

AUTOMATISERET BYGNINGSKONSTRUKTION

Eller hvordan man printer et hus

Forskningsrapport af **CINARK** ved
Jakob Knudsen

Kolofon:

**Automatiseret bygningskonstruktion
- hvordan man printer et hus**

Udarbejdet af CINARK ved:
Jakob Knudsen
Red. Anne Beim

Grafisk tilrettelæggelse:
Tenna Arnbak, Grafisk Design

Illustrationer: Der er angivet rettigheder ved billeder i det omfang, de har været til at spore.
Henvendelser herom rettes til forlaget.
Fotografer ikke krediteret ved billedet:

Udgivet april 2009

ISBN: 978-87-7830-151-2

© **CINARK**
Det Kongelige Danske Kunstakademi
Kunstakademiets Arkitektskole
Institut for Arkitekturens Teknologi
Center for Industriel Arkitektur
Philip de Langes Allé 10
1435 København K
www.cinark.dk

Indhold

Forord	5
Introduktion	6
Industrialiseret bygningskonstruktion Tendenser, muligheder og udfordringer	8
Rapid Prototyping	16
Teoretiske store teknikker	28
Case 1. Contour Crafting	34
Case 2. 3DE. Three Dimensional Element	38
Produktion	42
Arkitektoniske muligheder	48
Konklusion og perspektiver	54
Referencer	58



Forord af Anne Beim

På byggepladserne finder vi en stadig voksende mængde mekaniserede håndværktøjer og produktionsmaskiner, som har til formål at gøre arbejdet effektivt og nemt for de udførende på pladsen. Byggeindustrien avancerer også i brugen af CAM (Computer Aided Manufacturing) i deres produktionsprocesser. Her er robotteknologi, som vi kender fra bilindustrien, langsomt ved at finde indpas, dog stadig til fremstilling af mere specialiserede produkter. Den ny teknologi inspirerer også til arkitektfagligt udviklingsarbejde og et godt eksempel er den organisk formede reliefmur i den Schweiziske pavillon, som blev vist ved Arkitekturbiennalen i Venedig i 2008, af Fabio Gramazio og Matthias Kohler.

Udviklingen i byggeriet hen imod mere automatiserede fremstillingsprocesser har i grove træk to sider. Den ene handler om at optimere og rationalisere produktionen, ligesom at aflaste de udførende for tunge, ensartede arbejdsopgaver. Den anden er orienteret mod avancerede fremstillingsprocesser og produkter, som kræver en ensartet præcision der ikke er menneskelig mulig eller hvor der er tale om gentagelsesprocesser som ud fra et arbejdsmiljøsynspunkt er umenneskelige.

Set i et arkitektonisk perspektiv vil denne udvikling få stor betydning og vil ændre på den måde arkitekturen tænkes bygget og udformet. Denne rapport undersøger et særligt felt inden for automatiseret bygningsproduktion, som kaldes Rapid Prototyping (RP). Her beskrives en række forskellige teknologier og fremstillingsmetoder, som er mere eller mindre modnet i forhold til implementering i konkret byggeri. Jakob Knudsen viser også egne forsøg, hvor han med enkle midler afprøver Contour Crafting og undersøger hvorledes denne teknologi kan generere geometriske strukturer som svært lader sig fremstille på anden måde.

Rapporten diskuterer på inspirerende og illustrativ vis både produktionstekniske og arkitektoniske muligheder og begrænsninger som findes ved Rapid Prototyping og er således et centralt dokument, hvis man gør sig overvejelser om at afprøve denne produktionsteknologi.

Arbejdet og rapporten har været udført i regi af CINARK - Center for industriel arkitektur, ved Institut for Teknologi, Kunstakademiets Arkitektskole og har været samfinansieret med Realdania.

Frank Louyd Wright. Guggenheim

Introduktion

Man kan i dag printe en plastikmodel af eksempelvis en mobiltelefon ud fra en 3D tegning - men kan man også printe et helt hus?

Nye fremstillingsprocesser baseret på automatiseret bygningskonstruktion peger på potentielt store produktivitetsforbedringer i byggesektoren. Samtidig åbner disse nye teknikker for vidtrækkende arkitektoniske muligheder. Man kan eksempelvis lave komplicerede skalkonstruktioner og detaljerede overflader uden at prisen øges.

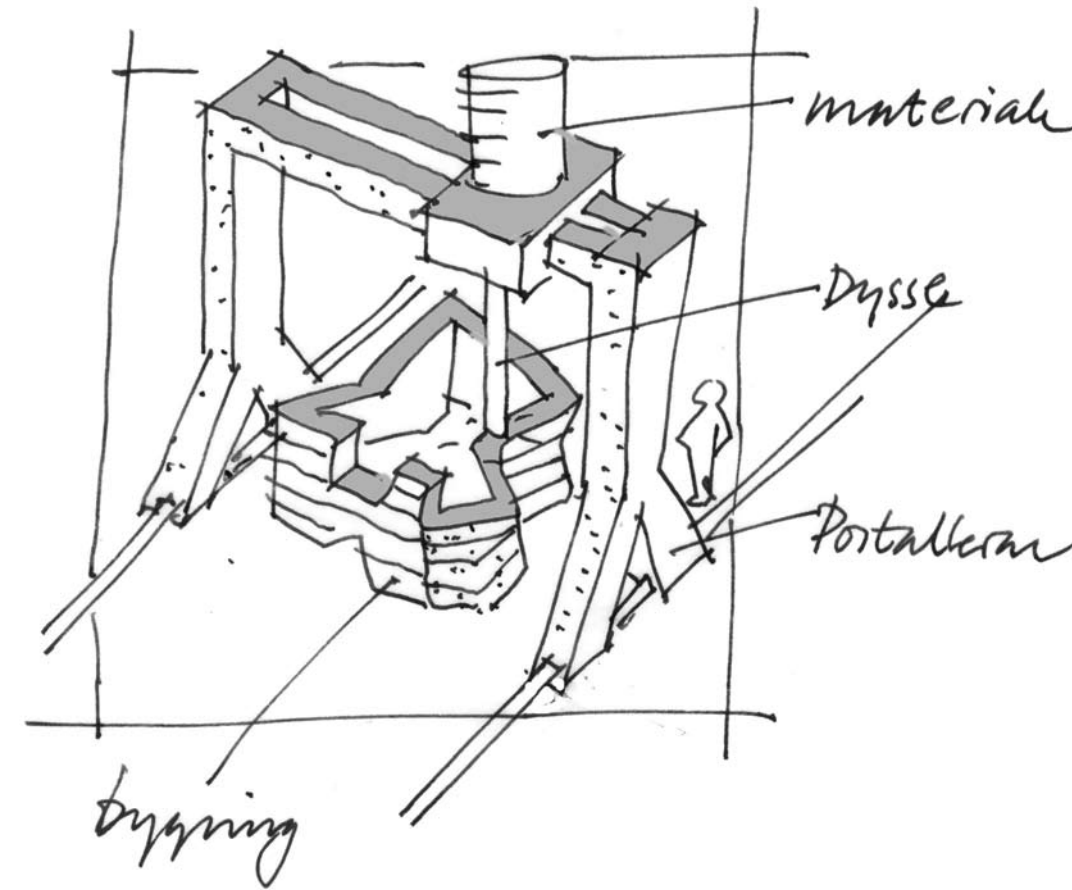
Fremstillingsprocesserne kaldes samlet for *Rapid Prototyping* (RP) og dækker over en række forskellige metoder hvor man direkte fra en digital 3-D computermodel laver fysiske modeller. En designer kan allerede i dag hurtigt og billigt lave en plastikmodel af f. eks. en ny komponent til en bil og derved prøve den af i 1:1.

Fælles for alle RP metoder er, at man bygger modellen op af "prikker" ligesom en inkjet printer laver et billede. Hvis man skifter blækket i printeren med små kugler (af eksempelvis plast, metal, gips) der limes sammen, og kører lag efter lag oven på hinanden, får man efterhånden et tredimensionelt objekt. Og ligesom en printer er ligeglad med kompleksiteten i det billede den printer er det i princippet lige meget hvor detaljeret og kompleks dette printede objekt er - det er højest et spørgsmål om produktionstid og størrelse på objektet.

I lang tid har RP været begrænset til små genstande på max 0,5 m³, men nu ser det ud til at man også potentielt kan lave meget større elementer.

Den metode der har været mest omtalt kaldes *Contour Crafting*. Ud fra en digital model bygges 3-D objekter ved at "pølse" et materiale op, f.eks. beton. Man kan på denne måde teoretisk bygge meget store objekter, herunder hele bygninger eller bygnings-elementer.

I dette projekt er der derudover lavet forsøg med en ny metode, kaldet 3DE (*Three Dimensional Element*). Denne metode bygger letbeton elementer op ved hjælp af simple materialer som leca og cement.



Figur 1.1 Fremtidens byggeplads? En portalkran printer en bygning. Den styres af en computer og kører automatisk 24 timer i døgnet. Hver morgen efterse resultatet og lagrene fyldes med nye materialer. Formvilje og detaljerigdom er stor nu man ikke længere er bundet af håndværkets eller økonomiens begrænsninger.

Disse nye produktionsformer vil ud over de økonomiske gevinster give arkitekter og ingeniører nye muligheder som formgivere. Selvbærende, materiale-optimerede konstruktioner vil være en oplagt udviklingsretning, og der lægger således et stærkt materiale- og ressourcebesparende potentiale i metoderne.

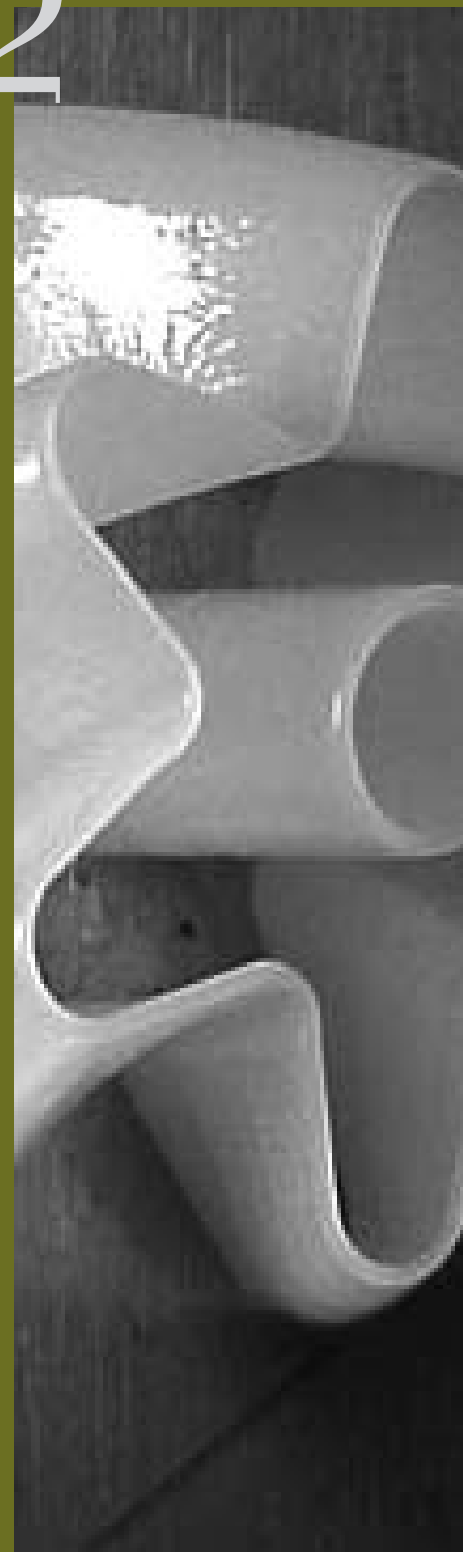
Målet med denne rapport er først og fremmest at beskrive de grundlæggende teknikker og muligheder. Herudover beskrives de arkitektoniske potentialer samt mulige fremtidige indsatsområder i forhold til dansk byggeerhverv.

2

Industrialiseret bygningskonstruktion.

Tendenser, muligheder og udfordringer

- 8 Industrialiseret bygningskonstruktion. Tendenser, muligheder og udfordringer
- 9 Industrialisering
- 10 Automatisering i byggeriet
- 12 Fremtidige muligheder



Industrialisering

Richard¹ har beskrevet 5 niveauer af industrialisering i byggeriet: Præfabrikation, mekanisering, automatisering, robotter og reproduktion.

Han beskriver hvordan produktionen af de enkelte komponenter (vinduer, spær osv.) i byggeriet er industrialiseret, men ikke bygningen som helhed. Hvis en computer eller en bil var bygget på samme måde som et hus havde ingen råd til at købe dem.

Præfabrikation handler om at tage en traditionel bygningskomponent og flytte produktionen til en fabrik hvor man med de rette værktøjer og rationel arbejdsgang kan sikre en ensartet høj kvalitet og samtidig skære ned på produktionsudgifterne.

Mekaniseringen kommer ind i billedet når man bruger maskiner for at lette det manuelle arbejde. Således er præfabrikerede bygningselementer typisk monteret af håndværkere ved hjælp af trykluftværktøj, mekaniske lifte osv.

Automatisering er når maskinerne har overtaget processen fuldstændigt. Der er ikke længere personer som udfører manuelt arbejde – de overvåger alene processen.

Robotter betegner her fleksible maskiner der kan udføre forskellige komplicerede opgaver. Robotter kan være vejen til individualiserede løsninger, "mass customisation", men de er generelt for dyre til simple opgaver som at slå søm i eller at lægge mursten, ligesom de har en begrænsning i forhold til de produktionsfaciliteter som de indgår i; de egner sig stadig primært til fabrikslignende forhold men er vanskelige at inkorporere på en almindelig byggeplads.

Reproduktion er et nyt begreb indenfor industrialisering. Begrebet reproduktion referer til printteknologi og har intet med biologisk reproduktion at gøre. Reproduktion handler om introduktion af innovative teknologier som arbejder med simple processer som multiplicerer enkle materialer til komplekse former. Stephen Kieran og James Timberlake har arbejdet med tilsvarende ideer.²

Reproduktion kan eksemplificeres med bogens udvikling. Før Gutenberg blev bøger kopieret i hånden. Man skrev sim-

pelthen af fra en anden bog. Gutenberg begyndte som den første at skære bogstaver ud i træ og sætte dem sammen til hele sider. Det tog selvfølgelig lang tid at skære de første bogstaver ud, men da det først var gjort kunne han hurtigt trykke mange bøger og dermed gøre bogen til hvermandseje.

