

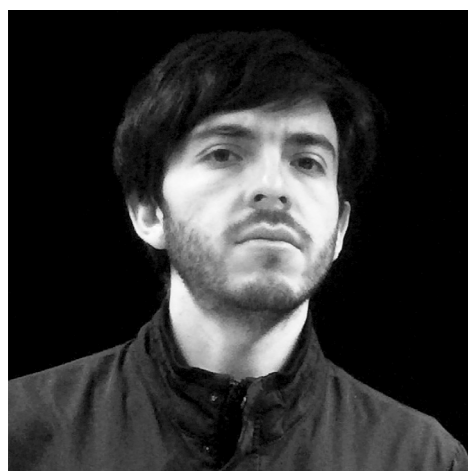
3D-printning av
prefabricerade
betongelement
– nya möjligheter
till samverkan
mellan design,
prestanda och
byggnation

Helena Westerlind

José Hernández



Helena Westerlind är arkitekt och doktorand på KTH Arkitekturskolan. Hennes forskning undersöker arkitektoniska möjligheter med digital additiv tillverkning inom betongkonstruktion.

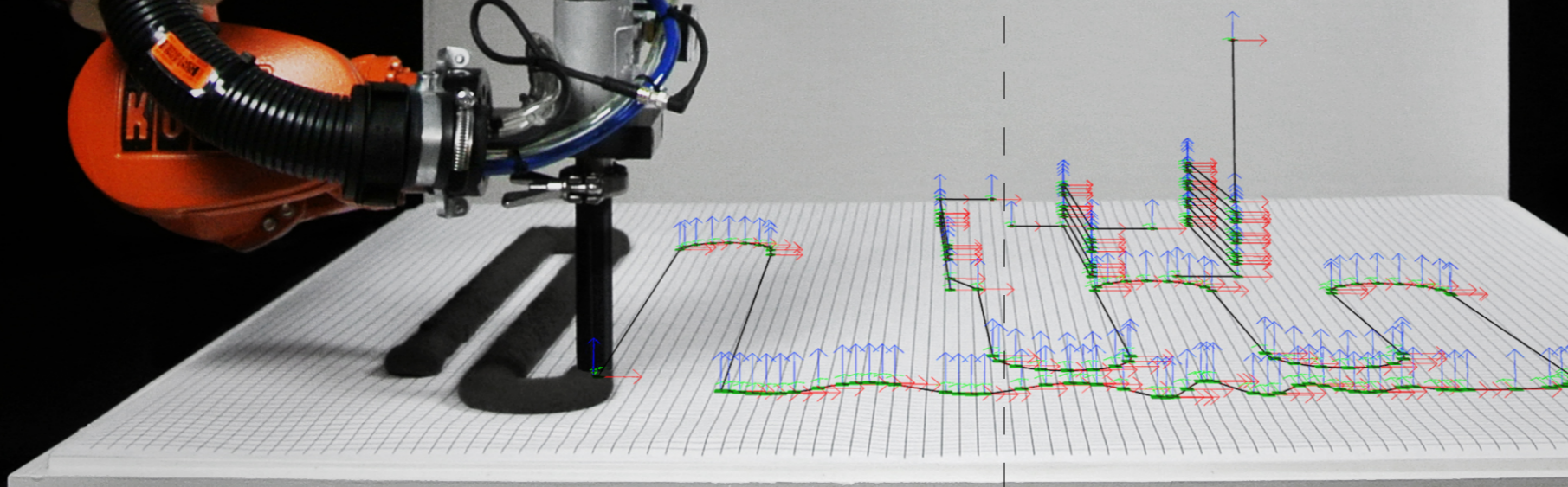
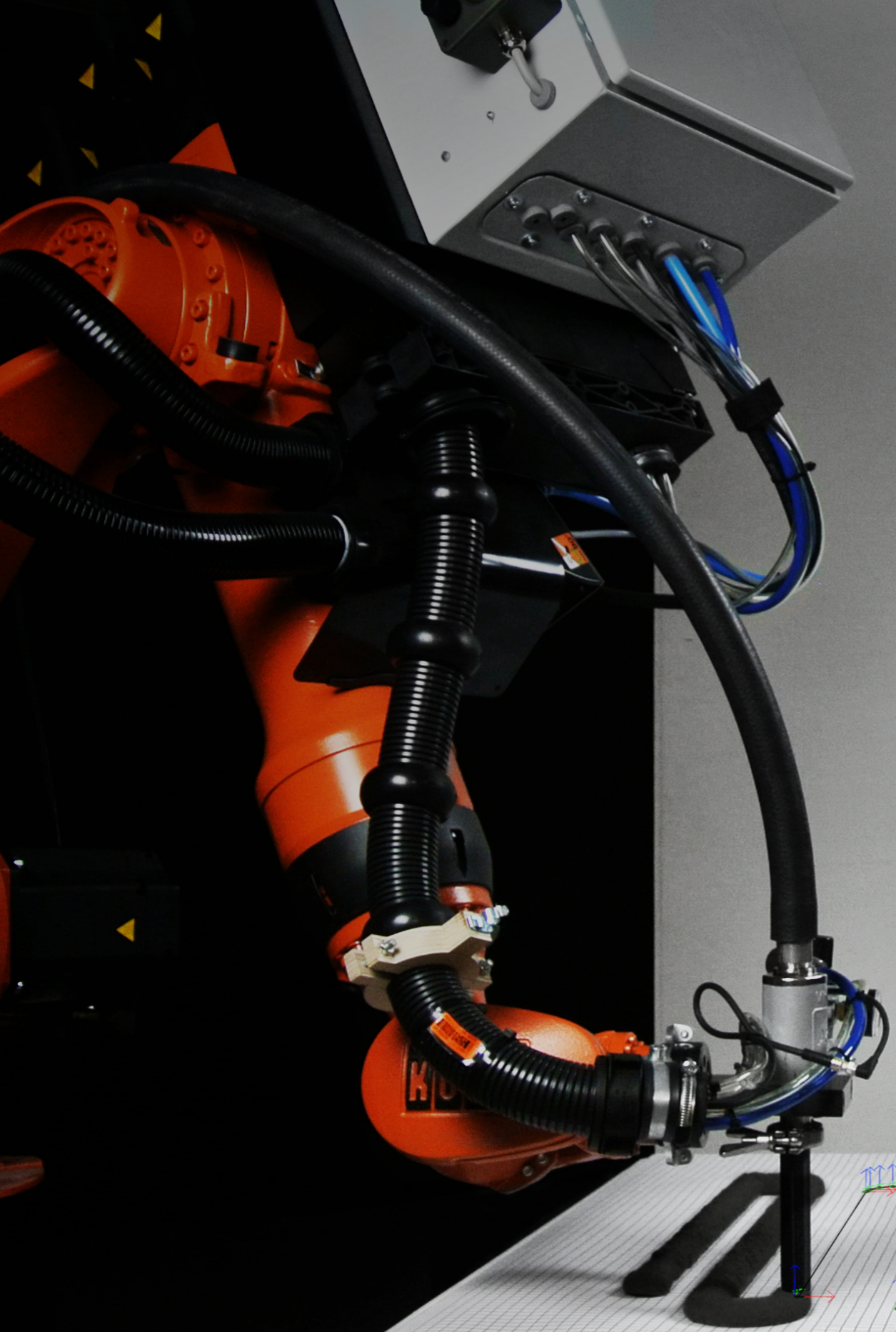


José Hernández är arkitekt och forskare på KTH Arkitekturskolan. I sitt arbete använder han programmering och digital teknik i syfte att förstärka och automatisera processer inom digital design och tillverkning.



Detta projekt är genomfört med stöd från LBF Leif Blomkvist forskningsstiftelse och är en vidareutveckling av ett doktorandprojekt initierat av Helena Westerlind på KTH Arkitekturskolan som en del av *European Union's Horizon 2020 research and innovation programme* under *Marie Skłodowska-Curie grant agreement No 642877*.

