

3D-UTSKRIFTER AV ATTEFALLSHUS

Praktiska tester



Tobias v. Haslingen, ConcretePrint
Henrik Ahlberg, ConcretePrint
Mats Emborg, Betongindustri / LTU
Jonas Carlswärd, Betongindustri

2022-01-18

FÖRORD

Föreliggande rapport redovisar resultatet av projektet **3D-utskrifter av Attefallshus – praktiska tester**. Arbetet har utförts under 2020-08-15 till 2021-12-22 och har till stor del varit finansierat med medel från Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF).

Betongindustri har ansvarat för projektet med Tekn. dr. Jonas Carlswärd som sökande och som projektledare. Operativt har projektet drivits av Tobias v. Haslingen, ConcretePrint, som tillika är huvudförfattare av rapporten.

Ett stort tack riktas till SBUF för finansiellt stöd samt till Betongindustri, dels för bidrag under ansökningsprocessen, dels för engagemang och givande diskussioner och stöd – särskilt i projektets inledning. Betongindustri har även bistått med betong och annat ingående material för projektets räkning, upplåtelse av mark för byggande av hus, utrustning o. dyl. samt för olika transporter

Förutom ovannämnda har följande personer medverkat i arbetsgrupp och styrgrupp för projektet till vilka ett stort tack riktas:

Arbetsgrupp:

- Civ.ing. Per Berglund, VD Betongindustri
- Prof. Mats Emborg Betongindustri / Luleå Tekniska Universitet
- Christoffer Bruntesson, Betongindustri
- Ing. Nabil Tawbik, Betongindustri
- Wolfram Oettel, Processteknik
- Henrik Ahlberg, ConcretePrint
- LIA-praktikanter, Yrkeshögskolan xenter
 - Freddie Wolf,
 - Joel Norrman,
 - Tim Hellberg,
 - Carl Trägårdh,
 - Gustaf Hedlind,
 - Alberto Araya,
 - Simon Bwomono

Styrgrupp:

- Prof. Johan Silfwerbrand, KTH Betongbyggnad
- Rickard Alinei, LINK Arkitektur
- Lars Albinsson, Magesto, Bygg 4.0
- Allan Rasmussen, JM
- Lars Sunesson Tyresö Betong och Bygg
- Joakim Jeppsson, Skanska
- Tekn.dr. Helena Westerlind, KTH
- Jose Hernandez, KTH
- Jan Hillgård, Strategic Advisor
- Claes Dalman, PEAB
- Torbjörn Glad, JM
- Michael Oldenburg, Arbrå Concrete

Ett stort tack riktas även till övriga företag och institutioner som hjälpt till i projektet: JM, PEAB, Tyresö Betong, Arbrå Concrete, Link Arkitekter, Magesto, KTH, ProcessTeknik, EPS Cement, Bo Willes byggmaskiner, Maltech, Weber, Deventus, MasterBuilder Solutions

ConcretePrint skulle aldrig kunna driva denna inslagna utvecklingsresa utan det Jubileumsstipendium som Tobias v. Haslingen fick av Stockholms Byggnadsförening 2019. En djup tacksamhet riktas därför till VD Ruben Aronsson, styrelsens ordförande, Jubileumsstipendiets kommitté och medlemmarna i Stockholms Byggnadsförening.

Januari 2022,

Tobias von Haslingen, ConcretePrint

SAMMANFATTNING

Denna rapport sammanfattar förberedelserna och arbetet med att genomföra en 3D-utskrift av ett 24 kvm stort Attefallshus. ConcretePrint, ett startup-företag som arbetar för automatiserat byggande, kunde uppföra Sveriges första 3D-printade hus. Attefallshuset, som finns på Betongindustris område i Tumba, stod klart den 17 juni 2021 och har plats för kök, sovrum, hall samt badrum med en rund dusch och WC.

Arbetet inom projektet har bland annat bestått av att justera betongmaterialet för de omständigheter som lämpar sig för denna typ av 3D-utskrivning. Svårigheten är att betongen skall vara pumpbar och ha goda flytegenskaper för att kunna extruderas och samtidigt en relativt snabb tillstyvnad för att betongen skall vara byggbar, dvs den måste kunna bära last från nästkommande lager utan att deformeras. Betongprovnigen resulterade i en sammansättning som hade de rätta egenskaperna och som sedermera användes vid 3D-printingen av Attefallshuset.

Parallellt med materialutvecklingen genomfördes arbete för att utveckla utrustningen och utveckla metoden för att överföra byggbara objekt från CAD-ritningar till styrning av 3D-skrivaren. Inom projektet genomfördes studier av hur olika väggkonstruktioner kan skrivas ut och hur de stödjer montering och tekniska installationer. Vidare undersöktes hur 3D-utskrivna väggar kan isoleras. Vid utskriften av Attefallshuset valdes slutligen att skriva ut en in- respektive utvändig väggskiva med tjockleken 50 mm. Utrymmet emellan väggskivorna fylldes i ett senare skede med installationer och isolering.

Förberedelser och anpassningar har även gjorts i samband med utskriften för att enkelt kunna installera bland annat el, vatten, värme och ventilation.

Arbetet som har utförts inom projektet visar att det är praktiskt möjligt att redan idag 3D-printa hus. Det bedöms att en hel del utvecklingsarbete givetvis återstår innan det går att skriva ut betonghus i kommersiell skala.

Slutsats

Teknikutvecklingen bör fortsätta. Nästa steg är att skriva ut en eller två plans villa på 150 – 200 kvm. Ett projekt för att ytterligare verifiera tekniken, studera konstruktion och design möjligheter tillsammans med den heldigitala arbetes processen,

Robotiserat byggande ger en rad fördelar som bland annat lägre kostnader, kortare byggtid, bättre säkerhet för personalen, färre transporter till och från byggplatsen och minimalt med byggfel.

Mycket teknikutveckling återstår för att denna teknik skall bli så effektiv och ha den kvalité som ConcretePrint beskriver i sin vision. ”Det skall bara vara att måla väggarna och montera de tekniska installationerna och installera kök och skapa badrum” för att ett hus skall vara färdigt.

Idag finns ingen leverantör av 3D-utskriftteknik som ännu har klarat av att nå den visionen enligt författarnas vetskap.

ConcretePrint består av ett team som menar att man kommer att kunna lyckas att uppnå visionen inom några år.

Ett visionärt mål skulle kunna vara - Från första spadtag till inflyttningsbar villa på 30 dagar

INNEHÅLL

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INLEDNING | 5 |
| 1.1 | MOTIV TILL PROJEKTET | 6 |
| 1.2 | SYFTE OCH MÅL | 7 |
| 1.3 | NYTTAN MED PROJEKTET | 7 |
| 1.4 | METODIK | 8 |
| 1.5 | RAPPORTENS INNEHÅLL | 8 |
| 1.6 | ORDFÖRKLARING | 9 |
| 2 | BAKGRUND | 10 |
| 2.1 | PROBLEMBILD OCH EN LÖSNING | 10 |
| 2.2 | 3D CONSTRUCTION PRINTING, 3DCP | 11 |
| 2.3 | 3D-SKRIVARE | 16 |
| 2.4 | CONCRETEPRINT: ETABLERING OCH FRAMTID | 17 |
| 2.5 | ENERGIEFFEKTIVISERING, HÅLLBARHET | 18 |
| 2.6 | 3D-UTSKRIVBARA MATERIAL | 19 |
| 2.7 | VISION, FRIFORMSARKITEKTUR | 19 |
| 2.8 | FÖRUTSÄTTNINGAR FÖR EFFEKTIVA 3D-UTSKRIFTER | 19 |
| 2.8.1 | <i>Designprocess</i> | 20 |
| 2.8.2 | <i>Materialhanteringsprocess</i> | 21 |
| 2.8.3 | <i>Kvalité</i> | 22 |
| 2.8.4 | <i>Väggjocklek</i> | 24 |
| 2.8.5 | <i>Lagerskift</i> | 25 |
| 2.8.6 | <i>Ifyllnadsmönster och densitet</i> | 25 |
| 3 | PRAKTISKT ARBETE | 27 |
| 3.1 | BETONGBLANDNING | 27 |
| 3.2 | MJUKVARUFÖRUTSÄTTNINGAR FÖR 3D-UTSKRIFT | 30 |
| 3.3 | UTSKRIFT AV OLIKA TYPER AV VÄGGKONSTRUKTIONER | 31 |
| 3.4 | ISOLERING OCH INSTALLATIONER | 33 |
| 3.4.1 | <i>Isolering</i> | 33 |
| 3.4.2 | <i>Montering av dörrar och fönster</i> | 34 |
| 3.4.3 | <i>Installationsmontage</i> | 36 |
| 3.4.4 | <i>Montering av vattenrör för olika köks- och badrumsinstallationer</i> | 37 |
| 3.4.5 | <i>Montering av el via el-dosor för tex strömbrytare</i> | 38 |
| 3.5 | 3D-UTSKRIFT AV ATTEFALLSHUS | 40 |
| 4 | RESULTAT | 49 |
| 4.1 | BETONGMATERIALET | 49 |
| 4.2 | ISOLERING | 49 |
| 4.3 | FÖNSTER/DÖRRAR | 50 |
| 4.4 | VATTEN | 50 |
| 4.5 | EL | 50 |
| 4.6 | KRYMPNING EN UTMANING | 50 |
| 5 | SLUTSATS | 51 |
| 5.1 | TRANSFORMATION I BYGGBRANSCHEN | 52 |
| 5.2 | FRAMTID | 53 |

| | | |
|----------|-------------------------|-----------|
| 6 | REFERENSER | 55 |
| 7 | BILAGOR | 59 |

1 INLEDNING

Att skriva ut artefakter med 3D-skrivare är en teknik som funnits sedan flera decennier. Tekniken kring 3D-utskriften börjar 1981 med en patentansökan från Dr. Heido Kodama för en rapidprototype apparat. 1984 söker Jean-Claude André, Olivier de Witte och Alain le Méhauté om patent för en rapidprototype apparat. Det första patentet inom additiv manufacturing, 3D-utskriften kommer från Charles "Chuck" Hull 1986 [1]. Olika teknologier utvecklades [2] [3][4]:

1. Stereolithography (SLA)
2. Digital Light Processing (DLP)
3. Fused Deposition Modeling (FDM) eller FFF (Fused Filament Fabrication)
4. CFF (Continuous Filament Fabrication)
5. ADAM (Atomic Diffusion Additive Manufacturing)
6. Selective Laser Sintering (SLS) och Direct Metal Laser Sintering (DMLS)
7. Selective Laser Melting (SLM)
8. Electronic Beam Melting (EBM)
9. Material Jetting (MJ)
10. Drop on Demand (DOD)
11. Sand Binder Jetting
12. Laminated Object Manufacturing (LOM)

Idag kategoriserar man de olika teknologierna enligt ISO standard se [5]

| Technology | Method |
|----------------------------|---|
| Material Extrusion | material is selectively dispensed through a nozzle or orifice |
| Vat Photopolymerization | a liquid photopolymer in a vat is selectively cured by light-activated polymerization |
| Material Jetting | droplets of build material are selectively deposited |
| Binder Jetting | a liquid bonding agent is selectively deposited to join powder materials |
| Powder Bed Fusion | thermal energy selectively fuses regions of a powder bed |
| Directed Energy Deposition | focused thermal energy is used to fuse materials by melting as they are being deposited |
| Sheet Lamination | sheets of material are bonded to form a part |

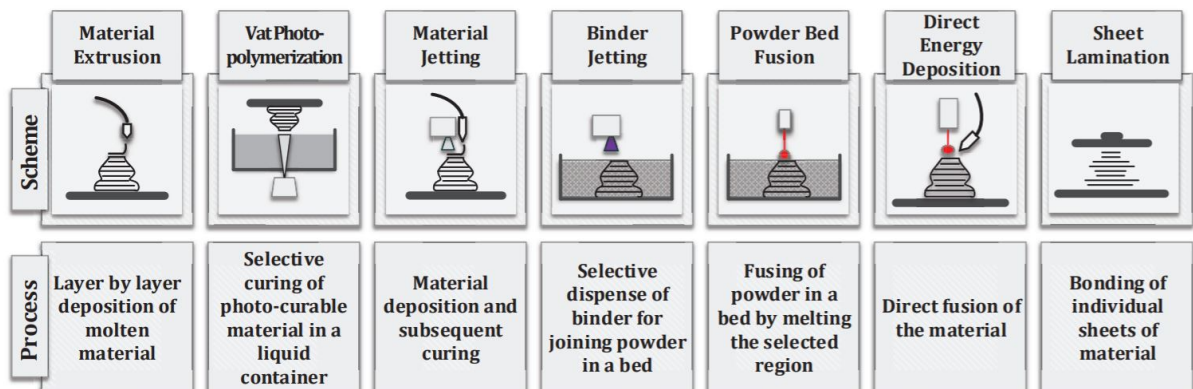


Bild 1, beskriver de olika ISO standarderna för 3D-utskriften [6]

Inom vissa områden har 3D-utskriftstekniken inneburit en makalös ändring av teknik för tillverkning av produkter med många gånger mycket komplicerade geometrier och designlösningar.

Metodikerna med 3D-utskriften har nu etablerat sig även inom byggbranschen. Möjligheterna till effektivitets- och kvalitetsvinster är stora och intresset börjar öka för ”det nya”.

Det har varit en tidsfråga innan 3D-utskriftstekniken nådde byggbranschen. Trots att denna bransch ofta anses vara konservativ och nära nog motsträvig mot ny teknik finns det nu således otaliga exempel på printade konstruktionsdelar och hela hus i flera våningar.

Många insatta personer i ämnet har en tro att massproducering av 3D-utskrivna byggnadsverk kan vara verklighet bara inom några år. Flera exempel på hela betongkonstruktioner och delar av sådana finns redan.

3D-skrivare och 3D-utskriften av betongstommar utvecklas nu med en rasande hastighet runt om i världen. Under senaste år har flera 3D-utskrivna hus med komplexa geometrier färdigställts och det kommersiella genombrottet kommer att ske nu och inom de närmaste åren, om det inte redan skett! Till exempel har i Nederländerna under våren 2021 en familj flyttat in i ett hus byggt av prefabricerade 3D-utskrivna byggnadskomponenter och i USA har det första 3D-utskrivna huset funnits till försäljning. En villa och ett flerfamiljshus med fem lägenheter har skrivits ut i Tyskland.

Sverige har 3D tekniken inom flera områden när det gäller byggnader finns nu i och med detta projekt, det första utskrivna huset, dessutom med 3D-utskrivna fönsterbågar till fönstren

1.1 Motiv till projektet

Även om byggnader har skrivits ut med lyckat resultat finns det ett antal frågor som bör adresseras, speciellt under de förhållanden som gäller i Sverige. Frågor kring teknikens robusthet har uppmärksamats internationellt. Tekniken är fortfarande relativt känslig vid utförandet. Den utskrivna betongens kvalitet är beroende av avvikelser i betongens reologi och av 3D-utskriftsutrustningen, det utskrivna objektets struktur och de förhållanden som gäller vid genomförandet. Till exempel har temperaturen en stark inverkan på reologin under gjutprocessen/3D-utskriftsprocessen. En intressant fråga är exempelvis vilken undre temperaturgräns som finns för olika sammansättningar av betong och hur den påverkas av utrustning och den struktur som ska färdigställas.

En betong kan fungera utmärkt i ett system, men om hastigheten eller munstyckets storlek ändras liksom gjutförhållande, är det inte säkert att samma betongblandning alls fungerar tillfredställande. Undersökningar har genomförts i Sverige där framför allt bruk har optimerats för 3D-printing men ett viktigt hinder för tekniken är att i dagsläget saknas en allmänt tillgänglig betong för 3D-utskriften i landet

Krav måste ställas på betongen med tanke på geometri och utformning av väggkonstruktioner möjliggörande installationer som vatten, el, mm samt infästningar av fönster och dörrar etc.

Vidare finns en utmaning att ha en tillräcklig flexibilitet vid själva skrivmomentet då material, förhållande, hårdvara (dvs. utrustningen) och mjukvara (styrningen av munstycket) är tätt sammanlänkade och måste vara synkroniserade gentemot varandra under hela processen.

Sammanfattningsvis motiveras projektet att, genom att tekniken att printa betong är relativt oöversedd i Sverige, har vi begränsad praktisk insikt om dess möjligheter för våra förhållanden.

1.2 Syfte och mål

Projektet ”3D-utskrifter av Attefallshus - praktiska tester” skall ses i ett större sammanhang och som ett steg i utvecklandet av kunskap och teknik för att skriva ut större strukturer som hus och radhus och kan ses som en del i ett kommande satsningar.

Syfte med projektet är att möta några av problemställningarna ovan genom att en studie i att skriva ut delar till Attefallshus för att studera konstruktion och utformning av väggar. Bland annat berörs följande frågeställningar: Hur installeras t ex fönster och dörrar på ett enkelt och korrekt sätt utan köldbryggor? Vilken typ av isolering är lämplig att användas? Hur hanteras installationer av el, vatten, avlopp och ventilation? Är det generellt så enkelt med 3D tekniken som det har förespeglats utanför våra landsgränser eller behövs ytterligare konceptutveckling ske?

Målsättning är att:

- genom praktiska tester skapa erfarenheter, konstruktionsmodeller och utveckla utskriftmetoder
- titta på husets termodynamik, dvs hur isolering ska utformas i väggar vid olika former av väggkonstruktioner och hur utformningen påverkas av köldbryggor mm
- undersöka hur betongrecept kan behöva justeras med avseende på typer av konstruktionsdelar
- skriva ut ett helt Attefallshus på plats med den nya 3D-printern som ConcretePrint utvecklats.

1.3 Nyttan med projektet

Den praktiska nyttan är stor genom att ett antal referensgjutningar av väggelement och konstruktionselement skapas. Att prova ut lämpliga betongrecept och testa dessa praktiskt i provningar inför byggandet av huset är mycket värdefullt liksom att utveckla principer hur betongen bör justeras vid olika gjut/3D-utskriftsförhållanden. 3D-utskrifter vid olika temperaturer har stor praktisk nytta eftersom exempelvis tillsatsmedel måste justeras med hänsyn till temperatur. Andra viktiga värden är att studera hur installationer görs i dessa väggar.

Ett användande av heldigitala arbetssätt bedöms vara intressant genom att föra digitalisering och robotisering framåt inom byggbranschen.

Resultatet av detta referensprojekt bedöms vara till gagn för hela den svenska byggindustrin då 3D-utskrifter kan skapa nya former av byggande, kortare byggprocesser, ett effektivare byggande som leder till minskade produktionskostnader. 3D-utskrifter av bostäder leder till en helt digitaliserad produktion samt till friare former på arkitektur och gestaltning.

Erfarenheter från projektet bedöms således utgöra bas för en fortsatt utveckling. Målet är att skriva ut ett radhus med visionen att:

- Bygga hela radhuset på en kalendermånad
- Att halvera produktionskostnaden genom att alla detaljer finns med i 3D modellen. På så sätt kan vissa delar tillverkas i verkstad i stället för på plats

Arbetet ger relevanta erfarenheter till ett pågående parallellt arbete vars syfte är att skapa ett samarbete mellan olika intressenter som KTH, RISE – CBI, xenter, Betongindustri och andra leverantörer och byggföretag. Målet med samarbetet är att skapa en testbädd för storskaliga 3D-utskrifter. Ett ”center” för att forska och utveckla storskaliga 3D-utskrifter bör kunna etableras bl a som resultat av detta projekt.

Projektet bedöms således kunna utgöra en generell bas för att vidareutveckla digitalisering, automatisering och robotisering och börja använda heldigitala arbetssätt. T ex skapas Nationellt nätverk för Byggautomation tillsammans mellan KTH, Luleå Tekniska Universitet, Lund Tekniska Högskola, Byggföretagen och ett antal personer från olika byggbolag.

Kunskaperna som ConcretePrint samlar på sig i detta projekt ligger till grund för utveckling av nästa generation av 3D-skrivare. Målet är att skapa en printer med en utskriftsvolym på 15 meter bred x 10 meter hög med en räls som går att förlänga upp till 50 meter.

1.4 Metodik

För att sammanfatta området och inte misstolka begrepp eller definitioner har en inledande övergripande litteraturstudie och faktainsamling genomförts. Det har inkluderat bl a ett antal intervjuer/samtal med experter inom arkitektur och konstruktion samt studie av referensobjekt som skrivits ut på olika ställen runt om i världen. Vidare skedde en insamling av krav som ställs på Attefallshus från tex Boverket. Litteraturstudien och faktainsamlingen ligger till grund för skapandet av ett antal hypoteser kring hur väggkonstruktioner skall utföras och skapar en bas för det fortsatta arbetet.

Den digitala processen har studerats och förfinats som t ex gått omvandla 3D-modellen till användbara styrinstruktioner till 3D-skrivaren.

Praktiska tester planerades i en första del genom utskrifter av olika väggkonstruktioner för att verifiera hypoteserna. Befintlig utrustning för 3D utskrift nyttjas. Vissa delar av de 3D-printade objekten testas med avseende på hållfasthet.

Huvuddelen av studien är att genomföra en fullskaleutskrift av ett Attefallshus. Vid utskriften av huset studeras möjligheterna med en digital arbetsprocess. De framtagna hypoteserna för väggar och valda installationer kommer i möjligaste mån att verifieras under utskriften.

Utskrifterna genomförs vid Betongindustris betongfabrik i Tumba där ConcretePrint har ett ca 500 kvm stort labb och har tillgång till Betongindustris materiallaboratorium för initiala tester av betongrecept och större justeringar under pågående utskrift.

