

PROSJEKTERING OG OPPFØRING AV KOMPLEKS BYGNINGSSTRUKTUR I TRE VED HJELP AV PARAMETRISK DAK OG CNC

DESIGN AND CONSTRUCTION OF COMPLEX BUILDING STRUCTURES IN WOOD
USING PARAMETRIC DAK AND CNC

OLAV BRAUTI

UNIVERSITETET FOR MILJØ- OG BIOVITENSKAP

INSTITUTT FOR MATEMATISKE REALFAG OG TEKNOLOGI
MASTEROPPGAVE 30 STP. 2011





I FORORD

Denne masteroppgaven er utarbeidet på Instituttet for matematiske realfag og teknologi, ved Universitetet for miljø - og biovitenskap.

Gjennom mine fem år på linjen byggeteknikk og arkitektur har jeg opparbeidet interesse og kompetanse innen DAK (dataassistert konstruksjon). Etersom tegningene har blitt mer komplekse har jeg fått en driv til å prøve å lære mer om hvordan dette faktisk kan bygges, og om det kan gjøres på en effektiv måte ved hjelp av CNC (computer numerical control) robot.

Da Leif D Houck kom med forslag om å skrive om CNC-fresing av kompleks bygningsstruktur, ble jeg motivert for å skrive en oppgave innen dette feltet. I oppgaven vil jeg ha hovedfokus på hvordan man kan bygge kompleks bygningsstruktur i tre.

Jeg vil rette en takk til Leif Daniel Houck for veiledning, Knut Bjørgum og Carsten Løddesøl ved Snøhetta arkitekter for innsikt i hvordan en CNC-prosess fungerer i fullskala, Lars Moth Poulsen for teknisk hjelp med Bentley Generative Components og alle som har lest korrektur.



II SAMMENDRAG

Hensikten med denne oppgaven er å se på hvordan man ved hjelp av roboter og DAK kan bygge komplekse bygningsstrukturer i tre på en effektiv måte. Denne måten å bygge på er lite gjennomprøvd og oppgaven har derfor vært svært utfordrende.

Kompleksiteten i dagens bygningsstruktur er økende og krever at verktøyene fornyes. Jeg mener derfor det er interessant å gjennomføre en oppgave om kompleks bygningsstruktur. Det har vært interessant å se på hvordan maskiner og programvare fra maskin- og tekstilindustri kan brukes til å skape en effektiv byggeprosess.

Målet har vært å finne nye måter å bygge komplekst på, og samtidig lære mer om kompleks bygningsstruktur, DAK og CNC-maskiner. Målet har jeg nådd gjennom først å bygge modeller ved hjelp av DAK og CNC, for deretter og forhøre meg med entreprenører hvordan man kan bygge dette i fullskala. I oppgaven har jeg hatt fokus på parametrisk DAK, CNC-fresing, CNC-skjæring og Nesting, disse begrepene blir forklart senere i oppgaven.

Oppgaven er gjennomført ved å se på en eksempeldesign som jeg har utforsket to forskjellige måter å bygge på. Forskningen har jeg gjort ved å se på to modeller, en modell har jeg CNC-frest og en har jeg gjort ved fineroppbygging. Jeg har kommet frem til at det finnes mange muligheter ved å bruke ny teknologi i byggebransjen. Både med tanke på å utforme ny bygningsstruktur men også med tanke på materialbesparelse. Hvis disse nye verktøyene brukes på rett måte, mener jeg man kan bygge en svært kompleks bygningsstruktur med en høy presisjon til en pris som ikke er avskrekkende høy.

I denne oppgaven har jeg hatt fokus på hvordan man bygger og designer selve strukturen, fremfor det å skape en pent og nyttig design. Oppgaven har gitt meg praktisk erfaring både i hvordan ting faktisk kan bygges og hvordan slike komplekse strukturer i tre kan fremstå i virkeligheten.



III ABSTRACT

The purpose of this thesis is to see how you can achieve complex building structures by using robots and CAD (computer aided design). This hasn't been thoroughly tested, which made the thesis quite challenging.

The complexity of the structures today is increasing and that makes it important that the tools also get better. Therefore I think it will be interesting to go through with a thesis about complex building structures. It has been interesting to see how machines and software from the machine- and textile industry can be used to create an efficient building process.

The goal have been to find new way of building complex structures and at the same time learn more about complex structures, CAD and CNC machines. I have achieved the goal by first building models with the help of CAD and CNC, and then consulting with entrepreneurs about how this could be built. I have focused on CNC milling, CNC cutting and Nesting, these terms will be explained later in the thesis.

The thesis carried out by making a design for a structure which I have been trying to build in two different ways. I made two models which I got my research data from. One of the models I made my CNC milling and another I built out of veneer. My conclusion is that there are several options for new technology to be used in the building business, in terms of designing new building structures and material savings. If these new tools are used correctly, I think one can build a highly complex structure with high precision, with a price that isn't deterrent.

I have been focusing on how to build and design the structure itself, rather than creating a nice and useful design. This thesis has given me practical experience on how to actually build a complex structure and how it will appear in wood.



Innholdsfortegnelse

I	FORORD.....	2
II	SAMMENDRAG.....	3
III	ABSTRACT.....	4
1.	Innledning og Problemstilling.....	7
1.1	Bakgrunn	7
1.1.1	Historie	7
1.1.2	Dagens utvikling	8
1.1.3	Tre som materiale	8
1.1.4	Datastyrte roboter.....	9
1.2	Problemstilling.....	10
1.3	Avgrensing og Forutsetninger	10
2.	Teori.....	11
2.1	Parametriske DAK-programmer	11
2.1.1	Dynamikk i prosessen	13
2.2	CNC.....	13
2.2.1	CNC-fresing.....	13
2.2.2	CNC-kutting	14
2.2.3	Nesting.....	14
2.2.4	3D-printing	15
3.	Metode og gjennomføring	16
3.1	Bakgrunn for designet	16
3.2	Utforming av designen	17
3.3	Oppbygning av DAK-modell.....	18
3.3.1	Dynamikk i DAK-modellen.....	18
3.3.2	Materialbesparelse med dynamiske modeller.....	23
3.4	3D-modelltest.....	23
3.5	Gjennomføring av CNC-fresing.....	25
3.5.1	Bygging av modell.....	25



3.5.2 Fullskala CNC-fresing	29
3.5.3 Prising av fullskala CNC-fresing	31
3.5.4 Nesting og dynamiske tegninger i forbindelse med CNC fresing	32
3.6 Oppbygning med finer	34
3.6.1 Modellbygging	34
3.6.2 Fullskala fineroppbygning	35
3.6.3 Prising av fullskala fineroppbygning	38
4. Resultater/Erfaringer	40
4.1 DAK-tegning	40
4.2 CNC-fresing	41
4.3 Fineroppbygging	42
5. Diskusjon	44
5.1 CNC	44
5.2 DAK	45
5.3 Nesting	46
6. Konklusjon	47
7. Videre arbeid	48
8. Litteratur	50
9. Vedlegg	51
1. Transaksjoner	52

1. Innledning og Problemstilling

I dette kapitlet beskrives bakgrunnen for problemstillingen, og avsnittene tar for seg ulike grunner til valget av problemstilling.

1.1 Bakgrunn

1.1.1 Historie

Grunnbetydningen av ordet arkitektur er byggmester. Helt siden denne ``byggmesteren`` forlot hulen sin, har han utviklet sin kompetanse og sine verktøy. Dette har ført til en gradvis økning i kompleksiteten på bygningene rundt oss. Kompleksiteten på bygninger varierer også med økonomisk velstand og classeskille (et klassesdelt samfunn), et stort classeskille i samfunnet førte tidlig til at det var mulig å bygge svært kompleks arkitektur selv om verktøyene ikke var de beste. Se for eksempel på Kheopspyramiden (figur 1), som ble bygget av egypterne 2550 f.Kr., som et resultat av svært billig arbeidskraft.



Figur 1 - Kheopspyramiden(Alex 2005)





Mens det etter en verdenskrig vil være dårlige økonomiske tider, tidsnød og mindre tilgang på faglig ekspertise. Komplexiteten vil dermed synke, man vil da bygge det som er effektivt og rimelig(figur2).

Figur 2- EN typisk østblokk - blokk(Telle 2008)

1.1.2 Dagnes utvikling

I dag er kompleksiteten i bygningsstrukturen økende, moderne computerprogram har ført til en liten revolusjon når det gjelder og utforske kompleks bygningsstruktur. Med kompleksitet tenker jeg på utformingen av bygget, om designen på bygget har en høy kompleksitet. Dette kan f.eks. være et dobbelt krummet parametrisk design. Dette skyldes både at vi generelt har fått bedre verktøy og et voksende marked for slik bygningsstruktur. Ved hjelp av avanserte DAK-programmer kan designere tegne komplekst på en helt annen måte en tidligere. Når designere og arkitekter får full frihet på denne måten skapes det raskt svært imponerende, komplekse strukturer. Dette vil etter hvert skape et problem for bygningsindustrien, hvordan skal man bygge denne komplekse designen effektivt? Og hvordan skal man eventuelt prise et slikt arbeid?

I denne sammenhengen er det også interessant å se på hvor mye dyrere det er og bygge en spennende kompleks design kontra en enklere design, sett at man bygger den komplekse designen effektivt.

1.1.3 Tre som materiale

Tre er et materiale som har lange tradisjoner i Norge. Det er et bærekraftig materiale med lav egenvekt, høy styrke, god isoleringsevne og god varmelagringskapasitet. Materialet er lett å bearbeide, og har over lengere tid vært lett tilgjengelig. Det førte til at tre tidlig ble brukt til komplisert byggeteknikk, stavkirker og vikingskip er eksempler på dette. Jeg mener også at tre er et meget estetisk materiale. Det er i tillegg et bærekraftig materiale med tanke på miljø. Men som med alle materialer er det viktig å bruke tre på rett måte og til rett formål. Det er viktig å ha god kjennskap til trevirkets bruksegenskaper før man bruker det.

Basert på de forestående egenskapene har jeg lyst til å se på hvordan man kan bruke tre på nye måter i kompleks bygningsstruktur. Selv om mange av teknikkene er brukt tidligere har jeg lyst til å se på hvordan det kan gjøres effektivt ved hjelp av DAK og CNC.



1.1.4 Datastyrtede roboter

Det benyttes allerede mange roboter i dagens byggenæring. Først og fremst benyttes disse til masseproduksjon av et materiale eller en modulbasert konstruksjon. Siden kompleksiteten i dagens byggebransje er økende, mener jeg at roboter vil spille en større rolle i byggebransjen i årene som kommer.

I januar besøkte jeg Faktor Industrier i Rakkestad. Der var jeg for å lære og for å få inspirasjon til å jobbe med roboter i oppgaven min. Faktor Industrier har en 178 meter lang produksjonslinje med 18 roboter der det blir utført automatisert modulproduksjonen. Deres filosofi går ut på at hvis man lager mange like moduler vil det lønne seg å bruke roboter også i byggebransjen.

De mener at kostnadene med å lage nye tegninger og samtidig endre på oppsettet på produksjonslinjen er så store at alt må være modulbasert hvis prisen på sluttproduktet ikke skal bli svært høy. Jeg mener det burde være mulig å få til en mye mer effektiv informasjonsflyt mellom tegning og robot, slik at man effektivt kan sette opp en robot til å gjøre en unik design. Dette har jeg lyst til å se nærmere på i oppgaven.



Figur 3 - Robot i aksjon hos Faktor industrier(Faktor 2009)

1.2 Problemstilling

Hvordan kan man ved hjelp av parametriske DAK programmer og CNC effektivt bygge komplekse strukturer i tre?

1.3 Avgrensing og Forutsetninger

- Fokuserer på tre som materiale, selv om andre materialer blir nevnt.
- Ser på to eksempeldesign: En med direkte CNC-fresing i 3D og en der man bygger opp med finer ut i fra 2D-snitt.
- Går ikke spesielt inn på at strukturen faktisk skal fungere som et busskur, det er kun en eksempeldesign for å utforske nye måter å bygge på. Ser dermed bort fra alt som har med styrkeberegning og funksjonalitet.
- Prisingen av strukturene er gjort med tanke på entreprenør. Det vil si at jeg ikke går inn på prosjekteringskostnader i oppgaven.



2. Teori

I dette kapitlet beskriver jeg teoridelen rundt de ulike verktøyene jeg kommer til å bruke i oppgaven. Det kommer også til å handle om hvordan man i teorien kan få til en effektiv tegne- og byggeprosess. Og litt om hvordan man kan få til en god informasjonsflyt mellom de to prosessene.

2.1 Parametriske DAK-programmer

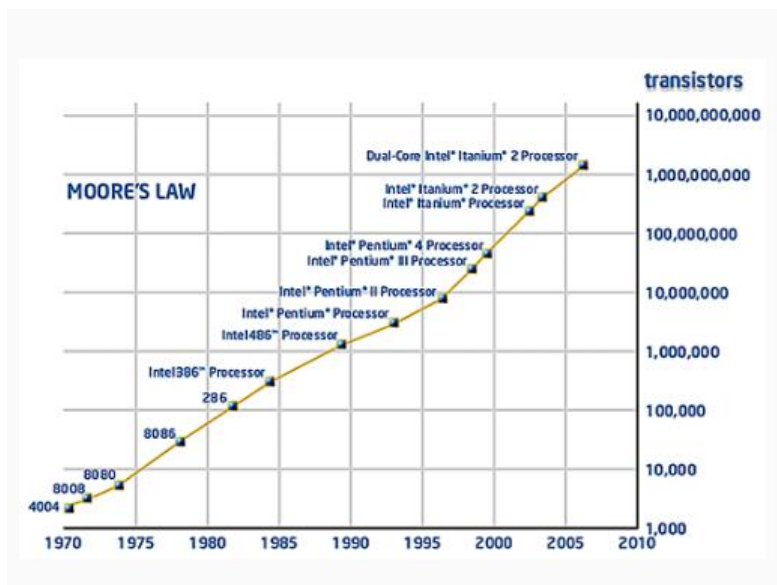
DAK eller dataassistert konstruksjon, er kjent som et verktøy for å formidle design og konstruksjoner ved hjelp av en datamaskin. Parametriske DAK programmer er programmer der man kan styre en eller flere parametere ved og endre en annen parameter, basert på hvordan man velger å bygge opp strukturen. Du er med andre ord helt fri til å lage akkurat den strukturen du vil, i motsetning til objekt orienterte programmer som for eksempel Archicad.