Ett särskilt tack vill vi rikta till Leif Blomkvist forskningsstiftelse, Ivar och Anders Tengboms fond, IASPIS – Konstnärsnämndens internationella program för bild- och formkonstnärer, Johan Silfwerbrandt, Hélène Frichot, Pablo Miranda, Wolfram Oettel, Patrick Rogers, Staffan Hintze, Erik Stenberg, Egil Bartos, XtreeE och Wasp 3D.



```
&ACCESS RVP
&REL 1
&PARAM TEMPLATE = C:\KRC\Roboter\Template\vorgabe
&PARAM EDITMASK = *
DEF test_15 ( )

;FOLD INI
;FOLD BASISTECH INI
GLOBAL INTERRUPT DECL 3 WHEN $STOPMESS==TRUE DO IR_STOPM ( )
INTERRUPT ON 3
BAS (#INITMOV,0 )
;ENDFOLD (BASISTECH INI)
;ENDFOLD (INI)

;FOLD STARTPOSITION - BASE IS 9, TOOL IS 9, SPEED IS 100%, POSITION IS A1
5,A2 -90,A3 100,A4 5,A5 10,A6 -5,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0
$BWDSTART = FALSE
PDAT_ACT = {VEL 100,ACC 100,APO_DIST 50}
FDAT_ACT = {TOOL_NO 9,BASE_NO 9,IPO_FRAME #BASE}
BAS (#PTP_PARAMS,100)
PTP {A1 5,A2 -90,A3 100,A4 5,A5 10,A6 -5,E1 0,E2 0,E3 0,E4 0}
;ENDFOLD

;FOLD LIN SPEED IS 2 m/sec, INTERPOLATION SETTINGS IN FOLD
$VEL.CP=2
$ADVANCE=3
;ENDFOLD

PTP {E6POS: X 792.056, Y -255.444, Z 225, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0,
E4 0, S 'B 110'} C_PTP
WAIT SEC 0
LIN {E6POS: X 792.056, Y -255.444, Z 225, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0,
E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 785.207, Y -254.154, Z 224.724, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 778.459, Y -252.308, Z 224.447, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 771.896, Y -249.924, Z 224.17, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 765.566, Y -247.022, Z 223.893, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 759.508, Y -243.622, Z 223.616, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 753.767, Y -239.752, Z 223.34, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 748.39, Y -235.442, Z 223.063, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 743.417, Y -230.725, Z 222.786, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 738.885, Y -225.637, Z 222.509, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 734.827, Y -220.219, Z 222.233, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 731.274, Y -214.51, Z 221.956, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 728.252, Y -208.556, Z 221.679, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 725.784, Y -202.402, Z 221.402, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 723.888, Y -196.094, Z 221.126, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 722.577, Y -189.682, Z 220.849, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 721.859, Y -183.213, Z 220.572, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 721.742, Y -176.738, Z 220.295, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 722.223, Y -170.306, Z 220.019, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 723.3, Y -163.964, Z 219.742, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3 0,
E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 724.961, Y -157.763, Z 219.465, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 727.196, Y -151.748, Z 219.188, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 729.985, Y -145.965, Z 218.912, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 733.307, Y -140.457, Z 218.635, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 737.135, Y -135.267, Z 218.358, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 741.441, Y -130.434, Z 218.081, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
LIN {E6POS: X 746.19, Y -125.992, Z 217.805, A 0, B 90, C 0, E1 0, E2 0, E3
0, E4 0} C_DIS
```

BAKGRUND

Betong är världens mest använda byggnadsmaterial. Dess unika egenskaper i kombination med god tillgänglighet av råmaterial har skapat ett universellt byggmaterial som spelar en fundamental roll i det moderna samhället. Materialets stora miljöpåverkan anses emellertid ofta stå i motsats till hållbart byggande. Den globala cementproduktionen står redan idag för sju procent av de totala utsläppen av koldioxid och den enorma konsumtionen av råmaterial har åskådliggjort att ingredienser såsom sand är en begränsad naturresurs. Denna problematik belyser det stora behovet av att i framtiden tillämpa effektiva byggmetoder som optimerar materialanvändning och förhindrar överkonsumtion.

I betongens traditionella tillämpning som ett gjutmaterial måste en gjutform först konstrueras och sedan nedmonteras för varje tillverkat byggnadselement. På grund av det ofta tidskrävande och kostsamma arbetet som gjutformar innebär har byggsektorn i stor utsträckning anammat industriella metoder där standardiserade gjutformar används för att

tillverka identiska byggkomponenter enligt löpandebandprincipen. Effekten av denna industrialisering nådde sin topp under miljonprogrammets bostadsbyggande då byggsystem med prefabricerade betongelement gav uttryck åt modernismens tankar om ett högteknologiskt byggande. Med tiden kom dock fördelarna med de prefabricerade byggsystemen som förhöjd levnadsstandard och produktions effektivitet, att överskuggas av de enformiga betongfasaderna som blev förknippade med en uniform stadsmiljö. En annan konsekvens av den standardisering och rationalisering som präglar gjutformar är att de skapar uniforma och överdimensionerade betongkonstruktioner som använder mer material än nödvändigt eftersom förenklade konstruktioner är billigare att tillverka än optimerade lösningar.

Idag står vi åter inför en bostadsbrist där ekonomiskt och effektivt byggande står i centrum samtidigt som en ökad medvetenhet om betongens stora miljöpåverkan ställer högre krav på hållbara lösningar. Som ett alternativ till befintliga gjuttekniker skapar storskalig 3D-printning nya möjligheter att över-

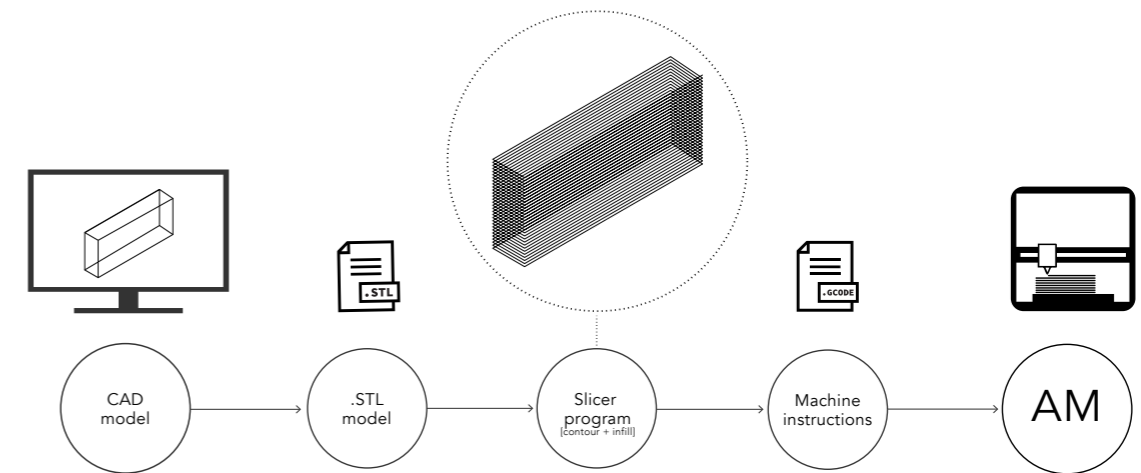
komma det motsatsförhållande som i idag existerar mellan skräddarsydd design och ekonomiskt gångbart byggande. Tekniken har varit under utveckling sedan tidigt 2000-tal men har under de senaste åren upplevt ett starkt växande intresse ifrån många områden inom byggindustrin. Forskning har dock hittills framförallt fokuserat på genomförbarhet och tekniska lösningar snarare än på nya arkitektoniska möjligheter. Detta projekt ämnar motverka denna tendens genom att undersöka teknikens potential för samverkan mellan design, materialegenskaper och byggnation i syfte att bidra till en mer hållbar användning av betong inom byggnadskonstruktion. Genom vidareutveckling av en metod för storskalig 3D-printning som tagits fram på KTH Arkitekturskolan av Helena Westerlind och José Hernández utforskas hur lokal variation i betongens uppbyggnad kan skapa anpassningsbara materialegenskaper i detta tidigare uniforma material.

SYFTE & MÅL

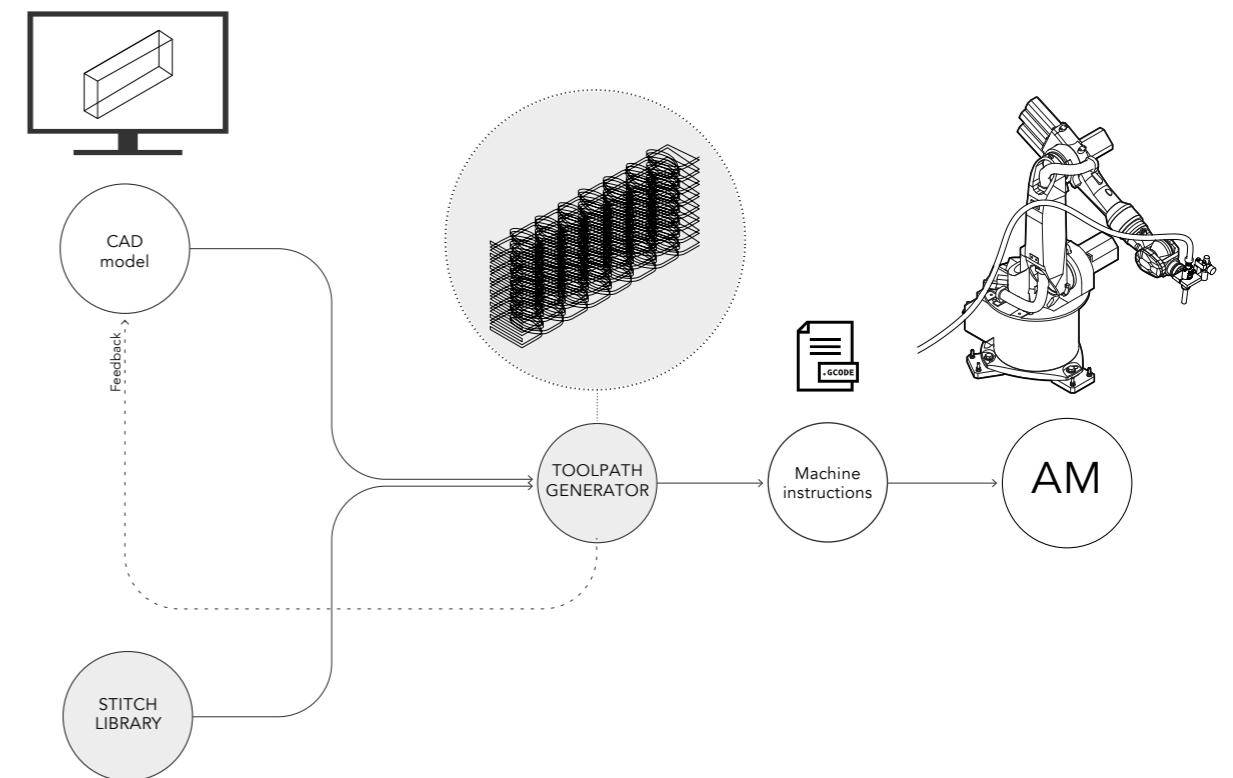
Syftet med projektet är att utveckla strategier för samverkan mellan design, materialprestanda och byggnation inom utformningen av prefabricerade betongelement. Projektet bygger vidare på ett digitalt designverktyg som utvecklats av författarna där programmeringen av olika robotstyrda rörelsemönster styr betongens placering för att åstadkomma varierande materialstrukturer i betongens uppbyggnad. Till skillnad från att gjuta betong som skapar massiva och uniforma konstruktioner så kan 3D-printprocessen således användas för att skapa designmönster som resulterar i komplexa yttexturer med helt nya arkitektoniska kvalitéer som hittills varit omöjliga på grund av gjutformens begränsningar. Målet är att utveckla designlösningar där materialdensitet och mönster kan varieras i relation till belastningskrav för att optimera materialanvändning och avancera betongens arkitektoniska kvalitéer.