Der er sket flere sådanne kvantespring i bogens udvikling. Den seneste revolutionerende teknologi er den personlige computer og printer. Nu kan alle i princippet selv lave en bog – man er uafhængig af antallet af tryk.

Automatisering i byggeriet

Industrialiseringen i vores samfund er massiv og forskellige automatiseringsteknologier bruges i dag i alle dele af industrien – skibe, vindmøller, biler, fly, computere – overalt overtager avancerede maskiner og robotter en stor del af produktionen. Men inden for byggeindustrien er situationen en helt anden. Bortset fra højtspecialiserede bygningskomponenter som vinduer og døre udføres selve bygningen groft sagt manuelt som for 100 år siden. Produktionsredskaberne er blevet lidt bedre og der er høstet rationaliseringsgevinster ved at præfabrikere bygningselementer af forskellig kompleksitet. Men helt grundlæggende bygges langt de fleste huse ved at man oversætter 2D tegninger til basale byggelementer som herefter samles manuelt.

Den omfattende digitalisering af selve projekteringen har kun i ringe grad slået igennem på selve produktionssiden. Det er fortsat en begivenhed når en 3D tegning fra arkitekten bruges direkte af en given producent.

Tager man eksempelvis et betonelement udgør 20 til 40 % af prisen i følge C. C. Brun Betonelementer arbejdslønnen til den person der opsætter formen. Et i øvrigt tungt, nedslidende og beskidt arbejde.

Andre industrier har i dag en væsentlig kortere produktionstid pga. automatisering og logistik i almindelighed. Men ikke byggeriet.

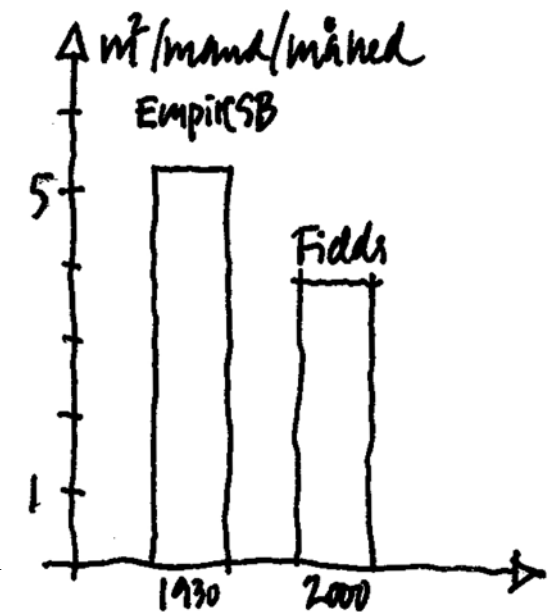
Da man i 1931 byggede Empire State Building³ midt på Manhattan (vel en af de logistisk sværeste byggepladser man kan tænke sig) var den samlede byggetid 13.5 måneder. 3000 mand byggede med en hastighed af 4½ etager om ugen. I alt 210.000 m² i 102 etager. Tegnet og bygget helt uden brug af computere. Til sammenligning tog det for bare et par år siden mere end dobbelt så lang tid, nemlig 30 måneder for 1000 mand at bygge de i sammenligning ret simple 115.000 m² til storcentret Fields i Ørestaden.⁴ Eller sagt på anden måde: I 1931 byggede man 5,2 m²/mand/måned, i dag 3,8 m²/mand/måned. Vi bygger altså for tiden med en hastighed som kun er 73% af datidens hastighed.

Man kan indvende at byggeriet i dag er mere komplekst end i 1931, der er eksempelvis flere og mere komplicerede installationer osv. Men lige meget hvordan man vender det er "udviklingen" mod en lavere produktivitet deprimerende. Der er selvfølgelig en oplagt grund til at industrialiseringen aldrig er slået rigtigt igennem i byggeindustrien. Nemlig at bygningen som helhed i høj grad er en unikproduktion hvor det samme produkt sjældent gentages. Mange processer gentages fra bygning til bygning (lægning af gulve, opsætning af lofter, lægning af fliser osv.) men kun få enkeltkomponenter som vinduer og døre er egnede til egentlig præfabrikation. Derfor er der heller ingen der vil investere et par milliarder i en platform som det ses i eksempelvis bilindustrien. Byggeindustrien har brug for en anden slags industrialisering, hvor det er processen snarere end produktet som er automatiseret. Eller for at blive i Richard's terminologi - byggeriet har brug for en "reproducerende industrialisering".

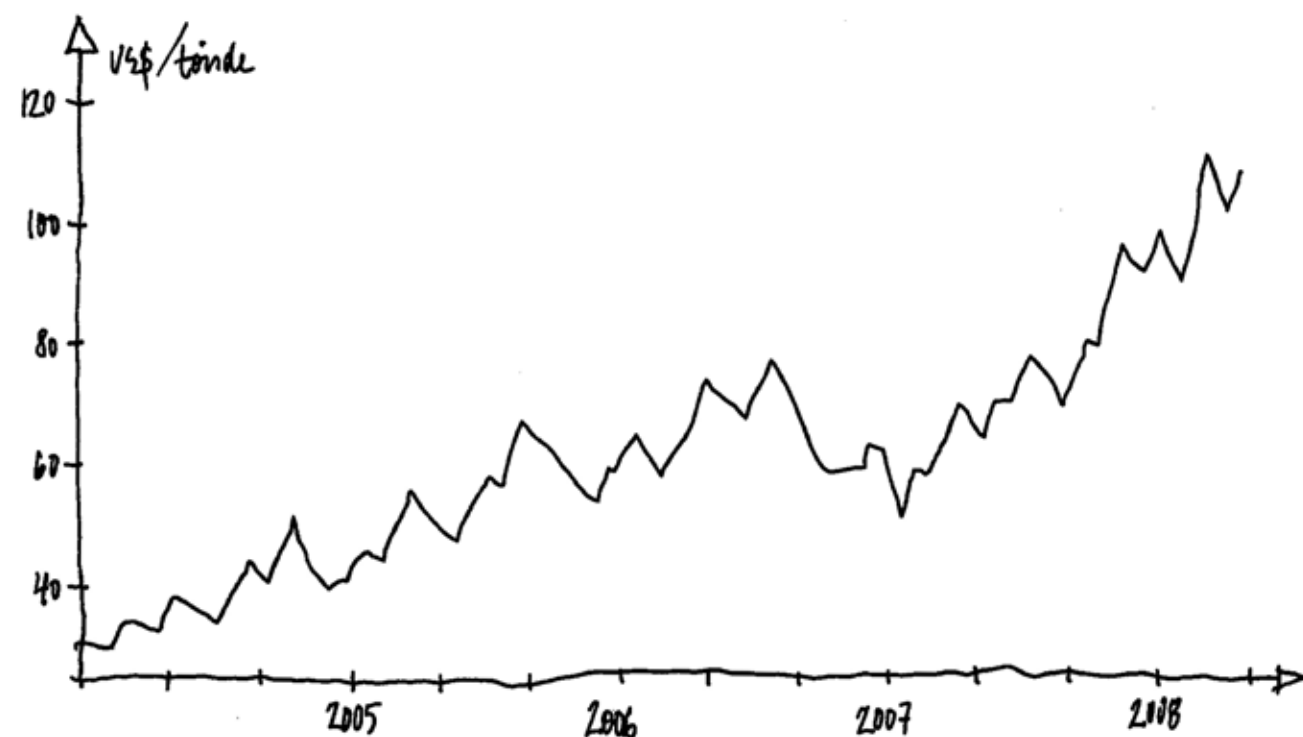
Det stærkeste argument for at industrialisere byggeriet er nu, som altid, prisen. Byggeri er simpelthen for dyrt. I USA anslås det at 1/3 af alle samfundets investeringer er i byggeindustrien. Men Erhvervs og Boligministeriet anslår nu at 40% af energiforbruget i Danmark bruges til opførelse og drift af bygningsmassen.⁵ Olieprisen er i det seneste år er steget med 100 % og prisen ser kun ud til at være stigende. Så alene energipriserne burde få os til at tænke på hvordan byggeprocesserne kan optimeres.



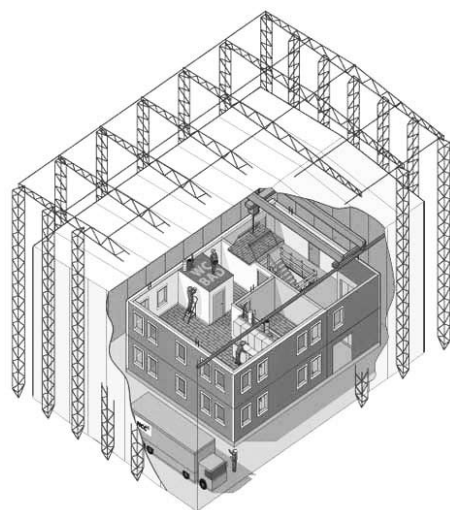
Empire State Building



Byggetid Empire State Building / Fields



Råoliepris 2004-8



NCC-Komplett forsøgte som en af de få at lave en egentlig platform. Af flere primært forretningsmæssige årsager gik det dog ikke.

Fremtidige muligheder

I mange år er byggeriet blevet sammenlignet med bilindustrien. Mange har fremhævet, at man med få museklik kan bestemme en række individuelle træk på sin bil - farve, udstyr, soltag - som så direkte bliver kommunikeret til den fabrik der producerer og leverer bilen kort tid efter. Sammenligningen er ikke god. Før den første bil er på gaden bliver der brugt mange millioner i produktudvikling, og de individuelle valgmuligheder er reelt kosmetiske i forhold til platformen. En mere relevant sammenligning vil være eksempelvis skibsværfter, hvor man arbejder med store komplekse former som måske nok er lavet over en fælles platform, men som sjældent er identiske.⁶

I en anden ende af produktionsindustrien foregår en helt anderledes udvikling, som måske er mere relevant for byggeriet. *Rapid Prototyping* (RP) dækker over en række forskellige metoder, hvor man direkte fra en digital 3D computermodel laver fysiske modeller. F.eks. kan en designer hurtigt og ret billigt lave en plastikmodel af en ny mobiltelefon og hermed teste produktet. Arkitekten kan på samme måde lave en model i lille skala af sin bygning som ligner traditionelle papmodeller. Man kan bruge mange forskellige materialer til RP. De mest almindelige arbejder med forskellige polymerer (plast), gips eller metal. Den mest simple RP maskine der er beskrevet drypper simpelthen bare vand ud i en fryser. På denne måde laves 3D former i is.⁷

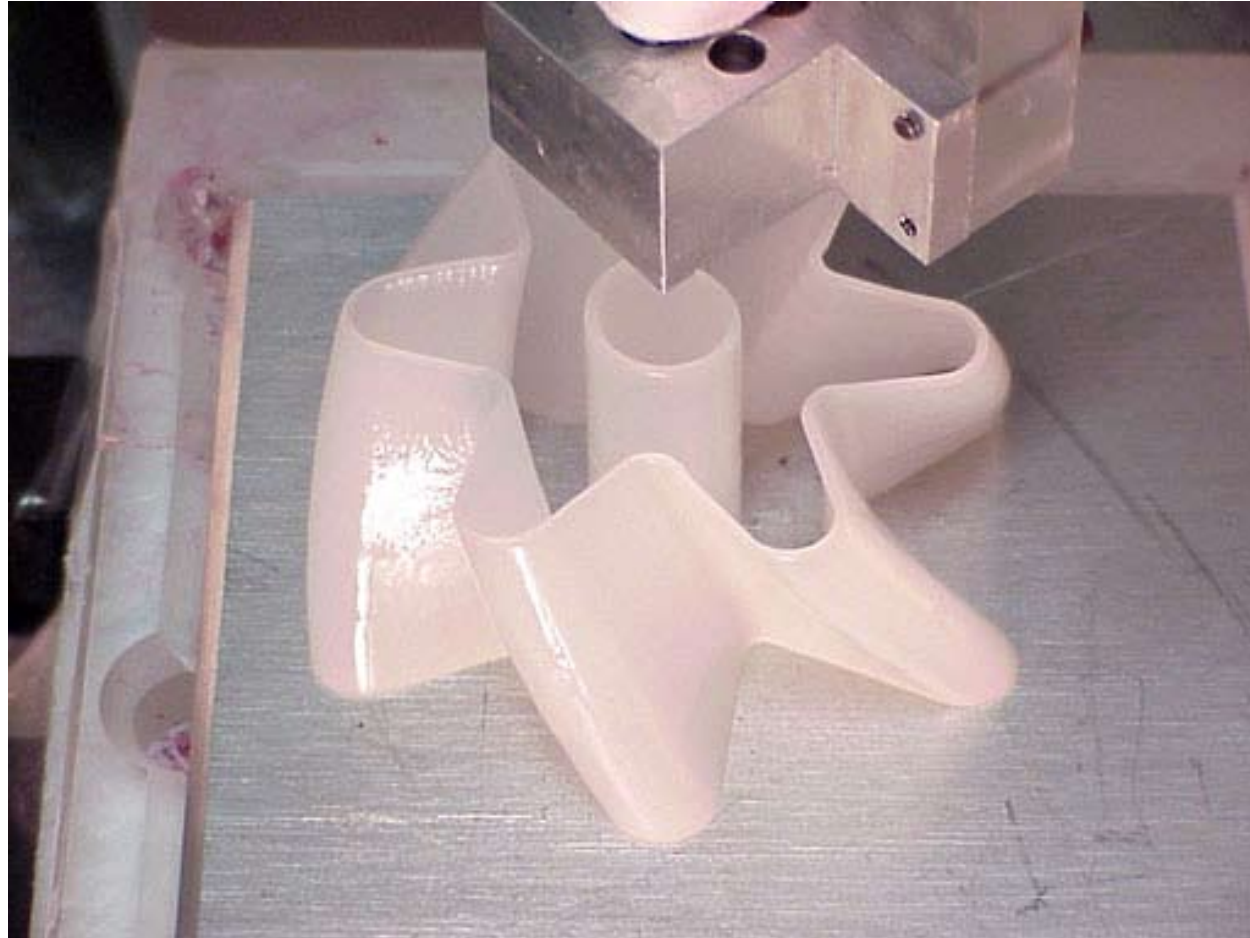
I dag taler man ikke kun om RP. Man bruger i stigende grad begreber som *Solid Freeform Fabrication* og *Layered Manufacturing* som indikerer at processen er på vej væk fra at være et modelmedie og i stigende grad bruges som et egentligt produktionsapparat, især ved mindre serier. Tandlægen kan lave en ny tand, mens man venter, kirurgen laver en ny hofteskål ud fra en CT scanning.

