



GRØN  
OMSTILLINGSFOND



# 3D Printet Byggeri

Afslutningsrapport februar 2018



[www.3Dprintetbyggeri.dk](http://www.3Dprintetbyggeri.dk)

# Indholdsfortegnelse

|                                                                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Indledning .....</b>                                                                                                                  | <b>1</b>  |
| 1.1 Rapportens indhold .....                                                                                                                | 1         |
| 1.2 Partnerskabet for 3D printet byggeri .....                                                                                              | 2         |
| 1.3 Formålet med partnerskabet .....                                                                                                        | 2         |
| <b>2. Formidling af resultatet af partnerskabets arbejde .....</b>                                                                          | <b>3</b>  |
| <b>3. Overordnet status 3D printet byggeri globalt .....</b>                                                                                | <b>5</b>  |
| 3.1 Opførte 3D printede bygninger og bygningsstrukturer globalt .....                                                                       | 5         |
| 3.2 Virksomheder, der arbejder med 3D printet byggeri globalt .....                                                                         | 9         |
| 3.3 Den konventionelle byggebranches indtog ind i 3D printet byggeri .....                                                                  | 13        |
| 3.4 3D printet byggeri industriens stade og markedspotentiale .....                                                                         | 14        |
| 3.5 Økonomien i 3D printet byggeri .....                                                                                                    | 18        |
| 3.6 Sammenfatning .....                                                                                                                     | 24        |
| <b>4. 3D printet byggeri printere .....</b>                                                                                                 | <b>26</b> |
| 4.1 Kategoriseringssystem .....                                                                                                             | 26        |
| 4.2 Typer af printere og on-site/off-site anvendelse .....                                                                                  | 28        |
| 4.3 Print muligheder ved hhv. gantry og robot type printere .....                                                                           | 30        |
| 4.4 Uløste udfordringer med dagens teknologi niveau .....                                                                                   | 33        |
| 4.5 Testprintere og testprints .....                                                                                                        | 34        |
| 4.8 Sammenfatning .....                                                                                                                     | 46        |
| <b>5. Materialer til 3D printet byggeri .....</b>                                                                                           | <b>48</b> |
| 5.1 Indledning .....                                                                                                                        | 48        |
| 5.2 Generiske krav til 3D printet byggeri materialer .....                                                                                  | 49        |
| 5.3 Mulige bindere ved 3D printet byggeri materialer .....                                                                                  | 53        |
| 5.4 Tilslags materialer .....                                                                                                               | 56        |
| 5.5 Udenlandske recepter til 3D printet byggeri materialer .....                                                                            | 57        |
| 5.6 Udvikling af 3D print beton indeholdende genbrugsmaterialer .....                                                                       | 59        |
| 5.7 Forsøgsresultater med brug af cement og genbrugstegl, bundslagge, knust beton og recycling gips til 3D printet byggeri materialer ..... | 61        |
| 5.8 Recepten for betonen anvendt ved 3D print af The BOD: .....                                                                             | 62        |
| 5. 9 Recepter indeholdende genbrugsgips .....                                                                                               | 64        |
| 5. 10 Sammenfatning .....                                                                                                                   | 67        |
| <b>6. Sammenfattende konklusion .....</b>                                                                                                   | <b>68</b> |

**Appendix .....71**

|                                                                                                      |     |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Appendix 1: Opsummering af formidlingsaktivitet .....                                                | 71  |
| Appendix 2: Oversigt over besøg, besøgsrapport og profilbeskrivelser .....                           | 75  |
| Appendix 3: Udenlandske recepter på 3D printet materiale .....                                       | 76  |
| Appendix 4: Forsøgsresultater udviklede recepter med genbrugsmaterialer til 3D printet beton .....   | 77  |
| Appendix 5: Kategoriseringssystem og forklaring på terminologi anvendt i kategoriseringssystem ..... | 85  |
| A) Company, project & development.....                                                               | 87  |
| B) Technology type.....                                                                              | 89  |
| C) Printer characteristics .....                                                                     | 94  |
| D) Materials used.....                                                                               | 102 |
| Appendix 6: Partnerskabets deltagende virksomheder og personer .....                                 | 105 |

# 1. Indledning

Denne rapport indeholder resultatet af partnerskabet for 3D printet byggeri's arbejde fra januar 2016 til januar 2018 vedrørende 3D printet byggeri. Det er partnerskabets håb, at denne rapport vil blive et nyttigt opslagsværk for byggebranchen i Danmark.

3D printet byggeri var nærmest ukendt og de facto ikke et brugt begreb i Danmark, da partnerskabet begyndte sit arbejde.

Dette er siden ændret drastisk, og situationen i dag er helt anderledes, hvor kendskabet til 3D printet byggeri er udbredt såvel i byggebranchen som alment. Så meget, at selv statsminister Lars Løkke Rasmussen talte om det i sit indlæg på Byggeriets årsdag i april 2017, samtidig med at der i efteråret 2017 blev 3D printet den første bygning i Danmark og Europa, som er opført i fuld overensstemmelse med de danske og europæiske standarder indenfor byggeri.

Det er Partnerskabets for 3D Printet Byggeri's opfattelse, at ovenstående for størstedelens vedkommende skyldes partnerskabet og dets arbejde, samt at partnerskabet har været den væsentligste katalysator for interessen for 3D printet byggeri i Danmark.

## 1.1 Rapportens indhold

Partnerskabet for 3D printet byggeri vil i denne rapport redegøre for formålet med partnerskabet og dets arbejde. Der vil ikke være tale om en kronologisk redegørelse for, hvad partnerskabet har foretaget sig hvornår, men derimod for de væsentligste resultater opnået og erfaringer indsamlet.

Afsnit 2 vil indeholde en oversigt over resultatet af den formidling, som partnerskabet har foretaget i perioden, mens afsnit 3 vil give et overordnet overblik over status for 3D printet byggeri globalt. I afsnit 4 og afsnit 5 vil der blive gået mere i dybden med hensyn til de erfaringer og tilegnelser, som partnerskabet har erhvervet i projektperioden med hensyn til anvendeligheden af forskellige printer typer og materialer, herunder genbrugsmaterialer, til 3D printet byggeri.

Endeligt vil rapporten bagerst indeholde 5 appendixer, som er en integreret del af denne rapport, men også kan stå alene som opslagsværker.

Appendix 1: Opsummering af partnerskabets formidlingsaktivitet

Appendix 2: Oversigt over besøg gennemført, besøgsrapporter og profilbeskrivelser udarbejdet.

Appendix 3: 11 udenlandske recepter på 3D printet byggeri materiale

Appendix 4: Forsøgsresultater for 8 af de af partnerskabet udviklede 3D printet byggeri materialer indeholdende genbrugsmaterialer

Appendix 5: Kategoriseringssystem og terminologi/generel ordforklaring vedr. 3d printet byggeri og det udarbejdede kategoriseringssystem til beskrivelse af status for de enkelte projekter

I tillæg til disse opslagsværker i appendixerne kommer de 12 udarbejdede besøgsrapporter, typisk ganske omfangsrige, samt de 19 korte profilbeskrivelser, som alle kan hentes på partnerskabets website; [www.3dprintetbyggeri.dk](http://www.3dprintetbyggeri.dk)

## 1.2 Partnerskabet for 3D printet byggeri

Partnerskabet blev officielt etableret i januar 2016 og afsluttes med denne rapport her i januar 2018. Partnerskabet har været støttet af Erhvervsfremmestyrelsens Grønne Omstillingsfond med 2,6 mio. kr. Støtten fra den Grønne Omstillingsfond har muliggjort etableringen og driften af partnerskabet, herunder partnerskabets fælles website [www.3dprintetbyggeri.dk](http://www.3dprintetbyggeri.dk).

Følgende virksomheder har indgået i partnerskabet:

- 3D Printhuset A/S
- Force Technology
- Gips Recycling Danmark A/S
- NCC Construction Danmark A/S

3D Printhuset A/S har fungeret som leder af partnerskabet.

NCC Recycling A/S var oprindeligt også medlem af partnerskabet, men måtte trække sig på grund af personaleændringer.

## 1.3 Formålet med partnerskabet

Partnerskabet for 3D Printet Byggeri har som primær målsætning haft at øge kendskabs- og kompetenceniveauet bredt i byggebranchen i Danmark til 3D print teknologiens muligheder indenfor byggeriet, herunder muligheder for materialebesparelse og anvendelsen af genbrugsmaterialer. Dette for at skabe grobund for yderligere forretningsudvikling og for at nye samarbejder kunne påbegyndes med henblik på at realisere de potentialer, som teknologien medfører for dansk byggeri.

Partnerskabet for 3D Printet Byggeri har i sit arbejde sigtet på at fremme forståelsen for og udviklingen af mulighederne indenfor 3D printet byggeri i Danmark, således at byggebranchen i Danmark ved yderligere indsats på området kan realisere potentielt en milliardomsætning ved at anvende 3D print teknologi i byggeriets produktion, samt ved salg af printbare materialer (gerne genanvendte), printteknologier og systemer relateret hertil.

Konkret havde partnerskabet følgende delmålsætninger ved opstart:

| Delmålsætning           | Indhold                                                               | Mål                                                                                              |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>State of the art</b> | Identificere teknologisk state of the art indenfor 3D printet byggeri | 12 besøg<br>12 besøgsrapporter                                                                   |
| <b>Testprinter</b>      | Udvikling af testprinter til test af materialer mv                    | Udvikling af én testprinter med mål 1*1*1 meter.                                                 |
| <b>Materialetest</b>    | Test af 3D printer materialer                                         | Lav sammenligning og måling af forskellige materiale recepter                                    |
| <b>Vidensportal</b>     | Etablere vidensportal for 3D printet byggeri og lave nyhedsbrev       | Vidensportal laves fra projekt start og udbygges løbende. 500 tilmeldte. Slutrapport udarbejdes. |
| <b>Konferencer</b>      | Hold konferencer om 3D printet byggeri for at dele viden              | Afholdelse af 2 konferencer med 100-200 deltagere per konference                                 |

## 2. Formidling af resultatet af partnerskabets arbejde

Det er partnerskabets opfattelse, at partnerskabets overordnede målsætning om at øge kendskabet til og kompetenceniveauet i byggebranchen om 3D printet byggeri er mere end blevet indfriet.

Det er via partnerskabets mange forskellige aktiviteter lykkedes at gøre byggebranchens aktører meget mere opmærksomme på 3D printet byggeri. Nogle tal kan belyse dette:

- A. Mens der i 2015 - før partnerskabets tilblivelse - var i alt 3 artikler om 3D printet byggeri i danske medier, var der i løbet af blot året 2017 mere end 12 gange så mange.
- B. Partnerskabets video'er er blevet set mere end 18.384 gange på Youtube.
- C. Partnerskabets meddelelser på LinkedIn er blevet set 40.152 gange og har modtaget 453 likes

Med oplysning kommer kompetencen også, og ikke mindst konferencerne og vidensportalen har muliggjort, at kompetenceniveauet i byggebranchen om 3d printet byggeri generelt må antages at være steget ganske kraftigt. Nogle tal kan belyse dette:

- A. Partnerskabets vidensportal på [www.3dprintetbyggeri.dk](http://www.3dprintetbyggeri.dk) har haft i alt 3.286 besøg i projektperioden
- B. Der har været 373 deltagere på heldagskonference om 3D printet byggeri og 775 deltagere på konferencer, hvor partnerskabet har præsenteret budskaber om 3D printet byggeri. I alt har 1.148 deltagere, hvoraf hovedparten må antages at være fra byggebranchen, deltaget på konferencer, hvor 3D printet byggeri har været et emne
- C. Videoer lagt op på nettet af partnerskabet har været set 14.384 gange
- D. LinkedIn omtaler lagt op af partnerskabet er set over 40.000 gange

I forhold til de opstillede delmålsætninger jf. afsnit 1.3 er disse mere end indfriet som følger:

| Delmålsætning           | Mål                                                                                                 | Realiseret                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>State of the art</b> | 12 besøg<br>12<br>besøgsrapporter                                                                   | 38 besøg<br>12 besøgsrapporter<br>18 profilbeskrivelser                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <b>Testprinter</b>      | Udvikling af én<br>testprinter med<br>mål 1*1*1 meter                                               | En testprinter med mål 1*1*1 meter<br>En testprinter med mål 8*8*1 meter<br>(En brugsprinter med mål 8*8*6 meter, lavet af 3D Printhuset alene, brugt til at opføre The BOD)                                                                                                                                                                                                                                                                                |
| <b>Materialetest</b>    | Lav<br>sammenligning og<br>måling af<br>forskellige<br>materiale recepter                           | 11 recepter indsamlet via de udenlandske projekter.<br>10 egne recepter udviklet, testet og målt, herunder recepten, der blev anvendt ved 3D printningen af Europa's første 3D printede bygning, The BOD i Nordhavn.<br>Forsøg med forskellige genbrugsmaterialer gennemført og viste forskellig brugbarhed. Nogle materialer brugbare herunder tegl, andre ikke af forskellige årsager, herunder genbrugsgips, bundslagge og glasfibre fra vindmøllevinger |
| <b>Vidensportal</b>     | Vidensportal laves<br>fra projekt start<br>og udbygges<br>løbende. 500<br>tilmeldte.<br>Slutrapport | Vidensportal etableret og drevet i 2 år.<br>10 nyhedsbreve + 18 video'er udsendt<br>519 tilmeldte til nyhedsbreve<br>Videoer set 14.384 gange<br>LinkedIn omtaler set over 40.000 gange<br>Nærværende rapport.                                                                                                                                                                                                                                              |
| <b>Konferencer</b>      | Afholdelse af 2<br>konferencer med<br>100-200 deltagere<br>per konference                           | Afholdelse af midtvejs konference med 160 deltagere og afslutningskonference med 213 deltagere<br>Deltagelse på Dansk Byggeris årsmøde med 645 deltagere<br>Indlæg på Nordic BIM konference med 130 deltagere.<br>I alt 1.148 personer eksponeret til 3d printet byggeri på 4 konferencer                                                                                                                                                                   |

Der ses således også, at det er lykkedes partnerskabet mere end at indfri samtlige delmålsætninger.

Der henvises i øvrigt til appendix 1, hvor en mere omfattende gennemgang af partnerskabets formidlingsaktiviteter fremgår.

Partnerskabets deltagere har i stor udstrækning ved den omfangsrige research opnået en samlet viden, der i sig selv er "state of the art". Et faktum der underbygges af, at 3D Printhuset og Henrik Lund-Nielsen er blevet inviteret til at tale på store byggeri konferencer i Saudi Arabien, Bratislava og København alene her i marts 2018.

3D Printhuset har derudover p.b.a. The BOD og den i denne forbindelse udviklede printer, som skete i naturlig forlængelse af 3D Printhusets deltagelse i partnerskabet, udviklet en forbedret modul opbygget 3D printet byggeri printer, fordi der fra ind- og udland har været stor efterspørgsel efter en sådan. 3D Printhuset går her i februar 2018 i gang med at markedsføre og sælge disse nye 3D byggeri printere.

I tillæg har flere konventionelle store byggevirksomheder henvendt sig og bedt om, at 3D Printhuset laver diverse udviklingsarbejde for dem relateret til 3D printet byggeri. Alle forhold der tyder på, at partnerskabet nu er i besiddelse af unik viden og kompetence på området, samt at kommercialiseringen heraf begynder at tage fart. Dette er i sig selv et langt bedre resultat end ventet.

Der skal blot knyttet en enkelt sidste kommentar til forholdet mellem besøg, besøgsrapporter og profilbeskrivelser: Det blev besluttet ikke at lave besøgsrapporter (eller de kortere profilbeskrivelser) fra samtlige besøg, da en række af disse viste, at de pågældende projekter havde oversolgt deres budskab i medierne og derfor reelt ikke indeholdt teknisk kunnen, koncepter eller erfaring, der var værd at viderebringe. For de besøg, hvor der reelt var meget at berette om, blev besøgsrapporterne ganske omfangsrige, hvorfor det blev besluttet i tillæg at lave de kortere profilbeskrivelser, samt at lade disse dække flere besøg end besøgsrapporterne.

### **3. Overordnet status 3D printet byggeri globalt**

Trods stor medieårvågenhed de sidste par år, specielt blandt udenlandske medier, og mange projekter/virksomheder der arbejder med 3D printet byggeri, er antallet af faktisk opførte bygninger med 3D printet byggeri stadig meget begrænset. Nedenfor vil der blive redegjort for de af partnerskabet identificerede faktisk opførte bygninger/bygningskonstruktioner med 3D print teknologien, samt igangværende projekter med samme sigte og hvad der kan udledes og læres om "state of the art" ved at analysere disse.

Det skal ikke udelukkes, at der reelt kan eksistere flere bygninger og projekter end de af partnerskabet identificerede, idet virksomhederne og organisationerne bag af forskellige årsager kan have valgt ikke at fortælle offentligheden om deres projekter eller kun gøre det på lokal sprog eller kun i et begrænset omfang, og dermed er projektet ikke blevet kendt i mere brede kredse.

Mens 3D print har været anvendt i industrien i 30 år og nu anvendes bredt i utallige industrier og med mange forskellige formål lige fra produktudvikling, over prototyper til endelige produkter, så er anvendelsen af 3D print teknologien til opførelse af bygninger og bygningskonstruktioner meget ny og det er ikke mere end 3-4 år siden, at de første bygninger opført med teknologien kom frem. Det gør naturligvis arbejdet ved at identificere bygninger og projekter noget lettere.

Man skal også gøre sig klart, at selvom der tales og skrives om 3D printede bygninger eller bygningsdele, så er der i alle tilfælde kun tale om det, som man måske mere korrekt kunne benævne 3D print af råhuset uden tag (d.v.s. råhuset uden dæk og tag). Det vil sige, at der reelt er tale om, at man 3D printer væggene til bygningen, samt i enkelte tilfælde også 3D print af dele af fundamentet (som i 3D Printhusets The BOD projekt). Årsagen til, at 3D print teknologien hidtil reelt ikke har været set anvendt til dæk og tage er, at teknologien primært er god til at printe vertikalt, mens teknologien ikke har nogen fordele, snarere tværtimod, ved horisontale dele, som kan laves meget hurtigere med traditionel udstøbning.

I denne rapport anvendes den gængse benævnelse 3D printede bygninger uanset, at det er klart, at der kun er tale om væggene.

#### **3.1 Opførte 3D printede bygninger og bygningsstrukturer globalt**

Status på 3d printede bygninger og bygningsstrukturer globalt kan groft angives således:



## Europa:

- 2 bygninger, hvor vægstrukturen er 3d printet færdigt, mens begge bygninger stadig mangler endelig færdiggørelse; 3D Printhuset's The BOD i Nordhavn, samt YHNova bygningen i Nantes, Frankrig udført af Nantes Universitet



Europa's første 3D printede bygning, Kbh (3D Printhuset)



Yhnova bygningen under dets opførelse (Nantes Universitet)

- 2 3D printede broer; Én af Royal BAM/Tekniske Universitet Eindhoven, og én af Acciona



3D printet bro, Alcobendas, Madrid (Acciona/D-Shape tekn.)



3D printet bro, Gemert, Holland (Royal BAM med TU Eindhoven)

## Asien:

- 11 bygninger; bestående af;
  - 7 3D printede huse;
    - 4 i Suzhou, Kina af Winsun
    - En i Beijing, Kina af Huashang Tsenda
    - En i Moskva, af Apis Cor
    - En i Yaroslavl, af Specavia



Alle i Suzhou, af Winsun: 3D printet hus



3D printet kinesisk hus



3d printet lille hus



3D printet villa, Suzhou, Kina af Winsun



3D printet villa, Beijing, Kina af Huashang Tsenda



3D printet villa, Moskva, Rusland af Apis Cor



3D printet villa, Yaroslavl, Rusland, af Specavia

#### ○ 4 andre 3D printede bygninger:

- Lejlighedskompleks i Suzhou. Kina af Winsun
- Hotel suite i Manilla, Filippinerne af TotalKustom
- Kontor i Dubai, af Winsun
- Laboratorie i Dubai, af Cybe Construction (færdiggørelse mangler)



3D printet lejlighedskompleks, Suzhou, Kina af Winsun



3D printet hotelsuite, Manilla, Filippinerne, af TotalKustom





3D printet kontor Dubai, af Winsun



3D printet laboratorie, Dubai af Cybe Construction

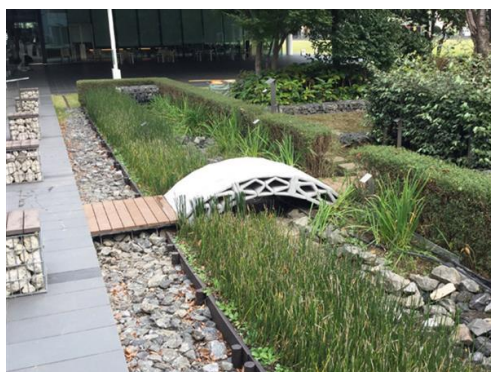
- 4 printede bygningsstrukturer; bestående af 3D printede bygningsstrukturer som følger;
  - offentlige toiletter i da Yang, Kina af Winsun
  - busstoppested i Shanghai, Kina af Winsun
  - bro i Shanghai, Kina, af Tongji Universitetet
  - bro i Japan, af Obayashi



3D printede offentlige toiletter, Da Yang, af Winsun



3D printet busstoppested, Shanghai, Kina af Winsun



3D printet bro i Japan, af Obayashi



3D printet bro, Shanghai, Kina af Tongji Universitetet

Der findes der ud over et antal barakker produceret i Kina af Winsun (10 huse på én dag som et blev hævdet i medierne), mens PR historien var for det første ikke sand, og bygningerne blev reelt ikke lavet færdigt og taget i brug – der var mere tale om forsøg. Tilsvarende findes der forskellige steder i Rusland nogle prints af lege-slottet etc., men der er mere tale om beton strukturer end egentlige bygninger/bygningsdele.

## USA

- En 3d printet militærbarak i Illinois, USA (The Construction Engineering Research Laboratory, CERL – del af den amerikanske hær)



3D printet militærbarak, af den amerikanske hær

Yderligere findes der i USA et 3D printet skur i Houston (Alex Le Roue) og et udendørs legeslot i Minnesota (Total Kustom), men ikke noget man decideret kan kalde en bygning eller bygningsdel.

Sammenfattende om den globale tilstedeværelse af allerede opførte bygninger og bygningsstrukturer med 3D print ses, at Asien er klart førende med 11 bygninger og 4 bygningsstrukturer, mens USA ligger bagerst med et enkelt projekt. Europa er ved at komme med og er nu oppe på 4 bygninger og bygningsstrukturer, men er stadig noget bagefter Asien, fordi der specielt i Dubai, Kina og Rusland sker meget på området.

Baseret på antallet af opførte bygninger og bygningsstrukturer er Winsun, Kina den klart førende virksomhed, idet Winsun alene står for 8 ud af 17 opførte bygninger og bygningsstrukturer med 3D print. Det er imidlertid værd at notere sig, at Winsuns løsninger med hensyn til armering og isolering ikke kan leve op til de europæiske krav på dette område. Ligeledes er det også karakteristisk, at den måde Winsun anvender 3D print teknologien på, er den mindst disruptive. Hvad Winsun reelt har etableret er en betonelement fabrik baseret på 3D print teknologi i stedet for traditionel teknologi. 3D print teknologien anvendes til at 3D printe elementer, som så på traditionel vis monteres på selve byggepladsen.

### **3.2 Virksomheder, der arbejder med 3D printet byggeri globalt**

Fokuseres der i stedet (for faktisk opførte bygninger) på igangværende projekter, hvor der arbejdes (R&D) på at lave 3D printet byggeri, ses et noget andet billede end for de opførte bygninger. Sådanne projekter kan indikere, hvor vi i fremtiden kommer til at se de næste projekter, og hvor flertallet af disse vil ligge.



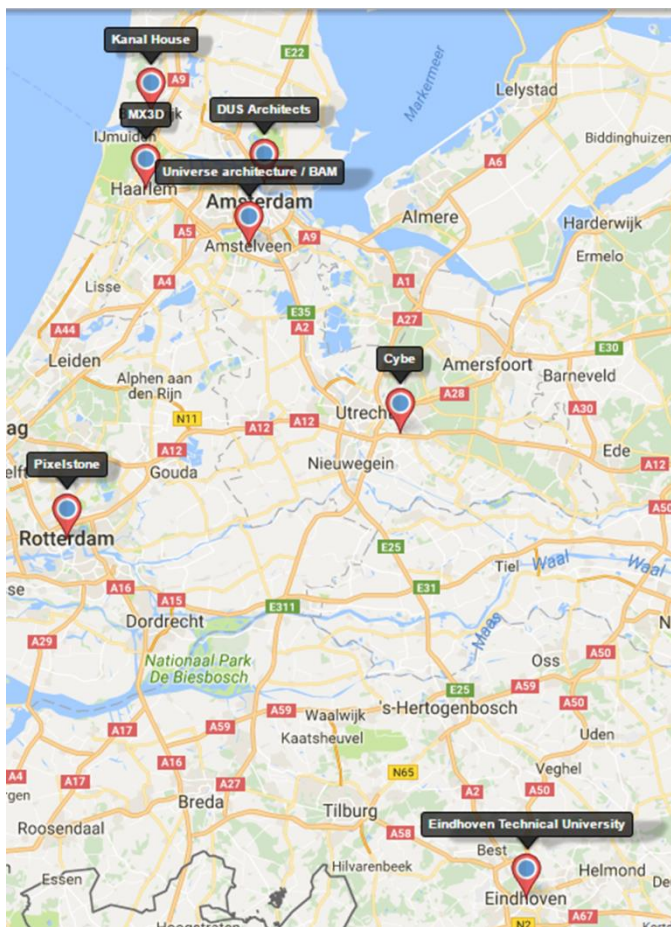
The map illustrates the geographical spread of 3D printing technology across Europe. Key locations and associated entities include:

- United Kingdom:** Loughborough University, Manchester, Liverpool, FreeFab.
- Netherlands:** Netherlands x7, 3D printed bike bridge /TUE/BAM, Dredsen University of Technology.
- Denmark:** Roskilde University Center, THE BOD, (Nyborg/TUE).
- Germany:** Hamburg, Köln, Frankfurt am Main, Mühlheim, Zühlbin Strabag.
- France:** Nantes /univ./BATI print, Constructions3D, Sika.
- Italy:** ETH, D-Shape, WASP, DFAB House.
- Spain:** Mini-Builders IAM, Pylos IAAC, Aciona/D-Shape.
- Poland:** Polska.
- Czech Republic:** Praha, Česká republika.
- Austria:** Overtec, Betabram.
- Slovenia:** Wasp.
- Croatia:** Hrvatska.
- Bosnia and Herzegovina:** Austrocam.
- Ukraine:** Passivdom.
- Hungary:** Magyarorszag.
- Albania:** Shqipëria.

Red arrows indicate the flow of technology and research, showing a general trend from North to South and West to East.

10

Specielt Holland er aktive indenfor 3D printet byggeri:



Alene i Holland er der således 7 aktive projekter, og specielt det Tekniske Universitet i Eindhoven skal fremhæves for deres R&D arbejde, men også på universiteter i Schweiz og i Frankrig sættes der meget på R&D indenfor 3D printet byggeri.

Af enkeltvirksomheder er partnerskabets eget medlem, 3D Printhuset, naturligvis interessant, idet 3D Printhuset stod bag 3D printningen af Europas første 3D printede bygning og fortsat sætter på at gøre sig gældende indenfor 3D printet byggeri. Her ud over foregår der på Teknologisk Institut også R&D indenfor 3D printet byggeri, så Danmark er ikke længere bagud på området og har opnået sin egen plads.

Dette kunne også ses på partnerskabets afslutningskonference, som tiltrak usædvanligt mange udenlandske deltagere trods, at konferencen principielt var rettet mod den danske byggebranche. Danmark er faktisk kommet så meget med på 3D printet byggeri, at udlandet udviser stor interesse for, hvad vi her foretager os.



## Asien



På R&D projekter er Asien også godt med, men med kun 15 projekter overgår Asien her af Europa.

Uanset at Asien ikke fører på antallet af R&D projekter, er det stadig sandsynligt, at Asien vil være stedet også de kommende år, hvor flest 3D printede bygninger opføres. Dette skyldes ikke mindst, at Dubai's Sheik har besluttet, at i 2030 skal 25% af alle bygninger i Dubai opføres med 3D print. Dette indebærer, at der pt. sættes meget på at få skabt flere 3D printede bygninger, og flere af de europæiske virksomheder er derfor også aktive i Dubai. De asiatiske organisationer satser entydigt på applikationen af metoden, nærmere end på forskning i grænserne for metoden. Asien er således ikke som Europa kendetegnet ved, at universiteterne på samme måde er gået ind i det, om end et par universiteter er aktive.

## USA



Med 15 R&D projekter er USA meget bedre med, end på antallet af opførte bygninger med 3D print.

Specielt skal involveringen fra MIT (Boston) og det amerikanske militær fremhæves, idet begge organisationer ofte går foran, når det gælder forskning og nyudvikling, og når først disse organisationer arbejder indenfor et område, følger mange andre virksomheder hurtigt efter. Den amerikanske virksomhed Total Kustom skal heller ikke glemmes, idet den stod for opførelsen af hotelsuiten i Manila for nogle år siden, men siden har der været meget stille omkring dem.

