segmentene fortsatt være 1 meter, mens fjærmodellen lager segmenter som alle er blitt vesentlig lengre og som har en lengdeforskjell på inntil 46 cm (se figur 6.9b), og lengdeforskjellen blir enda større hvis kurvaturen økes. Forskjellen mellom partikkel-fjær-modellen i testeksempel 1 og et gitterskall springer ut av måten deformasjonen oppstår. En lamell i et gitterskall får sin form ved bøyedeforimasjon. Den jekkes opp på midten og endekantene presses innover mot opplagerpunktene. Fjærmodellen fikk derimot sin form ved hjelp av aksialtøyninger. Ønsker vi en mer presis modell kan vi søke å gjenskape oppføringsprosessen digitalt ved å forflytte endekantene.

Testeksempel 2 – fjærmodell med bøyedeforimasjon

Vi søker denne gangen å skape en momentfri bueform ved å flytte på forankringspunktene istedenfor å påføre en vertikalkraft. Med den analytiske løsningen fra eksempel 1 som referanse starter vi med en rett linje AC med lengde 15 meter, samme lengde som den hyperbolske cosinusfunksjonen.

Som i den virkelige bøyesituasjonen påfører vi en oppoverrettet vertikalkraft i begynnelsen av deformasjonsprosessen som «knipser» buen i riktig retning slik at det blir en trykkbue. Deretter flytter vi forankringspunktet fra punkt C til punkt B og skrur av vertikalkraften. Av figur 6.11b ser vi at ved hjelp av denne teknikken kan vi gjenskape formen til et hengende kjede med stor presisjon og at vi har kvantitative resultater som tyder på at utfordringen er løst. Men like viktig som presisjonen er teknikkens fleksibilitet og formbarhet. Denne teknikken tar ut-

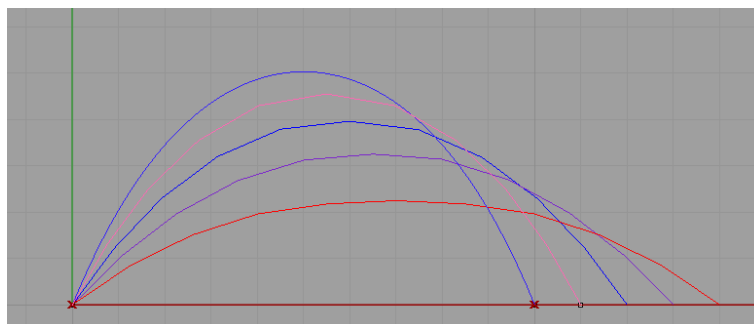


(a) Rett linje AC med samme lengde som kjedelinjen

(b) Deformert linje (rosa linje)

Figur 6.11: Deformasjon ved hjelp av bøyedeforasjon

gangspunkt i en annen type geometriske betingelser. I det første eksemplet var forankringspunktene gitte størrelser mens vi genererte ulike kurver med forskjellig buelengde ved å justere fjærstivheten (se figur 6.6b). I dette eksempelet justerte vi forankringspunktene. Vi kan dermed generere ulike kurver ved å forskyve posisjonen til forankringspunktene. Dette er den eneste parameteren vi har å arbeide med hvis vi ønske å beholde den konstante segmentlengden. Sammenlignet med

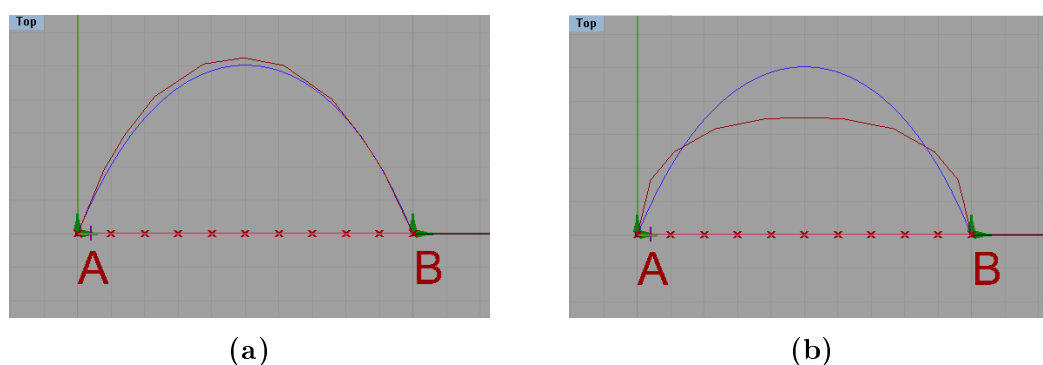


Figur 6.12: Kurver generert fra testeksempel 2. Lik buelengde men ulik kurvatur.

testeksempel 1 og figur 6.6b ligner fremgangsmåten i testeksempel to mer den faktiske oppføringsprosessen enn arkitektens tankeprosess. Det er sjelden en særlig realistisk situasjon at man vet buelengden men ikke buens kurvatur. Vanligvis er det buespennet som er gitt i prosjektets randbetingelser og kurvaturen som må bestemmes utfra andre funksjonelle og konstruksjonstekniske krav. Formingsprosessen i eksempel to krever at man på forhånd vet hvor lang buen skal være for deretter å sikte seg inn på opplagerpunktet.

Testeksempel 3 – forming ved hjelp av elementmetodeprogram.

Et viktig delmål i denne oppgaven er å utforske styreberegningsprogrammets potensial som interaktivt formgivningsverktøy innen parametrisk design. Vi starter denne undersøkelsen med å sammenligne de geometriske resultatene vi får hvis vi utfører de samme testene som i eksempel 1 og 2 men analysert av elementmetodeprogrammet Karamba. Først går vi tilbake til utgangspunktet i eksempel 1. Linjesegmentene som i de to første testeksempelene ble behandlet som elastiske fjærer gjøres nå om til bjelkeelementer festet til hverandre i noder. Systemet festes til opplagerpunktene A og B der det fastholdes for all translasjon men hvor rotasjon tillates. I elementprogrammet har bjelkeelementene en masse med en spesifikk tetthet. Det åpner opp for muligheten til å påføre en tyngdekraft som virker over hele bjelken istedenfor punktlaster i massepartiklene. Dette skulle gi en mer realistisk lastsituasjon enn i de foregående eksemplene. For geometrisk ikke-lineær analyse av deformasjoner har Karamba en «Large Deformations»-komponent som gir anledning til å justere parametrisert den maksimale deformasjonen som skal påføres og antall lastiterasjoner som skal påføres før modellens form oppdateres. For hver oppdatering nullstilles alle spenninger og modellen betraktes som en allerede noe deformert bjelke som får lasten påført på nytt, men denne gangen har kraften en annen virkning siden den virker på et system med en annen form (se også kapittel 5.6.6. Den deformerte bjelken har en tilsynelatende god bueform på figur

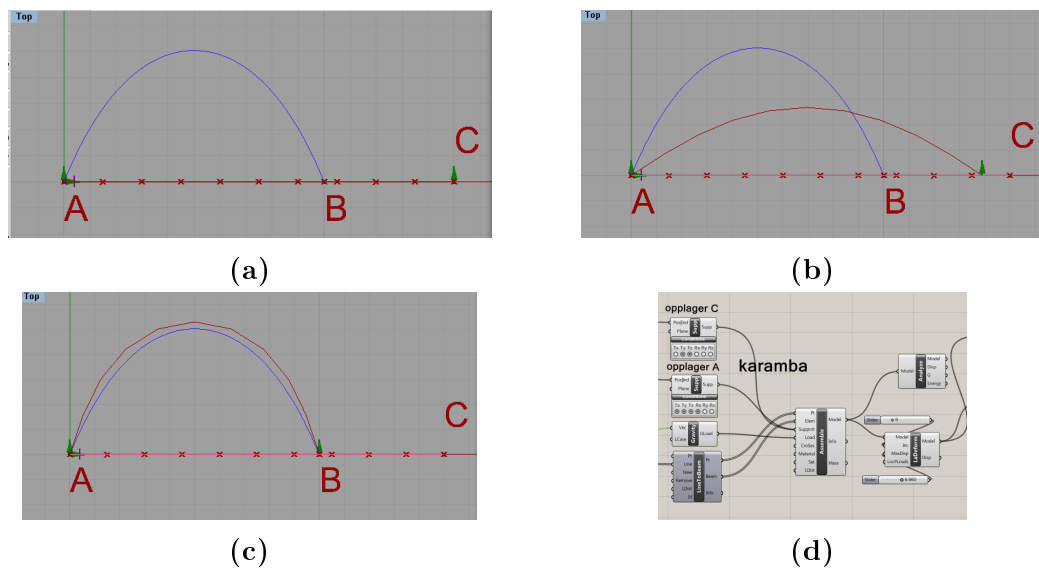


Figur 6.13: Rød linje: Deformert bjelke AB, ikke-lineær analyse i Karamba

6.13a, men deformasjonsprosessen frem til denne formen vitner om en uregelmessig deformasjonsprosess med mange åpenbart usannsynlige konfigurasjoner, illustrert i figur 6.13b. En gjentakelse av eksempel 2 i Karamba gir lignende erfaringer.

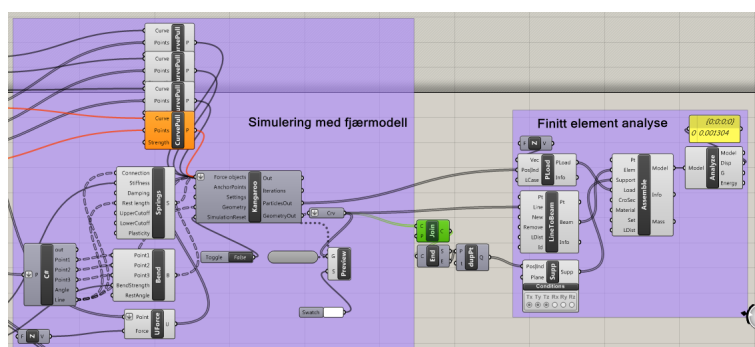
Testeksempel 4 – Dynamisk relaksasjon og informasjonsflyt

Som en foreløpig slutning etter de innledende testene virker partikkel-fjær-modellen best egnet som formgivningsverktøy, både hva gjelder fleksibilitet og geometrisk

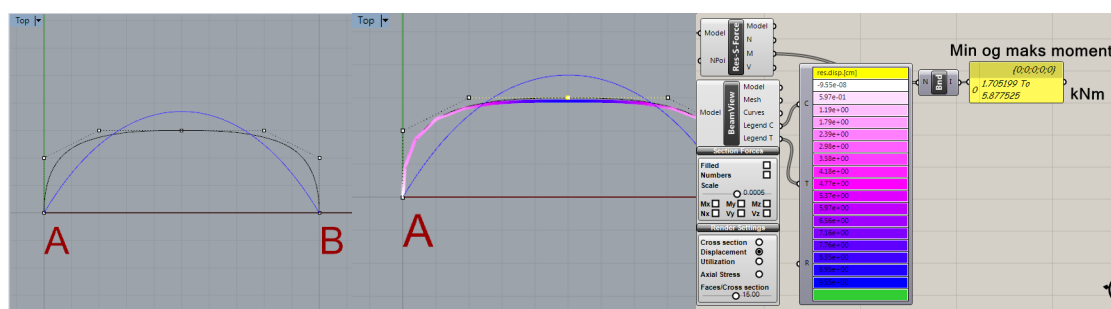


Figur 6.14: (a-d) Rød linje: Deformasjon av bjelke med rullelager ved høyre opplager.

presisjon. For så store deformasjoner det er snakk om her gir numeriske beregninger basert på eksplisitte løsningsmetoder den beste representasjonen av geometrien. Men Karamba-analysen rommer mye informasjon som ennå ikke er blitt dratt nytte av. For store deformasjoner blir feilkildene for store til å bruke det som selvstendig formgivningsverktøy ved hjelp av ikke-lineær geometrisk analyse. Men vi kan derimot bruke mer tradisjonell lineær analyse til å peile oss inn på de mer fordelaktige formene som fjær-modellen genererer. Her kommer det parametriske aspektet ved Karamba til sin rett siden programmet fungerer interaktivt på samme plattform som både tegne- og simuleringsverktøyet. Ved å legge inn f.eks. fargekoder for de kritiske konstruktive aspektene man ønsker å ta hensyn til under prosjekteringen kan man for eksempel justere fjær-modellen parametriske på bakgrunn av informasjonen som elementanalysen tilfører simuleringen. Dette eksempelet tar for seg ikke bare ett instrument men en prosess som involverer flere etapper i en mulig parametriske utformingsprosess. En NURBS-kurve (i svart) med en antatt mer gunstig form enn den analytiske linjen (i blått) analyseres i Karamba. Beregningen viser at buen blir utsatt for store momentpåkjenninger på midten av spennet (se figur ?? c). For å forbedre formen kan arkitekten flytte på kurvens kontrollpunkter i tegneprogrammet. Karamba-analysen kan også kobles til fjærmodellen og analysere fortløpende formene som genereres i simuleringen. Lar vi denne fremgangsmåten fortsette vil kjedelinjen til slutt nås. Vi er tilbake til utgangspunktet og teknikken kan synes triviell. Men når buen skiftes ut med en dobbelkrum overflate er ikke formen en slik relaksasjon fører til like opplagt. I en praktisk formgivningsprosess



Figur 6.15: Sammenkobling i GH mellom fjærmodell og FEM-program



Figur 6.16: (a-c) NURBS-kurve (svart) med påført vertikalkraft analyseres av Karamba

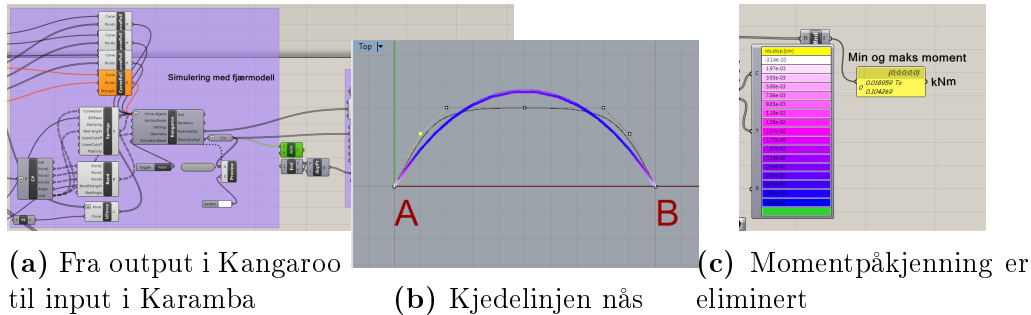
kan det ved enkelte anledninger være stimulerende å frigjøre seg fra nettet og jobbe med det mest formbare verktøyet, NURBS-overflaten i Rhino, for deretter å omdanne formen til en optimalisert gitterkonstruksjon.

Testeksempel 5 - Optimaliseringsprosesser og stokastiske metoder.