1.5 Rapportens innehåll

Rapporten är organiserad i 7 kapitel, förutom inledande kapitel 1 noteras att:

- Kapitel 2 ger en bakgrund och sammanfattar tekniken kring 3D-utskrifter och s k Additive Manufacturing inom byggnadsbranschen. Det beskrivs bl a varför tekniken bör användas och sedan görs en kort sammanställning av utmaningar som finns med 3D-utskrifter.
- Kapitel 3 går igenom de praktiska testerna och förklarar mer i detalj utförandets olika skeenden. Kapitlet avslutas med en genomgång av det 3D-utskrivna Attefallshuset.
- Kapitel 4 ger en sammanställning av resultatet.
- Kapitlet 5. diskuteras resultatet och söker ge en slutsats samt en beskrivning av möjligheter med framtida arbete.
- Kapitel 6. referenser
- Kapitel 7. lista på bilagor

1.6 Ordförklaring

| | |
|------------------|---|
| Gcode | <p>Filformat för styrkoden tex en CNC fräsmaskiner eller 3D-skrivare m fl.</p> <p>Innehållet i filen ser ut som följer och är en typisk gcode sekvens</p> <pre>G90 G1 X100 F2000 E10 G1 Y100 X200 E30</pre> <p>G90 sätter om koordinatsystemet till absoluta koordinater. G1 är en instruktion till skrivaren att den skall förflytta sig. X100 F2000 ger en koordinat. I detta fall i X-led och F2000 är en instruktion om hastigheten som skrivarens huvud skall flytta sig med. E10 är hastigheten på extrudermotorn vid det givna tillfället.</p> |
| Nozzel | Munstycke. Den del där materialet som 3D-skrivaren skriver ut och läggs på nästa lager |
| Extruder | En motor eller pump som driver fram materialet som skall skrivas ut med 3D-skrivaren. Inom 3DCP sitter extrudern nära munstycket och styr mängden material som läggs på i detalj. Det möjliggör att man kan skriva ut detaljer med mer detaljrikedom eller kan skapa detaljer som är platta. mer effektivt |
| Extruderbarhet | Att ett material är extrudeerbart innebär att materialet håller formen och inte faller ihop när materialet kommer ut genom munstycket |
| Byggbarhet | Inom 3D-utskriftstekniken innebär begreppet att betongen bli klar av att hålla emot kommande lager av betong utan att kollapsa. (Begreppet har egentligen en mer generell betydelse i byggsammanhang). |
| Pumpbarhet | Betongens flytegenskaper och robusthet att motstå de tryck och friktioner i pumputrustning utan att separera och falla isär. En dålig pumpbarhet innebär oftast ett alltför högt tryck och slutligen pumpstopp. |
| Öppethållandetid | Inom 3D-utskriftstekniken innebär begreppet den längsta tid man med säkerhet kan ha innan man påför nästa lager för att man skall få tillräcklig hållfasthet mellan lagren. Normalt betyder det öppenhållandetiden den tid efter inblandning av vatten som betongen är flytbar dvs har hög konsistens. |
| Slicer | Skivar eller lagergenerering av en CAD-modell. En programvara som genererar lager av en 3D-modell sparad i tex en STL fil och skapar gcode file (se ovan). En slicer har många inställningar som används för att styra lagergenereringen. |
| STL-fil | Ett format som 3D-modeller exporteras i för att kunna importeras i en slicer. 3D-modellen innehåller bara ytstrukturer. |
| Infill pattern | Ett mönster som används för att fylla solida objekt. Det är ett sätt att minska mängden använt filament. |
| Filament | Filament är materialet som man skriver ut med. Det kan vara plast eller betong eller något annat material |

2 BAKGRUND

Boende är en humanitär rättighet enligt de globala hållbarhetsmålen. UN-habitat (FN:s program för boende och byggelsefrågor) har i en rapport fastställt att år 2020 fanns det 1 miljard personer som inte har ett drägligt boende. Enligt UN-habitats prognoser kommer antalet öka och år 2030 beräknas vara 3 miljarder personer.

I en rapport från Boverket från maj 2019 beskriver 8 av 10 kommuner i Sverige att man har stort behov att bygga nya bostäder men rådande byggkostnader gör bostäderna för dyra. Enligt analyser från Boverket behövs fram till 2030 ca 800 000 nya bostäder i Sverige varav 279 300 bostadslägenheter i Stockholms län. [2]. Man kan här iaktta att det har tagit 30 år att bygga de senaste 300 000 bostäderna i Stockholm. Hårdast drabbade av bostadsbrist är unga, socialt utsatta och personer med utländsk bakgrund.

Urbaniseringen och förtätningen av våra städer ökar behovet av infrastruktur. Även om infrastruktur ovan och under mark har många fördelar är den dyr att bygga och har en mycket hög investeringskostnad; exempelvis Förbifart Stockholm har beräknats att kosta 37,7 miljarder SEK. Dessutom innebär aktiviteterna kopplade till uppförandet av byggnader och infrastruktur en hög konsumtion av energi och naturresurser, dvs en hög belastning på klimatet.

2.1 Problembild och en lösning

Bygg- och anläggningsindustrin är den sektor som kan sägas påverkats minst av digitalisering och automatisering. Enligt flera författare utförs arbetet inom sektorn på liknande sätt under de senaste 50 åren, se t ex [3]. Bland annat har automatiseringstrenden varit begränsad och byggkostnaden ökar; t ex pekar Albinsson [4] på att byggkostnaderna har ökat 8 gånger mer än andra kostnader. Anjou beskriver en bransch som behöver effektivisering och förändring [5]. De byggfelen som uppstår inom byggnadsbranschen där arbete måste göras om uppgår årligen till många miljarder enligt Anjou.

Med en mer automatiserad och digitaliserad byggprocess skulle mängden fel kopplat till handhavande kunna minskas. Trenden går idag mot mer robotisering och automatisering i alla delar av samhället. Även byggandet kommer att ta nya former och kommer att bli snabbare, effektivare och ha högre precision. Japan kommer, med sin åldrande befolkning, inom en snar framtid få problem att ha tillräckligt många byggnadsarbetare. Därför har Japan satt som mål att helt automatisera sin byggindustri till 2040.

3D-utskrifter eller Additive Manufacturing, AM, är en lösning till en effektivare, mer energi- och resurssnål tillverkningsprocess. Många förtjänster anses finnas med 3D-utskrifter som t ex lägre produktionskostnader, hög effektivitet och hög arkitektonisk flexibilitet genom den fria formen som processen möjliggör. Mindre materialförbrukning, ökad arbetsmiljösäkerhet och minskade fel på grund av mänskliga misstag är andra förtjänster liksom mindre resursanvändning och minskat energiförbrukande vid byggande.

Med en 3D-skrivare adderas material till tidigare material så att slutprodukten byggs upp lager för lager. Slutprodukten printas fram och den tänkta formen växer upp tredimensionellt. Denna typ av tillverkning kallas därför ibland *Additiv tillverkning* till skillnad mot för *Subtraherande tillverkning* där formen växer fram genom att man *avlägsnar* material från ett större block, t ex vid fräsning, svarvning och sågning.

En utmaning med den nya additiva tekniken är att kunna producera och tillverka heterogena material och artefakter, det vill säga föremål, i ett och samma material med bibehållen kvalitet. En annan utmaning är att i framtiden kunna printa föremål även med olika materialsammansättning i samma ”print”, vid ett och samma tillfälle.

Vid 3D-utskrift av betong gjuter man således inte i några formar - man ”skriver fritt”. Synsättet är med andra ord omvälvande för betongbranschen eftersom tekniken med att gjuta i formar har skett på ett likartat sätt i ungefär 100 år, med undantag av sprutbetong vid bergförstärkning, prefabrtillverkning av t ex betongrör och gjutning av betongbeläggning till vägar.

Det finns olika sätt att printa betong. I vissa fall strävar man efter att printa hela betongkonstruktionen direkt på arbetsplatsen medan i andra fall skriver man ut prefabricerade betongelement på fabrik, som sedan fraktas och sammanfogas på byggarbetsplatsen. Tillvägagångssätten innebär både möjligheter och hinder. Den som printar prefabricerade element behöver till exempel inte ta hänsyn till väder, vind och klimat på samma sätt som någon som skriver ut platsbestämt. Å andra sidan slipper den som väljer att printa på plats transportera prefabricerade elementen till byggarbetsplatsen och behöver inte hantera något lager. Utskriften sker ”on demand” på samma sätt som traditionell platsgjuten betong.

En 3D betongprinter i storformat består vanligen av någon form av robot eller robotstyrning där strukturen byggs upp genom att betongmaterialet printas i en förprogrammerad bana i en additiv process. Detta kan jämföras med hur betongen idag adderas i gjutformen och det går att konstatera att redan nu sker gjutningen genom en additiv process med den skillnaden att en betongarbetare håller i pumpslangen och fördelar betongen manuellt i en handmanövrerad bana inom önskat gjutområde.

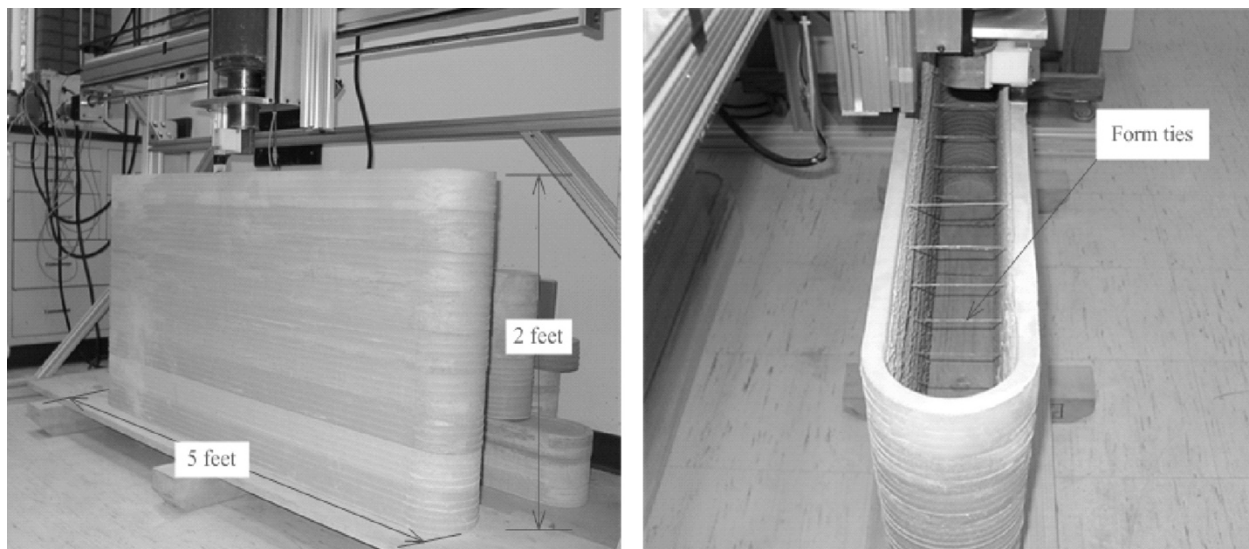
2.2 3D Construction Printing, 3DCP

Internationellt benämns områden där man använder 3D-skrivare inom byggnadsindustrin för Construction 3D Printing (c3Dp) eller 3D Construction Printing (3DCP). Tekniken och möjligheterna började utvecklas i slutet av 1990 talet av Behrokh Khoshnevis vid University of Southern California [11][12]. Khoshnevis teknik kallas ContourCrafting. Det är ett exempel på en 3D-utskriftsteknik där man trycker betongen mot en platta som följer med när man skriver ut. På så sätt så skapas en yta som är blir planare än den som används vid vanlig 3D-utskrift med plast.

Tidigt fanns det tre olika typer av 3D-utskrifts metoder:

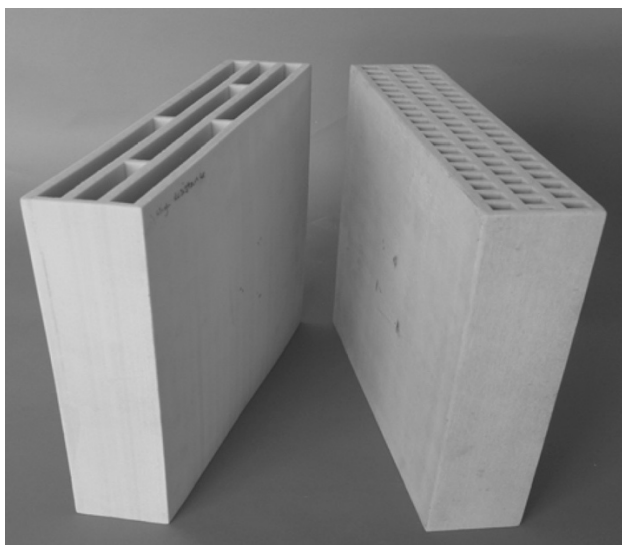
- Contour Crafting utvecklat av Khoshnevis vid University of Southern California
- D-shape som uppfanns av Enrico Dini, grundare av of Monolite i UK
- Concrete Printing som bland annat används av Buswell med Loughborough University, UK

I Figur 2.1 visas exempel på en väggform utskriven med ContourCrafting teknik, där ”form ties” sk form förbindare har används. Formförbindarna är manuellt instoppade under utskrivningen med ContourCrafting tekniken. Teknologin kan använda böjda armeringsjärn för att hålla ihop väggskevorna och stålförbindningarna placeras manuellt ut i olika lager under printprocessen



Figur 2.1 3D-utskrivna väggformar som utvecklades av Khoshnevis et al [13]

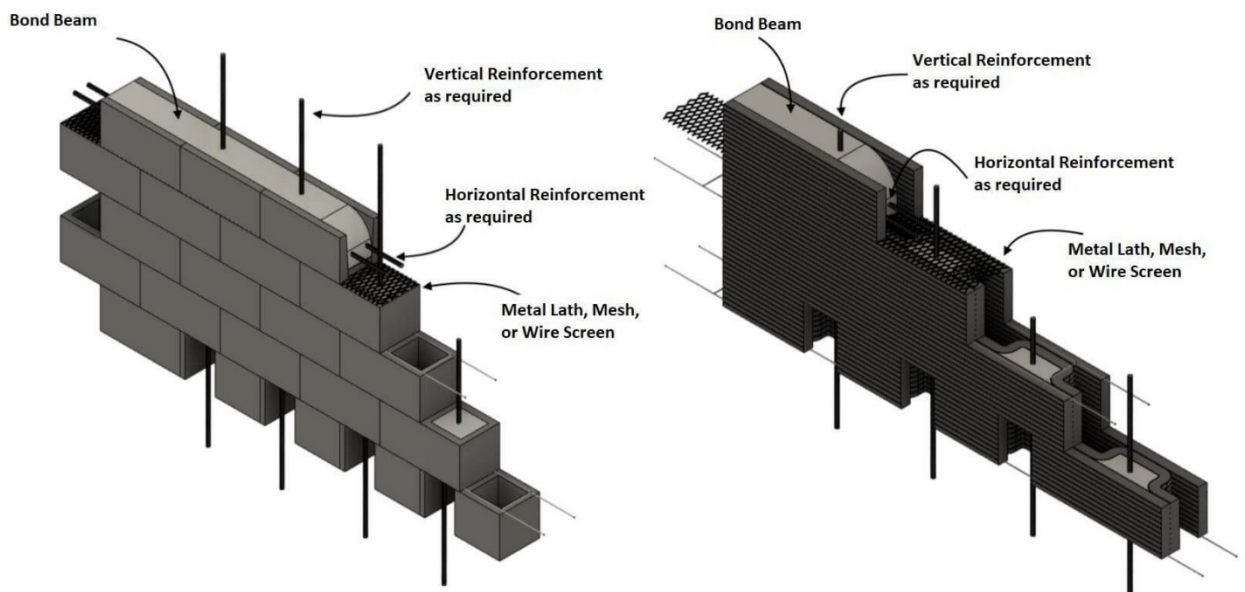
Buswell et al [14] beskriver olika möjligheter att 3D-printa väggelement med lägre termisk konduktivitet genom att utforma väggen med håligheter. Några exempel på väggkonfigurationer redovisas i Figur 2.2.



Figur 2.2 3D-utskrivna väggar med inre håligheter för lägre termisk konduktivitet. Från [14]

Figurerna ovan visar att redan för nästan 20 år sedan togs idéerna till de tekniker som senare kom att användas i mer eller modifierad form av flera 3D-utskrifts företag när de skriver hus eller andra objekt.

Det amerikanske företaget Apis Cor har utvecklat en metod att 3D-printa en väggkonstruktion som motsvarar en konstruktion där betonghålsten används, se Figur 2.2. Lösningen med betonghålsten är väldigt utbredd i USA [15] vid bostadsbyggande. Ett stort antal provningar av olika slag har genomförts med syfte att få den 3D-printade väggkonstruktionen godkänd för användning vid husbyggnation.



Figur 2.3. Murad väggkonstruktion som är vanligt förekommande vid husbyggnation i USA till vänster och 3D-printad vägg med liknande konfiguration till höger. Från [15]

Sedan ett antal år pågår arbete med att skriva ut olika större strukturer med hjälp av 3D-utskrifter. Ett antal exempel finns i Kina, Frankrike, Schweiz, Tyskland, Ryssland, Nederländerna, USA, Danmark och Norge där hela byggnader eller delar av betongkonstruktioner framställs genom 3D-utskrifter. Både ESA och NASA driver forskning för att använda storskalig 3D-utskrift på bland annat månen.

Från och med oktober 2019 finns världens största 3D-utskrivna byggnad i Dubai. Huset är 9,5 meter högt och har en total yta av 640 kvm, se Figur 2.4. I byggnaden används zig-zag mönster för att hålla ihop inner- och ytterväggen. Vidare syns armeringen stå upp i väggarna. Pelare som skapas där väggarna blir kvarsittande form när väggarna printats upp till full höjd och fyllts med armering och betong. Byggnaden är utskriven med en gips-cementblandning.

Under hösten 2020 och våren 2021 har ett konsortium av företag från Tyskland gjort utskrifter av hus i Beckum och utanför München i Tyskland, se Figur 2.5 och detaljer i Figur 2.6. Detaljerna visar användandet av form stabiliserade metallstag för att hålla ihop väggskivorna och stålplattor för skapandet av hålrum i den 3D-utskrivna väggen.





Figur 2.4 Exempel på 3D-printat hus i Dubai. Färdigprintad byggnad samt foton från printprocessen. Från [16]



Figur 2.5 Foto på 3D-utskrivet hus i Beckum, Tyskland. Från [17]



a)

b)



c)

Figur 2.6 Exempel på detaljer av 3D-utskrivet hus i Beckum, Tyskland. Från Peri YouTube [18].

Det kan noteras att de flesta av de beskrivningar om redan utskrivna hus eller byggnader som finns publicerade inte alltid är korrekt beskrivna kring hur långt inblandade forskare/ utvecklare eller företaget egentligen kommit eller vilka eventuella problem som uppstått. Huset i Dubai som nämns ovan ska ha tagit 500 timmar att skriva ut, enligt företaget som skrivit ut huset. Det skedde dock över en period av ett år. Med andra ord tekniken och forskningen är inte alltid så långt fram som marknadsföringen vill påskina.

Beträffande forskning kring 3DCP sker bland denna annat vid:

- ETH i Zürich, Schweiz, där man har tittat på de mer arkitektoniska fördelarna
- TUE i Eindhoven, Nederländerna. utförs forskning på konstruktionsutmaningar som tex de som råder för design och utförande av mindre broar.
- Ett större forskningssamarbete har 2020 finansierats mellan TU München, Universitetet i Dresden och Universitetet i Braunschweig. I Dresden forskar man på en typ av munstycke för vanlig transportbetong till väggar.

Sverige har en ledande ställning inom traditionell 3D-utskrift av andra material bl a med tillverkaren av 3D-metallskrivarföretaget Arcam. Höganäs och Sandvik tillverkar och världens hårdaste 3D-printbara metall från VBN components. Ett etablerat center för 3D utskrift av plast och metall är etablerat vid RISE i Mölndal. Wallenbergssfärens 3D-utskriftföretag AMEXI kan nämnas liksom forskning på KTH bland annat med metallskrivare.

Inom 3DCP har Sverige dock halkat efter även om ett antal aktiviteter inom området kan nämnas:

- Skanska gjorde tidigt försök 2014 med tillsammans med Loughborough University, England.
- Två examensarbeten från 2015 utförda på Lunds Tekniska Högskola som handlar om en 3D-skrivare och 3D-utskriften betong.[17], [18]
- Examensarbete, Statusöversikt om 3D-utskrift med betong. Arbetet har utfört av Caledron-Nygren, 2016 på uppdrag av Cementa[19]
- Två examensarbeten som utforskar betongens printbarhet från 2018 och 2019 utförda på KTH i samarbete med RISE [20], [21]
- SBUF rapport om Produktionsautomation i betongbyggandet. Från 2020 av Petra Jenning[22].
- Helena Westerlind doktorerat i området 3DCP under ledning av bland annat Prof Johan Silfwerbrand med hjälp av Wolfram Oettel på RISE [23]
- Examensarbete, Kvarsittandeformar för broar av Sergi Boned Ferrer från 2021 på uppdrag av KTH, Johan Silfwerbrand och ConcretePrint [24]
- Examensarbete, 3D-Printning av betong från 2021 från Örebro av Zahedi Yasin and Sheikh Shouk Mustafa. I rapporten intervjuas bland annat med Tobias .v Haslingen[25]
- Vid KTH fortsätter Helena Westerlind och Jose Hernández forskningen kring gestaltning av 3D-utskrivna objekt inom projektet Digital Betong

Vidare bör det nämnas ett par andra arbeten som pågår i Sverige

- Examensarbete om 3D-utskrift av boende på Mars, Adrian Pihl Spahiu. Chalmers 2020 [26]
- Examensarbete om Kontextuell helhet av 3D- printad träullsandwich. Rasmus Lundberg, KTH 2019 [27]
- Fönster och dörr tillverkaren NorDan har fått pris för 3D-printat fönster, Quality Innovation Award [28]

2.3 3D-skrivare

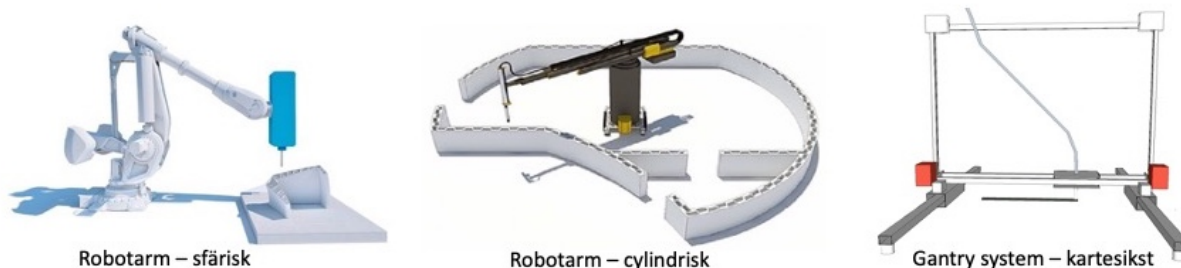
Det finns olika typer av 3D-skrivare för storskaliga 3D-utskrifter:

- Mobila
- Flyttbara
- Fastmonterade

Mobila skrivare är oftast bandgående. Någon som är monterad på ett släp med hjul. Flyttbara skrivare monteras ner och transporteras i delar. Fastmonterade står fast monterade på ett och samma ställe.