Samlet viser oversigtskortene omkring 70 projekter, uden at det påstås, at dette er en komplet oversigt. De særdeles mange projekter er til gengæld udtryk for, at vi også i de kommende år vil se mere og mere 3D printet byggeri.

Det vurderes, at kombinationen mellem erhvervsvirksomheder, der primært arbejder indenfor applikation af teknologien og universiteterne, der primært forsker i teknologiens muligheder, vil gøre, at Europa vil være med helt fremme globalt i årene fremover. Asien vil nok stadig være førende på antallet af opførte bygninger, men Europa forudses at overgå Asien på bl.a. materiale- og teknologi udvikling, samt m.h.t. integrerede løsninger for armering, isolering etc.

### 3.3 Den konventionelle byggebranches indtog ind i 3D printet byggeri

I løbet af partnerskabets levetid har der været en klar tendens til, at 3D printet byggeri er gået fra at være drevet af diverse start-ups og innovative personer til, at den konventionelle industri ikke bare interesserer sig for, men også investerer i den nye teknologi mere og mere.

Dette er et meget tydeligt tegn på, at potentialet i teknologien eksisterer og forventes omsat til forbedret konkurrenceevne i de kommende år for organisationer, der har deres spidskompetence indenfor byggeri og ikke teknologi, som typisk er der, hvor de innovative virksomheder kommer fra.

Specielt 2017 markerede året, hvor den konventionelle industri for alvor begyndte at involvere sig.



Det giver specielt genlyd rundt omkring, når det er store internationale virksomheder indenfor den konventionelle byggebranche, der rykker ind i 3D printet byggeri, hvorfor der nedenfor vises nogle eksempler på de store konventionelle byggevirksomheders involvering:

|                              | <b>Egen udvikling</b>                                                                                                                                 | <b>Investering i start ups</b>                                                                                   |
|------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Materiale leverandør</b>  | Sika (CH) (egen materiale- og printer udvikling)<br>Lafarge (materiale udvikling)                                                                     |                                                                                                                  |
| <b>Udstyrs leverandør</b>    |                                                                                                                                                       | Caterpillar investerer i FastBricks (AU)                                                                         |
| <b>Udførende entreprenør</b> | Strabag/Zublin (DE)<br>Bouygues (FR)<br>Skanska (S) (i samarbejde med Loughborough Universitet)<br>Royal BAM, Holland (i samarbejde med TU Eindhoven) | Vinci (Fr) investerer i Xtrees<br>Peri (DE) investerer i Minibuilders<br>Doka (AT) investerer i Contour Crafting |

Der ud over har en række andre virksomheder fra den konventionelle byggebranche involveret sig i at erhverve sig viden om teknologien og dens muligheder, hvad NCC's involvering i partnerskabet er et tydeligt eksempel på.

Den ovenfor beskrevne forskel mellem antallet af opførte bygninger/bygningskonstruktioner med 3D print og antallet af projekter/virksomheder, der arbejder med 3D printet byggeri, indikerer, at vi fremover kommer til at se meget mere 3D printet byggeri i takt med, at planerne føres ud i livet. Samme billede tegner sig, når man ser på udviklingen i antallet af annoncerede projekter, som gjort i grafen nedenfor:

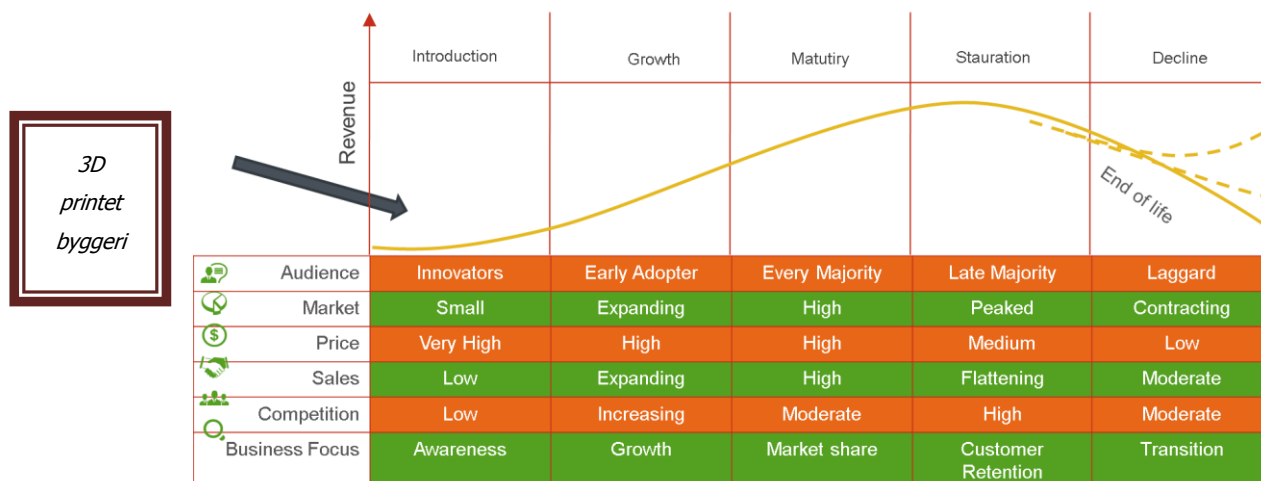


Grafen viser tydeligt, at flere og flere projekter er kommet til de seneste år.

Grafen er samtidig udtryk for industriens spæde udviklingsstadie, idet industrien ikke har eksisteret længe, som det også blev nævnt i indledningen til dette afsnit.

Sættes denne udvikling i et økonomi teoretisk perspektiv fås indikationer på, at der er tale om en meget ung industri med de kendetegn, der normalt følger heraf:

Udviklingsstadie for 3D printet byggeri industrien



Kilde: Partnerskabet

Uanset, at der kommer flere og flere projekter til og flere og flere bygninger bliver opført med 3D print, er der med stor sandsynlighed stadig tale om en industri i sin spæde vugge; Opmærksomheden rettes mod nye innovationer og innovatører, markedet er meget småt, salget er lavt og konkurrencen mellem udbyderne er reelt meget begrænset.

Netop fordi hele opmærksomheden er på nye innovationer og innovatørerne bag, kan sådanne med vovede påstande tiltrække sig en masse opmærksomhed, og dermed interesse for deres virksomheder. Netop derfor har vi i 2017 set eksempler herpå, der inkluderer Apis Cor, der påstod, at have bygget et hus i Moskva på bare 24 timer; De amerikanske TV nyheder viste det, Børsen skrev om det osv. og al medieopmærksomheden fik 3 millioner mennesker til at se deres video.

På samme måde med Cazza Construction, der påstod, at de om 3 år ville bruge 3D print til at opføre det første højhus i verden med teknologien i Dubai. Et andet eksempel kunne være Qingdao, Kina, der påstod, at have verdens største byggeri printer. Quingdao "glemte" bare at nævne, at de aldrig havde printet noget som helst med printeren, ligesom Apis Cor "glemte" at nævne, at de 24 timer kun var rigtige, såfremt det havde lykket dem at printe hele tiden uden problemer (og det gjorde det ikke, og derfor brugte de måneder på at lave bygningen) og Cazza "glemte" at nævne, at de da ikke anede, hvordan man skulle opføre et sådant højhus lige nu, samt at der blot var tale om nogle tanker og drømme hos personer, der i øvrigt ikke selv har byggeteknisk erfaring.

Sådanne udtalelser holdt således ikke til det fakta check, som partnerskabet kunne udføre på dem. Dette gjaldt også for de mange påstande om, at en given teknologi til 3D printet byggeri vil medføre mandskabsbesparelser på 40%, ja helt op til 70% påstår nogle endda (mere herom senere i afsnittet og i næste afsnit).

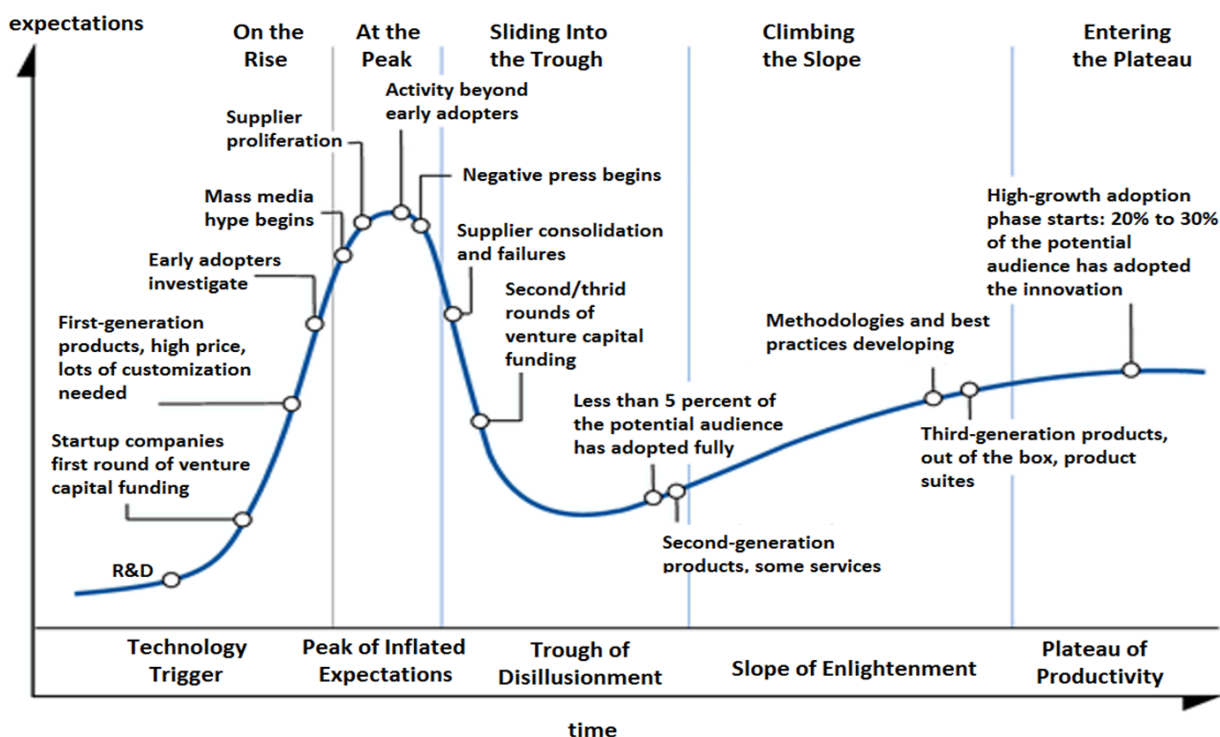
Faktisk viste mange af de besøg, som partnerskabet foretog til diverse 3D printet byggeri projekter rundt om i verden, at det som de pågældende virksomheder havde hævdet i pressen, måske ikke direkte var forkert, men så var de i hvert fald kommet med en række oplysninger i deres PR, som var misvisende for, hvor langt

de pågældende virksomheder reelt var kommet med deres udvikling og projekt. Det gjaldt naturligvis ikke alle, men det gjaldt en del og faktisk var det en generel trend for alle besøg, at virksomhederne i deres PR klart havde hævdet mere, end der kunne findes belæg for i deres projekter.

På den måde er sektoren præget af en del "hype", og dette antages at være tilfældet, fordi de flotte PR påstande kan tiltrække mediernes interesse og dermed øge interessen for og prisen på de pågældende virksomheder.

Analysevirksomheden Gartner Inc. har opstillet en generel model for, hvordan industrier, der oplever stor hype, udvikler sig, jf. nedenstående:

#### Gartners hype cycle:



Det er partnerskabets opfattelse, at interessen for 3D printet byggeri er eksploderet de sidste par år, og at industrien nærmer sig det tidspunkt, hvor forventningerne om, hvad teknologien kan medføre vil toppe hjulpet på vej af diverse påstande som ovenfor nævnt. D.v.s. vi er på vej til "at the peak" stadiet, som er karakteriseret ved stor mediebevågenhed, men reelt meget lidt udført (meget lille konkret anvendelse, meget lille markedsandel).

Disse forventninger vil ganske naturligt på et eller andet tidspunkt blive skuffede: Nej, man kan ikke printe et hus på 24 timer baseret på beton, bl.a. fordi betonen som minimum skal have en hærdetid på 7 dage og reelt først har nået sin endelige styrke efter 28 dage, og fordi alle de andre fag, der er nødvendige i et byggeri (f.eks. el, vvs etc.) stadig vil bruge den tid, som de normalt anvender og det er langt mere end 24 timer.

Og nej, der er intet, der taler for, at man om 3 år skulle være kommet så langt med udviklingen af teknologien, at man kan 3D printe en skyskraber. Flere etager jo, men ikke en skyskraber om 3 år.

Dette kan man med en vis grad af sandsynlighed forudsige vil medføre skuffelse i medierne og i den generelle opfattelse, og forventningerne til teknologien/industrien vil som konsekvens rasle ned, men

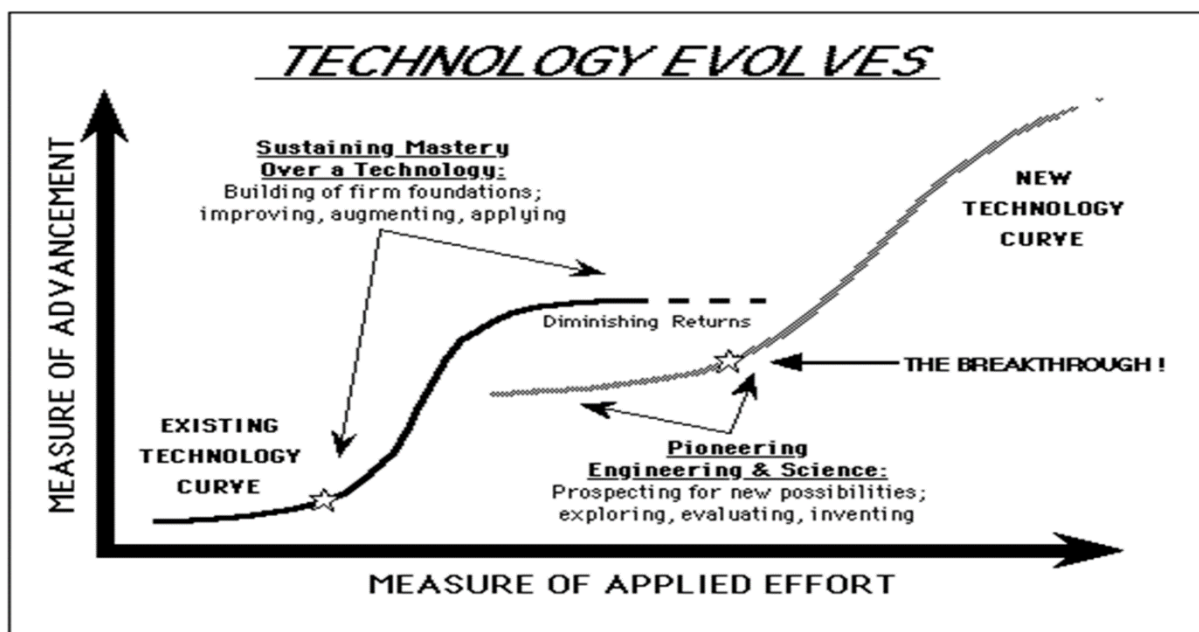
samtidig vil de seriøse aktører indenfor branchen (for Europa gælder dette ikke mindst universiteterne) fortsætte deres arbejde, og langsomt vil dette arbejde føre til, at teknologien vinder indpas lidt efter lidt.

Det er muligt, at nogle af de nævnte ca. 70 projekter ikke vil lede til et resultat, eller at de vil møde en stille død i de kommende år, men nogle af dem vil nok lykkes, og der vil blive realiseret mere og mere byggeri med metoden. Dette ikke mindst fordi den spæde industri nu i meget større omfang også får opbakning fra den konventionelle byggebranche, som redegjort for tidligere og i samarbejde med universiteternes involvering burde dette sikre, at teknologien står overfor stor udvikling de kommende år.

Dette vil så igen lede til, at den akkumulerede indsats for at fremme teknologien vil stige i årene fremover, og med dette også muligheden for, at teknologien reelt vil overgå de traditionelt anvendte teknologier i byggebranchen.

På sin vis kan man hævde, at vi her i Danmark, netop p.g.a. partnerskabet og den mere saglige fremstilling af, hvor langt teknologien er kommet, og hvor konkurrencedygtig den er (se senere), hurtigere vil komme ned af hype kurven og dermed forhåbentligt også hurtigere får lavet den yderligere indsats, som der skal til for, at teknologien kan høste de potentialer, som den har. Kommer den yderligere indsats vil teknologiens muligheder for fremover at få en reel betydning i byggeriet blive forøget.

Ovenstående beskrevne udvikling for teknologien, hvor den har potentialer, men starter med reelt ikke at kunne konkurrere med den eksisterende teknologi svarer præcis til den typiske klassiske S-kurve udvikling af en ny teknologi, jf. nedenstående figur:

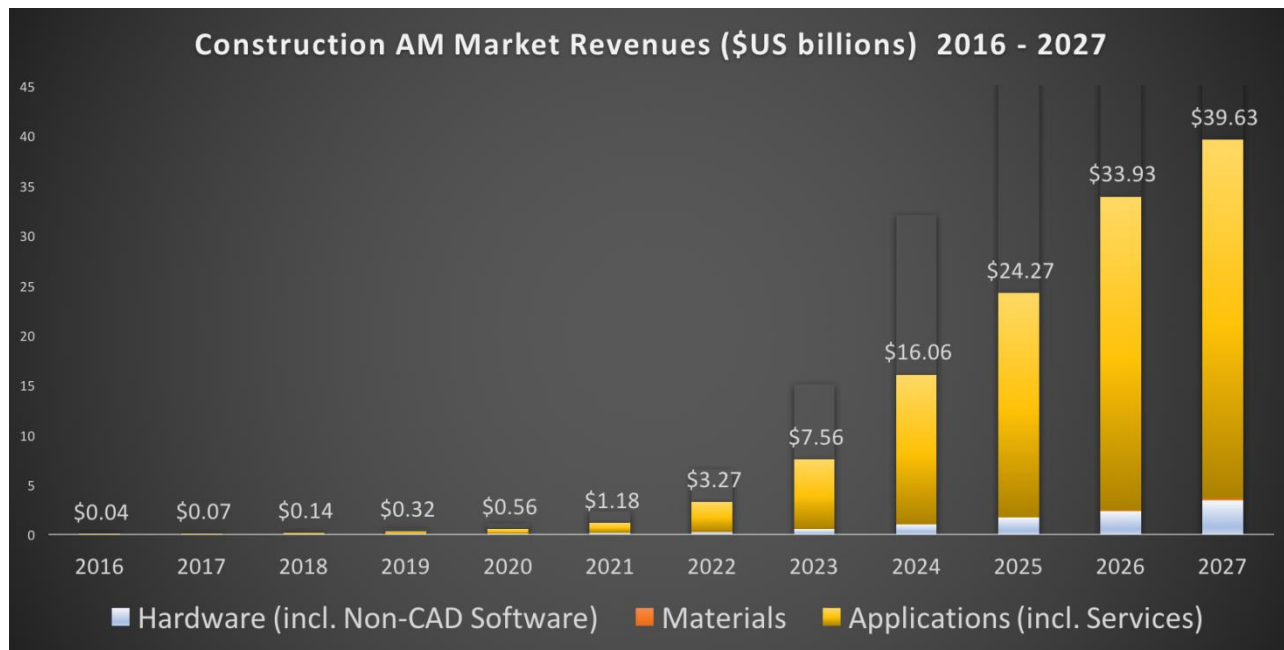


Teknologien starter med ikke at være konkurrencedygtig, men har teknologien et potentiale vil den i takt med en større indsats yde bedre og bedre og på et tidspunkt overgå den konventionelle teknologi. Som følge af de store virksomheders og universiteternes involvering er partnerskabet ikke i tvivl om, at indsatsen vil blive foretaget. Derfor spås markedspotentialet for teknologien stadig at være meget betragteligt, trods de ovenfor beskrevne begrænsninger.

Nu er det som bekendt svært at spå om fremtiden, men der er på den anden side også behov for at få sat tal på, hvor stor teknologien kan forventes at blive i årene fremefter. Et bud kunne være det som Smartech Publishing, der udgiver markedsrapporter om en række markeder, netop har offentliggjort, om end Smartech også kan være påvirket af Gartners hype effekt, og derfor måske kunne tænkes at overvurdere mulighederne.



Smartech Markets Publishing har i tråd med ovenstående i januar 2018 udgivet en analyse rapport, hvor de forecaster det globale marked for 3D printet byggeri til at udgøre små 250 mia. kr om blot 10 år !!



En af de hyppigst anvendte argumenter for 3D printet byggeri blandt udbydere af teknologien, er teknologiens mandskabs og dermed omkostningsbesparende muligheder, som nævnt ovenfor.

Partnerskabet har naturligvis i sit arbejde forsøgt at få belyst teknologiens nuværende konkurrenceevne via data fra de realiserede projekter. Det har bare ikke været muligt. Der har ikke kunnet opnås valide data fra eet eneste af de udførte byggerier. Sandsynligvis fordi, at hvis disse data blev "offentliggjort", ville det vise sig, at det pågældende byggeri billigere og hurtigere ville have kunnet opføres med traditionel teknologi. Det er der ikke mange overskrifter i, og derfor har virksomhederne bag projekterne ikke haft interesse i at tilvejebringe og offentliggøre disse data.

Det er således partnerskabets opfattelse ud fra de interviews og undersøgelser af de enkelte projekter, som partnerskabet har fortaget, at hovedparten (hvis ikke samtlige) af de opførte bygninger reelt har kostet mere og været længere tid om at blive opført, end hvis de var opført på den traditionelle måde. Som følge af situationen har det som nævnt ikke været muligt at belyse dette med data, men efter 2 års research og besøg af op mod 40 projekter, er det det bedste bud på den reelle konkurrenceevne af teknologien på nuværende tidspunkt.

Det er der imidlertid ikke noget mærkeligt i. Det er fuldstændig efter bogen og i henhold til ovenstående S-kurve.

### 3.5 Økonomien i 3D printet byggeri

Tages de økonomiske teori briller på igen ville det også være usædvanligt, såfremt 3D print teknologien med det samme generelt ville overhale den konventionelle teknologi anvendt.

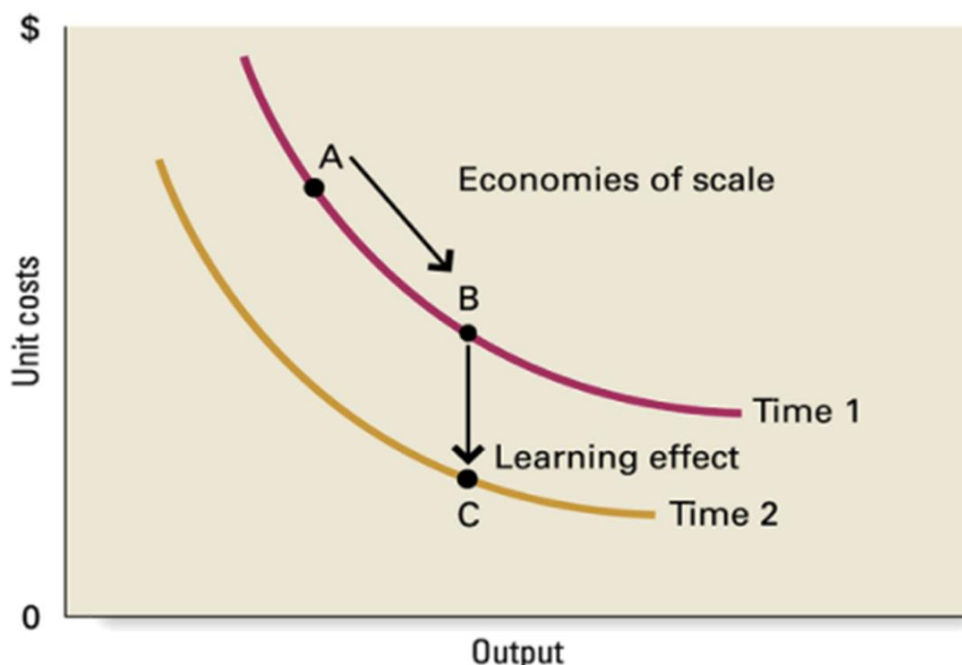
Dette skyldes dels, at bortset fra Winsun, så er der ingen af de opførte bygninger, der er opført af organisationer, der har prøvet det før, og som bekendt bliver man altså ikke verdensmester første gang man prøver noget.

Sagt økonomi teoretisk har der for samtlige organisationer, på nær Winsun, umuligt kunnet finde en "learning effect" sted, idet dette jo netop først sker, når man prøver det samme flere gange.

Industrien er således i den grad præget af ikke at have nogen læringseffekt, og dermed stadig i økonomisk forstand operere på et helt andet omkostningsniveau, end der ville kunne opnås, såfremt man repeterede de opførte byggerier eller lavede nogle tilsvarende: Alle de ting, der gik galt første gang og alle de forhold, der ikke blev lavet optimalt, ville man dermed få mulighed for at forbedre med faldende omkostningsniveau som konsekvens. Groft sagt vil man via læringseffekten have mulighed for at rykke ned på et meget lavere omkostningsniveau.

Den anden grund til, at man ikke kan forvente, at teknologien ville kunne fungere på lige fod med den konventionelle teknologi, er den mangel på "economies of scale", som præger situationen i dag. For så godt som samtlige af de opførte byggerier har der været tale om "ét" styk, hvad der alt andet lige gør enhver ting dyrere per styk end mange styk af den samme ting.

Begge disse forhold er illustreret i nedenstående figur:



Læringseffektens og mængdens betydning for omkostningerne i de opførte bygninger med 3D print

Læringseffekt kan bringe omkostningerne ved 3D printet byggeri ned på et helt andet niveau (ned på en anden omkostningskurve), mens flere byggerier/mængden af bygninger kan presse enhedsomkostningen yderligere (medføre bevægelse ned af kurven).

Med baggrund i sædvanlig accepteret økonomisk teori er der således belæg for at påstå, at konkurrenceevnen for teknologien vil forbedres markant i perioden fremover i takt med, at de organisationer, der allerede har brugt teknologien, gentager brugen af den og gør det i større omfang.

Om dette i sig selv er nok til at gøre teknologien på det nuværende udviklingsstadium fuldt konkurrencedygtig med den konventionelle teknologi er svært at svare generelt på, og vil sandsynligvis også afhænge af arten af det byggeri, der skal opføres. Teknologien opnår således sandsynligvis hurtigere god konkurrenceevne indenfor det unikke byggeri, hvor der designs med former, der ikke er retlinjede, idet teknologien her har specielle fordele, og idet den konventionelle byggebranche ikke har så lang akkumuleret erfaring med

sådanne. Dette er ikke tilfældet med mere retlinjede designs, hvor elementerne til et sådant kan udføres på elementfabrikker, der har haft årevis til at perfektionere fremstillingen heraf. 3D print teknologien vil således alt andet lige have nemmere ved at overgå de konventionelle fremstillingsmetoder for unikt byggeri end for mere low cost standard byggeri.

Teknologiens muligheder for markant at forbedre konkurrenceevnen afhænger også af, i hvilket omfang teknologien kan bidrage til at øge produktiviteten for forskellige af de elementer, der indgår i en færdig bygning. Det er karakteristisk, at "alle" taler om en 3D printet bygning, mens der i realiteten er tale om, at væggene i en bygning er 3D printet, mens resten af bygningen er opført med traditionelle teknologier, jf. indledningen til dette afsnit.

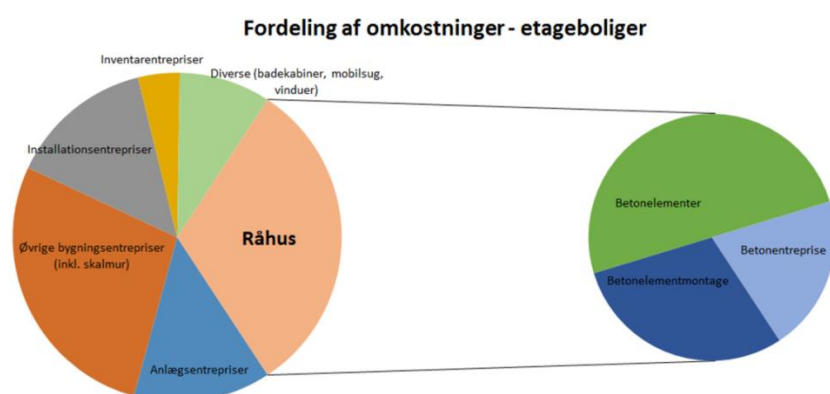
Væggene er trods alt kun en mindre del af en bygning, og for et typisk én-families hus, som de opførte byggerier med 3D print kan sammenlignes med, udgør væggene ikke mere end allerhøjst 36%, og det kun hvis man inkluderer trapper, altaner mv.