Ingeniører og designere har lenge brukt computere til å gjøre kalkulasjoner. Utviklingen av CAD startet med fly- og bilindustrien på 1950 tallet. Da utviklet US Air Force's SAGE (Semi Automatic Ground Environment) et grafisk anti air system. Systemet ble utviklet ved Massachusetts Institute of Technology's Lincoln Laboratory. I 1960 utviklet Ivan Sutherland programmet Sketchpad. Sketchpad blir sett på som det første CAD-programmet. En del av det matematiske arbeidet bak kurvene ble utviklet så tidlig som i 1940 av Robert Isaac Newton. (Marian Bozdoc)

De første DAK-programmene lignet svært mye på det man hadde gjort siden papiret tok over som formidlingsmedium for 400 år siden. Man kan si at dette bare var å flytte arbeidet som ble gjort med linjal og gradskive på tegnebrett, over på å definere linjer og kurver på en datamaskin. Det man vant på ved å starte og tegne på datamaskin var at man sparte tid på å slippe og gjøre alt på nytt hvis man måtte gjøre endringer på tegningen.

På 1970-80 tallet kom Formz. Dette programmet kom til å ha et banebrytende brukergrensesnitt der man kunne utføre programmerte kommandoer ved å velge verktøy i et grafisk skjermbilde. Dette var banebrytende fordi tidligere måtte brukeren skrive inn

kommandoer i tekstformat. I Formz kunne man også tegne direkte i 3D, men denne funksjonen var noe begrenset i og med at det ikke var mulig å endre på objekter. Hvis det var noe som måtte endres i 3D måtte man tegne det på nytt. Siden den gang har det kommet et utall versjoner av CAD-programmer med stadige forbedringer. Den raske utviklingen av datakraft var kanskje den viktigste faktoren til den raske DAK-utviklingen. Den førte til at prisen på datakraft og DAK-programmer sank raskt. Noe som igjen førte til at også mindre bedrifter kunne starte og bruke CAD.



Figur 4 -- Moores lov som viser utvikling av datakraft(greentechmedia 2010)

I dag kan man si at vi skiller mellom to hovedtyper av DAK programmer. Vi har objekt orienterte programmer som Archicad og Autocad, og vi har parametriske slik som Bentley Generative Components. I oppgaven har jeg valgt å bruke GC (Generative Components) for å ha muligheten til å bygge opp et kompleks parametrisk design.

Det avgjørende med oversiktighet og punktlighet når man jobber med komplekse parametriske DAK modeller. De som kommer etter deg må lett kunne oppfatte hva tegningen sier og kunne forstå hvordan strukturen er bygget opp. Dette er spesielt viktig når man jobber med komplekse design som i utgangspunktet kan være vanskelig å forstå.

Hvis man arbeider med å utforme kompleks bygningsstruktur er det svært viktig å lage designen så "enkel" som mulig samtidig som det er godt dokumentert. Det må være enkelt



for andre å forstå hva du har gjort, og hvordan du har bygget opp designen. GC er et program spesielt tilpasset det å tegne kompleks og parametrisk bygningsstruktur. Her bygges designen opp ved hjelp av programmerte transaksjoner som du alltid har mulighet til å gå tilbake å se på. Dette gjør at du får full oversikt over hva som skjer og det som har skjedd i designprosessen, noe som er essensielt når man tegner en kompleks design. Jeg beskriver programmet nærmere i metodekapittelet.

2.1.1 Dynamikk i prosessen

Når man jobber med kompleks bygningsstruktur er det lurt å lage dynamiske tegninger. Det vil si alle tegningene oppdaterer seg dersom du gjør mindre endringer på selve designen, da tenker jeg f.eks. på horisontale og vertikale snitt. Man vil da raskt kunne justere formen slik man vil ha den, uten å måtte tegne ting på nytt. I oppgaven har jeg hatt fokus på dette, og det kommer mer om dynamiske tegninger i metodekapittelet.

2.2 CNC

CNC er en forkortelse for Computer Numerical Control som på norsk blir datamaskinbasert numerisk styring. Det refererer til maskiner som kan bruke informasjon fra en datamaskin til å utføre ulike oppgaver.

En CNC-maskin arbeider ut i fra koordinasjonsakser. Det mest vanlige er at maskinene har to eller tre akser (X,Y,(Z)), men helt opp i 9 akser forekommer. Desto fler akser du har, jo større muligheter har du til å lage komplekse design. CNC ble utviklet ved MIT (Massachusetts institute of technology) Servomechanisms på slutten av 1940 tallet.

En CNC-maskin kan i dag brukes til å lage det meste, i dag brukes det for eksempel til å styre sveisemaskiner, vannskjærere, freser, sliper, bor eller sprayer i mekaniske verksted.

2.2.1 CNC-fresing

EN CNC fres arbeider gjerne ut i fra tre akser eller mer. En CNC-maskin av denne typen er utstyrt med et fresehode som bestemmes ut i fra hvilket materiale man skal frese og hvor grovt man skal frese. De mest avanserte CNC fresene kan automatisk bytte mellom ulike verktøy.



Desto fler akser en slik fres har, jo vanskeligere er den å operere. Men flere akser gir som sagt også flere muligheter. Hos Snøhetta arkitekter fikk jeg se hvordan de opererte en 5 akset fres. Når man skal eksportere en 3D-fil inn i en CNC-maskin må man se til at maskinen bygger opp korrekte kjørebane for fresehodet. Da er det flere ting det må tas hensyn til. Det er blant annet punkt til punkt problematikk, det vil si at det fort kan oppstå et problem når fresen skal inn og ut av materialet. Når fresen er ferdig med å frese en bane må den vekk fra materialet før den starter på neste bane. Her kan det skje at fresen kolliderer med materialet når den skal forflytte seg. Hvis man da har en fres med mer en 3 akser er gjerne ikke dette et problem, siden fresen vil gå ut i en bestemt retning, enten x, y eller z vekk fra materialet. Når man derimot har en fres med 5 eller fler akser vil fresen ikke nødvendigvis bevege seg på den måten som er kortest for fresehodet. Maskinen vil bevege seg slik at den med minst mulig bevegelse i leddene beveger fresehode fra a til b. Dette kan av og til føre til forflyttinger som kan være vanskelig å forutse. Freseprogrammene for freser med 5- akser er derfor lagt opp slik at man kan gjøre grafiske simuleringer der man ser hvordan fresene vil bevege fresehodet fra punkt til punkt.

2.2.2 CNC-kutting

En CNC-styrt kuttemaskin kan være utstyrt med for eksempel en vannskjærer, laserkutter eller en enkel båndsg.

Disse maskinene brukes til å lage 2D-kutt i forskjellige materialer, og de jobber stort sett ut i fra 2 akser (x,y). Dette gjør at de blir enkle å programmere og sette opp for forskjellige design, noe som fører til at prisen på CNC-kutting ikke nødvendigvis blir høy.

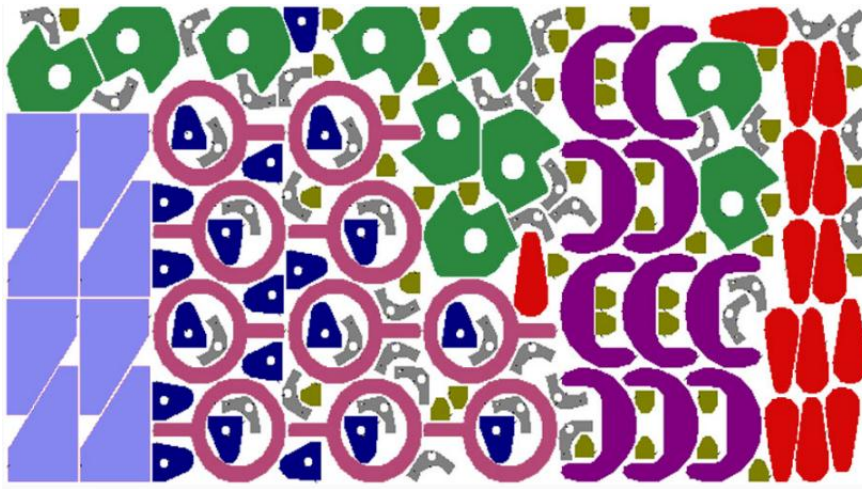
Hvis man lager en kompleks design som krever at man kutter alle bitene i designen forskjellig kan man bruke disse maskinene til å produsere kuttene raskt og presist. Ved hjelp av denne teknologien skal det være mulig å produsere kompleks bygningsstruktur relativt rimelig.

2.2.3 Nesting

Når jeg omtaler nesting i denne oppgaven snakker jeg om en programmeringsmetode for å optimalisere materialbruken.

Nesting er allerede mye brukt i maskin-, tekstil- og båtbyggerindustrien for å optimalisere materialbruk med tanke på avkapp. Jeg vil dele inn nesting i to hovedkategorier, flatenesting og lagernesting.

Med flatenesting mener jeg at man har en stor flate, for eksempel en aluminiumsplate som skal kuttes i flere deler. Da kan man få et nestingprogram til å optimalisere materialbruken ved å lage smarte kutt.



Figur 5 - Eksempel på flatenesting(cncut 2009)

Med lagernesting tenker jeg på større industrier der man har et stort materiallager. I en slik industri kan nesting brukes til å hente ut den spesifikke materialbiten som skal brukes til å gjøre et spesifikt kutt. Det vil si at programmet henter ut den biten som passer best til det du skal lage.

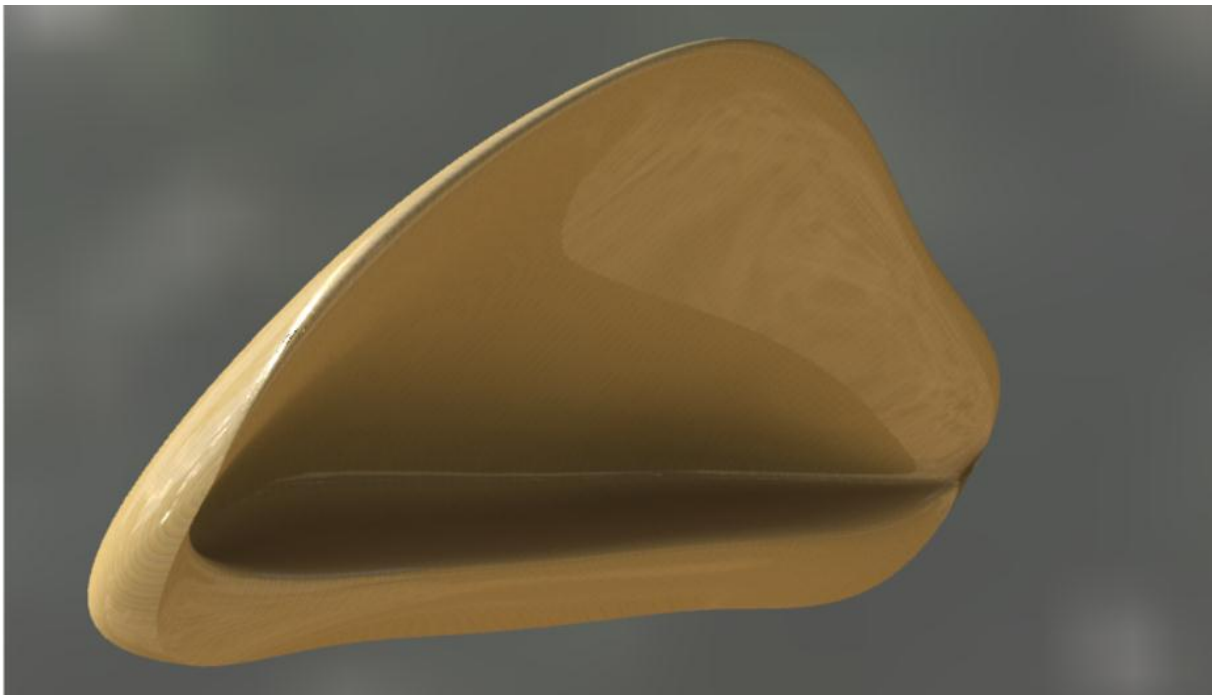
2.2.4 3D-printing

3D-printing er et verktøy for raskt og enkelt å kunne lage små modeller i 3D. Ut i fra en DAK modell kan man eksportere en solid modell til 3D-printeren for så å printe i 3D.

3D-printeren bygger opp en modell ved å legge opp lag på lag av et materiale i enten flytende form eller i pulverform. En 3D-printer brukes gjerne av produktutviklere eller arkitekter fordi det er en relativt rask og prisgunstig måte å lage modeller og prototyper på. Når man skal bruke en 3D-printer er det viktig at man vet at det man tegner er en solid modell og ikke et skall.

3. Metode og gjennomføring

I dette kapittlet beskriver jeg metoden jeg har brukt for å bygge opp den komplekse designen. Jeg beskriver også metodene jeg har brukt for å bygge opp de to modellene av eksempeldesignet. Den ene modellen er bygget opp ved hjelp av CNC-fresing og den andre er bygget opp av finersnitt som er satt sammen.



Figur 6 - Rending av designet

3.1 Bakgrunn for designet

Da jeg bestemte meg for å skrive om kompleks bygningsstruktur, fant jeg ganske raskt ut at jeg ville prøve å lage noe selv. På den måten ville jeg få praktisk erfaring med hvordan man kan bygge kompleks bygningsstruktur. Jeg bestemte meg for å lage en relativt liten og enkel men samtidig kompleks design.

Målet med designen var å ha en relativt enkel men samtidig kompleks design som jeg kunne bruke til å se på forskjellige måter å bygge designen på. Jeg ville samtidig prøve å lage en design som mange kunne se på daglig og som hadde en praktisk funksjon. På bakgrunn av disse forutsetningene bestemte jeg meg for å designe et buskur.

I utgangspunktet hadde jeg som mål å bygge busskuret i fullskala. Men etter å ha snakket med en del bedrifter, fant jeg fort ut at jeg ikke hadde tid til å skaffe de ressursene som skal til for å gjennomføre et slikt prosjekt i fullskala. Det hadde krevd store økonomiske ressurser og mye tid av de bedriftene jeg skulle samarbeidet med, på grunn av at ingen har mye erfaring med å bygge på denne måten.