Skrivarna bygger på tre huvudtyper av 3D-utskriftsmetoder. Klassificeringen sker lättast med den typ av koordinatsystem de använder. Det finns naturligtvis avarter med andra typer av rörelsescheman Figur 2.7. Huvudklasserna är:

- Sfärisk
- Cylindrisk
- Kartetiskt, XYZ



Figur 2.7 Tre huvudtyper av 3D-skrivare. Den sfäriska används av Xtree, den cylindriska av Apis Cor och den kartesiska kommer från ConcretePrint

Skrivarna använder i huvudsak två olika typer av uppställningar:

- Prefabricering
- På-platsen utskrifter

Andra sätt att klassificera 3D-utskrift är vilken typ av munstycke som skrivaren använder eller vilket typ av pumpsystem eller typ av material som används.

2.4 ConcretePrint: etablering och framtid

Företaget ConcretePrint har sedan 2015 utvecklat en 3D-skrivare för betong i full skala och är för närvarande det enda företag i Sverige som kan skriva ut storskaliga objekt i betong. I samarbete med bl a Betongindustri, JM, Skanska, och PEAB driver följande projekt:

- ”3D-utskrift för en energieffektiv och resurseffektiv byggprocess” som Energimyndigheten delfinansierar, 2021. De senare delarna av detta projekt och ytterligare ett antal arbetspaket som inte ingår i detta projekt:
 - AP1 Heldigital arbetsprocess
 - AP2 Testande av bygglov för 3D-utskrifter med heldigital arbetsprocess
 - AP5 Kravspecifikation på ytterligare egenskaper för 3D-skrivaren
 - AP7 Utskrifter av gestaltningsdetaljer – tester av Helena W. modeller
 - AP8 Utskrifter av pelare till paviljong
- ”3D-utskrifter av Attefallshus – praktiska tester” som SBUF delfinansierar, dvs detta projekt. I projektet ingår också två studentprojekt:
 - vid KTH konstruktion av ett extrudermunstycke
 - vid LTU kring hållfasthet och termodynamik

Genom minskade byggkostnader menar ett antal leverantörer av 3D-utskriftsutrustning att man kan bygga billiga hus i världens utsatta områden. Det kan här nämnas att ConcretePrint har haft samarbete med organisationen SweGhana och skapat ett internationellt projekt för att möjliggöra 3D-utskrift av billiga småhus i Ghana. Inom SweGhana (utvecklare Olle Olsson) försöker man etablera ett nytt sätt att bygga små säkra och ekologiskt hållbara bostäder för familjer i utsatta områden. Ansökan för finansiering är inskickad till olika stiftelser för att kunna etablera en metod och en välgörenhet där hjälp till självhjälp som är en av de stora framgångstankarna som SweGhana arbetar med.

ConcretePrint arbetar också aktivt i samarbete med bl a KTH och LTU där man är med och driver Nationellt nätverk för Byggautomation (www.byggautomation.se). Vidare är ConcretePrint engagerad i

- KTH- projektet Samverkansspelare med 3D-utskriften betongform fylld med SKB
- projektet ”Digital Betong” på KTH som drivs av Jose Hernández och Helena Westerlind.
- Att vid KTH försöka skapa ett nationellt labb för storskalig 3D-utskrift. En testbädd möjliggörs för Svensk byggindustri och en av de testbäddar som etablerats av Nationellt nätverk för Byggautomation kan användas. Svensk byggindustri behöver möjligheter att kunna få utbildning och exempel på nya sätt att bygga.

2.5 Energieffektivisering, hållbarhet

Bebyggelsen står för cirka en tredjedel av den totala energianvändningen i Sverige [29] och samtidigt uppstår byggfel, skador och brister som kostar över 100 miljarder kronor om året [30]. Detta innebär en stor helt onödig belastning på miljön. Beträffande energianvändningen i byggprocessen kan denna i huvudsak delas upp i [31]:

- Energianvändning vid tillverkning och transport av byggmaterial
- Energianvändning på byggplatsen

Enligt ”Energianvändning och LCA-beräkningar i byggprocessen” [31] utgör energianvändningen av transporter av byggmaterial till byggarbetsplatsen och användning på byggarbetsplatsen cirka 16 % av den totala klimatpåverkan för en byggnad.

Man kan argumentera för att minskad byggtid för en byggnad också minskar energianvändningen för byggnadsarbetarnas transporter till och från byggplatsen.

Ett exempel på initiativ angående hållbarhet och 3D-utskrift är det som skett i Dubai. Efter att framgångsrikt ha skrivit ut den ovan nämnda byggnaden har regeringen i Dubai som mål att till 2030 3D-skriva 25 % av alla nybyggda byggnader [32]. Därigenom menar man att:

- byggkostnaderna kan minska med 50 – 70 %.
- arbetstiden kan minska med 50 – 80 %
- utöver detta kan tekniken hjälpa till att minska mängden av det skräp som genereras under byggnationen med upp till 60 %.

Detta påverkar byggindustrins ekonomiska avkastning och bidrar till ett resurseffektivt och hållbart byggande, se även [33]. Kan byggtiden minskas genom att arbetstiden minskar med 50 – 80 % bör energianvändningen på byggplatsen som är 16 % minska med upp till 50 – 80 %.

Förutom kortare arbetstid på byggplatsen ger automatiserat och robotiserat byggande finns möjligheter till minskade arbetsplatskador och olyckor inom byggnadsindustrin.

Dessutom, om en del av det byggavfall som idag är resultatet av byggande och renoverande av befintliga byggnader återanvändas i de 3D-utskrivna byggnaderna, ökar resurseffektiviteten och hållbarheten. Det kan vara material som tegel, porslin eller betong som rivs, krossas och tillförs som en del av det material som används för att 3D-skriva byggnader. Ett cirkulärt tänkande skapas.

Vidare finns också möjligheter att kraftigt minska användningen av cement/betong vid olika byggnationer. Med 3D-utskriften kan man skriva ut kvarsittande former med geometriska former som är optimalt anpassade till konstruktionens behov snarare än att ”bara” bygga ”fyrkantiga boxar”. Detta eftersom formbyggande är kostsamt och ofta görs traditionellt med fyrkantiga former snarare än att anpassa formbyggandet efter det hållfasttekniska behovet som finns. Betong är billig i jämförelse med att man bygger former som är anpassade för hållfasthetskraven och som skall byggas med traditionella metoder.

2.6 3D-utskrivbara material

Många material går att använda för 3D-utskrift. Men för 3DCP används i dagsläget främst betong även andra material, som plast, träplastblandning och stål också kan användas för att skriva ut byggnader eller byggnadsdetaljer.

Betong är världens mest använda byggnadsmaterial och är också ett naturmaterial som har unika egenskaper och är väl anpassat till byggnation. Betongens formbarhet, robusthet och goda beständighet i de flesta miljöer är exempel på positiva egenskaper som bidrar till den stora användningen. En utmaning är att tillverkningen av betong, eller egentligen cement, ger upphov till koldioxidutsläpp. Förändring är helt klart nödvändig om man skall klara samhällets krav på minskade utsläpp vid byggande med betong. 3D-printing skulle här kunna vara en del av lösningen genom att mängden material kan optimeras. Inblandning av alternativa bindemedel i betongen är ett annat exempel på åtgärd som reducerar betongens CO₂-påverkan. Även inom cementindustrin jobbar man idag intensivt med olika lösningar för att sänka koldioxidutsläppen. Bland annat finns långt framskridna planer på att bygga upp anläggningar för CCS, Carbon Capture Storage, som fångar in koldioxiden vid tillverkningsprocessen och därefter lagrar den. En sådan process skulle innebära att betongen istället skulle kunna bli en koldioxidsänka genom att betong under sin livslängd återtar koldioxid från atmosfären, betongen karbonatiserar.

2.7 Vision, friformsarkitektur

Visionen är att Sverige kan producera billiga bostäder där även unga och samhällets utsatta har råd att ha en egen bostad. Inom en snar framtid bör det exempelvis vara möjligt att skriva ut ett radhus med minst sju bostäder i en radhuslänga. Då erhålls lågt energianvändande, minskat användande av naturresurser, liten mängd byggavfall och få byggmoment. Huset är väl förberett för installation av vatten, avlopp, ventilation och el där kostnaderna för installationerna är låga vilket medför en kostnads-, resurs- och energieffektiv byggnad.

Friformsarkitektur kommer sannolikt ge samhällelig innovation och gestaltnings innovation och annan påverkan som inte går att överblicka idag. Kan kostnaderna och byggtiden minskas på det sätt som föreslås kommer tekniken sannolikt påverka bostadskulturen och samhällsbyggandet. Fler har råd att bo i hus med unik arkitektur och spännande former som är anpassade till människan.

Andra visioner finns för framtiden. T ex med en aktiv materialutveckling finns möjligheter att arbeta över materialgränserna, t ex genom att tillsammans med organisationer som Paper province eller skogsbolag som StoraEnso utveckla biomaterial för storskaliga 3D utskrift. En annan tanke skulle kunna vara användandet av betong med cyanobakterier för att ytterligare äta CO₂ eller självläka betongen [34]. Materialutvecklingen kan på sikt också innefatta mer exotiska framtidsorienterat material som tex mycel härstammande från svampar [35][36].

2.8 Förutsättningar för effektiva 3D-utskrift

För att 3D-utskriftstekniken skall ge besparing och effektivisering behöver alla de viktigare detaljerna finnas i den digitala modellen. Arbetet börjar med arkitekten och förs sedan vidare med samarbetet mellan arkitekt och konstruktörer; ett samarbete som skapar förutsättningar för en bra 3D modell. Det handlar bland annat om att rördragningar och uttag för bredband, tele, vatten, el, avlopp och ventilation etc skall finnas på plats i modellen. Dessutom behöver inredningsdetaljer, fönster och dörrar finnas med tillsammans med alla konstruktionsdetaljer kopplat till bärförmåga, energi och ventilation vara klara och finnas i modellen.

Utöver detta måste de krav som finns för tex brandskydd m. fl vara helt omhändertagna.

För att uppnå effektivitet kan inget ändras efter det när man skriver ut. Hela huset måste vara färdigritat och väl genomtänkt.

Tre övergripande processer samspelar för att skapa en utskrift:

1. Designprocessen – från idé via 3D-CAD till utskrift
2. Materialhanteringsprocessen – från enstaka material via blandning till utskrift
3. Designförutsättningar – s.k. ”Design for robotic construction” för 3D-skrivare dvs från blandning, installationstekniska förutsättningar och 3D-utskriftsteknik till faktiska förutsättningar på den blivande utformningen.

2.8.1 Designprocess

I processen mellan design och 3D-utskriften produkt finns många delsteg. Byggande börjar med någon form av viljeyttring som begränsas av vilka områdes eller detaljplaner som gäller eller andra förutsättningar och begränsningar. De viktigaste detaljerna är detaljritningar för kök, badrum, dörrar och fönster, olika typer av installationer och konstruktioner. Det är vid dessa detaljer som noggrannhet och precision kan skapa stora tidsvinster. Tidsvinster kan vara att detaljerna är enkla att montera och prefabricerade som tex fönster och dörrar eller kanske att ventilationssystem är färdigskapat och ihop byggt till lagom stora moduler. Detaljerna förfinas under processens gång.

Delsteg enligt ned kan definieras:

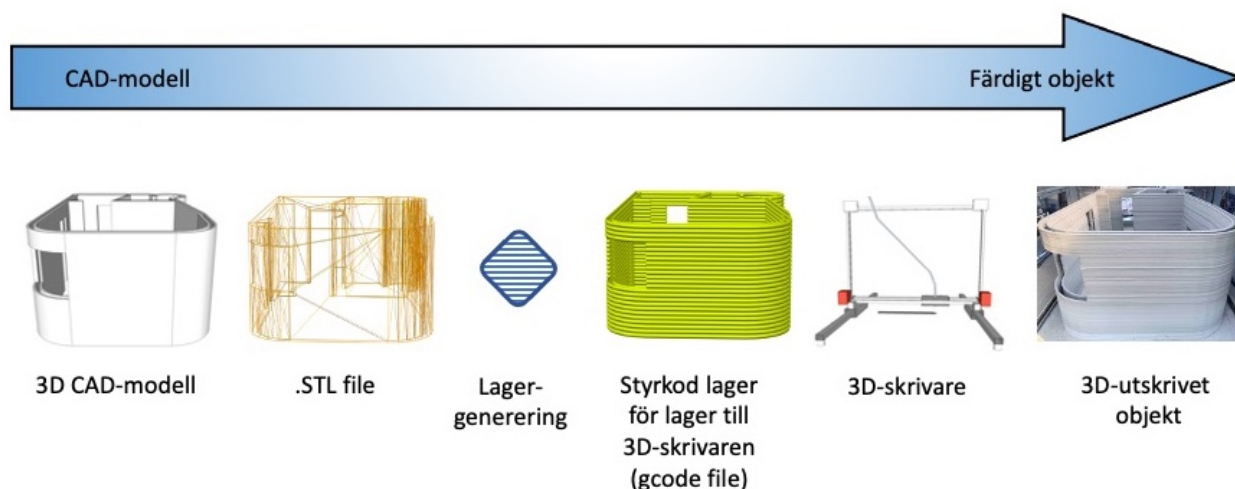
1. Förutsättningar, kravställningar från kund och samhälle
2. Arkitekturskiss
3. Beslut från kund
4. Arkitektritning
5. Konstruktion
6. Bygglovshandlingar
7. Detaljritningar, fönster, dörrar, badrum, trappor, entréer, kök mm
8. Detaljritningar för konstruktioner till detaljritningarna värme, vatten, avlopp, el, tele, data, ventilation mm
9. Startbesked
10. Färdig modell för 3D-utskrift
11. Korrigering av 3D modell för 3D-utskrift
12. Uppskivning eller lagergenerering (Slicing)
13. Preparering av 3D-modell för 3D-skrivare
14. 3D-utskrift

Fram till punkt 10 är stegen tämligen lika med de steg som finns med i den traditionella byggprocessen. Detaljnivån måste vara högre och 3D-modellen måste vara färdigritad och bör vara verifierad i ett tidigt skede. Stegen från färdig CAD-modell till färdigt objekt, dvs de sista delarna av processen ovan visas i Figur 2.8.

Alla detaljer behöver vara genomarbetade och finns på plats i modellen. Då kan genererandet av styrkoden till roboten utföras utan att för mycket måste göras om eller att det eventuellt behöver efterjusteras t ex borrar för håltagningar eller justeras genom bilning.

CAD-modellen exporteras som en STL fil och öppnas i en programvara för lagergenerering. I programvaran styrs detaljer om hur lagren skall genereras. Många parametrar skall ställas in och finjusteras. De genererade lagren sparas i en gcode-fil som styr 3D-skrivaren. I vissa fall läggs unika detaljer in i gcode-filen för att styra vissa unika detaljer för den unika 3D-skrivaren.

Gcode-filen laddas sedan in i 3D-skrivaren eller alternativt i ett styrprogram till 3D-skrivaren som kommunicerar med 3D-skrivaren.



Figur 2.8, Standardprocessen mellan en 3D-CAD modell fram till det 3D-utskrivna resultatet

2.8.2 Materialhanteringsprocess

Materialhanteringen för betongskrivare är en komplicerad del i 3D-skrivarsystemet.

Utgångsmaterialen blandas till en konsistens där betongen kan pumpas över till skrivaren och skrivarkuvudet. Betongmaterialet ska vara *pumpbart* (se förklaring initialt i rapporten) i det här skedet. Med skrivarkuvudet placeras materialet ut och materialet måste vara *extruderbart* för ändamålet. Extruderbart innebär att materialet, enligt tidigare, skall hålla formen från munstycket/nozzeln.

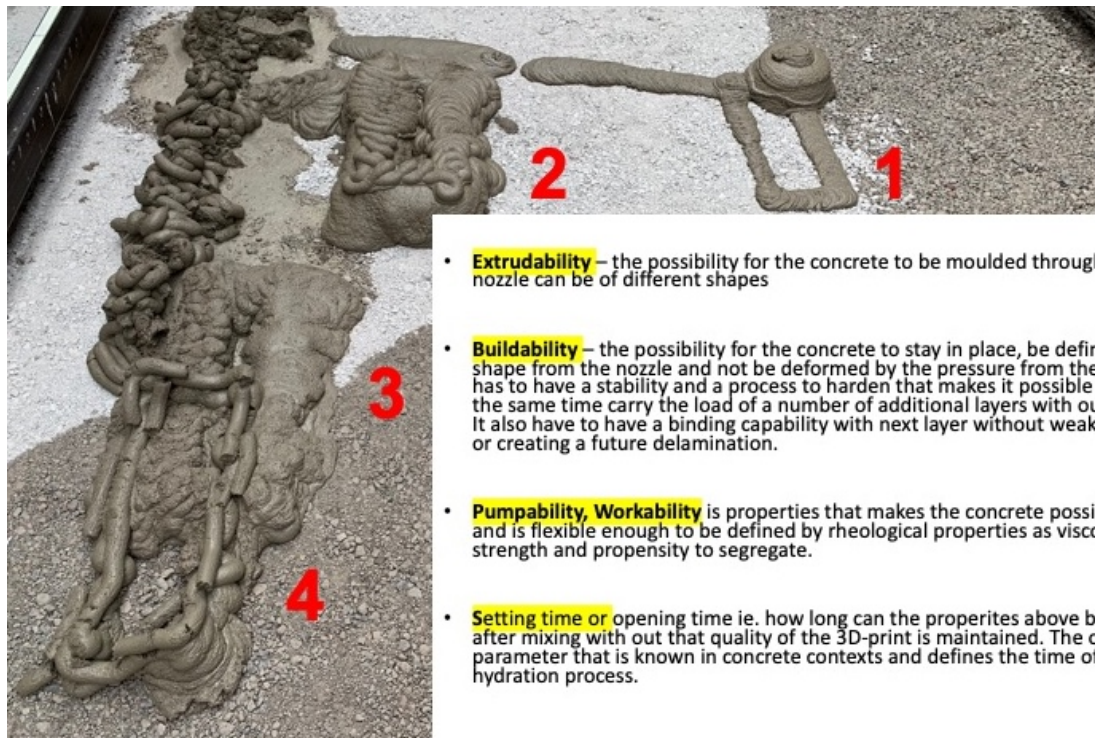
Efter placeringen av materialet ska en styvhet mer eller mindre direkt infinna sig, dvs en *byggbarhet*, som gör möjligt att materialet kan ta emot det tryck som efterföljande lager skapar utan att deformeras. Kravet på materialet gör att dessa två lager upplevs som två olika material: Ett material med lägre viskositet som kan pumpas och extruderas och ett underliggande material med högre viskositet och styvhet som gör att materialet kan staplas lager på lager utan att deformeras.

Fönstret där alla tre egenskaper överlappar varandra är inte särskilt stort men kan nås med hjälp av tillsats av viskositetsmodifierande tillsatsmedel, flytmedel, stabilisatorer alternativt att även använda av acceleratorer. Dessutom skall betongen ha en *öppethållandetid* så att nästkommande lager fäster ordentligt vid föregående lager.

Betongen som används för 3D-utskrift har faktiskt likheter med sprutbetong[37] och samtidigt med självkompakterande betong, SKB. Likheten med SKB är att betongen inte behöver vibreras för att lägga sig till rätta, och likheten med sprutbetong är att den extruderas genom ett munstycke och klarar av att forma sig i komplexa former i lager på lager.

Figur 2.9 beskriver dessa utmaningar för betongen att uppfylla och konsekvenser av avsaknad av någon av dessa egenskaper. Nr 1 visar att betongen är pumpbar – pumpability, Nr 2 visar avsaknad av byggbarhet. Dvs betongen rinner ut. Nr 3, beskriver avsaknad av byggbarhet och nr 4 visar någon form av byggbarhet

Det inses att många utmaningar finns med betongmaterialet!



Figur 2.9, Karaktäristiska och basala egenskaper för 3D printad betong: extruderbarhet, byggbarhet, pumpbarhet arbetbarhet och öppethållandetid samt möjligheter och konsekvenser om dessa uppfylls eller saknas.

2.8.3 Kvalité

Processen kring blandningen är viktig och skapar förutsättningar för att få en bra kvalitet på de kommande utskrivna objekten Figur 2.10. Materialblandningen, som kan ske antingen i en blandarpump eller i en satsblandare tillsammans med en separat betongpump, påverkar resultatet och kvalitén. Slangen som används vid pumpning av materialet och dess längd samt diameter påverkar blandningens egenskaper. Med längre slang uppstår ett stort motstånd i slangen vilket kan inverka på pump och flödes hastigheten ur munstycket om detta inte är försedd med ett mellanlager/extruder.



a)



b)



c)



d)

Figur 2.10 Produktionsprocess / produktions uppställning med alla ingående delar. a) Silo för att hantera och mata fram material. Foto från Heidelberg Cement [38] b) Mixerpump från Maltech c) Slang för att distribuera färdigblandadt material d) Exempel på munstycke

Munstycket, dvs nozzelns utformning påverkar kvalitén och noggrannheten. Figur 2.11 visar några utformningar:

a) ett munstycke med en extruder. Extrudern kan stoppa betongflödet precis innan ett kommande lager skifte eller ett ställe där man skall skapa en öppning. Extrudern ger möjlighet till att ändra betongflödet i detalj genom att ändra på extruderhastigheten och därför kan en större noggrannhet och detaljer på den utlagda betongen skapas.

b) en lösning där man pumpar direkt. Då skapas ett eftertryck när man slutar pumpa och en senare uppstart där man måste börja pumpa en stund innan materialet kommer ut genom munstycket igen. Munstycket skapar en yta som spritsar ut betongen med övertryck. Betongen blir bredare än munstyckets diameter. Munstycket ger också med sitt randiga ytan en fästyta som är större än om den skulle ha varit plan eller platt. Det gör att nästa lager har en större yta att fästa vid och detta bör göra att hållfastheten mellan lagren ökar.