METOD

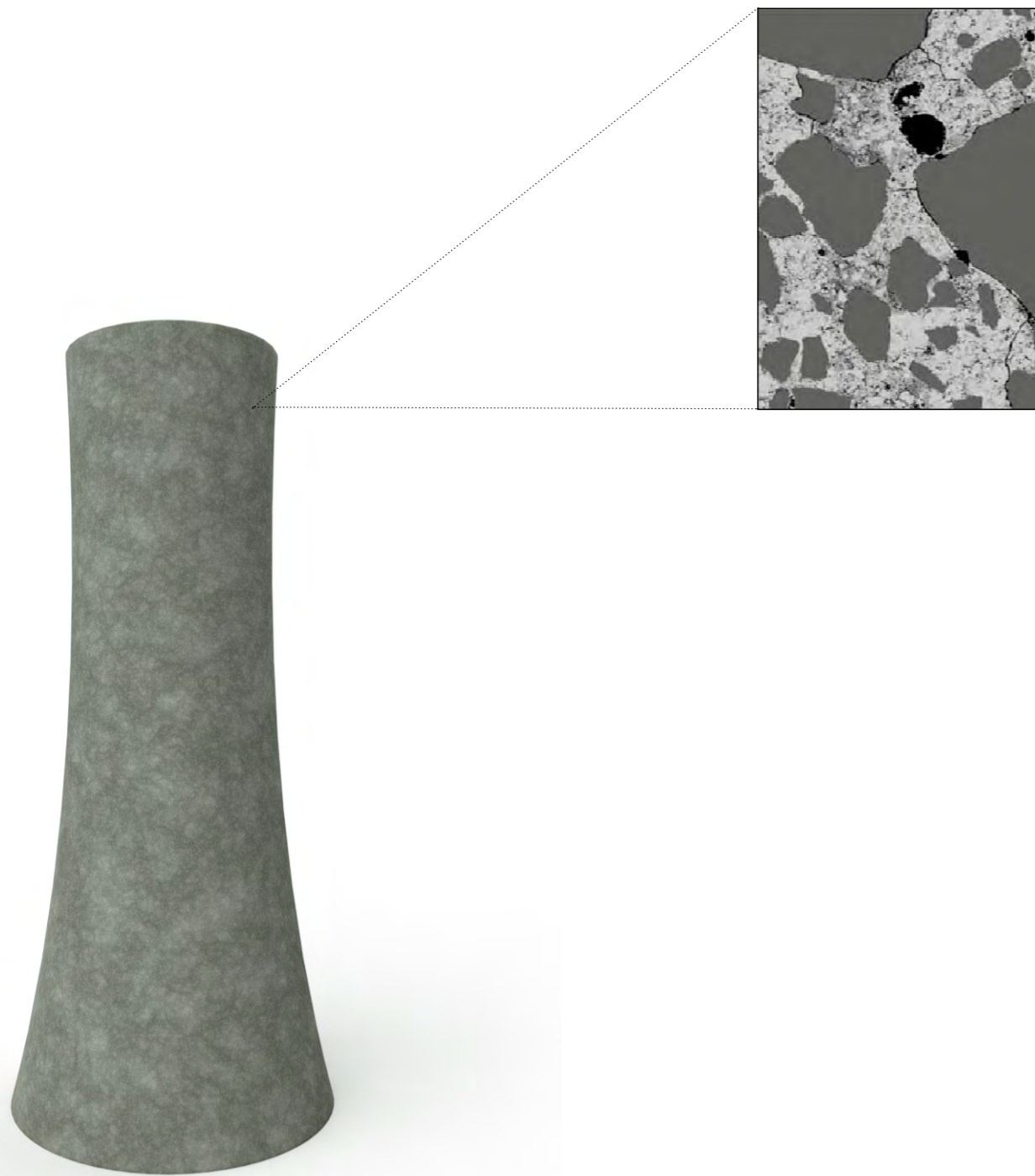
Projektet innefattar vidareutveckling av ett robotstyrt 3D-printverktyg samt ett digitalt designverktyg som översätter designintentioner till maskininstruktioner. Verket har testats genom prototypframställning. Projektet har utförts i tre faser. I projektets första fas förbättrades det robotstyrda 3D-printsystemet som utvecklats på KTH Arkitekturskolan av författarna genom installation av ett nytt printmunstycke som tillåter precision av materialflödet. I projektets andra fas tillverkades en serie designprototyper i lera för att verifiera arbetsmetoden och utvärdera olika materialstrukturers arkitektoniska kvalitéer. Detta empiriska underlag låg till grund för en workshop med syfte att diskutera framtida praktiska tillämpningar med medverkande arkitekter från Liljewall arkitekter och konstruktör från Ramboll. Denna diskussion blev startpunkten för projektets sista fas med fokus på utökade funktioner och förbättringar av det digitala designverktyget.