Det fremgår tydeligt af den såkaldte V&S prisbog, som gengives nedenfor:

| Emne                 | Pris/m2 | Beskrivelse                                    |
|----------------------|---------|------------------------------------------------|
| Enfamilieshuse       | 10.000  | Total                                          |
| Bygningsbasis        | 840     | Terræn, fundamenter, terrændæk                 |
| Primære bygningsdele | 3.600   | 36% Ydervægge, indervægge, dæk, trapper, altan |
| Komplettering        | 1.430   | Komplettering af primære bygningsdele          |
| Overflader           | 2.050   | Alle udvendige og indvendige overflader        |
| Spildevand           | 100     | -                                              |
| Sanitet              | 240     | -                                              |
| Vand                 | 190     | -                                              |
| Fjernvarmeanlæg      | 660     | -                                              |
| Ventilation          | 50      | -                                              |
| El-inst.             | 470     | -                                              |
| VVS, øvrige          | 40      | -                                              |
| Fast inventar        | 350     | -                                              |
| Kontrol              | 10.020  |                                                |

V&S Molio prisbog 2016, én-families byggerier

Tilsvarende ses for etagebyggeri:



Kilde: NCC præsentation, Konference om 3D Printet Byggeri, 28. februar 2017

Med så relativt lille en andel for væggene, så kan påstande/håb om, at teknologien kan medføre f.eks. en halvering af byggeomkostningerne kun blive realiseret, såfremt 3D print teknologien kan anvendes til andet end blot opførelsen af de rå vægge.

For virkelig at reducere de samlede omkostninger ved byggeri bør teknologien fremover også bruges til:

- Flere bygningsdele end bare væggene (f.eks. hovedparten af fundamentet, dæk etc.)
- Overfladering og komplettering
- Reducere omkostningerne for de efterfølgende fag (VVS, EL, isolering, tag etc)

Analyserer man omfanget af anvendelsen af 3D print teknologien i de opførte byggerier med teknologien ses groft skitseret følgende:



Anvendelsesområde for 3D print ved 3D printet byggeri (Kilde: Partnerskabet for 3D printet byggeri)

Det er således meget karakteristisk for de opførte byggerier, at for langt hovedparten af dem, har de alene koncentreret sig om "beton" delen og langt færre for armeringsdelen og så fremdeles.

I enkelte projekter, f.eks. 3D Printhuset's The BOD byggeri, har det fra starten været planlagt og medtaget, at teknologien også skulle muliggøre en efterfølgende nemmere isolering, som dermed også ville hjælpe til at reducere omkostningerne. I 3D Printhusets tilfælde således, at isoleringen efterfølgende kunne udføres på bare 4 timer af én mand ved at blæse papiruld ind i væggene.

Som nævnt tidligere har partnerskabet forsøgt at få data fra alle de opførte byggerier, men det har ikke været muligt at få fra andre end 3D Printhuset. 3D Printhuset har forsøgt at lave en omkostningsopgørelse for deres 3D printede bygning og så sammenligne denne med, hvad det ville koste at opføre samme bygning med konventionel teknologi. Sammenligningen ser ud som følger:



| Klassisk bygning                           | Råhu<br>S                  |                       |
|--------------------------------------------|----------------------------|-----------------------|
|                                            |                            |                       |
| Materiale                                  | Mængde<br>[ton]            | Pris [ton]            |
| Beton, leveret                             | 24.00 ton                  | 13,200.00 kr.         |
| facadeisolering<br>(Rockwool)              | 0.90 ton                   | 22,500.00 kr.         |
|                                            |                            |                       |
| <b>Materialer i alt</b>                    |                            | <b>35,700.00 kr.</b>  |
|                                            |                            |                       |
| Arbejdsopgave                              | Tid<br>[Timer] á<br>225 kr | Pris                  |
| Forskalling og støbning                    | 675                        | 151,875.00 kr.        |
| Isolering + Pudsning                       | 80                         | 18,000.00 kr.         |
|                                            |                            |                       |
| <b>Arbejdstid i alt</b>                    | <b>755</b>                 | <b>169,875.00 kr.</b> |
|                                            |                            |                       |
| <b>Samlede<br/>omkostninger,<br/>råhus</b> |                            | <b>205,575.00 kr.</b> |

| 3D Printet Bygning                            | Råhus                    |                      |
|-----------------------------------------------|--------------------------|----------------------|
|                                               |                          |                      |
| Materiale                                     | Mængde<br>[ton]          | Pris                 |
| Cement                                        | 6.12 ton                 | 10,374.07 kr.        |
| 0/2 sand                                      | 3.50 ton                 | 595.02 kr.           |
| 0/4 sand                                      | 3.50 ton                 | 637.02 kr.           |
| genbrugstegl                                  | 4.38 ton                 | 525.75 kr.           |
| Vand                                          | 1.66 ton                 | 62.40 kr.            |
| Glenium sky 631                               | 0.04 ton                 | 191.45 kr.           |
| Crackstop                                     | 0.02 ton                 | 1,038.35 kr.         |
| <b>Materialeomkostninger i alt (3d Print)</b> |                          | <b>12,385.72 kr.</b> |
| Primewool<br>papirisolering                   | 1.40 ton                 | 8,400.00 kr.         |
| Færdig beton til søjler                       | 2.70 ton                 | 1,485.00 kr.         |
| <b>Materialeomkostninger i alt</b>            |                          | <b>22,270.72 kr.</b> |
|                                               |                          |                      |
| Arbejdsopgave                                 | Tid [timer] á<br>225 / t | Pris                 |
| Mont. + Demont af<br>printer                  | 64                       | 14,400.00 kr.        |
| 3D print                                      | 150                      | 33,750.00 kr.        |
| Udstøbning af søjler                          | 4                        | 900.00 kr.           |
| Opfyld af isolering                           | 4                        | 900.00 kr.           |
|                                               |                          |                      |
| <b>Arbejdsløn i alt</b>                       | <b>158</b>               | <b>49,950.00 kr.</b> |
| <b>Samlede<br/>omkostninger</b>               |                          | <b>72,220.72 kr.</b> |

Omkostningerne til at 3D printe væggene og udføre isoleringen i 3D Printhuset's The BOD projekt sammenlignet med omkostningerne ved at opføre en tilsvarende bygning med konventionelt byggeri. Man skal være varsom med at konkludere på disse tal. Se kommentarer nedenfor.

Omkostningerne ved at bygge den tilsvarende bygning med konventionel teknologi er estimeret af kvalificeret virksomhed, vant til konventionelt byggeri.

Her skal man for det første bemærke, at der er tale om en bygning med ekstremt organiske former, som er usædvanlig dyr at lave med konventionel teknologi, mens 3D print teknologien netop medfører, at dette kan gøre uden ekstra omkostninger. Det er således ikke usædvanligt i den konventionelle byggebranche at regne med, at sådanne byggerier ender med at koste 5 gange så meget (for arbejdskraften) som et traditionelt firkantet/rektangulært byggeri. Omkostnings sammenligningen laves altså på 3D print teknologiens hjemmebane kunne man sige, og havde 3D Printhuset valgt at opføre en retlinjet bygning ville omkostningerne i projektet nok ikke have været markant anderledes, men den tilsvarende omkostning ved

traditionel teknologi ville altså have reduceret arbejdskraftbehovet med 80% og dermed have gjort dette billigere end med 3D print teknologien.

Man skal også gøre sig klart, at det lidt er at sammenligne æbler og pærer, idet de to metoder leder til forskellige løsninger m.h.t., hvordan enkelt elementer som f.eks. isoleringen laves, og når man ikke laver tingene på samme måde, kan man reelt så sammenligne, kunne man spørge. Det gælder også for materialerne. I ovenstående sammenlignes færdigt leveret beton ved konventionelt byggeri med den beton, som 3D Printhuset selv blandede og fremstillede ved deres byggeri.

Det skal endeligt også bemærkes, at 3D Printhuset i ovenstående oversigt IKKE har medtaget de faktiske timer brugt, som langt oversteg antallet angivet ovenfor, men i stedet har beregnet, hvor lang tid man har printet, når man ikke har brugt tid på at løse andre problemer primært relateret til materiale, der ikke levede op til specifikationen (mere herom senere). Man kan derfor sige, at opgørelsen viser "en best case" omkostningsopgørelse på nuværende teknologiske stadiet baseret på, at man har overvundet børnesygdommene etc (realiseret første læringseffekt ).

Vurderet på denne måde viser potentialet sig, idet der kun anvendes 30% af den løn (70% reduktion) der ellers ved anvendelse af konventionel teknologi skulle være anvendt på de organiske former anvendt i projektet.

Følgende skal også bemærkes:

- Selvom der i recepten for det 3D printede beton er anvendt en relativ stor andel cement, så er 3D betonen generelt ikke dyrere end ved konventionelt byggeri, fordi der ved 3D printet byggeri anvendes mindre beton. Dog er der, som før nævnt, tale om en sammenligning af færdigblandet leveret beton ved konventionelt byggeri, men den selv-blandede i 3D Printhusets tilfælde.
- En væsentlig del af såvel løn som materialebesparelsen kommer fra isoleringen, der med den 3D printede bygning kun tog 4 timer mod estimeret 80 for en tilsvarende bygning opført konventionelt. Dette skyldes, at der i den 3D printede byggeri blev opført to parallelle vægge, hvor i mellem papirisoleringen hurtigt kunne blæses ind, mens der ved det konventionelle byggeri ville skulle anvendes facade isoleringsbatts, som er krævende at montere.
- Beregningen medtager ikke de omkostninger til opsætning, leje og nedtagning af telt, som er nødvendigt, når der anvendes 3D print teknologien. På den anden side medfører brugen af telt, at vejrlig ikke spiller ind, hvad der også ville kunne give besparelser specielt om efteråret.
- Beregningen medtager heller ikke omkostningerne ved brug af 3D printeren, som der jo skal investeres i for at bygge på denne måde.
- Den helt store forskel i omkostningerne ved de to metoder er tiden anvendt til forskalling i.f.t. 3D print. Her er det naturligvis vigtigt at notere sig, at beregningen er foretaget på baggrund af en bygning, der med konventionel teknologi ville være meget vanskelig og dermed tidskrævende at opføre. En hel retlinet bygning ville typisk have kostet 1/3 af det ovenfor anførte eller stort set svarende til den 3D printede bygning
- Denne første, men meget forenklet sammenligning viser således, at der kan være et meget betydeligt besparelspotentiale ved anvendelse af 3D print teknologien til bygninger, der ikke er helt retlinede og enkle, mens fordelene nok er betydeligt mindre for en retlinet bygning.

## 3.6 Sammenfatning

Kortlægningen af "state of the art" globalt viste sammenfattende følgende:

- Trods den meget hype er der stadig under 20 bygninger opført med 3D print teknologien globalt.
- Hysten er delvist afstedkommet af, at medierne gladeligt har fremført påstande fra de involverede organisationer om fordelene ved 3D print teknologien – fordele som et nærmere eftersyn generelt ikke har kunnet dokumentere. På et tidspunkt forventes dette at lede til meget skuffede forventninger og nærmest afskrivning af teknologiens muligheder (efter devicen "højt at flyve – dybt at falde"), men ligesom hypen har været overdrevet med hensyn til opskruede forventninger, lige så vil den fremtidige forventede nedtur også være en overreaktion, som der egentlig ikke er belæg for. Potentialer er der, de er bare ikke realiseret endnu.
- Kina og Mellemøsten er klart førende med hensyn til, hvor bygninger med 3D print teknologien er opført, men Europa er begyndt at rykke og er foran USA, hvor forbavsende lidt faktisk er blevet opført med teknologien trods, at den blev opfundet der. Rusland er overraskende godt med, med flere projekter.
- Da Europa yderligere klart fører på antallet af nuværende projekter og inddragelse af såvel private virksomheder som universiteter og materialeleverandører i indsatsen for at fremme forståelsen og anvendelsen af 3D printet byggeri, forudses Europa at opnå en endnu mere prominent position fremover.
- En virksomhed, kinesiske Winsun, er hovedårsagen bag Kinas og Mellemøstens dominans på opførte bygninger og er ansvarlig for henved halvdelen af alle byggerier, hvor teknologien har været anvendt. Winsun vurderes til gengæld også at være den virksomhed, der reelt har den mindst disruptive anvendelse af teknologien, med deraf hørende begrænsede muligheder for fuldt ud at realisere potentialerne i teknologien. Det er også værd at bemærke, at Winsuns løsninger generelt ikke lever op til Europæiske normer og standarder.
- Trods besøg og interviews har det ikke været muligt at få pålidelige data fra de gennemførte byggerier, der med stor grad af sikkerhed kan fastslå den præcise konkurrenceevne af den nye teknologi.
- Til gengæld er der et væld af information af mere indikativ karakter, der alle peger i retning af, at teknologien – i hvert fald for bygninger med konventionel formgivning – endnu ikke er konkurrencedygtig, mens der er svage indikationer på, at konkurrenceevnen på mere organisk formede bygninger måske allerede nu overgår den konventionelle teknologi.
- Det ville også være mærkeligt, hvis 3D print teknologien kunne konkurrere allerede nu med den konventionelle metode ved standard byggerier; teknologien er relativt ny, og der er ingen skala eller læringseffekt opnået. Det er simpelthen ikke muligt på baggrund af de meget få bygninger, der er opført. Den konventionelle byggebranche har tilsvarende mangel på skala, når det gælder mere organisk formede bygninger, og der kan 3D print teknologien derfor bedre allerede nu konkurrere, også fordi formgivning med teknologien ikke koster ekstra.
- I takt med, at skala og læringseffekt opnås med teknologien vil denne blive mere og mere konkurrencedygtig.
- Det er dog også klart, at man i de hidtidige projekter har koncentreret anvendelsen af 3D print teknologien på bygningskomponenter, i praksis blot væggene, der står for en så relativ lille del af de samlede byggeomkostninger (25-30%), at teknologien fremover skal anvendes mere omfangsrigt, hvis teknologien signifikant skal reducere de samlede byggeomkostninger. En pæn besparelse på f.eks. 20% på omkostninger, der udgør 25%, er jo kun en besparelse på 5% på de samlede byggeomkostninger.

- Udover at 3D print teknologien skulle kunne lave flere bygningsdele end væggene, så skal den fremover også kunne mere end blot at printe dem rå, hvis teknologien virkelig skal medføre reduktioner i byggeriets fremstillingsomkostninger. 3D print af flere bygningsdele og komplettering og finish af sådanne skal altså komme til, men det kræver udvikling af næste generation af teknologien, idet ingen af de kendte teknologier muliggør dette.
- Tilsvarende skal teknologien gøre det nemmere for de efterfølgende fag for virkelig at nedbringe de samlede omkostninger
- De gennemførte projekter har demonstreret potentialet i teknologien, der af flere og flere vurderes at være meget stort. Så stort, at finansieringen af indsatsen for at udvikle teknologien nu ikke længere alene bæres af relativt nystartede virksomheder, men mere og mere af store veletablerede virksomheder fra den konventionelle byggebranche, der er begyndt at investere i 3D print og de opstartsvirksomheder, der har satset herpå.
- Dette lover godt for fremtiden og i tillæg til den forskning, der foregår på universiteterne, kan disse forhold og den finansiering være med til at løfte teknologien afgørende frem til udvikling af den næste generation af teknologien, som er helt nødvendig, hvis teknologien skal realisere sine potentialer og nedbringe de samlede byggeomkostninger markant.

## 4. 3D printet byggeri printere

Ligesom for den 3D print teknologi, der anvendes bl.a. i industrien, findes der ikke kun én bestemt type af printere indenfor kategorien 3D printere til byggeri. Det fører dog for vidt her at gennemgå samtlige de typer af printere og teknologier, der findes. Der henvises i denne sammenhæng til de udarbejdede besøgsrapporter og profilbeskrivelser i kombination med den generelle forklaring om 3D printere anvendt til byggeri formål, som findes i appendix 5 i denne rapport. Beskrivelsen i appendix 5 knytter sig til det kategoriseringssystem, som partnerskabet har udviklet til at indsamle og systematisere viden om de enkelte projekter og teknologier anvendt til byggeri.

Nedenfor følger derfor først en kort forklaring på kategoriseringssystemet, som efterfølges af en kort beskrivelse af de to mest anvendte typer af printere til byggeri og hvor de anvendes (off-site/prefab eller on-site). Så følger en kort analyse af, hvad der faktisk kan printes med to af de mest anvendte typer af printere, samt en kortlægning af nogle af de udfordringer, der ikke ses løst i nogen af projekterne. Endeligt ses der på erfaringen fra de testprints og de udviklede test printere, som har været anvendt i projektet, ligesom printeren som 3D Printhuset brugte til opførelsen af The BOD vil blive gennemgået og erfaringerne fra dette projekt vil blive videregivet.

### 4.1 Kategoriseringssystem

I forbindelse med de mange gennemførte besøg til 3D printet byggeri projekter udviklede partnerskabet allerede meget tidligt i forløbet et system til at indsamle og kategorisere den viden om hvert projekt og teknologi, som var nødvendig for præcist at forstå projektets indhold og status.

Systemet består af 4 hovedområder som følger:

- Grundlæggende information om den pågældende organisation og hvor langt de er kommet med udviklingen af deres 3D printet byggeri projekt (udviklingsstadiet)
- Information om hvilken type af 3D printet byggeri teknologi, der anvendes i det pågældende projekt
- Detaljerne omkring den printer, som projektet udføres med
- Detaljerne omkring de materialer, som projektet udføres med

Under hvert hovedområde er der en række under kategorier, som gennemgås nedenfor.

#### Ad A) Organisation og udviklingsstadiet

|                       |                                                |                   |                        |                   |                          |                           |                           |                          |                   |                   |
|-----------------------|------------------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Company & development | Year of establishment                          | 2014              |                        |                   |                          |                           |                           |                          |                   |                   |
|                       | Year of entering into construction 3D-Printing | 2014              |                        |                   |                          |                           |                           |                          |                   |                   |
|                       | Number of employees                            | Less than 10      | Less than 25           | Less than 50      | Less than 100            | Less than 500             | Less than 1000            | More than 1000           | Unknown/Undefined |                   |
|                       | Targeted market                                | Printers          | Printer parts          | Materials         | Furniture/Sculptures     | Building components       | Building projects         | Other                    | Unknown/Undefined |                   |
|                       | Development stage of printers                  | Conceptual        | Prototypes             | Working products  | Commercial products      | Other                     | Unknown/Undefined         |                          |                   |                   |
|                       | Development stage of printed materials         | Conceptual        | Prototypes/Test prints | Usable products   | Commercial products      | Other                     | Unknown/Undefined         |                          |                   |                   |
|                       | Patent(s) status                               | Not patented      | Patent pending         | Patent granted    | Other                    | Unknown/Undefined         |                           |                          |                   |                   |
|                       | Patent coverage                                | Printer design    | Printing technology    | Material          | Nozzle/Deposition system | Material feeding system   | Movement system           | Software/Firmware        | Other             | Unknown/Undefined |
|                       | Largest print up to date (size)                | Less than 1m3     | Less than 5m3          | Less than 10m3    | Less than 25m3           | Less than 50m3            | Less than 100m3           | More than 100m3          | Unknown/Undefined |                   |
|                       | Largest print up to date (category)            | Minor test prints | Furniture/Sculptures   | Building elements | Less than 50m2 buildings | Less than 100m2 buildings | More than 100m2 buildings | Multiple storey building | Other             | Unknown/Undefined |



## Ad B) Teknologi type

| T<br>e<br>c<br>h<br>n<br>o<br>l<br>o<br>g<br>y | Additive Manufacturing technology type | Material Extrusion (Layered) | Material Extrusion (Suspended) | Binder Jetting        | Other                | Unknown/Undefined                  |                             |       |                   |  |
|------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|----------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------|-------------------|--|
|                                                | Form Freedom                           | 2D freedom                   | 2.5D freedom                   | 3D freedom            | Full 3D freedom      | Other                              | Unknown/Undefined           |       |                   |  |
|                                                | Fabrication location                   | In situ                      | On-site prefabricati           | Off-site prefabricati | Partial prefabricati | Other                              | Unknown/Undefined           |       |                   |  |
|                                                | Fabrication approach                   | Direct fabrication           | Semi-direct fabrication        | Component fabrication | Formwork fabrication | Stay-in-place formwork fabrication | Cover/Engulfing fabrication | Other | Unknown/Undefined |  |

## Ad C) Printer anvendt

| P<br>r<br>i<br>n<br>t<br>e<br>r | Movement system             | Cartesian gantry   | Delta gantry                 | Robotic arm               | Mobile robotic           | Cable suspension          | Other               | Unknown/Undefined |                   |                   |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
|                                 | Maximum printable volume    | Less than 1m3      | Less than 5m3                | Less than 10m3            | Less than 25m3           | Less than 50m3            | Less than 100m3     | More than 100m3   | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Maximum printable area      | Less than 1m2      | Less than 2m2                | Less than 5m2             | Less than 10m2           | Less than 25m2            | Less than 50m2      | More than 50m2    | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Deposition method           | Jetting            | Pressure extrusion           | Mechanical extrusion      | Mechanical movement      | Gravity deposition        | Sintering/Welding   | Other             | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Number of print heads       | Single             | Multiple                     | Array                     | Other                    | Unknown/Undefined         |                     |                   |                   |                   |
|                                 | Print Head/ Nozzle diameter | Less than 1mm      | Less than 5mm                | Less than 10mm            | Less than 25mm           | Less than 50mm            | Less than 100mm     | More than 100mm   | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Print head/ Nozzle features | Three axis motion  | Rotational/Tangential motion | Omni-directional motion   | Troweling mechanism      | Other                     | Unknown/Undefined   |                   |                   |                   |
|                                 | Material feeding system     | Manual             | Included, semi-automated     | Included, fully automated | Separate, semi-automated | Separate, fully automated | Other               | Unknown/Undefined |                   |                   |
|                                 | Theoretical printing speed  | Less than 0.1m3/h  | Less than 0.5m3/h            | Less than 0.1m3/h         | Less than 2m3/h          | Less than 5m3/h           | Less than 10m3/h    | Less than 20m3/h  | More than 20m3/h  | Unknown/Undefined |
|                                 | Actual printing speed       | Less than 0.1m3/h  | Less than 0.3m3/h            | Less than 0.5m3/h         | Less than 1m3/h          | Less than 2m3/h           | Less than 5m3/h     | Less than 10m3/h  | More than 10m3/h  | Unknown/Undefined |
|                                 | Accuracy                    | Less than 5mm      | Less than 10mm               | Less than 50mm            | Less than 100mm          | More than 100mm           | Unknown/Undefined   |                   |                   |                   |
|                                 | Printer (dis)assembly speed | Less than 1 hour   | Less than 10 hours           | Less than 24 hours        | Less than 2 days         | More than 2 days          | Other               | Unknown/Undefined |                   |                   |
|                                 | Price per printer unit      | Less than 10.000\$ | Less than 50.000\$           | Less than 100.000\$       | Less than 250.000\$      | Less than 500.000\$       | More than 500.000\$ | Unknown/Undefined |                   |                   |

## Ad D) Materialer anvendt

| M<br>a<br>t<br>e<br>r<br>i<br>a<br>l | Material possibilities                      | Single material          | Multiple materials      | Structure/Support material | Other                     | Unknown/Undefined     |                             |                            |                     |                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|
|                                      | Material type                               | Traditional concrete     | Alternative concrete    | Clay                       | Soil                      | Plastic               | Metal                       | Resin                      | Other               | Unknown/Undefined |
|                                      | Price                                       | Less than 50\$/m3        | Less than 100\$/m3      | Less than 150\$/m3         | Less than 300\$/m3        | Less than 500\$/m3    | Less than 1000\$/m3         | Less than 2000\$/m3        | More than 2000\$/m3 | Unknown/Undefined |
|                                      | Compression strength                        | Less than 5MPa           | Less than 15MPa         | Less than 25MPa            | Less than 50MPa           | Less than 100MPa      | Less than 200MPa            | More than 200MPa           | Unknown/Undefined   |                   |
|                                      | Tensile strength                            | Less than 1MPa           | Less than 3MPa          | Less than 5MPa             | Less than 10MPa           | More than 10MPa       | Unknown/Undefined           |                            |                     |                   |
|                                      | Aggregate size                              | No aggregates (Paste)    | Up to 2mm (Fine mortar) | Up to 4mm (Rough mortar)   | Up to 6mm (Fine concrete) | Up to 16mm (Concrete) | Up to 40mm (Rough concrete) | Over 40mm (Rough concrete) | Other               | Unknown/Undefined |
|                                      | Aggregate weight (kg/m3)                    | Ultra lightweight (<500) | Lightweight (500-1000)  | Normal weight (1000-2000)  | Normal weight (1000-2000) | Heavyweight (>2000)   | Unknown/Undefined           |                            |                     |                   |
|                                      | Material verification                       | Conceptual               | Prototype               | Partially tested           | Extensively tested        | Certified             | Other                       | Unknown/Undefined          |                     |                   |
|                                      | Material hardening time                     | Less than 1 hour         | Less than 10 hours      | Less than 24 hours         | Less than 2 days          | Less than 5 days      | Less than 10 days           | More than 10 days          | Other               | Unknown/Undefined |
|                                      | Material usability time                     | Less than 15 minutes     | Less than 60 minutes    | Less than 2 hours          | Less than 5 hours         | Less than 10 hours    | More than 10 hours          | Other                      | Unknown/Undefined   |                   |
|                                      | Raw material price                          | Less than 50\$/m3        | Less than 100\$/m3      | Less than 150\$/m3         | Less than 300\$/m3        | Less than 500\$/m3    | Less than 1000\$/m3         | Less than 2000\$/m3        | More than 2000\$/m3 | Unknown/Undefined |
|                                      | Raw material availability (in construction) | Industry standard        | Extensively used        | Partially used             | Niche usage               | Not used              | Other                       | Unknown/Undefined          |                     |                   |

For en nærmere forklaring på indholdet af de enkelte underkategorier henvises til appendix 5, hvor disse fremgår.

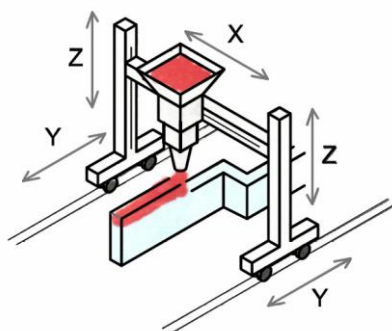
Kategoriseringssystemet er konsekvent blevet anvendt til systematisk at indsamle og viderebringe information om hvert enkelt projekt, som det fremgår af de udarbejdede besøgsrapporter og profilbeskrivelser.

## 4.2 Typer af printere og on-site/off-site anvendelse

Det fremgår af den indsamlede viden via kategoriseringssystemet, at de to mest anvendte typer af printere er som følger:

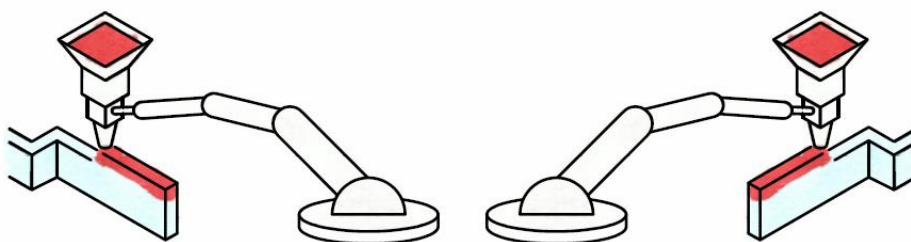
- A) Gantry typen
- B) Robot arm typen

En gantry printer er en printer, der populært sagt består af en ramme hele vejen rundt om det emne, der skal printes, hvor printer hovedet kan bevæges præcist derhen indenfor rammen, hvor man ønsker materialet skal komme ud. Flytningen af printerhovedet sikres gennem at printeren kan bevæge sig såvel i X (bredde-retningen), som i Y (længde-retningen) og Z retningen (højden), jf. nedenstående tegning.



En gantry printer udlægger sit materiale indenfor sin ramme/printområde, kan man populært sige, mens printeren står udenfor rammen/printområdet. Fordi printeren kan bevæges i X, Y og Z retningen sikres, at det printede ikke kan komme i vejen for printeren.

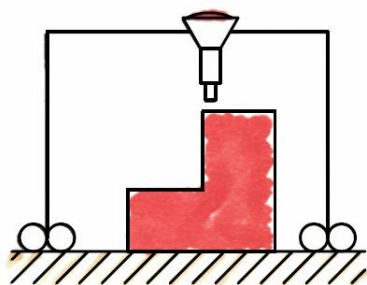
En robot arm printer har modsat et fast udgangspunkt indenfor sin ramme/printområde, og fra dette udgangspunkt kan armen bevæges i den retning og hen til det punkt, som man ønsker, afgrænset af hvor lang rækkevidden for armen er. Printeren udlægger således materiale rundt om sig selv, populært sagt.