Der findes en lang række forskellige processer baseret på forskellige metoder og materialer: Plastik der hærdes med UV-lys, metalpulvere der hærdes med en laser, papir der skæres i ark og sammenlimes. Alle disse metoder har fordele og ulemper, men et fælles problem har hidtil været størrelsen af objekterne der i praksis alle har haft en begrænsning på max. 0,5 m³. De specifikke teknikker beskrives nøjere i kapitel 3.

Problemet med den lille størrelse ser ud til at kunne løses vha. en patenteret metode kaldet *Contour Crafting* (CC) udviklet på University of Southern California (USC) af Dr. Behrokh Khoshnevis. Processen går i korte træk ud på, at en dysse ekstruderer en pølse af materiale ud, som så modelleres på plads af en slags palletknive. Indtil nu er processen afprøvet med plastik og keramik i relativt små størrelser, men på det seneste er processen blevet skalleret op og kan nu udføres med beton i 1:1. Metoden er hurtigere og billigere end andre beslægtede metoder og så er der i teorien ingen begrænsning på objekternes størrelse i. Man kan forestille sig at en betonkanon spændes fast til en portalkran og herefter sættes til at "printe" et hus elementerne til et hus.



Golf platform. Den samme grundform bruges til at producere meget forskellige biler.

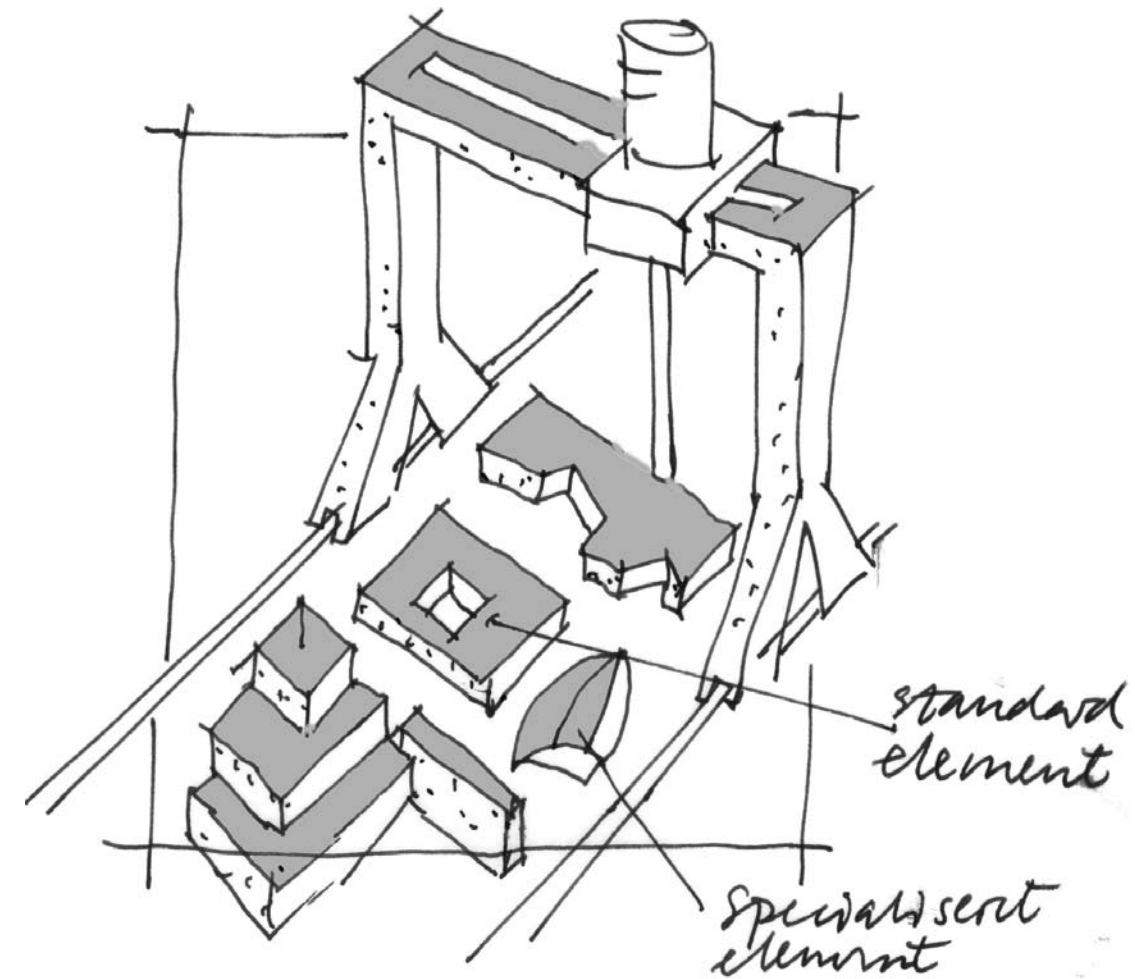


*Isprinter. Den simpleste af alle RP maskiner.
Vand dryppes ud i en fryser.*

USC er i fuld gang med at planlægge forsøg der seriøst vil afprøve teknikker til automatiseret bygnings konstruktion, men der er endnu kun få publicerede resultater. *Contour Crafting* er beskrevet nærmere i kapitel 5.

I kapitel 6 er en alternativ metode kaldet *Three Dimensional Element*, 3DE beskrevet

Der er andre grupper som internationalt arbejder med området^{8, 9, 10}. Men så vidt det vides er der ikke nogen der har printet et hus endnu.



Fremtidens elementfremstilling? En portalkran 'printer' elementer. Den styres af en computer og kører automatisk 24 timer i døgnet. Det er lige meget hvor komplicerede elementerne er – forarbejdet er i princippet afskaffet. Man laver elementerne i den rækkefølge de skal bruges på byggepladsen.

3



Rapid Prototyping

- 16 Rapid Prototyping
- 18 Baggrund
- 20 SLA. Stereolithography.
- 21 SLS. Selective Laser Sintering.
- 22 FDM. Fused Deposition Modeling.
- 23 Inkjets
- 24 3DP. Three Dimensional Printing.
- 25 LOM. Laminated Object Manufacturing
- 26 LPF. Laser Powder Forming
- 27 Bearbejdning af plader til skalformer.

For at forstå mulighederne i *Rapid Prototyping* (RP) beskrives teknologierne generelt i det følgende afsnit.

Efter den generelle beskrivelse gennemgås de mest almindelige teknikker mere detaljeret. Fælles for alle disse teknikker er at de kun kan lave objekter under 0.5 m³, de fleste endda endnu mindre. Beskrivelserne af teknikkerne er indhentet fra en række kilder^{11, 12, 13} men er dog hovedsageligt baseret på Castle Island's: *Worldwide Guide to Rapid Prototyping*¹⁴ samt *Printing the Future*¹⁵ fra samme udgiver.

Beskrivelsen af de små teknikker danner grundlag for den efterfølgende beskrivelse af mulige storskala teknikker i kapitel 4.

Baggrund

Rapid Prototyping (RP)¹⁶ er en samlet betegnelse for en række metoder til konstruktion af fysiske objekter ud fra en digital model. Man bruger eksempelvis 3D printere (3DP), stereolito-grafi maskiner (SLA) eller selective laser sintering (SLS). *Rapid prototyping* kaldes bl.a. også *Solid Freeform Fabrication* (SFF)¹⁷ *Rapid prototyping* er en slags computerstyret produktion (computer aided manufacturing =CAM) ligesom eksempelvis CNC fræsning.

De første teknikker til RP kom frem i 1980'erne. I starten blev de brugt til at producere modeller (prototyper), heraf navnet. I dag bliver teknikkerne i stigende grad brugt til at fremstille værktøjer eller endda til at producere høj kvalitetsprodukter i små serier.

RP bruger en 3D computermodel som skæres op i en række vandrette snit. Hvert snit produceres efterfølgende fysisk og stables indtil modellen er færdig. Processen minder om at lave en topografisk landskabsmodel (kotemodel).

Der er to hovedmetoder til RP – additiv og substraktiv. Ved additiv prototyping læser maskinen data fra en CAD tegning og danner herefter successive micro eller millimetertykke lag af flydende plastik, metalpulver eller andre materialer. På denne måde bygges modellen langsomt op ud fra en serie af vandrette snit. De enkelte lag limes eller smeltes (ofte med en laser) automatisk sammen indtil man har den endelige form. Det svarer lidt til, at lave en lerkrukke vha. pølser af ler. Den væsentligste fordel ved additive konstruktioner er, at man kan lave stort set alle rumlige geometrier. Ulempen er, at man kun kan lave ret små elementer – de største på størrelse med en bilmotor. Man kan dog lave meget store dele ved at skære skumplader med en varmetråd. Flere firmaer har lavet store maskiner der kan udføre sådanne store konstruktioner.

Den substraktive metode er ældre og mindre effektiv. Man starter med en blok af plastik eller voks som man herefter lag for lag fræser et objekt ud i. Teknikken svarer til CNC fræsning. Teknikken er ældre, men kendt og afprøvet. Det svarer til, når en skulptør tager en træ- eller marmorblok og hugger små stykker af indtil man har den ønskede figur. Det er her sværere at lave komplicerede geometrier som eksempelvis hulheder.

Man bliver i så fald nødt til at opbygge objektet af flere dele som sættes sammen. Man kan lave meget store objekter med disse teknikker – eksempelvis bruger man lignende teknikker til at lave forme til vindmøllevinger.

Udvekslingen mellem digitale 3D modeller og RP maskinerne foregår som regel vha. en slags printerfil i et specielt format kaldet STL format.

Det er i dag muligt at lave meget nøjagtige modeller. For visse materialer / processer skal den materialemæssige opløsning måles i micrometer.

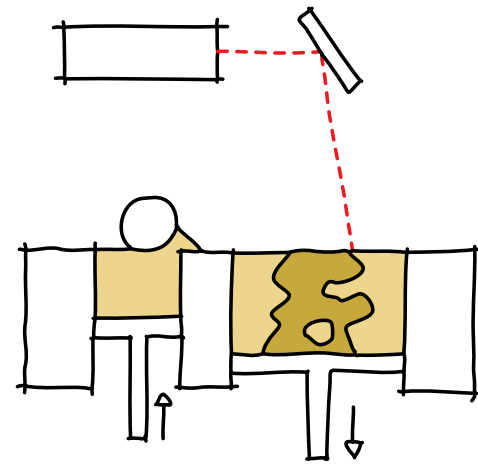
Betegnelsen "rapid" er relativ, idet det med de nyeste maskiner typisk tager fra 3-72 timer at bygge et objekt afhængig af metoden og modellens størrelse. Men hvis objekterne er små nok, er betegnelsen "rapid" korrekt idet man ikke på anden måde kan bygge microobjekter i tilsvarende tempo.

Metoderne er i dag forbedret så meget, at nogle maskiner kan bruge forskellige materialer. Eksempelvis et plastmateriale med et højt smeltepunkt for det endelige produkt og et andet materiale med et lavt smeltepunkt som fyldmateriale mellem bevægelige dele eller som støtte til overhængende dele. Når modellen er færdig smelter man så bare støttematerialet væk. Traditionel spøjtestøbning af plastik er i dag billigere, men inden længe vil man til konkurrencedygtige priser sandsynligvis kunne fremstille komplekse objekter med bevægelige dele i en enkelt proces ved hjælp af RP.

I laboratorierne har man lavet RP maskiner der anvender både elektrisk ledende og isolerende materialer. Det betyder at man potentielt kan lave elektronikken til eksempelvis en mobiltelefon i en enkelt proces.

Prisen på maskinerne falder hele tiden. Man skal i dag lægge fra ca. 25.000 \$ og opad for at få en maskine.

En af de mere spektakulære ideer er at lave RP maskiner der selv kan producere de komponenter der skal til for at bygge en ny maskine. Denne teknik kalder *RepRap*¹⁸ og ideen er simpelthen at lave en selv-replikerende maskine der, for billige penge, kan lave nye eksemplarer. Og herefter har vi alle sådan en maskine stående ved siden af printeren.



Procesdiagram SLA

SLA. Stereolithography.

SLA er en af de mest udbredte teknikker. Den bliver generelt betragtet som den mest præcise metode, samtidig med at den har en meget fin overfladefinish. SLA kan producere modeller ud fra en række forskellige plasttyper. SLA kan bruges til at lave ret store objekter (100 x 80 x 50 cm)

SLA bygger objektet op lag for lag vha. en laser-stråle som rammer overfladen af et kar med en flydende fotopolymer (en flydende plast, der har den kemiske egenskab at den stivner når den udsættes for eksempelvis UV-lys. Lidt på samme måde som når en tandlæge laver en plastfyldning af en tand. Bruges også meget i trykkeindustrien). Fotopolymeren stivner øjeblikkeligt, når den rammes af laserstrålen. Når et helt lag er færdigt bliver hele objektet sænket lidt ned i væsken, og et nyt lag kan bygges på toppen af det foregående.

Hvis objektet har udkragende dele må de støttes midlertidigt under produktionsprocessen. Bagefter skæres støtterne af manuelt. En af ulemperne er, at der er tale om en våd proces, der desuden ofte kræver efterbehandling i en ovn for at færdighærde objektet.

SLA er på det sidste kommet i skarp konkurrence med forskellige inkjet teknologier. Disse teknikker bruger også fotopolymerer, men de er hurtigere og stadig præcise.

En klar væske hærdes med en laser.

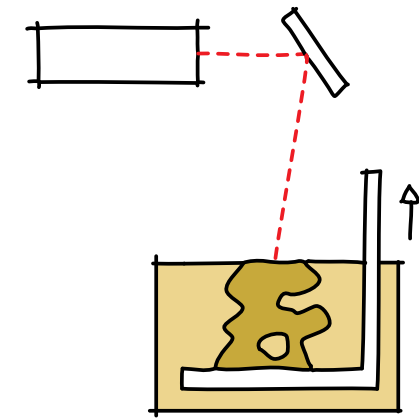


SLS. Selective Laser Sintering.

SLS ligner på mange måder SLA, men I stedet for en væske bruges pulver. SLS har samme produktionshastighed som SLA, men man kan bruge mange flere forskellige materialer herunder polymerer, metaller, nylon, polystyren og polymer-coated sand. Sidstnævnte bruges til at lave støbeforme med. Fælles for alle materialerne er, at de skal kunne smelte. Overfladefinishen er ikke helt så god som ved SLA.