Men ved å velge å designe et busskur kunne jeg holde alt i en relativt høy skala når jeg bygget modell, samtidig som ting ikke ble alt for stort. Et busskur i et sentralt område er også noe mange folk ser daglig uten at de nødvendigvis oppsøker det.

I dag finansieres de fleste busskur i sentrale strøk av et reklamefirma. Dette fører ofte til et dårlig estetisk uttrykk. Årsaken til at et reklamefirma finansierer dette er fordi disse byggene er svært eksponerte. Derfor mener jeg det kan være interessant å se på hvordan man kan bygge slike bygg på en ny måte.

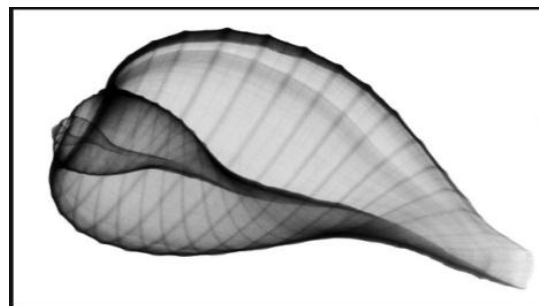
3.2 Utforming av designen

Utformingen av designen på busskuret er inspirert av formen på åpningen av en konkylie.

I utgangspunktet mener jeg at det er feil å lage designen kompleks bare fordi det skal være komplekst. Men i denne oppgaven er det egentlig den praktiske metoden for oppbygningen av designen som er viktig fremfor hvordan jeg kom frem til designet og hvordan det ser ut.

I designen min ville jeg ha noe som representerer beskyttelse, men som samtidig åpner seg opp. Målet mitt var å lage et busskur der brukerne kunne være beskyttet for vær og vind, samtidig som de lett kunne orientere seg om hvilke busser som kom.

Jeg gjorde et søk på internettet etter noe som kunne inspirere meg. Jeg ville ha noe som representerte nettopp åpenhet og beskyttelse. Da fant jeg etter en stund et bilde



Figur 7 – Konkylie (Green 2008)



Figur 8 – Shell house (greentechmedia 2010)

av en konkylie, noe som jeg følte representerte det jeg lette etter. Jeg ble også inspirert av skjellhuset designet av artchnic (figur 6).

Med denne oppbygningen av designen fikk jeg noe som ga et relativt vakkert estetisk uttrykk og samtidig oppfylte kravet om kompleksitet.

3.3 Oppbygning av DAK-modell

Designen min er tegnet i Bentley Generative components. Programmet er spesielt designet for å tegne komplekse strukturer. Jeg valgte å bruke programmet etter en overbevisende demonstrasjon av Lars Moth Poulsen fra Bentley Systems på et seminar holdt av building SMART NORGE. Jeg ble overbevist om at det var best å bruke et parametrisk designprogram for å designe strukturen.

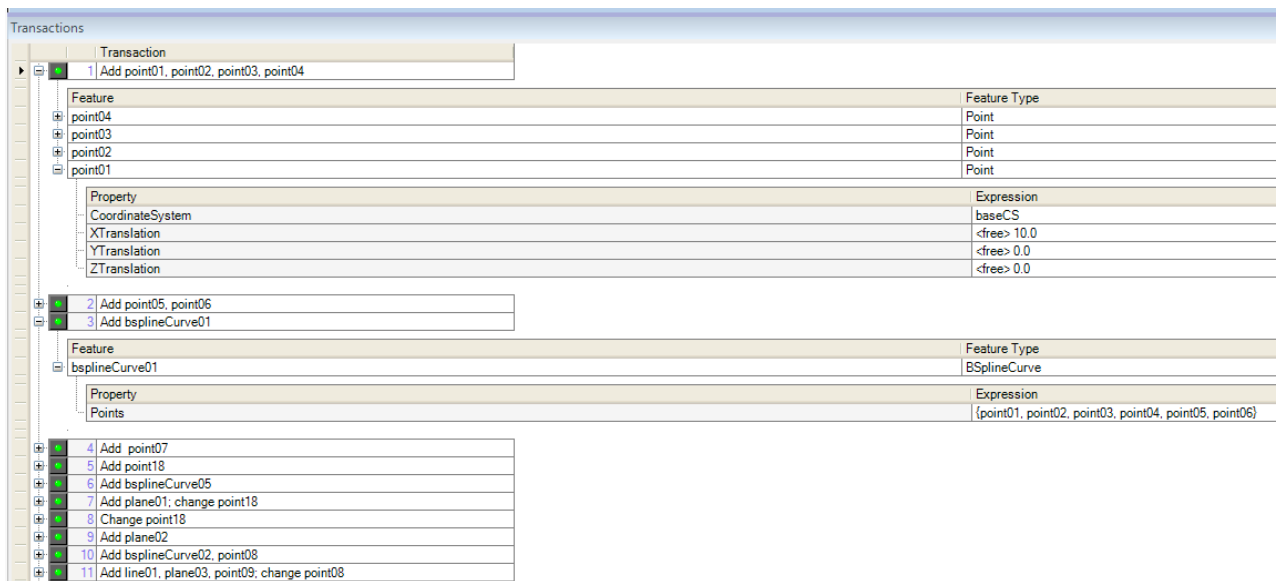
3.3.1 Dynamikk i DAK-modellen

Her beskriver jeg hvordan jeg har bygd opp en dynamisk modell som er enkel å holde kontroll på.

Før jeg startet med selve tegningen, leste jeg gjennom tutorilas(eksempler som forklarer hvordan man bruker et program) for å få en bedre innsikt i programmet og lære mer om hvordan man skal tenke når man bygger opp en kompleks design. Som jeg beskrev i teoridelen er det viktig å bygge opp en ryddig og oversiktlig tegning. Derfor har jeg bygget opp designen min med transaksjoner som man kan gå inn i for å se hvordan strukturen er bygget opp. Disse transaksjonene kan man endre, slette, slå av eller slå på. På denne måten kan man alltid fritt endre på designet. Slik får både jeg og andre god oversikt.



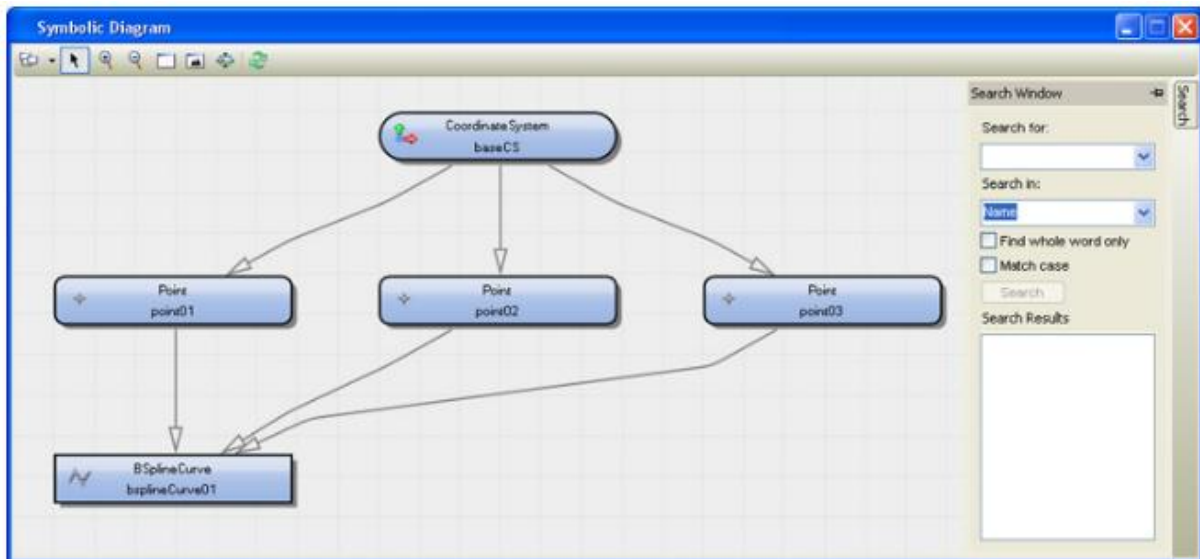
Figur 9 - Eksempel på bruk av Bentley Generative components (Bentley 2010)



Figur 10 -- Et utsnitt som viser hvordan designet er bygget opp av transaksjoner

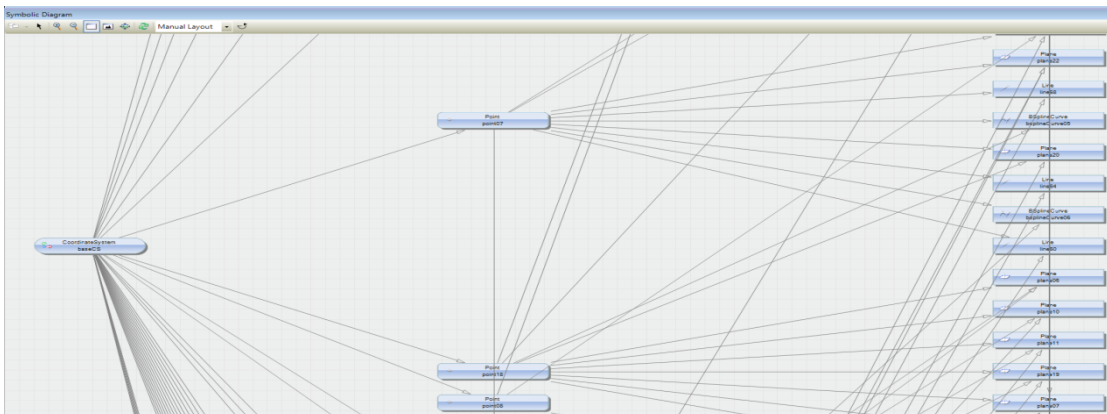
På figur 9 ser man hvordan jeg har bygget opp designet ved hjelp av slike transaksjoner. Disse transaksjonene gir en god oversikt samtidig som man alltid kan gå tilbake til alle transaksjoner å gjøre endringer. Her ser du hvordan jeg startet å lage designet ved å lage fire punkt, koordinatene til disse fire punktene finner du alltid igjen i transaksjonene slik at man kan endre posisjon. Så lager jeg bsplineCurve01, der de fire punktene styrer denne kurven. Fullstendig transaksjonsscript ligger som vedlegg.

Enda et hjelpemiddel jeg brukte for å holde kontroll på det komplekse designet var noe som kalles symbolic diagram. Dette er et diagram som viser hvordan strukturen er bygget opp, og hva som henger sammen. Det vil si at man får en god oversikt over hvilke parameter som endrer seg med endringer man gjør på en annen parameter. Her kan man i tillegg gå inn i de forskjellige objektene for å gjøre endringer i designet, for eksempel endre koordinatene til punkt 3.



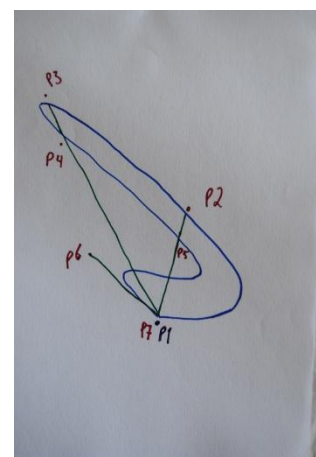
Figur 11 - enkelt eksempel på et symbolic diagram

Disse kan bli litt uoversiktlig i større modeller, da er det svært nyttig å kunne søke opp den parameteren man vil se nærmere på. I en stor modell kan det være vanskelig å finne frem i transaksjonsfilen.



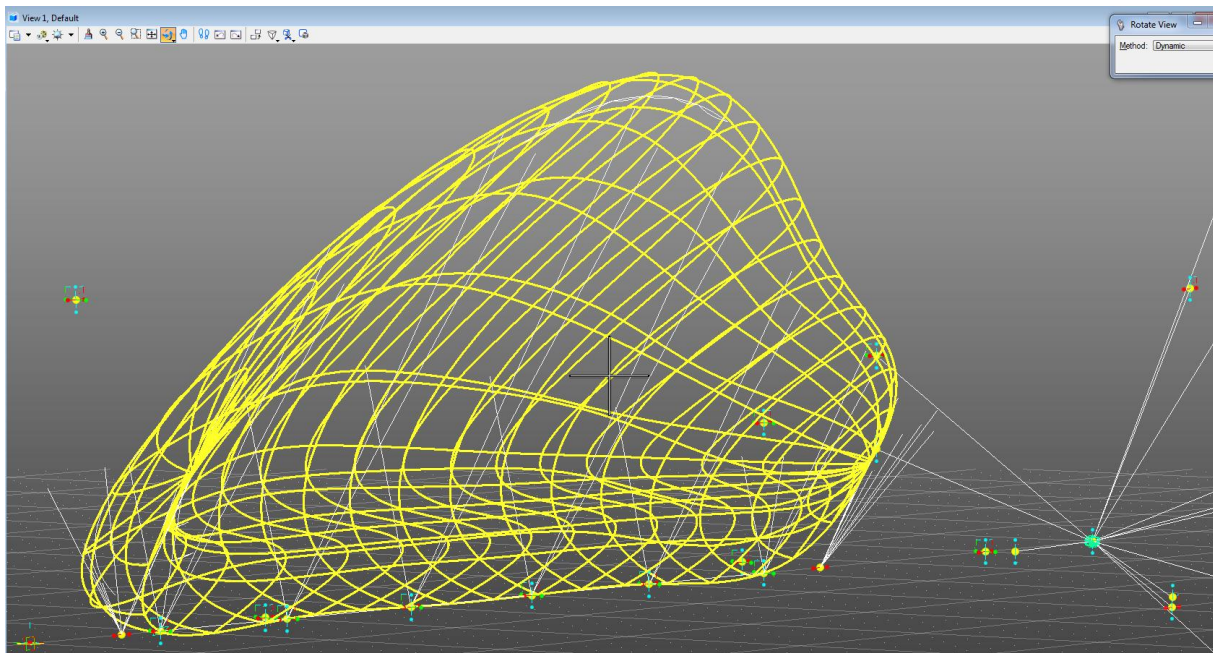
Figur 12 – Eksempel på et sybolic diagram i en større modell