I de eksemplene over den en analytiske løsningen hatt en linjelengde på 15 meter som referanse. Men i en virkelig prosjekterings-situasjon har vi sjelden en slik referanse. Spennet på 10 meter er vanligere å ha som geometrisk betingelse. Vi så i eksempel 1 at vi med kangaroo lett kan generere ulike kjedeformede kurver som alle har samme spenn men med ulik buelengde og kurvatur. I eksemplene er buelengden satt til 15 meter, men kunne vi ha valgt en annen buelengde og fått en sterkere konstruksjon? Kangaroo kan generere momentgunstige former, men andre hensyn spiller også rolle for konstruksjonens stabilitet. En konstruksjon er lett når den kan bære en stor last i forhold til sin egenvekt. En formsterk konstruksjon muliggjør slanke materialer eventuelt store spenn. Denne informasjonen kan vi ikke hente ut av Kangaroo men denne informasjonen er også nyttig i formgivningsprosessen av et gitterskall. Høy kurvatur gir inntil et visst nivå formsterke konstruksjoner men



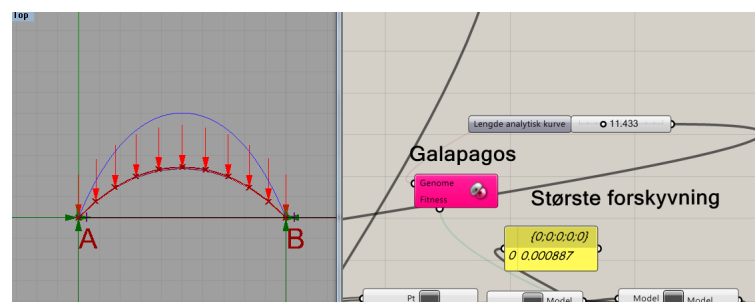
Figur 6.17: Justering for å redusere momentpåkjenning



(a) Fra output i Kangaroo til input i Karamba (b) Kjedelinjen nås (c) Momentpåkjenning er eliminert

Figur 6.18: (a-c) NURBS-kurve (svart) med påført vertikalkraft analyseres av Karamba

krever svakere materialer (materialer med lavere tverrsnitt). Når vi går over i tredimensjonale bæresystemer kan denne avveiningen i stor grad påvirke formen som kan prosjekteres. Vi kobler den analytiske linjen til FEM-programmet Karamba for å vurdere ulike kurvers egenskaper. Kurven deles inn i like lange segmenter og den påføres en punktlast i hver node. Vi kan gjøre buelengden til en justerbar parameter og be algoritmeløseren Galapagos finne bjelkelengden som gir den laveste deformasjonen. Algoritmeløseren Galapagos komme først til sin fulle rett



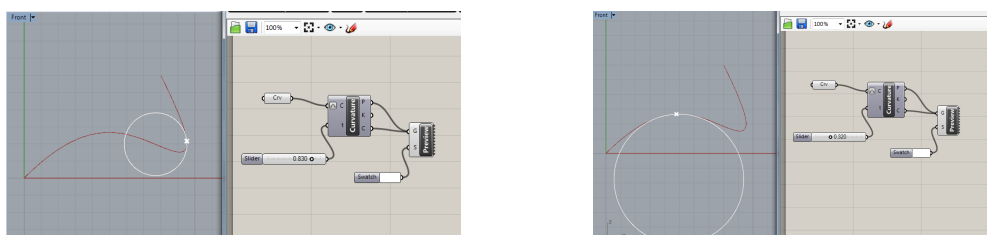
Figur 6.19: Buelengden 11,4 meter gir den minste deformasjonen i Karamba.

når flere variabler skal kombineres for å gi et optimalt resultat, men den er enkel å bruke og finner fort fram ønskede verdier for enkle beregninger – selv om man

tar «monteringstiden» for å sette opp modellen med i regnskapet. I en virkelig situasjon er også reaksjonskreftene en viktig variabel for å evaluere en bueforms fortrinn fremfor en annen.

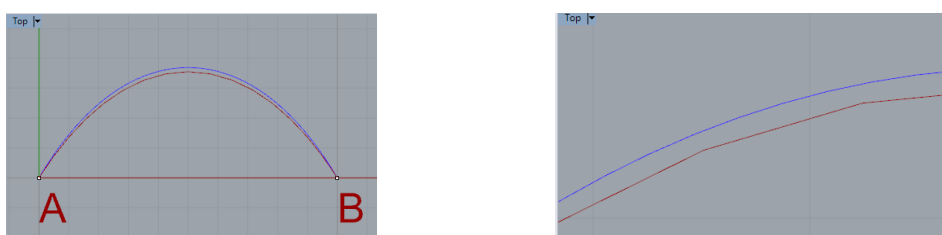
Testeksempel 6 - Etablering av kurvaturindikator.

Når vi analyserer kurvene med elementmetoden er det under forutsetning om et lineært forhold mellom spenning og tøyning. I oppføringsfasen oppstår det bøyepenninger i lamellene som følge av deformasjonen av det flate rutenettet. Denne bøyepenningen avtar riktignok i stor grad etter hvert som følge av treets relaksasjon (se kapittel Mannheim). Det er likevel en svakhet ved modellen at denne bøyepenningen ikke fanges opp automatisk i elementmetodeprogrammet. I formgivningsfasen er det nyttig å få en tidlig tilbakemelding om hvor høy kurvatur man er i ferd med å tegne inn i konstruksjonen, hvilken tverrsnittshøyde man eventuelt må gå ned til som følge av denne kurvaturen. I Grasshopper finner vi en funksjon som evaluerer en parametrisk kurves kurvatur. Denne funksjonen kan ikke uten vi-



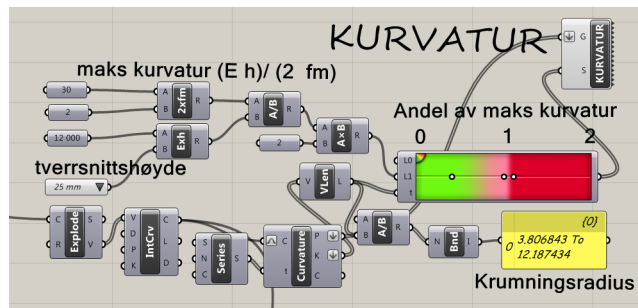
Figur 6.20: Sirkel med radius lik kurvens krumningsradius ved et gitt punkt.

dere anvendes på fjærmodellene siden de består av segmenter som bare kan tøyes i aksialretning, med andre ord enhver kurve fra fjærmodellen vil bli analysert som mange små segmenter uten kurvatur, uansett hvor finindelt fjærmodellen er. For

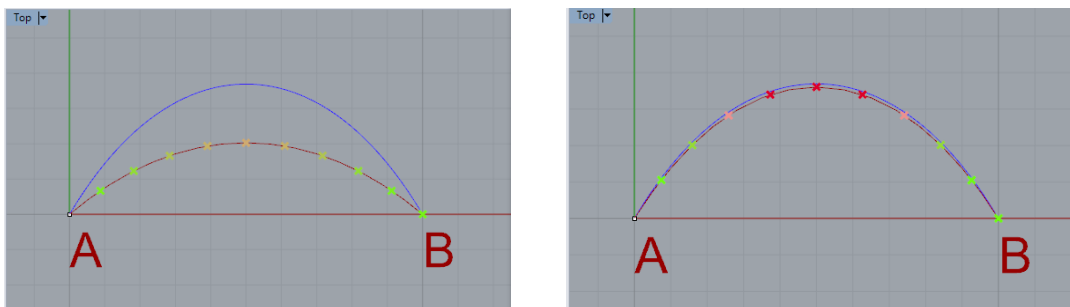


Figur 6.21: Kontinuerlig funksjon (blå linje) og diskretisert modell (rød linje).

å lage en grafisk fremstilling av kurvaturen som er enkel å jobbe med i formgivningsprosessen, blir segmentene gjort om til en kontinuerlig kurve ved hjelp av en interpoleringsfunksjon som deretter får kurvaturen evaluert gjennom en fargeskala.



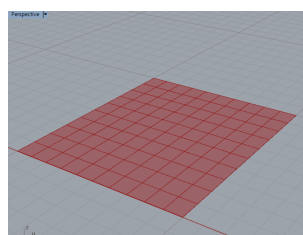
Figur 6.22: Skript for visning av kurvatur under simulering



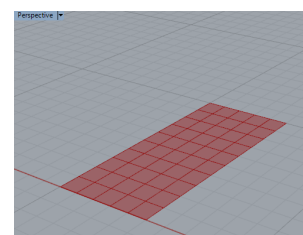
Figur 6.23: Fargekode for kurvatur

Figur 6.23 viser en evaluering av kurvatur der fargeskalaen baserer seg på karakteristiske materialegenskaper for konstruksjonstre i styrkeklasse C30 og en tverrsnittshøyde på 25 mm. Vi ser at for å unngå fare for brudd i oppføringsfasen må kurvaturen minkes.

6.3.2 Modellering av gitter



(a) 10 x 10 m

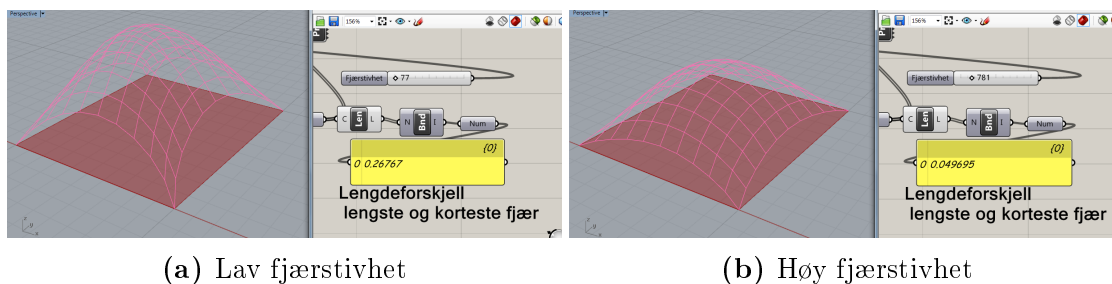


(b) 10 x 5 m

Figur 6.24: Testgitre.

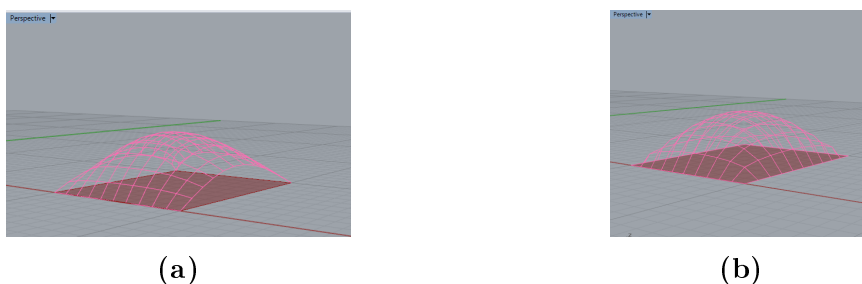
3D-eksempel 1 - skallform ved hjelp av aksialtøyning

Vi gjentar testen i eksempel 1 med rutenettet i figur 6.24a. Rutenettet er blitt definert til en partikkel-modell der linjene mellom partiklene er fjærer som kan tøyes i aksialretningen. Mens en linje har endepunkter har et gitter endelkanter, noe



Figur 6.25: Skallformer kan genereres ved å variere fjærstivheten.

som gir mulighet for mange forskjellige konstellasjoner av forankringspunkter som igjen gir nye skallformer. Denne modellen innbyr til mange ulike skallformer. Men

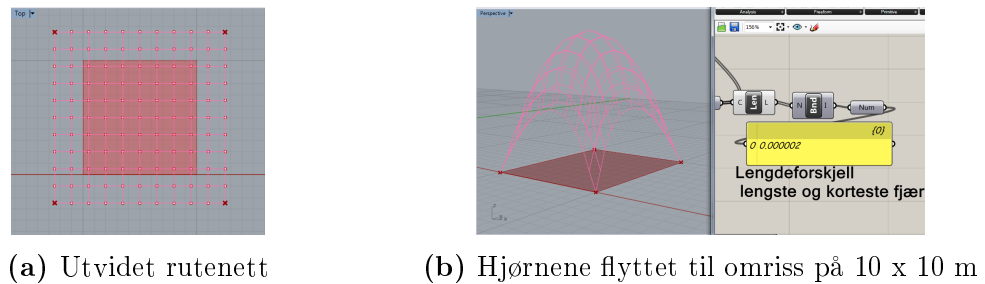


Figur 6.26: Skallformer kan genereres ved å endre forankringspunkter.

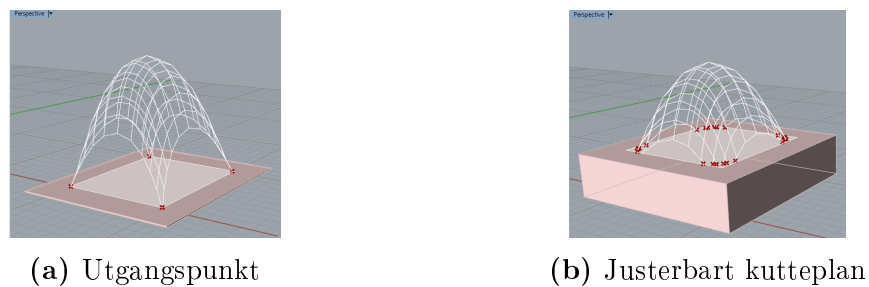
vi støter på det samme problemet som i eksempel 1. Posisjonen til knutepunktene er ikke presis, noe som også kan ha stor påvirkning på formen hvis man velger varianter med frie endekanter (se for eksempel figur 6.26b).

3D-eksempel 2 – skallform ved hjelp av bøyedeformasjon.

I tråd med vilkårene i testeksempel 2 i kapittel 6.3.1 utvides rutenettet til 15 x 15 meter. Vi setter på en liten vertikalkraft for å få kuppelen rettet oppover, setter hjørnepunktene i riktig posisjon og skrur av kraften. Nå kan vi få en figur med frie endekanter med knutepunkter i riktig posisjon. En enkel måte å teste forflytninger i høyderetning er å lage en plattform med prosjektets omriss tegnet inn. Denne plattformen kan gjøres justerbar i høyderetning og man kan fort se hva slags former som oppstår hvis modellen beskjæres i ulike høydenivåer. I sin mest

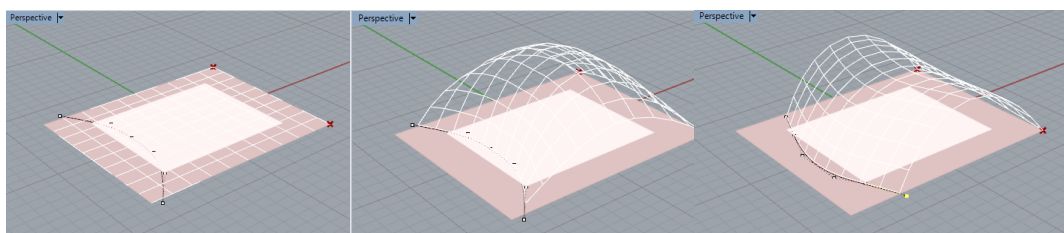


Figur 6.27: Skallform ved hjelp av forskyvning av forankringspunkter.



Figur 6.28: Eksperimentering med beskjæring i ulike høydenivåer og justering av forankringspunkter (røde punkter).

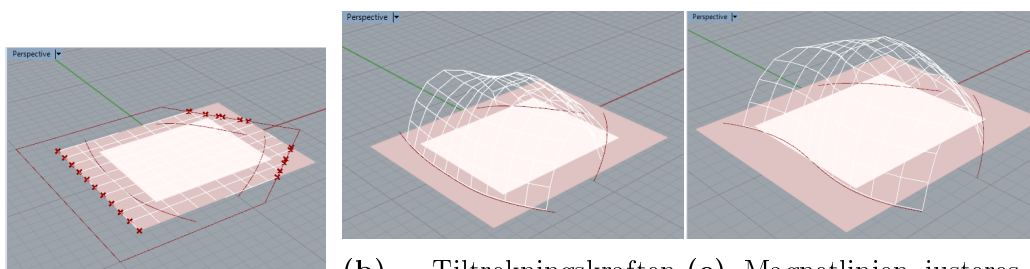
rudimentære versjon er modellen i dette testeksempelet noe tungvint å bruke i praktisk modellutforming, men den har attraktive kvaliteter for oss som gjør at det er verdt å undersøke metoder for å gjøre flyttingen av forankringspunktene mer smidig og brukervennlig i praktisk modellering. En måte å gjøre dette på er å legge inn kommandoer for forskyvningsprinsippene. Istedenfor å definere forankringspunkter som nettet henger fast i, kan vi definere en kraft som skal trekke valgte punkter mot en geometrisk størrelse – det kan være et punkt, en linje eller en flate. For vårt foretagende er det spesielt interessant å kunne sette opp omrisslinjer som vi vil at nettet skal bevege seg mot. Denne funksjonens betydning for formbarheten ligger i muligheten til å justere denne kraftens styrke og retning etter at simuleringen er startet. Vi modifiserer eksempelet vårt ved å erstatte forankringspunkter langs den ene siden med en forankringskraft. Vi definerer videre hvilke punkter på modellen som denne kraften skal virke på og hvilket punkt denne kraften skal ha som sentrum for tiltrekningskraften. Man kan se på denne funksjonen som en magnet. Man velger hvor magneten skal plasseres og hvilke deler av modellen som skal være magnetiske. Vi kan for eksempel legge inn en slik magnetisk linje definert av en NURBS-kurve tegnet inn i Rhino. Hvis man i tillegg legger inn muligheten for å forhåndstilpasse det kvadratiske rutenettet kan man generere et vell av momentgunstige former mens simuleringen pågår, noe som ville



(a) Kurve i Rhino får "magnetkraft" (b) Tiltrekningskraften skrues på (c) Magnetlinjen justeres mens simuleringen pågår

Figur 6.29: Formutforskning med forskyvbare forankringslinjer

ha vært svært arbeidskrevende med fysisk modellering eller tradisjonelle DAK-verktøy. Denne teknikken er blitt brukt av blant annet Fiore og Foca Lancia til å oppføre flere testgitterskall i mer beskjedne formater enn eksemplene i kapittel 3⁶



(a) Kutting av rutenett (b) Tiltrekningskraften skrues på (c) Magnetlinjen justeres mens simuleringen pågår

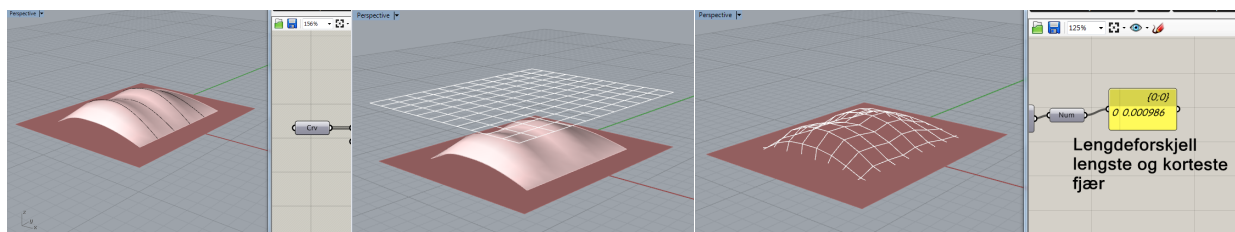
Figur 6.30: Med justerbar avgrensning av rutenettet kan enda flere formes genereres fra samme simulering.