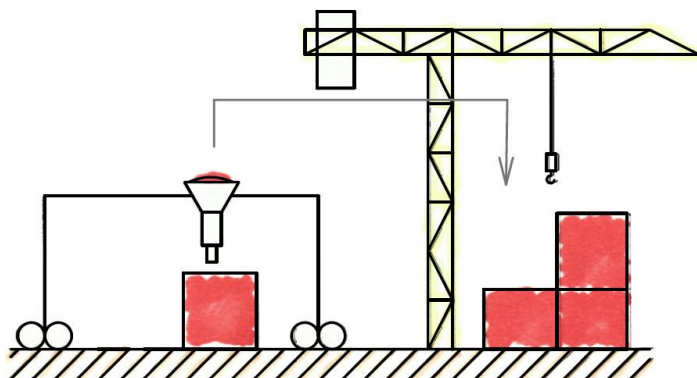
Disse to printer typer anvendes i mere end 80% af de undersøgte projekter.

Fælles for dem begge er, at de kan anvendes såvel "on-site" som "off-site" til element produktion.

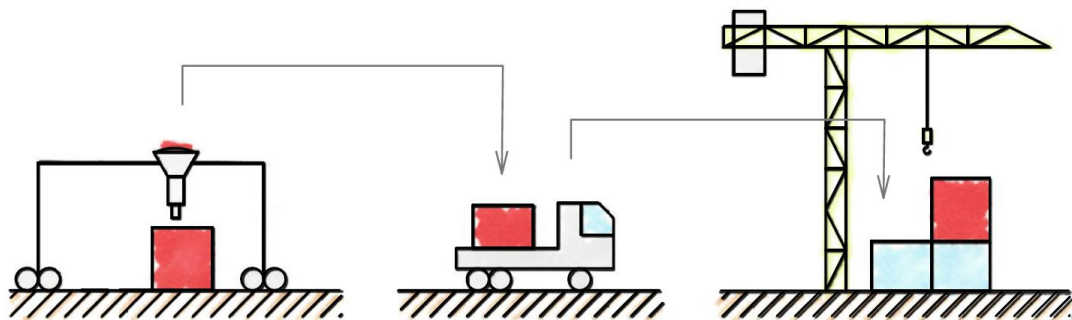
Med "on-site" forstås, at printeren er placeret præcis der, hvor byggeriet skal opføres, og der er ikke behov for transport af det printede efterfølgende. Bygningen står, hvor den er printet, jf. vedlagte illustration:



I en variant af on-site løsningen står printeren i umiddelbar nærhed af, hvor byggeriet opføres, og den printer så elementer, der med en kran eller på anden vis flyttes hen, hvor selve byggeriet foregår, jf. nedenstående:



"Off-site" opførelse er på den anden side karakteriseret ved, at man kun kan bruge dette til at producere elementer, som så med lastbil transporteres hen på selve byggepladsen, hvor de monteres jf. nedenstående illustration. Modsat on-site, der foregår på selve byggepladsen, vil off-site typisk indebære, at selve fremstillingen af komponenterne foregår i et langt mere industrielt og kontrolleret miljø.



Researchen afslørede, at begge løsninger anvendes og kan bruges uanset printer typen, der anvendes.

Gantry type printeren kan såvel bruges on-site, som off-site og tilsvarende gjaldt for robot type printeren, og der var ikke en kombination, der var dominerende, jf. nedenstående, hvor nogle af de mest interessante projekter er vist i.f.t. typen af printer, der anvendes og hvor der printes henne:

| Place<br>Printer type  | In situ                                                                                                                                         | Off site                                                                                                                     |
|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Robot/crane<br>printer | <ul style="list-style-type: none"><li>• Batiprint (Nantes) (foam)</li><li>• MIT (foam)</li><li>• Cybe (components)</li><li>• Apis Cor</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>• Xtreee</li><li>• MX3D (steel)</li><li>• Branch Technology (plastic)</li></ul>        |
| Gantry<br>printer      | <ul style="list-style-type: none"><li>• 3D Printhuset</li><li>• Contour Crafting</li><li>• Total Kustom</li></ul>                               | <ul style="list-style-type: none"><li>• Winsun</li><li>• Technical Univ. Eindhoven</li><li>• D-Shape (Enrico Dini)</li></ul> |

Kilde: Partnerskabet

Ved in-situ/on-site fremstilling opnås den fordel, at der ikke efter fremstillingen skal transporteres noget, mens man på den anden side opererer i et meget sværere kontrollerbart miljø, hvor omverdens faktorer, herunder vejret kan have stor indflydelse. Det sker ikke, når man laver off-site produktion, der kan foregå i en industri hal, hvor man kan styre temperaturen og ikke udsættes for vejret. Til gengæld får man behov for efterfølgende at transportere og montere elementerne på byggepladsen.

Ved anvendelse af en robot opnås den fordel, at printeren relativt nemt kan flyttes, samt let kan drejes hen præcist til det punkt og med den vinkel på udlægningen, som man ønsker. Det kan en gantry type printer kun vanskeligere gøre, idet den som udgangspunkt udlægger materialet under printhovedets placering. Til gengæld er gantry printeren generelt mere stabil, fordi printhovedets præcise placering afgøres af nogle faste strukturer med mange holdepunkter, der bevæges, modsat robot printeren som skal hente sin stabilitet fra et fast punkt, som kan ligge mange meter fra, hvor materialet udlægges.

I tillæg er der i praksis forskel på, hvilke print muligheder man har med en gantry og robot arm type printer, som der vil blive redegjort for nærmere nedenfor.

## 4.3 Print muligheder ved hhv. gantry og robot type printere

Rækkevidden af en printer er særdeles afgørende, når man i praksis skal vurdere, hvilke byggerier en given printer kan anvendes til. Rækkevidden definerer jo størrelsen på det, som man kan printe.

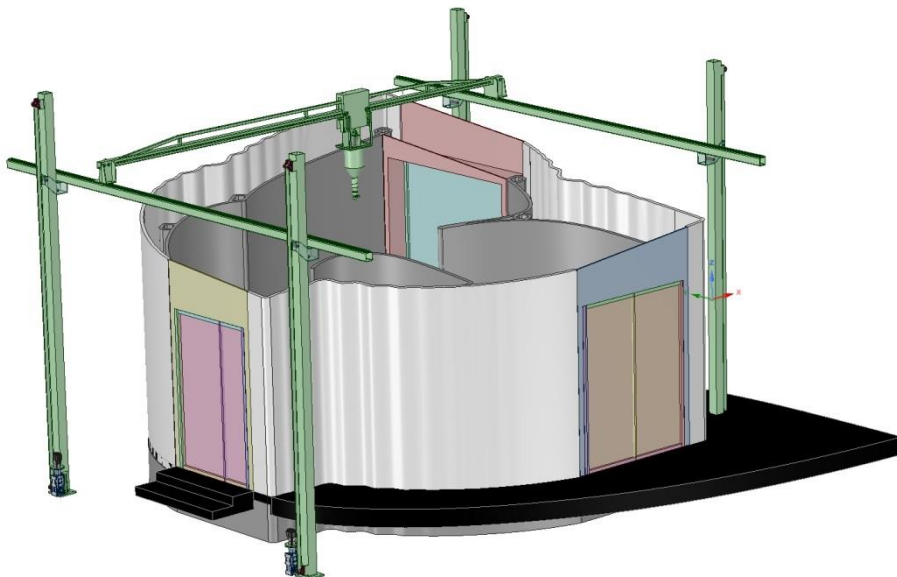
En gantry printer på 8\*8 meter, som anvendt af 3D Printhuset ved opførelsen af The BOD kan maksimalt printe 8 \* 8 meter, idet denne printer type som nævnt printer "indenfor" sin ramme.

Sammenlignes et sådant printområde med, hvad de typiske robotprintere, som researchen har identificeret, kan printe, viser der sig en bemærkelsesværdig forskel.

Længden på de typisk anvendte robot arme er således typisk så begrænset, at robot printeren ikke nær kan printe et så stort område, som gantry printeren kan.

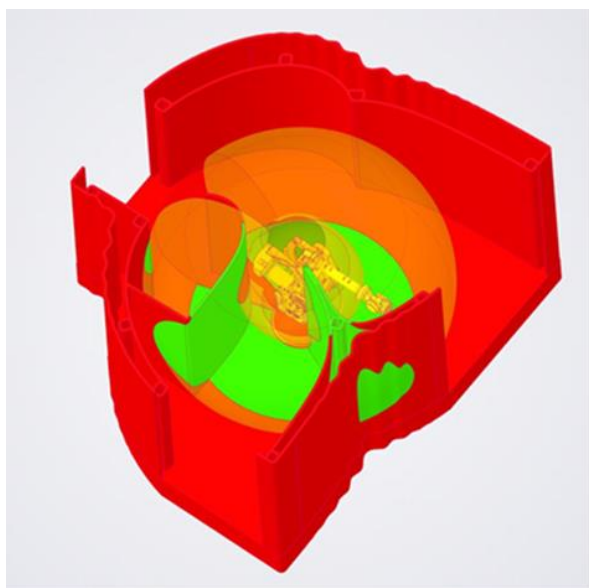
Dette er søgt illustreret nedenfor, hvor der er taget udgangspunkt i The BOD bygningen.

Nedenstående illustration viser, hvorledes den 8\*8 meter printer, som 3D Printhuset benyttede kunne printe bygningen:



Kilde: 3D Printhuset: The BOD printeren i.f.t. The BOD bygningen

Herefter ses der på The BOD bygningen i.f.t. hvad de robot arme, som f.eks. CyBe og Xtreee anvender, kan printe. I nedenstående figur illustrerer den røde farve omfanget af The BOD bygningen (som robot arm printeren ikke kan printe), mens den grønne og orange farve indikerer den del af bygningen, som robot armen ville kunne printe:

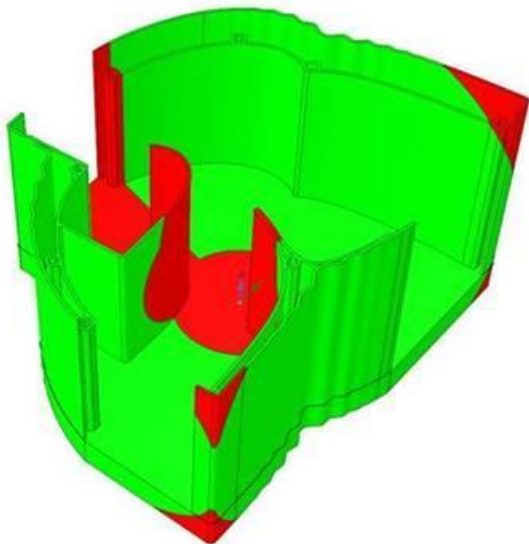


Kilde: Partnerskabet; typisk robot arms rækkevidde/printområde sammenlignet med The BOD bygningen



Når der på robot arm printerne anvendes en arm med en rækkevidde på 3 meter, som er det typiske, bliver ovenstående resultatet.

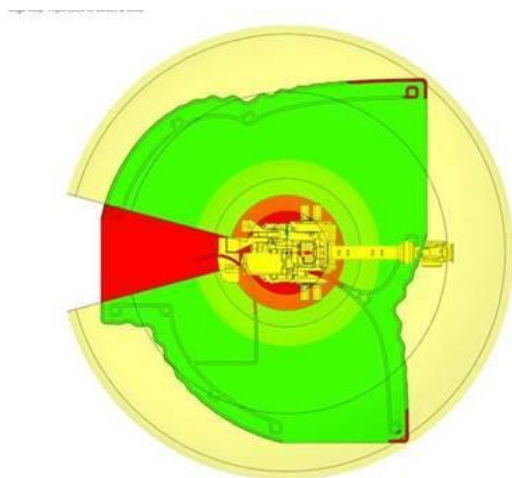
Der findes dog større robot arme end dem, som CyBe og Xtreee anvender, men de er meget kostbare, og selv ikke ved anvendelsen af den allerstørste arm, der eksisterer på markedet (men som ikke anvendes i nogen af besøgte/researchede projekter) ville en sådan kunne printe hele The BOD, som illustreret nedenfor:



Kilde: Partnerskabet, print område i.f.t. The BOD bygningen for en robot arm printer med den største arm, der findes på markedet (men ikke er set anvendt i nogle af projekterne)

Til dette skal bemærkes, at en gantry printer ikke er begrænset til en maksimal størrelse på 8\*8 meter. Gantry printeren kunne lige så godt laves i en version på 12\*12 meter, som Quindao i Kina har gjort, eller andre større mål end de 8\*8 meter, som er målet for 3D Printhusets printer.

Der er også en anden vigtig begrænsning ved anvendelsen af robot printere til at printe hele bygninger, som illustreret nedenfor:



Kilde: Partnerskabet, print område for en robot arm printer med den største arm, der findes på markedet. Printerens kan ikke printe bag sig selv.

Det ovenfor anførte røde område "bag" ved printeren skyldes, at robot arm printeren ikke kan printe i dette område, fordi printeren ikke kan bevæge sig 360 grader rundt, men kun 330 grader i.f.t. armens udgangspunkt. Det område, der ligger "bag" robot arm printeren op ad til venstre, kan robot armen altså ikke nå.

Tilsvarende skal det røde område rundt om robot arms printeren bemærkes. Dette område kan robot arm printeren heller ikke printe i, idet den så at sige selv står i vejen for det og ikke kan bøje robot armen der ned.

Begge disse forhold betinger, at robotarm printeren derfor principielt kun er egnet til at printe i et område foran sig på ca. 120 grader, hvor armen kan nå ud.

Hermed kan printeren reelt ikke bruges til at placeres midt i den bygning, der skal opføres og for alle praktiske formål kan en robot arm printer således ikke opføre en komplet bygning i en omgang !

Når en robot arm printer ikke kan printe et større område end vist, bliver konsekvensen, at robot arm printer typen ved opførelse af hele bygninger i praksis er henvist til at opføre disse som en form for elementproduktion med deraf følgende krav til samling af de printede elementer.

Dette ses også bekræftet af den gennemførte research, idet CyBe ved opførelsen af "sin" bygning, drone laboratoriet i Dubai, netop printede begrænsede størrelse enkelt komponenter on-site, som derefter blev monteret. Tilsvarende har Xtreee foreløbigt begrænset sine prints til at være enkelt komponenter, f.eks. søjler fremfor hele bygninger.

## 4.4 Uløste udfordringer med dagens teknologi niveau

Der er specielt to udfordringer, som Partnerskabet har lagt mærke til reelt ikke adresseres i nogle af de projekter, der har været besøgt:

- Integreret armeringsløsning
- Løsning for print af dæk

Armering anvendes i praksis i så godt som alle byggerier, bortset fra enkelte småhuse. Trods dette har researchen ikke afsløret én løsning, hvor armeringsproblematikken er blevet løst som en integreret del af print løsningen. De forskellige projekter har naturligvis armering, men denne armering er ikke fremstillet og monteret af printeren, men som en uafhængig manuel opgave.

Armering foretages populært sagt for at sikre bygningen i.f.t. nedenstående problemer:

- Fæstning af taget/tagkonstruktionen så denne ved vindlast ikke frigøres fra bygningen (lodret træk i væggene)
- Håndtering af vægten fra tag og de øvre etager, så bygning ikke bryder sammen (lodret og vandret tryk = træk i væggen, p.g.a. udbøjning)
- Håndtere vindlast på væggene, så disse ikke kan blæses ind/ned (vandret træk i væggen)
- Sikre, at der ikke opstår revner ved døre og vinduer, hvor væggen ikke er komplet og der opstår "hul" i dækningen af trykket oppefra (lodret og vandret tryk)

Ovenstående problemstillinger er nært knyttet til, at cements trykstyrke sædvanligvis er 10 gange større end cements trækstyrke, som ikke er særlig stor. P.g.a. dette forhold er der behov for armeringen. Dette kompenseres der i konventionelle byggerier for ved at anvende et armeringsgitter, som kan klare træk i alle retninger.

Skal 3D print teknologien anvendes i større omfang, vil der i de kommende år skulle findes en løsning på denne udfordring, således at armeringsproblematikken kan løses som en integreret del af, hvad printereren kan.

Tilsvarende med behovet for dæk, som der forekommer i alle andre bygninger end eet etages byggeri. Researchen har således ikke afsløret eet eneste projekt, hvor man har forsøgt sig med at lave en løsning for printning af dækket. Forklaringen herpå ligger som før nævnt i, at printerne specielt er velegnede til at printe vertikalt, men ikke er specielt egnede til store horisontale prints, som der ud over – alt andet lige – også kan udstøbes langt hurtigere og billigere ved anvendelse af konventionel teknologi.

Skal 3D print teknologien finde større udbredelse fremover, vil det være ønskværdigt med en integreret løsning på, hvordan dæk fremstilles.

## 4.5 Testprintere og testprints

Med henblik på, at få en dybere teknisk forståelse for 3D print af bygninger med beton, samt udvikling og test af materialer med højt indhold af genbrugsmaterialer, har 3D Printhuset udviklet og testet tre versioner 3D Printere. Alle 3D Printere er blevet brugt til test samt udvikling, specifikt for at undersøge de nedenstående punkter:

- Materiale Ekstrusion – Ekstrudering af beton gennem dyser af forskellig udformning
- Materialeblanding og føddning – Blanding og føddning af materiale til 3D printer
- Materialeegenskaber – Reologi, konsistens og flydeevne
- Lagbinding – Binding mellem hvert lag af ekstruderet materiale
- Synkning – Hvor meget synkning sker der pr. lag og pr. tid
- Afhærdning – Hvor hurtigt hærdes materialet
- Tilsætning af genbrugsmaterialer, herunder gips, tegl og beton samt genbrugsfibre

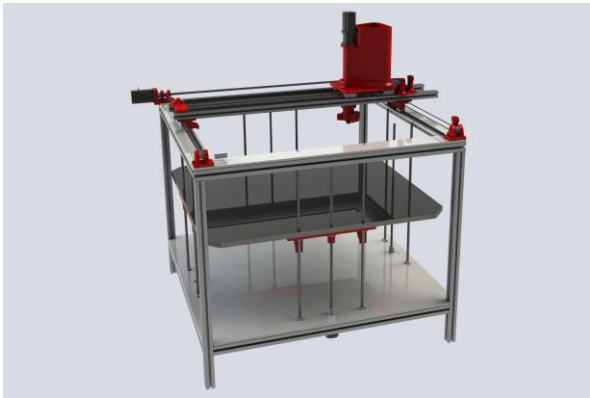
Test blev udført i tre faser:

1. På en 1x1x0,9 meter 3D printer, med effektivt printområde på 0,7 x 0,7 x 0,5 meter
2. På en 8 x 8 x 1 meter 3D printer, med effektivt printområde på 6,7 x 7,2 x 1 meter
3. På en 8 x 8 x 6 meter 3D printer, med effektivt printområde på 6,7 x 7,2 x 5,8 meter

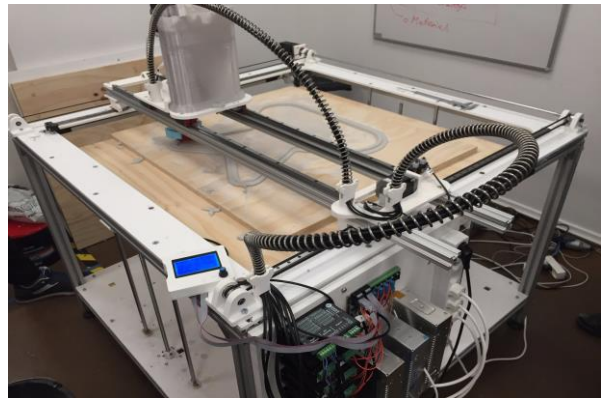
### Første test 3d printer

Den første testprinter blev bygget ud fra ideen om, at man kunne teste mange materialer hurtigt. Basis er en simpel gantry printer, der har bevægelse i x,y og z akser samt et printhoved bestående af en snegl samt en 3d printet dyse, som kan udskiftes efter behov. Indledende test blev udført på denne maskine:

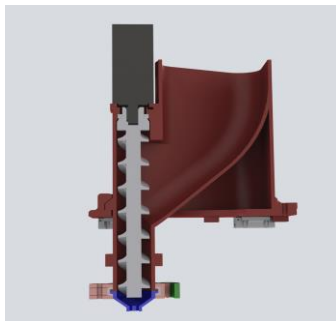
1. Ekstrusion af spartel
2. Ekstrusion af mørtel (cement, sand 0-2 mm, vand)



CAD model af første testprinter,



Den udviklede første testprinter.



CAD tegning af printhovedet på første testprinter



Eksempel på testprint på første testprinter

Resultatet af print i den lille printer viste, at ved korte lagtider omkring 1-2 minutter var der høj grad af synkning, da de underliggende lag ikke nåede en tilstrækkelig grad af afhærdning. Samtidig var det ikke muligt at holde pause mellem lagene for at opnå højere lag-tid. Tilsvarende var det ikke muligt at teste nogle af de udenlandske recepter, som partnerskabets research havde fået identificeret, idet disse var designet efter en printtid pr lag på langt længere tid, fra 15 minutter op til en halv time, og udviklet til at lave meget større prints.

Konklusionen på de indledende test var entydige:

- Cement skal holdes "i live" med en omrører, da det ellers størkner inden det ekstruderes.
- "Døde" zoner i materiale-tilførslen størkner og blokerer ekstrusion.
- Hvis der skal printes med tilslag på op til 8 mm, er der brug for en kraftig motor til dette. Denne motor kunne ikke passe på den lille printer
- Sættetid / tørretid for betonen, samt tiden mellem hvert lag er afgørende for kvaliteten og blandingen af materialet samt blandings og fødningsprocessen.
- Det var ikke muligt at anvende og teste recepterne for de under besøg erhvervede recepter, idet disse recepter var tilpasset meget større printere og print designs, hvor der var relativ meget længere mellem udlægning af første og næste lag, end på den lille testprinter.

Det viste sig dermed ret hurtigt, at for at kunne opnå de ønskede testresultater med betonprint, skulle der en større test printer til.

## Anden testprinter

For at kunne teste og simulere en reel printsituation i byggeriet blev der indkøbt en printer med større printareal. Derved kunne test påbegyndes ift. de interessante print tekniske forhold. En printer, der kunne printe i 8 meters længde og bredde, blev indkøbt.



Anden Testprinter opsat og testet på Nordhavn sommer 2017 (print areal 8\*8\*1 meter).



## Testprints på anden testprinter

Som vist i billederne nedenunder, blev de interessante områder af 3D print undersøgt v.h.a. prints på den større printer. Samtidig blev der tilføjet en pumpe samt blandingsstation, som skulle sikre en kontinuert tilførsel af beton til printhovedet, når der skulle laves større test prints.

|                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|    |    |    |
| Synkning (kegleformet profil)                                                       | Dårlig lagbinding                                                                   | Svindrevner                                                                          |
|  |  |  |
| Tilsat genbrugstegl                                                                 | Print af 30 meter væg/mur                                                           | Væltede vægge ved 150 mm højde.                                                      |

Følgende observationer og læring kunne foretages ud fra disse forsøg:

### Synkning

Synkning sker, når et lag ikke er tilstrækkeligt hærdet inden næste lag påføres. Hvis materialet er for blødt, kan vægten af overliggende lag ikke understøttes under print, og

resultatet er en "kegleformet" profil (se billede), som bliver større, jo flere lag der påføres. Synkning kan accepteres til en vis grad, hvis der kompenseres i mængden af materiale, der ekstruderes i det næstkommende lag, og hvis synkningen stopper relativt hurtigt efter 3-4 lag. Tilsætning af fibre til blandingen kan ydermere begrænse synkning, da materialet opnår en større stabilitet uden at ændre hærdetiden.

## **Lagbinding**

Lagbindingen styres primært af tre faktorer - Tiden det tager at printe et lag, samt materialets afhærdning på samme tid og mængden af vand i materialet. Printes for tørt, fås ingen eller lidt lagbinding, næsten ligegyldigt hvor hurtigt det følgende lag printes. Printes vådere, er lagbindingen afhængig af printtiden. Der findes for hver blanding et optimalt vindue, hvor lagbindingen er god. Denne tid kan variere kraftigt alt efter mængden af cement, accellerator, vand / cement forhold samt temperatur og fugtighed som de vigtigste eksterne parametre. På nuværende tidspunkt findes der altså ikke en blanding, der kan virke til alle formål og printere. En opskrift skal derimod designes til at matche tiden det tager printeren at lægge et fuldt lag.

## **Svindrevner**

Svindrevner opstår som følge af hurtig hærdning samt udtørring af det printede (se billede). Når der printes lag på lag, på denne måde, vil overfladearealet være relativt stort sammenlignet med typisk støbte elementer, og der er følgelig en stor overflade der kan afgive vand. størrelsen og mængden af svindrevner tiltager ved højere cementindhold. I disse forsøg blev der tilsat en lille mængde fibre (PP plastfibre, crackstop), som løste problemet.

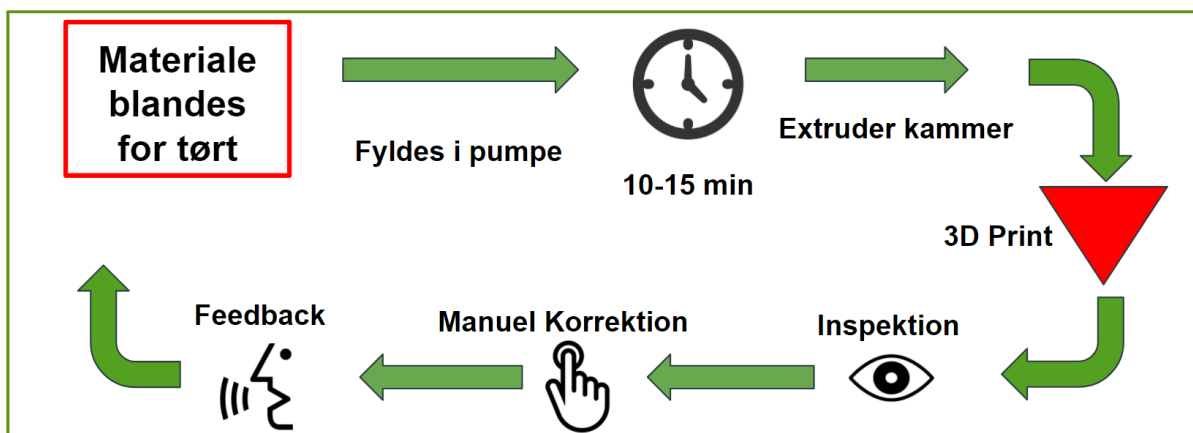
## **Tilsætning af genbrugsmaterialer**

En vigtig del af forsøgene, var tilsætning af diverse genbrugsmaterialer til beton-blandingen. Der blev både eksperimenteret med gips, tegl samt knust beton i det printede. Materialerne afløste en del af tilslagsmaterialer, som sand og grus. Samtidig blev der testet knuste vindmøllevinger som en erstatning for plastfibre. De givne materialer er beskrevet i materialeafsnittet af denne rapport. Det viste sig muligt at printe med de fleste genbrugsmaterialer, der blev tilsat, både fibre og tilslag. De knuste glasfibre fra møllevingerne gav dog ikke nogen effekt ift. svind, som beskrevet herunder. Det viste sig også, at tegl var det optimale at printe med i dette tilfælde, da det gav nogle bedre flydeegenskaber end de andre materialer (se billede), men selv ved anvendelse af tegl var der udfordringer, som gennemgået nedenfor.

## **Lagtid og printhastighed**

For at få et realistisk billede af, hvordan en mulig process for et fuldt hus kunne se ud, blev der printet længere sammenhængende mure. Dette gav printtider på mellem 10 og 15 minutter pr lag, hvilket er realistisk ift. printtiden på et lille hus med den af printeren begrænsede printhastighed og ekstrusion. I denne størrelse bliver blandingstid og leveringscyklus meget vigtige, idet der kontinuert skal fødes et ensartet materiale. Beton ændrer konsistens og reologi over tid, så målet med forsøget var at forsøge at ramme en blandingstid, som stemte overens med printtiden og dermed minimere forskellen på materialet over printets stadier. Implikationer ved korrekt timing for materialet er illustreret herunder. Korrektions-feedback loopet er meget langt, og der kan derfor gå op til 30 minutter, før en ændring kan ses i printet. Dette stiller høje krav til ensartetheden i materialet. I den kontekst er genbrugte materialer svære at styre, da indholdet af eks. vand kan variere stærkt, og påvirke printet kontinuert. Det kan til en vis grad kontrolleres af blandemesteren, men i en evt.

fremtidig automatisering af blandingen, vil dette være en udfordring, der skal løses, når genbrugsmaterialer anvendes.



Materiale flow og mulighed for reaktion på blanding

## Stabilitet

En sidste vigtig faktor for 3D print i beton, er væggenes stabilitet under print. Dette er afhængig af hærdetiden, printhastigheden samt væggenes tykkelse. Som det ses på billedet ovenfor, kan væggene vælte, hvis der printes for hurtigt ovenpå lag, som ikke er tilstrækkeligt tørrede. Fibre i materialet tilføjer noget styrke inden afhærdning, som er fordelagtigt. Udover dette, skal materialets konsistens og hærdetid matche. Til sidst kan man, i tilfælde af print af en yder- og indervæg, tilføje murbindere mellem væggene, som giver stabilitet også under print.