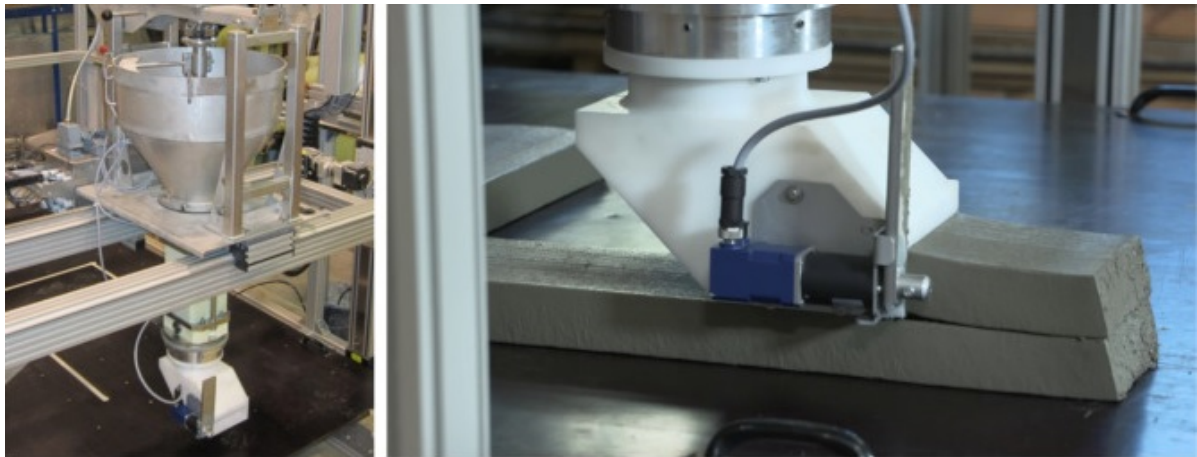
c) och d) i Figur 2.11 visar en extruder med ett munstycke som har en nästan horisontal placering av materialet och där munstycket har sidor som gör att det extruderade materialet får en nästan rak sida. Kvalitén och rakheten på väggen kan bli högre med ett sådant munstycke.



a)



b)



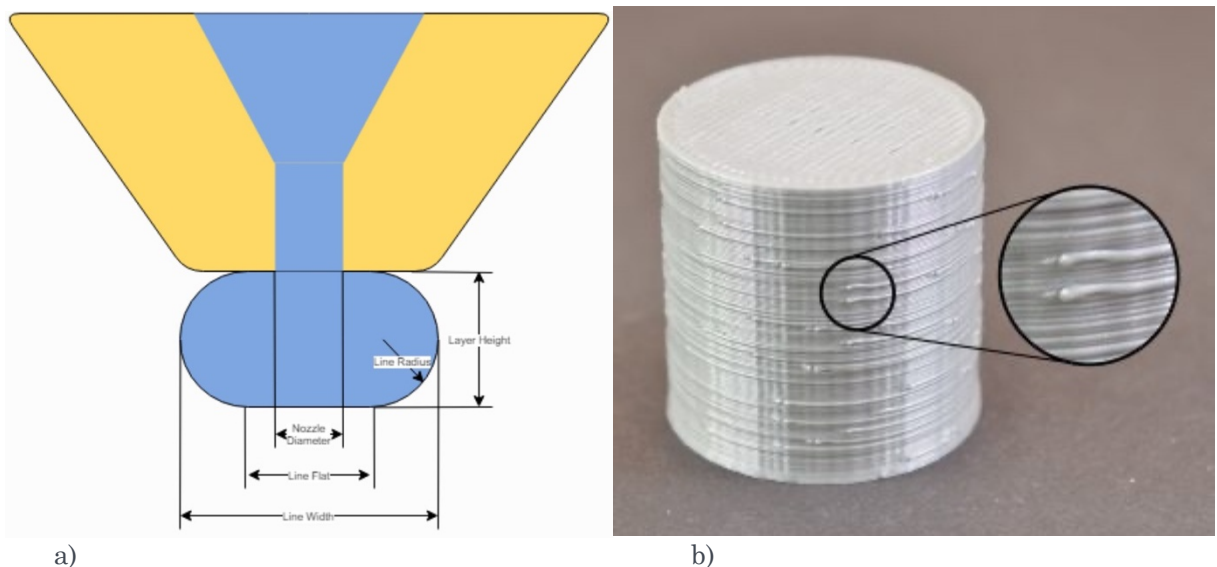
c)

d)

Figur 2.11 Munstyckeslösningar: a) munstycke med en extruder från COBOD[39]. B) munstycke där betongen pumpas hela vägen med övertäck till munstycket c) munstycke med extruder d) ett munstycke som ger helt raka lager.

2.8.4 Väggtjocklek

Munstycket eller nozzeln definierar hur tunn väggtjockleken kan vara. För plast är relationen mellan hastigheten som plasten pressas ut genom nozzel, lagerhöjden och temperaturen avgörande faktorer som beaktas. Plasten övertrycks vid printande. Det är övertrycket som ger upphov till de rundande lagren, se Figur 2.12 b). Figuren visar även på kvalitetsproblem som kan uppstå vid 3D-utskrift.



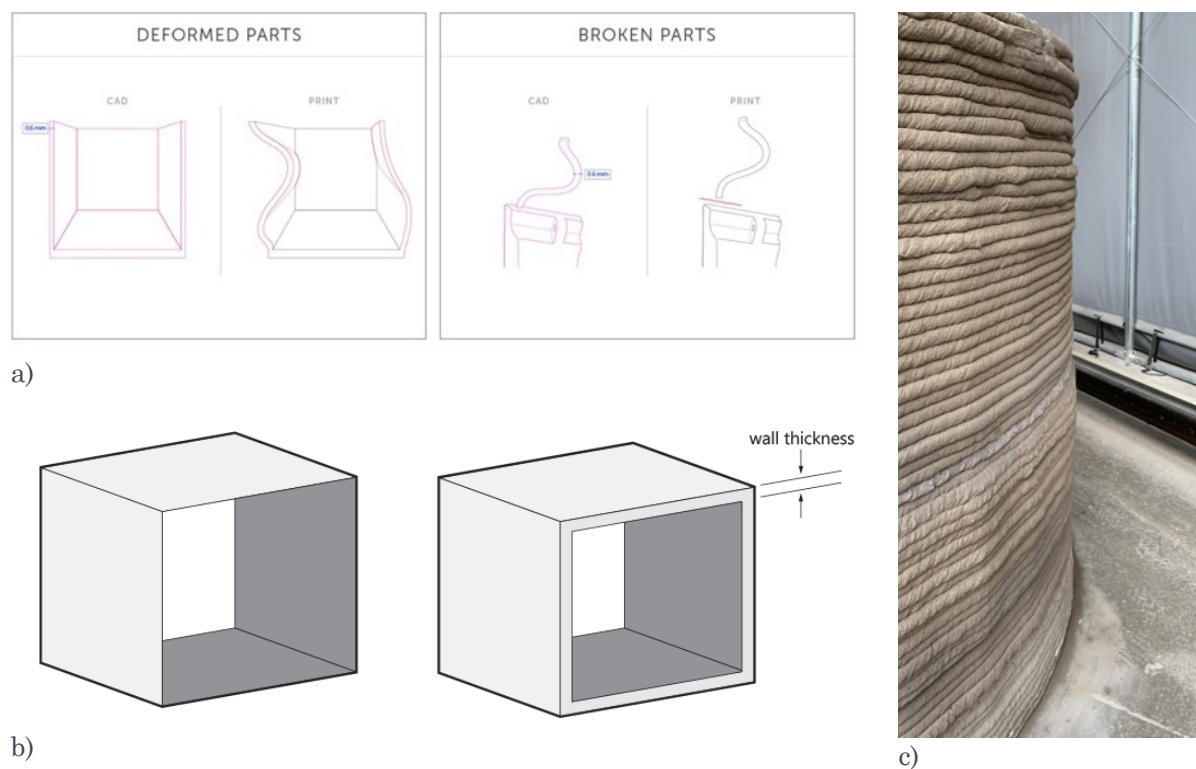
a)

b)

Figur 2.12 Utskrift av plast: a) Plastmunstycke i genomskärning där utskriven plast övertrycks för att ge en viss linjebredd [40]. B) ett utskrivet plastobjekt där utskriftskvalitén kan påverkas på under utskrift [41]

Inom 3D-printing är väggtjocklek generellt ett definierat begrepp som har påverkan på kvalitét på utskriften. Beroende på material som skall 3D printas finns också flera begränsningsfaktorer. Det observeras att det inte är samma väggtjockleksbegrepp som används inom byggindustrin. För 3DCP skiljer sig också hanteringen för nozzelns tjocklek och hur tjocka väggar som man använder för byggnation. I CAD ritningen är det den begränsningen som skall användas.

Figur 2.13 a) visar på vilka avvikelser som kan uppstå vid transfereringen mellan CAD ritningen och hur 3D-utskivet objekt blir mer eller mindre deformerat och kan ibland till och med förorsaka ett brott. Noggrannheten har visa toleranser och på sikt bör dessa toleranser ner till en nivå på ± 1 eller 2 mm. Kvalitén skall vara så bra att "det skall bara vara att måla väggen", dvs samma kvalitét som en gipsvägg. Figur 2.5 b) visar vägg tjocklek enligt 3D-printer och beskriver vägg tjocklek och relationen till nozzle's tjocklek. Vid 3D-printing ska nozzle's storlek ge möjligheter till att fler lager av utskrivet material skapar väggens tjocklek. c) visar en sida på ett 3D-utskrivet objekt i betong och visar på de utmaningar och problem som kan uppstå där reologin med olika nivå på viskositet i blandningarna, ger ytor som avviker i jämnhet.



Figur 2.13, Exempel på felaktigheter vid transformering data från CAD ritning. A) oönskad deformation och brott [7]. B) otillräcklig definition av tjocklek i relation till munstycket [8] c) ojämn vägg sida, här utskrivet av ConcretePrint

2.8.5 Lagerskift

Utmaningar uppstår även när printern skall göra lagerskift, dvs byta lager för att fortsätta utskriften. Det existerar en metod där man printar kontinuerligt och lagerskift förekommer inte utan höjden ökar konstant. Det kallas för "vase mode" Vase mode. Begreppet vase mode förekommer ofta som en inställning i lagergenereringsprogramvaran, den sk slicern.

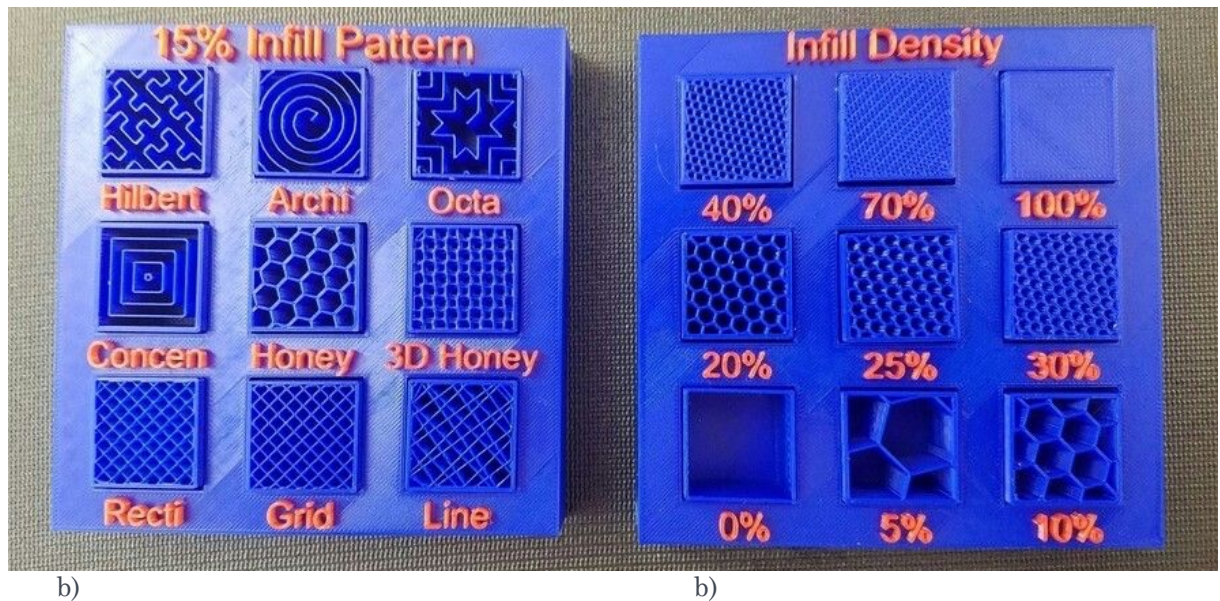
Däremot vid traditionellt lagerskift uppstår relativt ofta kvalitetsbrister genom att hastigheten ändras vid byte av lager. Inom 3D-utskrift i plast används ofta en metod att "lima" ihop lagren vid lagerskift som kallas Z-söm. Skrivaren utför en rörelse som är att likna en söm. Detta förfarande ger dock oregelbundenheter vid lagerändringen.

2.8.6 Ifyllnadsmönster och densitet

Vid traditionell 3D-utskrift i plast eller i andra material brukar väggarna användas för att skapa en begränsning. För att minska materialåtgången och göra detaljer mindre tunga fylls inte inre

strukturer med annat material, för tex värmeisolering av ytterväggar. I stället används olika mönster för att fylla insidan. Programvaran som genererar lagren eller skrivarmodellen har möjlighet att skapa dessa mönster som fyller utrymmet, se Figur 2.14 visande olika ifyllnads alternativ (infill patterns) och hur densiteten hos strukturen påverkas. Dessa inställningar kan utföras eller justeras i slicer-programvaran.

När det gäller 3DCP vill man enligt ovan gärna fylla utrymmet mellan inner- och yttervägg med isolering. Samtidigt kan konstruktionen kräva förbindelser mellan väggarna av bärighetsskäl för att få samverkan. I dagsläget finns dock inget standardiserat, idealt, ifyllnadsmönster som fungerar på önskvärt sätt vid husbyggnation med betong.



Figur 2.14 S k fyllnads mönster (infill patterns) som fyller utrymmet i en utskriven struktur (a) och hur densiteten påverkas (b). Parametrar som ställs in i programvaran [8].

3 PRAKTISKT ARBETE

Projektets målsättning var enligt kap 1 att genomföra praktiska tester av konstruktioner med 3D-utskrivna betong, enligt följande detaljering enligt kap 1:

- genom praktiska tester skapa erfarenheter, konstruktionsmodeller och utveckla utskriftsmetoder
- titta på husets termodynamik, dvs hur isolering ska utformas i väggar vid olika former av väggkonstruktioner och hur utformningen påverkas av köldbryggor mm
- undersöka hur betongrecept kan behöva justeras med avseende på typer av konstruktionsdelar
- skriva ut ett helt Attefallshus på plats med den nya 3D-printern som ConcretePrint utvecklats.

I projektet har fokus varit att kunna påvisa att det är praktiskt genomförbart att 3D-printa en huskonstruktion och möjligt att lösa olika typer av installationer och isolering av väggkonstruktioner. Däremot har konstruktiva aspekter i detta läge gjorts schematiskt. Se bilaga A och B

Det mesta av arbetet i projektet har genomförts under perioden november 2020 till september 2021. Till att börja med utfördes en hel del laboratoriearbete för att hitta en optimal betongsammansättning för 3D-utskrift. Under tiden gjordes även en hel del testutskrifter i mindre skala för att utreda om egenskaperna hos de framtagna betongblandningarna var lämpliga. Mycket arbete krävdes även för att lösa styrningen av 3D-skrivaren innan mer fullskaliga utskrifter av väggar och andra detaljer kunde ta vid. Utskriften av Attefallshuset utfördes slutligen under sommaren 2021.

I kapitlet sammanställs en del av ovan nämnda arbete.

3.1 Betongblandning

Innan försöken startades upp ägnades stor energi åt att prova ut lämplig betongsammansättning. Jämfört med betong som används vid vanliga gjutningar ställs här betydligt högre krav av helt annan karaktär. För att 3D-utskrift skall vara möjlig krävs, enligt tidigare redogörelse att materialet har en sådan konsistens att den kan pumpas till skrivaren och skrivhuvudet, det skall hålla formen från munstycket och det skall styvna snabbt för att kunna bära last från nästkommande lager. Betongmaterialet måste alltså vara *pumpbart, extruderbart och byggbart* (Se avsnitt 2.8.2).

Redan innan projektet startades hade ConcretePrint under våren 2020 tagit fram en basblandning som fungerade för att skriva ut en större cylinder, se Se Figur 3.1. Blandningen som togs fram utgjordes av 25 kg cement typ CEM I, 59 kg sand 0/4 och 12,5 kg vatten.

Vid mätning två utskriftsdagar har densiteten varit ca 2100 kg/m³ eller ca 2,1 kg/liter.

| Mätning | Densitet kg/m ³ | | Tryckhållfasthet MPa | |
|------------|----------------------------|------------------------|----------------------|----------|
| | 7 dagar | 28 dagar | 7 dagar | 28 dagar |
| 2021-04-12 | 2120 kg/m ³ | 2140 kg/m ³ | 26,6 MPa | 34,4 MPa |
| 2021-04-19 | 2090 kg/m ³ | 2100 kg/m ³ | 26,3 MPa | 31,5 MPa |

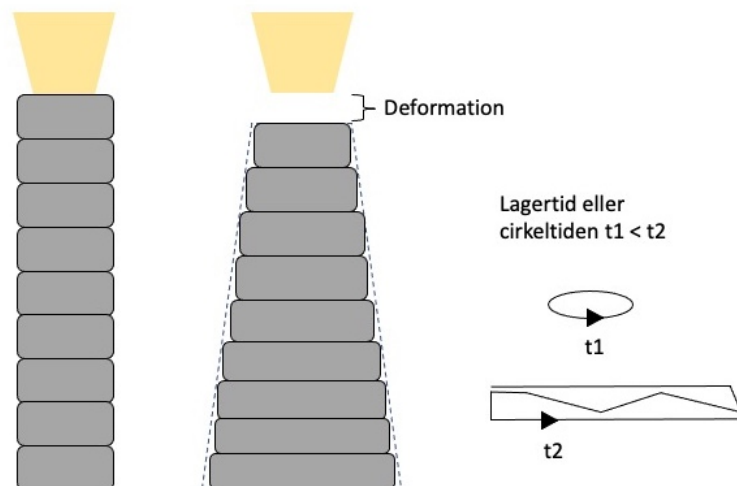


Figur 3.1 Visar ConcretePrints 2 meter i diameter 3D-printde cylinder från våren 2020. Resultatet var mycket låvande men utmaningar fanns, tex går det att se på cylindern att på de övre lagren är kvalitén på det printade något ojämnt.

Det har varit nödvändigt att justera blandningen under projektet för olika egenskaper som skapat problem vid utskriften. Erfarenhet har inhämtats mellan hur lång tid det tar att skriva ut ett lager och 3D-modellens komplexitet, den sk lagertiden eller cirkeltiden. Betongen ska ju möta uppställda egenskaper enligt tidigare. Men framför allt skall byggbarheten hinna uppnås innan tillräckligt många lager eller för mycket vikt/tryck deformerar de undre lagren, se Figur 2.8. Egenskaperna är:

- pumpbar
- extruderbar
- byggbar
- öppethållandetid

Byggbarhet och öppenhållandetid



Figur 3.2 Beskriver relation mellan lagertid, defromation och öppenhållandetid. Är tiden t_1 för kort hinna de lägre lagren inte stelna och objektet deformerar. Är tiden t_1 förlång riskerar påverka det öppenhållandet och det får till följd att hållfastheten mellan lagren minskar

Vid de praktiska testerna justeras byggbarheten genom noggrant tillsättande av vattnet i blandningsprocessen:

- Först blandats de torra ingredienserna i ca 2 min
- Sedan påförs $\frac{3}{4}$ delar av vattnet tillsammans med olika tillsatsmedel
- Efter det påförs den sista delen av vattnet under de sista minuterna av blandning

Vattenmängden, och även sandmängden, har justerats vid nästan varje blandning då sanden innehåller olika mängd vatten till följd av varierande ingående fuktkvot. Justeringar har också gjorts som en följd av att delmaterialens egenskaper har varierat, t ex beträffande siktcurvan hos det använda sandmaterialet.

Då betongen har handblandats i projektet (se Figur 3.3) uppstår lätt viss variation av betongens egenskaper. Detta ger upphov till en del av de oregelbundenheter som de utskrivna objekten får. Utan att ha tillgång till en färdig torrblandning där bara vattenmängden justeras är det svårt att få till en blandning som över tid håller rätt och jämna egenskaper

Byggbarheten är också beroende på hur snabbt nästa lager läggs på, dvs på hur lång tid ett lager eller en cirkel i konstruktionen tar. I en kommersiell produkt som ConcretePrint har fått möjlighet att prova under hösten (i.tech 3D utvecklad av Heidelberg Cement) finns det en maximal lager/cirkeltid på 9 minuter. Öppethållandetiden, eller tiden som betongen fäster vid nästa lager utan att hållfastheten påverkas, är 9 minuter. Byggbarheten påverkas också av materialhastigheten eller betongflödet. Vid vissa tillfällen har pumpbarheten påverkats. En sannolik förklaring kan vara att någon materialfraktion har förändrats och då påverkas reologin vilket i sin tur påverkar pumpbarheten.



Figur 3.3 Projektets uppställning för blandning och pumpande.

Pumpbarheten påverkas i hög grad även av pumpslangens temperatur. Här är det viktigt att beakta effekten av solinstrålning på en svart slang. Storleken på de satser som blandas och hastigheten vid pumpning är andra faktorer som har betydelse. Om för små mängder material pumpas per minut kommer delar av betongen att bli stillastående för lång tid. Detta leder i sin tur till att betongen styvnar i slangen. För att undvika detta har betongen aktiverats med hjälp av mekaniskt tillsatt energi. Framför allt har en vibratorstav använts för att hålla liv i betongen i pumptråget.

Betongflödet går att justera med ett vred som justerar pumpmotorns hastighet. Samtidigt beror flödet på hur sliten pumpens rotor och stator är. Det finns möjligheter att justera pumpens rotationshastighet uppåt, dvs flödet, när förslitningen gradvis blir större eller om blandningens pumpbarhet försämras. Idealt för en jämn vägg behövs samma materialflöde. Normalt printas en sträng som är 50 mm bred och 20 mm hög. I dagsläget används normalt en hastighet på någonstans mellan 60 - 80 mm per sekund eller ca 3,6 – 4,8 liter per minut. Det är ett litet flöde för den pump som har använts i projektet, se Figur 3.3 En ansevärd omfattning av justerande och provande av olika inställningar på pumpen har varit nödvändig för att hitta rätt.