Standardiserat arbetsflöde inom additiv tillverkning

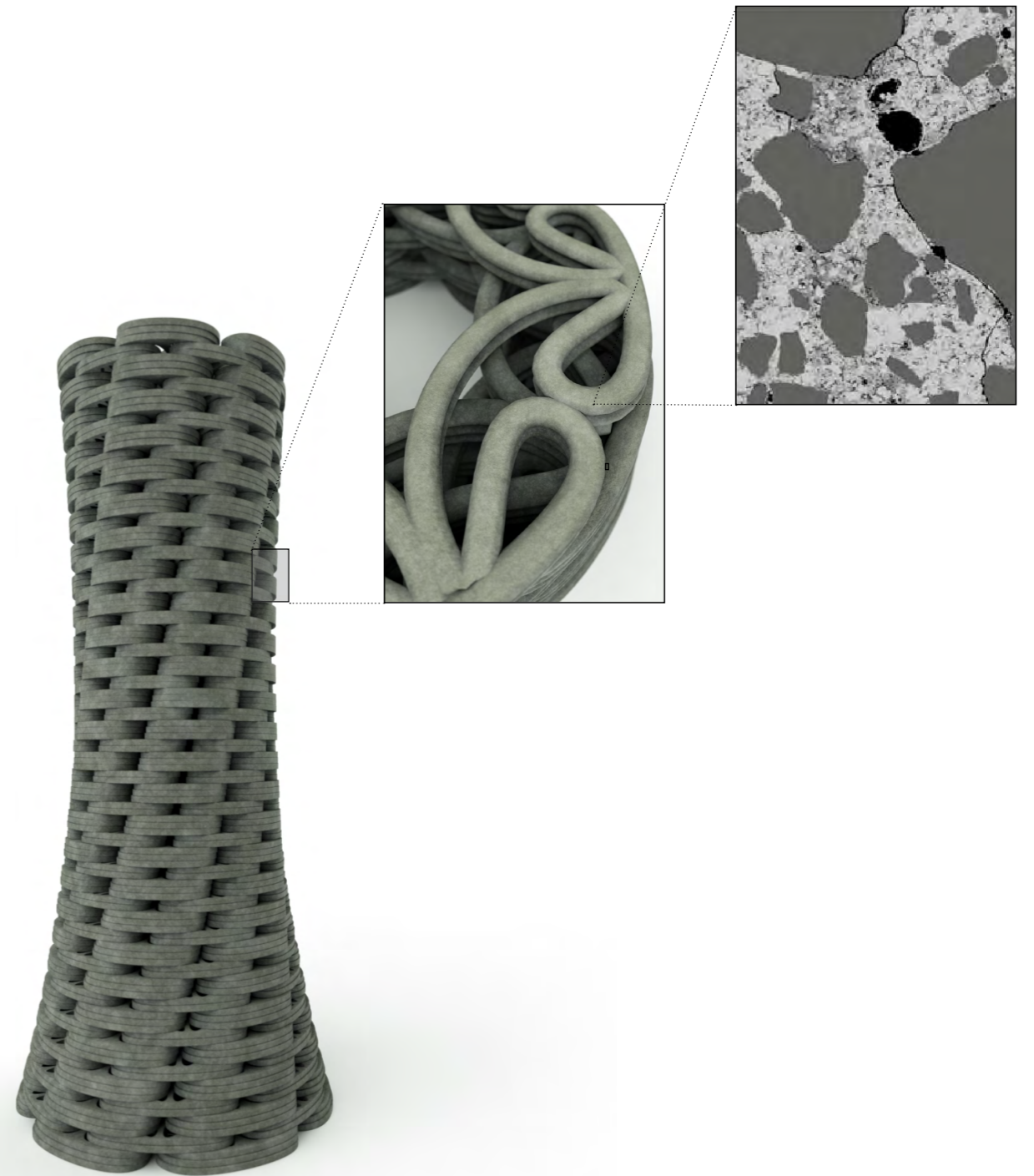


Tillämpat arbetsflöde i projektet



MACRO-SCALE
 $10^0 <$

MICRO-SCALE
 μm



MACRO-SCALE
 $10^0 <$

MESO-SCALE
 $10^{-2} - 10^0\text{m}$

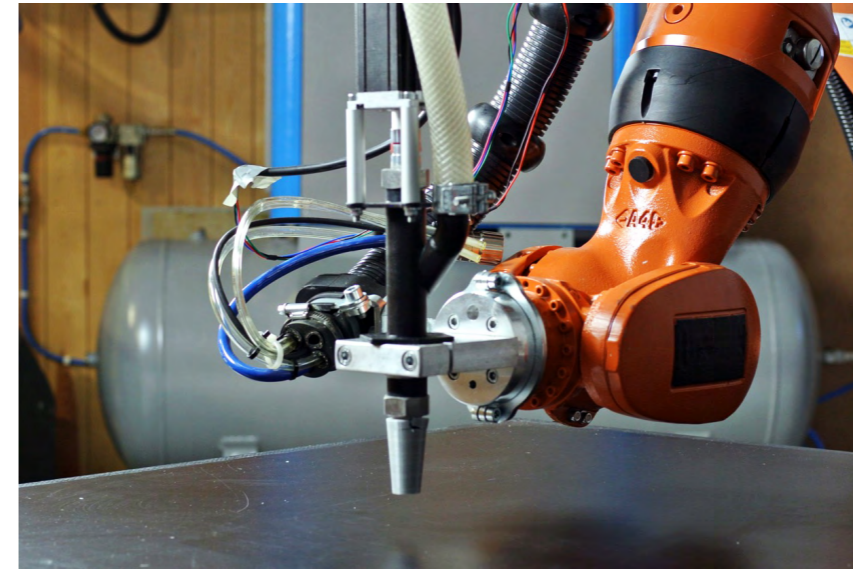
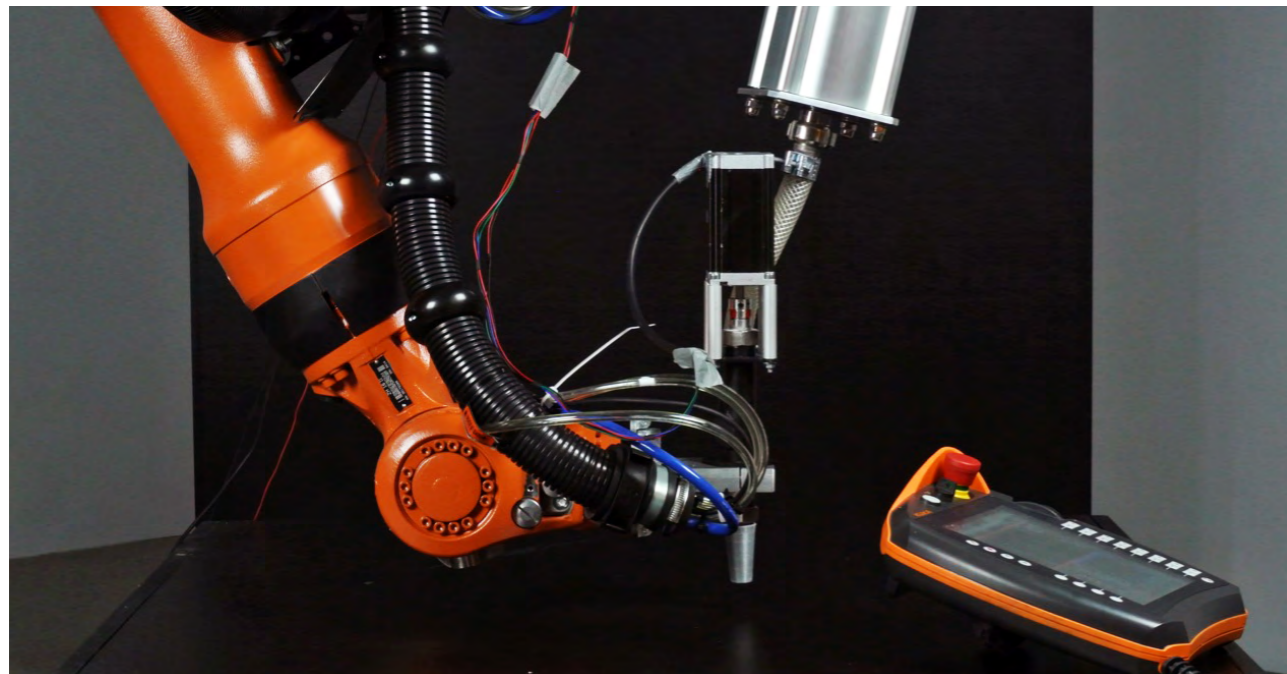
MICRO-SCALE
 μm

ROBOTSYSTEM

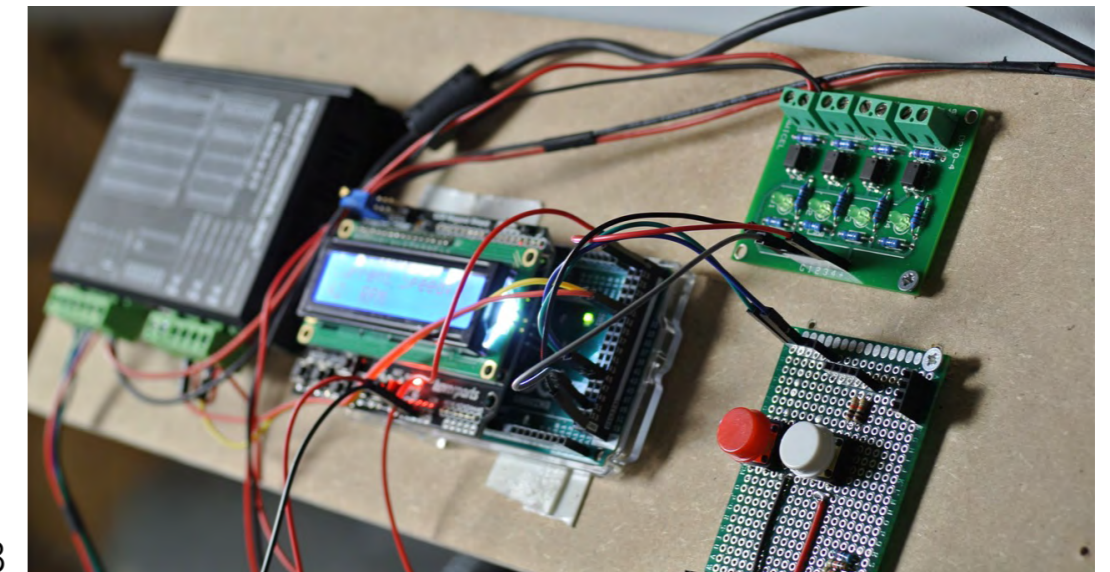
KTH Arkitekturskolan

Det robotstyrda 3D-printsystemet som används inom projektet består av tre komponenter: en industriell robotarm, ett specialbyggt deponeringsverktyg (munstycke) samt ett pumpsystem som förser munstycket med ett kontinuerligt flöde av material. Med denna anordning kan vi utföra småskaliga experiment med betong och andra trögflytande material såsom till exempel lera. Inom ramen av detta projekt har deponeringsverktyget förbättrats genom installationen av ett nytt munstycke med en digitalt styrd matarskruv. Med denna lösning kan flödet av material kontrolleras med hög precision och integrerad start och stop-funktion. För att kunna hantera mindre volymer material åt gången har vi också kopplat munstycket till en cylinderbehållare (5L) som förser munstycket med material med hjälp av tryckluft. Detta har gjorts för att effektivisera arbetet och för att slippa rengöra den stora pumpen vid varje försök.