Slutteligt kan det konkluderes, at 3D print med beton er et felt, hvor mange faktorer indvirker på det endelige resultat udover egenskaberne ved materialerne som betonen består af: Printhastighed, materialekonsistens, hærdetid og printhøjde indvirker alt sammen på hinanden, og de enkelte faktorer skal tilpasses indbyrdes for det gode resultat. Vil man eksempelvis optimere den samlede printtid, skal man lige dele se på materialets hærdetid og egenskaber over tid, som på selve printerens parametre, luftfugtighed, temperatur og blandingsværktøj. Der findes ikke een løsning, men mange forskellige, som vil være optimale til forskellige brugstilfælde.

## Erfaring med prints under udførelse af "The Bod" - Europas første 3D printede bygning.

I kølvandet på de ovenstående test-printere, test prints samt den erhvervede viden om status i Europa, besluttede 3D Printhuset at udvikle en 3D byggeprinter (ud fra "skelletet" af test printeren), som kunne printe en hel bygning, idet 3D Printhuset så og greb muligheden for at være først med at 3D printe en bygning i Europa.

Printeren blev derfor udviklet udover det af fonden støttede projekt, men på basis af den læring projektet havde givet, og 3D Printhuset gav sig kun i kast med dette projekt, som følge af den erfaring og kompetence, der var opnået i projektet. Da de andre partnere i partnerskabet ydermere tilbød at bistå, sprang 3D Printhuset ud i det.



Den mest drastiske ændring i forhold til den anvendte store testprinter var printhøjden, som blev forøget til 5,8 meter. 3 kameraer blev også tilføjet, så processen kunne overvåges på afstand, ligesom printhovedet og en række dele blev udskiftet, således at printeren kunne anvendes til printe en hel bygning. Et nyt materiale blev udviklet specifikt til dette hus, baseret på de mange test prints og forsøg, som Force havde gennemført i løbet af det støttede projekt. Opskriften blev baseret på en lagtid på 15 minutter, og bestod af cement, sand, grus, genbrugs knuste tegl samt fibre og plastificering.

Den 11. september viste 3D Printhuset projektets start frem til offentligheden. Mere end 100 tilskuere kom og overværede den første printning og eventet løb af stablen til stor pressebevågenhed:



Mere end 100 fremmødte til begyndelse af 3D printningen af The BOD ("Building on Demand").



TV2 på pletten, da 3D Printhuset begyndte 3D printningen af Europa's første 3D printede bygning

Såvel DR's TVA som TV2 Nyhederne, samt TV2 News bragte videoer fra starten på printningen. Tilsvarende bragte en række radiostationer nyheden om Europa's første 3D printede bygning i Nordhavn. Mere end 1,5 mio. danskere blev således eksponeret for 3D printet byggeri på denne måde.



DR sendte live radio ud på P3 af printningen

Bortset fra, at pumpen samme morgen var gået i stykker, således at materialerne fra mixeren måtte fødes op i printhovedet manuelt og ikke medpumpe/slange, så forløb den første dags printning som planlagt.



Status efter første dags print af The BOD, den 11. september 2017

Herefter begyndte problemerne.

Til printningen de efterfølgende dage blev det valgt at få forhåndsmixet grus, sand og genbrugstegl leveret, og først ved mixeren tilføje cement og vand.



Efter 1/2 times printing med disse materialer kørte pumpe/slange systemet fast, og det måtte renses i gennem. Problemet gentog sig efter endnu 1/2 time og tredje gang var forstoppelsen af "systemet" så stor, at betonslangen sprang og sendte beton rundt i hele teltet.

Ved nærmere eftersyn af de forhåndsmixede materialer viste det sig, at problemet lå her: Et eller andet sted var mixet blevet "forurenset" med materiale, der var langt, langt større end de max 4 mm, som var bestilt. I bunken på de 15 tons, der var blevet leveret, blev der således fundet klumper med en diameter på 3 cm og mere. Det var sådanne, der blokerede systemet.

Gode råd var nu dyre, fordi det af pladshensyn ikke var muligt at få en lastbil ind i teltet og afhente materialet, ligesom nyt materiale heller ikke kunne leveres ind i teltet. Løsningen blev at finde en sigte, der kunne sigte de modtagne 15 tons. Herefter blev alle 15 tons manuelt sigtet før det blev tilført mixeren!



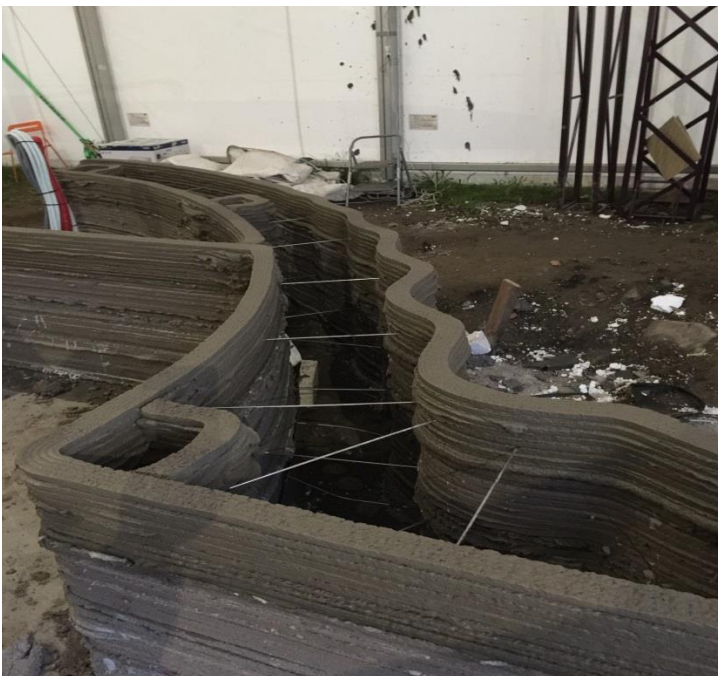
Indkøbt sigte sigter den forhåndsmixede fraktion. Oversize ender i trillebøren.  
Læg mærke til den store mængde af oversize materiale.

Disse materiale håndteringsproblemer forsinkede projektet med flere uger, men da først de blev løst, så gik det derefter udmærket med selve printningen.



Fortsat printning af væggene, da først materiale problemet blev løst

Da statik, der involverer organiske formede konstruktioner og beton, som indeholder recycling materialer, ikke umiddelbart kan udregnes, var det før projektets udførelse besluttet at printe omkredsen af nogle søjler, som traditionel beton så kunne udstøbes i, og disse og de rette linjer mellem søjlerne kunne bruges til at dokumentere statistikken og dermed opnå myndighedsgodkendelse.



3D printeren printede omkredsen af søjler, der senere blev støbt ud med konventionel beton. Murbindere brugt til at forbinde for og bagmur. Bemærk beton smidt ud på teltet af slangen, der gik i stykker.

3D printningen blev færdiggjort efter et par uger, og selvom der totalt set kun var printet i 50 timer, havde print perioden spredt sig ud over godt to måneder p.g.a. de opståede problemer.



Færdige 3D printede vægge medio november 2017. Bemærk taghældningen.

Før start blev det besluttet, at det ikke var alt afgørende, at 3D printingen medførte helt "glatte" flader på de printede vægge. Tidligere var der udviklet en løsning på at printe glatte flader ved hjælp af nogle "flapper" ned langs siden af det ekstruderede materiale, men denne løsning kunne ikke anvendes, når der også skulle printes søjler, idet overgangen mellem søjle og mur så ville blive "skåret over" af de fastgjorte flapper. For ikke at tabe tid til konkurrerende projekter accepterede 3D Printhuset den relativt dårlige ensartethed/manglende glathed af de printede vægge.



Færdige 3D printede vægge på The BOD. Ensartet/glatheden af printet kunne være bedre

Efter printningen har de andre fag taget over. Mens de organiske former ikke præsenterede et selvstændigt eller dyrt problem for 3D printeren, så forholder det sig meget anderledes for de efterfølgende fag, der alle har anvendt længere tid og medført en større omkostning end ved opførelse af et mere konventionelt

byggeri. Dette er vigtig læring i forhold til, hvor meget billigere 3D print teknologien på det nuværende stadie kan gøre bygninger opført i en mere fri form.



De organiske former og den store taghældning gav efterfølgende fag problemer

Projektet viste tydeligt, at det er muligt, allerede i dag, at 3D printe en bygning, som lever op til Europæiske normer.

Det viste også, at vi stadig har at gøre med en teknologi, hvis modenhed er på et meget tidligt stadie, og der er stadig meget udvikling, der skal laves, inden man kan opnå både teknisk og kommerciel succes på området.

Der er ydermere behov for, at flere dele af 3D print processen automatiseres. Det kræver stadig som minimum 2 mand at operere maskine samt blande og føde materiale, men med mere udvikling kan begge disse erstattes og automatiseres. Materialeblanding kan allerede nu findes, som halvautomatiske løsninger, så det eneste der mangler er en digitalisering af denne process, så printer og fødningsmekanisme kan tale sammen. Printeroperatøren er noget sværere at afløse, og vil også i de kommende år være en aktiv del af byggeprocessen. Udover dette, skal der tilføjes flere features til 3D printerne, for at de får en højere værdi i byggebranchen.



## 4.8 Sammenfatning

Partnerskabets research på 3D printet byggeri printere viste groft sagt følgende:

- To printer typer dominerer og udgør over 80% af de anvendte printere; gantry og robotarms printere
- Gantry printeren skal være større end den bygning eller bygningsdel, som man ønsker at printe, idet denne printer type, printer emnet indenfor sin ramme
- Robotarms printeren derimod printer emnet ud for sig og vil ved 360 graders print komme til at stå "inde i" det printede område
- Gantry printerne fås generelt meget større end robotarms printerne og kan generelt derfor også printe meget større emner
- P.g.a. begrænset rækkevidde og manglende 360 graders print mulighed for robotarms printerne kan disse i praksis "kun" producere elementer (som skal monteres) og ikke hele bygninger
- Om end researchen afslørede at begge typer af printere anvendes såvel på selve byggepladsen (in-situ) som off-site på fabrikker til element produktion, så tegner der sig et tydeligt billede af, at gantry typen vil være den mest oplagte at bruge ved in-situ udførelse af komplette bygninger/bygningsstrukturer, mens robotarms printere vil være mest oplagte at benytte til off-site produktion af (mindre) elementer
- Ingen af de researchede teknologier har udviklet løsninger, således at armeringsbehovet eller fremstillingen af dæk kan løses med teknologien. Det er et job for næste eller næste igen generation af 3D print teknologien
- Test prints med den første udviklede og lille 1\*1 meter test printer afslørede hurtigt, at der var behov for en større test printer for reelt at teste recepter og print tekniske forhold af
- Med den større test printer på 8\*8 m meter, selv med den begrænsede mulighed for kun at printe 1 meter i højden, kunne en række af de print tekniske forhold testes af, og værdifuld erfaring som følger blev opsamlet:
  - Synkning af printet kan modvirkes med tilsætning af fibre
  - "One size does not fit all", hvad der her betyder, at for hvert job skal der i praksis udvikles en ny recept, der præcis passer til det job, som man står overfor at skulle printe. Fremover vil det være formålstjenesteligt, hvis denne proces kunne foretages hurtigere ved udvikling af software, der ud fra givne parametre lavede forslag til recepter til det givne print
  - Svindrevner i det printede er et generel forekommende problem, men kan tilsyneladende løses ved tilsætning af fibre
  - Det er muligt at tilsætte genbrugsmaterialer til formlerne, men det gør ikke udfordringerne med konsistens af printet etc. nemmere (mere herom i kommende afsnit)
  - Stabilitet, lagtid og printhastighed er ekstremt vigtige at afpasse i forhold til hinanden, og sammen med behovet for recepter, der passer til printet der skal laves, medfører dette, at hele processen stadig er at beskrive som kompliceret og med mange fejlkilder p.g.a. den indbyrdes afhængighed
  - Det er problematisk, hvis det p.g.a. materiale håndteringssystemet tager for lang tid at få feedback på, om en given blanding er som ønsket
- På baggrund af den indhentede viden i forbindelse med undersøgelse af "state of the art", og den erhvervede viden via test prints og materiale tests (næste afsnit) følte 3D Printhuset sig så godt klædt på, at de kastede sig over og lykkedes med at 3D printe den første bygning i Europa, The BOD. Dette var ikke en del af støttede projekt, men realiseringen af dette var kun muligt p.g.a. den viden, som ikke bare 3D Printhuset, men hele partnerskabet havde erhvervet.



- Printning af The BOD foregik under stor mediebevågenhed, og har været med til at sætte 3D printet byggeri på dagsordenen i Danmark, og Danmark på verdenskortet i.f.t. 3D printet byggeri
- Mens selve 3D printningen af The BOD i realiteten foregik relativt uproblematisk blev det i dette projekt tydeligt, at systemet til materialehåndtering er mindst lige så vigtig som selve printeren. Det er samtidig karakteristisk, at materialehåndteringen ikke har nydt samme bevågenhed i de andre 3D printet byggeri projekter. Derfor er udviklingen af gode løsninger til integreret materialehåndtering i forbindelse med 3D printet byggeri ikke kommet så langt, og der opfordres hermed til, at der forskes og undersøges yderligere på dette område, således at gode løsninger findes fremover, og således at der også på dette område sker en automatisering.

## 5. Materialer til 3D printet byggeri

### 5.1 Indledning

At kunne printe en bygning med et betonbaseret materiale eller et andet materiale, med lignende egenskaber kan være realiseringen af den store drøm for arkitekter og designere. Muligheden for at kunne lave frie organiske former, som ville kræve komplicerede formkonstruktioner, med dobbelthulbuede kurver og selv bærende strukturer vil skabe fantastisk spændende unikkonstruktioner, som er umulige at realisere på konventionel vis.

3D print i plast, metal og ler udnyttes både til fremstilling af prototyper og modeller, men også til fremstilling af tekniske komponenter. 3D print giver muligheden for at kunne fremstille komplicerede ydre geometrier og indre skjulte geometrier, som ellers er umulige at fremstille i en arbejdsproces.

Der har i en årrække været flere, mere eller mindre vellykkede initiativer, hvor man har forsøgt eller faktisk er lykkedes med at printe delkomponenter og regulære råruse. Afhængigt af størrelsen af elementet, er dette udført med konventionelle flerakslede robotter og printere, som er baseret på en modificeret portalkransløsning.

Der har været printet med stort set alle typer materiale, som det har været muligt at presse ud gennem en dysse, eller som selv har kunnet løbe ud af en tragt. Som udgangspunkt har hovedfokus været at kunne printe med et konventionelt cementbaseret materiale med den grundtanke, at cement var billigt, relativt ensartet og at man kunne blande hvad som helst i som tilslag.

Det har også været printet med ler, jord, gips og magnesit og diverse mineralske materialer, som er opblandet med en organisk binder.

Det har også været forsøgt at sprøjte materialet på et 3D printet plastnet eller et stålnet.

Fælles for alle forsøg er, at der skal være harmoni mellem printværktøjet og materialets fysiske karakter for at forøget kan lykkedes. Dette betyder, at man ikke umiddelbart kan anvende samme produkt i alle printertyper. Det kræver justering af printer og materialet for, at man opnår et godt resultat.

Ud over de printtekniske udfordringer, er spørgsmålet, hvad materialet selv skal kunne præstere. Hvis den printede konstruktion skal eksponeres for fugt, frost og mekanisk slid (aggressiv miljøklasse), må materiale sammensætningen justeres tilsvarende. Skal materialet anvendes i et beskyttet miljø, er der større mulighed for at anvende alternative materialer, som har tilstrækkelig fysisk styrke, men som ikke kan tåle fugt.

Trykstyrken af 3D printmaterialer er principielt af mindre betydning i den yderste konsekvens. 3D print giver mulighed for at topologi optimere. Dette betyder, at man bygger konstruktionen med udgangspunkt i hvor man har belastningerne. Et godt eksempel på dette er strukturen i lårbensknoglen, eller mere spektakulært, Pantheon i Rom eller en iglo!. Printer man med et materiale med lille styrke, må man printet tættere, og lægge ribber og kamme i strukturen for at støtte strukturen. Printer man med et stærkt materiale, kan man lave tyndere konstruktioner med færre støtte elementer. Vægtningen mellem de to materialestrategier afhænger af funktionen af bygningsselementet, pris, plads og tilgængelighed af materialer.

Som udgangspunkt besidder 3D printet materiale kun en trykstyrke i lodret retning i forhold til printretning. De enkelte lag i lagkagen er bundet sammen af bindermaterialet alene. Der er umiddelbart ikke indlagt lodret armering, som kan håndtere trækspændinger eller forskydninger mellem de enkelte lag. De enkelte lag kan armeres med fibre, som hindrer svindrevner og giver materialet en vis trækstyrke. Disse statiske

forhold skal indregnes, når man dimensionerer, hvorledes konstruktion skal kunne håndtere vindlast, tagudhæng, udspæringer og lignende.

På trods af de materiale tekniske udfordringer, som i nogle tilfælde gør materialerne dyrere end konventionel beton, er 3D print med beton eller lignende stadig interessant.;

- Det er muligt at printe komplicerede bygningsdetaljer til en høj grad af færdiggørelse i en operation
- Det er muligt løbende at ændre design og tilføje og ændre detaljer
- Det er muligt at minimere spild via topologi optimering
- Opførelsen kan køre 24/7
- Der er teoretisk muligt at udnytte nedbrydningsmateriale direkte på stedet til opførelse af nye konstruktioner. Dette kunne minimere transport/trafik i bymiljø.
- Genanvendelse minimerer miljøpåvirkningen

## 5.2 Generiske krav til 3D printet byggeri materialer

Materiale til 3D print af bygninger er fyldt med modsætninger, som ikke harmonerer med normale krav til beton:

- Materialet skal kunne pumpes og være flydende
- Materielt skal være formstabilt det sekund det udlægges samtidigt med, at det skal kunne flyde sammen med tidligere udlagt materiale
- Materialet skal have en afbinding, der er hurtig nok til at kunne bære flere lag inden for en given tidsramme uden at være så reaktiv, at man ikke kan håndtere et pumpestop.

Konventionel beton udstøbes typisk som sætmåls beton eller som selvnivellerende beton, alt efter formålet.

Sætmålsbeton kræver mere eller mindre intensiv bearbejdning i form af mekanisk komprimering eller vibrering, afhængigt af hvor stiv betonen er, for at kunne flyde. Dette betyder, at man skal tilføje energi for at få pasta i betonen til at flyde sammen i overgangen mellem de enkelte lag. Sætmåls beton er den mest almindelige type beton, som anvendes til udstøbning gulve, vægge og søjler.

Selvnivellerende beton, også kaldet lavabeton eller SCC, kan flyde af sig selv uden, at tilslaget (sand, grus og sten) flyder til bunds (separation). Denne type beton anvendes til udstøbning af gulve og komplicerede støbninger, hvor det ikke er muligt at vibrere betonen for at opnå den rette kompaktering.

Beton til 3D print skal besidde egenskaber, som er en mellemting mellem de to betontyper. Med et fint ord kaldes denne egenskab thixotropi. Materialet er flydende, så længe det udsættes for mekanisk påvirkning. Når den mekaniske påvirkning ophører, låses strukturen. Afhængigt af sammensætningen kan materialet svinge mellem at være flydende og være "stift" ved gentagne mekaniske påvirkninger. For 3D print materiale gælder, at materialet kun besidder thixotropiske egenskaber i den periode, hvor det påvirkes af blander, pumpe, slange og dysse. Materialet må ikke kunne genaktiveres når næste lag udlægges, relativt kort tid efter udlægningen.

3D print materialer behøver ikke at besidde perfekt thixotropi, men den energi som printhovedet udsætter materialet for, skal være tilstrækkelig til at mobilisere bindermaterialet ned i det tidligere udlagte lag for at opnå binding.

Flydeegenskaberne styres primært af følgende parametre:

- Stivhed af matrix
- Forholdet mellem matrix og tilslag
- Kornform på tilslag
- Kornkurve

Stivheden af matrix styres principielt af tætheden mellem de enkelte binderkorn, binderkornkurve, indbyrdes elektriske ladninger, kornform, størrelse af binderpartikler og reaktivitet. Med reaktivitet menes, at der allerede ved opfugtning begynder at ske opløsning af binderkorn og dermed ændring af væskekemi og eventuelt udfældning af bindermateriale. Tætheden mellem de enkelt korn styres af vandtilsætningen, også kaldet vandcementforholdet. Bindekornkurven styres af forholdet mellem cement med en given kornkurve, tilsætningen af eventuelt flyveaske, metakaolin eller mikrosilika og/eller slagge. Typisk vil tilsætning af mikrosilika medføre at pasta bliver mere klistret. Tilsætning af slagge, vil typisk gøre matrix mindre flydende grundet den kantede kornform. Den indbyrdes bevægelighed mellem de enkelte korn kan styres ved at tilsætte forskellige plastificeringsmidler, som enten virker ved at skubbe de enkelte partikler fra hinanden rent fysisk eller ved at ændre på de elektriske ladningsforhold. Matrixflydeevne kan også modificeres ved at tilsætte VMA (Viscosity Modifying Agents), som bidrager til at forbedre de thixotropiske egenskaber.

Endelig kan stivheden af matrix modificeres ved at iblande luft. Dette kan også benyttes, hvis man anvender lette tilslag, som man ønsker at holde i suspension i en ellers tung matrix.

Luftindblanding bidrager også til at gøre betonen mere resistent over frys/tø skader, hvilket man udnytter når man dimensionerer beton til aggressivt miljø. Desuden er luft en gratis komponent, hvis man dog indkalkulerer den reduktion af styrken, som indhold over typisk 5-6 % Vol. medfører. En tommelfingerregel siger, at 1 % luftforøgelse over 5% vol. medfører styrkereduktion på ca. 5 %. Så ved tilsætning af luft gælder, at man skal balancere pro et contra i forhold til den funktion materialet skal have.

Luftiblanding kan være svær at styre. Nogle plastificeringsmidler har en tendens til at øge luftblandingen, hvilket gør, at man så må tilsætte en skumdæmper. I andre tilfælde kan det næsten være umuligt at få matrix til at holde på luften. Det kan man så i nogle tilfælde styre med viskositetsmodificerende midler. Blandemetoden har afgørende betydning for, hvor meget luft man kan piske ind i materialet. Indirekte efterbearbejdning/blanding i silo/betonvogn eller pumpe kan i høj grad påvirke luftblandingen, ved enten at tilføre eller fjerne luft. Endelig kan man få ødelagt luftporestrukturen fra at have mange små porer til færre store eller til skumdannelse, som ødelægger de reologiske egenskaber og øger tendens til separation.

Forholdet mellem matrix og tilslag er langt den vigtigste parameter. Som udgangspunkt ønsker man at have så højt indhold af passivt tilslag som muligt, idet bindermaterialet er det dyreste og den mest energikrævende komponent, hvis bindersystemet er baseret på cement eller en polymer. Tilslaget påvirker flydeegenskaberne, herefter kaldet reologien, ved ikke at kunne deformeres når de støder sammen. En analogi er et stadion fyldt med mennesker, som skal ud af samme dør. Ved deformation, hvor partiklerne støder sammen sker der blokering. Denne blokering udnyttes til dels, når man designer for at få materialet til at være formstabilt lige efter udlægning.

Kornform og kornkurve er kritisk for de reologiske egenskaber. Kantede korn blokerer lettere, og en kornkurve hvor hvert enkelt hulrum er udfyldt med successivt mindre inerte partikler vil også tendere at blive stiv. Ved at modificere kornkurven er det muligt at kompensere for eventuelt kantede fraktioner.

Kravet til styrken af 3d printmateriale kan som udgangspunkt sættes i forhold til den funktion, materialet skal udfylde i forhold den eksponering materialet udsættes for i drift.

Udsættes materialet for fugt og frost, vil det som udgangspunkt være nødvendigt, at materialet lever op til aggressiv miljø klasse. Det vil sige et vandcementforhold under 0,55 og en styrke, som er over 30 MPa og over 300 kg cement pr. kubikmeter samt, at tilslag ikke må være alkalisk reaktivt eller frosthølsomt. Skal materialet anvendes inde i et beskyttet miljø, kan man nøjes med 12MPa eller måske mindre.

## Trykstyrke

Styrkerne på gængse byggematerialer varierer fra 1-70 MPa alt afhængigt af hvor de indgår, og hvilken funktion de skal have:

*Klassiske materialer; Trykstyrke i MPa:*

- *Muremørtel: 1-5*
- *Mursten: 10-25*
- *Granit: 85-120*
- *Kalksten: 70-90*
- *Leca beton: 10-20*
- *Beton: 20-70 (typisk 25-45)*

Materialet skal under de givne forhold kunne håndtere de laster, som det udsættes for. Lastfordelingen kan optimeres således, at selv svage materialer kan fungere, hvis lasterne fordeles rigtigt via topologi optimering.

3D printede konstruktioner har som udgangspunkt tynde vægge, med stor overflade/volumenforhold. Dette betyder, at man skal forvente en stor fordampning. Dette medfører en betydelig risiko for tidlig udtørring, før bindermaterialet har dannet de fornødne bindinger, som holder konstruktionen sammen, og som forhindrer udtørringssvid. Af samme årsag er det heller ikke forventeligt, at man får fuld udnyttelse af bindermaterialet i randen af 3D-pølsen. Sammenstøbningen mellem de enkelte lag er ikke altid helt optimale ved randen, hvilket reducerer den fulde udnyttelse af styrken af den udlagte pølse. Qua dette skal man fratrække effekten af denne reduktion af styrken ved beregning af den effektive udnyttelse af styrken i materialet.

For at de fleste 3D print materialer kan fungere, har de typisk et højt indhold af pulver eller finkornet materiale. "Pulver" defineres typisk som indholdet af cement/gips/ler plus fyldmateriale i form af inert mineralisk materiale i nogenlunde sammen kornstørrelse som bindermaterialet. Et højt pulverindhold medfører, som udgangspunkt, at materialet vil svinde.

Man taler typisk om to typer svind;

- **Udtørringssvind:** opstår når vandet forsvinder. Et eksempel på dette er tørkesprækker i en mudderpøl, når den tørrer ind eller sommeren. Udtørringssvind er kritisk, hvis dette sker inden bindermaterialet er ordentligt reageret. I så fald udnytter man ikke binderen ordentligt, og opnår ikke den ønskede styrke. Dette er grunden til at man typisk beskytter konstruktionen mod hurtig udtørring ved enten at befugte overfladen, eller at påføre overfladen en udtørnings hindrende hinde. Med finkornede systemer kan man ikke helt undgå en vis grad af udtørringssvind, men man kan begrænse de skadelige effekter.
- **Autogent svind:** opstår når bindersystemet reagerer og hvor volumen af vand plus bindermateriale er større end den endelige binder. Dette forhold varierer fra binder system til bindersystem. I nogle bindersystemer medfører reaktionen endda en volumenforøgelse.



Det samlede svind kan reduceres ved at minimere vandindholdet, binderindholdet og den samlede mængde af finstof. Som nævnt tidligere påvirker dette reologien af systemet.

De reologiske egenskaber og den tidlige høje styrke af materialet gør, at materialet i mange tilfælde vil være yderst reaktivt, hvilket betyder at det let bliver stift i pumper, slanger og dysser, hvis der sker variationer i materiale flowet, herunder driftstop. Dette kan styres på flere måder:

- Tilsætning af retarder, som bremser binderreaktionen. Er tilsætningen for høj, er der risiko for at materialet ikke kan bære næste lag på grund af for langsom afbinding
- Bindersystemet modificeres enten ved passiv filler eller langsomt reagerende flyveaske, slagge eller anden puzzolan. Blanding designs til at kunne holde formen, selv under lasten af flere successive lag, før den første afbinding er indtruffet. Gøres blandingen for stiv risikerer man, at det ikke er muligt at ekstrudere / sammenvibrere de enkelte lag.
- Hvis dysse er kombineret med pumpe/blander, er det teoretisk muligt at designe blandingen med en retarder, som efterfølgende kompenseres med en accelerator i støbehovedet. Dette kræver, at der sker en fuldstændig opblanding lige før udlægning.

## Trækstyrke

3D printmateriale baseret på bindersystemer af cement, gips, ler og uorganiske bindersystemer har generelt lav trækstyrke. Som udgangspunkt er trækstyrken af uorganiske bindersystemer ca. 1/10 af trykstyrken. Trækstyrken svækkes yderligere ved defekter, som ligger vinkelret på trækaksen, så som udtørnings revner, og kærvrevner i overfladen af 3D-pølsen. Tilsætning af fibre bidrager til at sprede spændinger fra udtørningssvind og autogent svind og forøger den samlede trækstyrke af materialet. Forøgelsen af trækstyrken virker kun parallelt med udlægningen af 3D-pølsen, som funktion af paralleliteten af fibre, forankringen af fibre i matrix og antallet af fiber pr. volumenenhed. Ved konventionel udlægning er det ikke muligt at opnå en sikker fiberkrydsbinding mellem de enkelte lag. Fibervinklen i forhold til trækretningen er for flad.

Tilsætning af fibre har kraftig påvirkning på de reologiske egenskaber af materialet. Det kræver mere energi at blande materialet, og det kan være vanskeligt at pumpe og ekstrudere materialet. Yderligere kan der være problemer med fuglereder i blander/plumpe/dysse, som kan resultere i driftstop.