Mängden av olika tillsatsmedel har justerats beroende på lufttemperatur, vattentemperatur och temperatur på slangen och eventuell solinstrålning.

På grund av det svenska klimatet har en metodik utarbetats där under vår, höst och vinter, då slangen är kall och underlaget är kallt, mängden accelererande tillsatsmedel har ökat i de första blandningarna beroende på materialåtgång per lager. När friktionen i slangen gjort den varm eller lagerhöjden nått ca 10 lager har mängden gradvis minskats. Utskrift kan ske och har skett under testerna ner till någon minusgrad. Ett problem vid kallt väder är att vattnet som används för att väta slangen i förväg fryser på insidan av slangen och kan ge upphov till pumpstopp. I projektet har tester genomförts i syfte att kyla en varm slang med kallvatten men en liknande metod skulle helt klart även kunna tillämpas för att värma slangen, se Figur 3.4



Figur 3.4 Exempel där en vattenslang har använts för att kyla slangen. Den kan naturligtvis användas för att värma slangen vid någon minusgrad.

Justeringar har också gjorts då material har haft olika egenskaper beroende att levererat material har en viss tolerans kring levererat materials innehåll. Tex beroende olika innehåll i materialkurvan för materialet.

3.2 Mjukvaruförutsättningar för 3D-utskrift

3D-utskrivbara objekt har etablerats där vissa modeller är skapade i CAD-program. Andra modeller är skapade direkt i styrkod / gcode (se 1.6) som är ett lågnivåspråk vilket hjälper att styra detaljerna direkt på 3D-skrivaren. Gcode för ett objekt genereras då man använder en slicer för att slicer/skära upp en 3D-modell.

Mjukvara för lagergenerering, som delar upp 3D-modeller, finns i många varianter, alltifrån dyra expert-programvaror ner till shareware och freeware. ConcretePrint har under åren provat olika mjukvaror med varierande egenskaper. Det har visat sig sedan flera år att ofta måste 3D-modellerna vara utformade på specifika sätt för att ge rätt utskrifter.

På sikt bör slicer mjukvarorna antingen kompletteras med detaljer för att kunna skapa gcode för 3DCP. Eller så måste en ny slicer skapas som hanterar de unika förutsättningar som existerar inom 3DCP.

3.3 Utskrift av olika typer av väggkonstruktioner

I projektet har tre olika väggkonstruktionstyper testats, se Figur 3.5 och Figur 3.6. Väggkonstruktionen i och Figur 3.5 a) betraktas som en referensmodell. För att kunna skapa väggar längre sträckor kan det behövas förbindelse emellan medan vägg-delarna som visas i Figur 3.5 b) och Figur 3.5 c) valdes vid fullskaleutskrift bl a på grund av högre stabilitet och flexibilitet.

Den enkla väggen har en okomplicerad form som gör den enkelt att skapa i ett CAD-program. På grund av dess form saknar väggen en stabilitet vid utskrift som under vissa förhållanden kan bli utmanande. Väggen kan tex trilla ihop på grund av en kort vind pust. Fördelen är att på grund av enkelheten av dess form går tillverkningen snabbt, vilket kan vara positivt vid olika former av tester.

För den enkla väggen bör det finnas något som håller väggen upprätt. Man kan naturligtvis göra någon form av konstruktions- och hållfasthetsberäkning för hur lång sträcka som man kan använda den enkla väggen utan någon större risk. Dock bör det påpekas att den största risken för kollaps på grund av någon mindre obalans troligen råder under uppförandet innan betongen har hårdnat. Risken är också avhängigt av andra egenskaper som tex betongens byggbarhet.

Stålpinneväggen skapas på samma sätt som enkla väggen men under utskriften stoppas tvärgående stålpinnar in manuellt. ”Pinnarna” ser ut som en häftklammer, dvs. som ett U. Detta är för att uppnå större hållfasthet mellan de utskrivna lagren. Höjden på stålpinnarnas skänklar är ca 60 mm så att 3 på varandra utskrivna lager involveras och skapar en bättre hållfasthet/vidhäftning i betongen. Bredden på U:t är från centrum på den ena väggen till centrum på den andra väggen, se Figur 3.6. Man kan se att stålpinnen är klippt från ett bi-stål. U:et skapas genom att änden på stålpinnen böjs med en radie så att hållfastheten inte påverkas.

I projektet valdes att manuellt stoppa in häftklammerliknande stålpinnar enligt ovan i ca var 15:e lager (dvs 300 mm) med ca 1–1,5 meters avstånd. Detta visade sig vara tillräckligt för att uppnå en stabilitet som gör att den 200 mm breda väggen blev stabil och bärkraftig.

De sammanbindande stålpinnarna skall uppfylla två funktioner:

1. Vid tillverkningen, under 3D-utskriften skall de stödja den ännu inte hårda väggen som är skör på grund av att betongen inte har stelnat.
2. Hållfasthetsmässigt för en skiva som står upp måste det finnas ett stöd så att den inte välter. Med stålpinnarna åstadkoms en samverkan mellan inner och yttervägg.

Även om det har visat sig fungera praktiskt i de väggar som har skrivits ut i projektet kommer beräkningar och sannolikt även mer eller mindre fullskaliga provningar krävas för verifiering i framtiden innan metodiken kan godkännas.

Zig-zag väggen som visas i Figur 3.5 c) är mer komplicerad att skapa. Det finns inte någon algoritm på samma sätt som beräkningarna av fyllnadsmönster, se Figur 2.14, för att skapa en zig-zag

geometri. Det går säkert att på sikt modifiera någon av de befintliga metoderna för fyllnadsmönster för att klara av att skapa zig-zag mönstret. Idag måste Zig-zag mönstret ritas för hand. Vid alla installationer i väggen kommer intressanta problem visa sig. Även detta måste justeras för hand. En fördel med att tillämpa zig-zag mönster är det inte krävs någon armering för att länka samman den yttre och inre väggskivan. Man sliper därmed ett moment som idag sker manuellt.



a)

b)

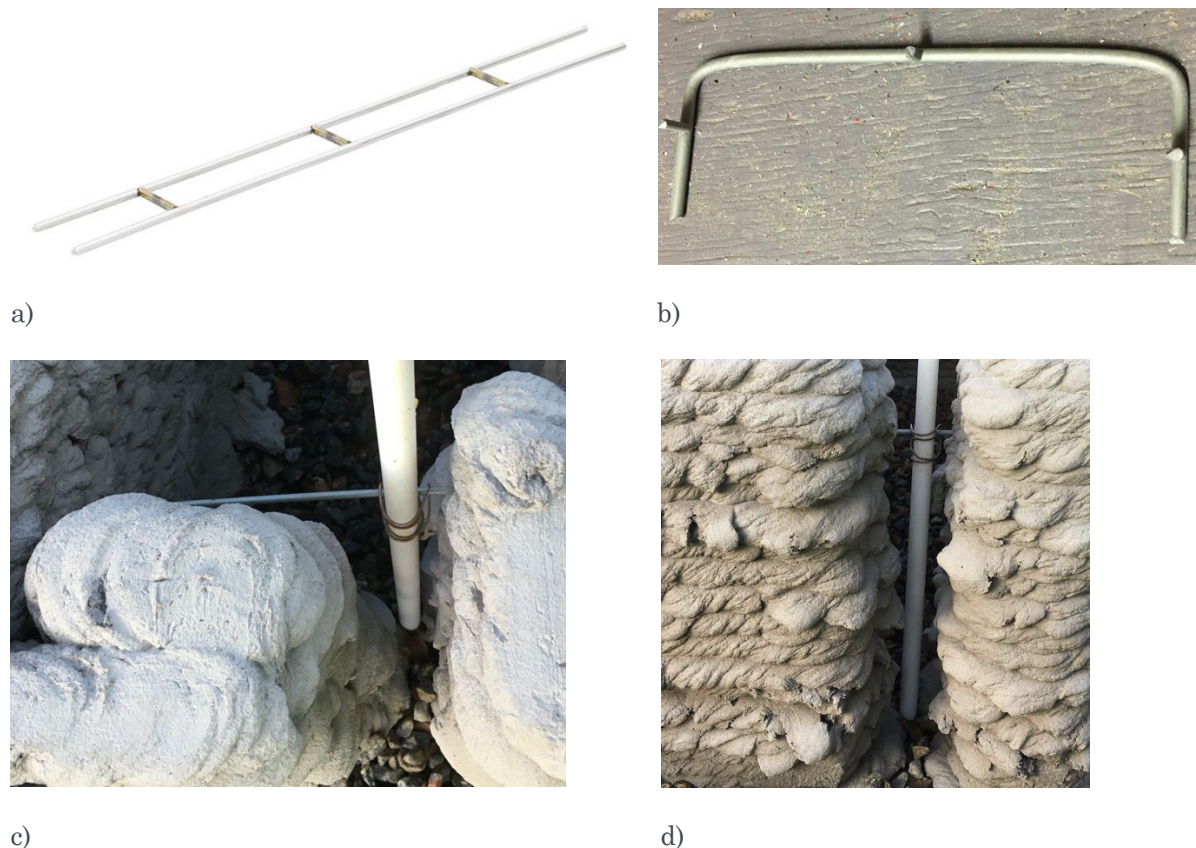
c)

Figur 3.5 Väggtypkonstruktioner. a) enkel vägg. b) vägg förstärkt med metallpinne mellan inner och yttrevägg. c) zig-zag vägg – den förbindande zig-zag vägg ökar styrkan men påverkar den termiska konduktiviteten på ett negativt sätt.



Figur 3.6 Detalj på väggtyp b) i Figur 3.5 med stålstång som förbinder inner och yttrevägg.

Projektet har använt armering, så kallad murarstege eller bi-stål se Figur 3.7, för att ge stadga åt inner- och yttervägg under utskriften i synnerhet innan cementmixen har stelnat men också för att ge ökad hållfasthet i väggsektionen i allmänhet. Murarstegen kan också användas för att fästa installationer.



Figur 3.7 Armering typ murarstege. a) visar ett bi-stål b) böjd som ett U med 6 cm långa ändrar som ska sticka ner i 3 lager av betong för att öka hållfastheten. c) och d) visar installation av el rör i en murarstege

3.4 Isolering och installationer

3.4.1 Isolering

Isolering sker idag på ett antal olika sätt antingen som skivor eller som lös isolering. Skivor stoppas in vid byggnation medan lös isolering normalt sprutas in på olika sätt. Hur 3D-utskrivna betongväggar isoleras beror i stor utsträckning på väggkonstruktionens utformning och isoleringskrav.

I det Attefallshus som skrevs ut inom det aktuella projektet användes stålpinnevägg och zig-zag vägg enligt ovan. Därmed lämpade det sig bäst att använda någon form av lös isolering. En annan faktor som påverkade valet av isolering var att det var nödvändigt att flytta huset med kranbil från printplatsen till en annan plats 30 meter bort. Därmed valdes ett isoleringsalternativ som bidrog till att öka konstruktionens stabilitet under transporten. Valet blev att använda polyuretanskum för att ge maximal stadga mellan ytter-och innervägg.

Då huset väger över 10 ton krävdes noggranna förberedelser för att flytten skulle ske säkert utan sprickbildning, bl a krävdes det 15 kraftiga spännband och en större kranbil men också en fast och

stum isolering som vidhäftade ordentligt mellan väggarna. En lärdom vid valet av polyuretanskum är att vid appliceringen bör man skydda printern och hus för stänk mycket noggrant för att undvika tidsödande städarbete.

3.4.2 Montering av dörrar och fönster

Där dörrar och fönster ska monteras behövs större monteringsutrymme så att monteringskruv kan fästas i de 50 mm tjocka väggskivorna. Med ett litet vinkelfel vid monteringen med tex skruvar är det lätt att väggen spricker även om man förborrar. Därför bör det skapas ett monteringsstöd som är bredare än 50 mm, se Figur 3.9. Fönstren kan därefter monteras på traditionellt sätt, antingen med plugg eller med självskruvande betongskruvar, se exempel i Figur 3.8.



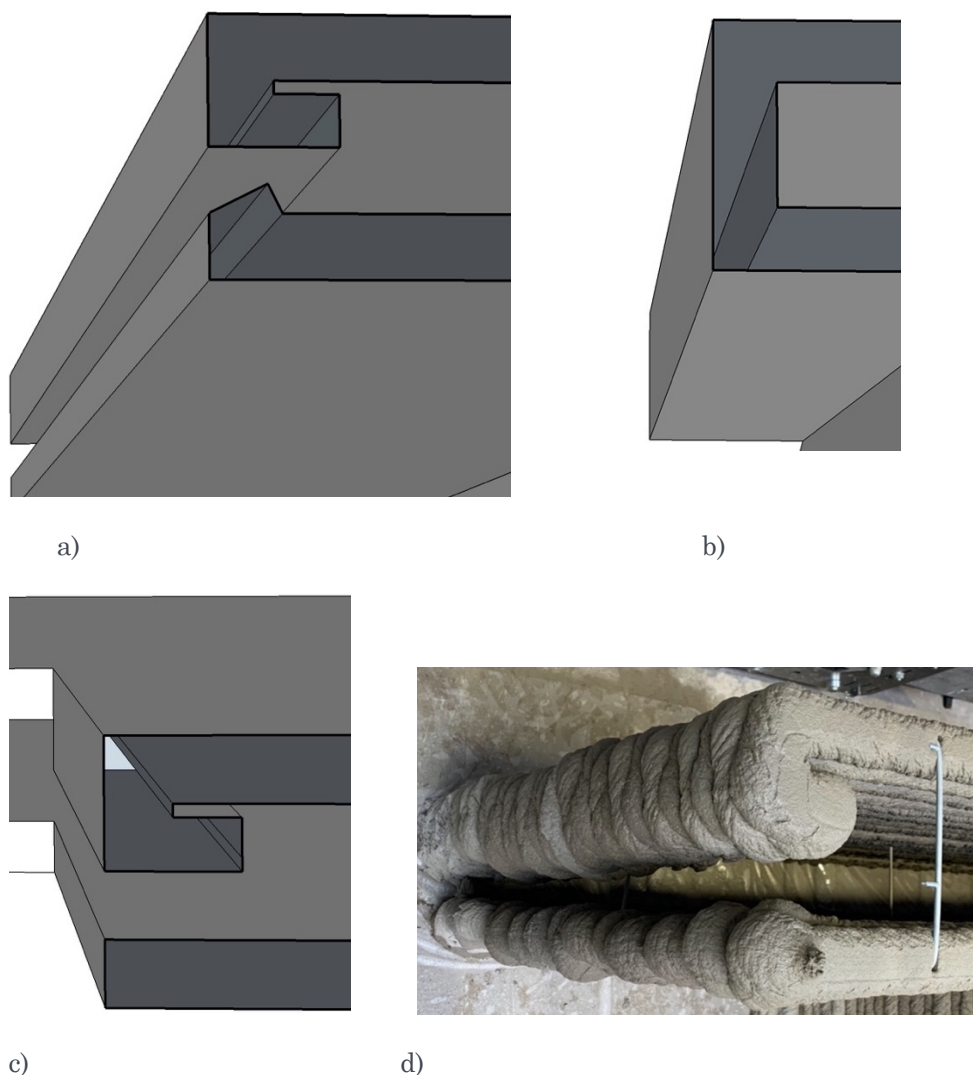
Figur 3.8 Exempel på fäst metod med skruv

I framtiden kan man fundera på alternativa fastsättningsmetoder. Det har mycket att göra med om precisionen av det som faktiskt skrivs ut ökar. Då kan justeringsmått kring fönster minskas. Idag ingår det i processen att det finns ett hålmått som är ca 10 mm större på varje sida av fönster och dörrar. Då 3D-utskriftstekniken utvecklats och precisionen närmar sig ± 1 mm kan hålmåttet minskas till att vara 3 mm på varje sida. Nya fastsättningsmetoder kan tas fram. Det skulle kunna vara möjligt att limma in fönstret med den kringliggande tätningsfogen som används för att vattentäta mellanrummet mellan betong och fönster.



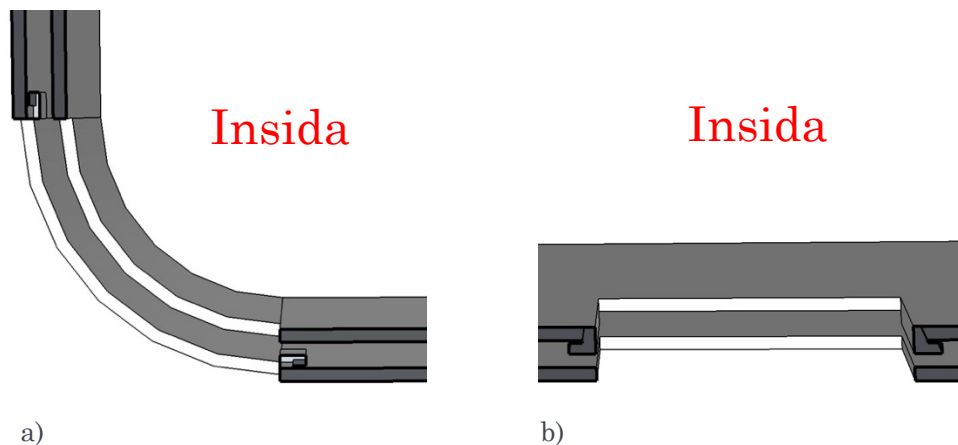
Figur 3.9 Projektet har fokuserat på att skapa en bruten köldbrygga som är flyttbar där man samtidigt skapar möjlighet för montagestöd för fönster och dörrar.

I Figur 3.10 redovisas några olika metoder som kan tillämpas för att lösa anslutningen mot en dörr- eller fönsteröppning. Det enklaste sättet är att helt enkelt koppla ihop den yttre och inre väggskivan enligt b). Problemet är att det då bildas en köldbrygga genom väggen. Ett bättre alternativ är att lämna en öppning enligt a) eftersom man då bryter köldbryggan. En CAD-ritning som slutligen tillämpades vid utskrift av Attefallshuset redovisas i c) medan exempel på färdigt resultat visas i d). Man kan se att mjukvaran som används för att slicca CAD-modellen inte tolkar detaljerna riktigt som de skall för att vinklarna blir fel på vartannat lager av den inböjda monteringsdetaljen i bild d)



Figur 3.10 Visar tvärsnitt på två olika sätt att montera dörr. a) med bruten köldbrygga. b) utan bruten köldbrygga. Teorin var att man skulle kunna skära ett tunt snitt i b) för att skapa ett par mm tunn brytning av köldbryggan. c) och d) visar på en CAD ritning av en modell och den i verkligheten utskrivna detaljen. Man kan se att mjukvaran som används för att skiva CAD-modellen inte tolkar detaljerna riktigt som de ska för att vinklarna blir fel på vartannat lager av den inböjda monteringsdetaljen i Figuren d)

Fönster och fönsterdjupet i relation till ytterfasaden har stor del att göra med gestaltningen och arkitektens känsla och vilja. Med rätt utformning kan både djupt eller ytligt liggande montage hanteras. Under projektet testades flera olika typer av metoder. Figur 3.11 visar exempel på olika metoder.

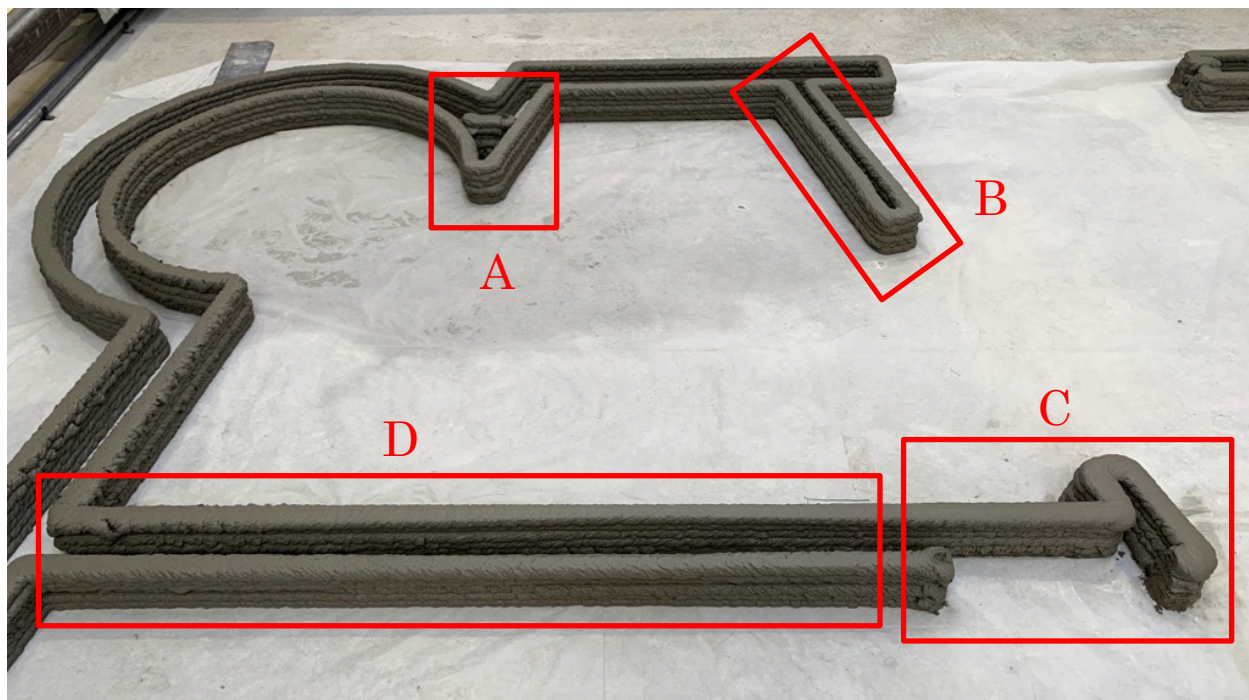


Figur 3.11 a) Visar på exempel på monteringsstöd för ytligt monterade fönster. Fönster som är monterade nära ytterväggens yta. b) visar motsvarande för djupt liggande montage där fönstret monteras nära innerväggen, insidan.

I de fönster som projektet senare erhåller av fönster och dörrtillverkaren NorDan har en annan monterings metod valts men på grund av andra avvägningar.