Det termoplastiske (varmefølsomme) pulver spredes med en rulle i et tyndt kompakt lag. Herefter tegner en laser-stråle en figur som smeltes og sammenbindes. Når laget er færdigt sænkes objektet og et nyt lag pulver rulles ud på overfladen. For at speede processen op holdes temperaturen i produktionskammeret konstant lige under smeltepunktet, så laser-strålen kun behøver at opvarme pulveret ganske let før det smelter. Når objektet er færdigt kan man børste eller støvsuge det overskydende materiale væk. En meget stor fordel ved denne teknologi er, at man ikke behøver at støtte udkragede dele idet det kompakte pulver er selvbærende. Derfor kan man lave eksempelvis hængsler i en proces.

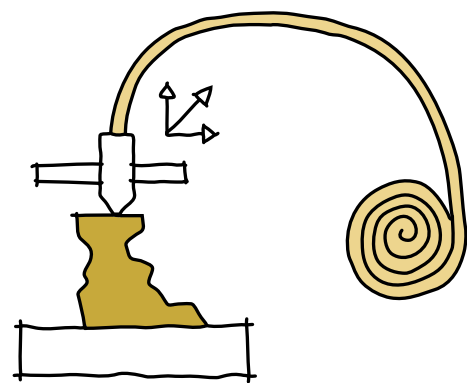
En af ulemperne ved processen er, at objekterne skal køle efter produktionen før de kan flyttes fra maskinen. Ved store objekter op til 2 dage. Da objekterne basalt består af sammensmeltede materialekorn er de porøse – der er simpelthen luft mellem de enkelte korn, og det kan derfor være nødvendigt at infiltrere, især metallerne, med andre materialer for at forbedre de mekaniske egenskaber.



Procesdiagram SLS



SLS Prototype på manifold til Audi A6



FDM. Fused Deposition Modeling.

Metoden er baseret på en ekstrudering af termoplastiske materialer. Nøjagtighed og overfladefinish er middel og hastigheden er langsom. Fordelen er, at man kan bruge en bred vifte af stærke forholdsvis billige polymere, bl.a. ABS og polycarbonat. Også voks kan bruges. Metoden er, efter *SLA*, den næst mest anvendte metode.

En plastiktråd føres fra en rulle direkte til et ekstruderings-hoved. Hovedet varmer plastikken op så den smelter. Hovedet fungerer i princippet som en vandhane, hvor man kan lukke op og i for plastikflowet. Extruderingshovedet er monteret på en stang der kan flyttes både horisontalt og vertikalt. Den flydende plast hærder umiddelbart efter at den er sprøjtet ud pga. den lavere temperatur.

Har man udkragede konstruktioner laver man løbende støttestrukturer. En specielt elegant variation er, at man kan have to ekstruderings-hoveder med hhv. byggematerialet og et vandopløseligt størttemateriale. Man bygger så støttestrukturerne i et vandopløseligt materiale som så bare kan vaskes væk efter produktionen.

Metoden er forholdsvis enkel, "kontor-venlig" og ikke støjende. Plastmaterialerne kommer i lukkede kassetter og maskinen minder lidt om en kopimaskine snarere end en kemisk virksomhed. Metoden bruges eksempelvis af Kunstakademiets Arkitektskoles værksted.



FDM. En tråd af plastik smeltes

Inkjets

Inkjet teknologierne fungerer i princippet ligesom en blækprinter. Det er de mest præcise af alle RP metoder, men ulempen er, at de indtil videre kun kan bruges med ret få og ret bløde termopolymere hvilket til en vis grad begrænser anvendelsesområderne. Metoderne er samtidigt ret langsomme, men flere firmaer konkurrer inden for dette område, og samlet set spås disse teknologier en stor fremtid som erstatning for *SLA*. Der er følgende to varianter:

Thermal Phase Change Inkjets

Som navnet antyder er metoden baseret på, at materialerne størkner når temperaturen falder. Maskinen har to dysser – en til plastmaterialet, og en til et voksmateriale, som bruges til støttestrukturerne. Begge materialer holdes flydende i tanke, og sprøjtes i små dråber ud gennem dysserne efterhånden som det bruges. Når et lag er færdigt, bearbejdes det med en slags tykkelses-høvl så laget overalt er præcist lige tykt. Det overskydende materiale støvsuges væk. Når hele objektet er færdigt smeltes støttestrukturerne af voks væk.

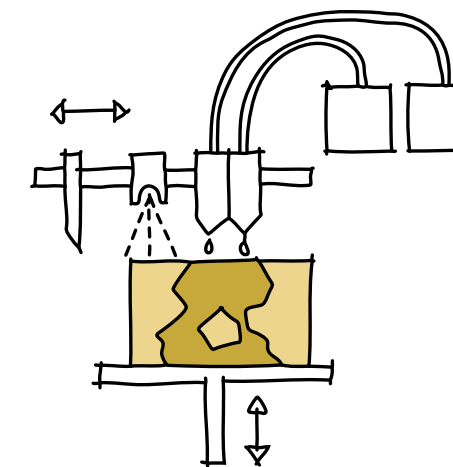
Processen er langsom, der er ikke så mange materialer til rådighed og objekterne er ret skrøbelige, men resultatet er lige så præcist som en CNC fræsning.

Andre producenter har udviklet lignende inkjet teknologier baseret på nedkøling af flydende plastik.

3D Systems producerer en inkjet maskine kaldet *Thermo Jet Modeler™* som bruger adskillige hundrede dysser spredt over et bredt printerhoved. Denne maskine er hurtigere men overfladefinishen er dårligere.

Photopolymer Phase Change Inkjets

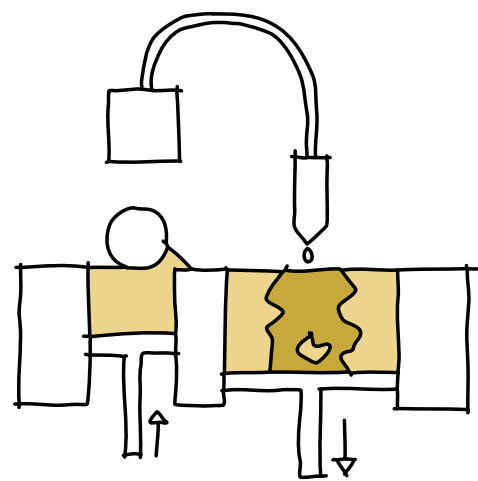
En alternativ inkjet teknologi er baseret på fotopolymere i stedet for termoplast. Et bredt printerhoved sprøjter lag for lag to forskellige fotopolymere ud – en til selve modellen og en til støttestrukturerne. Hvert lag hærdes løbende med UV lys. Metoden minder om *SLA*, men i stedet for at en laser skal tegne mønstret er her er det fotopolymeren der printes ud i et mønster og hærdes med UV lys i en proces. Det er hurtigere. Til sidst vaskes støttestrukturerne ud med vand.



Procesdiagram INK

Komplekse former printet med inkjet





Procesdiagram SLA

3DP. Three Dimensional Printing.

Metoden bruges mest til hurtige konceptmodeller. Finishen er ikke alt for god, men det er den hurtigste og billigste RP metode der findes. Man kan kun bruge stivelse eller gips som materialer, til gengæld kan der bruges farver.

Selve metoden minder meget om *SLS*, dvs. en pulverbaseret metode. I stedet for laser bruger man her en flydende lim (ti-sekunders-lim. Den er ret giftig og ubehagelig at arbejde med), der lag for lag limmer objektet op. Som ved *SLS* er det ikke nødvendigt med støttestrukturer idet pulveret i sig selv kan holde de udkragede dele.

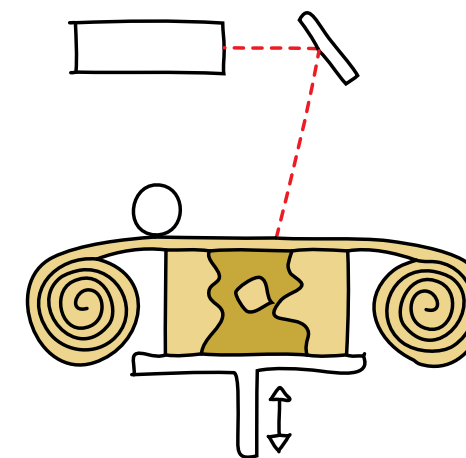
En speciel udgave af 3D printerer bruger levende celler som printes i en hydrogel. En såkaldt biplotter. På denne måde kan man i fremtiden tage celler ud af en person, dyrke dem og herefter printe et nyt hjerte. Der er stadig mange problemer der skal løses så det varer længe inden man kan printe et helt hjerte, men man er temmelig tæt på at kunne printe mere simple emner som eksempelvis kunstig hjerteklapper – det vil gøre en stor forskel for mange mennesker der i dag ikke tåler de kunstige klapper ret godt. Man arbejder også på, at kunne lave kunstige bryster efter eksempelvis cancer operationer. Fælles for disse teknologier er, at man printer et slags skelet eller stillads som indopereres og herefter infiltreres af kroppens egne celler. Der foregår en intens udvikling inden for det bioteknologiske område. Mange forskere drømmer om, at man med disse teknologier kan lave stort set alle de organer man har brug for med patienternes egne celler. Derved undgås alle de problemer der er af såvel praktisk som etisk art i forhold til transplantationer.¹⁹



Kompleks geometri lavet med 3DP

LOM. Laminated Object Manufacturing

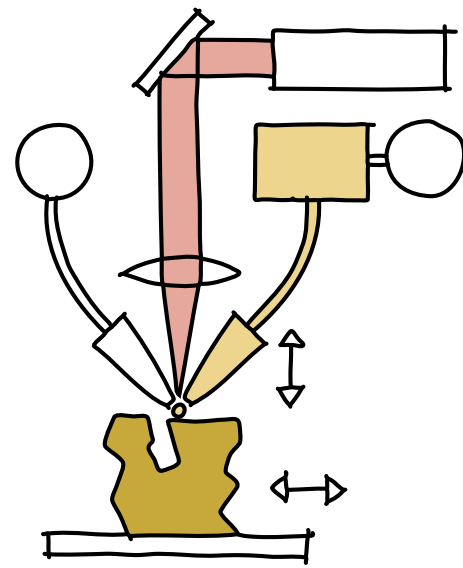
Metoden er for så vidt simpel. En række papirark lægges oven på hinanden. Hvert ark er et vandret snit skåret ud i papir vha. en laser. Papiret føres frem fra en rulle. Inden papiret lægges oven i stakken påføres en varm valse et lag smeltet plastik som klæber arkene sammen. Først når hele stakken er limet sammen fjernes det materiale der fylder hulhederne. Det betyder, at teknikken er "selvbærende", dvs. Der skal ikke laves midlertidige støtter. For at gøre det nemmere at fjerne disse dele, er de skraveret med snitlinier af laseren. Alligevel kan de afhængigt af geometrien tage lang tid at fjerne papiret i hulhederne. Metoden giver ikke den højeste finish, men materialerne er meget billige og lettilgængelige. Desuden virker objekterne som træ, og man kan bearbejde dem videre som træ. Der er flere firmaer der arbejder med teknologien, også i alternative varianter, hvor papiret skæres med knive, ligesom andre materialer som keramik og metal er blevet forsøgt.



Procesdiagram LOM



udført i LOM opfører sig ligesom træ.



Procesdiagram LPF

LPF. Laser Powder Forming

Begrebet dækker en række forskellige teknikker, der alle er baseret på direkte smeltning af metal eller keramisk pulver vha. en laser. Den store fordel er, at man hurtigt kan lave massive metaldele med god metallurgiske egenskaber.

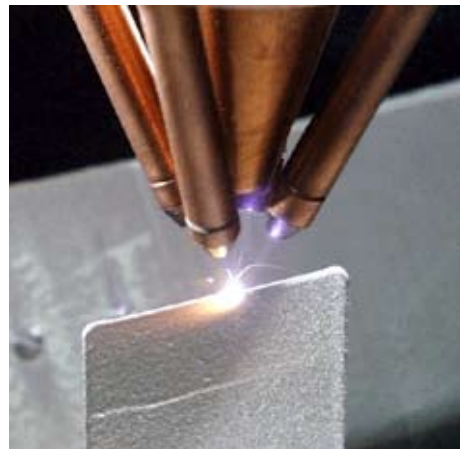
Teknikkerne er ret nye, men omgæret med megen opmærksomhed. Både i Europa og USA er såvel offentlige som private laboratorier involveret.

Laser Engineered Net Shaping™, LENS® er en af disse teknikker. En højenergi laser smelter et metalpulver. Laseren er fokuseret forstærket vha. linser. Metalpulveret bliver blæst ind vha. en gas som samtidig holder luftens ilt væk for at sikre, at smelteprocessen er så kontrolleret som muligt.

Man kan bruge mange forskellige metaller, herunder rustfrit stål, kobber, aluminium og titanium. Metalsammensætningen kan ændres løbende, dvs. at man kan lave en slags glidende legeringer, hvilket aldrig før har været muligt.

De færdige objekter er massive med en metalstruktur som er lige så god eller bedre end objekter lavet ved konventionelle metoder. Objekterne skal dog som regel stadig have en eller anden efterbearbejdning og i forhold til *SLS* er der færre materialebegrænsninger. Indtil videre er det især store komponenter af titanium til rumfartsindustrien som er fabrikeret med denne metode. Det siger sig selv, at ikke mindst hæren er meget interesseret i disse teknikker. Man vil gerne have en printer bag på en lastbil, der hurtigt kan lave en ekstra riffel eller en ny dims til en helikopter når man sidder i felten.²⁰

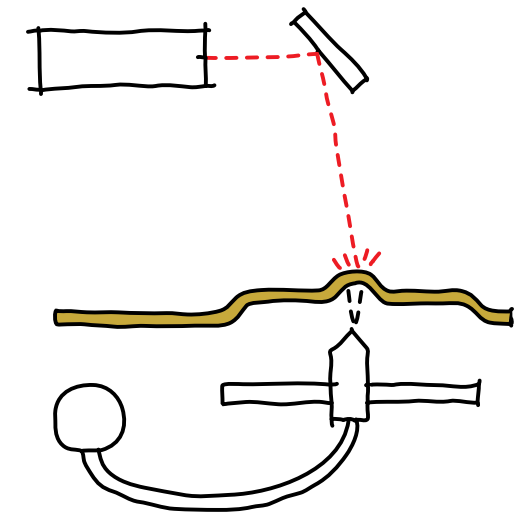
LPF. En laser smelter metalpulver



Bearbejdning af plader til skalformer.