Eksempel på ekstruderede ler-”pølses”, hvor der er tilsat fibre for at reducere muligheden for svindrevner og for at gøre materialet formstabil. I det givne tilfælde er der ingen sammenhæng/binding mellem de enkelte pølses/lag

## 5.3 Mulige bindere ved 3D printet byggeri materialer

Valget af bindermateriale til 3D print til bygninger er afhængigt af, hvilke egenskaber konstruktionsdelen skal besidde. Opføres byggeriet i et tørt miljø, hvor klimaskærm beskyttes mod slagregn og vind, kan man principielt printe med en kombination af jord/ler og organisk fibre. Dette er under forudsætning af, at man stadig kan overholde den nødvendige stabilitet og styrke. Teknikken har været anvendt i årtusinder. Bagsiden af Luxor Templet er opbygget med ubrændte lertegl, som er blandet med plantefibre. Jordhuse, hvor tilgængelig jord er banket sammen (Rammed earth houses) har eksisteret i hundrede af år.

I tørt miljø er det også muligt at anvende bindersystemer af uorganisk salte så som magnesit ( $\text{MgO}$  som reageres med  $\text{MgCl}_2$ ), og gips ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) og Natron. Bindersystemerne er baseret på opløsning og genudfældning af krystaller, som via en kombination af sammenvoksning af krystaller og en slags velcro effekt låser materialet sammen.

Disse bindertyper kan principielt anvendes alene, men af hensyn til økonomi og styring af de reologiske egenskaber og svind tilsættes tilslag, på lige fod med fremstilling af beton. Både Magnesit og gips bindersystemer kan blive både retarderet (forsinket afbinding) og accelereret (hurtig afbinding). Reologien kan også her justeres ved hjælp plastificeringsmidler og VMA. Bindersystemer baseret på uorganiske salte skal ligesom beton forstærkes med fibre for at styrke trækstyrken og reducere/kontrollere svind.

Det er teoretisk muligt at fremstille 3D printmaterialer, hvor der anvendes en organisk binder, som for eksempel PVA, polyuretan, epoxy eller acryl og et uorganisk tilslag af stenmel, sand og sten. De reologiske egenskaber af organiske bindersystemer kan modificeres med forskellige hjælpestoffer. Organisk baserede printsystemer kan opnå styrker, som er lige så høje som højstyrkebeton (60-100 MPa), afhængig af polymer og styrken af tilslaget. Ulempen ved disse polymerer er primært prisen, men i høj grad også de miljø- og sikkerhedsmæssige aspekter.

### Cement som binder materiale i 3D printet byggeri materialer

I ikke-tørt miljø vil cement-bindere for alle praktiske formål være det mest relevante primære binde materiale. Flyveaske, slagge og geopolymere kan også tilsættes (se senere). Print materialer til byggeri baseret på cementbaserede systemer giver en hel række muligheder for at modificere egenskaberne ved at kombinere cementtyper, puzzolantype/geopolymer og tilsætningsstoffer og forholdet mellem de enkelte delkomponenter. Dertil kommer mulighederne for at ændre temperatur og luftfugtighed, som har afgørende indflydelse på afbinding og styrke opbygning.



Udvalg af forskellige hjælpestoffer anvendt i forsøgene - Plastificering, viskositet (VMA), accelerator, retarder, skumdæper mv.

Byggematerialer til råhuse domineres af beton. Fundamenter, søjler, gulve, vægge og trapper er fremstillet af armeret beton, hvor armeringen kompenserer for den manglende trækstyrke af betonen. Før opfindelsen

af armeret beton i 1892, var alle sten og tegl konstruktioner opført så man udnyttede trykstyrken i materialerne. Det samme gør sig gældende for 3D printede bygninger i beton, hvor man ikke har nogen direkte armering mellem de enkelte lag. Dette betyder, at man på mange måder kan sammenligne en 3D konstruktion med en muret konstruktion.

Det ligger lige for at anvende cement som primær binder i 3D print ud fra følgende argumenter:

- Cement er let tilgængelig
- Ved den rette formulering opnår man hurtigt relativt høje trykstyrker.
- Cement er relativt billigt (men "dyrt" ud fra et miljømæssigt synspunkt!)
- Betontechnologi er velkendt
- Udvalget af hjælpestoffer og puzzulaner er bredt og relativt let tilgængeligt
- Det er muligt at blande cement med stort set alle typer tilslag.

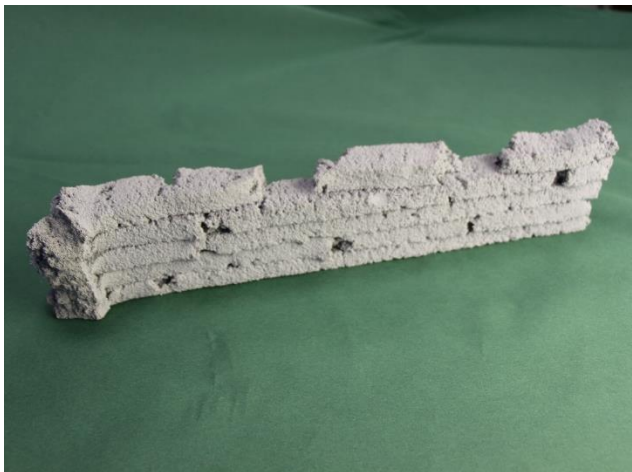
I almindelige betoner ligger vand-cementforholdet mellem 0,35-0,45 for betoner med styrker fra 45-60 MPa og 0,65 for beton med en styrke på 20 -25 MPa. I ultrahøjstyrke (UHPC) beton ligger styrken på 80-120MPa. Denne type beton fremstilles typisk med et vandcementforhold på helt ned til 0,25 og cementindholdet er højt og suppleret med stor tilsætning af mikrosilika.

De kritiske parametre ved fremstilling af 3D printmaterialer er:

- Hvilken metode skal anvendes til at udlægge materialet, og hvad kan blande, pumpe og udlægger/printhoved håndtere
- Med hvilken hastighed skal materialet kunne udlægges og i hvilke tykkelser

Hvis man ønsker at udlægge tykke lag skal udstyret kunne håndtere stive/seje blandinger. Hvis man vil udlægge tynde lag hurtigt skal udstyret kunne administrere tyndtflydende blandinger uden, at man får ukontrolleret udflydning.

|  |                                                                                                                                                                                                                                          |  |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |                                                                                                                                                       |  |
|  | 3D print materiale designet til tyndt udlæg, som kunne håndteres af forsøgs printer. Blandingen er baseret på en meget høj matrixandel kombineret af 600 kg cement 50 kg Flyveaske og 15 kg mikrosilika og et vand-cement forhold på 0,3 |  |

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                       |  |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |                                                                                                                                                                                      |  |
|  | 3D print materiale designet til tyk (for tyk!) udlæg (20 mm). Den viste blanding er et eksempel på de første forsøg med modificering af Grovbeton 0-4mm til fuldskala print. Det viste eksempel illustrerer effekten af en meget mager blanding (lavt cement indhold) |  |

Man omtaler typisk cement som en samlet masse. Cement er et komplekst materiale som fremstilles ved at blande kalk, kvarts og ler og eventuelt lidt jern. Denne masse formales og fødes ind i en roterovn, hvor det smeltes. Denne proces kræver en voldsom energi, hvorfor fremstillingen er forbundet med stor CO<sub>2</sub>-frigivelse (klimasynder!). I enden af ovnen begynder smelten at krystallisere, og man får grundlæggende fire mineral faser, som hver har forskellig betydning for hydratiseringen, reaktiviteten og binderdannelse.

Efter afkøling af cementklinkerne formales de til cementmel. Formalingsgraden har stor betydning for reaktiviteten, og dermed hvor hurtigt cementen afbinder.

Dette betyder, at man ikke bare kan skifte fra en cement type til en anden under et print. Selv om cement er klassificeret i henhold til internationale standarder, kan der stadig være forskelle fra batch til batch og fra leverandør til leverandør.

Cementen reagerer med vandet og hydratiserer. Herved dannes en række nye minerafaser og gel faser, som "limer" materialet sammen.

Under optimale forhold bruger cementen alt vandet til at danne binder. Hvis cementen udtørres for hurtigt, dannes ikke tilstrækkeligt binder og materialet bliver porøst og svagt.

Styrken af en beton styres primært af forholdet mellem vand og cement, også kaldet vandcementforholdet. Jo lavere vandcementforhold jo tættere bliver strukturen og jo stærkere bliver materialet. Der skal dog stadig være vand nok til stede så alle overflader kan reagere og danne binder.

Reaktionerne i cementen begynder med en reaktion mellem cementpartiklerne og tilsat vand, også kaldet hydratisering, herved dannes CSH (calcium silicium hydrat) og calcium hydroxid. Herved stiger pH. Er man i dette tilfælde heldig, så frigives også noget KOH. Dette betyder at pH i porevæsken stiger til pH 14.

## Brug af geopolymere i 3D print materialer

Puzzolan eller geopolymere er et materiale, som ved reaktion med alkalier (KOH, NaOH, CaOH) danner geler CSH/Torbemorit, som binder partiklerne sammen.

Ordet puzzolan henføres tilbage til de romerske betoner, opus caementicium, som er beskrevet af Vitruvius ca. 50 før vor tidsregning. Her beskrives, at man kunne fremstille beton, som kunne hærde under vand (heraf betegnelsen hydrauliske egenskaber) ved at blande brændt kalk med vulkansk jord fra Puzzoli. I mange artikler betegnes denne type mineralsk tilsætning også som geopolymere.

Den ideelle puzzolan har et højt indhold af amorf siliciumoxid (glas), som reagerer med frie alkalier og danner binder.

Opløseligheden af  $\text{SiO}_2$  stiger med pH. Dette betyder, at man ikke kan bruge puzzolaner alene men, at man har brug for en accelerator til at hæve pH. En aktivator er et middel der hurtigt hæver pH til 14.

Når man taler om Geopolymere/puzzolan udnytter man, at man kan fremprovokere en reaktion med ellers inert materiale ved hjælp af f.eks. følgende aktivatorer KOH, NaOH og  $\text{Ca(OH)}_2$ .

Som nævnt, kan man betegne Flyveaske, Slagge, naturlig vulkansk aske, metakaolin, mikrosilika, brændt tegl, og stenmel fra mine industrien som en geopolymere. Dette er dog under forudsætning af, at materialet har et højt indhold af amorf kvarts eller glas med et højt indhold af silicium. Nogle slaggetyper har et lavt indhold af silicium, hvilket gør dem mindre reaktive, og nogle vulkanske asker har en sammensætning med lavt indhold af silicium, som gør dem uegnet til puzzolan/geopolymere

Reaktiviteten af en geopolymere styres primært af indholdet af amorf silicium/glas og kornstørrelsen. Fint formålet materiale er meget reaktivt, mens groft materiale reagerer meget langsomt. Ved fine kornstørrelser kan man få materialet til at reagere med en simple aktivator som brændt kalk, mens mere grove fraktioner skal aktiveres med en mere aggressiv aktivator som KOH.

Geopolymere kan tilsættes cementbaserede bindersystemer som supplement eller til at styre reaktivitet/temperaturudvikling eller til at opsuge overskydende alkalier. Sidst nævnte udnyttes, hvis tilslaget er alkalisk reaktivt, til at forhindre at der sker ekspansion af reaktive tilslagskorn.

Finkornet geopolymere kan også bidrage til at gøre bindersystemet mere "klistret" og danne en tæt binderstruktur. Betonkoncepter, hvor der er tilsat mikrosilika, vil ofte have en mere klistret konsistens, som kan udnyttes, hvis man printer eller støber "op ad bakke"

## 5.4 Tilslags materialer

Principielt kan man anvende alle typer tilslag til 3D print, så længe materialet ikke nedbrydes af bindermaterialet.

Tilslaget danner grundstenen i printmaterialet, idet det som udgangspunkt helst skal udgøre 60-70 % volumen af materialet. Tilslaget må under de givne driftforhold ikke medvirke til nedbrydning af bindermaterialet eller ekspansion, som følge af reaktioner med bindermaterialet. Tilslaget må heller ikke være frostfølsomt eller svellende under fugtige forhold.



Det ideelle tilslag er ikke sugende, har lav absorptionsværdi og en styrke, som overstiger styrkekravet til materialet. Kornformen er kantafrundet således, at der opnås et kompromis mellem at kunne både facilitere fri bevægelse kombineret med egenskaber, som låser strukturen når dette kræves.

Denne type materiale er altid tilgængelig på laboratorie plan.

I den virkelige verden er det mere kompliceret:

- Materialet har varierende kornform
- Der er variationer i absorptionsværdierne/porøsitet
- Der forekommer variationer i kornkurver (kornstørrelsesfordeling)

Variationerne er en udfordring men ikke et uløseligt problem. Ved design af printmateriale og printudstyr skal man tage forbehold for disse variationer således, at man har et robust grundkoncept. Den største udfordring er blande/pumpe/printeudstyrets mulighed for at kompensere for forskelle i de reologiske egenskaber af printmaterialet uden, at der opstår printstop eller blokering i slanger og dysser. Der skal være muligt at håndtere tilslagskorn i en vis overstørrelse, eller at materialet pludseligt bliver mere flydende eller mere stift. Dette kræver at pumpe, slanger, føder og dysse er dynamiske til en vis grænse.

Rene, veldefinerede, mineralske tilslag, som er knust og soldet til bestemte fraktioner er relativt let at anvende. Det er muligt at sammenstikke en ensartet kornkurve, som kun har mindre variationer.

Anvendes mineralske materialer, som er udtaget i bredere fraktioner, som for eksempel 0-2 mm sand eller 0-4 mm sand, så er der sandsynlighed for, at variationer i den fine del af kornkurven vil have indvirkning på vandbehov og forbrug af plastificeringsmiddel for at opnå en given reologi.

Anvendes knust beton, tegl eller gips vanskeliggøres processen yderligere af variationer i grundmaterialets karakter, som funktion af forskelle i kildesammensætningen. Eksempel: Dag-1; *der er knust rest højstyrke beton fra Unicon. Dag-2; der er knust beton fra faldefærdige altaner fra 1920*

Grundegenskaberne er vidt forskellige i de to materialer; Dag-1. sammensætningen er ensartet og cementpasta besidder måske endnu et restpotentiale. Dag-2; sammensætningen er yderst varierende og der er rester af maling og mørtel. Yderligere er tilslag sandsynligvis reaktivt og cementpasta er helt karboniseret.

Hvis man har et overskueligt projekt, kan man homogenisere den samlede tilslagsmængde forud for print. Yderligere er det klogt at foretage en ekstra sigtning, for at undgå mulige korn i overstørrelse, som kan blokere systemet.

## 5.5 Udenlandske recepter til 3D printet byggeri materialer

Fra de udenlandske besøg og fra researchen blev der indsamlet 11 recepter, hvoraf 10 var baseret på cement. Generelt viste det sig ikke nemt at indsamle disse recepter, da deltagerne i de udenlandske projekter gerne ville holde deres recepter hemmelige.

Der henvises til appendix 3 for en oversigt over disse recepter.

For flertallet af de udenlandske recepter var følgende gældende:

- Cementindholdet er typisk højt gående fra 450-650 kg pr. m<sup>3</sup>.
- Vandcementforholdet ligger typisk omkring 0,25-0,35
- Der er ofte tilsat mikrosilika for at gøre blandingen "klister-agtig" og øge styrke.
- Der er ofte tilsat flyveaske, for at øge matrix andel og som moderator
- Der er typisk anvendt sandtilslag med 0-4 mm. Oftest dog kun 0-2 mm
- Der er tilsat mikrofibre/crackstop for at kompensere for svind.
- Flydeegenskaberne er kraftigt justeret med plastificeringsstoffer og afbindingshastigheden er justeret med kombinationer af retarder og accelerator.
- Da langt de fleste recepter bestod af materialer med en maksimal partikel størrelse på 4 mm - og ikke de påkrævede 8 mm for, at materialet kan kaldes beton – ville den rigtige betegnelse for dem være (beton)mørtel

I alle rapporterede forsøg er blandingerne optimeret til den enkelte printer og print metode. Mange af forsøgene er udført på printere, hvor det har været nødvendigt at kunne foretage hurtig opbygning mellem de enkelte lag. Dette betyder, at det har været nødvendigt at opnå en hurtig sætning af blandingerne således, at de har kunnet bære de efterfølgende lag uden at synke. Blandingerne har opnået ekstremt høje styrker, 60-120 MPa, qua det høje cementindhold kombineret med lavt vandcementforhold og ofte også tilsætning af mikrosilika. Man kan stille spørgsmål ved, om der er brug for de høje styrker, og det er generelt ikke tilfældet, specielt ikke i de projekter, hvor det 3D printede beton bruges som form til at udstøbe konventionel beton i. Den høje andel af cement tilføres normalt ikke, fordi høje trykstyrker er påkrævet, men fordi der skal meget binder (cement) i for at sikre, at den 3D printede beton ikke flyder ud.

I de større kinesiske forsøg, hvor der rent faktisk er printet store konstruktioner, har blandingerne tydeligvis været mere magre (lavere cement indhold), idet der har været tid mellem hver lag til at opnå en vis sætning før det næste lag blev udlagt og udstyret har kunnet håndtere både flydende og stive betonkoncepter.

|  |                                                                                                           |  |
|--|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |                       |  |
|  | <p>Materiale prøve fra Kina, Winsun. Bemærk den grove overflade struktur. Hvert lag er ca. 20 mm tykt</p> |  |

Hvis printdesignet og udstyret optimeres til at kunne håndtere kombinationer af stivere materialer og længere åbningstid mellem hvert lag, samt at man overvejer, hvilke styrker der reelt er behov for under opførelsen og i den færdige konstruktion, så er der muligheder for at optimere betonkonceptet til at blive mere bæredygtigt. Dette gælder også, hvis man kunne anvende en binder, der ikke var cement baseret.

Betonkonceptet kan modificeres til at først og fremmest nedsætte cementindholdet til 350-400 kg cement. Denne mængde cement er nødvendigt for at kunne opnå en relativt hurtig styrkeopbygning ved et vandcementforhold på 0,30. Samtidigt skal volumenandelen af binderfase plus luft være høj nok til at give en plastisk struktur. Reologien justeres ved tilsætning af passiv filler kombineret med evt. flyveaske/geopolymer, som også bidrager til bindersystemet. Ved at optimere kornkurve og kornform på tilslag, kan man yderligere bidrage til at opnå den ønskede reologi, som yderligere justeres med kombinationer af plastificering, konsistensmiddel (VMA).

## 5.6 Udvikling af 3D print beton indeholdende genbrugsmaterialer

Et hovedtema i projektet har været at afsøge muligheden for at udnytte genvundne råmaterialer til 3D print af bygninger. Vil det være muligt at gøre 3Dprint mere bæredygtige i forhold til de konventionelle byggemetoder via mindre materialespild, logistik og inkorporering af sekundære råvarer. Projektet skal ses i lyset af at andre 3D print projekter er delvist lykkedes via anvendelse af små mængder af veldefinerede materialer og et generelt højt cementindhold i materialet i forhold til konventionelle betonprodukter. Skal 3D print af byggerier være interessant ud fra et økonomisk- og bæredygtigt synspunkt, er det vigtigt at få cementindholdet ned og andelen af genvundne materialer op.

I hovedparten af forsøgene har målet været at fremstille blandinger med følgende grundegenskaber:

- Genanvendte materialer skal udgøre den størst mulige andel
- Indholdet af ny binder skal reduceres mest muligt.
- Indholdet af puzzolaner skal maksimeres
- Vandindhold skal reduceres til et minimum
- Kornkurven skal have den højst mulige andel af grove partikler  $x > 2-4$  mm.
- Printmaterialet skal være pumpbart
- Materialet skal være formstabilt lige efter udlægning
- Materialet skal have et afbindingsforløb, som tillader at successive lag påføres med en frekvens på ca. 1 lag pr. 10 minutter.
- Styrken og styrkeudviklingen skal være højst mulig
- Svindet skal være mindst muligt

Grundprincippet i forsøgene har været at afsøge muligheden for at fremstille 3D print materialer baseret på kombinationer af cementbindersystemer og genbrugsmaterialer og dermed reducere cementandelen samtidigt med, at der er opnået en acceptabel reologi, afbinding og styrkedannelse.

De afprøvede genbrugsmaterialer kan deles op i fire gruppe:

1. materialer med varierende/svage puzzulane egenskaber, som potentielt kan bidrage til styrkedannelse
2. materialer, som virker som passiv filler, som bidrager til at modificere de reologiske egenskaber
3. passivt tilslag (sten, grus, sand)
4. fibre, som kan bidrage til reduktion af svind og øge trækstyrken.

### Gruppe -1 svage puzzolaner

- Bundslagge
- Knust tegl, ren, 0-4 mm

- Urent teglknus 0-4 mm

Materialerne har potentielt svage puzzulane egenskaber, idet dele af materialet udgøres af fint glasagtigt støv, som kan reagere med alkalier fra hydratiseringen af cementen og danne binder. Materialerne er dog meget uensartede og kornkurven og grundsammensætning kan være yderst varierende.

#### Gruppe-2 passiv filler materialer

- Knust tegl, ren, 0-4 mm
- Urent teglknus 0-4 mm
- Recycling gips D-max 5 mm
- 0-4 mm knust beton

Materialerne indeholder varierende mængder filler, som er genereret under knuseprocesserne.

#### Gruppe-3 passive tilslags materialer

- Knust polyuretan
- Bundslagge
- Knust tegl, ren, 0-4 mm
- Urent teglknus 0-4 mm
- Recycling gips D-max 5 mm
- Recycling gips D-max 14 mm
- Knust beton 0-4 mm uren
- 0-4 mm knust beton

Kornkurven på materialerne er yderst varierende, og der ses ofte overkorn eller lange korn, som komplicerer ekstruderingen.

De mekaniske egenskaber er meget forskellige. Den knuste polyurethan har ingen særlig styrke, men kunne principielt bruges til at fremstille meget lette printmaterialer. Bundslagge og knust tegl svarer til porøse tilslag så som leca nødder og mursten. Styrken og egenskaberne af knust beton svarer til knust granit/kalksten. Recycling gips er svagt og deformerbart.

Som udgangspunkt bør man ikke anvende gips i beton, som udsættes for fugt, idet dette kan lede til nedbrydning via internt sulfatangreb. Til passive konstruktioner, hvor der ikke er betydelige styrkekrav kan gips dog anvendes som passivt tilslag.

#### Gruppe-4 fibre

- Knust glasfiber
- Rockwool støv

Knust glasfiber fra vindmøllevinger er yderst inhomogene, med hensyn til fiberlængde, mængden af sammensatte fiber og smidighed på grund af at fibrene er helt eller delvis indstøbte i epoxy eller polyester.

Rockwool støvet har yderst begrænset fiberlængde (under 2 mm) og materialet fremstår mere som filler end som fibre.

|  |                                                                                                                                                                                                      |  |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |                                                                                                                    |  |
|  | <p>Eksempel på genbrugsfibre. Til venstre ses glasfiberfragmenter fra knuste vindmølle vinger. De enkelte fibre varierer i længde fra 5-30 mm. Til højre ses granulat af knust genbrugsrockwool.</p> |  |

## 5.7 Forsøgsresultater med brug af cement og genbrugstegl, bundslagge, knust beton og recycling gips til 3D printet byggeri materialer

Der er blevet testet 11 recepter opbygget omkring kombinationer af cement, flyveaske, mikrosilika, slagge, gips, genbrugsbeton og varierende mængder af knust tegl af forskellig kvalitet.

De forskellige recepter blev forsøgt printet med test printeren, og der blev efterfølgende foretaget måling af trykstyrken af de printede emner. Resultaterne af de i alt 11 tests (inkl. den anvendte beton ved printningen af The BOD, samt to recepter indeholdende genbrugsgips) er vist i appendix 4 (der indeholder de 8 tests, mens de tre andre er nævnt herunder), hvor det præcise indhold af hvert testet materiale også fremgår.

Generelt viste forsøgene, at der intet problem var med at lave beton blandinger med den nødvendige trykstyrke. Faktisk var trykstyrken i de fleste recepter mere end 2-3 gange de gængse krav ved brug af beton til vægge mv.

I alle recepter er reologien justeret med superplast og VMA på niveauer, som svarer til 1-1,5 % af bindermængden. Igen er det vigtigt at understrege, at materialerne er yderst varierende, hvor mængderne af superplast ligeledes varierer betydeligt.

Principielt burde der være en styrkegevinst ved at tilsætte knust tegl, under optimale forhold, når materialet er knust til mel. De testede genbrugsmaterialer er dog anvendt som modtaget. Dette betyder, at sammensætningen og kornkurven varierer, og dermed får man ikke udnyttet det fulde potentiale i teglmaterialet og det er sværere at styre. Ideelt set kunne man have sigtet materialet, således at finfraktionen indgik som en del af binder fraktionen på linje med flyveaske. Under alle omstændigheder viste test resultaterne, at genbrugs tegl kunne anvendes, såfremt den blev modtaget som en ren fraktion og såfremt indholdet af tegl ikke blev for stort (mere end 25%).



Noget tilsvarende gjaldt for anvendelsen af genbrugsbeton, der også viste sig at være svær at styre grundet meget uensartet partikelstørrelse, der ofte overskred printerens mulighed for at ekstrudere. Skal genbrugsbeton anvendes som tilslag kræves en renere og mere ensartet fraktion, der systematisk overholder kravet til den maksimale størrelse af partiklerne.

Resultaterne med anvendelse af flyveaske og microsilka var derimod mere lovende, mens bundslaggen og glasfibre fra de knuste vindmølle vinger ikke viste sig brugbare til 3D printet beton, fordi de i den form, som de normalt findes i, var for vanskelige at ekstrudere. Glasfibre fordi de var for lange/grove i.f.t. 3D print, mens bundslagen var for inhomogen m.h.t. forstørrelse og sammensætning. Begge materialer ville kræve yderligere neddeling, hvis de skal kunne anvendes til 3D print.

Bundslagge er den grove slaggefraktion, som ikke kan transporteres af røggassen lige som flyveaske. Yderligere er der ofte et relativt højt indhold af restkoks (uforbrændte partikler), som kan påvirke afbindingen af cementbundne systemer samt reaktioner i tilsætningsstofferne. Bundslaggen findes derfor ikke egnet, men det betyder ikke, at andre slagge typer ikke kan anvendes.

Genbrugs gips fejlede totalt som et muligt materiale, mere herom i afsnit 5.9.

## **5.8 Recepten for betonen anvendt ved 3D print af The BOD:**

Betonkonceptet, som er anvendt i The BOD er opbygget omkring anvendelsen af kombinationen mellem et rent cementbindersystem og den mulige puzzulane effekt og filler komponenter i knuste tegl.

Flydeegenskaberne styres primært af et højt matrixindhold, som opstår som en kombination af højt cementindhold samt fillerandelen fra de knuste tegl. Stabiliteten af blandingen opnås via den kantede kornform af de knuste tegl.

Kravspecifikationerne til den specifikke blanding var, at den skulle kunne udlægges i 20 mm tykke lag og at der skulle kunne ske en overprintning efter 10-15 minutter ved 20°C. Endelig sættid skulle være 1 time.

Der blev tilsat polyester crackstop fiber for at forhindre udtørringssvind og autogent svind.

Blanding er modificeret til at kunne printes i et fødehoved, hvor blandingen selv skulle kunne flyde ned til fødesnegl. Blanding skulle samtidig være så stiv, at materialet ikke kunne flyde ud ved egen kraft. Dette vil sige at materialet skulle have stort set perfekte thixotropiske egenskaber.