3D-eksempel 3 - Tsjebysjov-nett ved hjelp av fjærmodell

Hvis vi ønsker å ta utgangspunkt i en allerede eksisterende form byr den tredimensjonale formen på noen geometriske problemer når det gjelder posisjoneringen av knutepunktene. Daden optimale buelengden ble beregnet (se figur ??, delte vi enkelt den analytiske kurven inn i ti like lange segmenter. Denne operasjonen kan det være ønskelig å ha tilgjengelig også når man arbeider med en tredimensjonal form. Når man arbeider med organiske, dobbelkrumme former som skal deles inn etter det kinematiske gitterskallets premisser står vi overfor ikke bare matematiske problemer som må løses men også overfor mange valgmuligheter som buen skåner oss for. Som vi har vært inne på i kapittel 5.7, har det vært utført flere akademiske

⁶for mer informasjon: www.gridshell.it, med linker til videoer. Av videoene fremgår det at denne teknikken er brukt selv om den digitale modellen ikke er tilgjengelig for publikum.

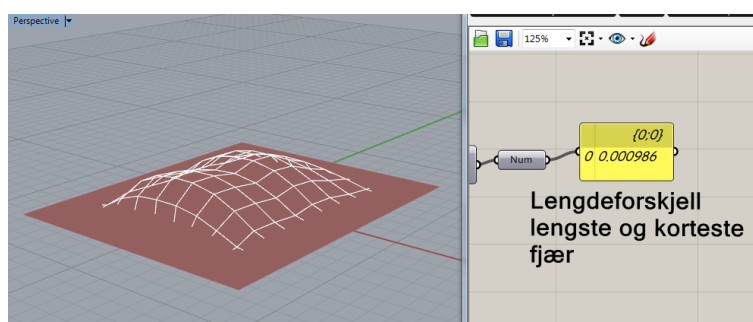
master- og doktorgradsarbeider i perioden 2007-2011 som har hatt denne utfordringen som målsetting. Disse arbeidene er basert på Rhinos NURBS-kurver men er ikke integrert i grasshopper-plattformen og drar dermed ikke nytte av fordelene som den parametriske arbeidsmåten åpner opp for. Vi bruker testrutene våre fra eksemplene over til å prøve å etablere et prinsipp som kan gjenskape denne geometrien på en hvilken som helst dobbelkrum form. Nå er ikke utfordringen primært å skape en optimal form, men en korrekt gittergeometri på en gitt form. For bedre å evaluere simuleringens presisjon lager vi derfor en konstruksjonsmessig ikke-optimal form først, en form som ikke følger av det hengende nettet. For selv om det hengende nettet er en fordelaktig form er den ikke absolutt nødvendig for å kunne prosjektere en skallform. I de historiske eksemplene er gitterskallene i Downland og Savill Garden eksempler på dette. Kanskje er vi i den designsituasjon hvor vi ønsker å bruke den nest beste formen i stedet. Vi tegner en forsøksmodell i Rhino som måler 10 x 10 meter og har en uregelmessig kurvatur. I den analoge



(a) Uregelmessige kurver (b) Fjærmodell senkes ned (c) Fjær-systemet draperes til overflate på skallet på skallet rarer skallformen

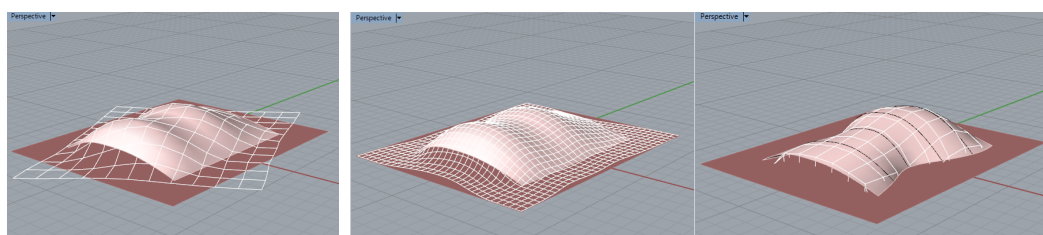
Figur 6.31: Tsjebysjov-nett på amorf, dobbelkrum overflate.

fremgangsmåten kan man lage et Tsebychev-nett ved hjelp av passer-teknikken beskrevet av Frei Otto og hans kolleger i IL-tidsskriftene, og forsøkt gjenskapt digitalt i tidligere nevnte arbeider. Hvis man skal gjenskape denne prosedyren ved hjelp av en partikkel-fjær-modell er det mer rasjonelt å plassere et rutenett på oversiden av skallet og la det falle ned på overflaten. Denne fremgangsmåten minner om oppføringsteknikken ved Downland, der det flate rutenettet ble senket ned på plass ved hjelp av tyngdekraften og et helt batteri med hydrauliske jekker. Rutenettet gjøres først om til en fjærmodell uten forankringspunkter. Når man setter på en vertikal kraft vil rutenettet være i fritt fall helt til det treffer skallet. Partiklene i fjærmodellen tas i mot av overflaten ved hjelp av en definisjon i Kangaroo-simulatoren, «CollideMesh», som skaper en tiltrekningskraft mot en flate. Ved at punktene holdes sammen av fjærer kan Tsjebysjov-nettet gjenskapes ved å velge en veldig høy fjærstivhet. I tillegg til variasjon med form, kan vi også variere maskevidden og ikke minst gitterretningen. Ved å koble fjærmodellen ~Karamba kan vi få umiddelbar respons på disse formatenes egenskaper og korrigere



Figur 6.32: Rutenett med korrekt geometri over tilfeldig, dobbelkrum form (målingen av lengdeforskjell omfatter hele det opprinnelige rutenettet).

for svake punkter i formen. Ved variasjon av maskevidden oppdager vi fort at simuleringer med mange partikler og fjærer er tar betraktelig lenger tid på en vanlig PC. Det kan derfor bli nødvendig å forenkle modellen ved å modellere med større maskevidde når simuleringene kjøres – akkurat som Frei Otto og hans kolleger var nødt til da de lagde sine analoge trådmodeller.

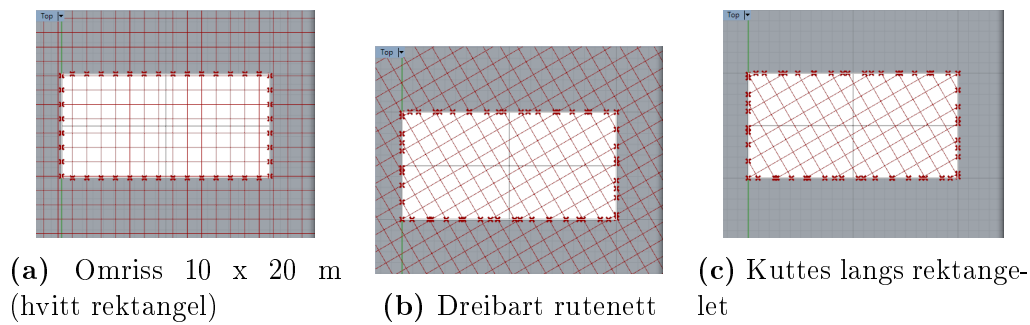


(a) Endret gitterretning (b) Endret maskevidde (c) Endret skallform

Figur 6.33: Variasjonsmuligheter for draperingsteknikken.

3D-eksempel 4 - Gitterretning som parameter

Testeksempel 5 viste at høy kurvatur gir høy styrke inntil et visst nivå. Lav kurvatur gir store opplagskrefter og øker faren for bukling. Det er viktig å huske på at kurvatur i sammenheng med styrke betegner lamellens kurvatur - ikke skallformens kurvatur. Ved å endre gitterretningen kan man også endre minste og største krumning og utnyttelsesgraden til lamellene. For å undersøke gitterretningens betydning etablerer vi et rutenett som kan dreies og danne et rektangulært gitter. En vertikal kraft settes på fjæromodellen. Avhengig av gitterretningen får kurvaturen ulik fordeling. Når gitterretningen er parallell med sidekantene får de langsgående lamellene liten kurvatur, mens de kryssende lamellene får en høy kurvatur. Ved å dreie gitterretninger 45 grader er det fremdeles kritiske verdier på gitteret men de

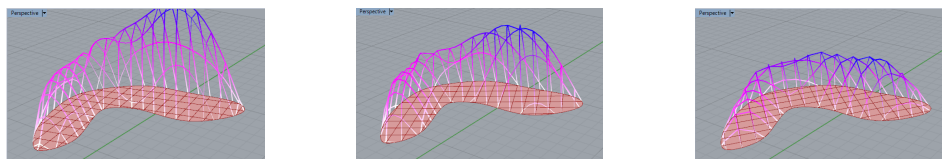


Figur 6.34: Utgangspunkt for å teste gunstig gitterretning.



Figur 6.35: Rødt: kritisk verdi for kurvatur.

røde sonene fordeler seg annerledes. Nå er det de spisse hjørnene som viser kritisk verdi. Ved for eksempel å kombinere denne teknikken med ulike beskjæringsteknikker beskrevet ovenfor (se figur 6.28b) kan gitterets form justeres og forbedres ved at man omformer (og ikke bare omdimensjonerer) mens simuleringen pågår. Har man en gitt form kan man også foreta en enkel stokastisk test med Galapagos for å finne gitterretningen som gir den laveste deformasjonen. I testen i ?? vurdere



Figur 6.36: Sterkeste gitterretning for et amorft omriss.

Galapagos ulike innstillinger av forskyning i x- og y-retning samt rotasjon i xy-planet av gitteret for å finne den optimale kombinasjonen av verdier. Testen evaluerer et flatt gitter (røde linjer) for deformasjon (deformasjonen på figurene i ?? er skalert opp). Den er i så måte ingen eksakt måling av faktisk deformasjon, men en vurdering av ulike formers styrke. Optimaliseringsprosessen kan gjøres mer sofistikert ved for eksempel å innlemme maskevidde og tverrsnittsdimensjoner for å vurdere

materialforbruk.

Oppsummering - sterke og svake sider

Etter disse innledende testene følger noen betraktninger om hvilke styrker og svakheter de teknikkene utmerker seg med.

- FEM-programmet virket ikke tilfredsstillende som selvstendig formingsverktøy for denne type modellering. FEM-programmet kan til gjengjeld levere nyttig informasjon ved hjelp av lineær analyse av fjærmodellsimuleringen.
- Fjærmodellering ved hjelp av aksialtøyning. Denne teknikken gir gode manøvreringsmuligheter mens simuleringen pågår. Den egner seg godt i en utforskningsfase hvor volumbetraktninger er viktigere enn presis informasjon om knutepunkter.
- Fjærmodellering ved hjelp av bøyedeformasjon. Denne teknikken gir bedre presisjon enn aksialtøyningssimuleringen. Den er imidlertid mindre fleksible når det gjelder endringer underveis i simuleringen. Den fordrer i større grad at brukeren vet på forhånd hvilke former som skal oppnå og, ikke minst, hvordan en slik skallform ser ut når den brettes ut til et flatt rutenett.
- Drapering ved hjelp av fjærmodell. Draperingsteknikken fungerer bra for å lage Tsjebysjov-nett over en amorf, dobbelkrum overflate. Den gir presis geometri for en rekke former, dog ikke for enhver form da skjevheter kan oppstå fordi nettet sklir på overflaten ved enkelte ugunstige former. Den gir ingen informasjon om skalloverflatens statiske egenskaper.
- Dynamisk relaksasjon ved hjelp av fjærmodell. I den parametriske modellen kan fjærmodellen også brukes til å utjevne uregelmessigheter i en forhåndsutformet skallform. Denne teknikken fungerte tilfredsstillende slik at modell for kraftdensitetsmetoden ikke ble vurdert.

6.4 Modelleringsstrategier

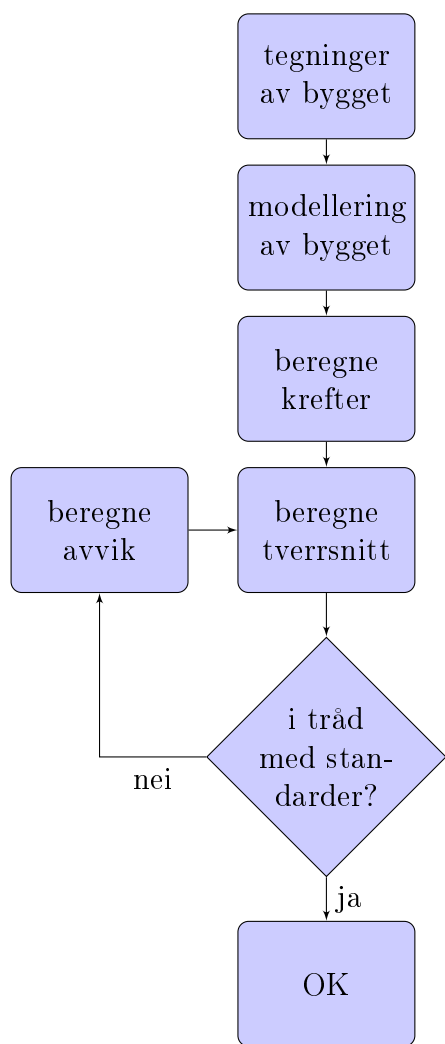
De ulike teknikkene vi har undersøkt har varierende egenskaper hva gjelder anvendbarhet og presisjon, men det er ikke én teknikk som peker seg ut som den beste kandidaten. Med aksialfjær-modellen kan vi generere mange former som alle har gode membranegenskaper og som forholder seg til arkitektens mest naturlige mentale «forankringspunkter» - omrisset til den oppførte konstruksjonen. Hvis vi former ved bøyedeformasjon uten, eller med minimal, aksialdeformasjon, etterligner vi den faktiske oppførelsesprosessen og får en presist formet gitterskall med

knutepunktets posisjon og geometri i frie endekanter, men teknikken krever at brukeren sikter seg inn på en forutbestemt posisjon og beregner på forhånd hvor lange lameller som trengs. Noe av styrken til den parametriske modellen slik den er blitt brukt i disse innledende testene er at man har alle verktøyene samlet på det samme digitale lerretet. Ikke bare kan man jobbe på den samme filen med ulike verktøy, slik vi kjenner det fra utviklingen innen BIM med IFC-formatet, man kan også jobbe med ulike verktøy samtidig – for eksempel fjærmodellen basert på dynamisk eksplisitt ikke-lineær analyse og FEM-beregningen, basert på lineær regneeffektiv analyse. Basert på undersøkelsene i dette kapitlet kan vi tenke oss en mulig strategi for å nå målet for oppgaven. Hovedmålet er å lage en digital modell som illustrerer gitterskallets arkitektoniske og konstruktive egenskaper vurdert i et konkret byggeprosjekt. Modellen kan senere eksporteres til tradisjonelle DAK- og FEM-verktøy som for eksempel REVIT og ROBOT⁷. Denne operasjonen er blitt illustrert i oppgaven til Andresen[2]. I krigskunsten heter det at man tar strategiske beslutninger når man er på en kanonlengdes avstand eller mer og taktiske beslutninger når man er innenfor kanonens rekkevidde. Etter noen detaljerte undersøkelser av teknikker i små formater kan vi ta med oss resultatene av disse studiene opp på et mer overordnet strategisk nivå for å sette opp en løsningsstrategi, med mulighet for taktiske manøvrer underveis, som kan brukes på et konkret utformingseksempel. En komprimert versjon av en læreboks skjematisk fremstilling av dimensjoneringsprosessen tjener som et utgangspunkt[42].