Denne teknik er udarbejdet af *Direct Shaping Technologies GmbH*.²¹ Teknikken bruger enkle termoplastiske pladematerialer som: Polystyren, polyethylen og polypropylen.

Teknikken minder om glaspustning. Plastikpladen opvarmes med en laser. Når plastikken er blød, blæses der bagfra med trykluft og pladen ændrer form. Man måler bulens højde med et videokamera, og kan således dynamisk ændre temperatur og luftmængde så den korrekte højde opnås. Afhængig af formen køres processen flere gange igennem. Processen er angiveligt hurtig, men der er begrænsninger i forhold til materialevalg (indtil videre kun plastmaterialer) og geometri.



Procesdiagram plader



blæses op til komplekse skalformer

4



Teoretiske store teknikker

- 28 Teoretiske store teknikker
- 29 SLA. Stereolitography
- 29 SLS. Selective Laser Sintering
- 30 FDM. Fused Deposition Modeling.
- 30 Inkjets.
- 30 3DP. Three Dimensional Printing
- 30 LOM. Laminated Object Manufacturing
- 31 LPF. Laser Powder Forming
- 32 Bearbejdning af plader til skalformer.
- 32 Andre store metoder

Hvis man for alvor skal bruge RP teknikker i byggeriet skal de skaleres op. Der er brug teknologier som kan danne elementer eller bygningsdele af en vis størrelse før det bliver interessant. Hypotetisk kan man tænke sig, at alle de små RP metoder bare kan opskaleres, men nogen er klart mere oplagte end andre. I det følgende gennemgås de teoretiske muligheder for store teknikker med udspring i de forskellige små RP teknologier.

SLA er en metode hvor en laser-stråle danner objekter ved at ramme overfladen af et kar med en flydende fotopolymer. Metoden er ikke særligt oplagt, da fotopolymere er alt, alt for dyre i de størrelser byggeriet operer med. Fotopolymere bruges i stor stil i bl.a. trykkeriindustrien, men man ved også herfra, at det kan være forbundet med miljøbelastninger, idet man bl.a. anvender opløsningsmidler i processen.

SLS er i princippet det samme som *SLA* men i stedet for væske bruges forskellige faste materialer som polymerer, metaller, nylon, polystyren og polymer-coated sand.

Teoretisk er metoden absolut en mulighed omend i en varieret form. I stedet for polymercoated sand kunne man bruge polymercoated tilslagsmaterialer af en vis størrelse. Når man laver støbeforme i sand bruger man allerede i dag polymercoated sand, hvor overfladen smelter når det rammes af en laserstråle. Det samme kunne man selvfølgelig gøre med traditionelle byggematerialer som grus / leca-nødder, men det virker umiddelbart som en dyr løsning. En mere oplagt form for coating vil være at prime grus / leca med noget så simpelt som cement. Man kan blande disse ingredienser på traditionel vis i en blandermaskine. I stedet for laser kan man så bruge vand som "aktivator". Eller sagt på en anden måde, man printer med vand. Metoden kan teoretisk anvendes til meget store emner, men de skal alle laves i en kasse eller form hvor emnet hærdes færdigt. En nærmere beskrivelse af mulighederne i denne proces er beskrevet i kapitel 6.

SLA. Stereolitography

SLS. Selective Laser Sintering

FDM. Fused Deposition Modeling.

Man opvarmer og ekstruderer en plast som hærder efterhånden som den påføres.

Metoden kan teoretisk set sagtens skaleres op til bygningselementer. Men normalt bruges der ikke plastmaterialer i den størrelse. På flere måder minder teknikken dog om *Contour Crafting* hvor man også bygger ved at ”pølse” et materiale op. *Contour Crafting* er beskrevet nærmere i kapitel 5.

Inkjets.

Denne metode er en meget præcis, men den er baseret på photopolymere og derfor som tidligere nævnt principielt ikke så interessant i de størrelser som byggeri kræver.

Men i processen indgår en efterbearbejdning af de enkelte lag med en tykkelseshøvl som er interessant. Næsten uanset teknik er det en udfordring at sikre en ensartet lagtykkelse så det samlede højde af det færdige element er korrekt. En lille systematisk fejl i højden på de enkelte lag bliver potentielt til en stor fejl når den multipliceres op med antallet af lag. Men hvis man høvler eller tromler hvert lag kan man sikre en ensartet tykkelse og dermed en større nøjagtighed i det færdige element.

3DP. Three Dimensional Printing

Metoden virker som en oplagt mulighed i byggeriet. Et lag leca. Print med beton. Nye lag leca. Print med beton osv. Undervejs tromles hvert lag eventuelt. Metoden kunne nok ret direkte udvikles til opsætning i eksisterende fabriksanlæg til fremstilling af betonelementer.

Mulighederne i denne proces er beskrevet i kapitel 6.

LOM. Laminated Object Manufacturing

Traditionelt skæres papirark ud og limes sammen ligesom når man laver en kotemodel i pap.

Metoden er næppe anvendelig til cementbaserede konstruktioner. Men den kunne eventuelt oversættes til krydsfiner. Så ville man kunne lave meget komplekse træelementer. Der vil dog potentielt være et stort materialespild. Man kunne sandsynligvis lige så godt CNC-fræse objektet ud.

Forskellige metoder der er baseret på direkte smeltning af metal eller keramisk pulver vha. en laser.

Metoden er oplagt interessant ift. komplekse bærende stålkonstruktioner som printes enten på stedet eller som elementer.

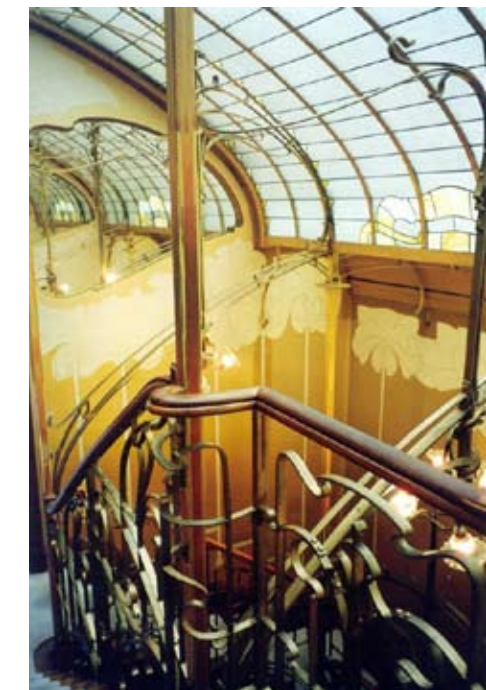
Organiske, topologioptimerede konstruktioner er i dag kostbare og vanskelige at fremstille.²² Derfor bruges de hovedsageligt i eksempelvis fly- og bilindustrien, hvor man har mange gentagelser af et meget avanceret produkt. Men med en mere direkte vej fra computer til stålkonstruktion åbnes nye spændende muligheder for både artistiske og konstruktive udfordrende formgivninger.

Indtil videre er metoden dog så dyr, at den næppe er anvendelig i bygningsindustrien. Teoretisk set kan metoden ret nemt opskales, men det vil nok inden for en overskuelig fremtid snarere være fly-, bil- og skibsindustri, der vil have glæde af en sådan metode.

Metoden er også interessant ift. muligheden for udførelse af glidende legeringer på stedet. Man kunne forestille sig en tilsvarende teknologi, oversat til et printhead, der løbende tilføres forskellige materialer som cement, grus, fibre, som så blandes på stedet i forhold til behov for styrke, isolering osv.

LPF. Laser Powder Forming

Hortas komplekse ståldetaljer bliver igen mulige



Bearbejdning af plader til skalformer.

Teknikken bearbejder termoplastiske pladematerialer som polystyren til skalformer.

Byggeriet er fuldt af pladematerialer og teknikker til individuel bearbejdning heraf er meget interessante, men det er et problem, at det indtil videre kun er plast der kan bearbejdes.

Teoretisk er der ingen forhindring for at også at forme plader i metaller som aluminium, kobber og stål på samme måde. Bilindustrien arbejder på lignende teknologier.

Andre store metoder

Man kan forestille sig andre storskala metoder end dem der udspringer af eksisterende små RP teknologier.

En metode kunne være printning med "klumper". Et eksempel herpå, er en robot der murer en væg (mursten=klump).

En sådan robot eksisterer allerede på ETH Zürich.²³ Ved at lægge mursten i lidt forskellige vinkler kan den danne meget avancerede mønstre og forbandter. Men murstenene mures ikke sammen med mørtel - de limes sammen. Det kræver en høj præcision og styring af processen.

En ulempe ved denne og andre robotter er netop kravet til præcision. Det betyder at murstenene er speciallavede med små tolerancer og de limes sammen da mørtel er for unøjagtigt. Robotten kan lave elementer på en størrelse op til 4,5 x 1,5m. Denne begrænsning ses umiddelbart ikke som et problem – tværtimod er byggeriet i høj grad baseret på elementer af lignende størrelser. Man vil også kunne udvikle en robot der fungerer direkte på pladsen, men det kræver at man får styr på tolerancerne.

Murstenen kunne skiftes ud med andre former for "klumper".

Så længe der er tale om ortogonale (firkantede) byggeelementer kan de i princippet sættes sammen på denne måde.

Case 1. Contour Craftin

34 Case 1. Contour Crafting

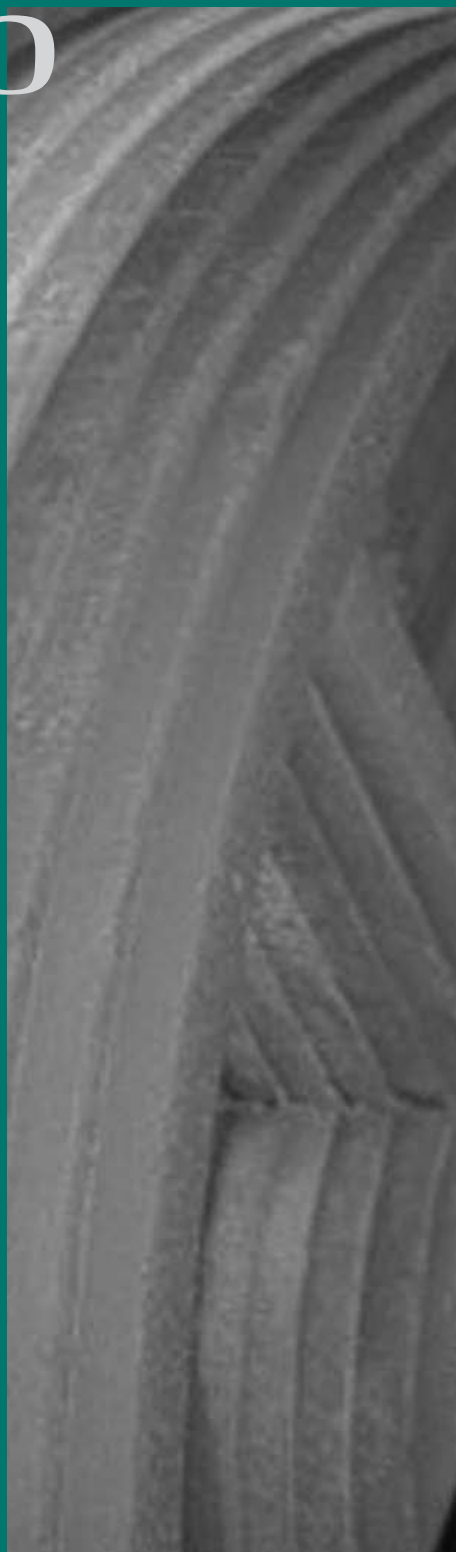
35 Metoden

35 Materialer

36 Armering

36 Hastighed

37 Udseende



Contour Crafting er en konstruktionsteknologi som stadig er under udvikling. Metoden er udviklet af ingeniør Behrokh Khoshnevis på University of Southern California, USC.²⁴⁻³³

Ved at bruge en computerstyret portalkran opbygges bygninger eller bygningsdele uden brug af manuel arbejdskraft. Oprindeligt blev metoden udviklet til at bygge støbeforme til industrielle emner. Men siden er teknologien udviklet i retning mod bl.a. hurtig og effektiv boligkonstruktion. Målet er bl.a. hurtigt at kunne lave billige boliger efter eksempelvis naturkatastrofer. Metoden går ud på, at man lag for lag ”pølser” et hurtigttørrende cementbaseret materiale op, til man har de færdige vægge. Metoden minder om FDM, men i stedet for en plastiktråd som smeltes bruges her beton. Undervejs i processen kan man indstøbe armering, men også mere komplicerede elementer, som el- og vvs-installationer, efterhånden som lagene bygges op. Khoshnevis hævder, at systemet vil kunne bygge et almindeligt enfamilieshus på under en dag. Samtidig vil den elektrisk drevne portalkran kun producere ganske lidt byggeaffald og luftforurening sammenlignet med mere traditionelle konstruktionsmetoder.

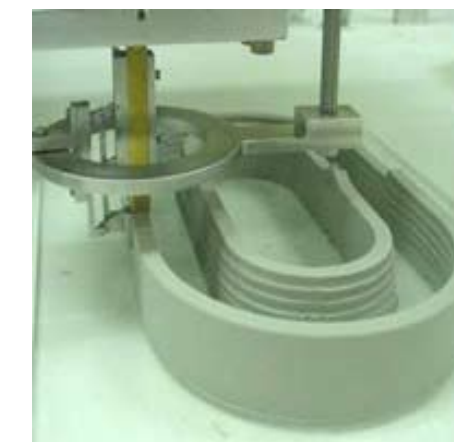
Khoshnevis stopper ikke på jorden. Han fortæller at NASA er ved at evaluere *Contour Crafting* i forbindelse med konstruktioner i rummet, det vil sige på månen og Mars.

Contour Crafting er baseret på et færdigblandet, hurtigttørrende cementholdigt produkt. Selve blandingen er indtil videre hjemmelig, men den ligner både i tør og våd tilstand en fiberforstærket flisemørtel.

Khoshnevis fremhæver, at der kommercielt kan være en analogi til inkjetprintereren, dvs at man enten forærer eller sælger selve maskinen billigt, men blækket (= cementen) dyrt. Der ligger givetvis stærke kommercielle overvejelser bag denne betragtning.

Ligesom printereren kan have flere farver blæk, kan man forestille sig, at have flere materialer i gang. Khoshnevis har vist eksempler, hvor der laves en mur med en hård ydre skal i fiberarmeret beton og et blødere indvendig fyld svarende til letbeton. Man kunne have endnu flere materialer – ikke mindst et effektivt isoleringsmateriale er interessant.