01



02



03



04

Fig. 01
Robotstyrt 3D-printsystemet, KTH
Arkitekturskolan.

Fig. 02
Nytt deponeringsverktyg kopplat till 6-axlad
robotarm.

Fig. 03
Styrenhet och display.

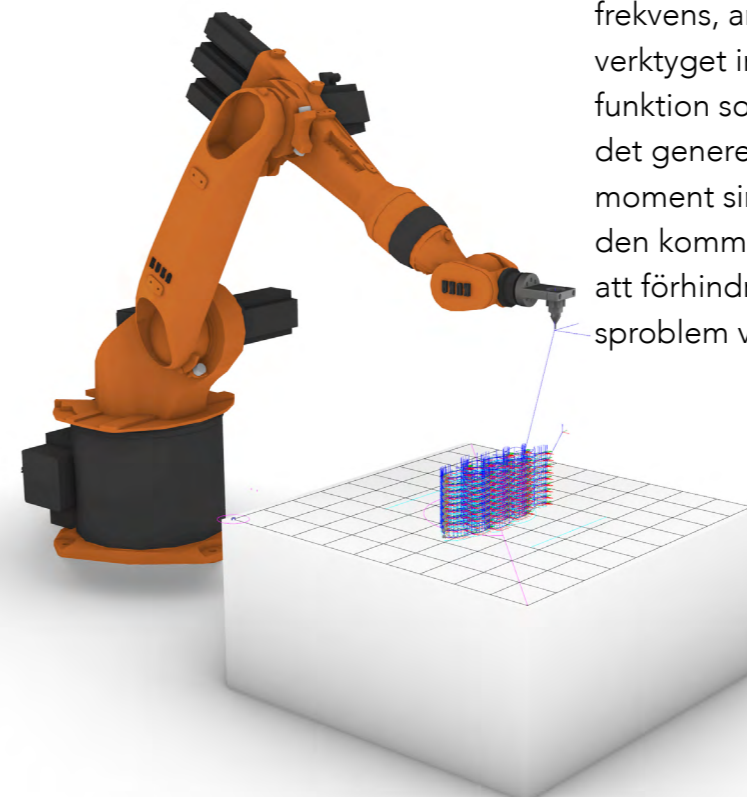
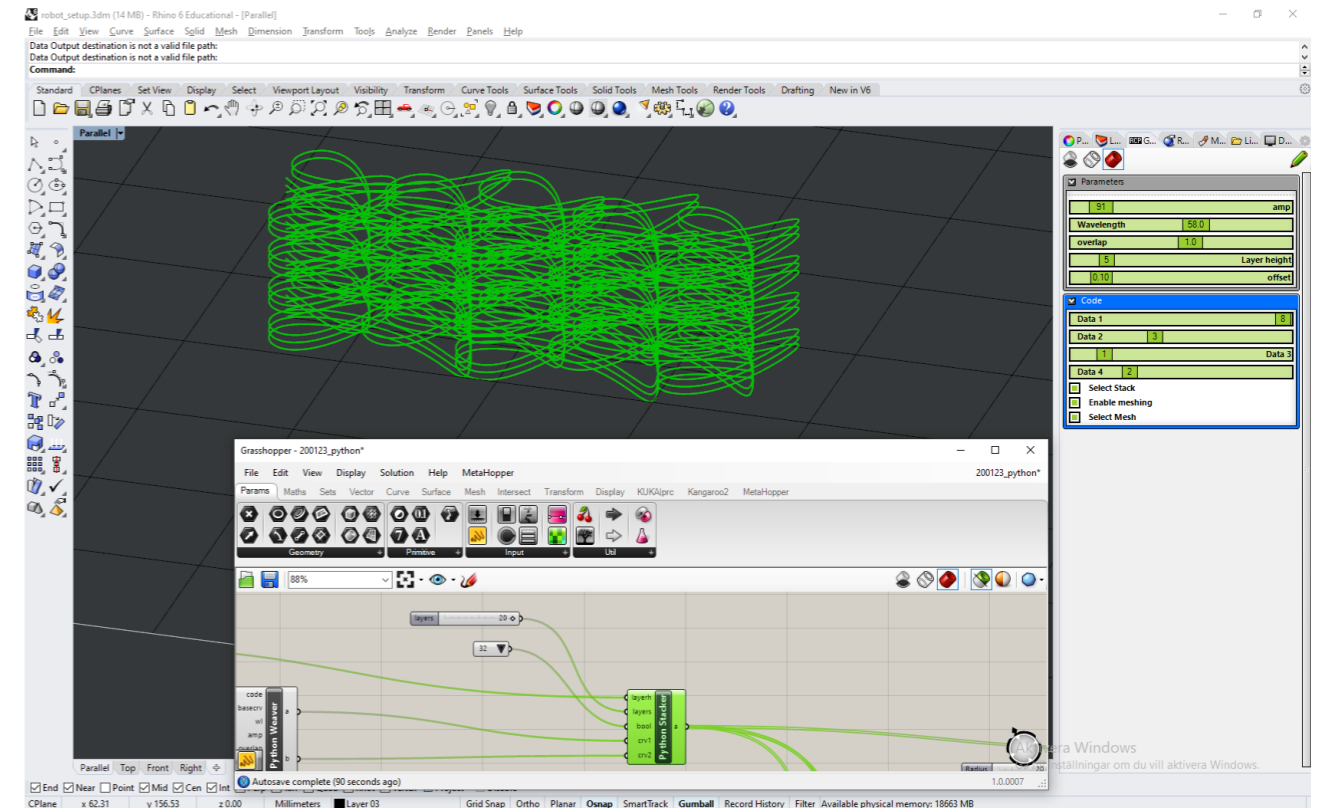
Fig. 04
Nytt deponeringsverktyg från WASP.

DIGITALT DESIGNVERKTYG

Fas I: Arbetsflöde

I den typiska tillämpningen av 3D-printning tillverkas en digital modell genom stegvis uppbyggnad av material i lager-på-lager. Till följd av den additiva processen är detaljnivån därför begränsad av dimensionen på det extruderade materialet och tjockleken av de deponerade lagren. I den ursprungliga användningen av 3D-printning för att framställa småskaliga objekt så blir den staplade strukturen endast nämvärt märkbar då tjockleken på materialet är i skalan av mikroner. När 3D-printtekniken anpassas för betong och skalas upp till byggnadskonstruktion blir dock de skiktade lagren en ofrånkomlig aspekt av det slutliga resultatet. Ansatser att överkomma denna till synes ofrånkomliga sidoeffekt och åstadkomma släta betongytor har resulterat i lösningar såsom att installera en spatel vid munstycket eller efterbearbetning genom att applicera ett lager av murbruk. I detta projekt har vi utvecklat designmetod som istället omvandlar denna nackdel till en fördel genom att utnyttja den stegvisa uppbyggnadsprocessen för att skapa intrikata yttexturer med unika taktila kvalitéer.

Istället för att använda en konventionel programvara, som omvandlar en 3D-modell till maskininstruktioner genom att generera staplade konturlinjer enligt en specifierad lagertjocklek, så introducerar vårt specialutvecklade programverktyg fler valmöjligheter när det gäller programmeringen av de robotbanor som styr materialets placering. Genom introduktionen av lokala rörelsemönster i robotbanan frångår vi den enkla lager-på-lagerprincipen till förmån för avancerade designmönster och materialstrukturer med inbyggda arkitektoniska och funktionella kvalitéer.



- (I) Olika rörelsemönster kan programmeras med hjälp av det digitala verktyget som är utvecklat för Rhino 3D-modelleringsmiljö.
- (II) Ett tredimensionellt mönster skapas och anpassas med hjälp av inställningar så som frekvens, amplitud och tjocklek.
- (III) Det digitala verktyget innehåller också en förhandsvisningsfunktion som gör att det är möjligt att granska det genererade mönstret.
- (IV) Som ett sista moment simuleras robotens rörelser under den kommande tillverkningsprocessen för att förhindra felmeddelanden och styrningproblem vid körning.

KATALOG MED LINJETYPER

Fas I, Steg I

Istället för att stapla konturlinjer som är automatiskt genererade och normalt sätt utanför designerns räckvidd föreslår vi att introduktionen av lokala rörelsemönster kan skapa hittills outforskade materialeffekter bortom den enkla lager-på-lager principen som blivit synonym med 3D-printing. Som ett första steg har vi därför utvecklat ett datorskript för att generera alternativa linjetyper som kan appliceras i det föreslagna arbetsflödet. Dessa linjetyper kan liknas med olika stygn som appliceras inom stickning av textilier. Inom ramen av projektet kallar vi dem därför 'stitches'. Det specialskrivna datorskriptet innehåller följande steg:

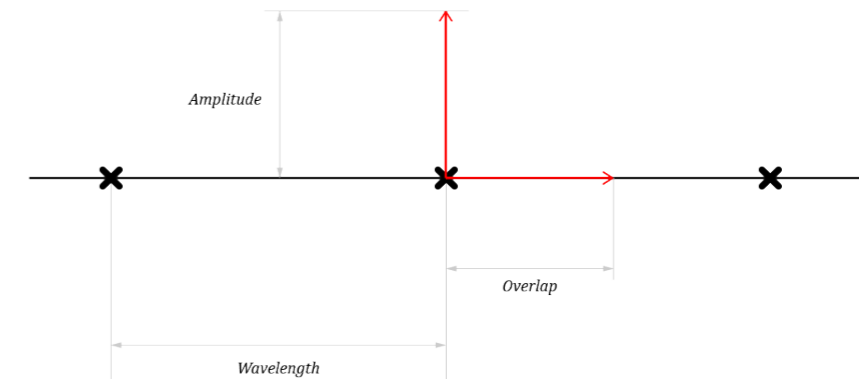
[I] En linje delas upp i kontrollpunkter enligt angiven våglängd och amplitud.