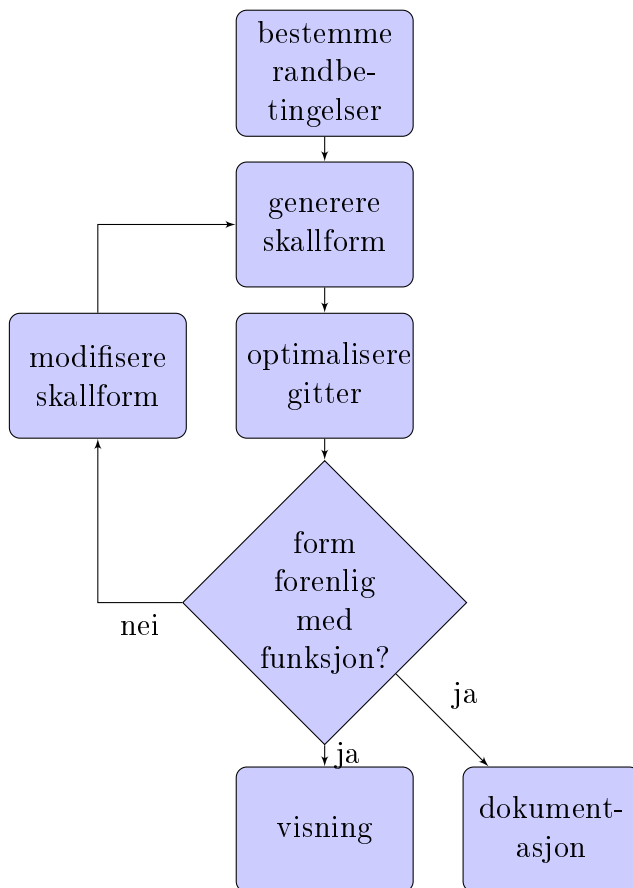
Skjematisk satt opp følger den tradisjonelle dimensjoneringsprosessen etapper som følger etter hverandre med liten grad av sammenvevning mellom arkitektens og ingeniørens arbeidsoppgaver (se figur ??). De fleste pilene i flytdiagrammet peker bare én vei og prosessen blir tegne, modellere, beregne. I praksis er oppgavene til arkitekt og ingeniører i større grad vevd inn i hverandre, særlig etter dagens utvikling innen BIM. Det er likevel verdt å merke seg at det for gitterskallet er et mye større *behov* for en interaksjon mellom dimensjoneringsprosessen og formgivningsprosessen, enn den tradisjonelle prosjekteringsprosessen legger opp til. Med en parametriske prosjekteringsprosess er det også en mye større mulighet for en slik interaksjon. Fremgangsmåten er i mye større grad en sirkulær prosess mellom funksjon, form og dimensjoner. Interaksjonen med startmodellen er en *omforming* snarere enn en omdimensjonering.

Av gitterskall oppført i den parametriske epoker det teknikken i 3D-eksempel 2, bøyedeforrasjon ved hjelp av forflytning av kontrollpunkter, som er mest utprøvd hittil. Den gir god presisjon, men kan være vanskelig å bruke som kreativt formingsverktøy. Man må starte med geometriske betingelser som kan være vanskelige å forestille seg i begynnelsen av et prosjekt - man må kunne se for seg hvordan det ønskede gitterskallet ser ut i flat tilstand og så må man ta det man

⁷For mer informasjon: se www.autodesk.no



Figur 6.37: Komprimert flytdiagram tradisjonell prosess



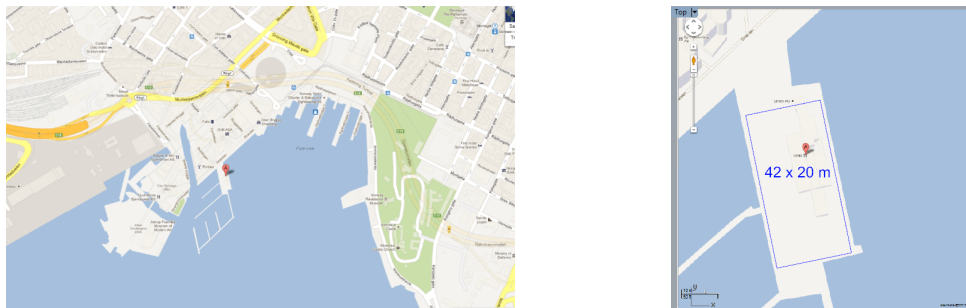
Figur 6.38: Flydiagram modellering av gitterskall

får når simuleringen starter. Denne oppgaven ønsker å prøve ut en annen strategi som bedre tar vare på de kreative aspektene som aksialfjærmodellen og den rene skisseutformingen i Rhino har som styrke. Strategien blir derfor å bruke disse teknikkene til å lage en skallform, en digital forskaling (3D-eksempel 1) som optimaliseres ut ved hjelp av interaktivt elementmetodeprogram. Deretter draperes forskalingen (3D-eksempel 3) med et rutenett i sterk gitterretning (3D-eksempel 4) og optimaliseres ved hjelp av dynamisk relaksasjon (testeksempel 4).

6.5 Et Modelleringsseksempel

6.5.1 Bakgrunn for prosjektet

For å utforske hvordan en prosjekteringsprosess kan arte seg med verktøyene og teknikkene i denne oppgaven skal vi til slutt finne formen til et tenkt restaurantprosjekt i Oslo. Utformingen av skallkonstruksjonen er hovedfokus men noen relevante betraktninger av funksjonell art trekkes inn for å belyse samspillet mellom arkitektoniske og ingeniørrelaterte problemstillinger når en slik konstruksjon skal prosjekteres. Restaurantprosjektet befinner seg på Aker Brygge i Oslo, på en tomt hvor vi i dag finner restauranten Onda. Utbygger ønsker seg en slank takkonstruksjon som tillater store spenn i restaurantens rom og som har et formmessig særpreg.



Figur 6.39: Tomtas nærområde og dimensjoner.

6.5.2 Analyse av tomta – beliggenhet og spesielle kvaliteter

Tomta ligger i et utpreget restaurantstrøk, med mange konkurrenter i umiddelbar nærhet. Mange av restaurantene er i en litt eksklusiv prisklasse og området tiltrekker seg mange gjester som ønsker å gå på restaurant for å markere en spesiell anledning. Tomta har noen unike kvaliteter sammenlignet med restaurantene ved siden av som det kan være verdt å utnytte. Mens de andre restaurantene ligger

på rekke og rad langs brygga med en forholdsvis bred gågate mellom seg og havet ligger denne tomta på en liten arm som strekker seg ut i sjøen, i tilknytning til en marina for fritidsbåter. Området er ellers, i likhet med selve byggetomta, en flat sone av byen langs sjøsiden.

Romprogram

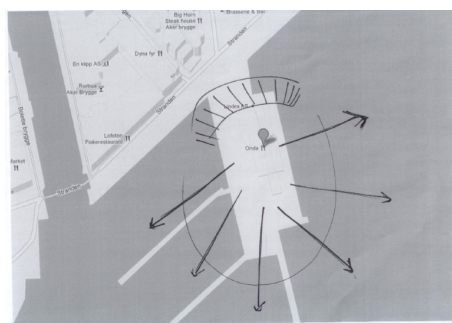
Byggetomta rommer et rektangel som måler 42 x 20 meter (se figur ??). En del av arealet tilhører imidlertid marinaen. Et indikativt romprogram følger under.

Sone	Areal, mm ²
Kjøkken	120
Toalett	50
Inngang/garderobe	30
Spisesone inne	300
Spisesone ute	150
Sum	650

Tabell 6.1: Romprogram

Innsyn og utsyn

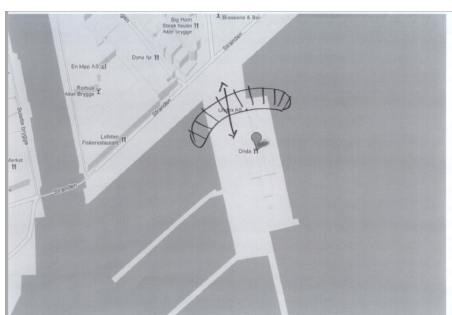
Tomta innbyr til en annen sjøopplevelse enn mange av konkurrentene ved siden av. I en halvsirkel fra nord til sør via vest har tomta et attraktivt utsyn mot fjorden. Mot nord ser man inn mot sentrum og Oslo rådhus. Det er kanskje det relativt sett minst attraktive utsynet i denne halvsirkelen – i hvert fall hvis vi ønsker å rendyrke fjordutsikten som opplevelse for dette spisestedet. Det er også skyggesiden i de fleste restauranters kjernetid. Mot øst har man en attraktiv utsikt mot festningen og øyene i den indre delen av Oslofjorden, mens man videre mot sør kan ser ut mot øyene i den indre delen av Oslofjorden og videre ut mot sjøen helt til man møter Tjuvholmen og det nye Astrup Fearnley-museet. Mot vest har tomta eksponering mot de andre restaurantene og gågata langs bryggekanalen. Bygningsmassen strekker seg flere etasjer oppover og gjør denne himmelretningen mindre attraktiv lysmessig. Det er normalt sett ikke noe galt med å ha eksponering mot folkelivet for en restaurant, men for denne eksponeringen er det mange av konkurrentene som har en minst like god posisjon og er på ingen måte en del av tomtas særpreg. Ved å skjerme seg mot vest kan restauranten rendyrke de mer unike kvalitetene og gi gjestene en opplevelse av at stedet er en egen liten verden ute på utstikkeren.



Figur 6.40: prioriteringer for skjerming og utsyn

Soneinndeling – tomt og funksjoner

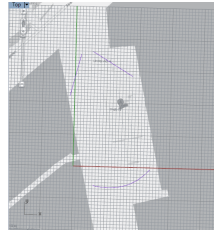
Tomta deles inn i soner som er egnet for de ulike funksjonene omtalt i romprogrammet. Inngangssonen er gitt fra tomteutformingen. Men den kan trenge en oppmykning. En smalere sone fungerer som en rituell overgang fra utenfor til innenfor, men det er viktig at den ikke er en barriere som virker avvisende, men et rom på andre siden av overgangen som tar de usikre og nølende i mot. Deretter



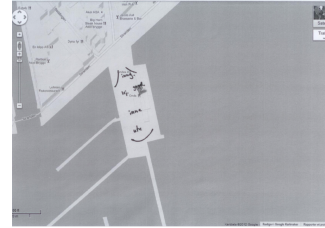
Figur 6.41: Inngangspartiet er i den skjermede sonen og kan lett bli avvisende

følger arealer som blir mer og mer attraktive som spisesoner. Umiddelbart etter inngangspartiet følger en sone som kan skjerme resten av tomta for innsyn fra gågata langs bryggekannten. Kjøkken- og andre nyttefunksjoner legges derfor i denne delen av tomta mens de to ytterste sonene vies ttil spisesoner, en innesone og en utesone. Ytterst på tomta plasserer vi en sone for uteservering. Her kan man sitte ved havet, skjermet for de nærgående og skuelystne. Her er det frie arealer for dem som ønsker å sitte i sola. Men det skal likevel være en del av stedet. De er fremdeles på restauranten. Som uteareal for et spisested kan det også være ønskelig med takutstikk over deler av utearealet som skjermer for vær og vind. Dermed kan utesesongen forlenges. Vi kan tenke oss at skallkonstruksjonen kan gå helt ned til bakken over deler av omrisset – også i spisesonen som skjerming for utearealene.

Ved å åpne opp taket enkelte steder kan bærekonstruksjonen fungere som solfiltrering, en ramme for utsikten, og en utstilling av spesiell konstruksjonsteknikk. Dermed får man en tilhørende romfølelse også av å sitte ute i solen.



(a) Lilla linjer: skjermingskanter



(b) Skjermingskanter og soneinndeling etter funksjon

Figur 6.42: Soneinndelinger

Foreløpige antagelser om form og konstruksjonsprinsipp

Av de historiske skallene vi har studert er det museet i Downland som ligger nærmest hva dimensjoner angår. Museet hadde en ganske avlang form som kan minne om den vi er stillet ovenfor. Vi kan som en foreløpig antagelse tenke oss at et dobbelt rutenett med lameller med dimensjonen 35 x 50 mm kan gi oss en tilstrekkelig sterk konstruksjon. For Downland kunne en maskevidde på 1 meter brukes flere steder uten at det satte konstruksjonens stabilitet i fare. Vi antar som et utgangspunkt at vi kan benytte vanlig norsk konstruksjonstre som blir sortert etter de samme kriteriene som for Downland, og at vi kan oppnå en dimensjonerende fasthet på 30 kN/mm², som egentlig er den karakteristiske fastheten. Med denne dimensjonen lagt til grunn har vi også en referanse for maksimal kurvatur som vi kan prosjektere med. Når det gjelder formen er det ikke like naturlig



(a) Boblehall, Kongsvinger tennis-klubb (Foto: Arne Huse)



(b) Peterskirken i Roma, foreviget av Piranesi [1748] (Wikimedia Commons)

Figur 6.43: Konvekse og konkave former

med Downland som inspirasjonskilde. Downland var et arbeidsatelier med over-

lys fra vindusbånd høyt oppe på taket. Inngangen har heller ikke som oppgave å lokke nye gjester inn i bygningen eller tilknyttede utesoner. Generelt kan skallkonstruksjonen lett få en utpreget bobleform – som en vinterhall på en tennisbane. Boblehallen på figur 6.43a har ypperlige membranegenskaper men er ikke fullt så imøtekommende. Man blir møtt med en konkveks form som fort kan få en avvisende karakter – i motsetning til den konkave formen som er mer imøtekommende. Et vanlig eksempel på denne kvaliteten er Petersplassen i Roma. Søyle radene danner armer som strekker seg imøtekommende ut for å omfavne den tilreisende (se figur 6.43b). Skallet kan dermed synes å ha et arkitektonisk handikapp allerede fra starten av. For en restaurant er det ønskelig med mer utsyn og en mindre konveks inngangssone enn det boblen har som grunnform. Når det gjelder vindusarealer har det vist seg fra de historiske eksemplene at glassflater går dårlig som kledning for et kinematisk gitterskall i tre. Lamellene har kontinuerlig bøyning som gjør glassdekke uforholdsmessig komplisert. For å tillate vindusflater og for å bryte opp bobleformen kan vi derfor skjele til Savill Garden der skallet er blitt løftet opp for å gi rom til vinduer. Prosjekter med amorf, organisk arkitektur får gjerne et mer eller mindre flatterende kallenavn. Mannheim er blitt kalt hvalen på grunn av de store dobbelkrummede dimensjonene og den grå, glatte overflaten. Savill Garden er derimot blitt kalt løvbladet, som vekker assosiasjoner til betraktelig lettere og slankere fenomener. En mulig løsning er derfor å heise taket opp på en stålramme som gjør det mulig med vindusvegger ned til bakken under taket. Basert på konstruksjonsformen og soneinndelingen kan vi tenke oss partier av tomta hvor skallkonstruksjonen, i motsetning til Savill Garden, kan gå helt ned til bakken. I noen retninger er det et attraktivt utsyn mens det i andre retninger er mer attraktivt å skjerme for innsyn. For utearealet er det også attraktivt med noe skjerming for vær og vind. Disse skjermingssonene kan kombineres med opplagersoner på bakkeplan for gitterskallet.



Figur 6.44: skisse for en mulig skallform

Oppsummering av tomteanalyse – ønskede funksjoner og kvaliteter for prosjektet

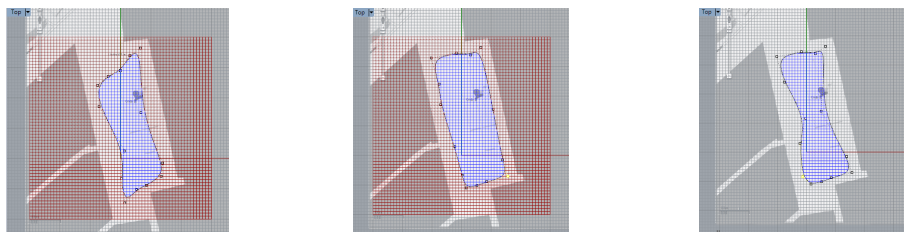
Ut fra denne første studien av byggetomta kan vi stille opp noen kvaliteter som prosjektet skal søke å gi spisestedet.