Metoden



Et cementbaseret materiale pølser op. Ydersiden glattes af en glidende murerske.

Materialer

Khoshnevis ved sin maskine



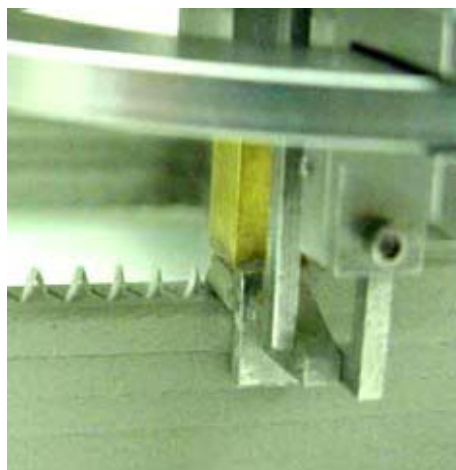
Armering



En portalkran der bevæger sig frem og tilbage på skinner i gulvet bruges til fremstilling af store elementer og potentielt hele bygninger.

Hastighed

Detalje der viser hvordan en spiralformet armering kontinuert nedlægges.



Der er hidtil arbejdet med tre slag armering. Den traditionelle bundne armering kan ikke bruges, men det er blevet foreslået at bruge en slags armering der skrues sammen lag for lag. Gevindet kan være ret groft, men selvom det kan fremstilles billigt i store industrielle kvanta, forekommer det alligevel at være en lidt dyr løsning.

En ret effektiv og enkel metode som passer godt til processen er, at ilægge en spiralarmering. Ulempen er, at de enkelte lag ikke bindes direkte sammen, hvilket alt andet lige må give en svagere styrke.

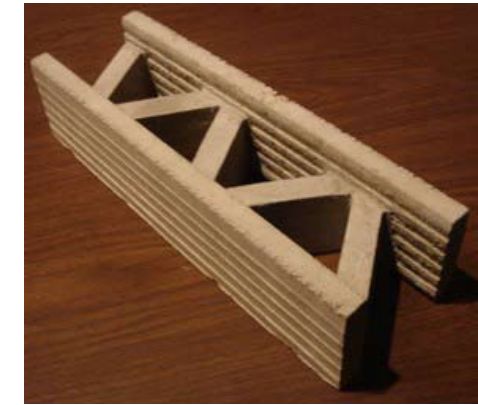
Mest enkel er helt klart fiberarmeringen. Man blander bare stål, glas eller kunstfibre i blandingen. Til mange almindelige vægkonstruktioner osv. virker det oplagt, men ved større krav, til eksempelvis udkragede konstruktioner, er det nok ikke tilstrækkeligt.

Ved et besøg på USC i februar 2008 demonstrerede Khoshnevis en ny generation af *Contour Crafting* maskineriet. De potentielle kommercielle muligheder er store og der er derfor en del hemmelighedskræmmeri omkring processen. Af samme grund må man ikke tage billeder eller video. De aktuelle data om den seneste maskine er endnu ikke offentliggjort, men det vurderes at maskinen i sin nuværende form kan bygge elementer i en størrelse af ca. 8 x 4 x 3 m (L x H x B).

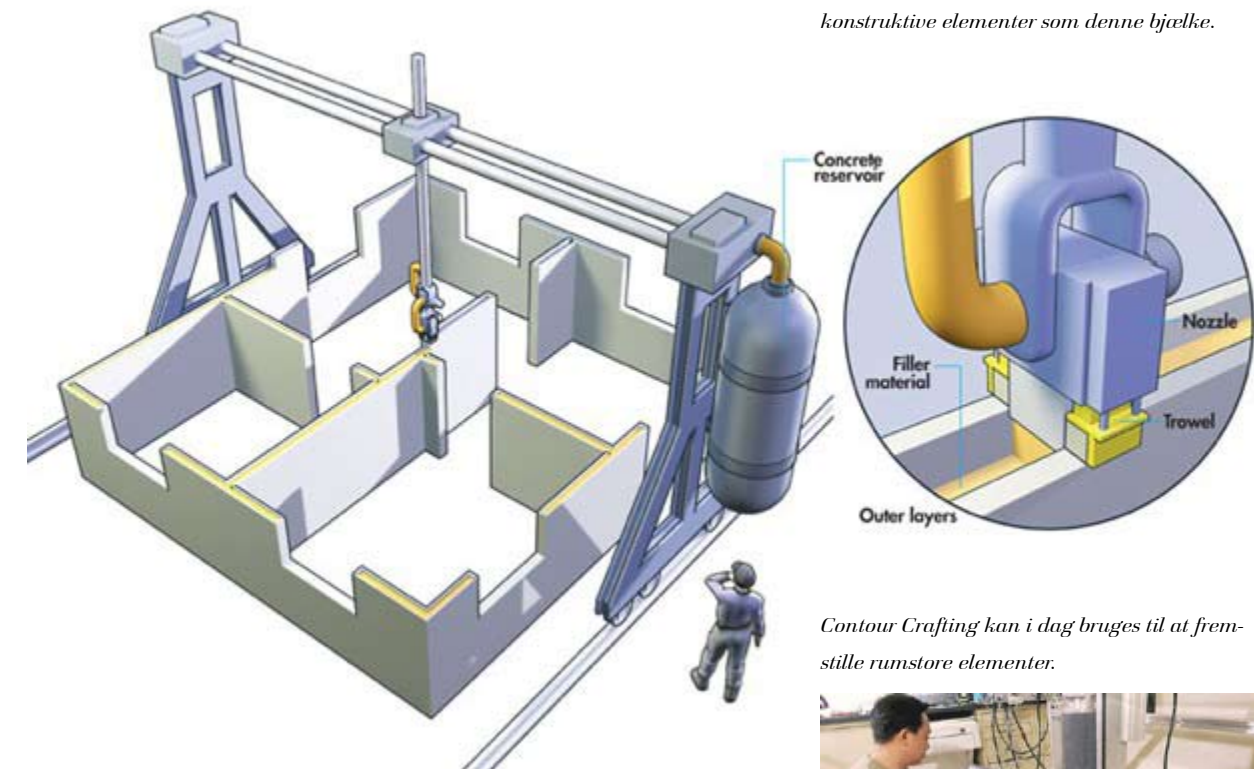
Khoshnevis oplyser, at hans team pt. arbejder på en ny generation som vil kunne bygge med en hastighed på ca. 2 min / m² væg. Et enfamiliehus på 150 m² har typisk 250-300 m² væg. Det svarer til max 600 min eller 10 timer for vægge til hele huset. Man kan forudse, at der vil være et problem med hærdetiden, men i følge det oplyste når hvert lag at hærde så meget af før det nye kommer på, at det kan holde det nye lag uden at falde sammen. Når man ser processen kan man se hvordan materialet er mere lyst i bunden end i toppen som udtryk for den gradvis tørring. Der er lavet forsøg med gennemskårne elementer på ca. 60 cm højde hvor hvert lag var ca. 2 cm højt. Muren har en god, jævn finish, har overalt samme tykkelse, ca. 8 cm og alle lag har fuldstændig samme højde. Så det ser ud til at systemet virker fint.

CC er karakteriseret ved at materialet pøses op i lag på ca. 2 cm i højden hvilket giver et vandret, svagt stribet udseende. Under opførelsen formes og glattes hvert lag på ydersiden med en slags murske der sidder efter dyssen. Man vil sikkert kunne få et endnu glattere udseende ved efterfølgende at køre en slags fugtet svamp over. Men det vandrette, svagt stribede udseende er i sig selv ganske pænt, og vil givetvis kunne anvendes direkte til såvel udvendig som indvendig overflade.

Udseende



Contour Crafting kan også bruges til at lave konstruktive elementer som denne bjælke.

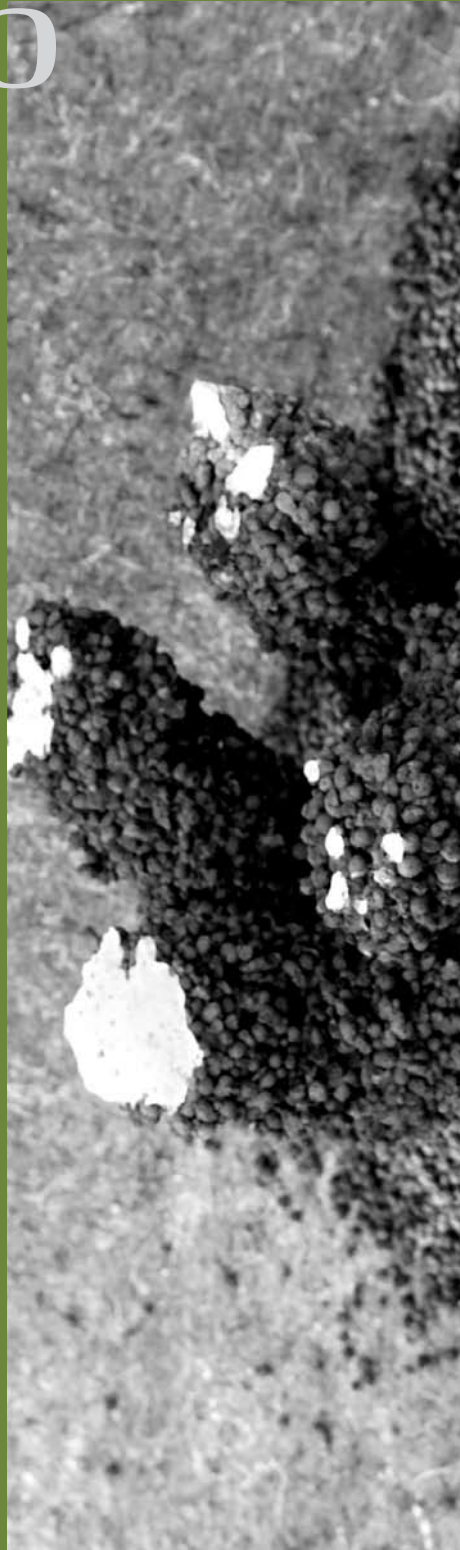


Visionen er at bygge en maskine der automatisk printer alle vægge i en arbejdsgang.

Contour Crafting kan i dag bruges til at fremstille rumstore elementer.



6



Case 2. 3DE. Three Dimensional Element

- 38 Case 2. 3DE. Three Dimensional Element
- 39 Metoden
- 40 Materialer
- 41 Armering
- 41 Hastighed
- 41 Udseende

3DE er en teknik der her beskrives for første gang. *3DE* er en forkortelse for *Three Dimensional Element* og er kort fortalt, en opskalaret *SLS* proces. I stedet for fint pulver, som limes eller smeltes sammen, bruges eksempelvis lecanødder som lag for lag bindes sammen med cement. På denne måde, kan man forholdsvis nemt fremstille store bygningselmenter med en kompleks form.

Det grundlæggende smarte ved *SLS* processen er, at man bruger materialet til at støtte sig selv. Man spreder et pulver med en rulle i et tyndt kompakt lag. Herefter tegnes et mønster med en laser-stråle, og objektets 1. lag opstår. Når 1. Lag er færdigt sænkes hele formen og et lag og et nyt lag pulver rulles ud på overfladen. Som i en lagkage støtter hvert nyt lag på de underliggende. Man behøver således ikke støtter ved udkragede dele idet det kompakte pulver er selvbærende.

Når objektet er færdigt kan man børste eller støvsuge det overskydende materiale væk, og det overskydende materiale kan umiddelbart genbruges.

Der er som led i denne rapport lavet forsøg med leca og cement. Selve processen er udført manuelt, men den vil umiddelbart kunne automatiseres.

Det har uden videre, været mulig at lave elementer i 0,8 x 0,4 x 0,4 m. Man kan sagtens lave disse elementer meget større – det er kun et praktisk spørgsmål.

På eksempelvis elementfabrikken C.C. Brun Betonelementer A/S bruges allerede i dag en printer, som tegner den ydre form af elementerne op med kridt på en stålform. Herefter monteres de ydre begrænsende forme manuelt ligesom armeringen ilægges manuelt. Printerne kunne for så vidt bruges direkte til denne proces. Hvis man laver en støbekasse monteret med et sænkbart stempel i bunden har man en *3DE* printer. Man skal blot bruge cement i stedet for kridt.

Metoden passer altså potentielt fint ind i eksisterende betonelement produktion. Allerede i dag, producerer man elementerne i en kasse, som efterfølgende sættes i et tørrekammer til afhærdning. Det samme kunne man gøre med *3DE* elementer - de skal så bare støvsuges for overskydende materiale efter hærdning.

Metoden

Materialer

I dette forsøg er der arbejdet med almindelige lecanødder og cement. Basalt set, giver det et element der minder om en lecablok eller et letbetonelement.

De færdige elementers grovhed er direkte afhængige af materialets finhed. Der har derfor været lavet et (mislykket) forsøg hvor der i stedet for leca blev brugt strandsand som naturligt giver en finere pixelering.

Man kan forestille sig andre materialer der kan bruges på lignende vis, herunder andre stenmaterialer, isoleringsmaterialer og opskummet beton (gasbeton).

Som klæbemiddel er der anvendt hhv hurtigtørrende flise cement eller almindelig cement blandet med vand til en flødeagtig konsistens. Denne blanding er efterfølgende hældt ned over lecanødderne som er lagt ud i lag af 10 mm. Begge klæbemidler har virket tilfredsstillende, men det er vigtigt at viskositeten er korrekt for ellers flyder klæbemidlet for langt eller for kort ned i massen.

Man kan alternativt forestille sig at leca og cement på forhånd blandes for herefter blot at dryppe/opfugte med vand. Det kræver at alle materialer er helt tørre og at processen foregår i en kontrolleret luftfugtighed.

Billedserie fra forsøg med fremstilling af 3DE element i leca og cement.



Metoden er kun testet uden armering. Umiddelbart er der de samme oplagte muligheder for armering som ved *Contour Crafting*, dvs, spiralarmering eller især fiberarmering.

En spændende mulighed kunne være en videreudvikling af filigran-elementet, dvs. at man bruger metoden til at lave en elaboreret ydre form som på bagsiden monteres med traditionel armering. På byggepladsen udstøbes det hele så til et massivt element.

Indtil nu er *Contour Crafting* den eneste metode der er beskrevet til fremstilling af elementer der er større end 0,4 m³ (aktuelt er SLA den eneste metode som kan lave elementer på 1 x 0,8 x 0,5 m).