Recepten blev baseret på et cementindhold på 400 kg/m<sup>3</sup>, som er relativt højt. Ved fremtidige forsøg vil der blive arbejdet på at reducere cementindholdet til under 400 kg og en øget andel af alternative råvarer.

| <b>Tabel 1:<br/>Recept for 3D print beton<br/>til The BOD</b> | <b>Totalt materiale<br/>forbrug for 3D<br/>print af The BOD</b> | <b>Materiale<br/>andel i hht.<br/>vægt</b> | <b>Pris for<br/>materiale<br/>forbruget</b> |
|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|---------------------------------------------|
| <b>Materiale</b>                                              | <b>Mængde [ton]</b>                                             | <b>% andel</b>                             | <b>Pris</b>                                 |
| Cement                                                        | 6.12 ton                                                        | 32%                                        | 10,374.07 kr.                               |
| 0/2 mm sand                                                   | 3.50 ton                                                        | 18%                                        | 595.02 kr.                                  |
| 0/4 mm grus                                                   | 3.50 ton                                                        | 18%                                        | 637.02 kr.                                  |
| Genbrugstegl (op til 8 mm)                                    | 4.38 ton                                                        | 23%                                        | 525.75 kr.                                  |
| Vand                                                          | 1.66 ton                                                        | 9%                                         | 62.40 kr.                                   |
| Glenium sky 631(plastificerer)                                | 0.04 ton                                                        |                                            | 191.45 kr.                                  |
| Polyester crackstop                                           | 0.02 ton                                                        |                                            | 1,038.35 kr.                                |
| <b>I alt</b>                                                  | 19.22<br>ton                                                    | <b>100%</b>                                | <b>12,385.72 kr.</b>                        |
| Primewool papirisolering                                      | 1.40 ton                                                        |                                            | 8,400.00 kr.                                |
| Færdig beton til søjler                                       | 2.70 ton                                                        |                                            | 1,485.00 kr.                                |
| <b>Materialeomkostninger i<br/>alt</b>                        |                                                                 |                                            | <b>22,270.72 kr.</b>                        |

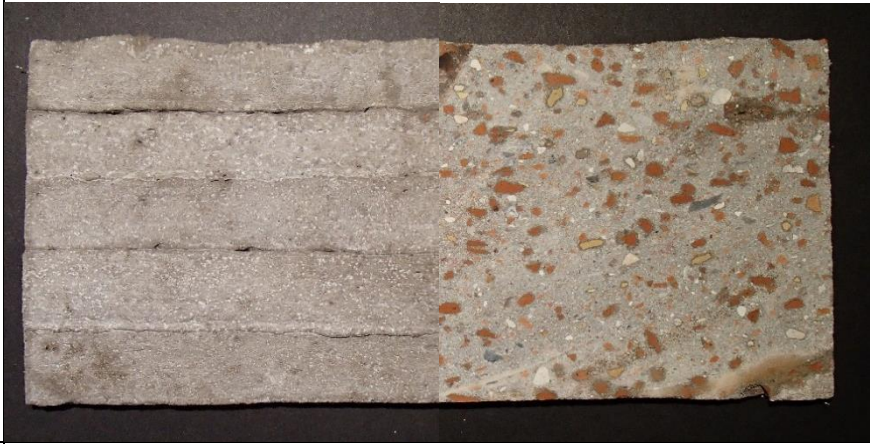
Omkostningen per ton af den 3D printede beton var ca. 650 kr mod 550 kr for konventionel beton. Den relativt høje andel af dyr cement ses således ikke at lede til en forholdsvis tilsvarende forøgelse af den samlede betons pris, afledt af at

Trykstyrken blev målt til 54 MPA, mens den initiale setting tid var 15 minutter.

Recepten viste sig at være fint egnet til at printe The BOD.

Blandingen er formstabil, og besidder tilstrækkelige thixotropiske egenskaber til at materialet successivt kan indarbejdes i foregående lag, uden at der sker betydelig sætning. Blandingen er justeret til at kunne udlægges i lag af 20 mm.

Blandingen var yderst følsom over for variationer i sammensætningen af genbrugstegl. Dette kræver justering i vandtilsætning for hver batch for at opretholde korrekt reologi. Som setup'et var i forbindelse med printningen af The BOD var dette mandskabskrævende og det tog lang tid at få en blanding korregeret, hvis denne var lavet enten for våd eller tør.

|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |  |
|--|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|  |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |  |
|  | <p>Gennemskåret prøve af 3D print betonen fra The BOD. Venstre side viser ydersiden, hvor de enkelte 20 mm tykke lag fremstår tydeligt. Bemærk den næsten perfekte overfladestruktur. Højre billede er samme prøve, som er vendt om. Snittet ligger ca. 7 mm fra ydersiden. Bemærk den stort set perfekte sammenvibrering af de enkelte lag. På snitfladen ses tydeligt forskellige tegl- og mørtelfragmenter, som er delvist orienteret parallelt med udlægningsretningen.</p> |  |

## 5. 9 Recepter indeholdende genbrugsgips

Som et led i afsøgningen af muligheder for at anvende alternative råvarer til fremstilling af materialer til 3D print, er det blevet undersøgt, om det var muligt at anvende kombinationer af ny gips og genbrugsgips. En sådan recept var tænkt brugt til at printe indvendige vægge.

Som udgangspunkt er kravspecifikationerne for gips de samme som for 3D printmaterialer fremstillet af cementbaserede produkter, bortset fra at man langt fra kan forvente samme styrker, grundet den fundamentale forskel i styrken af bindersystemet. Det er ikke forventeligt at opnå styrker, som overstiger 3--10 MPa, svarende til murstensbyggeri.

Succeskriteriet for blandingerne var følgende:

- Materialet skal være pumpbart/ekstruderbart
- Materialet skal være formstabilt
- Det skal kunne overprintes inden for 10-15 minutter
- Initial afbinding inden for 60 minutter, dette for at kunne understøtte efterfølgende lag uden at synke.

Med dette udgangspunkt er det forsøgt at fremstille recepter, hvor der tilsat varierende mængder af genbrugsgips og ovntør sand. Kombinationen af sand og genbrugsgips udnyttes til at opbygge et passivt selvunderstøttende tilslagsskelet, for at minimere mængden af ny binder.

Udgangspunktet i blandingerne er ny KNAUF ROTBAND tør gipsspartel, som ved deklareret opblanding kan opnå styrker, som overstiger 3 MPa. Afbindingstiden er ca. 15-30 minutter afhængigt af vandtilsætningen.

Genbrugsgipsen, i 0-5 mm, består af knuste gipsplader, hvor størstedelen af papir og maling er sorteret fra. Materialet er primært designet til at indgå i i fabrikationen af nye gipsplader, hvor genbrugsgipsen kan udgøre 20-25 %. I denne proces opvarmes gipsen, hvorved den omdannes til hemihydrat, som kan reagere med vand og omdannes til dihydrat, som er fast.

I denne afsøgning af muligheder er det forsøgt at tilsætte genbrugsgips uden at foretage en afvanding til hemihydrat, altså uden at opvarme og aktivere materialet. Dette betyder at genbrugsgipsen ikke bidrager til binderdannelse, men udelukkende fungerer som tilslag.

Reologien er modificeret ved tilsætning af plastificeringsmidler, svarende til max 1 % af bindemiddel.

I de følgende recepter er der opnået reologier, som vurderedes egnet til 3D printmaterialer. Det viste sig imidlertid ikke at være muligt at opnå afbindingstider eller styrker, som var forlignelige med kravspecifikationerne.

| 3D printet gips med genbrugsgips (19%) | Vægt<br>Kg | Volumenandel, sum liter | Vægt % |
|----------------------------------------|------------|-------------------------|--------|
| Knauf Rotband, ren ny gipsspartel      | 20         | 25                      | 38     |
| Vand                                   | 14         | 14                      | 27     |
| Recycling gips: 0-5 mm                 | 10         | 10                      | 19     |
| Sand: ovntørret 0-2 mm                 | 8          | 8                       | 15     |
| Styrke: MPa                            | n/a        |                         |        |
| Set. Min                               | >60        |                         |        |

**Konklusion:**

Blandingen er plastisk og formstabil, men afbindingen er yderst langsom, og massen forbliver fugtig. Materialet kan smuldres med fingrene, og har altså ingen trykstyrke.

Fibre i genbrugs gips resulterer i at massen bliver sej. Der findes en del overkorn i genbrugs gips.

Styrkeudvikling ar yderst langsom. Mere end 24 timer.

Umuligt at anvende op til 20% gips i 3D printede vægge



| 3D printet gips med genbrugsgips (10%)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Vægt<br>Kg | Volumenandel, sum liter | Vægt % |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------|--------|
| Knauf Rotband                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 20         | 25                      | 44     |
| Vand                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 13         | 13                      | 29     |
| Recycling gips: 0-5 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 4,5        | 4,5                     | 10     |
| sand : ovntørret 0-2 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 8          | 8                       | 18     |
| styrke: MPa                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | n/a        |                         |        |
| set. Min                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | >60        |                         |        |
| <b>Konklusion:</b><br><br>Om end recepten klart var bedre end recepten med op til 20% genbrugsgips, vurderes materialet stadig ikke at være egnet til 3D printet byggeri.<br><br>Blandingen er plastisk og formstabil, men afbindingen er langsom, og massen forbliver fugtig.<br><br>Stykeudvikling er langsom. Mere end 12 timer. Materialet er svagt og kan let brækkes med fingrene. Materialet kan ikke anvendes til 3D print. |            |                         |        |

Med udgangspunkt i ovenstående resultater blev det forsøgt at varmebehandle genbrugsgipsen forud for opblandingen. En prøve på 1 kg blev opvarmet til 160°C i 12 timer. Herefter blev gipsen formalet og genopblandet med vand, for at måle tid til initial set. Ved opblandingen kunne gipsen relativt let opslæmmes til en grødagtig konsistens. Blandingen opnåede ikke formstabilitet inden for 30 minutter og nogen egentlig styrke var ikke opnået før efter 6 timer. Det blev bemærket at overfladen fremstod med en brunlig skorpe.

Skimmelvækst i genbrugsgips mistænkes for at danne stoffer, som virker som retardere. Dette betyder at gipsen ikke kan anvendes uden forudgående opvarmning, hvilket gør at der ikke er nogen energimæssig fordel ved at anvende genbrugsgips til dette formål.



## 5. 10 Sammenfatning

Partnerskabets research på materialer til 3D printet byggeri viste groft sagt følgende:

- Udfordringen, der skal løses, er, at materialet skal:
  - Kunne ekstruderes
  - Være pump- og flyd-bart
  - Opnå hurtig formstabilitet
  - Sikre hurtig afbinding, men ikke så hurtig, at det størkner forskellige steder i system ved utilsigtede stop etc.
- Cement er som udgangspunkt det mest oplagte materiale af bruge som binder for det printede materiale. Cement er relativt billigt, er tilgængeligt alle steder i verden, med den rette recept opnås høje trykstyrker for betonen og betontechnologien er meget velkendt, mens cement kan blandes med en lang række af tilslagsmaterialer og udvalget af hjælpestoffer til cement/beton er stort. Det største problem ved anvendelsen af cement er klimaaftrykket
- Cement var da også binder materialet i 10 ud af 11 recepter brugt i udlandet, som det trods alt lykkedes partnerskabet at få frem (mange var uvillige til at dele recepter).
- De udenlandske recepter var der ud over karakteriseret ved:
  - Relativt stort indhold af cement (2-3 gange det normale for støbebeton)
  - Relativ ofte kombineret med flyveaske og microsilika
  - Sand mest anvendte tilslagsmateriale, og da den maksimale partikelstørrelse i de udenlandske recepter var under 4 mm, er der reelt mere tale om recepter for mørtel end for beton
  - Fibre anvendt som crackstop
  - Plastificider anvendt for at styre flydbarheden
- Partnerskabets tests af 11 egne forskellige recepter afslørede:
  - At der skal en større end normalt indhold af cement til for at opnå den nødvendige binding, der gør, at materialet kan 3D printes
  - At det er uproblematisk at opnå en trykstyrke, som anvendes i byggeriet. Faktisk nås langt mere end der reelt er nødvendig, fordi der tilføres relativt meget cement for at nå bindingen jf. ovenstående
  - At microsilika og flyveaske kan begrænse mængden af den anvendte cement
  - At en række genbrugsmaterialer desværre ikke kan anvendes, herunder ikke mindst genbrugs gips, der ellers var store forhåbninger til, grove fibre fra knuste vindmøller (men måske mere finere) og bundslagge (mens anden slagge godt kunne tænkes at kunne anvendes), mens værdien af at tilsætte knust Rockwool affald er tvivlsom
  - Til gengæld kan såvel genbrugs tegl som beton anvendes, med følgende begrænsninger:
    - For tegl skal der være tale om en relativt ren fraktion, og der er en øvre grænse for hvor meget, der kan tilsættes som tilslag
    - For beton skal der være tale om ensartet fraktion for at sikre ekstruderingen
- Det er lykkedes at lave en recept til brug for 3D printningen af The BOD med beton med stor styrke, plastificider for at styre flydbarheden, polyester cracks for at undgå revner, 23% andel genbrugstegl og udmærkede printegenskaber.
- Materialet var trods den relativt store andel af cement kun marginalt dyrere pr tons end sædvanlig beton til udstøbning, og fordi der anvendes mindre beton ved 3D print end konventionel støbning, så kompenseres i et klimaperspektiv den større andel af cement i recepten med det mindre materialeforbrug

## 6. Sammenfattende konklusion

Denne rapport markerer afslutningen af arbejdet for Partnerskabets for 3D Printet Byggeri. Partnerskabet blev indledt den 1. januar 2016 og principielt afsluttet den 31. december 2017. Partnerskabet bestod af 3D Printhuset, NCC Danmark, Force Technology og Gips Recycling.

Partnerskabets Partnerskab for 3D Printet Byggeri har som primær målsætning haft at øge kendskabs- og kompetenceniveauet bredt i byggebranchen i Danmark til 3D print teknologiens muligheder indenfor byggeriet, herunder muligheder for materialebesparelse og anvendelsen af genbrugsmaterialer. Partnerskabet tillader sig hermed at konkludere, at partnerskabet såvel i form af direkte ydelser som i form af de indirekte effekter, har leveret mere end oprindeligt lovet og planlagt.

Partnerskabet har i de to år gennemført besøg hos 3 gange så mange 3D printet byggeri projekter rundt om i verden, som planlagt, og har produceret ikke bare én test printer, men to forskellige for at kunne simulere, hvordan printer og materialer ville opføre sig på et rigtigt byggeprojekt. Partnerskabet har erhvervet og testet 11 forskellige recepter fra de udenlandske projekter, og har selv udviklet 11 forskellige recepter på 3D printet materiale, som er blevet testet. Partnerskabet har udviklet og i to år kørt vidensportalen [www.3dprintetbyggeri.dk](http://www.3dprintetbyggeri.dk), som har haft tusindevis af besøgende i perioden og partnerskabets videoer er blevet set næsten 15.000 gange. Portalen indeholder de planlagte 12 besøgsrapporter fra udenlandske besøg, men i tillæg også 18 kortere profilbeskrivelser. Partnerskabet har delt og spredt den erhvervede viden til byggebranchen bredt i Danmark via besøgsrapporterne, profilbeskrivelser, videoer, linkedin opdateringer, vidensportalen og ikke mindst via afholdelse af 2 egne store konferencer om 3D printet byggeri, samt deltagelse med præsentationer på andre konferencer. Mere end 1.000 mennesker har således deltaget på konferencen, hvor partnerskabet har videregivet den opnåede viden.

Partnerskabets research af "state of the art" har identificeret i alt 17 opførte bygninger/bygningsstrukturer globalt. Hovedparten af disse i Asien, ikke mindst Kina, Rusland og Mellemøsten. Kinesiske Winsun står alene for næsten halvdelen af disse og er den enkeltvirksomhed, som har den største og bredeste erfaring med teknologien. Måden Winsun anvender teknologien på er til gengæld den mindst disruptive, idet Winsun principielt blot råder over en betonelement fabrik, der bruger 3D print teknologi (i stedet for konventionel støbning) til at printe hovedsageligt bygningsdele, der er retlinjede og ikke tager fordel af teknologiens muligheder for at fremstille mere fritformede designs. Det er også værd at bemærke, at Winsuns løsninger ikke ville kunne godkendes i Europa, hverken mht. energi, styrke eller kvalitet.

I alt har partnerskabets research afdækket næsten 70 3D printet byggeri projekter, og selvom Asien er førende på udførte byggerier, gælder dette ikke for igangværende forsknings- og udviklingsprojekter, hvor Europa dominerer. I Europa er der generelt et meget større samspil mellem virksomheder og videns institutioner (universiteter), der arbejder med og forsker i 3D printet byggeri end i andre verdensdele. Dette gælder ikke mindst m.h.t. involveringen af store virksomheder fra den konventionelle byggebranche, hvor Europa også er klart førende, og flere af disse har i løbet af 2017 enten investeret i startups indenfor 3D printet byggeri eller er selv begyndt at investere i teknologien.

Dette samspil mellem vidensinstitutionerne på den ene side, og de store konventionelle virksomheder og 3D print startups på den anden side, vurderes også at være afgørende i den fortsatte og nødvendig udvikling af næste generationer af teknologien. Europa har derfor potentialet til at blive førende på teknologien, selvom specielt Kina og Mellemøsten – ikke mindst Dubai – forventes at dominere på antallet af opførte bygninger. Kina p.g.a virksomheden Winsun og fordi det antages at være nemmere at opnå tilladelser der, og Dubai fordi sheiken af Dubai har besluttet, at i 2030, om bare 12 år, skal 25% af alle bygninger opføres med 3D print teknologien, og Dubai har allerede taget mange skridt i forsøget på at realisere dette mål.

Researchen har ikke entydigt kunne konkludere noget om teknologiens nuværende konkurrenceevne, idet det faktisk kun har været muligt at få data fra et projekt – The BOD, Europa's første 3D printede bygning, opført af partnerskabs deltageren 3D Printhuset i forlængelse af deltagelsen i partnerskabet. For resten af projekterne har det ikke været muligt at opnå valide data, mens der er utallige indikationer på, at ingen af byggerierne reelt har medført de markedsførte besparelser (tid og økonomi), snarere tværtimod.

Det ville også have været overraskende, hvis det havde været tilfældet, idet der bortset fra Winsun er tale om virksomheder, der anvender teknologien for første gang, og som bekendt bliver man aldrig verdensmester til at gøre noget, første gang man gør det. Sagt mere økonomi-teoretisk er der endnu ikke opnået nogen form for skala eller læringseffekt, der kunne medføre, at potentialerne i teknologien blev fuldt udnyttet.

De første demo-projekter, som ses rundt i verden, skal videreudvikles og flere eksperter samt brugere fra byggebranchen skal involveres, inden børnesygdommene kan kureres, og denne teknologi kan konkurrere på lige fod med traditionelle produktionsformer. Der findes dog niche-områder, hvor 3D print allerede nu ser ud til at kunne konkurrere. Eksempelvis små bygninger, som f.eks. The BOD, med meget organiske former, som traditionelt er dyre at bygge. I takt med, at der opnås skala og læringseffekt med teknologien, forventer mange, at teknologien selv på det nuværende teknologiske stade ville kunne konkurrere med konventionelt byggeri af standard byggeri, mens teknologien forventes at kunne overgå de konventionelle metoder ved opførelsen af bygninger med mere fri formgivning, hvis den nødvendige videreudvikling sker. Det gælder dog kun omkostningerne ved de 3D printede vægge, idet teknologien på det nuværende stade ikke foreløbigt har muliggjort, at de efterfølgende fag kunne opnå besparelser ved opførelse af bygninger med mere fri formgivning.

Researchen har også afsløret, at 3D print teknologien primært har været anvendt ved opførelsen af vægge, så betegnelsen en 3D printet bygning er i og for sig en stor overdrivelse. Skal teknologien virkelig være med til at reducere de samlede byggeomkostninger fremover, skal teknologien inddrages i byggeriet på langt flere områder, som alt andet lige først kan ske, når printerne udvikles til at kunne klare flere funktioner end blot print af beton vægge. Printerne skal kunne bidrage også med løsning af armeringsbehovet, og printerens funktion skal ikke begrænses til kun at være materialer (in casu beton), der kan printes (ekstruderes), men printer systemet skal kunne håndtere flere og andre materialer, der påføres bygningen på forskellig vis. Tilsvarende bør 3D print teknologien komme med løsninger relateret til fundamentet, dæk og tag.

Der er ydermere behov for, at flere dele af selve 3D print processen automatiseres. Det kræver stadig som minimum 2 mand at operere printer, samt blande og føde materialerne, men med mere udvikling kan begge disse erstattes og automatiseres. Materialeblanding findes allerede som halvautomatiske løsninger, så det eneste der mangler, er en digitalisering af denne process, så printer og fødningsmekanisme kan tale sammen. Printeroperatøren er noget sværere at afløse, og vil sandsynligvis også i de kommende år være en aktiv del af byggeprocessen.

Partnerskabets research og tests har ydermere vist, at betydningen af materialer og materialehåndtering ikke må undervurderes. På sin vis er dette præcis lige så vigtigt som selve printer. Printeren er populært sagt "hardwaren", mens materialerne er "softwaren", og det er samspillet mellem disse, der kommer til at afgøre teknologiens konkurrenceevne.

Partnerskabets research har påvist, at beton er det hyppigst anvendte materiale og der er som sådan også gode grunde til dette. Når beton skal 3D printes viser de udenlandske recepter, samt tests udført af partnerskabet, at der skal anvendes relativt mere cement end ved konventionel støbning. Ikke for at betonen kan få en bestemt styrke, for det er relativt uproblematisk at opnå de nødvendige styrker også med

3D printet beton, men for at binde betonen tilstrækkeligt sammen, så den kan anvendes med 3D printning. Der ud over påviste de udførte tests, samt opførelsen af The BOD, at bl.a. svindrevner kan undgås ved anvendelse af polyesterfibre/crackstop, samt at flydningen af materialet kan styres ved brug af plastificider.

Om end det er påvist, at microsilika og flyveakse delvist kan reducere behovet for cement, så er der behov for videreudvikling på dette område, idet den store andel af cement ikke er ønskværdig ud fra et miljømæssigt perspektiv. Der er således behov for en binder, der ikke nødvendigvis giver betonen mere styrke, men på samme måde som cement er i stand til holde betonen sammen, så der kan printes videre på de først udlagte lag. Da materialeforbruget ved 3D printet byggeri generelt er mindre end ved støbning gælder fra et miljømæssigt perspektiv, at den relativt høje andel af cement i betonen opvejes af, at der totalt kan anvendes mindre beton.

Partnerskabets research har yderligere påvist, at der kan anvendes flere genbrugsmaterialer, når der benyttes 3D print, end der i dag typisk anvendes ved konventionel støbning. Partnerskabets tests og opførelsen af The BOD påviste, at genbrugstegl kan anvendes, og tilsvarende påviste tests, at genbrugsbeton ligeledes kunne anvendes. For begge materials vedkommende var det dog ikke helt uproblematisk, og bl.a. er det vigtigt med ensartethed af de anvendte materialer, samt at disse skal være i så rene fraktioner som muligt, idet det ellers er svært at styre printningen. Til gengæld kunne genbrugsgips, bundslagge (men måske godt anden slagge) og grove fibre fra knuste vindmøller ikke anvendes, ligesom værdien af at tilføre betonen knust Rockwool affald blev vurderet som værende tvivlsom.

Partnerskabet har samlet opnået så meget viden om 3D printet byggeri, der er blevet stillet til gratis rådighed for byggebranchen generelt, at Danmark nu ikke længere kan siges at være bagud på området, men er blandt de førende. Dette forhold ses bl.a. af, at næsten 50% af tilhørerne på den sidste af partnerskabets konferencer faktisk var udlændige, der havde rejst hertil for at få del i den erhvervede viden.

Tilsvarende ses det forhold, at det lykkedes at opføre den første 3D printede bygning i Europa her i Danmark, af partnerskabsdeltageren 3D Printhuset, at Danmark er kommet rigtig langt. Partnerskabet og 3D Printhuset efterspørges nu selv som eksperter og talere ved byggekonferencer i udlandet, og 3D Printhuset er i tillæg efter opfordring fra potentielle kunder begyndt at omsætte den opnåede viden til kommercielle produkter, der nu tilbydes markedet i form af en opdateret version af den printer, som 3D Printhuset bruger til opførelsen af The BOD med.

Kommercialiseringen af dette område er således nu også i gang med Danmark som deltager. I takt med at der investeres og forskes yderligere i området, samt i takt med at de store anerkendte arkitektfirmaer får øjnene op for teknologien og medvirker til, at den mere frie formgivning, der tidligere var forbeholdt helt unikke byggerier, nu med teknologien og dens potentiale for at reducere omkostningerne, gøres mere bredt tilgængelig, vil Danmark med den rigtige understøtning, herunder økonomisk, stå rigtig godt rustet for at deltage i, præge og få fordel af denne udvikling.

3D print indenfor byggeri forudsiges at kunne opnå et betragteligt marked, især indenfor bygninger med organiske former. Det er der ikke mange, der er uenige i og de store konventionelle virksomheder er også begyndt tro på det. Der er behov for mere forskning og udvikling indenfor området, og med den rigtige understøtning af udviklingen og teknologien har Danmark mulighed for at opnå en afgørende førerposition på et fremtidigt meget stort marked. Partnerskabet opfordrer hermed til, at dette sker.

## Appendix

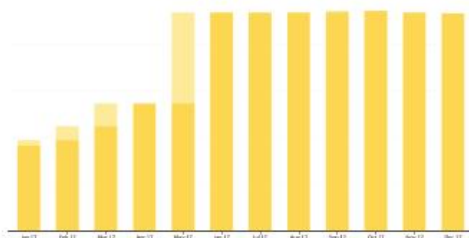
### Appendix 1: Opsummering af formidlingsaktivitet

# OPSUMMERING AF FORMIDLINGS AKTIVITET FOR PARTNERSKABET FOR 3D PRINTET BYGGERI

Pr. 31/12-2017

## NYHEDSBREVE

Samlet antal tilmeldte: **519**  
Samlet antal sendte nyhedsbreve: **10**



November, 2017 (2)

|  |                                                                                                                                     |             |                       |                        |
|--|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|
|  | <b>2. Konference #3</b><br>Regular - Nyhedsbrev indsamlet på landingpage<br>Sent Tue, November 28th, 2017 1:24 PM to 233 recipients | <b>Sent</b> | <b>47.0%</b><br>Opens | <b>17.0%</b><br>Clicks |
|  | <b>2. Konference #2</b><br>Regular - Nyhedsbrev indsamlet på landingpage<br>Sent Fri, November 17th, 2017 1:37 PM to 234 recipients | <b>Sent</b> | <b>37.1%</b><br>Opens | <b>16.8%</b><br>Clicks |

Oktober, 2017 (1)

|  |                                                                                                                                    |             |                       |                        |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|
|  | <b>2. Konference #1</b><br>Regular - Nyhedsbrev indsamlet på landingpage<br>Sent Thu, October 26th, 2017 1:58 PM to 235 recipients | <b>Sent</b> | <b>47.6%</b><br>Opens | <b>23.8%</b><br>Clicks |
|--|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------|------------------------|

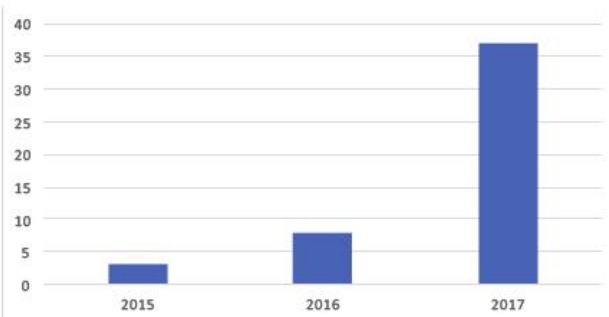
## ONLINE ARTIKLER

Antal artikler hvor "Partnerskabet for 3D Printet Byggeri" indgår:

- For hele projekt perioden: **23**

Antal artikler hvor "3D printet byggeri" er nævnt (2015-2017):

- 2015: **3**
- 2016: **8**
- 2017: **37**



## 3D printet byggeri og cirkulær økonomi

Erik Krogh Lauritzen 12. sep 2017 kl. 09:54



Partnerskabet 3D Printet Byggeri, bestående af 3D Printhuset A/S, NCC Construction Danmark A/S, Force Technology og Gips Recycling Danmark A/S, præsenterede d. 11. september 2017 3D print af betonfundament til en lille kontorbygning i Københavns Nordhavn. Det blev klart for enhver, at 3D print teknologi kan bruges til betonbygning. Selv om der var tale om støbning af miniature dimensioner skal der ikke megen fantasi til forestilling om mulighederne for 3D printing af større betonkonstruktioner. Nærmere oplysninger kan hentes på <https://3dprinthuset.dk/europas-første-3d-printede-bygning/>

## Europas første 3D-printede hus bliver bygget i København

Bygningen er den første 3D-printede bygning, som lever op til det europæiske byggekodex.

## 3D Printet byggeri for første gang i Danmark

I Spanien blev der i sidste måned 3D printet for første gang i Europa. Den første 3D printede bygning var en lille kontorbygning i København. Bygningen blev bygget af 3D Printet Byggeri, som er et samarbejde mellem NCC Construction Danmark, Force Technology og Gips Recycling Danmark.



Automatisk 3D Printet byggeri er ideelt på vej frem i udlandet. Økono-

Et forskningsprojekt finansieret af Danmarks Forskningsråd, hvor 3D af de første 3D printede bygninger i udlandet har været meget succesfuld, og det har vist sig, at 3D printet byggeri er et meget effektivt og økonomisk alternativ til traditionel bygning. Bygningen blev bygget af 3D Printet Byggeri, som er et samarbejde mellem NCC Construction Danmark, Force Technology og Gips Recycling Danmark.

Derfor sætter Partnerskabet for 3D Printet Byggeri nu fokus på de nye muligheder og arbejder på at få bygningen færdig i slutningen af 2017. Bygningen vil være den første 3D printede bygning i Danmark.

## 3D print konference blev et tilfældigt stykke

afholdt i NCC i København 11. sep 2017 kl. 14:48



Mere end 150 deltagere fra 70 forskellige virksomheder deltog i Skandinaviens første konference om 3D printet byggeri.

3D Printet Byggeri afholdt i samarbejde med NCC i København 11. september 2017. Konferencen var den første af sin art i Skandinavien og havde til formål at bringe 3D printet byggeri og cirkulær økonomi tættere på de danske virksomheder. Konferencen var en succes og blev afholdt i NCC i København.