- Det ønskes en takkonstruksjon som er en selvstendig bærekonstruksjon og som kan omfavne inne- og uteareal og gjøre spisestedets ulike soner til en helhet.
- Det ønskes å vektlegge utsynet mot havet, og til en viss grad inn mot byen, som denne utstikkertomta har som spesielle kvaliteter. I motsetning til mange av de nærmeste konkurrentene ønskes det en delvis skjerming mot de nærmeste forbipasserende i gågata langs brygga. De andre restaurantene er godt plassert for dem som ønsker å se på folkelivet mens de spiser. Denne restauranten ønsker derfor å fokusere på nærheten til havet og utsynet i andre retninger enn mot gågata.
- Det ønskes en takkonstruksjon som kan bryte opp skillet mellom inne og ute, et tak som kan gi ulike grader av ly for utesonen slik at utesesongen kan forlenges samtidig som gjestene får en opplevelse av å sitte ute ved sjøen om sommeren.
- Det ønskes et inviterende inngangsparti som pirrer nysgjerrigheten og som gjør det uforpliktende å nærme seg – et inngangsparti med gradvise overganger mellom et innenfor og et utenfor for restaurantområdet.
- Det ønskes et bygg med arkitektoniske kvaliteter som skiller seg ut fra konkurrentene, et bygg som kan tiltrekke seg gjester i kraft av arkitektoniske egenskapene. Bygget bør ha en markert profil sett fra sentrum av byen som gir stedet et særpreg og en identitet.
- Det ønskes et bygg som gir gjestene en spesiell romopplevelse, enten de er inne eller ute, og en opplevelse av å være inne i en spesiell konstruksjon.

6.5.3 Simuleringer for utforskning av form

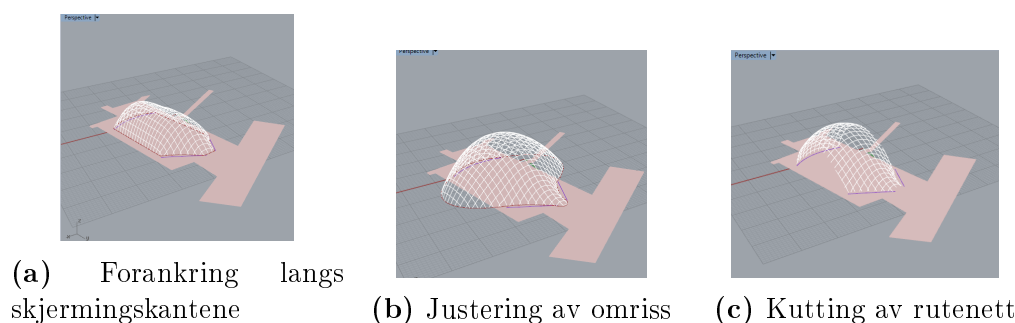
For å starte utforskningen av formen etableres først en enkel fjærmodell som kan generere mange forskjellige former. Med henvisning til flytskjemaet i ??, etableres prosjektets geometriske betingelser, som følger av tomteanalysen og romprogrammet. Prosjektet har som randbetingelser tre skjermingslinjer og et volum som rommer restaurantens funksjoner. Et rektangel med grunnflate 400 m^2 og høyde 3 m danner rammen for innearealene. Grunnflaten i dette volumet kan varieres noe hvis tilpassing kreves. Et tilsvarende volum for utearealet etableres også. Disse volumene tjener som en geometrisk betingelse for skallet da taket bør kunne omslutte disse volumene for å oppfylle de funksjonelle kravene. For å generere skallformer ut fra disse betingelsene (trinn 2 i flytskjemaet), etableres det en fjærmodell som, i motsetning til den mer etablerte fremgangsmåten, er basert på aksialtøyninger.

Først legges et stort rutenett utover hele prosjektområdet som kuttes og tilpasses prosjektets foreløpige omriss. Den delen av rutenettet som befinner seg innenfor omrisset har kobles til Kangaroo slik at den får partikkel-fjær-egenskaper. Nettets



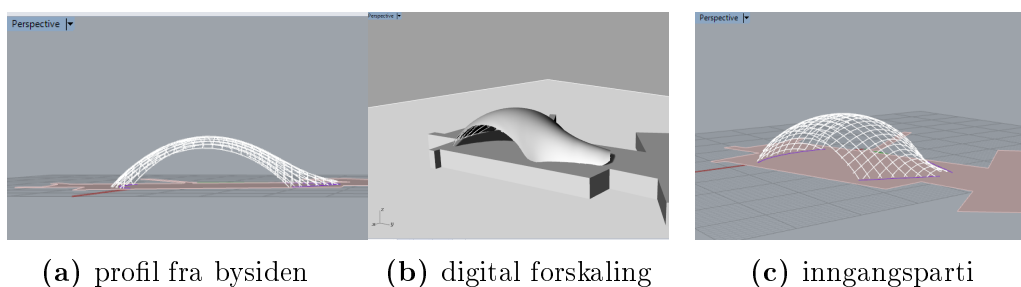
Figur 6.45: (a-c). Avgrenset rutenett for fjærmodell

oppførsel som fjærmodell studeres ved hjelp av noen innledende simuleringer. I

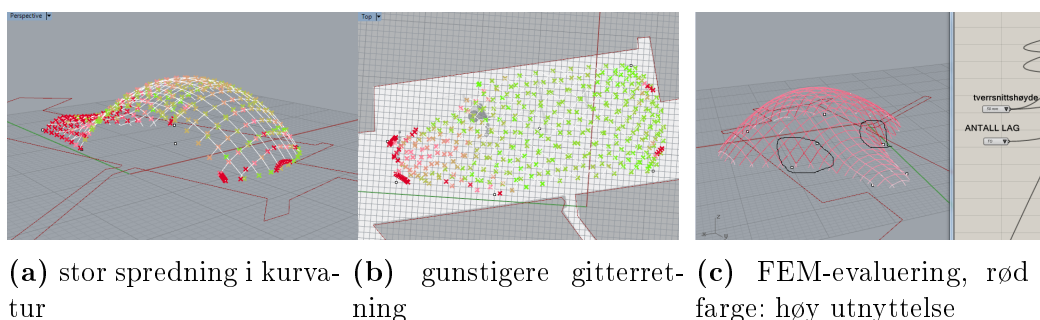


Figur 6.46: Innledende varianter av nett festet til skjermingslinjene

tomteanalysen ønsket vi tre åpninger i gitteret, en inngang, utsyn mot havet og mot byen. Inngangen skal være en invitasjon, en utstrakt hånd som trekker en inn i hovedrommet. Utsynssonene skal være partier hvor taket løftes opp over vindusvegger. For å modellere denne oppløftingen i en fjærmodell benyttes den samme teknikken med kutteplan illustrert i figur 6.28b, men denne gangen er planene vertikale og kutter der gitterets rand skal gå (se figur ?? b og c). Formen er en litt tilfeldig variant av en modell som vi kan bruke til å prøve oss fram til en egnet form for restauranten. Vi ser umiddelbart at for eksempel takhøyden i inngangspartiet er altfor liten sammenlignet med spisesonen, og at takhøyden i spisesonen er ganske enorm. Plasseringen av skjermingssonene gir en interessant profil sett fra byen (se figur ??). Boblepreget er tonet ned til en profil som kan minne om et halvt øye som titter opp over horisonten. Men inngangspartiet er ikke tilfredsstillende og selv om formen er generert fra en fjærmodell har den flere svake punkter. Vi forutsetter, som et utgangspunkt, materialdimensjoner og -egenskaper omtrent lik prosjektet i Downland. Selv om dette er en nokså unøyaktig modell hva gjelder geometri, ser vi med en gang fra simuleringen at kurvatur er et viktig



Figur 6.47: Visuell evaluering av formskissen



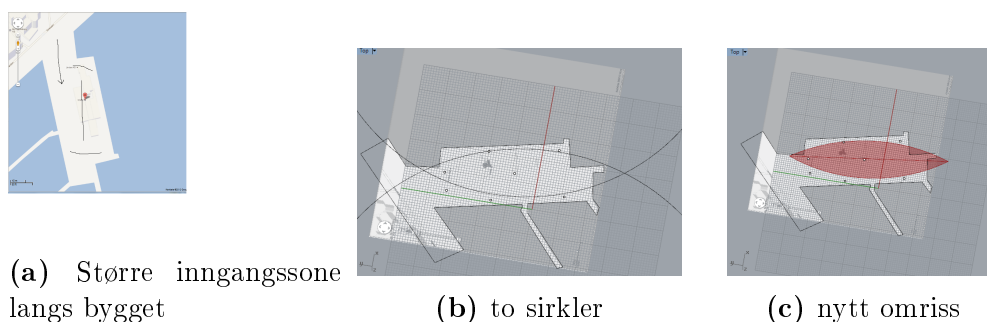
Figur 6.48: FEM- og kurvatur evaluering peker på problemer med formskissen

hensyn. Modellen har hele skalaen fra grønne partier til røde partier. En justering av gitterretningen fjerner ikke dette problemet. I tillegg er det der kurvaturen er mest kritisk at vi ønsker en høyere takhøyde og dermed høyere kurvatur. En rask FEM-analyse peker også på at modellen har en ugunstig utforming i enden av skjermingslinjen (se figur 6.49c). En høy kurvatur gir, til et visst punkt, en sterkere form. Da er det uheldig at det beskjedent utformede inngangspartiet setter grensen for tverrsnitthøyden. Fra den første simuleringen bør prosjektet gå i en retning som forener særlig tre hensyn.

- Kurvaturen bør jevnes ut for å tillate en sterkere form.
- Skarpe hjørner langs skjermingslinjene bør fjernes.
- Inngangspartiet bør åpnes opp.

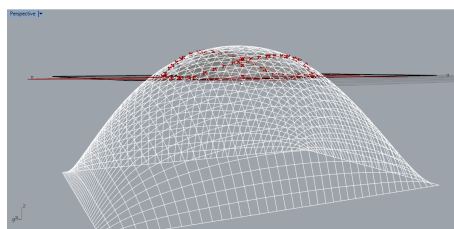
For å åpne opp inngangspartiet fjernes skjermingslinjen som ligger nærmest inngangspartiet. Målet er å lage et skall som nå går langs en lett skrånende akse mellom de to skjermingslinjene som er igjen.

Ved å legge skallets lengdeakse litt mer på skrå blir overgangen mellom innenfor mer glidende og inviterende. Man kan gå over den første det smale partiet og fremdeles være utenfor bygget. For å oppnå en jevnere kurvatur brukes beskjæringsteknikken fra 3D-eksempel 2 (se figur 6.28b) i enda større utstrekning enn i



Figur 6.49: Geometriske betingelser for 2. simulering

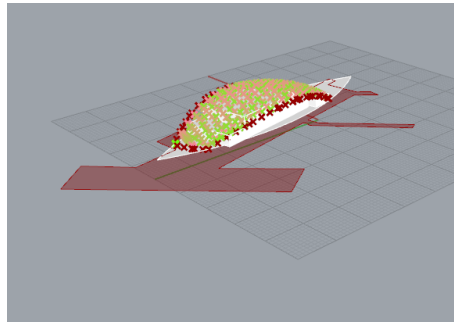
den første simuleringen. Med den nye akse som utgangspunkt etableres et avlangt omriss avgrenset av to sirkler som går inn i hverandre, slik som i Savill Garden (se figur 5.28a).



Figur 6.50: aksialtøyningsmodell

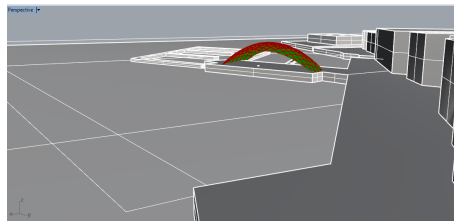
Aksialtøyningsmodellen gir tilfredsstillende resultater hvis modellen beskjæres slik av kun det midterste partiet benyttes i til det tiltenkte gitterskallet. Derfor starter simuleringen nå med et stort rutenett plassert et godt stykke nedenfor restaurantens grunnplan. Rutenettet kan justeres i høyderetning samt forlenges og forkortes i x - og y -retning. Omrisset, som også kan justeres i xy -planet, ekstruderes i høyderetning og simuleringens gitter defineres som den delen av rutenettet som befinner seg innenfor dette ekstruderte omrisset. Når simuleringen startes på nytt har vi en aksialtøyningsmodell med meget god fleksibilitet og formbarhet.

Kurvaturen til skallet kan justeres ved hjelp av fjærstivheten, kurvaturen til stålrammen kan justeres ved å justere størrelsen på rutenettet og formen på skallet kan justeres ved å endre posisjonen til omrissets kontrollpunkter. Vi har en funksjonell betingelse fra romprogrammet og vi har hele tiden tilbakemelding på kurvaturen for det valgte tversnittet. Nå kan vi modellere og utforske ulike skallformer helt til vi finner en form som både er sterk og funksjonell. Videre gir tilkoblingen til FEM-programmet mulighet for å sammenligne styrken på variantene som fjærmodellen genererer. EN slik formmessig utforskning ville være svært tidkrevende med fysisk modellering og med tradisjonelle prosjekteringsprosesser. Hvis men vet

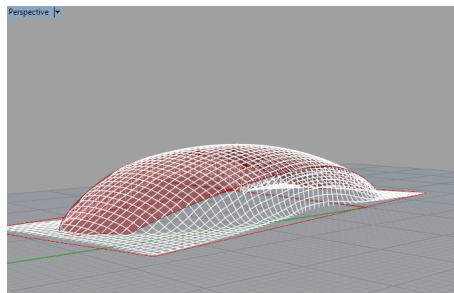


Figur 6.51: kurvaturl

nøyaktig hvilken form man ønsker kan man bruke et FEM-program som er basert på ekplisitte løsningsmetoder, som for eksempel ABAQUS explicit, men der kan man ikke la analysen modellere på samme måte som i en parametrisk modell.



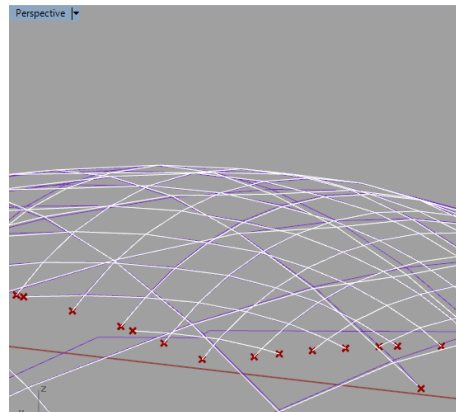
Figur 6.52: kurvaturl



Figur 6.53: drapering

Det største ulempen med denne fremgangsmåten sammenlignet med for eksempel forskyvning av forankringspunkter, som ble testet i 3d-eksempel to - og som er blitt brukt i noen andre gitterskallmodeller, er den manglende presisjonen for knutepunktene posisjon, og dermed også lamellenes baner. Dette problemet løses ved å lage en digital forskaling av resultatet fra den første etappen. Denne forskalingen draperes med en fjærmodell med meget stive fjærer. Dermed har den

fleksible og formbare modellen fra den første etappen også fått et Tsjebysjov-nett. Dette nettet føres så inn i den siste fasen, en etterbearbeidingsfase der det blir gjenstand for en dynamisk relaksasjon (se kapittel 5.6.4. Rutenettet er nå blitt en dobbelkrum bærekonstruksjon som kan innlemmes i de neste etappene i prosjekteringsprosessen.



Figur 6.54: momentoptimalisering ved hjelp av dynamiske relaksasjon (relaksert gitter:hvite linjer)

Kapittel 7

Resultater

Resultatene av denne undersøkelse fordeler seg på tre ulike nivåer. Oppgaven har munnet ut i en modell, en strategi, og et sett med teknikker. Oppgavens hovedmål har vært å lage en parametrisert modell som er spesielt utformet for å svare på de spesielle utfordringene som denne konstruksjonstypen byr på. Modellens utforming er en konsekvens av konklusjonene fra erfaringene i kapittel 3 og erfaringene fra testeksemplene i kapittel 4. Modellen kan ses i sin helhet i bilag A. Modellen gjenspeiler en modelleringsstrategi som skiller seg noe fra andre benyttede fremgangsmåter i det den bruker aksialtøyningsmodellen istedenfor bøyedeforformasjonsmodellen som formingsprinsipp. Det modellerte gitteret er et utsnitt av aksialfjærmodellen, slik unngår man de partiene av aksialfjærmodellen der knutepunktspresisjonen er lavest. Da drar man nytte av aksialfjærmodellens fleksibilitet og formbarhet. For å oppnå en presis geometri ga draperingsteknikken et godt resultat. Med denne teknikken kan man gjenskape Tsjebysjov-nettet der alle sidekantene i nettets ruter har samme lengde også når nettet blir deformert til en tredimensjonal form. Disse to erfaringene resulterte i en modelleringsstrategi der aksialtøyningsmodellen ble brukt til å finne en form, mens draperingsteknikken ble brukt til å bestemme knutepunktsgeometrien. Et viktig moment i oppgavens undersøkelse var å eksperimentere med et interaktivt FEM-program i formingsfasen. Resultatet av denne testen var betinget positivt. Verktøyet var nyttig i kombinasjon med fjærmodeller, samt sammen med algoritmeløseren Galapagos for å finne gunstigste gitterretning for et gitt omriss.