Men som beskrevet i det foregående afsnit er *Contour Crafting* ikke uden begrænsninger. Først og fremmest, er der tale om et meget specialiseret, kompliceret og sandsynligvis ret kostbart fremstillingsapparat der skal udvikles før metoden kan bruges i praksis.

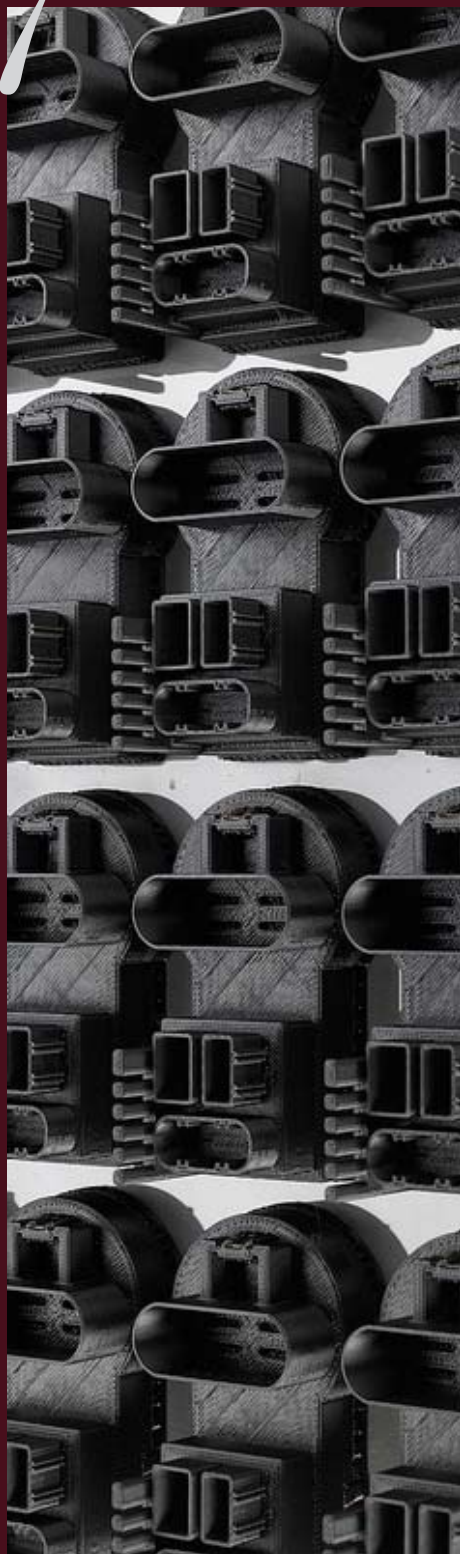
I Danmark er byggeriet domineret af betonelementfabrikkerne – i forhold til mange andre lande bruger vi kun i ringe omfang in situ støbt beton. Vi bruger hovedsageligt præfabrikerede og alle byggeriets parter er vandt til at håndtere de involverede processer fra projektering over produktion til montage på byggepladsen.³⁶

Armering

Hastighed

Udseende

Produktion



- 42 Produktion
- 43 Software
- 44 Rapid prototyping. Pris / tid
- 46 Byggeriet. Pris / tid

De fremstillede elementer kan ikke umiddelbart bruges som færdig overflade – hertil er de for grove. Men ved et finere tilslagsmateriale kan det bruges. Man kan måske også arbejde med en ”modning” af overfladerne i lighed med den der forgår når man infiltrerer SLS-modeller. Eller sagt på en anden måde – hulrum og overflader kan fyldes med et finere materiale.

Software

I princippet kan et hvilket som helst 3D tegneprogram bruges til at udvikle selve projektet, umiddelbart er der ikke begrænsninger. Objektet skal blot konstrueres som et solidt emne, dvs. at det ikke må være opbygget af overflader alene. Ingeniør baserede programmer som eksempelvis ”Solid Works” er født på denne måde, og derfor specielt velegnede som platforme. Fra 3D modellen oversættes der til en såkaldt *STL* fil. 3D objektet deles ind i et antal lag der svarer til maskinens opløsning og der genereres herfra en printfil der indeholder alle lagene. *STL* formatet er ret universelt – det læses af de fleste maskiner uanset teknologi. Det vurderes, at en ny teknik som 3DE (som omtalt i afsnit 6) også vil kunne bruge denne teknologi.

Contour Crafting er en undtagelse. Den bruger sit eget program for at oversætte 3D modellen til print. Der er tale om en mere kompleks programmering, idet der ikke bare spyttes små materialeemner ud. Ved *Contour Crafting* skal man dirigere retningen på materialet mens det ekstruderes mens der samtidigt gives informationer om hvordan spartlerne på siden skal føres frem. Alt i alt en mere kompliceret information.

Rapid prototyping. Pris / tid

Der er nogle meget direkte sammenhænge mellem kvalitet, pris og tid som det fremgår af nedenstående skema.

Der er en grund til, at der er så mange forskellige teknologier idet de har hver deres optimum ift. disse parametre.

De mest almindelige teknologier, *SLA* (Stereolithography) og *SLS* (Selective Laser Sintering) ligger midt i feltet hvad angår pris for materialer, præcision og produktionstid.

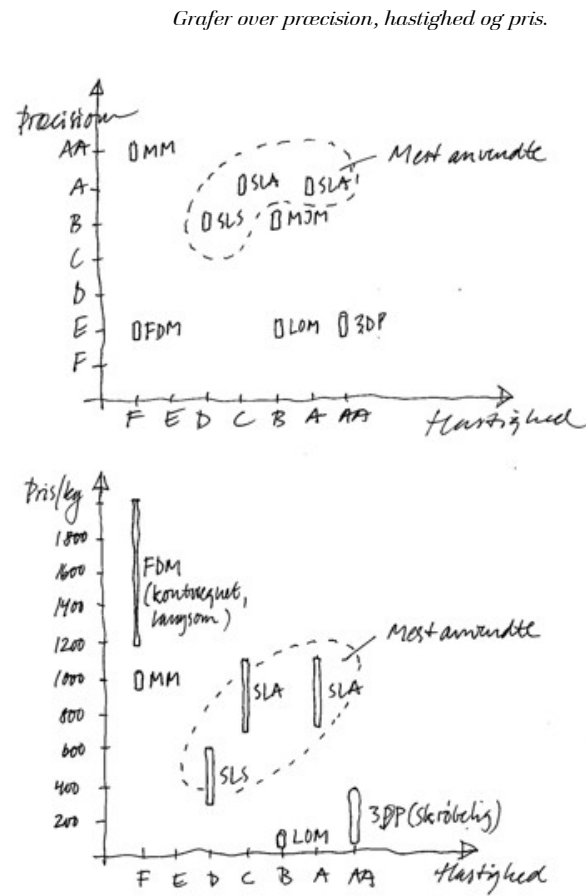
En fremstillingsmetode som *FDM* (Fused Deposition Modeling) skiller sig ud ved at være dyr i materialer og samtidig en langsom proces. Men metoden står alligevel stærkt den er egnet til umiddelbar produktion uden særlige krav. Metoden omtales ofte som "kontoregnet" da den er simpel, ugiftig, materialet er praktisk (kommer i standard kassetter) og prisen på selve maskinen er i den lavere ende. Samtidigt er det ret nemt at lære at betjene maskinen idet der ikke er så mange indstillingsmuligheder.

Det samme gælder for *3DP* (Three Dimensional Printing). Materialet er skrøbelig (gips) men maskinen er billig og metoden er hurtig, og derfor har denne teknik stor udbredelse.

I de to første tabeller er præcision sat over for hastighed og pris/kg sat overfor hastighed. Man kan også sætte pris/kg overfor præcision som det er gjort i den tredje tabel. Så ser man igen som forventet at de mest udbredte teknikker, *SLS* og *SLA* ligger midt i feltet, og at en teknik som *FDM* er dyr og upræcis – men på trods heraf stadig attraktiv, da den er "kontoregnet".

AA - Meget god, A - god, B - over middel, C - middel, D - under middel, E - ret dårlig, F - meget dårlig

Tabellen er baseret på oplysninger fra Ed Grenda: "Printing the future" 15. Det havde været ønskeligt med udbyggede oplysninger om miljøpåvirkninger, men som Ed Grenda gør opmærksom på, er der ikke på dette område forsket nok, og der findes ikke systematiske / sammenlignelige oplysninger. Materialeprisen indeholder omkostninger til materialerne alene, dvs. at eksempelvis strømforbrug ikke er indregnet.



Teknologi	Stereo-lithography	Stereo-lithography	Wide Area Thermal Inkjet	Selective Laser Sintering	Fused Deposition Modeling	Single Jet Inkjet	Three Dimensional Printing	Laminated Object Manufacturing
Forkortelse	SLA	SLA	MJM	SLS	FDM	MM	3DP	LOM
Producent	Sony	3D Systems			Stratasys	Solidscape	Z Corp.	Cubic Technologies
Generelle egenskaber								
Max emne størrelse (cm)	100x80x50	50x50x60	25x20x20	38x33x45	60x50x60	30x15x22	50x60x40	80x55x50
Hastighed	A	C	B	D	F	F	AA	B
Præcision	A	A	B	B	E	AA	E	E
Overflade finish	A	A	E	E	E	AA	E	E/F
Styrker	meget store emner, præcision, hastighed	store emner, præcision	Kontor egnet	Præcision, materialer	Kontor egnet, pris, materialer	Præcision, finish, kontor egnet	Hastighed, kontor egnet, pris, farve	Store emner, materiale pris
Svagheder	Efterbehandling, kemikalier	Efterbehandling, kemikalier	Størrelse og vægt, skrøbelige emner, få materialer, emnestørrelse	Størrelse og vægt, system pris, overflade finish	hastighed	Hastighed, få materialer, emnestørrelse	Få materialer, skrøbelige emner, finish	Emne stabilitet, røg, finish og præcision
System pris (1000 kr)	1.000-4.000	400-4.000	250	1.500	100-1.500	350-400	150-350	600-1.200
Materiale pris kr/kg								
Plastik (forskellige polymerer)	750-1.100	750-1.100	1.000	300-600	1.200-2.000	1.000		100
Metal (forskellige metaller)				250-300				
Andet				50 (sand)			stivelse: 100 / liter gips: 200 / liter + infiltrant	50-100 (papir)

Byggeriet. Pris / tid

I byggeriet, som i industrien generelt, er der nogle praktiske og håndterbare størrelser for de enkelte byggeteknologier. En mursten er lille, fleksibel og forholdsvis nem at transportere men tidskrævende at lægge op.

Er betonelement giver mest mening når det har en optimal størrelse i forhold til transport og håndtering, dvs. noget der kan ligge på ladet af en lastbil og hurtigt løftes på plads. Meget store elementer må laves på stedet. Kun hvis de er meget kostbare og specialiserede (vinger til vindmøller, bro- og tunnelementer) kan det betale sig at præfabrikere dem og transportere dem med specialtransport.

Ofte er der en sammenhæng mellem præcision og produktionshastighed. Det er billigere og hurtigere at lave et simpelt tagpaptag end et kompliceret tegltag med mange kviste. Den samme sammenhæng ses også mellem materialepris og byggehastighed. Det er hurtigt og billigt at bygge med gasbeton. Det er langsommere og dyrere at bygge med mursten.

Der er en tilsvarende sammenhæng mellem mandetimer i byggeriet og elementstørrelse. Men selv om man kan opsætte et sådant udefra set rationelt synspunkt gælder det ofte ikke i praksis. Byggeriet har mange aktører og der foreligger ofte særlige aftaler der medfører en uigennemsigtig pris beregninger. Eksempelvis er der som regel ikke nogen væsentlig prisreduktion når man anvender blokmurværk i forhold til normalstens murværk. Murerne beregner prisen i forhold til m² færdig mur. Tilsvarende oplever arkitekten ofte at glas-alu facader koster det samme uanset kompleksitetsgrad. Der regnes alene med m² priser.

Nedenstående graf viser sammenhængen mellem byggematerialepris og arbejdstid for udvalgte ydermure. Betonelementet er forholdsvis dyrt, men hurtigt at sætte op. Teglmuren er billig i materialer, men kræver mange timer på byggepladsen. Midt imellem disse ligger en ydermur med skærmtegl og bagmur i betonelementer.

Men i prisen for betonelementerne gemmer sig også de arbejdstimer der er brugt på fabrikken. Hvis man kan reducere prisen til forarbejdet, som *Contour Crafting* eller 3DE dybest set drejer sig om, kan man også reducere prisen på betonelementerne og samtidig få den attraktive korte byggetid.

Nr	Type	Enhedspris	BMP. pr. m ²	Timer pr. m ²
B1	Præfabrikerede betonelementer, 430 mm	2650	2360	0,550
T1	Hulmur tegl, bagmur tegl, 420 mm	2180	865	3,050
T2	Hulmur tegl, bagmur porrebeton, 410 mm	1920	760	2,600
S1	Skærmtegl, præfabrikeret betonelement, 370 mm	2580	1860	1,500

Arkitektoniske muligheder



48 Arkitektoniske muligheder

50 Specialløsningens genkomst

Da jernbetonen blev indført i byggeriet frigjorde man det arkitektoniske potentiale som vi i dag kender som modernismen. I starten var denne nye byggeteknologi for dyr til at blive brugt i almindelighed. Men alligevel begyndte arkitekturen hurtigt at omstille sig og tvang billeder af den nye arkitektur igennem. Et eksempel er Schröder Huis af Rietveld (1924-25) som hovedsageligt er lavet i mursten, selvom det på alle måder skal ligne et betonhus.

Man kan sige, at det samme sker for tiden. I bøger, magasiner og på udstillinger over hele verden anes konturerne af en langt friere, ekspressiv og organisk formet arkitektur.³⁸ De friheder som tegneprammerne har givet arkitekten, er endnu kun i ringe grad oversat til fysisk form. Enkelte arkitekter forsøger at bygge disse nye former f. eks. Frank Gehry, Zaha Hadid - men det er som regel kun ved store prestigeprojekter at det kan lade sig gøre. I det store hele venter arkitektstanden på en ny byggeteknologi men har samtidigt på mange måder formmæssigt foregrebet den.