[II] Ett sekundärt rutnät med nio numrerade kontrollpunkter introduceras vid varje kontrollpunkt.

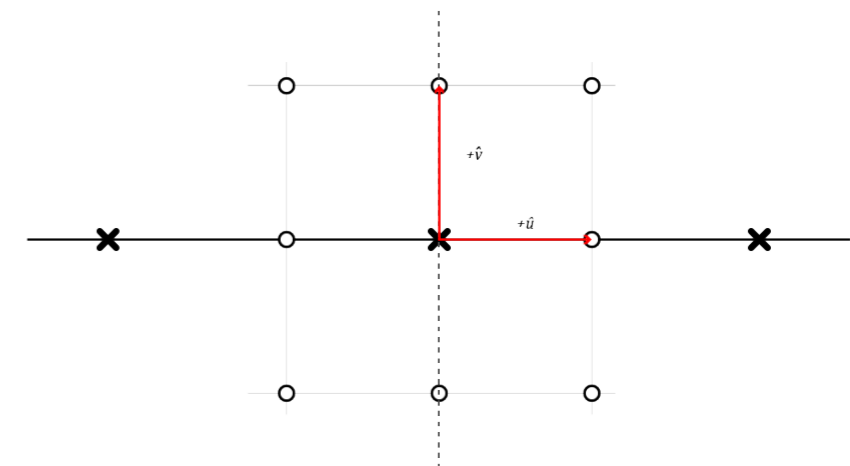
[III] Linjen rekonstrueras genom att specificera nya kontrollpunkter i angiven sekvens.

Baserat på hur många kontrollpunkter som specificeras kan datorskriptet generera alla tänkbara kombinationer. Två kontrollpunkter per punkt (9x9) resulterar i 81 möjliga linjetyper medans tre kontrollpunkter (9x9x9) resulterar i 729 möjliga kombinationer. Fyra kontrollpunkter ger 6051 möjliga linjetyper vilka har sammanställts i en katalog. Alla linjetyper identifieras och appliceras i designverktyget med en fysisiffrig kod.

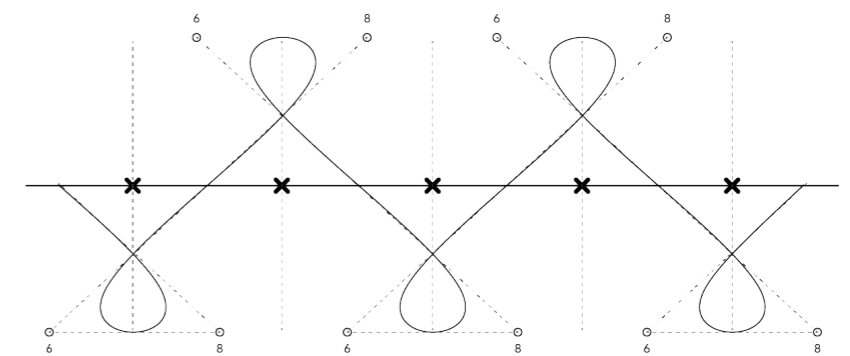
[I]

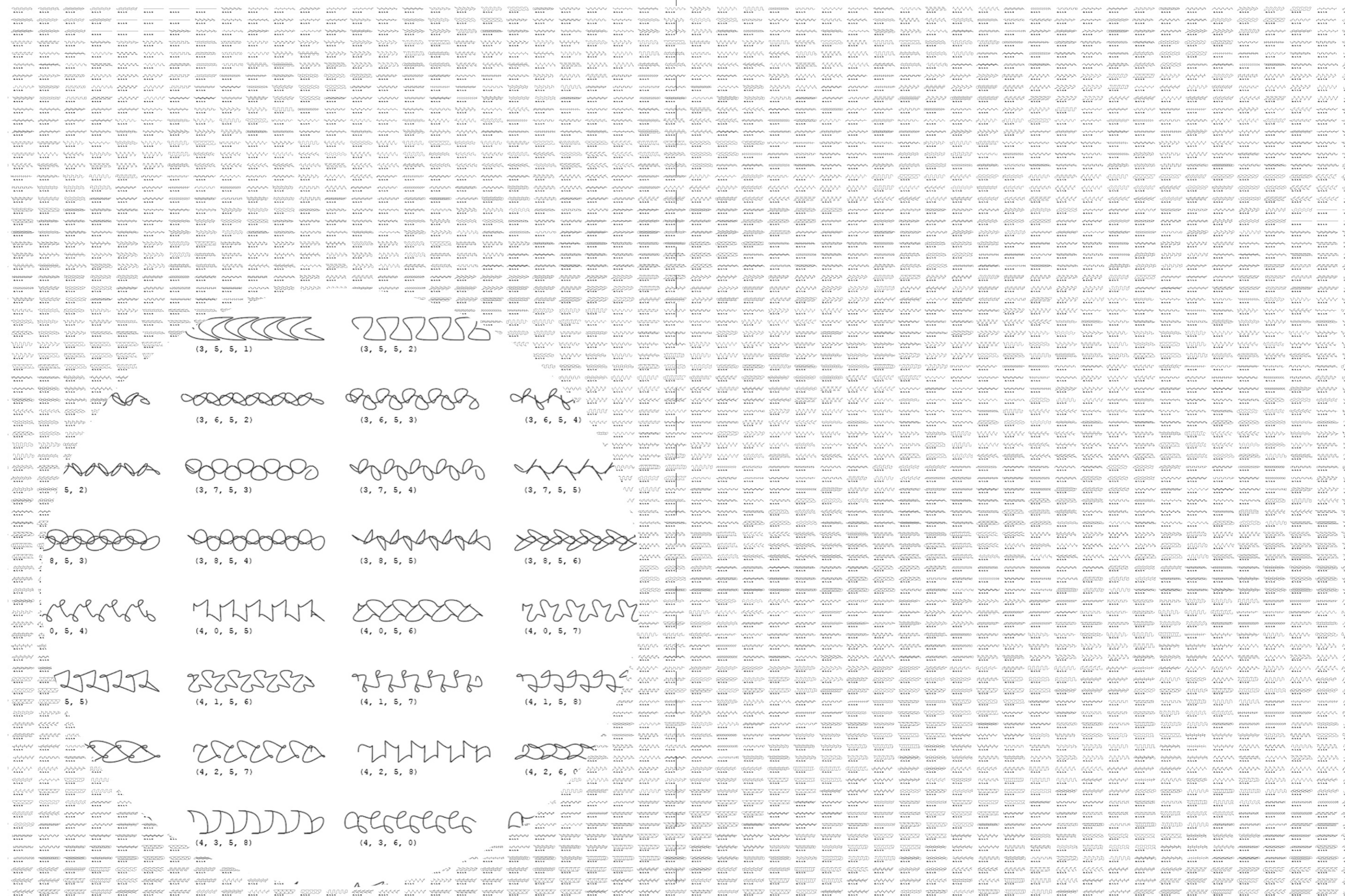


[II]



[III]





MATERIALSTRUKTURER

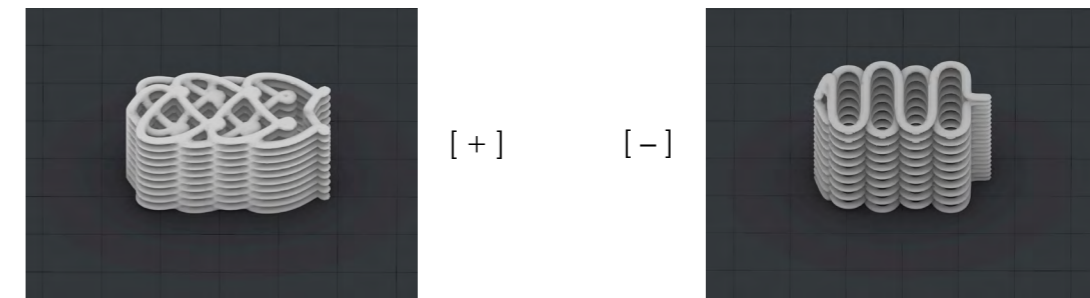
Fas I, Steg II

Aggregeringen av 'stitches' skapar tredimensionella rörelsemönster som kan appliceras och anpassas för att producera en bestämd geometri. Med detta tillvägagångssätt kan den additiva processen frambringa komplexa materialstrukturer på materialets meso-skala i tillverkningsstadiet som annars ligger utom räckhåll för digitala modelleringsmetoder. I projektets nästa fas definieras en simpel geometri som testobjekt för att utforska variationen av möjliga resultat inom ramen av ett standardobjekt.