Kapittel 8

Diskusjon av resultater

Oppgaven kom til det resultat at en strategi med en kombinasjon av aksialtøyningsmodell og en draperingsmodell ga en parametrisk modell med bedre formbarhet enn teknikken med forskyvbare kontrollpunkter. For å komme frem til dette resultatet er det ikke uten betydning hvilken type kinematisk gitterskall man søker å prosjektere. Gitterskallet i oppgaven baserer seg i stor grad på Downland som et best practiceeksempel, med elementer fra Savill Garden. Det er på bakgrunn av Downlands løsninger at vi kan tillate oss noen løsninger som går godt sammen med denne oppgavens modelleringsstrategi. Når aksialfjærmodellen draperes med Tsjebysojv-nettet får man noen randkonstellasjoner som ikke er gunstige for alle typer gitterskall. Noen gitterskall er konstruert slik at hvert opplagerpunkt også er et knutepunkt. Dermed er man avhengig av å få lamellene til å møtes i opplagerpunktene. Når det gjelder Downland har dette gitterskallet snarere opplagerkanter enn opplagerpunkter (se figur 5.22a). Gitterskallet i denne oppgaven er også tenkt prosjektert med slike opplagerkanter, en sandwichkonstruksjon à la det man finner i Downland-skallet. Hvis man har opplagspunkter å forholde seg til kan en modell basert på bøyedeformasjon komme bedre ut i sammenligningen.

Kapittel 9

Konklusjon

Oppgaven startet med et tilsynelatende paradoks. Gitterskallet er en sterk skallkonstruksjon som ikke krever dyr forskaling. Som trekonstruksjon er det et økologisk alternativ, og den kan formes til spennende arkitektur, likevel blir det bygget få gitterskall. Den historiske delen har vist oss at gitterskallet kan konkurrere på pris, representert ved Downland-museet og The Lothian Gridshell i Skottland. Det kan gi rom for spennende og eksperimentell arkitektur, representert ved Savill Garden og Mannheim *Multihalle*. Den historiske delen har også vist at det er en klar læringskurve å spore fra gitterskallet i Mannheim der *ad hoc*-løsningen med to gitterlag måtte til for å få tilfredsstillende stabilitet og med mange lamellbrudd i oppføringsfasen, til nyere tiders løsninger der slike problemer nærmest er eliminert. En teori som kan forklare gitterskallets manglende popularitet er prosjekteringsprosessen, som også denne oppgaven har søkt å belyse. I den anledning er den største nyvinningen i nyere tid de digitale partikkel-fjær-systemene som kan gjen-skape det hengende nettet som de første gitterskallene ble modellert etter. En parametrisk modell kan integrere denne fjærmodellen i en interaktiv prosess der både konstruktive og funksjonelle hensyn kan fungere som styrende prinsipper for utformingen i en og samme simuleringsprosess. En klok bruk av parametrisk design kan føre gitterskallet over fra det eksperimentelle stadiet og over til å bli en rasjonell byggeteknikk med et stort formregister.

Kapittel 10

Videre forskning

For å vurdere en konstruksjons vellykkethet er det særlig fire aspekter som må tas i betraktning: funksjon, form, konstruksjon og kostnad. I denne oppgaven er kun de tre første blitt behandlet. Høy materialutnyttelse leder isolert sett til lavere kostnader, men den forbedrede materialutnyttelsen kan også ha sin pris. Denne oppgaven har først og fremst befattet seg med formgivningsprosessen og forsøkt å gjøre denne allment tilgjengelig for ikke-spesialiserte arkitekter og ingeniører. I kapittelet der vi studerte noen av gitterskallene som er blitt bygget hittil så vi imidlertid at konstruktørene støtte på flere problemer. Særlig utfordringer knyttet til oppføringsfasen peker seg ut som potensielle barrierer for fremtidige prosjekter. Gitterskallet i Mannheim består av 34 000 knutepunkter, langt fler enn man kan greie seg med hvis man velger alternative konstruksjonsteknikker. Her kan det ligge en stor utgiftspost i antall arbeidstimer som gjør at vinning i materialeffektivitet går opp i spinning i form av økte lønnsutgifter. Vi så at Lothian Gridshell var lett å oppføre. Det gikk raskt og ble utført på dugnad av ufaglærte idealister. Likevel ble det spekulert i at selve usikkerheten hva gjelder oppføringstid og uforutsette komplikasjoner var nok til å skremme vekk en profesjonell aktør. For å få et bedre fundament til å vurdere gitterskallets aktualitet bør man derfor se nærmere på hvordan man kan beregne total kostnadene for et slikt prosjekt. Den parametriske modellen har gode muligheter for å innlemme slike betraktninger i optimaliseringsprosessen. Selv om parametrisk design ofte blir assosiert med organisk og eksperimentell design har denne arbeidsmetoden også gode muligheter til å behandle problemstillinger innen industriell økonomi.

Bibliografi

- [1]
- [2] Tor Øistein ANDRESEN. *Prosjektering og dimensjonering av kompleks bygningskonstruksjon ved hjelp av parametrisk DAK og FEM-design*. Masteroppgave, UMB, 2012.
- [3] Kjell Arne MALO & Vanessa ANGST. *Glued Laminated Timber, i Handbook 1 – Timber Structures*. Leonadro Da Vinci Pilot Projects, Educational Materials for Designing and Testing of Timber Structures, 2008.
- [4] M.R. BARNES. Form finding and analysis of tension structures by dynamic relaxation. *International Journal of Spatial Structures*, 14(2), 1999.
- [5] Mathias FRESE & Hans Joachim BLASS. Statistics of damages to timber structures in germany. *Engineering Structures*, 33(11):2969–2977, 2011.
- [6] Andrew BOGART. Foredrag holdt på university of michigan. <http://www.youtube.com/watch?v=Aix0qgPimR4>, sett 12/10-2012.
- [7] Lina BOUHAYA. *Optimisation des gridshells*. Doktoravhandling, Université Paris-Est, Paris, 2010.
- [8] Nils Ivar BOVIM. Forelesningsnotater tba 290, 2011.
- [9] Berthold BURKHARDT. *IL 13: Multihalle Mannheim*. Karl Kramer Verlag, Stuttgart, 1978.
- [10] William D. CALLISTER. *Materials Science and Engineering: an Introduction*. John Wiley and Sons, New York, 7. utgave, 2007.
- [11] John CHILTON. *Heinz Isler: The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture*. Thomas Telford, London, 2000.
- [12] John CHILTON. *Heinz Isler's Infinite Spectrum Form-finding in Design*. John Wiley and Sons Ltd., 2010.

- [13] Anil K. CHOPRA. *Dynamics of Structures, Theory and Applications to Earthquake Engineering*. Pearson, New Delhi 7. utgave, 2011.
- [14] George R COLLINS. *Antoni Gaudì*. George Braziller Inc., 1960.
- [15] Milos DIMCIC. *Structural optimisation of grid shells based on genetic algorithms*. Doktorgradsavhandling, TU Stuttgart, 2011.
- [16] Cyril DOUTHE. *Etude de structures élancées précontraintes en matériaux composites: Application à la conception des gridshells*. Doktoravhandling, Ecole nationale des ponts et chaussées, Paris, 2007.
- [17] Hans LARSEN & Vahik ENJILY. *Practical design of timber structures to Eurocode 5*. Thomas Telford, London, 2009.
- [18] European Committee for Standardisation. *Eurocode 1: Actions on structures – General actions - Part 1-4: Wind actions. EN 1991-1-4*. CEN, Brussel, 2005.
- [19] European Committee for Standardisation. *Structural Timber – Strength Classes, EN 338*. CEN, Brussel, 2005.
- [20] Ludwig GLAESER. *IL 17: the work of Frei Otto and his teams 1955-1976*. Institut für leichte Flächentragwerke, Stuttgart, 1976.
- [21] Matteo GOBBI. Nurbs e loftmans. e-ducks.blogspot.no/2011/04/nurb-loftsman.html, lest 06.11.2011.
- [22] John HARDING and Paul SHEPERD. Structural form finding using zero-length springs with dynamic mass. *In: 2011 IASS Annual Symposium: IABSE-IASS 2011: Taller, Longer, Lighter*, 2011.
- [23] Richard HARRIS, Michael DICKSON, Oliver KELLY, and Jonathan ROYNON. The use of timber gridshells for long span structures. *Proceedings of the 8th International Conference on Timber Engineering WCTE*, 2004.
- [24] Richard HARRIS, J. ROMER, and Oliver KELLY. Design and construction of the downland gridshell. *Building research and information*, 31(6):427–454, 2003.
- [25] Richard HARRIS and jonathan ROYNON. The savill garden gridshell design and construction. *Structural Engineer*, 2008.
- [26] Santiago HUERTA. Structural design in the work of gaudì. *Architerctural Science Review*, 49(4):324–339, 2006.

- [27] Bernt JAKOBSEN. The sleipner accident and its causes. *Engineering Failure Analysis*, 1(3):193–199, 1994.
- [28] Axel KILIAN. Linking hanging chain models to fabrication. *Proceedings of the 23rd Annual Conference of the Association for Computer Aided Design in Architecture*, 2004.
- [29] Axel KILIAN and John OCHSENDORF. Particle-spring systems for structural form-finding. *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, 46, 2005.
- [30] Toni KOTNIK and Joseph SCHWARTZ. The architecture of heinz isler. *Journal of the international association for shell and spatial structures*, 52(3):185–190, 2011.
- [31] Maarten KUIJVENHOVEN. *A design method for timber grid shells*. Mastergrad, TU Delft, 2009.
- [32] Oliver LOWENSTEIN. Lothian gridshell. *Building for a Future*, vinterutgaven, 2002.
- [33] Dominique MEIER. *Organische Formen in Holz*. <http://www.haring.ch>, lest 14.11.2012.
- [34] Robert MOTT. *Applied Strength of Materials*. Prentice Hall, 2. utgave, 1990.
- [35] Frei OTTO. *IL10 : Gitterschalen*. Karl Kramer Verlag, Stuttgart, 1974.
- [36] Eugene Vladimirovich POPOV. Geometric approach to chebyshev net generation along an arbitrary surface represented by nurbs.
- [37] Clemens PREISINGER.
- [38] Fabian SCHEURER. Digitaler holzbau – komplexe geometrien effizient realisiert. *14. Internationales Holzbau-Forum*, 2008.
- [39] Jörg SCHLAICH. *Leicht Weit*. Prestel Verlag, 2005.
- [40] Prof. Dr. Joseph SCHWARTZ. *Tragwerksentwurf IV, Formfindung und konstruktives Detail*. www.schwartz.arch.ethz.ch/Vorlesungen/TE-3-4/unterlagen-te3.php, lest 15.09.2012.
- [41] Joachim Seehusen. Verdens største trebro over mjøsa. *Teknisk Ukeblad*, (34), 2010.
- [42] Leif Erik STORM. *Konstruksjonslære for arkitekter*. Tapir, 2003.

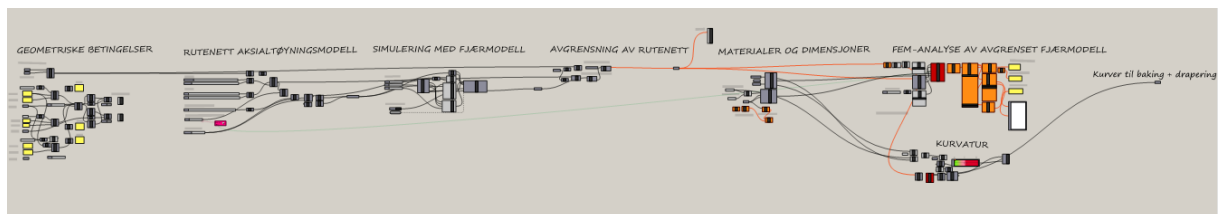
- [43] Jos TOMOLOV. *IL 34: Das Model*. Karl Kramer Verlag, Stuttgart, 1989.
- [44] Davide TONELLI. *Sinossi sull' ingegneria delle forme libere*.
www.dic.unipi.it/davide.tonelli/files/Sinossi.pdf, lest 01.11.2012.

Tillegg A

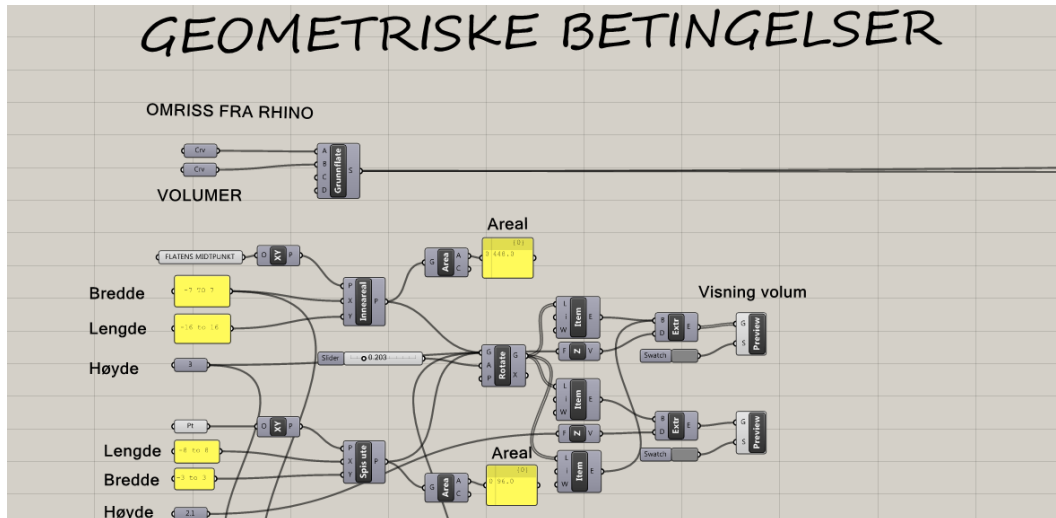
Definisjoner i Grasshopper

I dette bilaget følger Grasshopper-definisjonene i sin helhet. Definisjonene er delt opp og sortert i grupper som gjensker oppgavens flytskjema og gangen i modelleringseksemplet i kapittel 6.5.

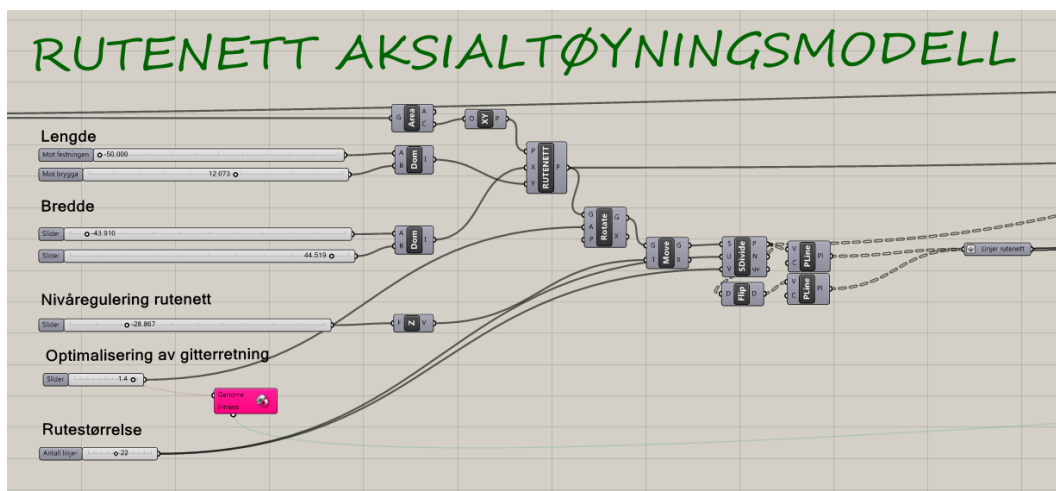
Figur A.1 viser en oversikt over rekkefølgen i sekvensene under til og med kurvene som skal bakes inn i Rhino for etterfølgende drapering. Under følger et nærbilde av hver gruppe slik at man kan studere definisjonene i detalj. Etter noen av definisjonene følger en illustrasjon av modellen slik det ser ut på det aktuelle stadiet. Den delen av modellen som bildet kommenterer er uthevet i hvit farge.