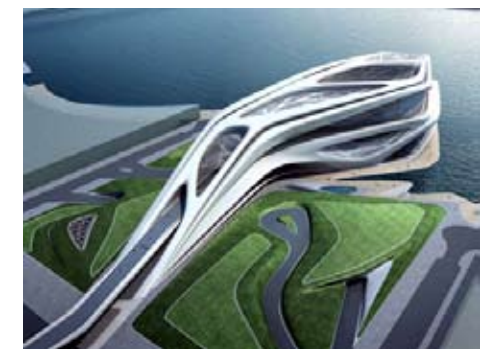
Schröder Huis



Gehry, Bilba



Zaha Hadid



Specialløsningens genkomst

Når nye teknologier inspireret af *RP* (rapid prototyping) bliver indført vil man i fremtiden kunne bygge på to måder:

Man kan enten fortsætte med at lave bygninger som fuldstændigt ligner dem vi allerede kender. Det kan bl.a. gøres ved at kombinere automatiseret fremstilling af vægge med halvfabrikata som eksempelvis bjælker eller dækelementer som ligeledes oplægges automatisk. Altså alene en rationalisering af den nuværende byggemetode.

Men man kan også vælge at udforske den nye byggeteknologi mere radikalt ligesom det skete da jernbetonen blev indført. Det vil eksempelvis kunne resultere i selv bærende konstruktioner, hvor buer og hvælv igen bliver interessante.

Det vil også kunne føre til avancerede konstruktionsprincipper hvor materialernes egenskaber bliver udnyttet til optimering af konstruktioner, isolering, overflader osv.

Detaljen vil blive et kapitel for sig selv og kan igen behandles som en arkitektonisk disciplin. Det vil i princippet være muligt at lave komplicerede detaljer som Frank Lloyd Wright eller Victor Horta uden at spekulere på økonomien. Har man en 3Dmodel kan en hvilken som helst kompliceret detalje i princippet indarbejdes i designet og "printes" som en integreret del af bygningen. Det vil være en revolution og et tiltrængt opgør med den færdige 2. generations modernisme vi trækkes med for tiden.

Hvis man kan printe en bygning, og hvis denne fremstillingsproces samtidig er ligeglad med kompleksiteten af det printede, så åbner der sig en række arkitektoniske muligheder.

Man kan forestille sig en fusion af arkitektur og billedhuggerkunst. Arkitekten kommer med et første design. Billedhuggeren laver et katalog. Man 3D-scanner et objekt og multipliceres det efterfølgende ud over en hel facade. Et mareridt vil nogen måske mene. Under alle omstændigheder en mulighed for udsmykningen og dekorationens genkomst.

Det er også et demokratisk, folkeligt potentiale: Man ser for sig, hvor man i de små hjem fra Internettet downloader en fil med de nyeste skulpturer for herefter at printe dem som en del af

facaden på sit nye hus. Det kan lyde som et æstetisk mareridt. Da den personlige computer og printer blev hver mands eje i 1990-erne var der fra professionelt hold en lignende frygt og forbandelse over det grafiske forurening der fulgte. Men denne forurening er i dag generelt forvandlet til en ny grafisk mangfoldighed, og kun få ville i dag undvære den friskhed der fulgte med.

En sådan ny copy-paste kultur er ikke fundamental fremmed for vores kultur. Da København i 1880'erne voksede hurtigt skete det i den såkaldte klunketid, hvor der fandtes store kataloger med præfabrikeret stuk, præfabrikeret støbejern osv. Det førte til en arkitektonisk stil, hvor murermesteren selv kunne vælge mellem en række ofte meget komplicerede figurer. Forfatteren Herman Bang var kritisk men dybt fascineret af den nye dynamiske og ekspanderende storby. I sin bog "Stuk" fra 1887 bruger han denne nye arkitektur som billedet på indre tomhed bag det strålende ydre. Allerede i det første kapitel heder det således:

- Svært, saa vi bygger Façader, sagde Berg, der i den skiftende Belysning sad og saa' ud over Fortovsstrømmens mange Hoveder.

- Vi kalker vore Grave, sagde Lange.

Men mange af bygningerne fra denne tid har overlevet og er i dag blandt de mest elskede i en by som København. Detaljemæssigt har vi ikke siden kunnet lave en facade af tilsvarende kompleksitet.



Wright. Los Angeles



Gaudi



Søtorvet

Man kan hævde, at det siden hen i det store hele mest er gået ned ad bakke. Vore byggerier er i dag industrialiseret i en grad hvor detaljen nok nærmer sig det teknisk perfekte mht. tæthed, isolering og holdbarhed. Men samtidigt mangler vore bygninger simple narrative egenskaber af enhver art. Det er et forarmet byggeri der i disse år opføres. En halv time i eksempelvis Ørestaden vil overbevise enhver om at vi her bygger morgendagens slum. Selvfølgelig er det ikke alene industrialiserings skyld at vi i dag er tilfredse med det byggede diagram. Inspireret af især Holland har arkitekterne længe fokuseret på en giftig blanding af konceptuel programudvikling og teknisk overfladiske løsninger. Den materialegenererede, æstetiske løsning er stort set fraværende. Det virker som om arkitekterne generelt har opgivet at detaljere indenfor den helhed som en bygning udgør.

Hvor er samarbejdet mellem billedhuggeren og arkitekten i dag?

Deponeret i enkeltværker på byens torv med støtte fra Statens Kunstfond? Loos har med sin "Ornament und Verbrechen" (1908) sejret i en sådan grad at både kunsthåndværkeren og billedhuggeren er blevet væk!

Og her ligger måske et af de mest interessante aspekter ved automatiserede byggeprocesser. Der åbner sig via en automatisering mulighed for en tilbagevenden til håndværkets specialløsninger. De nye teknikker betyder at vi igen kan bygge med en kompleksitet og mangfoldighed som industrialiseringen ellers har sorteret fuldstændigt væk. Specialløsningen bliver en integreret del af og ikke en modsætning til industrialiseringen.



Wright, Guggenheim, New York



Wright, Guggenheim, New York

9



Konklusion og perspektiver

- 56 Konklusion og perspektiver
- 58 Muligheder i byggeindustrien
- 58 Fremtidige udviklingsperspektiver og forskning
- 59 Forslag til udviklingsforsøg

Automatiseret bygningskonstruktion er en meget reel mulighed inden for en overskuelig tidsramme. Det er ikke et spørgsmål om disse fremstillingsteknologier kommer, kun om formen, prisen og tidspunktet.

Muligheder i byggeindustrien

Det vil få potentielt vidtrækkende økonomiske konsekvenser for byggeindustrien. Ikke kun i Danmark, men i alle industrialiserede lande hvor arbejdskraften er dyr. Der tegner sig fra starten to hovedudviklingsmuligheder.

I den ene ende, kan man forestille sig at fremtidens bygninger printes helt eller delvist direkte fra arkitekten og ingeniørens digitale 3Dmodeller. De kan i princippet bygges af en række forskellige materialer, men det er sandsynligt, at beton vil være en hovedingrediens. Besparelsesmulighederne i form af reduceret arbejdskraft og bedre logistik er åbenlys. Byggeteknik kan man kvalitetssikre byggeriet når kommunikationen omkring kuldeborer, isolering, membraner osv. ikke først skal oversættes til håndværk og dermed potentielt misforstås.

I den anden ende, er muligheden for en mere raffineret betonelementindustri hvor hele det dyre forarbejde er elimineret. De økonomiske muligheder er her oplagte da forarbejdet i dag udgør mellem 20 og 40% af udgifterne til fremstillingen af et betonelement.

Fremtidige udviklingsperspektiver og forskning

På University of Southern California arbejder *Contour Crafting* gruppen målrettet mod at printe et hus. Danske institutioner som eksempelvis Kunstakademiets Arkitektskole, kunne ret nemt indgå i et forskningssamarbejde med denne gruppe.

Der findes ikke i dag en samlet systematiseret viden på dette område i Danmark. Der findes en hel del viden på arkitektskolerne, de tekniske universiteter, Teknologisk Institut og kommercielt i branchen: Men denne viden er tilsyneladende stærkt knyttet til de mere traditionelle *Rapid Prototyping* og betonteknologier.

39-45

Man burde sammensætte en tværfaglig gruppe blandt ovennævnte institutioner. Målet kunne være inden for en 3 års ramme at lave Danmarks første hus, hvor hovedkonstruktionen var udført i en 3D print proces. Er man hurtig nok, vil det tilmed blive det første af sin art i verdenen.

Hvorfor lige os

En første fase af et sådant projekt vil være rent teoretisk. Et projektforslag, som går ud på at samle den tilgængelige viden på området, herunder afsøgning og vurdering af alternative tekniker. Danske og udenlandske forskere opsøges og projektets udviklingsmuligheder beskrives. Der laves desuden forskellige forsøgsbænke med det mål at printe 3D objekter i alternative teknologier i en størrelsesorden på ca. 1m³. Udviklingsgruppen fungerer i denne fase først og fremmest som et forum der løbende diskuterer den indsamlede viden og de foreløbige resultater.

Anden fase er hovedprojektet. Her udvikles i tæt samarbejde mellem deltagerne i gruppen den praktiske løsning. Det vil kræve en række delforsøg, afklaringer af patentforhold, kontakt til forskellige dele af byggeindustrien osv.

Tredje fase er udførelsen. Målet er en egentlig prototype. Et projekt der ud over at være en teknisk demonstration tillige viser de arkitektoniske muligheder og begrænsninger som metoden byder på.

Forslag til udviklingsforsøg

10 Referencer

1. Roger-Bruno Richard. (2005) Industrialised building systems: reproduction before automation and robotics. *Automation in Construction*, Volume 14, Issue 4, pp. 442-451
2. Stephen Kieran, James Timberlake. (2003) Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies Are Poised to Transform Building Construction. *Architectural Record*
3. http://www.esbnyc.com/tourism/tourism_history_timeline.cfm
4. <http://www.steenstrom.com/Steenstrom2/templates/PressPage.aspx?id=1762>
5. EBST, FoU-rapport 05/2008 'mod et vidensbaseret byggeri', pp. 4, www.ebst.dk/nyheder/80946/1/0
6. Thomas Ryborg Jørgensen. (2007) Arkitektur & Maas Customization. CINARK.
7. M.C. Leua, W. Zhanga and G. Suia. (2000) An Experimental and Analytical Study of Ice Part Fabrication with Rapid Freeze Prototyping. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. Volume 49, Issue 1, pp. 147-150
8. The Household Fabricator. <http://www.ennex.com/~fabbers/publish/199308-MB-HouseholdFab.asp>
9. MIT Architecture. <http://architecture.mit.edu/descomp/>
10. Kevin Rotheroe. <http://www.architecture.yale.edu/drupal/index.php?q=node/61> http://www.architecture-week.com/2000/0927/tools_1-2.html
11. The Rapid Prototyping Home Page. <http://www.cc.utah.edu/~asn8200/rapid.html>
12. Here Comes Rapid Tooling. http://www.vistatek.com/news/article_rtComes.html
13. Kaper Guldager Jørgensen. (2006) Hvad er rapid prototyping. *Arkitekten* 14. pp. 100-102
14. Castle Island's: Worldwide Guide to Rapid Prototyping. <http://home.att.net/~castleisland/home.htm>
15. Ed Grenda. *Printing the Future*. Castle Island. 2005
16. http://en.wikipedia.org/wiki/Rapid_prototyping
17. Solid Freeform Fabrication, Laboratory at University of Texas at Austin. <http://utwired.engr.utexas.edu/lff/>
18. Self-Replicating Rapid Prototypers, University of Bath. <http://reprap.org>
19. Scott J. Hollister. Porous scaffold design for tissue engineering. *Nature Materials* 4, 518 - 524 (2005)
20. http://www.mobilepartshospital.com/docs/mph_home.shtml
21. <http://home.att.net/~edgrenda/pow/pow8.htm>
22. Ole Sigmund. Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* (2000) 358, 211-227
23. Mette Jerl. Comeback for den flettede mur. *Arkitekten* 11. 2007
24. Automated Construction Using Contour Crafting. B. Khoshnevis, H. Kwon, and S. Bukkapatnam *Industrial and Systems. Solid Freeform Fabrication Proceedings*, 2001, pp 497-504
25. USC researd projects. <http://www.usc.edu/dept/ise/projects.html>
26. Quantum Leap in Rapid Prototyping Unveiled. <http://www.rcf.usc.edu/~khoshnev/us-tech.htm>
27. Contour Crafting: A Novel Hybrid Rapid Prototyping Technique. <http://www.usc.edu/academe/otl/2489w.htm>
28. The Shaping of Things to Come. http://www.usc.edu/ext-relations/news_service/chronicle_html/1997.09.08.html/The_Shaping_of_Things_to_.html
29. Behrokh Khoshnevis. (2006) Mega-scale fabrication by contour crafting. *Int. J. Industrial and Systems Engineering*, Vol. 1, No. 3, 301
30. Behrokh Khoshnevis. (2004) Lunar Contour Crafting – A Novel Technique for ISRUBased Habitat Development. American Institute of Aeronautics and Astronautics Conference, January 2005. Published in *Journal of Automation in Construction – Special Issue: The best of ISARC 2002*, Vol 13, Issue 1, pp 5-19.
31. Habitat Development. *Journal of Automation in Construction – Special Issue: The best of ISARC 2002*, Vol 13, Issue 1, January 2004, pp 5-19.
32. "Home Sweet Home", USC Public Relations, March 24, 2004
33. "Annenberg Foundation Puts Robotic Disaster Rebuilding Technology on Fast Track" (press release), November 14, 2005
34. Additive fabrication apparatus and method. United States Patent. 5,529,471. <http://patft.uspto.gov>
35. Anne Beim, Kasper Sánchez Vibæk og Thomas Ryborg Jørgensen. (2007) Arkitektonisk kvalitet og industrielle byggesystemer. CINARK
36. V&S prisdata. *Bygningsdele*. Januar 2008
37. Branko Kolarevic. (2003) *Architecture in the Digital Age*. Taylor & Francis.
38. <http://www.unikabeton.dk/> Projekt støttet af Højteknologifonden. Formålet er at skabe unikke betonkonstruktioner til konkurrencedygtige priser.
39. <http://www.synligbeton.dk/> Hjemmeside om betonoverflader
40. <http://www.esbenklemann.dk/> Dansk billedhugger der arbejder med beton
41. <http://www.nano cem.org/> Internationalt netværk som arbejder for at øge viden om cementbaserede materials egenskaber på mikroniveau.
42. <http://www.nanonordisk.com/site/11482.htm>. Lotus-effekt. (Hvorfor regndråberne glider af et blad – små hår)
43. www.nanobyg.dk Projekt støttet af Realdania Fondensundersøger mulighederne for en nanoindsats i byggeriet
44. Anne-Mette Manelius. (2007) *Flydende Sten*. CINARK.