3.4.3 Installationsmontage

I huset som printades skapades ett antal olika möjligheter för att montera olika typer av installationer, se Figur 3.12. Installationer av vatten kan t ex förläggas i en vertikal kanal enligt A medan elinstallationer kan förläggas i innerväggar som printas med 20-30 mm mellanrum mellan väggsnivorna (B). Installationsskåp kan fällas in i väggen genom att man helt enkelt lämnar en öppning i den inre väggskivan enligt C. Lite större installationer, typ vattenrör, kan förläggas i ytterväggar där avståndet mellan väggsnivorna är 50-80 mm (se D i figuren).



Figur 3.12 Visar några olika möjligheter till installationer. A visar kanal för vattenrör, B el-rör, C skåp för vatteninstallation och D vägg med ett större mellanrum för installationer.

3.4.4 Montering av vattenrör för olika köks- och badrumsinstallationer

I projektet har ett utrymme skapats där det går att installera ett installationsskåp för tex en golvvärmeinstallation, se Figur 3.13. Normalt är golvvärmen och vattnet redan installerat i plattan. Det skapar en utmaning vid 3D-utskrift eftersom golvvärmerören som sticker upp ur plattan kan komma att påverka 3D-skrivarens munstycke. Det måste finnas tillräckligt med plats att komma åt att skriva runt rören om det skall finnas väggar där golvvärmen kommer upp. På samma sätt kommer det att vara en utmaning att se till att övrig utrustning inte krockar med de uppstående golvvärmerören. Ett liknande problem kommer att uppstå vid uppstickande armeringsjärn ur plattan, vilket kan vara aktuellt om det exempelvis krävs pelare eller andra konstruktionsdetaljer



Figur 3.13 Visar en öppning där det går att fästa ett installationsskåp för tex golvvärme eller vatten.

3.4.5 Montering av el via el-dosor för tex strömbrytare

Inom projektet har några olika sätt att installera el i 3D-printad vägg provats. Installationen bör vara dold men kan inte göras på samma sätt som i ett konstruktionssystem där man kan gå från punkt till punkt. Installationen blir mer av stjärntyp. Dvs varje dragning går till en enhet. Men med den utveckling som sker inom intelligenta hem kanske den typen av el-dragning blir mindre vanlig. Ljusbrytare mm kanske inte behöver kontakt med el-dragningen utan belysning mm blir mer relä- och scenariestyrt.

Vid installation med dosa måste dosan vara djup då väggen är ca 50 mm tjock.

Alternativt drar man elen i väggen som man gör i tex Tyskland. Där används inte skyddsrör utan man förlägger el med en gummikabel. Den formen av installation ger inte den flexibilitet som kan uppnås med dragning i rör. Dessutom måste väggen putsas efteråt.

Effektivast skulle man kunna printa rördragningskanalerna också. Dvs att man i väggen gör ett enskilt "rör" eller kanal för installationerna av betong.

När betongen fortfarande är plastisk, dvs inte har stelnat, är det enkelt att med en diamanthör skära ut hål för el-dosor se Figur 3.14. I framtiden kommer denna process att vara robotiserad, dvs att 3D-skrivaren/roboten gör de hål som behövs. Då kommer en högre exakthet och precision finnas. Vidare kan man fråga sig om det behövs el-dosor eller om det är bättre med fastsättning rätt i betongen. Detta för att spara på användandet av plast. Betong brinner ju inte och är de kommande el-kanalerna tillräckligt bra så bör det räcka som både brandskydd och kanaler för att dra elledningar i.



a)

b)

Figur 3.14 a) Visar exempel på borrhåll i icke hård betong och b) hur det ser ut när det är borrhållat. I b) har betongen rätats till genom att ytan är riven med en är betongen och så .

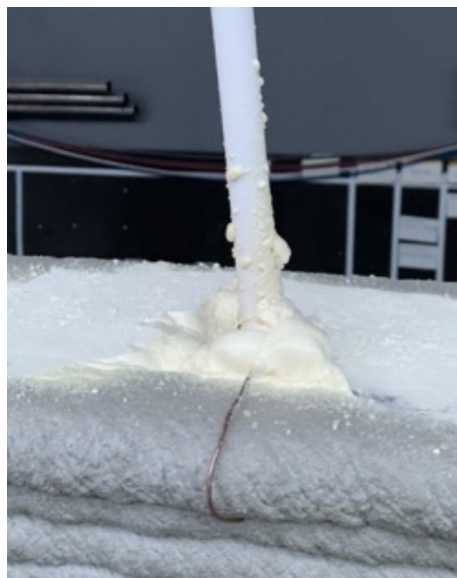
Figur 3.15 a) visar vägguttag och lampknappar. Den övre vänstra dosan är installerad i mellanrummet som visades ovan vid markering B från Figur 3.12. Figur 3.15 b) visar hur röret från installationer i vägg kommer upp mellan inner och yttervägg (Ståltråden har använts för att se till att röret hamnade närmast innerväggen detta för att kunna på ett enkelt sätt ta ut röret vid hammarbandet)

Vid väggens översida, där el-rören kommer upp mellan inner och yttervägg se Figur 3.15 b), måste de böjas och dras vidare. Elen bör dras i samman nivå som glespanelen. Glespanelen monteras på takstolarna och samtidigt måste takstolarna monteras på väggarna. Det skall fästa en diffusionsfolie

för att förhindra kondens. Ett sätt att montera takstolar så att el och diffusionsspärr går att montera vid betongvägg är att använda ett hammarband.



a)



b)

Figur 3.15 a) visar vägguttag och lampknappar. b) visar hur röret från installationer i vägg kommer upp mellan inner och yttervägg (Ståltråden har använts för att hålla fast el-röret vid insidan av väggen när isoleringen sprutades in. Detta för att se till att röret hamnade närmast innerväggen så det blev enkelt att ta ut röret vid hammarbandet. Se Figur 3.16 a).

Hur hammarband används och utförande med elrör som sticker upp genom hammarbandet går att se i Figur 3.16. Den väggmodell som projektet använt är en väggprofil med ett på 200 mm djup. För att skapa ett hammarband har en 170 mm regel används. Se Figur 3.17. Detta av följande orsaker:

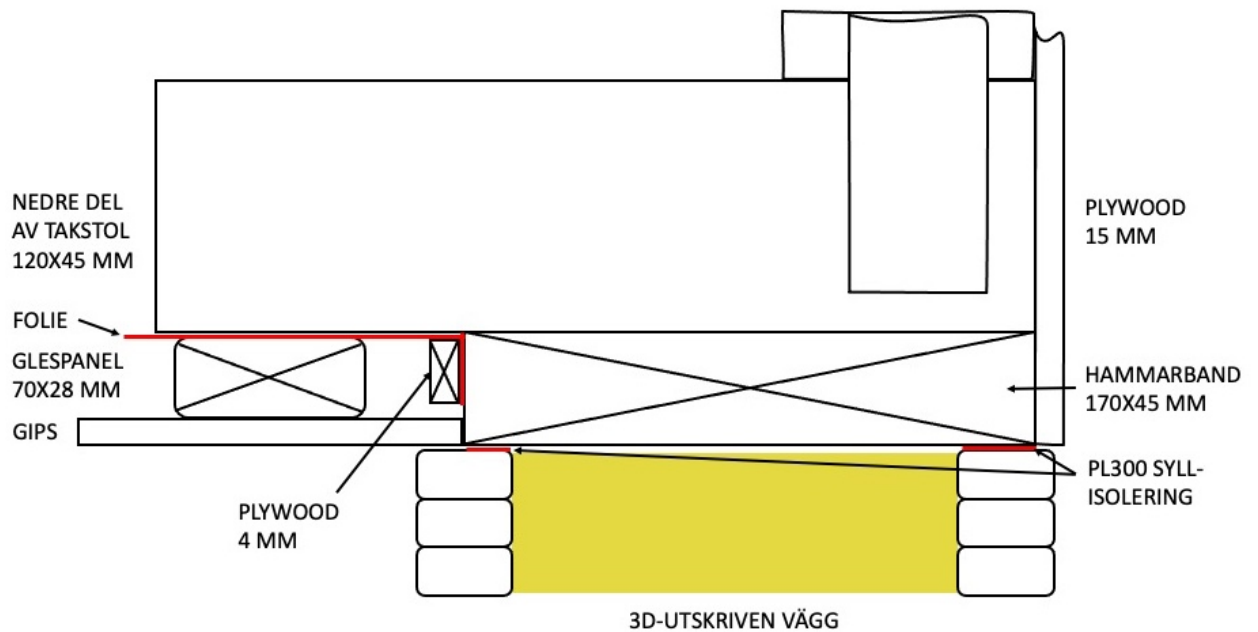
1. Ett effektivt sätt att montera takbjälkar på de två 50 mm 3D-utskrivna väggarna. Takbjälkarna kan därigenom skråspikas med 4-6 st 95 mm spikar sitter takbjälken fast i hammarbandet
2. Med hjälp av hammarband kan diffusionsspärr monteras mot hammarbandet och bli tät. Detta är viktigt då sprutisoleringen skall stanna på rätt sida om diffusionsspärren.
3. Genom att använda ett hammarband kan glespanelen monteras mot takbjälkarna och ändå går det att skjuta in gipsskivan ovanför de 3D-utskrivna väggarna. Det gör installationen av gipsskivor enklare och effektivare om man skriver ut oregelbundna former eller friformsarkitektur. För att få till en tätning mellan 3D-utskrivna vägg och gipsskiva i taket bör det räcka med en mjukfog.
4. Hammarbandet sticker ut någon mm utanför ytterväggen för att det skall vara enkelt att montera konstruktions plywood på utsidan som sarg på takstolarnas sidor.
5. Med en 170 mm regel som sticker ut någon mm utanför på utsidan och med en 200 mm vägg finns det ca 30 mm på insidan där gipsskivan kan ligga in över ytterväggen. Det gör det enkelt att montera gips.



a)

b)

Figur 3.16 Visar hur el-rör kommer upp ur hammarband. B) är exempel på en modell av en el-kanal som är utskrivet inne i en vägg.



Figur 3.17 Ritning som beskriver monteringen av hammarband och hur glespanel och gips blir ett effektivt system för att skapa tak till oregelbundenheten som 3D-utskrivna väggar skapar

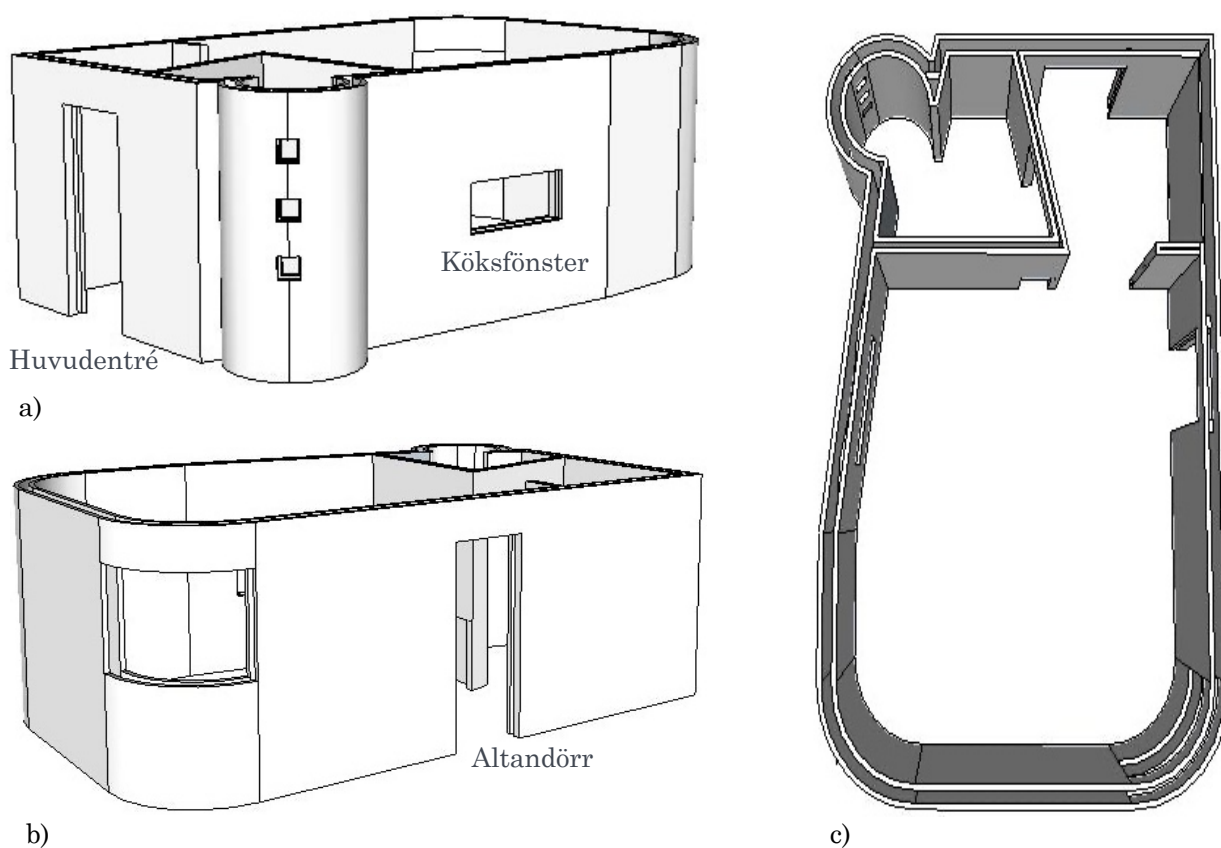
3.5 3D-utskrift av Attefallshus

Arbetet under våren 2021 ledde således fram till möjligheten att skriva ut ett Attefallshus.

Många funderingar fanns kring hur ett hus skulle skapas och vilka egenskaper som skulle finnas med och undersökas. I projektets mål ingår ett antal viktiga tekniska detaljer och installationer som behövde utredas.

Arbetet med att rita ett Attefallshus behövde gå snabbt. Kunskap om kommande mjukvaruproblem och tiden det skulle ta tid att lösa dessa gjorde att valet föll på CAD-verktyget SketchUp 2017. SketchUp 2017 är enkelt att använda och som användare går det snabbt att justera modeller etc utan att vara expert.

Ett Attefallshus med två större fönster, varav ett böjt och ett vanligt, två dörrar, en vanlig och en altandörr, samt tre mindre fönster som kommer göras i betongglas ritades. Fönstrens och dörrars faktiska montering är en viktig detalj att utreda för projektet. I tankarna kring att rita och sedan skriva ut ett hus har funnits med att prova intressanta och utmanade former. Någon av friforms arkitekturen alla möjligheter behöver utredas och verkligen provas i stor skala. Viktig var att få med en rundad former i planet. Dubbelkrökta ytor är nästa projekts utmaning. Samtidigt prova installation av kök och badrum och hur de kan inredas. Ett badrum skall ju förses med någon form av tätskikt. Dvs verifiera lösningar för de i projektet uppsatta tekniska installationerna.

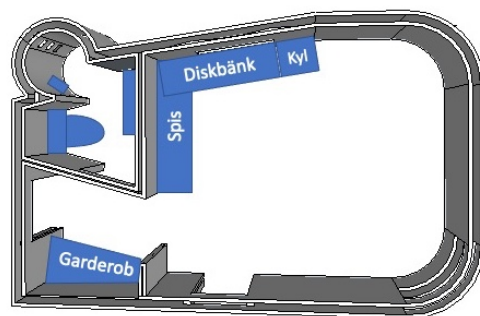


Figur 3.18 a) och b) visar CAD-modellen ur två perspektiv. c) visar rumsdistributionen från modellen ovanifrån.

De tekniska installationerna och konstruktionsdetaljerna behöver finnas på plats så att förberedelser för installationer och el- och vattendragningar mm kan finnas med i CAD-modellen. I Figur 3.19 - Figur 3.24 visas CAD-modeller där viss inredning, vatten, el och ventilation har indikerats. I det aktuella projektet är inte alla dragningar och installationer utförda eftersom ambitionen framför

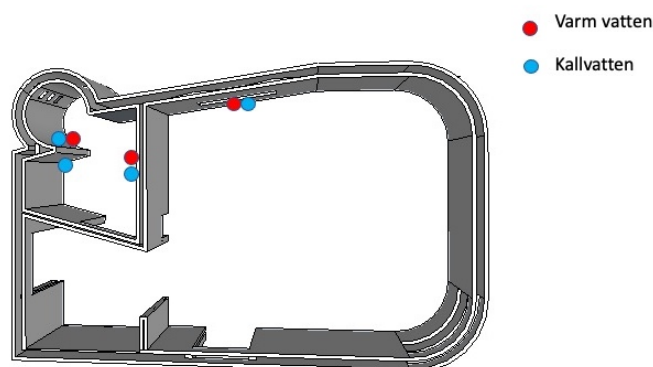
allt var att printa ett hus i betong. Dragningen för vatten är förberedd genom att kanaler har skapats där det skall gå att dra vatten till dusch och toalett och genom att innerväggen mot badrummet har tillräckligt med utrymme för att få plats med vattenrör.

Inredning



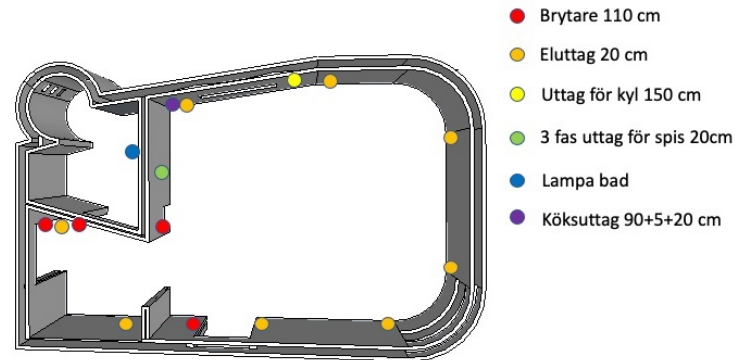
Figur 3.19 Installationer av toalett, handfat, dusch, kök med spis, diskbänk, kyl. (Insättande av diskmaskin är möjlig under diskbänk).

Vatten



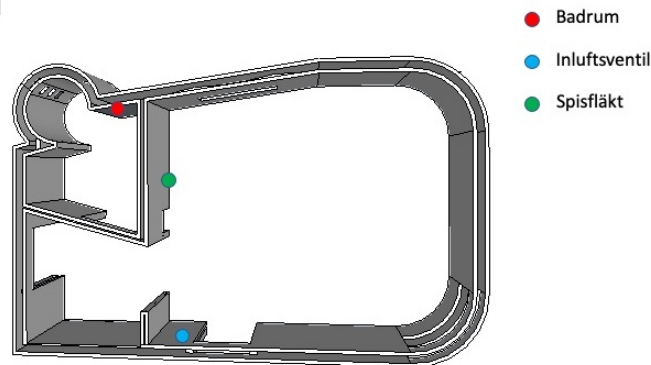
Figur 3.20 Installation av vatten sker på fyra ställen i huset. Det finns en vertikal kanal mellan duschen och toaletten för vattenledningar till duschblandaren och till fixturen för WC. I väggen mellan badrum och rummet finns ett mellanrum på 30-50 mm för att kunna att dra vatten rör

El



Figur 3.21 El installerad i väggarna. Färgerna markerar vart och vilken höjd installationen av el-dosor skall ske. I väggar som är en yttervägg dras el innan isoleringen genomförs.

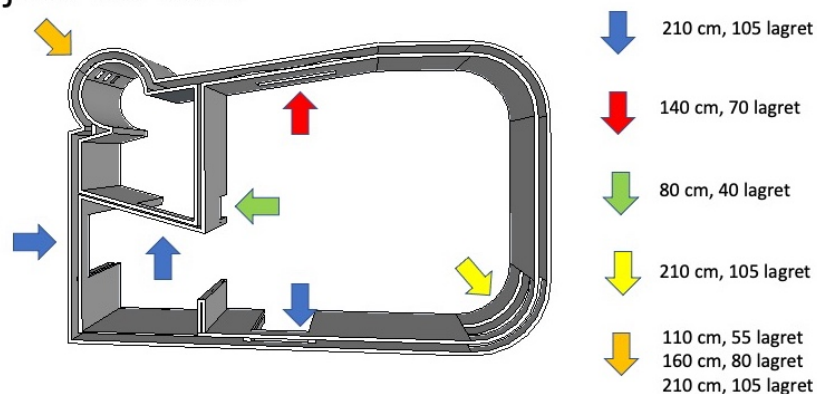
Ventilation



Figur 3.22 Visar installation av ventilation. Det ska finnas en spisfläkt som tar hand om stekos etc. (grön). Vid altandörren, (blå), sitter en inluftsventil och i badrummet finns en utluftsventil, (röd)

I Figur 3.23 redovisas höjder för samtliga öppningar. Här indikeras både mått i höjddled samt lager.

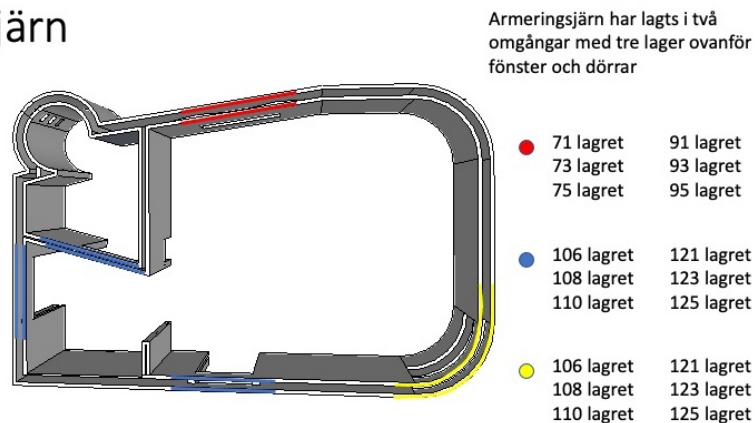
Lagerhöjder för stöd



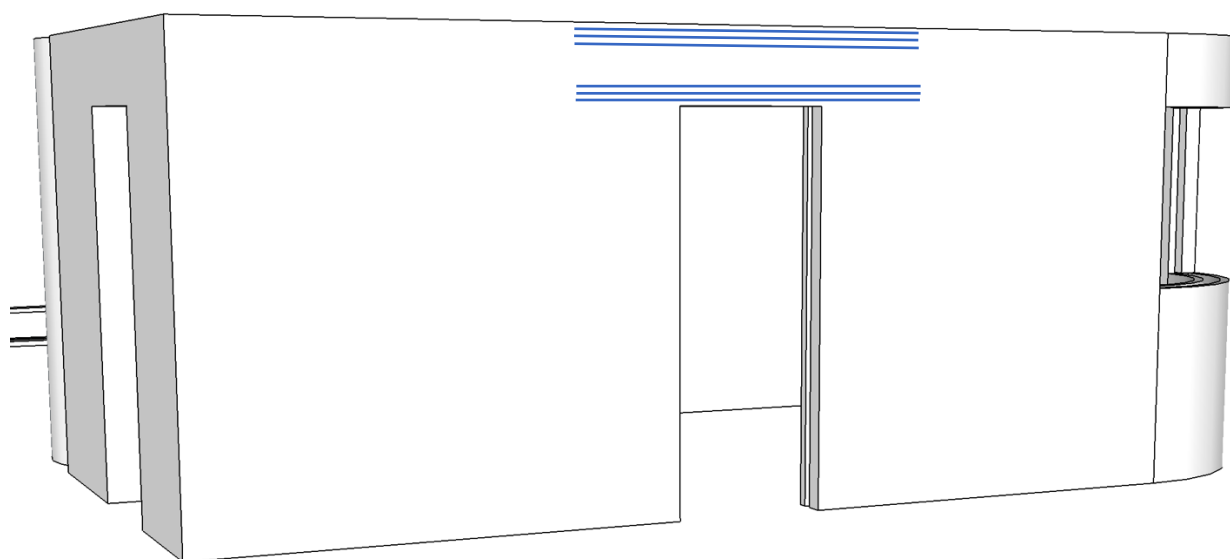
Figur 3.23 Pilarna indikerar var stöden för ingångar dörrar (blå pilar), köksfönster (röd pil), installationsskåpet för golvvärme & vatten (grön pil), välvda fönstret (gul pil) och de fyrkantiga badrumsfönsterna (orange pil) ska finnas.