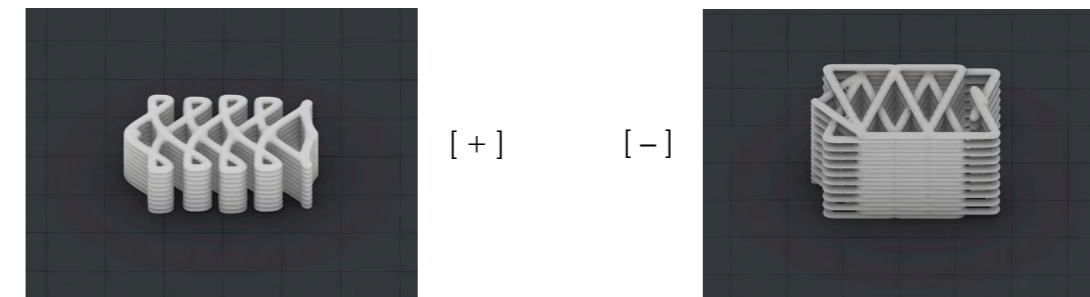
Testobjektet är jämförbart med vad inom stickning kallas en 'swatch' dvs en sekvens av stygn som utgör ett mönsterprov. Detta format är idealt för att utvärdera karaktären och kvalitéer hos materialstrukturer som framställs från olika linjetyper. En serie prototyper tillverkades i skala 1:4 i lera med syfte att utforska den stora variationsrikedomen till följd av olika rörelsemönster. Utifrån detta underlag har vi identifierat följande tillämpningsområden som speciellt intressanta att utveckla vidare.



POROSITET – Genom olika stapelscheman kan mönster skapa ofyllda partier som vore helt omöjligt att uppnå med gjuten betong.



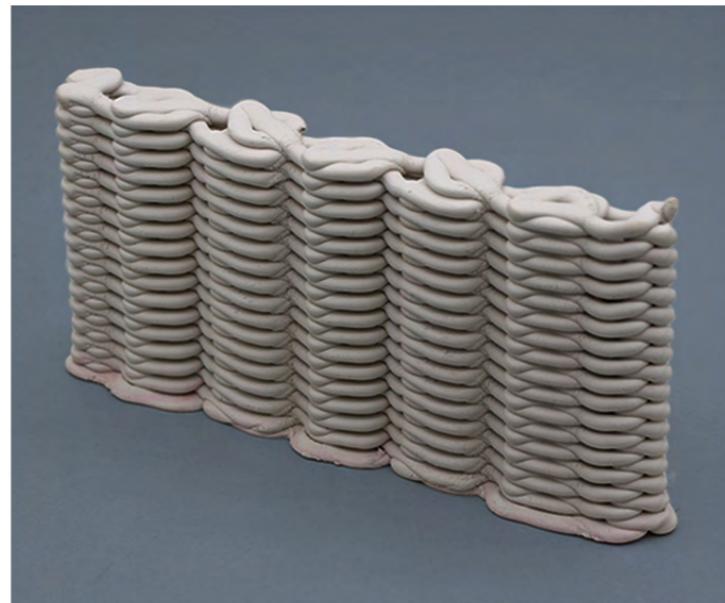
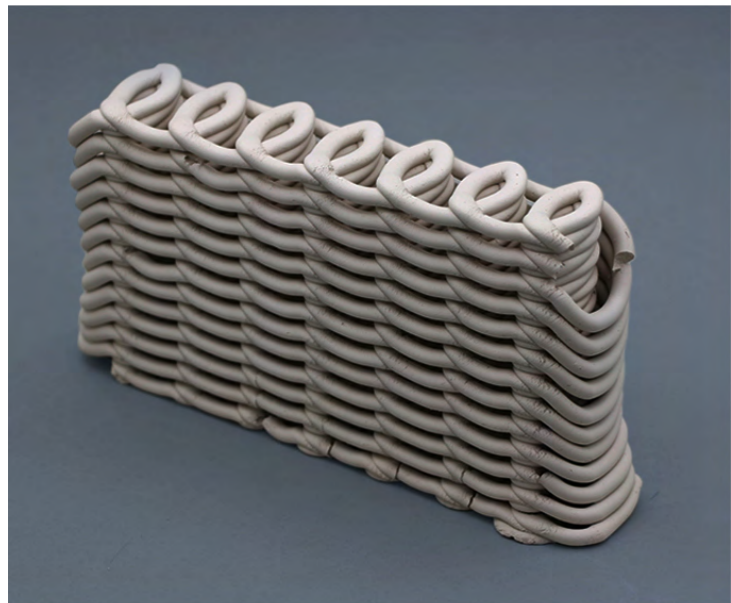
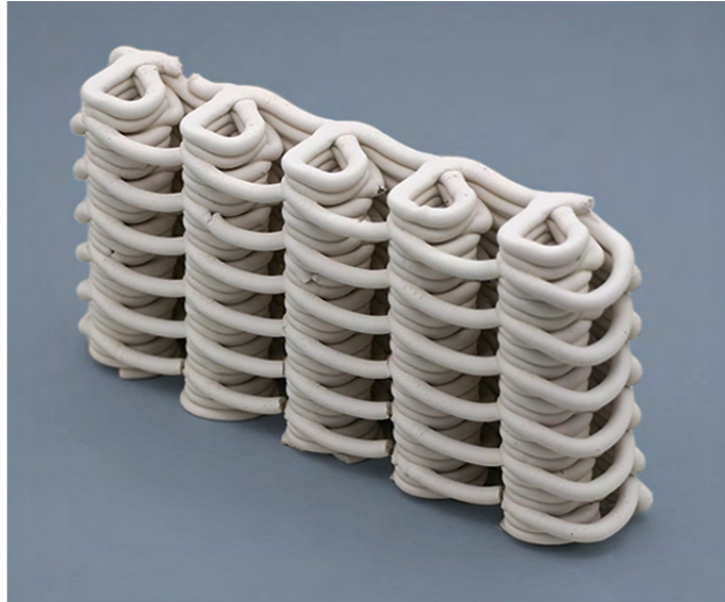
DENSITET – Olika mönster resulterar i specifika materialdensitet som kan anpassas för att optimera användningen av material enligt belastningskrav.



YTAREA – Betongytor med stor area kan tillämpas för att maximera materialets termiska kapacitet.



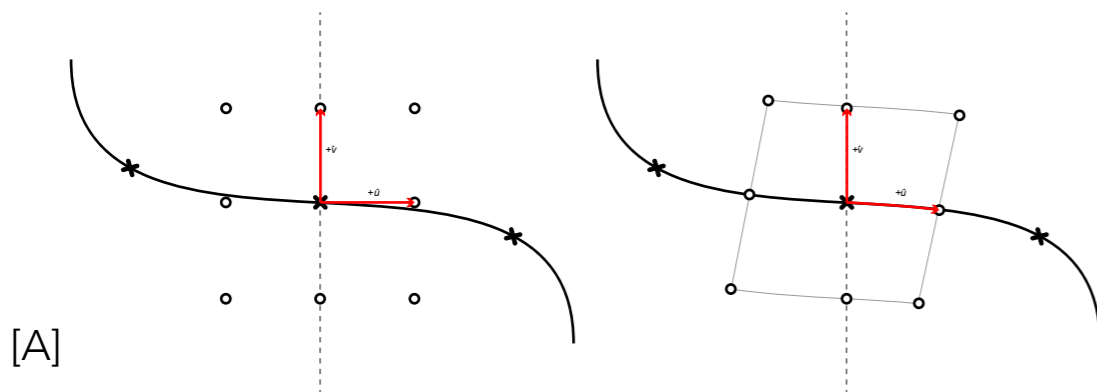
RELIEF – Yttexturer med intrikat relief kan tillämpas för ljuddämpande effekt och termodynamiska egenskaper.