Designet er altså bygget opp av punkter, linjer og plan som kan justeres ettersom man ønsker og utforske designen. Det betyr at man kan endre på plan og linjer slik at hele formen på den komplekse designen endrer seg. Sluttpunktene på linjene danner flere b-splinekurver som igjen danner en b-splineoverflater. En b-splinekurve er en jevn kurve som dannes av to eller flere punkt. På figur 5 ser man en b-splinekurve som er bygget opp av sju punkter. Hvis man beveger på noen av punktene vil derfor b-splinekurvene



Figur 13 - b spline curve

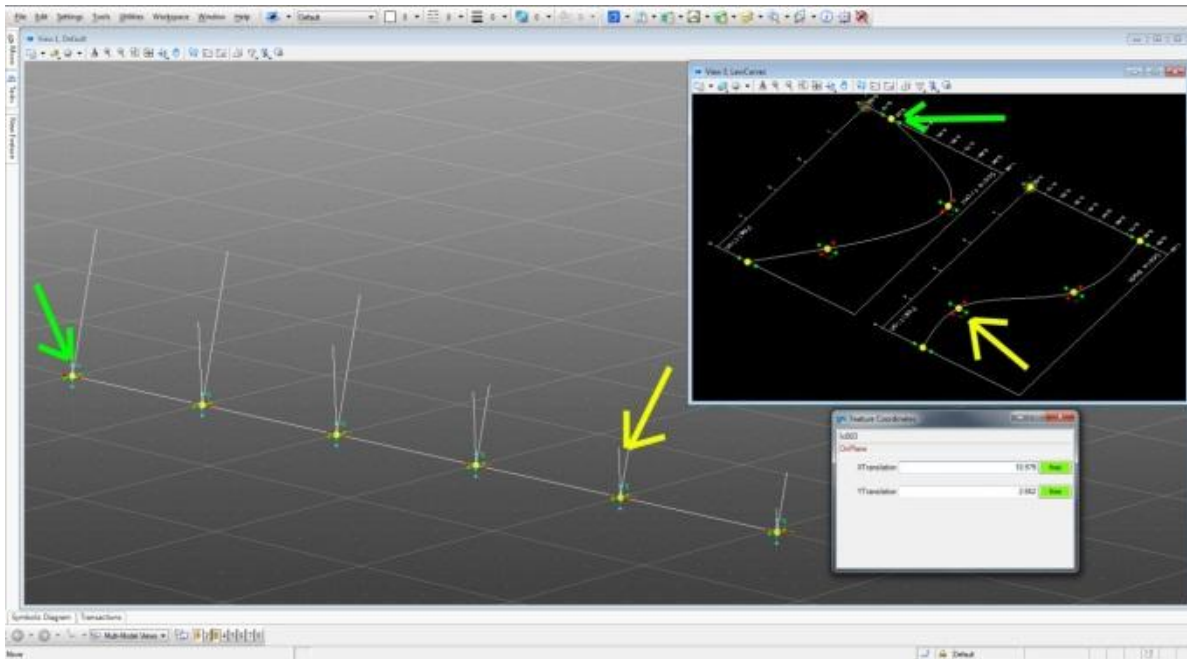
endre seg. De grønne linjene jeg har laget, er for at punktene skal holdes i rett plan hele tiden. Samtidig kan punktene flyttes ved å endre lengde og vinkel på linjene (se fig. 10). Når man bygger opp designet på denne måten kan man enkelt og med stor nøyaktighet endre designet slik man vil.



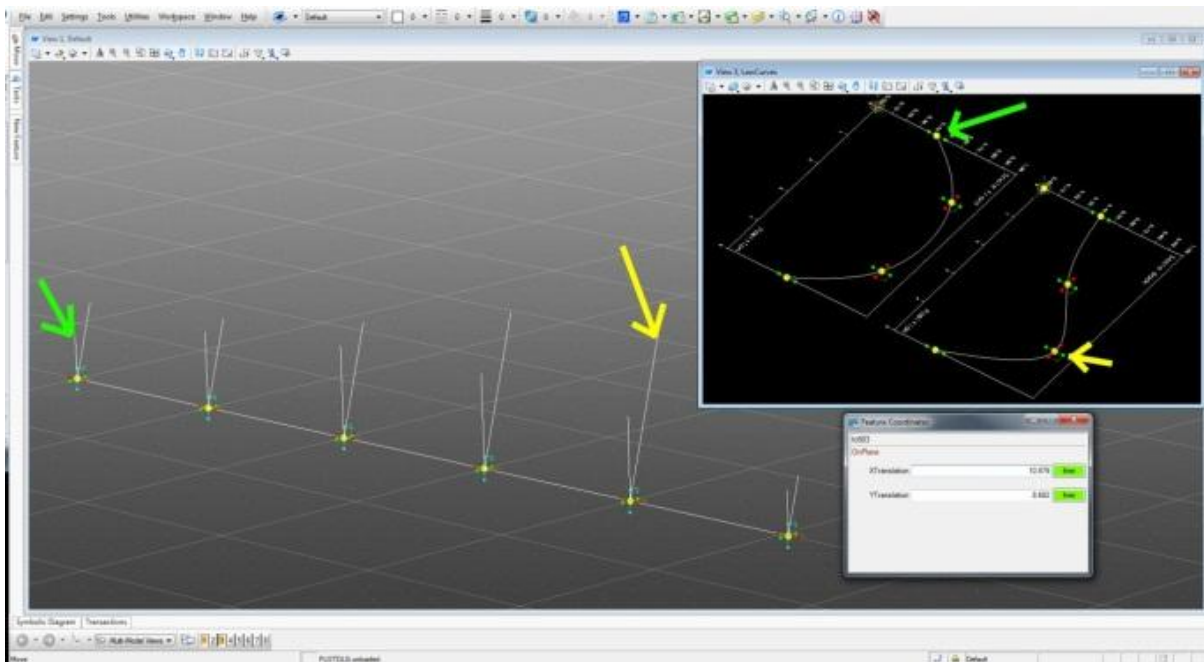
Figur 14 - De gule kurvene er b-splinekurver som danner en b-splineoverflate

Når man lager en b-splineoverflate kan man dra i punkter på overflaten av modellen for å endre formen, denne teknikken kalles NURBS (Non-Uniform Rational B-Spline) og er mye brukt i mange programmer.

Siden designet mitt er relativt komplekst valgte jeg å lage såkalte lawcurves. De kan jeg bruke til å få en bedre kontroll og forståelse av designet (se figur 15 og 16). Med slike 2D law curvs kan jeg bestemme hvordan kurvaturen på designet skal se ut i 3D. Jeg kan også bruke disse lawcurvene til å styre mange punkt ved å lage en kurve med bare fire punkt, dette skjer ved at alle de punktene jeg velger legger seg på den kurven jeg lager med fire punkt. Dette hadde vært til enda større hjelp hvis konstruksjonen hadde vært større.



Figur 15 – Lawcurvs 1



Figur 16 - Lawcurves 2

Når man lager dynamisk design er det også muligheter for å bruke den samme "plattformen" flere ganger til å lage ulike tegninger. Det vil si at hvis jeg har tegnet en sylinder kan jeg bruke den som plattform til å lage mange forskjellige dimensjoner eller



former. På denne måten kan du opparbeide ditt eget bibliotek av former som du tror kan brukes ved en senere anledning.

3.3.2 Materialbesparelse med dynamiske modeller

Man kan gjøre store materialbesparelser ved å lage en smart dynamisk design.

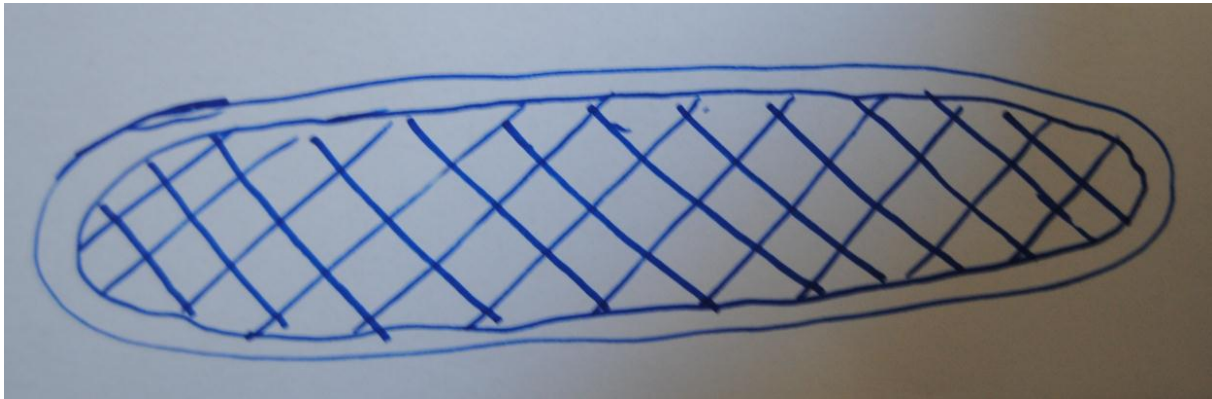
Ved å ha mulighet til raskt å kunne justere formen slik man vil ha den, kan man med tanke på hvilke materialer man har til rådighet lage en smart design. Med dette mener jeg at hvis det er mulig estetisk sett, gjør man små endringer på designet for å spare material. Man har jo gjerne en viss diameter på trematerialet man jobber med, og da kan det være smart å lage en design som utnytter diameteren på trematerialet.

3.4 3D-modelltest

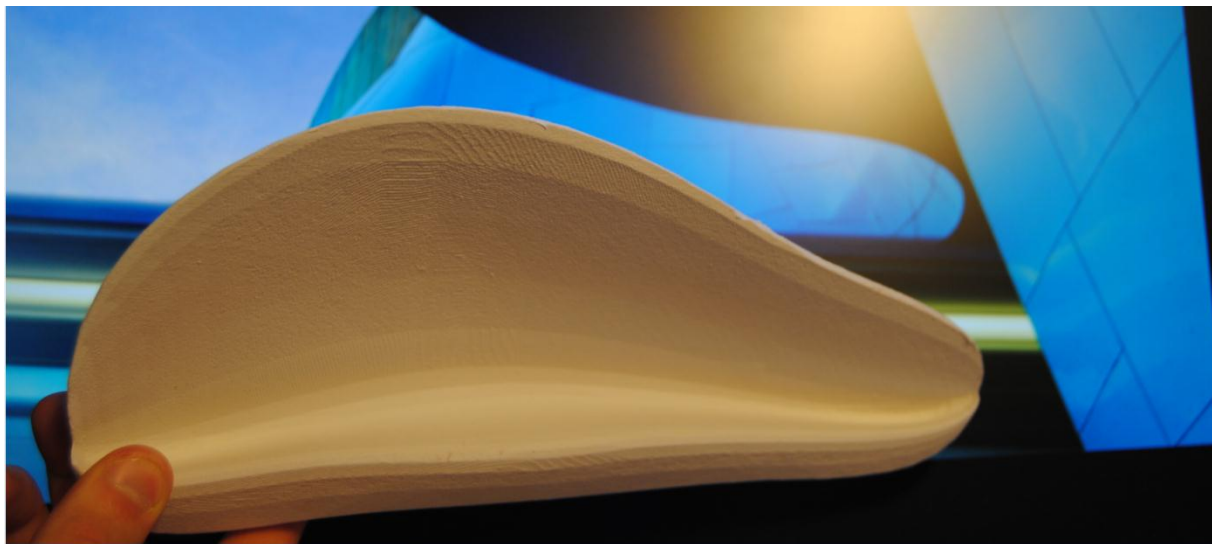
Før jeg skulle frese, ville jeg prøve å lage en enklere og billigere 3D-modell for å se hvordan modellen så ut og om det burde gjøres forbedringer. Jeg fant ut at 3D-printing trolig var en god måte å gjøre dette på. En 3D-printer er relativt dyr i innkjøp, men å gjøre et print er relativt billig hvis man bygger opp modellen på en smart måte. Printet mitt kostet ca. 300 kr.

Med hjelp av Henrik Holmberg (student ved UMB) og tillatelse fra Thomas Thiis (førsteamanuensis ved UMB) eksporterte vi en SAT (Standard ACIS Text) fil fra GC til-3D printeren. Verken jeg eller Henrik hadde prøvd å bygge opp en modell basert på en SAT-fil før, og vi var spente på om 3D printeren leste filen bare som et skall eller som en solid modell. Hvis modellen hadde blitt lest som et skall ville ikke printerens bygget opp noe struktur inne i modellen og den ville derfor ha falt fra hverandre. Men SAT var den eneste filtypen som både Generative Components og 3D printeren kunne eksportere/lese. Vi var heldige, og 3D-printeren bygget opp en solid modell med skall ytterst og en struktur

innvendig. Resultatet ble svært bra, jeg ble imponert over 3D-printerens nøyaktighet.



Figur 17 - Slik bygget 3D printeren opp modellen, et utvendig skall med en struktur innerst



Figur 18 - 3D-print av modellen

Nå kunne jeg bruke denne relativt billige modellen til lettere å se hvilke forbedringer jeg burde gjøre på designen før jeg CNC-freste. Jeg fant blant annet ut at sidekantene mine var for tynne, ikke engang 3D-printeren klarte å printe de ekstremt tynne sidekantene (se figur 18). Det ville ikke være mulig å frese dette uten at fresen laget sprekker eller andre skader i treverket. Jeg fant også ut at setet hadde fått litt for brå vinkling til at det hadde blitt behagelig å sitte. Dermed gikk jeg tilbake i GC og endret designen slik at disse feilene ble rettet opp. Jeg vinklet sete opp for at det skulle bli flatere og



Figur 19 - Modellen var for tynn i sidekanten .4



samtidig laget jeg sidekantene litt tykkere. Siden hele designet var bygget opp dynamisk og ved hjelp av transaksjoner, gikk det relativt fort å gjøre disse endringene.

Disse feilene kunne jeg selvfølgelig også avdekket i 3D-modellen, men på en såpass kompleks design synes jeg at det var betraktelig lettere å se feilene når jeg hadde en faktisk modell. Derfor mener jeg at det kan være svært nyttig å bruke 3D-printing også på større prosjekter av samme form. Dette kan gjøres både for å avdekke feil og for å få et godt visuelt uttrykk tidlig i prosessen.