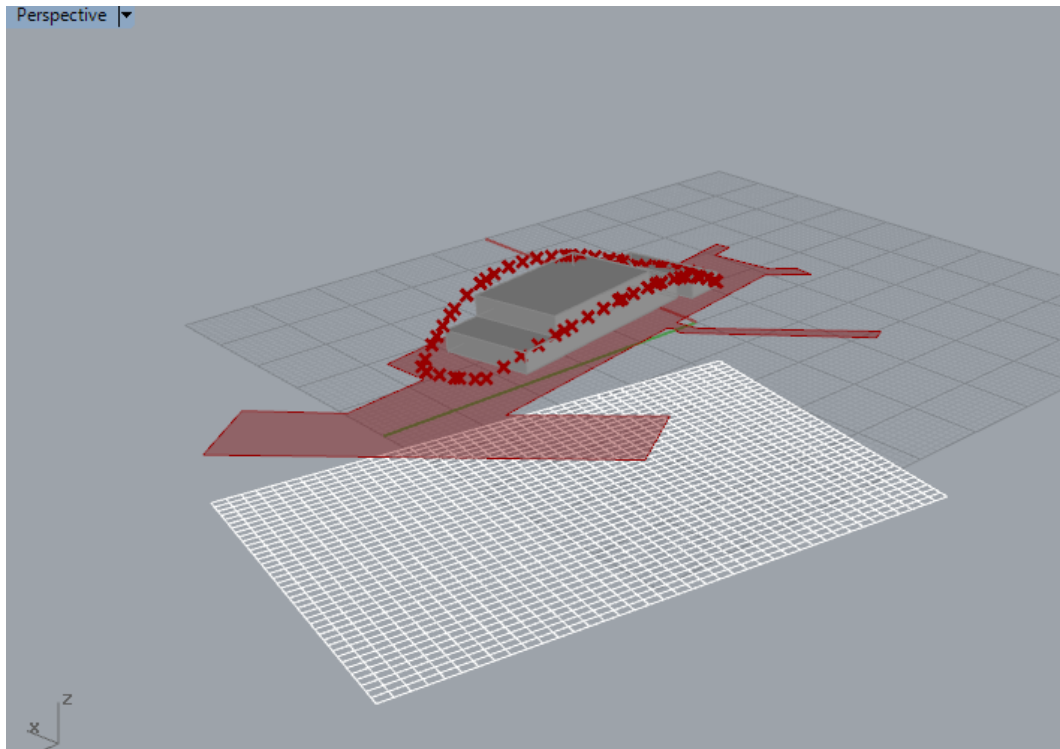
Figur A.1: Sekvens for første simulering



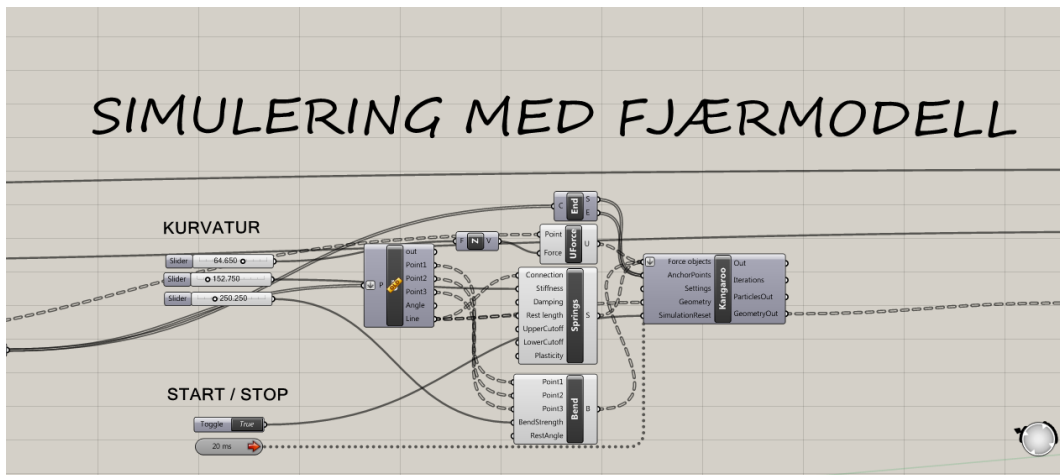
Figur A.2: Definisjon av geometriske betingelser



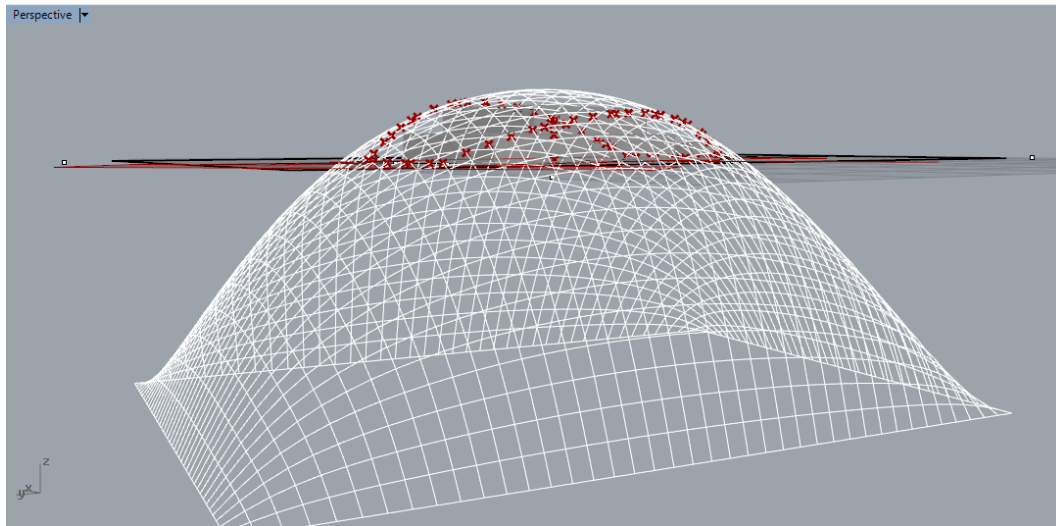
Figur A.3: Rutenettet for fjærmodell



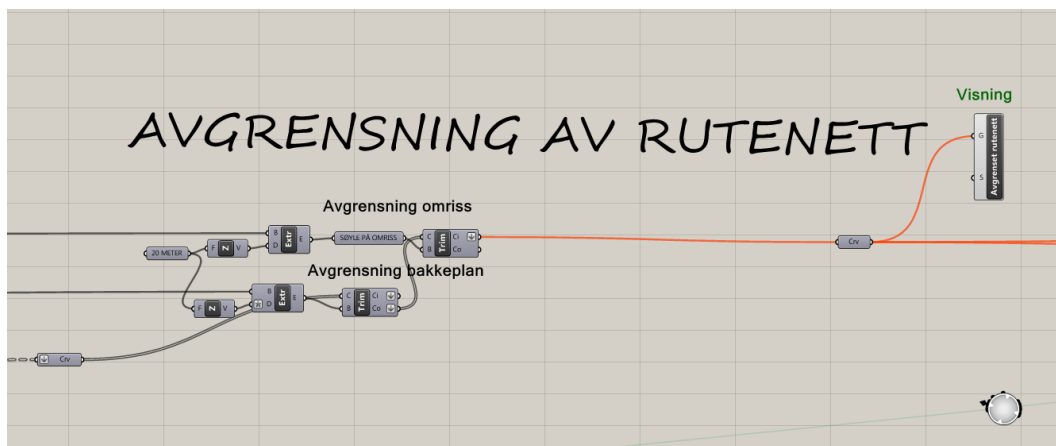
Figur A.4: Visning av rutenettet for fjærmodell



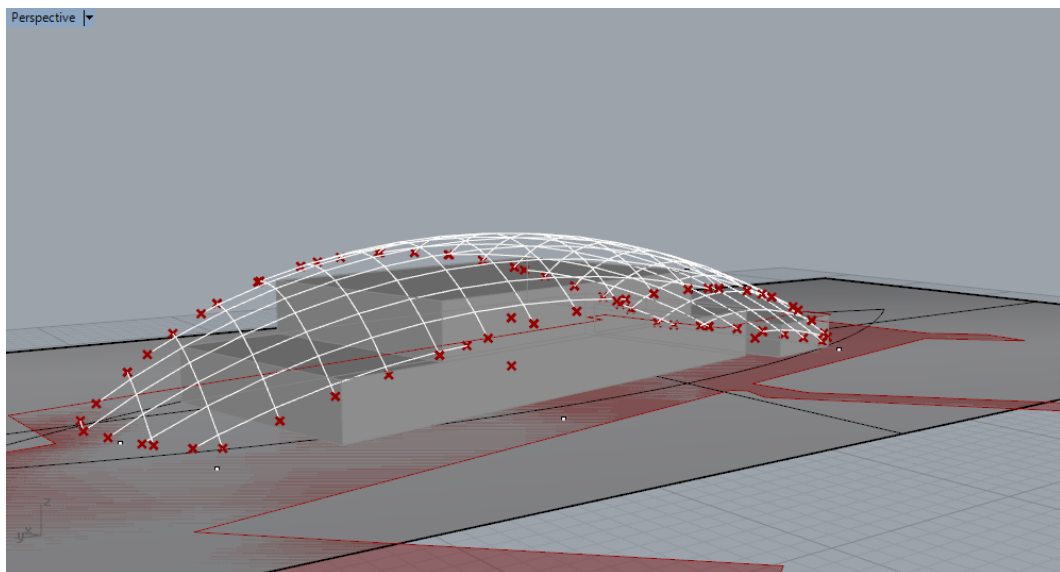
Figur A.5: Fjærmodell med aksiaøtøyning



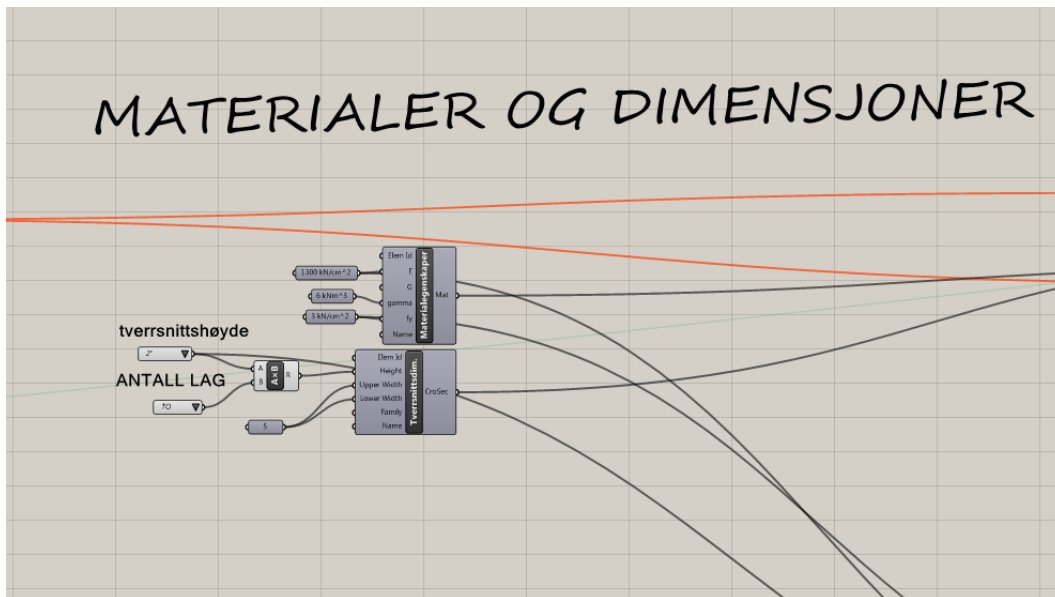
Figur A.6: Visning av fjær-simulering



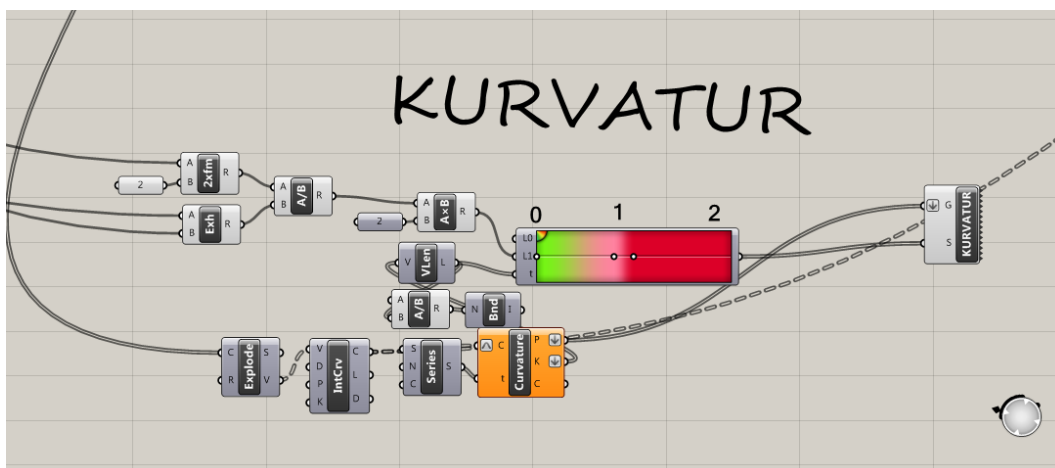
Figur A.7: Avgrensning av rutenettet etter simulering



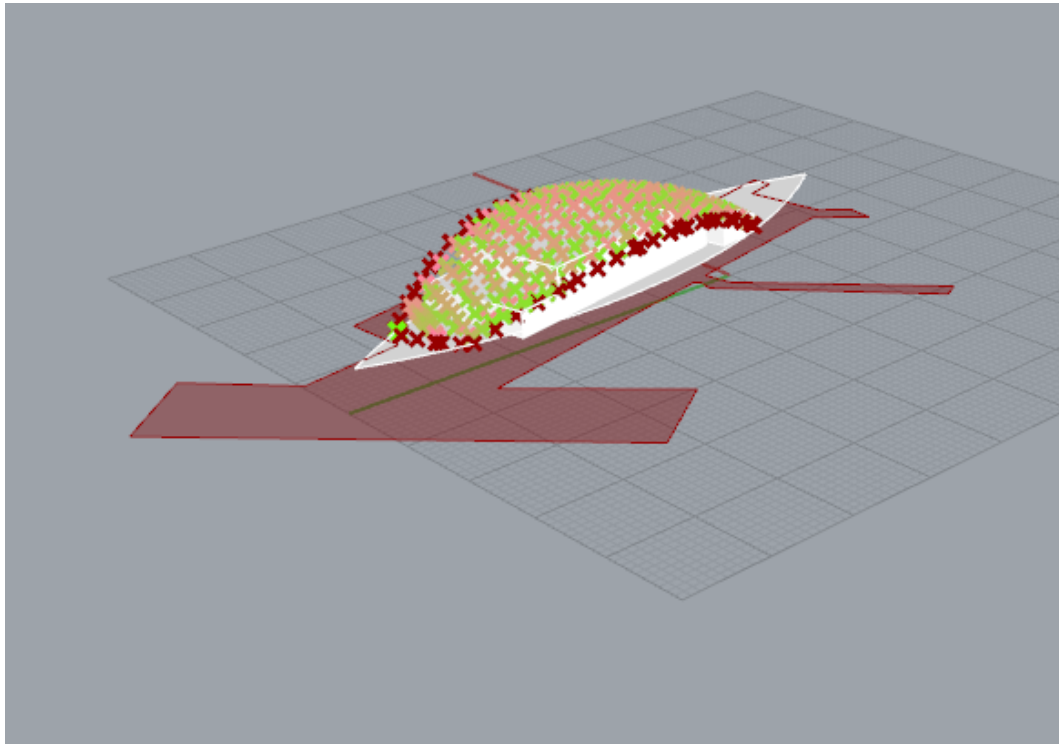
Figur A.8: Visning av rutenett etter fjærsimulering