För att säkerställa tillräcklig bärförmåga placerades armeringsstänger ut över fönster- och dörröppningar. Armeringen utgjordes av två raka armeringsenheter utlagda i sex lager över varje öppning. Tre nere och tre uppe, se Figur 3.24 och Figur 3.25. Det bör påpekas att beräkningar inte har utförts för att verifiera att armeringsutförandet är korrekt. Detta bör göras inför kommande projekt.

Armeringsjärn



Figur 3.24 Redovisning av kompletterande armeringsjärn . Färgerna visar på vilket lager som armeringen är inplacerade. Exempelvis röda prickerna och de röda sträckorna beskriver vart armeringen är inplacerade ovanför fönstret vid diskbänken.

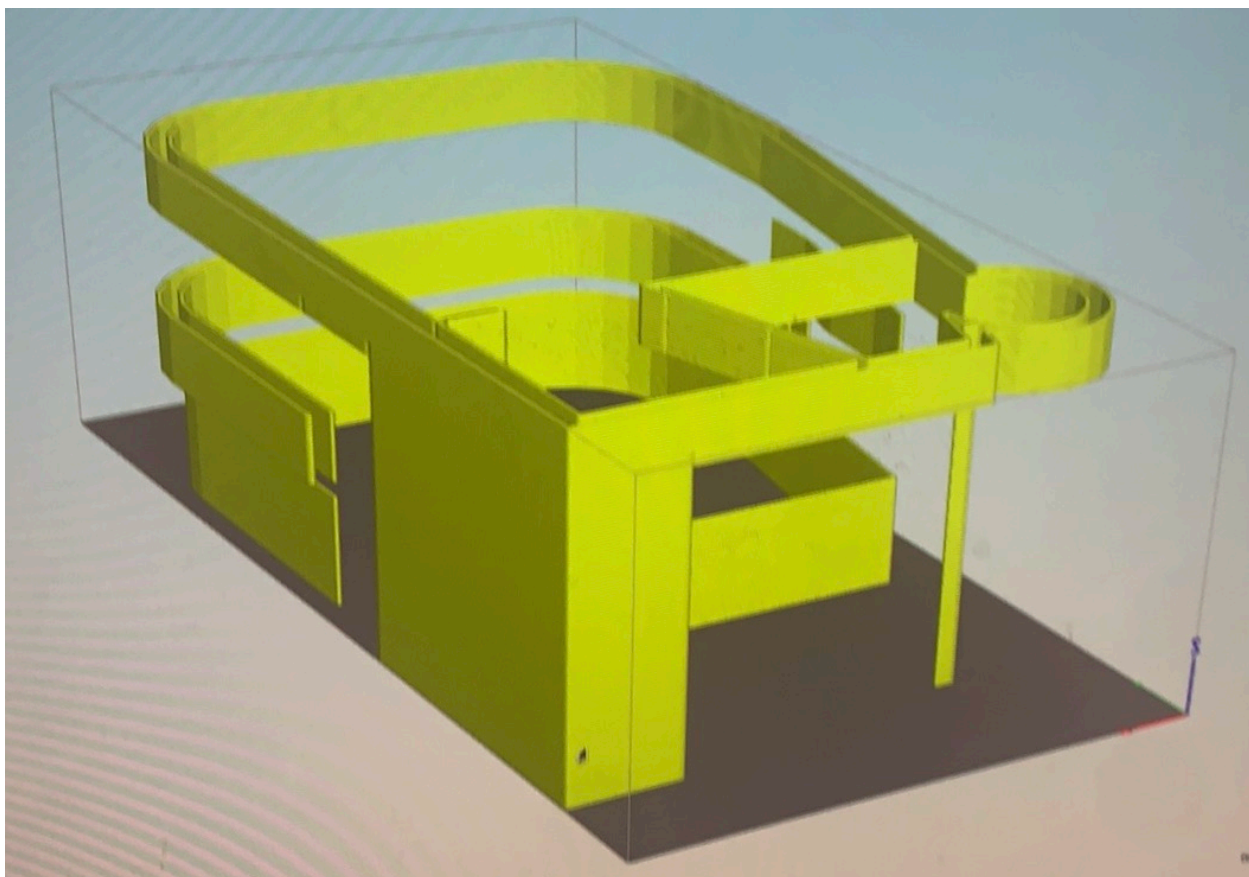


Figur 3.25 Visar hur armeringsjärnerna är lagda tre och tre i lager 106, 108, 110 och 121, 123 och 125.

Efter att en 3D-modell skapats och installationerna hade placerats ut tog projektet en genväg och modellerade inte hål för el, vatten och ventilation ritades dessa in i figurerna ovan. Projektet såg till att det fanns monteringsmöjligheter, kanaler mm i modellen men tänkte fräsa ut hål enligt ovan modell med diamant klinga i stelrande betong.

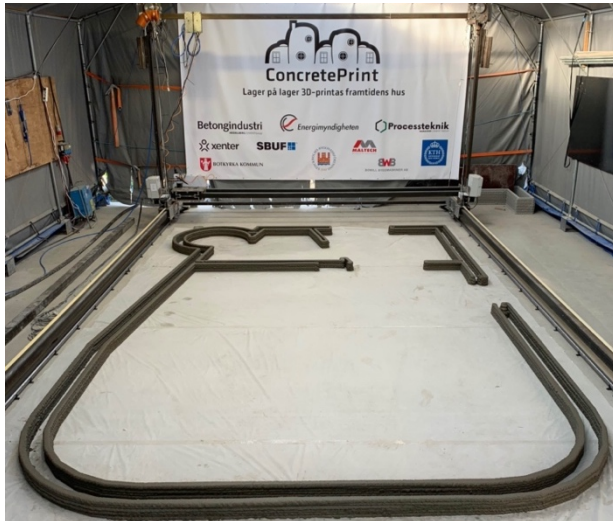
Arbetet med att skriva ut ett hus påbörjades 18 maj 2021. Innan arbetet med själva utskriften påbörjades behövdes flera mjukvaruproblem lösas. I Figur 3.26 nedan visas en del av problemen. Figuren är en referens för att förstå problembilden och hur programvarorna kan skapa fel.

Modellen och flera lagergenereringsprogramvaror användes och justerades flera gånger. Först användes en slic3r en freeware lagergenereringsprogramvara. Under någon period provades lagergenereringsprogramvaran Cura användas. Slutligen köptes Simplify3D och anpassades för printerns inställningar. Efter ett antal försök gick det att få ut en fungerande gcode-fil för att styra printern.

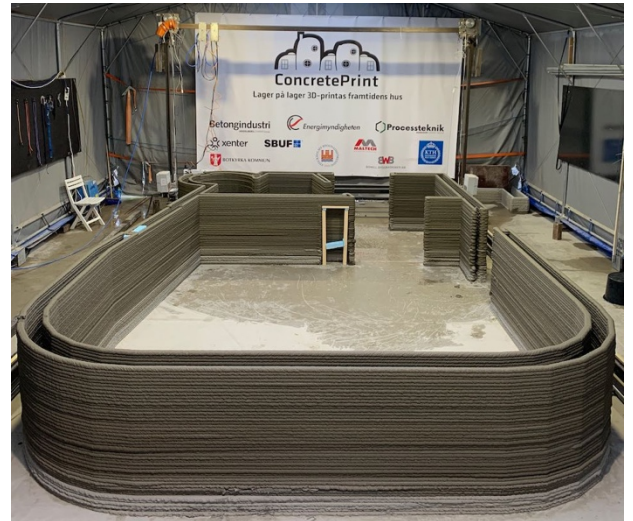


Figur 3.26 Visar på vissa av de fel som uppstod med CAD-modellen och att CAD-modellen var tvungen att justeras många gånger innan rätt inställningar för lagergenereringsprogramvaran hade hittats. Där efter kunde en rätt och fungerande styrkod till 3D-skrivaren genereras.

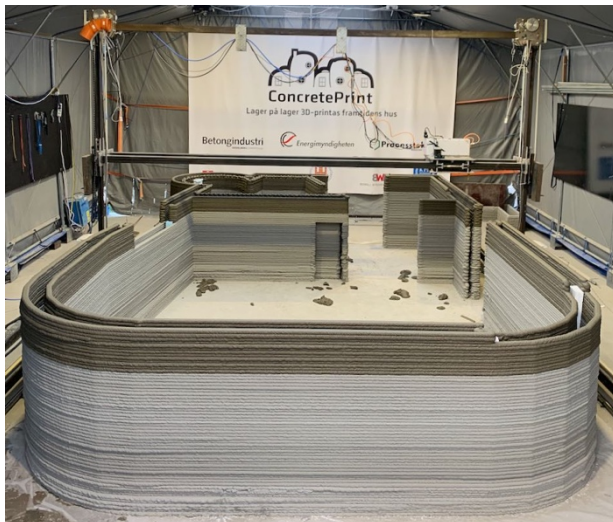
I Figur 3.27 visas foton från olika tidpunkter under processen (21, 27, 31 maj samt 11 juni 2021) och visar hur huset successivt växte fram. I Figur 3.27 b) kan man se stödet som placerades för att lösa öppningen för vattenfördelarskåp i mitten av bilden. Om man tittar noggrant på fotot i Figur 3.27 c) går det även att se de monteringsstöd som användes för stabilisering invid fönsteröppningarna, se blå detalj i den vänstra öppningen och vit detalj vid fönstret till höger. Utifrån fotot i Figur 3.27 d) är taget den 11 juni där kan man bland annat se att stödmaterialen för fönstren har tagits bort.



a)



b)



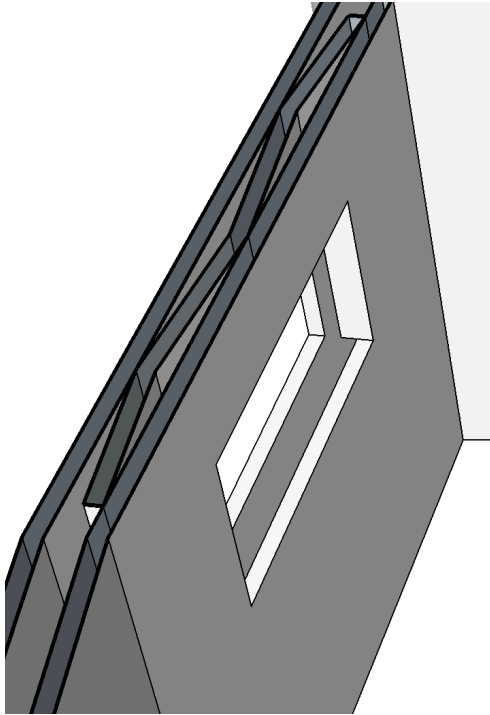
c)



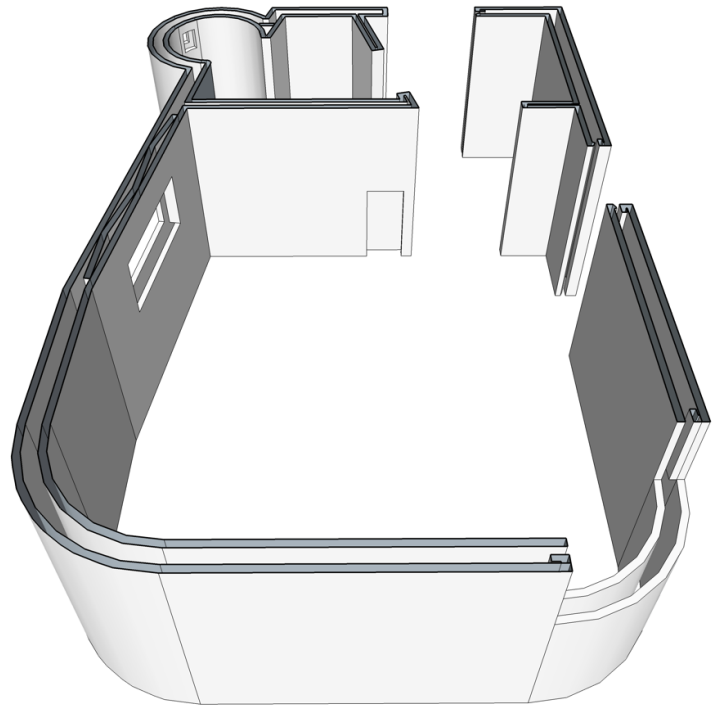
d)

Figur 3.27 a) visar resultatet efter dag 1, 21 maj 2021. b) är från den 27 maj. c) är från 31 maj. d) är från 11 juni.

Ovanför fönstret som ligger i köksdelen, där fönstret är 120 cm långt, har en extra balk lagts in. se Figur 3.28 Balk som skapat vid 3D-utskriften som förstärkning vid större öppningar. som visar hur stödbalken är konstruerad och hur den är positionerad. Bilden visar en metod för att öka styrkan och bärförmågan över fönstret. En 40 cm hög balk som är 40 cm längre än fönstret på varje sida. Balken utförs med den zig-zag metoden. Dessutom läggs armeringsjärn in i väggen enligt Figur 3.29. Tre armeringsjärn ligger på lager 71, 73 och 75 (från botten). Lager 71 är det lager som syns på bilden. På samma bild visas hur stöd används för att stödja uppbyggnaden av väggen ovanför fönstret. Betongen skrivs ut ovanpå stödet. Plasten gör det lätt att demontera och cellplasten som är mjuk gör det enkelt att ta ut stöden och möjliggör återanvändning.



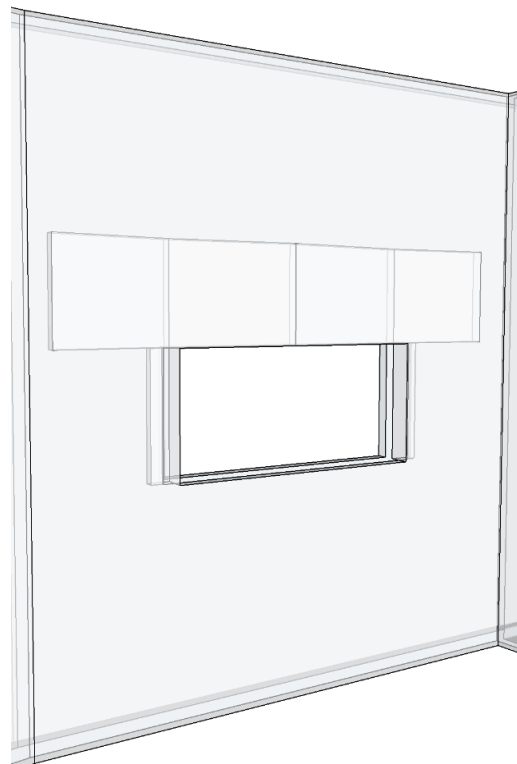
a)



b)



c)



d)

Figur 3.28 Balk som skapat vid 3D-utskriften som förstärkning vid större öppningar. Zig-zag metoden används. Armeringsjärn är inplacerade, se Figur 3.29.



Figur 3.29 3D-printing på monteringsstöd över öppning samt förstärkning med armering. Notera att stödet som har placerats under öppningen har försetts med cellplast och plastfolie, vilket underlättar vid demontering.

I Figur 3.30 visas ett foto som togs samma dag som stommen var färdigprintad. Utskriftsprocessen hade då pågått under sammanlagt 28 arbetsdagar, 13 utskriftsdagar.



Figur 3.30 Visar den färdiga stommen från den 18 juni. Själva utskriftsarbetet har då pågått i under 13 arbetsdagar.

4 RESULTAT

På Betongindustris område i Tumba finns ett 3D-printat hus med plats för en köksdel/sovrums, hall och badrum med en rund dusch med WC. ConcretePrint, ett startup-företag som arbetar för automatiserat byggande, är först i Sverige med att skriva ut en komplett husstomme i betong.

Det 3D-printade huset blev klart 17 juni 2021 och är 24 kvm stort, består av dubbelväggar som är 50 mm breda med ett utrymme emellan som ska fyllas med isolering. Inredning, fönster och dörrar kommer att 3D-printas av andra företag. Tak och bottenplatta görs på konventionellt sätt.

Fakta om huset:

- Yta: 24 kvm
- Disposition: Kombinerat vardagsrum, sovrums och kök med hall och badrum innehållande duschutrymme och plats för handfat och toalett
- Antal lager: 126 lager
- Totalt printat: 2,7 km betong fördelat på totalt 126 lager som är ca 50 mm breda
- Total printtid: 28 timmar
- Total vikt: 10
- Totala antalet printdagar: 13 dagar (målet var ca 15 lager per dag)
- Antal personer sysselsatta: ca 4 personer / dag (bl a elever från yrkeshögskolan xenter)
- Problemlösningsteknik: Agila tavelmöten
- Väggar: Dubbelvägg 50 mm breda med ett utrymme innanför som fylls med isolering men även armering och framtida el- och VVS-infrastruktur
- Tak och betongsula: Printas inte i dagsläget utan påförs på konventionellt vis
- Kompletterade objekt: Fönster, dörrar och viss inredning som garderober 3D-printas av externa samarbetspartners
- Fönster och dörrar kommer att tillverkas av fönstertillverkaren NorDan.
- Materialkostnad: ca 32 000 SEK

Huset behövde flyttas. Det stod i ConcretePrints 3D-utskriftslabb. Beräkningar skall göras och flytt genomföras men det är del av ett annat projekt.

Tak och installationer behöver genomföras. Nedan kommer kort resultat av hur långt de olika installationerna kommit och hur det har gått i enlighet med planering

4.1 Betongmaterialet

Det framtagna betongmaterialet har visat sig ha intressanta egenskaper. Vid tester visar det sig ha en tryckhållfasthet ca 30 MPa motsvarande hållfasthetsklass C25/30. Materialet behöver justeras något vid temperatursvängningar.

Framöver behöver en industriell process för att tillverka färdigt torrmaterial hittas. Det går inte att blanda för hand 6 kubikmeter betong med den precision som behövs. Kvalitén på det printande är beroende på en stabil process. Naturligt skulle temperatur och trycksensorer installeras för att följa processen och hjälpa till att justera.

Vissa Realtids reologiska mätningar skulle också vara intressanta att genomföra. Det går naturligtvis att argumentera hur mycket de reologiska egenskaperna som behöver justeras då ett tolerant material har utvecklats. Men fram till dess är det intressant hur man justerar blandningen.

4.2 Isolering

Projektet valde att använda polyuretanskum som isolering för att isoleringen skulle hjälpa till att hålla ihop huset vid den kommande flytten. Projektledaren var mycket orolig för att huset skulle gå sönder och orsaka skada på omkringliggande föremål. Huset saknar en grundarmering i längsriktning längst ner och överst. Att flytta ett 10 ton tungt objekt utan att råka få tryckkrafter på långsidor eller kortsidor som trycker sönder en 50 mm smal inner eller yttervägg är komplicerat. Med hjälp av en hård isolering kan vissa av tryckkraft tas upp i den skapade sandwich-väggen.

4.3 Fönster/dörrar

Under arbetet med utskriften av huset skapas ett samarbete med fönster och dörrar av tillverkaren NorDan. NorDan är intresserad att använda sin prisbelönta 3D-utskriftsteknik för att skriva ut fönsterkarmar till fönstren och dörrkarmar till dörrarna för att användas i huset. En mycket spännande kommande möjlighet dvs. hur kan NorDans 3D-teknik användas för att effektivisera byggande?

4.4 Vatten

Förberedelser är gjorda. Inga vatteninstallationer har dragits. Det blir en kommande aktivitet att verifiera att det går att praktiskt dra in vattenrör i kanaler och mellanvägg enligt ovan.

4.5 El

Projektet valde att borra för el-genomföringarna efter utskriften av betongen var klar och hade stelnat. Detta berodde främst på att endast 6 lager om dagen skrevs ut de två första dagarna. Projektet hade som mål att borra/skära ut hål i den stelnde betongen cirka 2 timmar efter betongen hade skrivits ut. El-dosorna skulle placeras med centrummått 20 cm ovanför golvet. Då utskriften efter dag två endast hade nått 12 lager, eller 24 centimeter ovan golvet, uppkom risken att skära sönder den täckande ytan för nästa lager. Beslut togs därmed att inte skära ut hål för el-dosorna i direkt anslutning till utskrift.

4.6 Krympning en utmaning

Under en lång utskriftstid, 30 kalenderdagar, påverkas den utskrivna betongen genom att torka ut. Uttorkningen ger upphov till krympning som i sin tur ger upphov till rörelser och inbyggda spänningar. Synliga effekter av betongens krympning i Attefallshuset är att två lager har delaminerat samt att en krympspricka har uppstått på insidan av en av de runda väggarna.

5 SLUTSATS

Med begränsade ekonomiska resurser har ConcretePrint utvecklat teknik, byggt en 3D-skrivare och utvecklat egen betong för att skriva storskaliga betongobjekt. Arbetet har skett med mycket hjälp, bidrag och stort engagemang från samarbetspartners och institutioner. Avslutningen med att skriva ut ett Attefallshus är en bra utvecklingskurva. 3D-skrivaren som används är den prototypskrivare som ConcretePrint har utvecklat. Projektet har visat att det finns kunskap, teknik men framför allt ett driv för att kunna vidareutveckla tekniken.