3.5 Gjennomføring av CNC-fresing

I dette underkapittelet beskriver jeg fremgangsmåten som ble brukt for å lage den CNC-freste modellen.

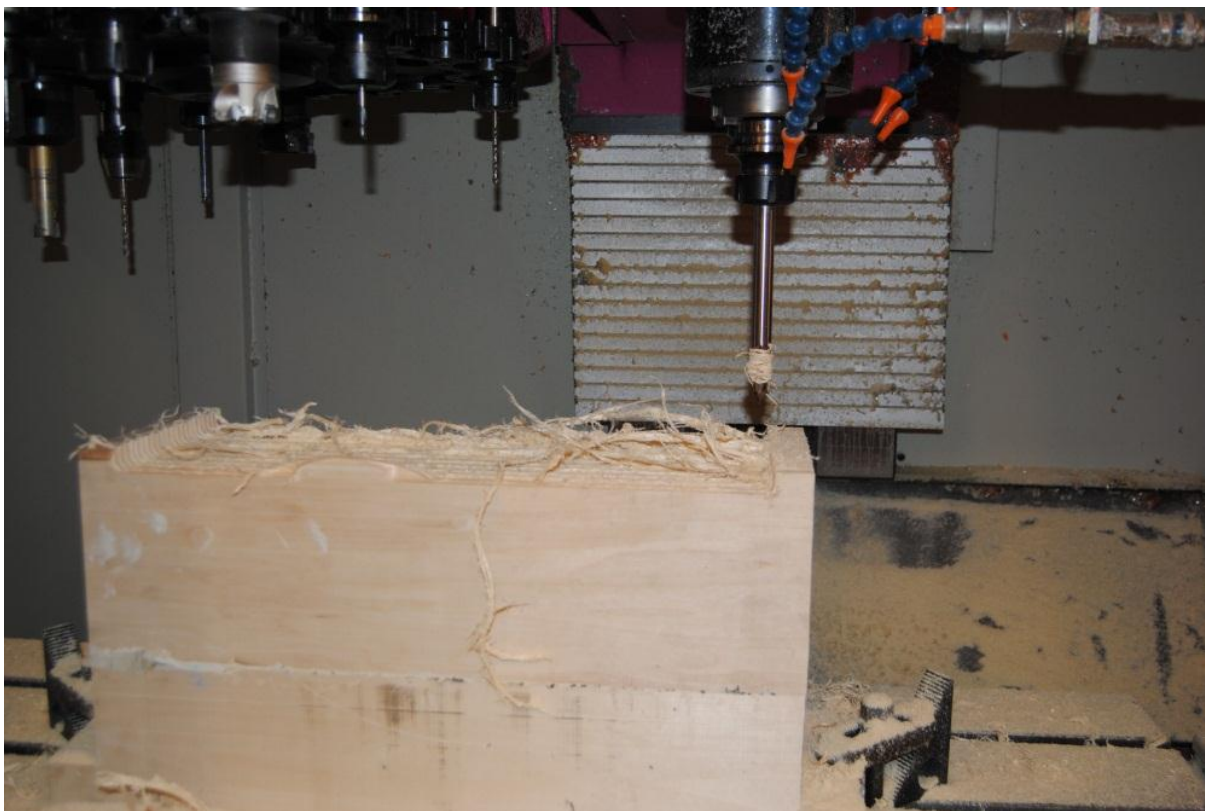
3.5.1 Bygging av modell

Først tok jeg kontakt med Snøhetta arkitekter for å høre om de var interessert i å gjennomføre et slikt prosjekt sammen med meg. De har en 5-akset fres som hadde vært ideell til å bruke i prosjektet mitt. Men de var allerede i gang med et eget prosjekt av samme art, og av økonomiske grunner så de seg ikke råd til å gjennomføre enda et slikt prosjekt. Men jeg fikk god innsikt i erfaringer de hadde gjort fra sitt prosjekt og det var til stor hjelp når jeg skulle gjennomføre prosjektet mitt.

Etter avslaget hos Snøhetta fikk jeg vite at vi hadde en 3-akset fres på skolen. Jeg kontaktet Gunnar Torp som har ansvaret for CNC-fresen på verkstedet, han lovet å hjelpe meg med CNC-fresingen. Vi ble ening om at STL (StereoLithography) var det beste formatet å bruke for å mate fresen med informasjon. Grunnen til at vi valgte STL format er at STL bare definerer overflaten på en tredimensjonal struktur, den tar ikke hensyn til farge eller andre attributter. Og siden det var nettopp overflaten vi var interessert i å eksportere valgte vi STL. Etter en del problematikk fikk jeg eksportert en STL fil av modellen som var vinklet slik at vi kunne optimalisere materialbruken av laminatet jeg allerede hadde laget.

Laminatet valgte jeg å lage av osp, noe som viste seg ikke å være det beste materialet å bruke når man skal frese. Ospa har en tendens til å trevle seg når man freser, det vil si at den strimler seg i stedet for at det kommer ut små spon. Senere fant jeg ut at osp ofte blir

brukt i staller på grunn av nettopp denne egenskapen, fordi når materialet trevler seg så sliter ikke hestekoene like fort på materialet. Hvis jeg hadde gjort grundigere undersøkelser på forhånd, kunne jeg ha unngått dette problemet. Dette førte til at vi måtte stoppe fresen for hver centimeter for å rense den for trestrimler. Optimalt sett skulle man kunne la fresen gjøre hele jobben i en operasjon. De oransje hodene på bildet er luftventiler som skal blåse vekk spon slik at fresen rensker seg selv. Men siden ospen trevler seg var ikke lufttrykk nok til å få rensket fresen.



Figur 20 - Eksempel på at ospen trevler seg

Siden skolen bare har en fres med 3-akser og designen min var relativt kompleks klarte vi ikke å frese alt fra en side, vi klarte heller ikke å komme til overalt. Først freste vi den ene overflaten fra en side, deretter snudde vi både DAK-modellen og den faktiske modellen 90 grader for å frese innvendig. Når man er nødt til å snu modellen er det vanskelig å få til et perfekt resultat, i og med at det er svært vanskelig å treffe eksakt samme nullpunktet etter at man har snudd modellen.

Når vi snudde modellen prøvde vi også et nytt fresehode som egentlig er beregnet for å frese aluminium. Dette fresehode fungerte mye bedre, og vi kunne kjøre så å si hele modellen i en operasjon. Men på grunn av at fresen startet å butte i det overfløydige materialet, måtte vi kutte bort litt for hånd. Dette gjorde vi mens modellen sto i fresen ved å sage litt inn på begge sider for så og kile i kuttene slik at treverket sprakk opp. På figur 21 ser man modellen etter at vi kuttet vekk materialet fresen buttet i, det er materialet nærmest på bildet.



Figur 21 - Fresing innvendig

For at fresingen skal være effektiv må man først grovfrese med et grovt fresehode, for så å skifte til et finere fresehode å gjøre finfresingen. Dette er spesielt viktig på større prosjekter der man gjerne skal frese bort store mengder material.



Figur 22 - ferdig CNC frest modell

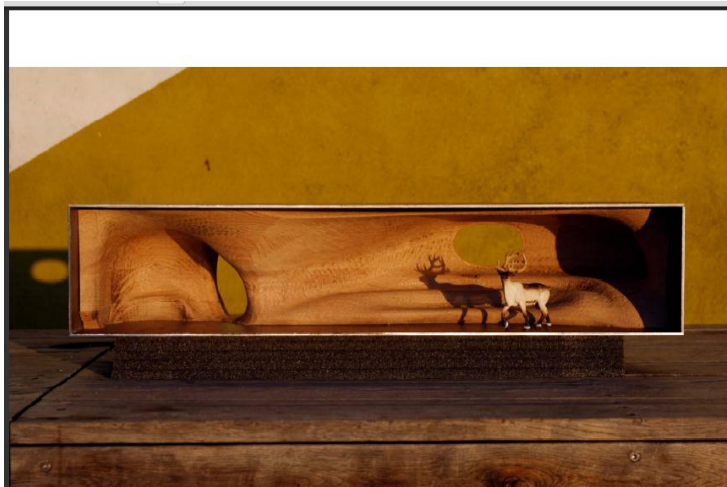


Figur 23 - ferdig CNC frest modell

3.5.2 Fullskala CNC-fresing

En fullskalaprojekt av denne designen hadde krevd annen oppbygning av materialet samt en mye større fres, helst en 5 akset fres.

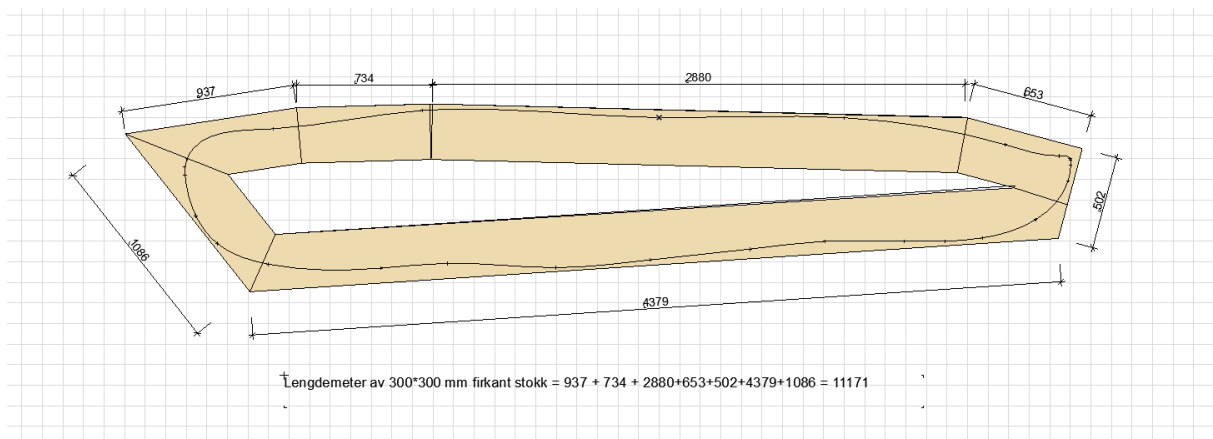
I 2010 gjennomførte Snøhetta arkitekter og Djupevåg båtbyggeri et prosjekt for Norsk villreinsenter på Hjerkin. Snøhetta sto for design, mens Djupevåg sto for oppføringen av den komplekse trestrukturen. Dette er et 75 kvadratmeter stort bygg, der de har satt en kompleks trestruktur inn i en stållamme. Hele bygget kostet 4 millioner kr, mens selve trekonstruksjonen kostet kr 900 000,- eks moms å produsere. Av disse pengene gikk kr 200 000,- til materialkostnader og kr 600 000 til laftearbeidet samt transport. Det var Djupevaag båtbyggeri som prissatte byggingen av trekonstruksjonen, og i følge Lars Djupevaag traff de rimelig bra med anbudet sitt. Jeg kommer til å bruke en del erfaringer fra dette prosjektet når jeg beskriver hvordan CNC-fresing kan gjøres i fullskala. (Djupevaag 2011; Snøhetta 2011)



Figur 24 - Modell av Hjerkinprosjektet(Snøhetta 2011)

Når jeg laget modellen freste jeg den direkte ut fra et solid rektangulært emne. Hvis prosjektet skulle blitt gjennomført i fullskala hadde dette vært ugjennomførbart med tanke på materialkostnaden. For å løse dette ville jeg laget flere 2D-snitt gjennom modellen for så å lafte opp ett og ett snitt. Forutsett at du har planker av en dimensjon på 30*30 cm (h*b). Hvis man da lager et snitt for hver 30 cm i høyden, kan man lafte opp ett og ett snitt med samme dimensjon som materialet man har tilgjengelig. Når man lager disse snittene må man

passer på at de treffer der modellen er bredest, slik at du får ut størst mulig 2D-snitt. Man må også passe på at man alltid bygger fra et stort snitt til et mindre snitt. Det betyr at jeg må bruke snitt 1 to ganger, både når jeg lafter runde en og to, dette er fordi det er det bredeste snittet for runde en og to.

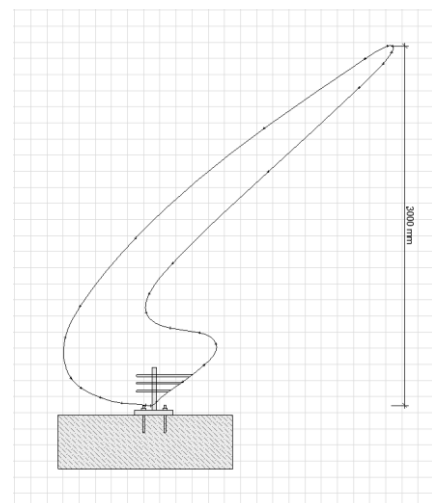


Figur 25 - Laftetegning for snitt 1

Når man skal lafte etter disse 2D snittene er det viktig å ha definert et globalt nullpunkt som er likt for alle snittene. På denne måten er det lett for de som skal lafte og vite hvor de skal starte med hver lafterunde.

Hvis man skulle gjort dette med en 3-akset fres kunne man ha laftet opp bare en runde per fresing for så å snu laftet på hodet og frese den andre siden. Med en 5-akset fres kunne man bygd opp hele laftet for så å frese hele strukturen i en fresing. Forutsatt at man har automatisk fjerning av flis og mulighet for å bytte fra grovt til fint verktøy automatisk.

Fundamenteringen av en slik struktur ville jeg gjort med innslissede stålplater på langs med strukturen som boltes



Figur 26 - Fundamentering



fast i betong. Den enkleste måten å gjøre dette på er nok først å montere stålplaten, så å heise trestrukturen på plass for til sist å slå inn ståldybler.

3.5.3 Prising av fullskala CNC-fresing

Å beregne prisen på en kompleks design i tre vil være svært komplisert og det vil kreve en høy grad av kompetanse og erfaring. Personlig har jeg ingen erfaring med prising av slike konstruksjoner, men har gjort noen beregninger basert på opplysninger fra aktører med mer erfaring.