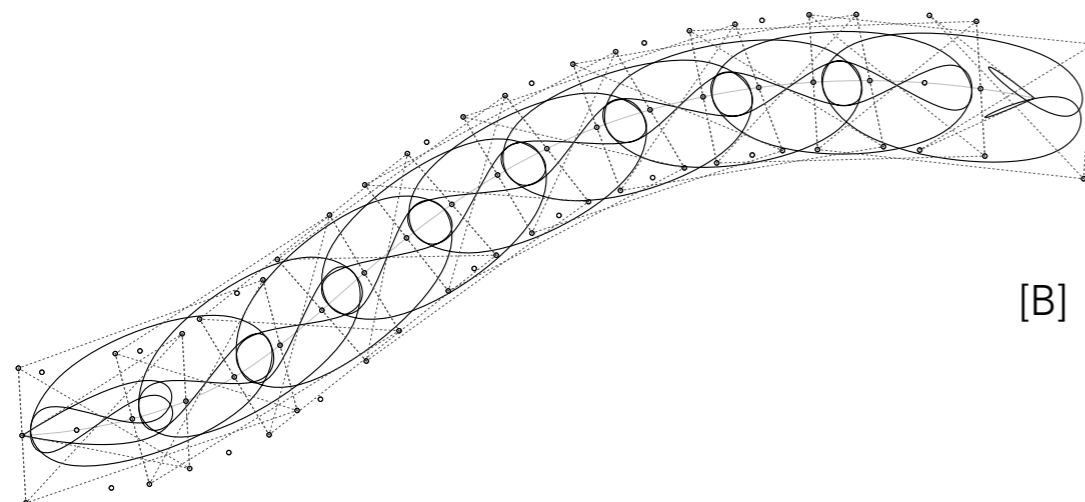
DIGITALT DESIGNVERKTYG

Fas II: Applicering på icke-plan yta

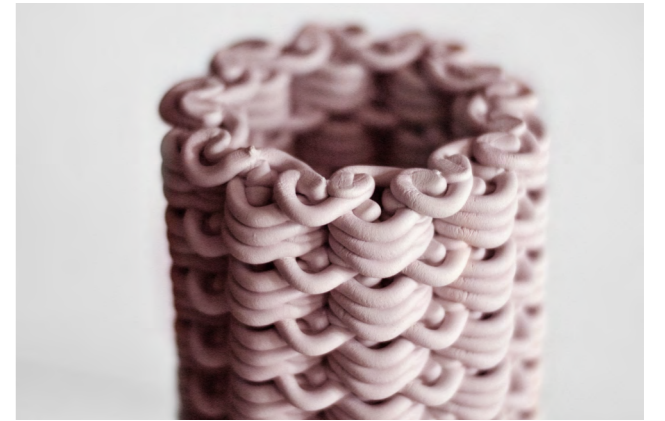
I projektets nästa steg applicerades utvalda mönster på en pelarform för att anpassas till icke-plana ytor (figur 01-03). Detta åstadkoms med en förbättring av datorskriptet genom att förskjuta koordinaterna vid varje kontrollpunkt för att följa kurvaturen på baslinjen (figur A). Uppkomsten av fogar (eller sömmar) undviks genom att interpolera kontrollpunkterna med en kontinuerlig bana som resulterar i en jämn yta (figur B). Med denna förbättring av designverktyget kan mönster appliceras på ytor med valfria kurvaturer.



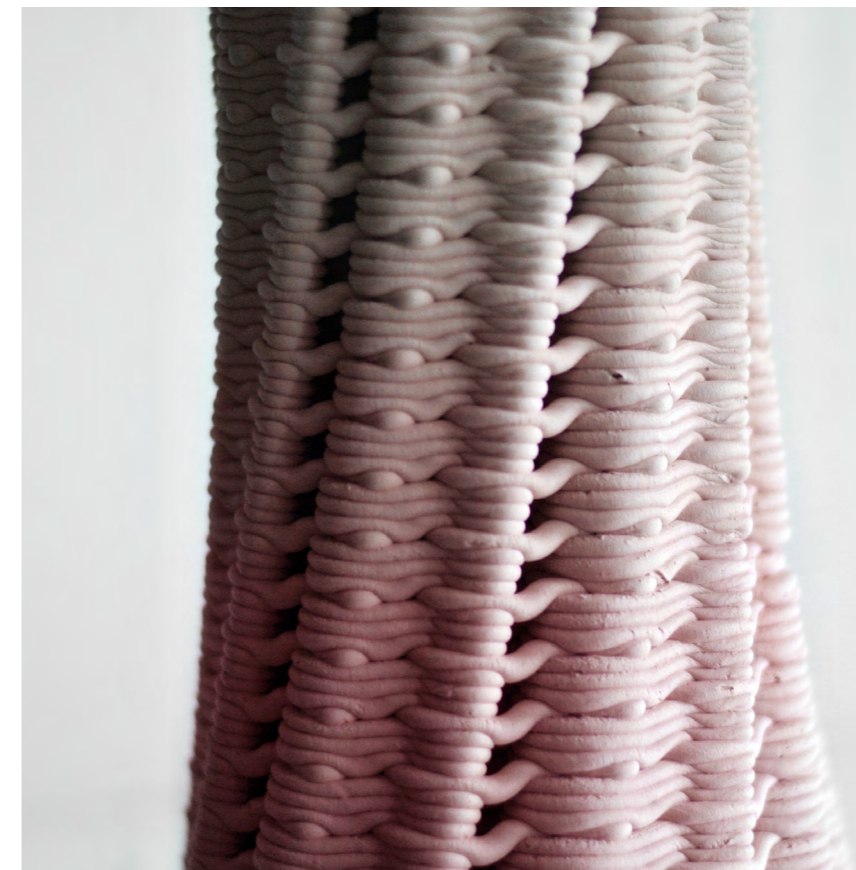
[A]



[B]



01



02



03



WORKSHOP

Liljewall arkitekter 2020-03-05

Onsdagen den 5e mars höll vi en workshop på Liljewall arkitektkontor i Stockholm på temat "3D-printad betongs möjligheter och begränsningar". Efter en genomgång av projektet så diskuterades ämnet med följande medverkande: Leif Blomkvist, Alexander Gösta, Harald Gamrell från Liljewall arkitekter, samt konstruktör Egil Bartos från Ramboll.

Diskussionen handlade bland annat om teknikens fördelar jämfört med gjuten betong och hur dessa fördelar bäst kan nyttjas för arkitektoniska ändamål. För att tekniken ska kunna etableras som byggmetod så måste applikationerna visa på nytta som inte kan uppnås med existerande gjutmetoder. Medverkande konstruktör ifrån Ramboll bidrog med värdefulla inblickar i utmaningarna med att applicera existerande strukturella beräkningsmodeller och simuleringsmetoder på 3D-printad betong. Bland intressanta applikationer att utveckla vidare nämndes fasadelement och porösa konstruktioner samt grafisk betong.



DIGITALT DESIGNVERKTYG

Fas III: Utökade designfunktioner

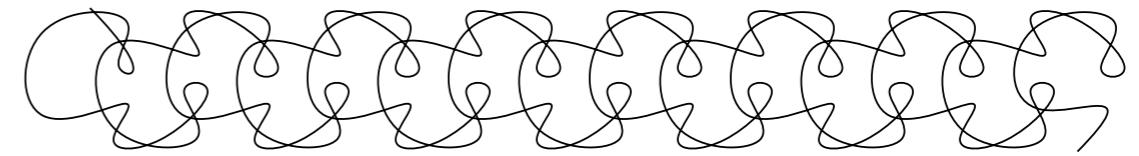
I projektets tredje och sista fas fokuserades arbetet på att utöka möjliga kombinationer av linjetyper i samma mönster. Då mönster hittills genererats baserat på repetitioner och variationer av en linjetyp per mönster så krävde denna avancering av designverktyget ett flertal förbättringar av datorskriptet. Varje förbättring är kompatibel med existerande valbara parametrar som redan existerar i verktyget såsom specificering av amplitud, frekvens etc. Följande förbättringar har integrerats i senaste versionen av verktyget:

[I] Generera stygn med fler än fyra kontrollpunkter som tidigare varit en begränsning. Exempel på stygn är baserat på 8 kontrollpunkter.

[II] Möjligheten att helt skräddarsy stygn inom givet koordinatsystem.

[III] Övergång mellan ett stygn till ett annat genom att interpolera genomsnittliga kontrollpunkter.

[IV] Möjligheten att kombinera två eller flera stygn i en sekvens på samma rad för att skräddarsy en linjetyp.



[I]



[II]



[III]



[IV]

FRAMTIDA FORSKNING

Det digitala designverktyget och framstegen som hittills gjorts inom projektet har presenterades vid andra upplagan av konferensen Digital Concrete som organiserades av RILEM och TU Eindhoven i juli 2020. Artikeln 'Knitting Concrete' har vidare inkluderas i publikationen från konferensen. Arbetet inom projektet har vidare lett till ett bredare samarbete med representanter ifrån byggindustrin som resulterat i ett fortsatt tvåårigt forskningsprojekt som finansieras av Svenska byggbranschens utvecklingsfond och Smart Built Environment (Formas). Projektet med titeln Digital Concrete - Integrating design and manufacturing beräknas starta i december 2020 som ett samarbete mellan KTH Arkitekturskolan, KTH Byggvetenskap, NCC, Rise, Ramboll och KTH Industriell produktion. Följande forskare kommer att medverka i projektet:

Helena Westerlind, arkitekt och doktorand på KTH Arkitekturskolan.

José Hernández, arkitekt och programmerare. Forskare på KTH Arkitekturskolan.

Johan L Silfwerbrand, Professor inom betongkonstruktion och prefekt på KTH Byggvetenskap.

Staffan Hintze, chef för forskning och utveckling NCC.

Wolfram Oettel, forskare inom betongmaterial, RISE.

Egil Bartos, Byggnadskonstruktör och FEM-expert, Ramboll.

Xi Vincent Wang, forskare och biträdande lektor, KTH Industriell produktion.





Ett stort tack till LBF Leif Blomkvist forskningsstiftelse!