Mycket teknikutveckling återstår för att denna teknik skall bli så effektiv och ha den kvalitet som ConcretePrint beskriver i sin vision. ”Det skall bara vara att måla väggarna och montera de tekniska installationerna och installera kök och skapa badrum” för att ett hus skall vara färdigt.

Med författarnas vetskap är det till dags dato ingen leverantör av storskalig 3D-utskriftsteknik har nått den visionen. Mycket arbete återstår för att robotisera detaljer och hantera kvalitet för att uppnå den möjliga effektiviseringen.

Projektet har visat att utvecklingen behöver drivas vidare. Större tester behöver göras.

ConcretePrint består av ett team som menar att man kommer kunna lyckas med denna vision. Under 2022 har ConcretePrint som målsättning att vidare utveckla teknikerna, processerna och skriva ut ett större hus. Målet är ett enplanshus med 150 kvm boyta. Den närmaste framtiden handlar om:

- Ny 3D-skrivare - Färdigställa nästa generation av skrivare. 20x15x10 meter printyta.
- Industriell process – ConcretePrint har under hösten drivit på utvecklandet av en industriell process och kommer under våren kunna skriva ut större objekt utan att behöva handblanda betongen
 - En blandarpump har erhållits genom Bo Will byggmaskiner och leverantören Maltech. Den har provats under hösten och kommer användas under våren 2022.
 - Färdigt material har kommit genom samarbete med Betongindustri från Heidelberg Cement.
- Inhemsk materialproduktion – Behov finns av att skapa en inhemsk materialproduktion av torrmaterial för att skriva ut
- Att genomföra storskaliga tester och skriva ut ett en- eller tvåplans hus är nästa led i arbetet. För det behöver flera samarbeten slutas mellan företag inom byggbranschen eller företag som levererar till byggbranschen.

Det går att konstatera att resultaten från projektet är positiva och tekniken kan ha en framtid för robotiserad tillverkning av byggnadsobjekt.

Projektet har insett värdet av att kunna mäta de olika egenskaperna i betongen i realtid och har diskuterat testandet av en realtids reologimätare. Olika former av försök har gjorts att mäta temperatur och tryck i slang och pump samt på munstycke för att kunna justera olika parametrar. Tester har gjorts att mäta strömmen på motorn till satsblandaren.

Intresset från media har varit stort. Ett antal artiklar är skrivna, två radio inslag och ett TV-inslag på SVT.

- Heidelberg Cement <https://blog.heidelbergcement.com/en/swedens-first-3d-printed-house>

- Betongindustri <https://www.betongindustri.se/sv/sveriges-forsta-3d-printade-betonghus-utvecklas-tillsammans-med-betongindustri>
- Byggvärlden <https://www.byggvarlden.se/sveriges-forsta-3d-printade-hus-215788/nyhet.html>
- Tidskriften Betong <https://betong.prenly.com/1387/tidskriften-betong/447945/2021-09-13/22976559/utskrivna-betonghus-i-3d>
- 3D Printing Media Network <https://www.3dprintingmedia.network/concreteprint-builds-swedens-first-3d-printed-home/>
- SvD <https://www.svd.se/vill-revolutionera-med-3d-printat-hus>
- P4 - Radio Stockholm https://sverigesradio.se/artikel/forsta-3d-printade-huset-star-i-tumba?fbclid=IwAR1Mu8_8v5fcH8hjsWSWjXXI_EEq-mADOnyZE82CZ6e8_mFiYP6tN-qiNa4
- SVT - Video på SVT <https://www.svt.se/nyheter/inrikes/se-sverige-forsta-forsta-3d-printade-hus-ta-form>
- DN <https://www.dn.se/sthlm/han-har-skatat-sveriges-forsta-3d-printade-betonghus/>
- DagensIndustri <https://www.di.se/nyheter/sveriges-forsta-3d-printade-hus-en-teknikutveckling-i-rasande-takt/>
- NyTeknik <https://www.nyteknik.se/premium/forst-i-sverige-bygger-helt-hus-med-3d-printer-for-betong-7016539>
- Mitt Botkyrka Salem <https://www.mitti.se/nyheter/carl-fran-salem-var-med-och-gjorde-sveriges-forsta-3d-printade-hus/repueE!KzuSUEqDVkh9NCj1bfsBJg/>
- Studio 1 - P1 SverigesRadio <https://sverigesradio.se/artikel/sverige-far-sitt-forsta-hus-utskrivet-med-3d-skrivare>
- 3dp.se <https://3dp.se/2021/06/16/den-3d-printade-husdrommen-lever-vidare/>
- Kristianstadsbladet <https://www.kristianstadsbladet.se/kristianstad/ahusille-var-med-nar-3d-printer-byggde-helt-hus-f3fb4464/>
- Mitti Danderyd <https://pdf.mitti.se/magazines/read/danderyddirekt/2021/27/dd035c89-e002-4ebc-97c6-04d056f53212>

Det finns ett intresse från branschen att komma på besök. Följande är en lista på några av de företag som har varit på besök:

- Benders
- Fortum
- Fortifikationsverket
- Skanska Betong
- PEAB
- Sweco
- JM

5.1 Transformation i byggbranschen

Det behövs en satsning för att Sverige och svensk byggindustri inte skall hamna på efterkälken i det teknologiska skifte som pågår internationellt inom byggbranschen. Akademin bör gå före och visa på systemsamband, nya digitala processer, användning av material, metoder och övriga kunskaper som behövs för att bygg- och anläggningsbranschen skall våga anamma robotisering som tex 3D-skrivarteknologin är.

Den automatiserade teknologin bygger på en helt digitaliserad produktionsprocess. Inga förändringar bör göras när man sätter i gång produktionsprocessen. Det ställer andra krav på arkitekter och konstruktörer. En högre grad av färdigställande av t.ex. byggnader och dess gestaltning behövs i ritningsunderlaget innan produktionsprocessen startas. Detta möjliggör att produktionstiden för 3D-utskriften kan reduceras från månader till dagar för exempelvis villor.

Tekniken effektiviseras bland annat genom att man inte behöver bygga och riva gjutformar. Vidare effektivisering erhålls om passformen är på nivån ± 1 mm och att det finns hål för eller montagestöd eller montageanvisningar för tekniska installationer.

Projektet är en del i en satsning för att Sverige och svensk byggindustri inte skall hamna på efterkälken i det teknologiska skifte som pågår internationellt inom byggbranschen. Projektet är också en del i att skapa en större nationell arena för storskaliga 3D-utskrifter.

Nationellt nätverk för Byggautomation, (www.byggautomation.nu) som söker skapa kunskaps spridning inom digitalisering, automatisering och robotiserat byggande är ett nätverk som söker skapa ett kunskapsutbyte mellan akademi och industri för att minska byggkostnaderna.

5.2 Framtid

Många utmaningar och mycket forskning kvarstår inom området 3DCP internationellt för att detta skall bli en etablerad metod där alla de fördelar 3DCP kan användas industriellt.

- Materialets sammansättning – grundrecept finns för betong. Men mycket arbete finns att utveckla och förfina
- Materialets justering till olika väderparametrar och skrivarens övriga tekniska funktioner
- Stort behov finns av att utveckla munstycken och processer för att tillföra material till munstycket
- Kvalité, formernas riktighet och materialets mikrohållfasthet; i form av svagheter på grund av lager på lager principen, inre hållfasthetsproblem på grund av krympning mm måste utforskas
- Processen från 3D arkitekturritningar via konstruktionsritningar till en färdig 3D-modell som går att skriva ut behöver utforskas mer

Olika typer av skrivare, geometriska former och användningsområden i tex prefabricering eller byggplatsutskrifter innebär olika utmaningar och olika parametrar som styr

- Ytstruktur eller ytkvalitébehandling kvarstår som en utmaning och forskningsområde
- Forskning på samspel mellan olika självfungerande autonoma system kvarstår. Dvs att olika system kan styra andra system

För att kunna skriva ut hus eller andra projekt så behövs en produktionsprocess och en materialleverantör. Många företag använder en relativt enkel produktionsprocess och använder en hemmagjord blandning. Att det tar tid beror på avsaknad av allomfattande industriell process och kanske de viktigaste processtegen utöver själva skrivningsprocessen, beredning, blandning och transport av materialet. Dessa kräver en likadan automatiseringsgrad som skrivarenheten.

Vid en konferens på Stanford University [15] om industriellt byggande beskrevs komplexiteten med dagens 3D-utskrifter. Man sammanfattade hindren enligt följande:

- avsaknad av en heldigital arbetsprocess som gör att det är enkelt för byggfirman att sätta upp skrivaren och skriva ut huset
- 3D-skrivarna är i dagsläget för komplicerade och att det där med krävs högre utbildning för att använda skrivarna
- att infrastruktur kring 3D-utskriften inte finns på plats

- en färdig, tillgänglig och 3D-utskrivbar betong saknas

Uppfattningen är att materialtillgången av en färdig betong är en viktig del. För att underlätta användningen av 3D-utskriften behöver materielförsörjningsprocessen finnas tillgänglig. Här behöver insatser göras.

Med en energieffektiv byggprocess där robotar gör stor del av byggandet genom användandet av 3D-utskriftsteknik med antingen ekologiska material eller inblandning av återvunnet material minskas resursanvändandet och energianvändningen vid nybyggnation.

Kvinnor och barn är de mest utsatta individerna på jorden. Att på sikt kunna skapa bostäder som är billiga och håller, ökar möjligheten till jämställdhet bland världens befolkning. Med det nya arbetssättet som uppstår vid robotiserat byggande ges kvinnor, äldre och andra utsatta individer förutsättningar och möjlighet att arbeta på mer lika villkor som unga män.

En helautomatisk produktionsprocess gör det lättare att utföra 3D-utskriften med rätt kvalitet och bör leda till en minskning av antalet byggfel och på så sätt skapa ett resurssnålare samhälle. Behovet är stort, 3 miljarder människor behöver bostad enligt FN:s definition på minimikvalité.

Svenska folket vill helst bo i småhus. Enligt en sammanställning av olika undersökningar gjord av TMF [44] ser ut på följande sätt

- 75 procent av svenskarna vill bo i villa, parhus, radhus eller kedjehus (dvs definitionen av småhus) I storstadsområdena vill sju av tio bo i enfamiljshus, **TMF, Sifo 2019**
- Över 70% i åldern 25-49 ville helst bo i småhus, över 60% i åldern 50-65. **SEB, Demoskop 2019**
- 78% vill bo i villa. **Landshypotek Bank 2017, Kantar Sifo**
- Minst hälften av de tillfrågade (5000 personer) vill bo i någon form av småhus, oavsett i vilken region de helst vill bo i. Bland de som helst vill bo i Stockholm är det 6 av 10 som vill bo i småhus. För Göteborgs- och Malmö-alternativen är det kring 7 av 10 som vill bo i småhus och i övriga regioner vill cirka 8 av 10 bo i småhus. **Boverket, Rapport 2014:24**

TMF menar att "En stor majoritet av svenska folket vill helst bo i småhus med trädgård – betydligt fler än hur många som faktiskt gör det. Därför bör småhus utgöra en stor del av nyproduktionen, vilket inte alls är fallet idag" [44]

Man kan fundera på när villastaden kommer att återuppstå? Den form av byggande som skapat stora områden med villor som omgärdar de stora städerna i Sverige.

6 REFERENSER

- [1] Gregurić Leo, “History of 3D Printing: When Was 3D Printing Invented? | All3DP,” *All3DP*, Dec. 10, 2018. <https://all3dp.com/2/history-of-3d-printing-when-was-3d-printing-invented/> (accessed Jan. 18, 2022).
- [2] All3DP, “The Types of 3D Printing Technology of 2021 | All3DP,” *All3DP*, Jul. 22, 2019. <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/> (accessed Jan. 18, 2022).
- [3] TechPats, “3D Printing | An Overview of 3D Printing Technologies,” *TechPats*, 2019. <https://www.techpats.com/3d-printing-technologies-overview/> (accessed Jan. 18, 2022).
- [4] Crease Alex, “3D Printer Types & Technologies,” *Markforged*. <https://markforged.com/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-introduction/3d-printer-types-technologies> (accessed Jan. 18, 2022).
- [5] ISO, “ISO/ASTM 52900:2015(en), Additive manufacturing — General principles — Terminology,” *ISO*, 2015. <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-1:v1:en> (accessed Jan. 18, 2022).
- [6] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 545–554, Jan. 2017, doi: 10.1016/J.PROMFG.2017.07.148.
- [7] “Kommunernas bostadsbyggnadsplaner 2019-2028/2030.” [Online]. Available: www.rufs.se
- [8] “Future Scenarios and Implications for the Industry,” *World Economic Forum*. https://www3.weforum.org/docs/Future_Scenarios_Implications_Industry_report_2018.pdf (accessed Jan. 10, 2022).
- [9] L. Albinsson, “Att bygga skepp på marken Bygg 4.0 Projektering-Hur principer från skeppsbyggnad kan effektivisera byggbranschen Bygg 4.0,” 2019.
- [10] Anjou Mikael, *Den ineffektiva byggbranschen : en förändringsagenda - Mikael Anjou - Bok (9789188849410) | Bokus*. Ekerlids, 2019. Accessed: Jan. 12, 2022. [Online]. Available: https://www.bokus.com/bok/9789188849410/den-ineffektiva-byggbranschen-en-forandningsagenda/?gclid=Cj0KCQiA8vSOBhCkARIsAGdp6RT44O51N2MI15olgt-Vmc7a-IWYovdVVk6nNM7FrB46Y5T610HMRDYaAqOcEALw_wcB
- [11] Khoshnevis B and Dutton R, “Innovative Rapid Prototyping Process Makes Large Sized, Smooth Surfaced Complex Shapes in a Wide Variety of Materials,” *Journal Materials Technology Advanced Performance Materials*, vol. 13, no. 2, pp. 53–55, 1998.
- [12] Hwang D. and Khoshnevis B., “An Innovative Construction Process-Contour Crafting (CC),D. Hwang ,” *22nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction 1 ISARC* , Sep. 2005.
- [13] B. Khoshnevis, D. Hwang, K.-T. Yao, and Z. Yeh, “Mega-scale fabrication by contour crafting.” [Online]. Available: <http://www-rcf.usc.edu/~khoshnev>

- [14] R. A. Buswell, R. C. Soar, A. G. F. Gibb, and A. Thorpe, "Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction," *Automation in Construction*, vol. 16, no. 2, pp. 224–231, Mar. 2007, doi: 10.1016/j.autcon.2006.05.002.
- [15] Apis Cor, "APIS COR REPORT 3D PRINTED STRUCTURES AS COMPARABLE TO MASONRY CONSTRUCTION." Accessed: Jan. 06, 2022. [Online]. Available: <https://www.nfpa.org/-/media/Files/News-and-Research/Publications-and-media/NFPA-Journal/2020/March-April-2020/APIS-COR-REPORT.ashx>
- [16] Block India, "Apis Cor builds world's largest 3D-printed building in Dubai," *Dezeen*, Dec. 22, 2019. <https://www.dezeen.com/2019/12/22/apis-cor-worlds-largest-3d-printed-building-dubai/> (accessed Jan. 18, 2022).
- [17] "3D House - aquatherm GmbH." <https://www.aquatherm.de/3d-house/?lang=en> (accessed Jan. 18, 2022).
- [18] Peri, *PROJECT | PERI 3D Construction Printing: First 3D-printed residential building in Germany (EN) - YouTube*, (Sep. 29, 2020). Accessed: Jan. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=3qCBpSiNWWc>
- [19] Hamelius August and Ehrensvärd Backebjörk Mikael, "Betong till 3D-printning-egenskaper i färskt och hårdnat tillstånd," Lund, 2015.
- [20] L. H. Anell, "Concrete 3d printer," 2015.
- [21] F. Petrus Calderon Nygren Handledare and B. Robert Larsson, "MÖJLIGHETER & HINDER MED 3D-PRINT AV BETONG," 2016. Accessed: Jan. 12, 2022. [Online]. Available: <https://www.cementa.se/sv/Petrus-Caledron-Nygren>
- [22] Liljestränd Mathias and Ljungberg Kirill, "Utveckling av betong för additiv tillverkning," 2018. Accessed: Jan. 13, 2022. [Online]. Available: <http://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1221654/FULLTEXT01.pdf>
- [23] M. Liljare and T. Silveira, "Utveckling av betong för 3D-skrivare Development of concrete for 3D-printers," 2019.
- [24] Jennings Petra, "PRODUKTIONSAUTOMATION I BETONGBYGGANDET Ökad produktivitet i betongbyggandet genom automatisering och robotisering.," Jan. 2020. Accessed: Jan. 18, 2022. [Online]. Available: [https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/7c894ad8-5f06-49f8-9702-9c1cae5868b9/FinalReport/SBUF%2013610%20Slutrapport%20Produktionsautomation%20-%20200108%20\(1\).pdf](https://vpp.sbuf.se/Public/Documents/ProjectDocuments/7c894ad8-5f06-49f8-9702-9c1cae5868b9/FinalReport/SBUF%2013610%20Slutrapport%20Produktionsautomation%20-%20200108%20(1).pdf)
- [25] H. Westerlind, "Choreographing Flow A Study in Concrete Deposition," 2021.
- [26] S. B. Ferrer, "Performance of 3D printed concrete formworks for bridge pillars focusing on casting," 2015.
- [27] Zahedi Yasin and Sheikh Shouk Mustafa, "3D-Printing av betong Är det möjligt att printa ut enfamiljshus i Sverige?," Örebro, 2021.
- [28] A. P. Spahiu, "THE RED DOT. Exploring 3D printing a habitat on Mars," 2020. Accessed: Jan. 13, 2022. [Online]. Available: <https://projects.arch.chalmers.se/wp-content/uploads/2020/06/Thesis-Booklet.pdf>

- [29] R. Lundberg, "Kontextuell helhet av 3D-printad träullsandwich Från prefab till printning in situ," 2019. Accessed: Jan. 13, 2022. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1432184/FULLTEXT01.pdf>
- [30] Jangenfildt Hanna |, "NorDan prisas för fönster i biokomposit - 3dp.se3dp.se," Nov. 04, 2019. <https://3dp.se/2019/11/04/de-prisas-for-fonster-i-biokomposit/> (accessed Jan. 13, 2022).
- [31] "Vad gör E2B2? - E2B2," Nov. 15, 2018. <https://www.e2b2.se/om-oss/vad-goer-e2b2/> (accessed Jan. 14, 2022).
- [32] Boverket, "Kartläggning av fel, brister och skador inom byggsektorn," 2018.
- [33] Stockholms stad, "Energianvändning och LCA-beräkningar i byggprocessen," Jun. 2015.
- [34] "25% of Dubai Buildings will be 3D printed by 2030," *arch20*. <https://www.arch20.com/25-dubai-buildings-will-3d-printed-2030/> (accessed Jan. 14, 2022).
- [35] Mohammed Bin Rashid, "Mohammed: 25% of Dubai's buildings will be 3D printed by 2030." <https://sheikhmohammed.ae/en-us/Pages/NewsDetails.aspx?nid=23724&cid=> (accessed Jan. 14, 2022).
- [36] Obminska Ania, "Cyanobakterier i betongen ska minska byggets klimatpåverkan," *NyTeknik*, Jan. 15, 2020. Accessed: Jan. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.nyteknik.se/innovation/cyanobakterier-i-betongen-ska-minska-byggets-klimatpaverkan-6984294>
- [37] Wilson Mark, "This mushroom building cleans our air as it grows," Oct. 31, 2019. <https://www.fastcompany.com/90423161/this-mushroom-building-cleans-our-air-as-it-grows> (accessed Jan. 18, 2022).
- [38] Isaksson Marcus, "Evaluation of antimicrobial properties of cellulose-mycelium biocomposite MARCUS ISAKSSON KTH ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY SCHOOL OF ENGINEERING SCIENCES IN CHEMISTRY, BIOTECHNOLOGY AND HEALTH," 2020. Accessed: Jan. 18, 2022. [Online]. Available: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1454422/SUMMARY01.pdf>
- [39] S. Lim *et al.*, "DEVELOPMENT OF A VIABLE CONCRETE PRINTING PROCESS."
- [40] Heidelberg Cement, "i.tech® 3D | HeidelbergCement Deutschland," *Heidelberg Cement*, 2020. <https://www.heidelbergcement.de/de/zement/i.tech3D> (accessed Jan. 18, 2022).
- [41] Anthony Davis, "COBOD 3D Construction Printer gör den första 3D-utskrivna byggnaden i Tyskland - Highways Today," *Highways Today*, Oct. 08, 2020. <https://highways.today/2020/10/08/cobod-3d-construction-printer/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [42] Philippe Carrier, "3D Print Speed: How to find the optimal speed for reliable and constant print quality," *DyzeDesign*, Jul. 10, 2018. <https://dyzedesign.com/2018/07/3d-print-speed-calculation-find-optimal-speed/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [43] Simplify3D, "How to Prevent Blobs on Your 3D Print | Simplify3D | Simplify3D Software," *Simplify 3D*, Jan. 30, 2016. <https://www.simplify3d.com/preventing-blobs-on-3d-print/> (accessed Jan. 12, 2022).

- [44] Team Fictiv, “Recommended Wall Thickness for 3D Printing - Fictiv,” *Fictiv*, Feb. 01, 2021. <https://www.fictiv.com/articles/recommended-wall-thickness-for-3d-printing> (accessed Jan. 12, 2022).
- [45] Fabian, “Calculate Minimum Wall Thickness for 3D Printing | 3D Printing Blog | i.materialise,” *i.materialise*, May 31, 2018. <https://i.materialise.com/blog/en/how-to-get-the-perfect-wall-thickness-when-turning-your-3d-model-into-a-3d-print/> (accessed Jan. 12, 2022).
- [46] TMF, “7 av 10 vill bo i småhus - TMF.” <https://www.tmf.se/branschutveckling/branschprojekt/bygg-fler-smahus/7-av-10-vill-bo-i-smahus/> (accessed Jan. 14, 2022).

7 BILAGOR

Lista på bilagor:

Bilaga A

Projekt arbete utfört av Manne Hansen, Luleå Tekniska Universitet

Bilaga B

Projektarbete utfört av Ahmad Al-Falahi, Luleå Tekniska Universitet