Det som påvirker prisen i størst grad er kompleksitet, størrelse og materialbruk. Desto større og mer komplekst man bygger jo dyrere blir det. Erfaring og verktøy spiller også en stor rolle i prisfastsettelsen. Har man erfaringen som skal til og man vet at man har de verktøyene som trengs for å gjennomføre prosjektet blir alt mye lettere.

Hvor mye materiale som går med varierer ofte med kompleksiteten. Høy kompleksitet vil føre til høyere materialbruk og prisen øker dermed eksponentielt. Hvis man skal se nærmere på kompleksiteten i en design og på hvor mye materialer som går med i byggeprosessen, ville det hjelpe å dele modellen opp i 2D-snitt. Derfor lagde jeg horisontale snitt med en høyde lik materialet jeg skal bygge med, med det mener jeg høyden på trevirket. Når man har disse horisontale snittene kan man lage fabrikkstegninger der man tegner opp hvordan man vil lafte treet. Ut i fra dette kan man med et enkelt $h*b*I$ regnestykke finne ut hvor mye materiale som går med. Man må også beregne en del avkapp. Jeg ringte Georg Solem som arbeider ved Solem sag og fikk en pris per meter på skurlast med dimensjon 300*300 millimeter. Han mente det kom til å komme på rundt 400-430 kr/m, men var litt usikker siden de sagde svært lite av denne dimensjonen. Jeg ringte også til Bøfjorden sag, der fikk jeg oppgitt en pris på 430 kr ferdig høvlet. På bakgrunn av disse opplysningene har jeg valgt å bruke en meterpris på 430 kr. (Eggen 2011; Solem 2011)



Snitt nr	Lengdemeter	pris per meter (kr/m)	pris per snitt (kr)
1	22,4	430	9632
2	6,2	430	2666
3	5,3	430	2279
4	4,8	430	2064
5	4,2	430	1806
6	3,3	430	1419
7	2,7	430	1161
8	1,7	430	731
Sum	50,6		21758

Figur 27-tabell som viser utregning av materialkostnad.

Grunnen til at snitt 1 er på hele 22.4 meter er fordi det er det bredeste snittet to ganger, det må dermed laftes to ganger. Hvis man i tillegg beregner 10 % avkapp blir materialkostnaden cirka 24 000 kr.

Pris på selve laftearbeidet er vanskelig å anslå. Jeg har gjort en grov beregning basert på erfaringer fra Hjerkinnsprosjektet samt opplysninger fra Tømmergutta og STOKK & STEIN som begge er laftebedrifter med lang erfaring. I snitt vil det koste cirka kr 900,- per meter laft, det vil i mitt tilfelle utgjøre en totalkostnad på laftearbeidet på kr 45540,- . Dette er usikre beregninger fordi ingen av laftebedriftene har utført et laft på eksakt denne måte tidligere. Prisen er trolig litt høy med tanke på at bedriftene har manglende erfaring. (STEIN 2011; Werp 2011)

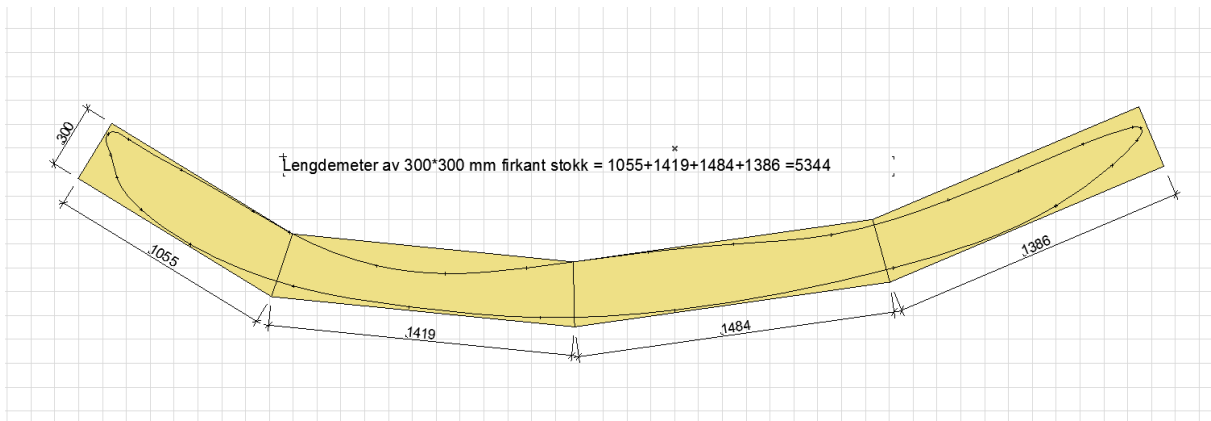
Når laftingen er unnagjort er det klart for CNC-fresingen. Dette er i følge Djupevaag den biten det er vanskeligst å sette en pris på. Ut i fra erfaringer Djupevaag hadde gjort fra Hjerkinnsprosjektet anslo vi en pris på 45 000 kr.

Dette gir en totalpris på selve trestrukturen lik kr 114 540,- eks moms.

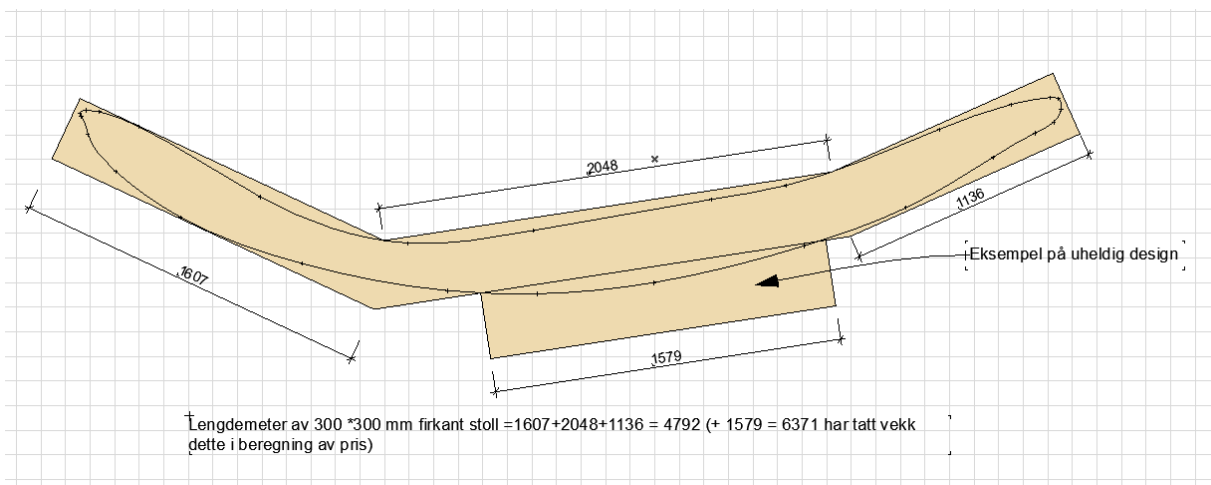
3.5.4 Nesting og dynamiske tegninger i forbindelse med CNC fresing

Basert på dynamiske tegninger kan man med raske endringer i designet se på om 2D-snittene er materialeeffektive eller ikke (se figur 28 og 29).

I eksempelet mitt har jeg brukt firkantstokker med en høyde og bredde på 300 millimeter. Ut i fra dette kan jeg lage en design som passer best mulig med denne materialdimensjonen, det vil si en tykkelse på for eksempel cirka 300 eller 600 mm.



Figur 28- Eksempel på god materialutnyttelse



Figur 29-Eksempel på dårlig materialutnyttelse

Hvis man lafter i stor skala og har et stort materiallager, kan man også optimalisere materialbruken av stokkene basert på lengde ved hjelp av nesting. En standardstokk er rundt 5,5 meter lang, men dette varierer veldig, særlig på store dimensjoner. På grunn av den store variasjonen i lengde er det svært vanskelig å optimalisere materialutnyttelsen ved manuell sortering. En nestingrobot kan gå og hente den optimale stokken basert på lengde

ut i fra et større lager. På denne måten bruker du alltid den stokken som gir minst mulig avkapp basert på alle laftestokkene du har lagt inn i programmet.

3.6 Oppbygning med finer

En annen måte å bygge opp designen på er en oppbygging med finer. Denne måten å bygge på gir mange muligheter.

3.6.1 Modellbygging

Jeg fikk dessverre ikke tid til å teste ut CNC-kutting i praksis. Da jeg bygde modellen lagde jeg bare 2D-print og kuttet ut fineren med en stikksag. Byggingen av modellen var defor mer for å få et visuelt inntrykk av hvordan en slik design kan se ut, kontra det og faktisk teste ut at det kan gjøres på den måten. I underkapittelet om fullskala finer oppbygging velger jeg likevel å skrive om hvordan designen kan bygges opp ved hjelp av en CNC-maskin og nesting.



Figur 30 - Strukturen i fineroppbyggingen

Jeg valgte å lage to hull i hvert snitt som globalt var likt referert. På denne måten kunne jeg skru inn gjengestag gjennom ett og ett hull slik at alle snittene kom på rett plass. Dette var en relativt rask og enkel måte og bygge opp strukturen på.

3.6.2 Fullskala fineroppbygning

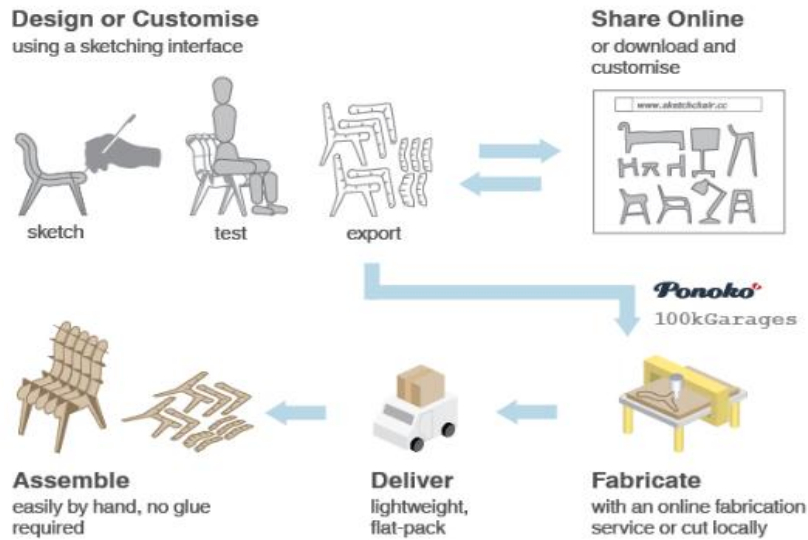
Ved hjelp av et DAK-program som f.eks. Generative Components kan man få ut ferdige fabrikkstegninger som er basert på 2D-snitt. Disse tegningene kan så kjøres gjennom et nestingprogram får å få maksimal materialutnyttelse. Når alt er nestet ut i fra formen på designet og dimensjonen på fineren man har, sender man tegningene til en CNC-styrt båndsg. Denne maskinen kan deretter arbeide uten oppsyn, enkelte maskiner vil kreve at en person er der for å legge inn en og en plate for skjæring, mens andre har automatisk mating. Men selv om man må manuelt mate inn plater, vil denne personen kunne gjøre andre ting mens maskinen arbeider.

Denne måten å bygge opp en design på mener jeg er meget interessant, i hovedsak vil denne måten å bygge på først og fremst være dekorativ. Man kan for eksempel bruke teknikken til å bygge opp spektakulære himlinger som vist på figur 31. Modellen er laget av Josh Canez, Lauren Hensley og Nick Schaidler og er en masteroppgave ved Texas A&M University.



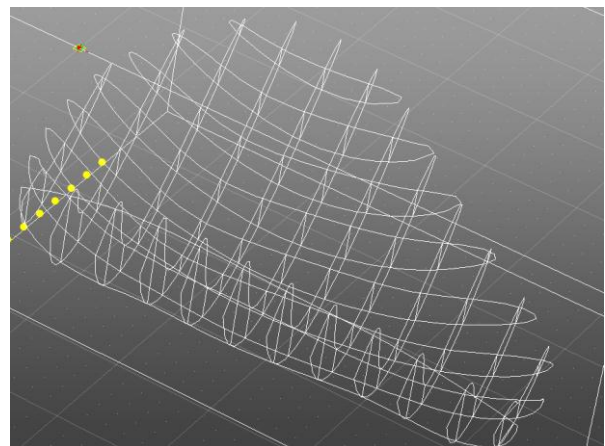
Figur 31 – Model av en himling av plywood (Hensley 2011)

Et annet eksempel på bruk av denne teknikken er prosjektet Sketch chair. Prosjektet startet hos JST Erato Design UI Project i Tokyo, der Greg Saul arbeidet som besøkende forsker.



Figur 32-Sketch chair prosses (Greg Saul 2009)

Disse to prosjektene fikk meg til å tenke på at gjengestag verken var den mest dekorative eller mest effektive måten å sette sammen kuttene på, spesielt ikke med tanke på et fullskalaprojekt. Det hadde vært bedre å lage snitt fra to sider for så å lage kutt slik at man bare kan klikke strukturen sammen.



Figur 33-Modellen snittet to veier

Når man skal bygge opp denne strukturen i fullskala, vil det også være et problem med at man ikke får tak i store nok finerplater. Dette kan løses ved å skjøte sammen finerplater med tynne aluminiumsplater. Det å skjøte finerplatene vil være en kostbar prosess i og med at det trolig må gjøres for hånd. Det hadde vært bedre og hatt en design der ingen kutt var større enn en ordinær finerplate.



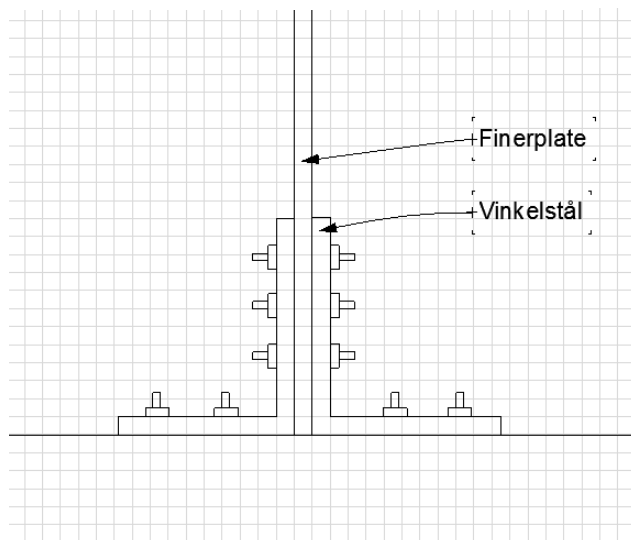
Figur 34 - Skjøting av finerplater

En slik oppbygning av materialet gir også mulighet til å kle in strukturen inn i et annet materiale. Dette kan for eksempel være en seilduk eller kanskje kobberplater.