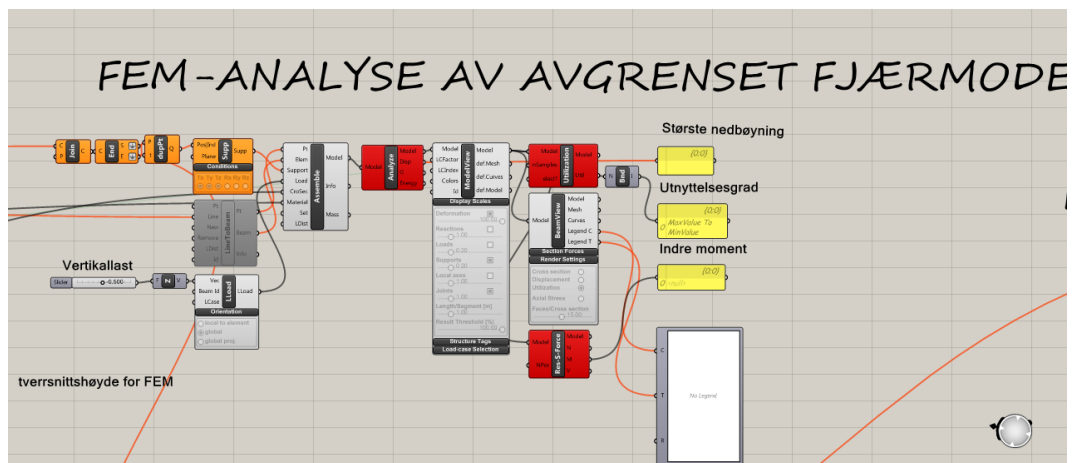
Figur A.9: Materialer og tverrsnittdimensjoner for FEM-analyse



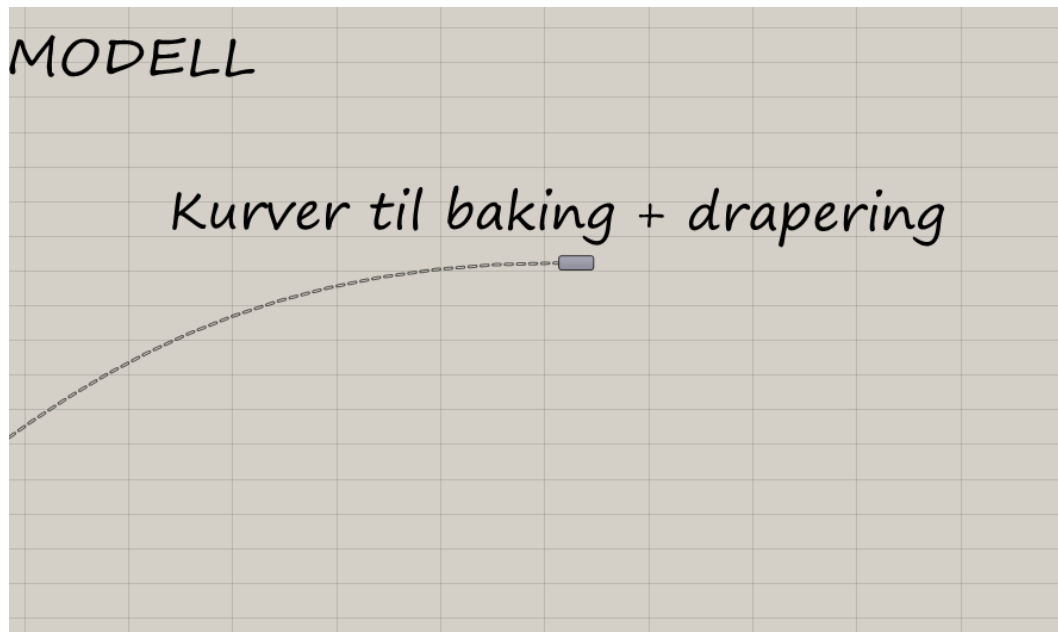
Figur A.10: Definisjon som viser kurvatur grafisk på modellen



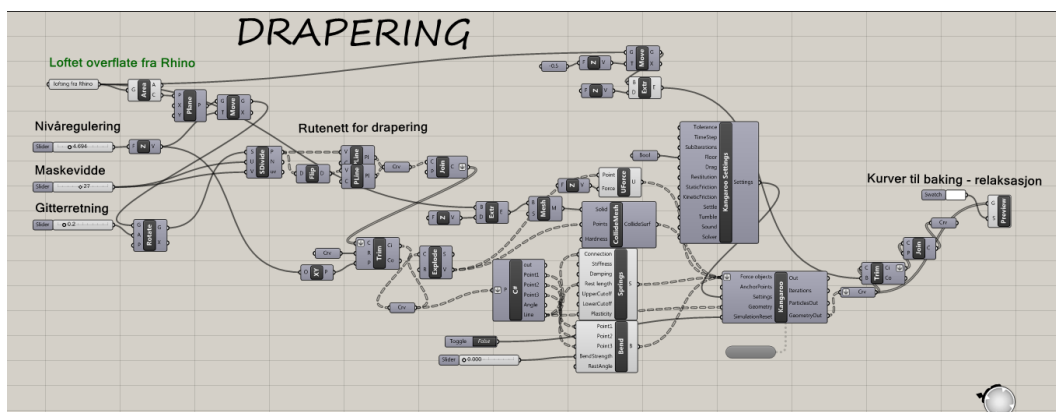
Figur A.11: visning av kurvaturdefinisjon



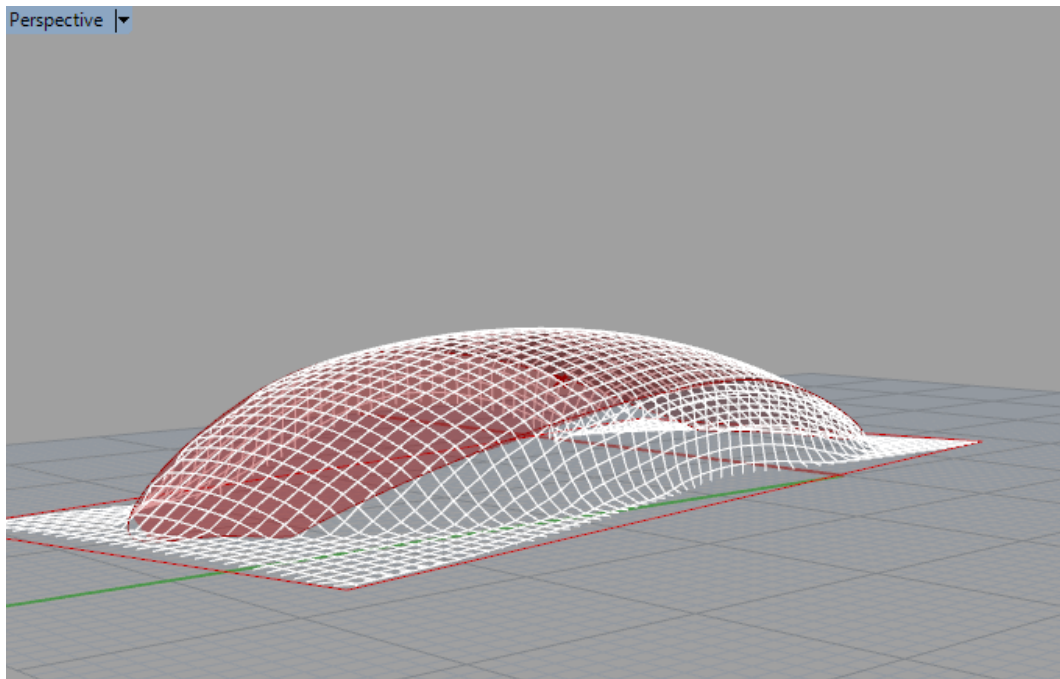
Figur A.12: FEM-definisjon



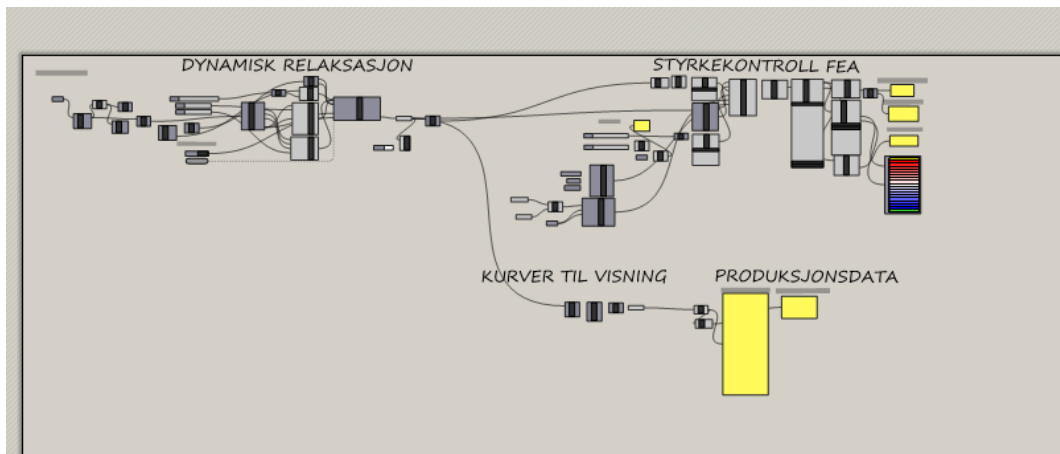
Figur A.13: Siste del av den første simuleringen. Kurvene føres over til draperings-definisjon



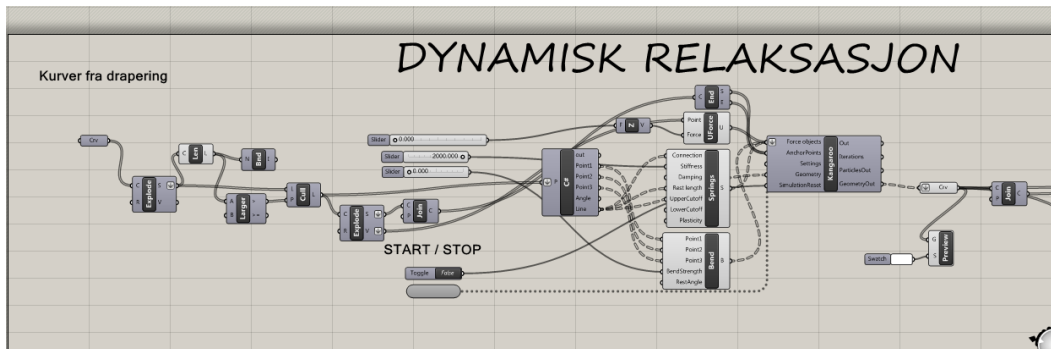
Figur A.14: Definisjon av fjærmodell for drapering



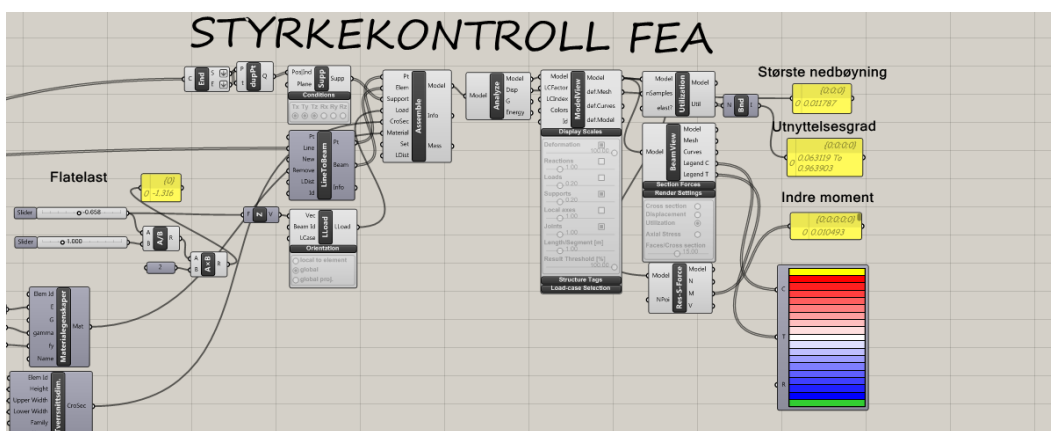
Figur A.15: Visning av drapering



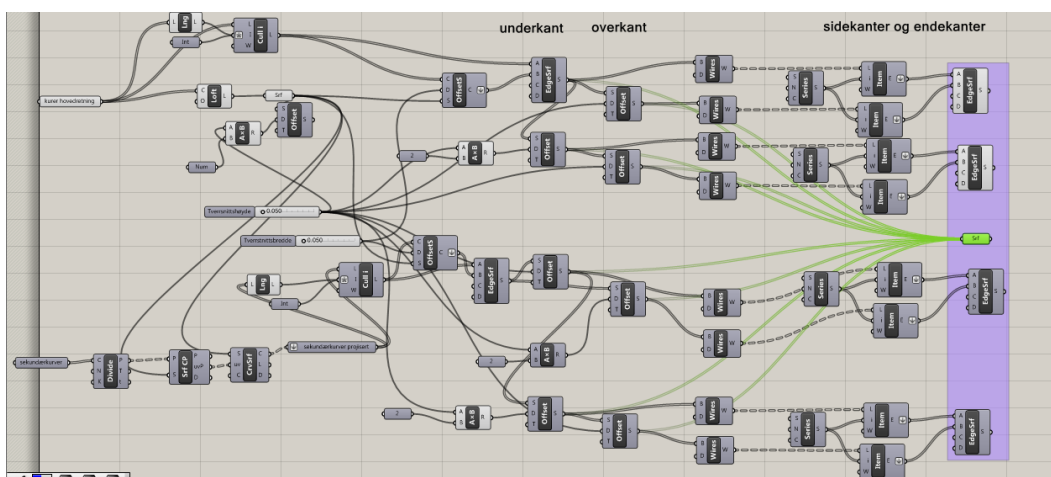
Figur A.16: Sekvens dynamisk relaksasjon og FEM-kontroll



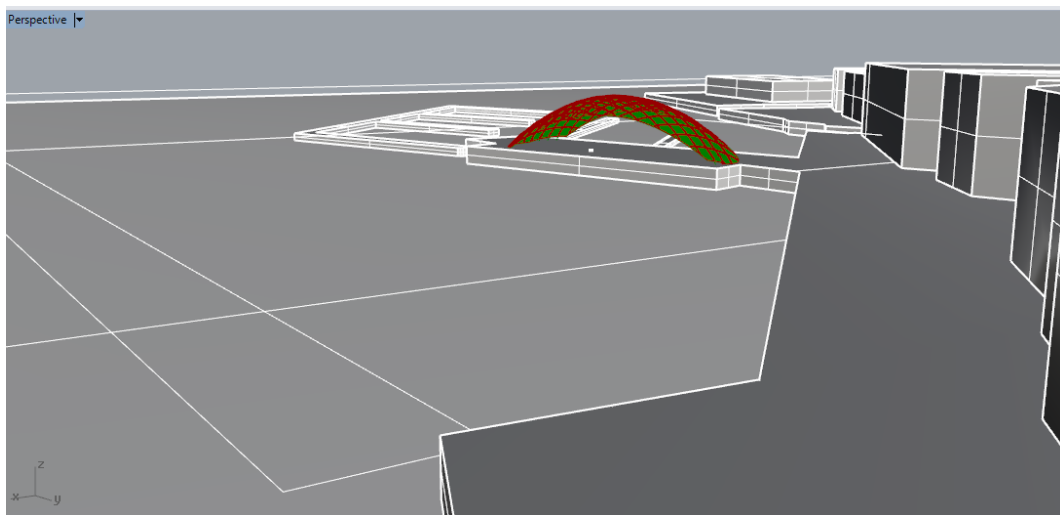
Figur A.17: Sekvens dynamisk relaksasjon



Figur A.18: FEM-kontroll

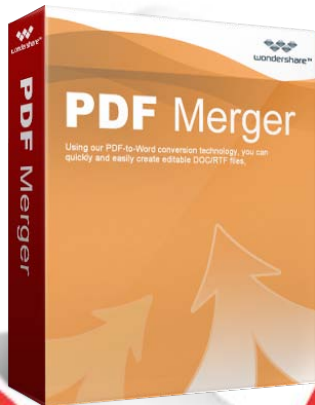


Figur A.19: Visning av gitter



Figur A.20: Visning av takkonstruksjon

Thank you for evaluating Wondershare PDF Merger! To remove this page, please register your program!



[Go to Purchase Now>>](#)

PDF Merger

- ✓ Merge multiple PDF files into one
- ✓ Select page range of PDF to merge
- ✓ Select specific page(s) to merge
- ✓ Extract page(s) from different PDF files and merge into one