Figur 36-En finerstruktur kledd med kobberplater kan i teorien se ut som dette.

Fundamentering av en slik struktur ville jeg gjort ved å klemme inn finerplatene mellom to vinkeljern. Det er mulig at det hadde vært tilstrekkelig med jern på bare en side, men jeg er litt usikker på hvor bra finer står imot hullkantrykk fra bolter. Det kunne vært interessant å se nærmere på dette i og med at monteringskostnaden trolig blir en stor andel av prisen på strukturen. Men mangel på tid og ressurser har ført til at jeg har valgt å se bort fra dette.

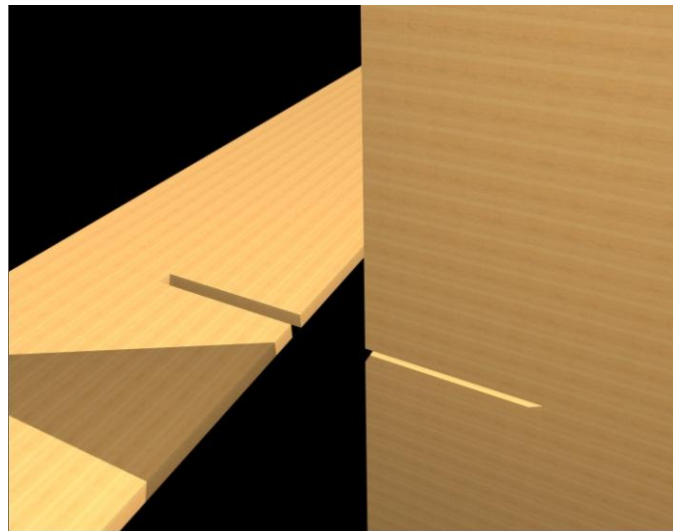


Figur 35- Fundamentering av en vertikal finerplate

3.6.3 Prising av fullskala fineroppbygning

Her ser jeg på hvordan man kan prise en kompleks fineroppbygning. Jeg har brukt et fullskala prosjekt av designen min som et teoretisk eksempel. Når du bygger på en slik måte og får materialet ferdig kuttet, trenger det nødvendigvis ikke koste særlig mye mer å bygge komplekst enn å bygge ordinært.

En av fordelene med fineroppbygning, er at prisingen av selve finerstrukturen er forholdsvis enkel. Alt man trenger å vite er prisen per kvadratmeter finer, hvor mye det koster å få fineren kuttet ut, og hva det koster å klikke den sammen. Mer komplekst blir det nok hvis man skal regne seg frem til hva det koster å kle inn strukturen med andre materialer.



Figur 37 - Eksempel på hvordan et horisontalt og et vertikalt snitt kan klikkes sammen.

Det vanskeligste for meg når jeg skal prise designet er å finne eksakt materialbruk av finer. Et nestingprogram kunne enkelt beregnet materialbruken. Ved å legge inn 2D-snitte tegningene fra designen sammen med dimensjonen på finerplatene inn i et nestingprogram, kan programmet raskt beregne materialbruken. Manglende kunnskap om nestingprogram førte til at jeg ikke hadde tid til å beregne materialbruken på denne måten. For å gjøre et grovt overslag på hvor mye materiale som går med har jeg sett på hvert enkelt snitt og beregnet materialbruken ut i fra det. For å beregne materialbruken på et enkelt snitt har jeg tegnet et rektangel rundt det aktuelle snittet. Dette rektangelet har jeg brukt som et estimat for å beregne materialbruken på et snitt. I gjennomsnitt går det cirka fem kvadratmeter finerplate per snitt, i modellene har jeg til sammen 20 snitt (12 vertikalt og 8 horisontalt). Byggmax oppgir at kvadratmeterprisen på 12 mm kryssfiner er kr 82,-. Det gir en total materialkostnad på kr 8200,-. (Byggmax 2011)



I følge Finn Tore Olafsen hos Norsk vannskjæring vil det å skjære ut disse snittene med en CNC-robot koste cirka 250 kr per snitt pluss 500 kr i oppstart. Det vil si at selve utskjæringen av kuttene kommer til å koste kr 5500,-. (Olafsen 2011)

Montering av en slik struktur har jeg ingen erfaring med, jeg har heller ikke funnet noen personer å rådføre meg med. Men med hjelp av gode tegninger og nummerering av snittene burde det ikke ta lang tid å klikke en slik struktur sammen. Jeg antar at tre personer vil bruke cirka en dag på jobben. Det fører til en monteringspris på 21 (timer) * 300 kr (timelønn) som blir lik kr 6300,-.

Det gir en totalpris på selve strukturen lik kr 20 000,-. Dette vil jeg si er en relativt billig måte å bygge opp en slik struktur på. Det som fort kan dra opp prisen en god del er montering og kledning av strukturen. En montering av denne strukturen vil nok koste en god del, dette er arbeid som må gjøres manuelt på byggeplassen.

Skal strukturen stå utendørs og dessuten kunne brukes kan jo ikke folk bare sitte på finerkutt, strukturen må kles inn av et annet materiale. Prisen på dette vil variere veldig med hvilket materiale man velger og hvordan man ønsker å gjøre det. En spennende og billig løsning kan være å spenne fast en seilduk rundt strukturen. Men i oppgaven er det oppbygningen av selve strukturen jeg ønsker å fokusere på, derfor går jeg ikke nærmere inn på prising av en eventuell kledning.



4. Resultater/Erfaringer

I dette kapittelet presenteres resultater og erfaringer jeg har gjort gjennom arbeidet med modellene, og ved rådføring av ressurspersoner innen trevirke.

4.1 DAK-tegning

Her beskriver jeg erfaringene jeg har gjort med DAK-tegning av kompleks bygningsstruktur. Og hvordan man bør tegne for å lage en ryddig design, som er lett og forstå for den som tegner og for andre.

Når man tegner noe som skal produseres av en robot er det ikke rom for feil, en robot vil alltid gjøre nøyaktig det du forteller den. Det betyr at alt må være hundre prosent korrekt. Det at bygningsstrukturen i tillegg er kompleks fører derfor til at tegneprosessen av komplekse strukturer som skal produseres av en robot ofte blir vanskelig og krever mye tid.

Personlig synes jeg at det å holde styr på tre akser(x,y,z) kan være vanskelig når man jobber med komplekse strukturer. Når man jobber med mer ordinære bygg er det ofte bare en eller to akser som forandrer seg om gangen mens de/den siste er konstant. Jobber man derimot med dobbeltkrumme overflater eller parametrisk design vil svært ofte alle de tre aksene forandre seg når man går fra et punkt til et annet. Det kreves derfor en del trening og erfaring hvis man raskt skal kunne produsere korrekte tegninger av kompleks bygningsstruktur. Jeg har selv erfart at uten mye trening i å tegne komplekst tar tegneprosessen lang tid.

Kort oppsummert er det viktig å tenke på disse punktene når man tegner komplekst.

- Alltid å ha et globalt nullpunkt som du jobber utfra og refererer til på alle tegninger.
- Tenk enkelt, tilstreb å lage strukturen ved så få operasjoner som mulig. Dette gjør det enklere både for deg selv og de som senere skal se på tegningene.
- Bygg opp designen slik at du enkelt kan endre strukturen.
- Lag alle tegninger dynamiske, på den måten er du sikker på at alle tegninger blir oppdatert automatisk.



4.2 CNC-fresing

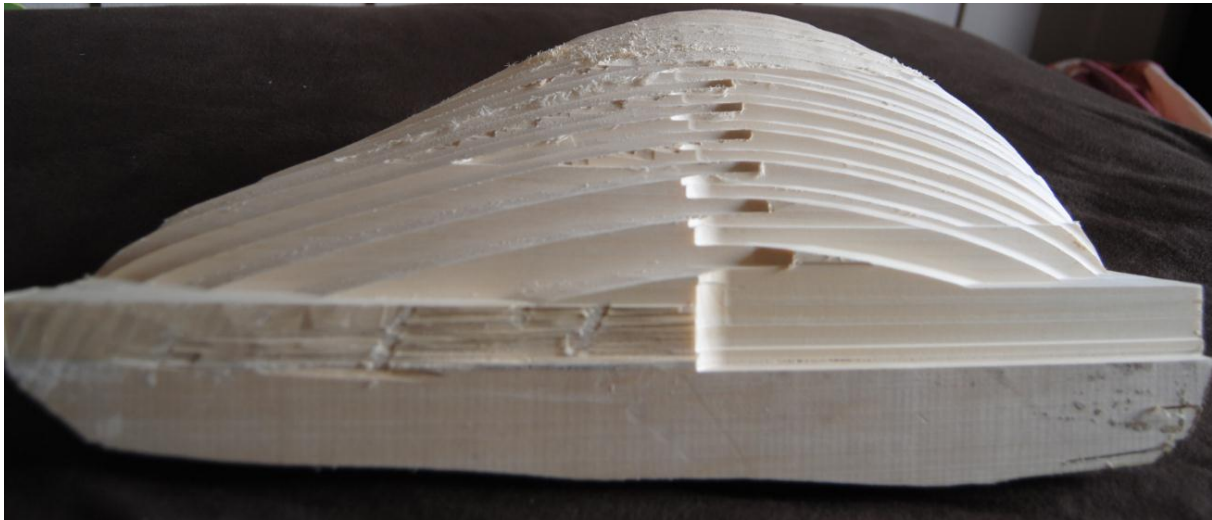
CNC-fresing kan brukes til å lage svært komplekse strukturer med svært høy presisjon.

Basert på erfaringer jeg har gjort i arbeidet med oppgaven ser jeg to store utfordringer med CNC-fresing av treverk. Den ene er å få til en god infoflyt fra tegning til programmering av fres. Mens det andre er hvordan man skal frese for å få til en god materialutnyttelse.

Hvis en original tredesign skal produseres ved CNC-fresing, og dette skal gjøres kostnadseffektivt, må infoflyten mellom designleddet og CNC-fresingen være effektiv. Det er viktig at den som tegner og den som skal utføre selve CNC-fresingen kommuniserer godt. Den som tegner må kjenne fresens begrensinger og hvilke filformater fresen jobber best ut i fra.

Skal man lage en kompleks trestruktur av større dimensjon ved hjelp av CNC-fresing må man tenke materialbesparelse. Når jeg freste ut modellen min av et solid rektangulært laminat hadde jeg en materialutnyttelse på cirka 10 %, det vil si at hele 90 % av materialet ble til flis. En slik materialutnyttelse er verken bærekraftig med tanke på miljø eller økonomisk holdbar. Selv når jeg lager et laft som beskrevet tidligere i oppgaven blir materialutnyttelsesgraden relativt lav. Jeg har regnet meg frem til en materialutnyttelsesgrad på cirka 60 %. Den dårlige materialutnyttelsen kommer av at man alltid må ta hensyn til det bredeste snittet per lafterunde.

En annen ting man bør tenke på når man skal CNC-frese er at strukturen må ha et fastholdningspunkt. Slik jeg har tegnet designen min, er det ingen flate sider, hele strukturen er krummet. Det er dermed ingen gunstige punkter for å sette fast modellen, det blir dermed umulig å frese hele strukturen. Man må da avslutte fresingen slik av en liten bit av modellen har en flat side, se fig 38.



Figur 38 - Flat side for fastholding

En estimert pris på trestrukturen kom til slutt på cirka 115 000,-. Denne prisen utelukker prosjektering, montering og frakt kostnader. Det er en usikker pris fordi vi i dag har svært liten erfaring med CNC fresing av kompleks bygningsstruktur i store dimensjoner.

4.3 Fineroppbygging

Det å bygge kompleks bygningsstruktur på denne måten byr på mange utfordringer men gir samtidig mange muligheter. Her beskriver jeg erfaringer jeg har gjort med oppbygging av en bygningsstruktur i finer.

Slik designen min er utformet og måten jeg har valgt å snitte den på gjør at jeg får en dårlig materialutnyttelse. Det er vanskelig å få til en god materialutnyttelse med mange store plater, det er bedre med mange små, eventuelt noen store og noen små plater. Dette gir en mye større mulighet for en effektiv nestingprosses. Med biter i en større variasjon i størrelse kan et nestingprogram få til en svært god materialutnyttelse, selv med kompleks struktur (se figur 5 i kapitlet om nesting). Når man har større variasjon i størrelse har nestingprogrammet altså større mulighet til å fylle tomrom.

Når man lager en slik struktur av finer tror jeg også det er lurt å basere seg på en oppbygging der man legger finersnitt i to retninger. På den måten får man punkter der finer krysser hverandre, og disse kryssene kan man bruke til og klikke strukturen sammen. På denne måten slipper man å bruke mer enn ett materiale når man skal bygge opp den komplekse strukturen. Slike kryss av fineren bidrar også til å stive av strukturen.



Universitetet for miljø- og biovitenskap

Totalprisen på strukturen kom på kr 20 000,- eks moms, i denne prisen er det ikke tatt hensyn til prosjektering, montering og frakt kostnader. Prisen er relativ sikker fordi operasjonene som skal gjøres er relativt enkle vær for seg.



5. Diskusjon

Det er viktig at man tenker seg godt om før man bygger en kompleks struktur. Det vil alltid være mere kostbart å bygge komplekst, og i tillegg være mer materialkrevende. For å sitere Albert Einstein: "Any fool can make things bigger, more complex, and more violent. It takes a touch of genius -- and a lot of courage -- to move in the opposite direction". Med dette mener jeg at man ikke burde bruke verktøy til å bygge kompleks hvis man ikke får et bedre resultat enn om man bygger noe mer ordinært.

Men hvis man har en god ide og bruker dagens verktøy på en god måte, mener jeg det er gode muligheter for å lage flotte og bærekraftige komplekse design i tre. Det er liten tvil om at slik teknologi kommer til å bli brukt i flere sammenhenger og i større grad enn det blir i dag. En større etterspørsel etter kompleks bygningsstruktur sammen med en dyr arbeidskraft vil føre til mer automasjon i byggebransjen.

5.1 CNC

Bruk av CNC-fres i byggebransjen har både negative og positive sider. Det er i dag mulig å bruke CNC til raskere produksjon av komplekse strukturer. Men det blir fremdeles dyrt hvis man ikke produserer i stor skala. Man vil så og si alltid bruke mer materiale når man bygger kompleks, selv ved effektiv bruk av nesting.

I resultatet mitt fant jeg ut at trestrukturen i seg selv vil komme på cirka kr 115 000,-. Et tilsvarende arbeid i noe større omfang ble som nevnt i oppgaven gjennomført av Djupevåg båtbyggeri, da kom byggingen av trestrukturen på kr 900 000,-. Dette var et prosjekt på cirka 75 m² mens prosjektet mitt er på cirka 15 m². Det gir et forholdstall mellom størrelsen på prosjektene lik 5. Det vil si at prisen jeg er kommet frem til er 37 % lavere enn det Djupevåg kom frem til. Denne prisreduksjonen kommer trolig i stor grad av materialbesparelse grunnet en smart design og lafteopplegg som gir en relativt lav materialkostnad. Men som



sagt er prisingen jeg har gjort relativt usikker, så det er vanskelig å dra noen sikker konklusjon ut i fra dette.

Prisingen av finerstrukturen kom på kr 20 000,-. Jeg har ingen prosjekter og sammenligne denne prisen med, men det er trolig en relativt riktig pris med bakgrunn i at hver av operasjonene som gjennomføres er relativt enkle. Sammenføyningen av selve strukturen er nok det som er mest usikkert både med tanke på pris og metode. Designet mitt er også noe usikret med tanke på laster, vil en slik struktur for eksempel kunne tåle en vinter i Norge?

5.2 DAK

Skal man tegne komplekse strukturer er det en stor fordel å bruke parametriske DAK programmer. Dette gir deg en mye større frihet til å designe akkurat det du vil slik du vil ha det.

I oppgaven har jeg lagd designet i Bentley Generative Components. Min erfaring med dette programmet er stort sett positivt. Det var relativt tungt å lære seg fordi det er bygd opp på en helt annen måte en de objekt orienterte DAK programmene jeg er vant til. Interfacen i programmet tar også litt tid å bli vant til, samtidig som man trenger en stor skjerm eller helst to for å få en god oversikt. Hvis man ikke har en stor skjerm og jobbe på må man hele tiden legge ned og ta opp funksjoner. Programmet mangler også en funksjon for og automatisk kunne generere flere snitt. Det er nok mulig å programmere sin egen funksjon ved hjelp av løkker som genererer flere snitt etter hverandre, men dette blir svært komplisert. I et parametriske DAK program som GC må man også definere alt selv. Det vil si at hvis man vil ha inn standardiserte ting som vinduer og dører må man tegne dette selv.

Men den tunge oppbygningen av blir mer forståelig når man lærer programmet bedre å kjenne. Når man tegner kompleks er det viktig at man bygger opp en forståelig design. De "tunge" funksjonene i programmet gjør dette mulig, noe som ikke ville vært mulig i et enklere objektorientert DAK program. Det er altså viktig å bruke riktig DAK program til riktig formål.

5.3 Nesting

Hvis nesting i byggebransjen skal være lønnsomt må man ha en viss størrelse og kompleksitet på prosjektet. Det er også avgjørende at man skal ha mange kutt av et og samme materiale.

Siden bygningsstrukturen i dag ser ut til å bli bare mer og mer kompleks, tror jeg nesting vil gjøre et større inntog i byggebransjen i tiden fremover. I oppgaven har jeg selv erfart ved bygging av komplekse modeller at det går med store mengder materiale dersom man ikke benytter seg av nesting.



Figur 39 – Eksempel på manuell nesting ved bygging av modell

Ved riktig og effektiv bruk av nesting tror jeg det er mulig å gjøre store materialbesparelser ved bygging av kompleks bygningsstruktur.



6. Konklusjon

Med roboter og DAK som verktøy kan man i dag bygge så å si hva som helst med en enorm presisjon. Økt kompetanse hos ingeniører og en stadig teknologiutvikling vil trolig føre til at man ser en større bruk av roboter ved bygging av originale komplekse strukturer.

Skal man få til en effektiv og kostnadsbesparende byggeprosess ved hjelp DAK, CNC og Nesting bør man fokusere på følgende punkter:

- Holde god orden og oversikt når man tegner kompleks.
- Fokusere på en god og effektiv bruk av nesting, jeg mener det er essensielt i forbindelse med bygging av kompleks bygningsstruktur i tre. Ved riktig bruk av nesting i forbindelse med kompleks design kan man gjøre store materialbesparelser.
- Lage dynamiske parametriske tegninger, fordi komplekse tegninger så og si alltid må endres. Med dynamiske tegninger kan man også utnytte resultater fra nesting på en bedre måte.
- God og effektiv infoflyt mellom DAK-modellen, nestingprogram og CNC-maskin.

Det er vanskelig å dra en konkret konklusjon på hvordan man effektivt kan bygge kompleks bygningsstruktur i tre ut i fra denne oppgaven. Siden jeg ikke har gjennomført et fullskalaprojekt eller har flere lignende prosjekter å sammenligne med. Men punktene over kan brukes som retningslinjer for hvordan man effektivt kan bygge en kompleks bygningsstruktur.

Når det kommer til prising av kompleks bygningsstruktur i tre kan dette være svært krevende uten den rette erfaringen. Det som er viktig når man skal prissette en slik struktur er å dele arbeidet opp i enklere arbeidsoppgaver. Det vil si at man ikke ser på hele strukturen på en gang.



7. Videre arbeid

Jeg mener finneroppbygning er et svært interessant tema. Det hadde vært interessant å gjennomføre et slikt prosjekt i fullskala. Et fullskalaprojekt av denne typen er mye billigere og dermed en del enklere å gjennomføre enn et CNC-prosjekt.

Det kan også være interessant å se på hvordan 3D-skanning kan brukes i en sammenheng med CNC-fresing. Dette kan for eksempel brukes til å kopiere gamle treskjæringer som skal restaureres. Det gjøres ved at man først 3D-skanner det man skal kopiere, for så å sende den skannede modellen direkte inn i CNC fresen. Ved hjelp av denne teknikken kan man med presisjon kopiere strukturer uten å måtte gjøre mye manuelt arbeid.

Når man har lagd en solid tredesign ved hjelp av CNC fresing, har man også en unik mulighet til enkelt og effektivt å lage flere kopier i f.eks. betong. Dette kan gjøres ved å fylle skum rundt tredesignet. Da får man en form man senere kan bruke til å støpe flere like design i. Dette kan man gjøre uten å ødelegge trestrukturen. Hvis man bygger kompleks på denne måten, trenger det nødvendigvis ikke bli mye dyrere å bygge komplekst kontra ordinært. Dette kunne vært interessant å se nærmere på for eksempel i sammenheng med å lage modulbaserte støyskjermer i betong mellom vei og bebyggelse. På denne måten kunne man laget en kompleks betongmodul som gjentar seg selv.

Man får også et problem når komplekse strukturer kommer opp i en viss størrelse, da vil strukturen bli for stor for å bli fremstilt i et stykke i en CNC fres. Slik jeg ser det er det to måter og løse dette problemet på, det ene er og CNC frese deler av strukturen som senere skjøtes sammen. Den andre og mer interessante ideen går ut på å ha en mobil CNC robot. Den mobile CNC roboten kan for eksempel stå på lasteplanet til en lastebil eller være montert på armen til en gravemaskin. Roboten kan for eksempel jobbe utfra GEO-refererte koordinater fra satellitter eller stasjonære bakkestasjoner, stasjonære bakkestasjoner er



Universitetet for miljø- og biovitenskap

kanskje mest aktuelt på grunn av presisjon. Ved å jobbe på denne måten kan man bruke roboten til å konstruere så stort man vil. Dette hadde vært meget interessant og sett mer på.



8. Litteratur

Alex (2005). Picture of the Great Pyramid. K. pyramid.

Bentley (2010). "The Lagoons." from <http://www.bentley.com/en-US/Promo/Generative+Components/In+Practice.htm>.

Byggmax (2011). "Kryssfinér P30
1005 - 12x1200x2440."

cncut (2009). "Nesting Software." from <http://www.cncut.org/>.

Djupevaag, b. (2011). Telefonsamtale med Lars Djuevaag.

Eggen, G. (2011). Bøfjorden sag.

Faktor, I. (2009). Robot.

Green, G. a. K. (2008) XRay seashell photo.

greentechmedia (2010). "Moore's law." from <http://www.greentechmedia.com/articles/read/varian-looks-to-enforce-moores-law-in-solar/>.

Hensley, J. C. N. S. L. (2011) Texas A & M University.

Olafsen, F. T. (2011). Norsk Vannskjæring AS.

Snøhetta (2011). Besøk hos Snøhetta.

Solem, G. (2011). Solem Sag.

STEIN, S. (2011). STOKK & STEIN.



Universitetet for miljø- og biovitenskap

Telle, J. (2008). "Østblokk - blokk." from <http://www.buf.no/nyheter/2008/?page=0616>.

Werp, A. (2011). Tømmergutta.



9. Vedlegg

1. Transaksjoner

Transactions	
Transaction	
1 Add point01, point02, point03, point04	
Feature	Feature Type
point04	Point
point03	Point
point02	Point
point01	Point
Property	Expression
CoordinateSystem	baseCS
XTranslation	<free> 10.0
YTranslation	<free> 0.0
ZTranslation	<free> 0.0
2 Add point05, point06	
Feature	Feature Type
point06	Point
Property	Expression
CoordinateSystem	baseCS
XTranslation	<free> 60.4445511412908
YTranslation	<free> 0.0
ZTranslation	<free> 0.0
point05	Point
Property	Expression
CoordinateSystem	baseCS
XTranslation	<free> 50.0
YTranslation	<free> 0.0
ZTranslation	<free> 0.0
3 Add bsplineCurve01	
Feature	Feature Type
bsplineCurve01	BSplineCurve
Property	Expression
Points	{point01, point02, point03, point04, point05, point06}
4 Add point07	
5 Add point18	
6 Add bsplineCurve05	
7 Add plane01; change point18	
8 Change point18	
9 Add plane02	
10 Add bsplineCurve02, point08	
11 Add line01, plane03, point09; change point08	
12 Add line02; change point08	
13 Add line03, line04	
14 Add line05, line06	



+	15	Add line07, line08, line09
+	16	Add line10, line11
+	17	Add point16
+	18	Change point16
+	19	Add point17
+	20	Add line12, line13
+	21	Add bsplineCurve03, bsplineSurface01, point10, point11, point12, point13
+	22	Add bsplineCurve03, bsplineCurve04, line14, line15, plane04, plane05,...
+	23	Change plane04, point10, point11, point12, point13, point18
+	24	Add line16, plane06
+	25	Add plane07
+	26	Add line17
+	27	Add point19
+	28	Add point20
+	29	Add line14; change bsplineCurve01, line16, point19
+	30	Add line18; change bsplineCurve01, line17, point20
+	31	Add point21; change line14
+	32	Add line19, plane08; change line14, point21
+	33	Add line14
+	34	Add line20, plane09, point22; change line14
+	35	Add line21
+	36	Change line01, line03, line04, line08, line09, line16, line21
+	37	Add point23, point24
+	38	Add line22, point25; change point24
+	39	Add plane10
+	40	Add line23, plane11
+	41	Add line24
+	42	Add line35, line36, line37, line38, line39, line40, line41, line42, line43,...
+	43	Add line46, line47
+	44	Change point06, point20
+	45	Change line10, line12, line17, line23, point13, point23
+	46	Add bsplineCurve06, point27
+	47	Change point08, point27
+	48	Add plane12; change point18, point27
+	49	Change line24
+	50	Add line15; change line01, line03, line05, line08, line10, line12, point08,...
+	51	Change line01, line03, line04, line05, line06, line08, line09, line10,...
+	52	Add line18, line25, line26, line27, line28; change line15
+	53	Change line15
+	54	Add line29, line30, line31, line32, line33, line34
+	55	Add point28
+	56	Add point26
+	57	Change point28
+	58	Change line23, point25, point26
+	59	Change line29, line30
+	60	Change line32
+	61	Change line29, line31



62	Change line02, line06, line09, line11, line17, line23, line27, line30,...
63	Change line04, line06, line09
64	Change line35, line36, line38, line39, line40, line41, line42, line43,...
65	Change line38
66	Add line48
67	Change line48, point27
68	Add line37, line49, line50, line51, plane13
69	Add line52, plane14
70	Add line53, plane15
71	Add line54
72	Add line55, plane16, plane17, plane18
73	Add line56, line57
74	Change line57
75	Add line58
76	Add point29, point30
77	Change point19
78	Add line59
79	Add line60, plane19, point31
80	Add line61; change point28
81	Add bsplineSurface01

Feature	Feature Type
bsplineSurface01	BSplineSurface

Property	Expression
Points	{{point01, line02.EndPoint, ...}}
LevelName	"Skal"

82	Change bsplineSurface01, line37, line48
83	Change bsplineSurface01, line35, line36, line53, line54, point11,...
84	Change bsplineSurface01, line53
85	Add line62; change line34, line46, line57, line58, point16, point20, point26
86	Change bsplineSurface01, line35, line38, line46, line47, line49, line50,...
87	Change bsplineSurface01, line24, line46, line51, line55, line56, line58,...
88	Add line63, line64, plane20, point32; change bsplineSurface01, line14,...
89	Add line65, line66, mesh01; change bsplineSurface01, point11, point13,...
90	Change line48, point27
91	Change point08, point18, point27
92	Add line67, plane21, point33
93	Change line14, line38, line65
94	Change bsplineSurface01, line26, point08, point33
95	Change bsplineSurface01
96	Change line13
97	Add point44
98	Add line68, plane22, point45; change bsplineSurface01, line15, line18,...
99	Change line28, line29, point45
100	Change line27, line28, line30, line33, line34, point21, point27, point33,...
101	Change point21, point23, point32