3D Printet Byggeri afholdt i samarbejde med NCC i København 11. september 2017. Konferencen var den første af sin art i Skandinavien og havde til formål at bringe 3D printet byggeri og cirkulær økonomi tættere på de danske virksomheder. Konferencen var en succes og blev afholdt i NCC i København.



## KONFERENCER

### Partnerskabets konferencer:

- 1. Konference (28-2-17):  
· Antal tilmeldte: **160**
- 2. Konference (30-11-17):  
· Antal tilmeldte: **213**

### Andres konferencer:

- Dansk Byggeri årsdag (27-4-2017):  
· Antal tilmeldte: **645**
- Nordic BIM Academy (4-11-2016):  
· Antal deltagere: **130**

I alt tilmeldte konferencer hvor 3DPB har været på dagsordenen: **1.148**



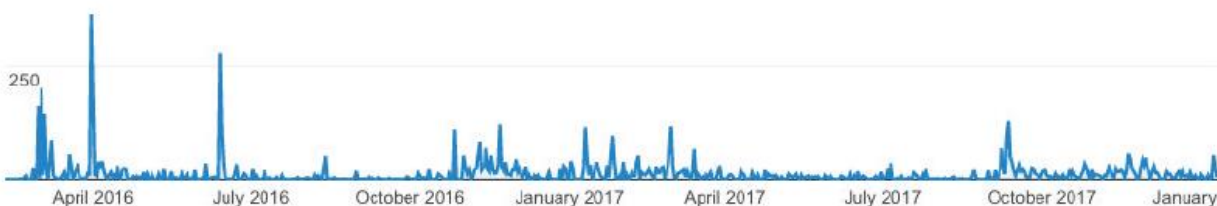
## WEBSITE STATISTIK FOR VIDENSPORTAL

Samlet antal besøgende: **3.286**

Top 3 mest læste sider:

1. Hvad er 3D printet byggeri
2. Nyheder
3. Projektbeskrivelse

| Page                                |  | Pageviews | % Pageviews |
|-------------------------------------|--|-----------|-------------|
| 1. /                                |  | 3,087     | 35.39%      |
| 2. /hvad-er-3d-printet-byggeri.html |  | 967       | 11.08%      |
| 3. /nyheder.html                    |  | 517       | 5.93%       |
| 4. /projektbeskrivelse.html         |  | 484       | 5.55%       |
| 5. /konferencer.html                |  | 423       | 4.85%       |
| 6. /kontakt.html                    |  | 418       | 4.79%       |
| 7. /sharebutton.to                  |  | 383       | 4.39%       |
| 8. /partnerskabet.html              |  | 375       | 4.30%       |
| 9. /forretningsmuligheder.html      |  | 346       | 3.97%       |



## VIDEO STATISTIK - YOUTUBE

Antal videoer: 18

Samlet antal views: 14.384

### Gender

#### Views



## LINKEDIN STATISTIK - INDHOLD

Samlet antal likes: 453

Samlet antal views: 40.152



**Asger Dath**

Communications Manager, Founding Partner at 3D Printhuset A/S  
Limo

Torsdag afholdte vi den hidtil største konference indenfor 3D Printet Byggeri, i samarbejde med IDA, NCC og FORCE.

...see more



54 Likes

Like Comment Share

2,524 views of your post in the feed

35 people from Rambøll viewed your post

|                                       |    |
|---------------------------------------|----|
| 3D Printhuset A/S                     | 3  |
| Holtenberg                            | 10 |
| Nave Nordisk                          | 13 |
| DTU - Technical University of Denmark | 11 |



100 people who have the title Salesperson viewed your post

|                  |    |
|------------------|----|
| Student / Intern | 67 |
| Project Manager  | 14 |
| Consultant       | 14 |
| Founder          | 46 |



Your biggest audience is from Copenhagen Area, Capital Region, Denmark

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Central Region, Denmark                    | 140 |
| Northern Region, Denmark                   | 69  |
| Southern Region, South Zealand, ST Denmark | 57  |
| Sealand Region, Denmark                    | 45  |

**3D Printhuset A/S**  
3mo

3D Printet Byggeri - Gratis konference d. 30. november.

Verdens førende virksomheder indenfor 3D printet byggeri vil d. 30. november 2017 komme og dele ud af deres erfaringer og visioner.

Vil du på forkant med en teknologi der er på vej til at ændre hvordan vi bygger, så kom bl.a. og hør Kinesiske Winsun der opførte "Office of the Future" i Dubai med 3D printet beton, og mange andre.

Konferencen afholdes af Partnerskabet for 3D Printet Byggeri i samarbejde med IDA Byg

Tilmeld:

<https://lnkd.in/eyJYsPm>

Programmet:

<https://lnkd.in/esEBzCr>



19 Likes

Like Comment

### Organic Reach

Targeted to: All followers

4,311  
Impressions  
26  
Social Actions

1.93%  
Engagement

57  
Clicks

Hide stats ^



## Appendix 2 – Oversigt over besøg, besøgsrapport og profilbeskrivelser

| Gennemførte besøg, udarbejdede besøgsrapporter og profilbeskrivelser |                                                  |                         |               |                   |
|----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------|-------------------------|---------------|-------------------|
|                                                                      | Firma / institution                              | By / land               | Besøgsrapport | Profilbeskrivelse |
| 1                                                                    | Alex Le Roux                                     | Houston                 | %             | %                 |
| 2                                                                    | Ambercon element fabrik                          | Ålborg                  | %             | %                 |
| 3                                                                    | Apis Cor                                         | Moskva                  | X             | X                 |
| 4                                                                    | Berkeley University (Coll. Environmental Design) | San Fransisco, USA      | %             | %                 |
| 5                                                                    | Betabram                                         | Slovenien               | X             | X                 |
| 6                                                                    | Branch Technology                                | Tennessee, USA          | %             | X                 |
| 7                                                                    | Cazza                                            | Dubai                   | %             | X                 |
| 8                                                                    | Contour Crafting (LA)                            | Los Angeles, USA        | %             | X                 |
| 9                                                                    | Cybe                                             | Holland, Den Bosch      | %             | X                 |
| 10                                                                   | D-shape                                          | Pisa, Italien           | X             | X                 |
| 11                                                                   | DUS Architects                                   | Holland, Amsterdam      | %             | %                 |
| 12                                                                   | Eindhoven Tekniske Universitet                   | Eindhoven, Holland      | %             | X                 |
| 13                                                                   | Emerging Objects                                 | San Fransisco, USA      | %             | %                 |
| 14                                                                   | Fimatec                                          | Finland                 | %             | %                 |
| 15                                                                   | G. Tecz Engineering (cement specialister)        | Kassel, Tyskland        | %             | %                 |
| 16                                                                   | Hotel suite Manilla (Andrey Rudenko projekt)     | Fillippinerne           | %             | %                 |
| 17                                                                   | Janjaap Ruisjesenaars / BAM (D-Shape)            | Holland, Amsterdam      | %             | %                 |
| 18                                                                   | Joris Laarman Lab (Mataerial) (epoxy / MX3D)     | Holland, Amsterdam      | %             | %                 |
| 19                                                                   | Kanal House                                      | Holland, Amsterdam Nord | %             | %                 |
| 20                                                                   | Lille Tekniske Universitet                       | Lille, Frankrig         | %             | %                 |
| 21                                                                   | Loughborough                                     | England                 | X             | X                 |
| 22                                                                   | Lund Teknisk Universitet                         | Lund, Sverige           | %             | %                 |
| 23                                                                   | Mini-builders/IAAC                               | Barcelona, Spanien      | X             | X                 |
| 24                                                                   | MIT                                              | Boston, USA             | %             | X                 |
| 25                                                                   | MX3D                                             | Holland, Amsterdam Nord | %             | %                 |
| 26                                                                   | Nantes Universitet                               | Nantes, Frankrig        | X             | X                 |
| 27                                                                   | Oak Ridge National Lab. Research Center          | Tennessee, USA          | %             | %                 |
| 28                                                                   | Pixelstone                                       | Holland, Rotterdam      | %             | %                 |
| 29                                                                   | Pylos/IAAC                                       | Barcelona, Spanien      | X             | X                 |
| 30                                                                   | Qindao Unique                                    | Qindao, Kina            | %             | %                 |
| 31                                                                   | RUC, Roskilde Universitet                        | Roskilde                | %             | %                 |
| 32                                                                   | Singapore 3D Center                              | Singapore               | %             | %                 |
| 33                                                                   | Specavia                                         | Yaroslavl, Rusland      | %             | %                 |
| 34                                                                   | Total Kustom/Rudenko (USA)                       | Minneapolis, USA        | X             | X                 |
| 35                                                                   | Umeå Teknisk Universitet                         | Umeå, Sverige           | X             | X                 |
| 36                                                                   | WASP                                             | Bologna, Italien        | X             | X                 |
| 37                                                                   | Winsun                                           | Shanghai, Kina          | X             | X                 |
| 38                                                                   | Xtreee                                           | Paris, Frankrig         | X             | X                 |
|                                                                      |                                                  |                         | 12            | 18                |



Appendix 3 udenlandske recepter på 3D printet materiale

| Mlx design              | Bulk Composition |            |             |           |           |         |           |                     |          |               |           | Reinforcement | Performance | Economical evaluation | Performance evaluation |          |           |               |          |          |                                      |                                                                                                         |                                                                                                                                                                 |
|-------------------------|------------------|------------|-------------|-----------|-----------|---------|-----------|---------------------|----------|---------------|-----------|---------------|-------------|-----------------------|------------------------|----------|-----------|---------------|----------|----------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                         | Cement           |            |             |           |           | Puzolon |           | Water total (W/C+P) |          | Super plaster |           |               |             |                       |                        | retarder |           |               |          |          |                                      |                                                                                                         |                                                                                                                                                                 |
| Receipt                 | Aggregat 1       | Aggregat 2 | Sand        | Type      | kg        | Type    | kg        | Type                | kg       | kg            | kg        | ratio         | kg/m³       | Type                  | kg                     | Type     | kg        | Type          | kg       | Total kg | Estimated compressive strength (Mpa) | Test                                                                                                    |                                                                                                                                                                 |
| Loughborough University | 00kg/00%         | 00kg/00%   | 1.215kg/54% | n/a       | 567kg/25% | fly ash | 162kg/07% | micro silica        | 81kg/04% | 00kg/00%      | 225kg/10% | 0.278         | 2.250       | 567                   | 088kg/00%/n/a          | 04kg/00% | 00kg/00%  | ppp           | 01kg/00% | 2263.35  | 107                                  | The mix is extremely expensive due to the high cement content. Not feasible for ordinary constructions. | extremely high strength, but severe cracking problems due to the fine-grained mix design and high cement ratio. The high theoretical strength of the mix is not |
|                         | 15kg/01%         | 912kg/41%  | 228kg/10%   | basement  | 659kg/30% | fly ash | 87kg/04%  | micro silica        | 83kg/04% | 00kg/00%      | 228kg/10% | 0.275         | 2.197       | 659                   | 088kg/00%/standard 532 | 03kg/00% | 00kg/00%  | pp crack stop | 01kg/00% | 2224.80  | 85-100                               | Do                                                                                                      |                                                                                                                                                                 |
| KEIMA                   | 00kg/00%         | 00kg/00%   | 1.800kg/80% | cement    | 450kg/20% |         |           |                     |          | 00kg/00%      | 00kg/00%  | 00kg/00%      |             | 450                   | 00kg/00%               | 00kg/00% | 00kg/00%  |               | 00kg/00% | 2250.00  |                                      | The product is used for injection of cracks. It has a high cement content and is therefore expensive    | The material will most likely work due to its pumpability, but it will most likely be very prone to crack in thick layers.                                      |
| Weber 3D beton          |                  |            |             |           |           |         |           |                     |          |               |           |               |             |                       |                        |          |           |               |          |          |                                      | Do                                                                                                      |                                                                                                                                                                 |
| Loughborough U Mix 1    |                  |            |             | cemt 52.5 |           |         |           | micro silica        |          |               |           | 0.279         | 2.300       | 376                   |                        |          |           |               |          |          | 50-70                                | expensive                                                                                               | To harsh.                                                                                                                                                       |
| Loughborough U Mix 2    |                  |            |             | cemt 52.5 |           |         |           | micro silica        |          |               |           | 0.279         | 2.300       | 446                   |                        |          |           |               |          |          | 60-80                                | expensive                                                                                               | To harsh.                                                                                                                                                       |
| Loughborough U Mix 3    |                  |            |             | cemt 52.5 |           |         |           | micro silica        |          |               |           | 0.280         | 2.300       | 513                   |                        |          |           | pp 12/0.18mm  |          |          | 80-100                               | expensive                                                                                               | slightly harsh                                                                                                                                                  |
| Loughborough U Mix 4    |                  |            |             | cemt 52.5 |           |         |           | micro silica        |          |               |           | 0.281         | 2.300       | 579                   |                        |          |           | pp 12/0.18mm  |          |          | 110                                  | expensive                                                                                               | good performance                                                                                                                                                |
| Loughborough U Mix 5    |                  |            |             | cemt 52.5 |           |         |           | micro silica        |          |               |           | 0.280         | 2.300       | 643                   |                        |          |           | pp 12/0.18mm  |          |          | 110                                  | expensive                                                                                               | Too plastic, slumps                                                                                                                                             |
| Pyllos                  |                  |            |             |           |           |         |           |                     |          |               |           |               |             |                       |                        |          |           |               |          |          | 25-40                                | cheap, eco friendly.                                                                                    | not suited for exposed structures. Will most likely have good adhesion properties due to the clay.                                                              |
| Sika shotcrete          | 00kg/00%         | 00kg/00%   | 1.300kg/72% | cemt 52.5 | 472kg/26% |         |           |                     | 00kg/00% | 00kg/00%      | 00kg/00%  |               | 1.800       |                       | 00kg/00%               | 00kg/00% | 64kg/100% | 00kg/00%      | 00kg/00% | 1810.00  | 64.00                                | acceptable                                                                                              | Will most likely be too harsh due to the coarse aggregate (4.8 mm)                                                                                              |



## Appendix 4 Forsøgsresultater udviklede recepter med genbrugsmaterialer til 3D printet beton

| Test 1) Beton fremstillet af cement + flyveaske + microsilika + tegl                                                                                                                                                                                                                                                                          |                           |                            |          |        |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|--------|
| Materiale                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Vægt<br>Kg/m <sup>3</sup> | Volumenandel,<br>sum liter | Pulver % | Vægt % |
| Cement, basis                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 400                       | 127                        | 82       | 24     |
| FA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 75                        | 160                        | 15       | 4      |
| MS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 15                        | 166                        | 3        | 1      |
| Vand                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 196                       | 362                        |          | 12     |
| Luft %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 5                         | 412                        |          | 0      |
| Sand: Ovntør 0-2 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 473                       | 618                        |          | 28     |
| Tegl: Knust 0-4 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 534                       | 1000                       |          | 32     |
| Densitet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 1693                      |                            |          |        |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | <b>62</b>                 |                            |          |        |
| <b>Initial set, min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | <b>15</b>                 |                            |          |        |
| <p><b>Konklusion:</b></p> <p>Formstabil, og ekstruderbar.</p> <p>Kombinationen af en grundmatrix på ca. 40 % med filler fraktionen giver en formstabil og plastisk struktur, som samtidigt besidder thixotropiske egenskaber</p> <p>Umiddelbart vurderes flyveaske, microsilika og tegl at kunne anvendes i recepter for 3D printet beton</p> |                           |                            |          |        |
|                                                                                                                                                                                                                                                            |                           |                            |          |        |

| <b>Test 2) Beton fremstillet af cement + ren tegl + uren tegl</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                  |                                    |                 |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Materiale</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | <b>Vægt<br/>Kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Volumenandel,<br/>sum liter</b> | <b>Pulver %</b> | <b>Vægt %</b> |
| Cement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 400                              | 127                                | 100             | 26            |
| Vand                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 160                              | 287                                |                 | 10            |
| Luft %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 10                               | 387                                |                 | 0             |
| Sand: Ovntørret 0-2 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 282                              | 510                                |                 | 18            |
| Tegl (relativt ren fraktion, NCC 0-4 mm med filler)                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 429                              | 816                                |                 | 28            |
| Tegl (Uren fraktion, NCC 0-4 mm med mørtel rester                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 257                              | 1000                               |                 | 17            |
| <b>Densitet</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 1529                             |                                    |                 |               |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | 36                               |                                    |                 |               |
| <b>Initial set min.</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 20                               |                                    |                 |               |
| <p><b>Konklusion:</b></p> <p>Meget formstabil, men printeren kunne ikke håndtere variationen i størrelsen af den knuste tegl. Grundet højt indhold af finstof, var det nødvendigt at øge vandtilsætning og super plast til 1,5 % af pulvervægt for at danne en plastisk konsistens.</p> <p>Højt indhold af knust tegl gør reologien uforudsigelig.</p> <p>Tegl forekommer stadig at være brugbar, mens det ukendte og varierende indhold i fraktionen uren tegl fraktion gør denne mindre anvendelig</p> |                                  |                                    |                 |               |

| <b>Test 3) Beton fremstillet af cement plus ren tegl</b>                                                                                                                                                                   |                                  |                                    |                 |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Materiale</b>                                                                                                                                                                                                           | <b>Vægt<br/>Kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Volumenandel,<br/>sum liter</b> | <b>Pulver %</b> | <b>Vægt %</b> |
| Cement                                                                                                                                                                                                                     | 400                              | 127                                | 100             | 23            |
| vand                                                                                                                                                                                                                       | 180                              | 307                                |                 | 10            |
| Luft %                                                                                                                                                                                                                     | 5                                | 357                                |                 | 0             |
| Sand: Ovntørret 0-2 mm                                                                                                                                                                                                     | 739                              | 678                                |                 | 42            |
| Tegl (relativt ren fraktion, ncc 0-4 mm med filler                                                                                                                                                                         | 450                              | 1000                               |                 | 25            |
| Densitet                                                                                                                                                                                                                   | 1770                             |                                    |                 |               |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                                                                                                  | 43                               |                                    |                 |               |
| <b>Initial set, min</b>                                                                                                                                                                                                    | 20                               |                                    |                 |               |
| <p><b>Konklusion:</b></p> <p>Blandingen er stabil og printbar. Indholdet af genbrugstegl er relativt lavt, hvilket bidrager til en mere stabil blanding.</p> <p>Testen bekræfter potentialet ved brug af genbrugstegl.</p> |                                  |                                    |                 |               |

| Test 4) beton fremstillet af cement + ren tegl + knust glasfiber |                           |                            |          |        |
|------------------------------------------------------------------|---------------------------|----------------------------|----------|--------|
| Materiale                                                        | Vægt<br>Kg/m <sup>3</sup> | Volumenandel,<br>sum liter | Pulver % | Vægt % |
| Cement                                                           | 400                       | 127                        | 100      | 22     |
| Vand                                                             | 200                       | 327                        |          | 11     |
| Luft                                                             | 5                         | 377                        |          | 0      |
| Sand: ovntør 0-2 mm                                              | 860                       | 751                        |          | 48     |
| Tegl: NCC ren fraktion 0-4 mm en del finstof                     | 349                       | 1000                       |          | 19     |
| Densitet                                                         | 1809                      |                            |          |        |
| fiber: Genvind knust glasfiber 0- 50 mm, uren                    | 36                        |                            |          |        |
| Styrke 14 døgn MPa                                               | Ikke testet               |                            |          |        |

**Konklusion:**

Umulig at blande og ekstrudere grundet stive fibre og tendens til at dannelse af fuglereder. Ikke muligt at anvende vindmølle fibrene til 3D printet beton.

| <b>Test 5) Beton fremstillet af cement + genbrugsbeton</b>                                                                                                                                                                                                              |                                  |                                    |                 |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Materiale</b>                                                                                                                                                                                                                                                        | <b>Vægt<br/>Kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Volumenandel,<br/>sum liter</b> | <b>Pulver %</b> | <b>Vægt %</b> |
| Cement                                                                                                                                                                                                                                                                  | 350                              | 111                                | 100             | 19            |
| Vand                                                                                                                                                                                                                                                                    | 165                              | 276                                |                 | 9             |
| Luft %                                                                                                                                                                                                                                                                  | 5                                | 326                                |                 | 0             |
| sand: ovntør 0-2 mm                                                                                                                                                                                                                                                     | 465                              | 528                                |                 | 25            |
| Beton: Genbrug: 0-4 mm uren                                                                                                                                                                                                                                             | 897                              | 1000                               |                 | 48            |
| Densitet                                                                                                                                                                                                                                                                | 1877                             |                                    |                 |               |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                                                                                                                                               | 29                               |                                    |                 |               |
| <b>Initial set, min</b>                                                                                                                                                                                                                                                 | 20                               |                                    |                 |               |
| <p><b>Konklusion:</b></p> <p>Knust beton prøve fremstår uren, med mange overkorn og en del filler. Høj absorption med behov for øget plast tilsætning.</p> <p>Formstabil, men ikke printbar i tilgængelig printer/pumpe. Teoretisk mulig med robust printerkoncept.</p> |                                  |                                    |                 |               |



| <b>Test 6) Beton fremstillet af cement + bundslagge</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                  |                                    |                 |               |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Materiale</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | <b>Vægt<br/>Kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Volumenandel,<br/>sum liter</b> | <b>Pulver %</b> | <b>Vægt %</b> |
| Cement                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 400                              | 127                                | 100             | 23            |
| Vand                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 180                              | 307                                |                 | 11            |
| Luft %                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 10                               | 407                                |                 | 0             |
| Sand: ovntør 0-2 mm                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 818                              | 763                                |                 | 48            |
| slagge: Bundslagge, 0-5 mm<br>uren, rest koks                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 308                              | 1000                               |                 | 18            |
| Densitet                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 1706                             |                                    |                 |               |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 29                               |                                    |                 |               |
| <b>Initial set, min</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 25                               |                                    |                 |               |
| <p><b>Konklusion:</b></p> <p>Blandningen er stabil. Kan genudlægges efter 15 minutter. Blandingen kunne ikke printes i forsøgsprinter grundet overkorn, som blokerede føder. Kornform er meget uensartet.</p> <p>Det er muligt at knust og homogeniseret bundslagge kunne anvendes, hvis man samtidig fjerner restkoks. Ikke umiddelbar brugbar recept til 3D printet beton</p> |                                  |                                    |                 |               |

| <b>Test 7) Beton fremstillet af cement + flyveaske + bundslagge</b>                                                                                                                                                                                            |                                  |                                    |                 |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Materiale</b>                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Vægt<br/>Kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Volumenandel,<br/>sum liter</b> | <b>Pulver %</b> | <b>Vægt %</b> |
| Cement                                                                                                                                                                                                                                                         | 370                              | 117                                | 88              | 21            |
| FA                                                                                                                                                                                                                                                             | 50                               | 139                                | 12              | 3             |
| Vand                                                                                                                                                                                                                                                           | 168                              | 307                                |                 | 10            |
| Luft %                                                                                                                                                                                                                                                         | 5                                | 357                                |                 | 0             |
| Sand: ovntør 0-2 mm                                                                                                                                                                                                                                            | 739                              | 679                                |                 | 42            |
| Slagge: Bundslagge uren,<br>overkorn                                                                                                                                                                                                                           | 418                              | 1000                               |                 | 24            |
| Densitet                                                                                                                                                                                                                                                       | 1745                             |                                    |                 |               |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                                                                                                                                      | 43                               |                                    |                 |               |
| <b>Initial set, min</b>                                                                                                                                                                                                                                        | 25                               |                                    |                 |               |
| <p><b>Konklusion:</b></p> <p>Formstabil, grundet relativt grove og kantede bundslaggekorn. Sæt tid er forlænget grundet tilsætning af flyveaske. Stiv reologi men kan ekstruderes i robust system. Skal tilsættes accelerator for at fremskynde afbinding.</p> |                                  |                                    |                 |               |
|                                                                                                                                                                             |                                  |                                    |                 |               |

| <b>Test 8) Beton fremstillet af cement + rockwoolstøv</b>                                                                                 |                                  |                                    |                 |               |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-----------------|---------------|
| <b>Materiale</b>                                                                                                                          | <b>Vægt<br/>Kg/m<sup>3</sup></b> | <b>Volumenandel,<br/>sum liter</b> | <b>Pulver %</b> | <b>Vægt %</b> |
| cement                                                                                                                                    | 400                              | 127                                | 84              | 20            |
| Fa                                                                                                                                        | 75                               | 160                                | 16              | 4             |
| Vand                                                                                                                                      | 190                              | 350                                |                 | 9             |
| Luft                                                                                                                                      | 5                                | 400                                |                 | 0             |
| sand: ovntør 0-2 mm                                                                                                                       | 1381                             | 1000                               |                 | 67            |
| Densitet                                                                                                                                  | 2046                             |                                    |                 |               |
| <b>Styrke 14 døgn MPa</b>                                                                                                                 | 43                               |                                    |                 |               |
| <b>Initial set, min</b>                                                                                                                   | 15                               |                                    |                 |               |
| Fiber: knust rockwool, NCC<br>næsten støv uren                                                                                            | 31                               |                                    |                 |               |
| Sej og formstabil, set inden for 15 min. Kunne ikke ekstruderes i forsøgsprinter.                                                         |                                  |                                    |                 |               |
| Knust rockwool bidrager til at gøre blandingen formstabil. Det er tvivlsomt, om det bidrager til fiberforstærkning/svind revne reduktion. |                                  |                                    |                 |               |

## Appendix 5 – Kategoriseringssystem og forklaring på termologi anvendt i kategoriseringssystem

### Categorisation system, used to describe each 3D construction printing project

#### A) Company, project & development stage info

|                                           |                                                |                   |                        |                   |                          |                           |                           |                          |                   |                   |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------|-------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------|-------------------|
| Company, project & development stage info | Year of establishment                          | 2014              |                        |                   |                          |                           |                           |                          |                   |                   |
|                                           | Year of entering into construction 3D-Printing | 2014              |                        |                   |                          |                           |                           |                          |                   |                   |
|                                           | Number of employees                            | Less than 10      | Less than 25           | Less than 50      | Less than 100            | Less than 500             | Less than 1000            | More than 1000           | Unknown/Undefined |                   |
|                                           | Targeted market                                | Printers          | Printer parts          | Materials         | Furniture/Sculptures     | Building components       | Building projects         | Other                    | Unknown/Undefined |                   |
|                                           | Development stage of printers                  | Conceptual        | Prototypes             | Working products  | Commercial products      | Other                     | Unknown/Undefined         |                          |                   |                   |
|                                           | Development stage of printed materials         | Conceptual        | Prototypes/Test prints | Usable products   | Commercial products      | Other                     | Unknown/Undefined         |                          |                   |                   |
|                                           | Patent(s) status                               | Not patented      | Patent pending         | Patent granted    | Other                    | Unknown/Undefined         |                           |                          |                   |                   |
|                                           | Patent coverage                                | Printer design    | Printing technology    | Material          | Nozzle/Deposition system | Material feeding system   | Movement system           | Software/Firmware        | Other             | Unknown/Undefined |
|                                           | Largest print up to date (size)                | Less than 1m3     | Less than 5m3          | Less than 10m3    | Less than 25m3           | Less than 50m3            | Less than 100m3           | More than 100m3          | Unknown/Undefined |                   |
|                                           | Largest print up to date (category)            | Minor test prints | Furniture/Sculptures   | Building elements | Less than 50m2 buildings | Less than 100m2 buildings | More than 100m2 buildings | Multiple storey building | Other             | Unknown/Undefined |

#### B) Technology type

|                 |                                        |                              |                                |                         |                        |                                    |                             |       |                   |  |
|-----------------|----------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|-------------------------|------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-------|-------------------|--|
| Technology type | Additive Manufacturing technology type | Material Extrusion (Layered) | Material Extrusion (Suspended) | Binder Jetting          | Other                  | Unknown/Undefined                  |                             |       |                   |  |
|                 | Form Freedom                           | 2D freedom                   | 2.5D freedom                   | 3D freedom              | Full 3D freedom        | Other                              | Unknown/Undefined           |       |                   |  |
|                 | Fabrication location                   | In situ                      | On-site prefabrication         | Off-site prefabrication | Partial prefabrication | Other                              | Unknown/Undefined           |       |                   |  |
|                 | Fabrication approach                   | Direct fabrication           | Semi-direct fabrication        | Component fabrication   | Formwork fabrication   | Stay-in-place formwork fabrication | Cover/Engulfing fabrication | Other | Unknown/Undefined |  |

### C) Printer characteristics

|                                 |                             |                    |                               |                           |                          |                           |                     |                   |                   |                   |
|---------------------------------|-----------------------------|--------------------|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| P<br>r<br>i<br>n<br>t<br>e<br>r | Movement system             | Cartesian gantry   | Delta gantry                  | Robotic arm               | Mobile robotic           | Cable suspension          | Other               | Unknown/Undefined |                   |                   |
|                                 | Maximum printable volume    | Less than 1m3      | Less than 5m3                 | Less than 10m3            | Less than 25m3           | Less than 50m3            | Less than 100m3     | More than 100m3   | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Maximum printable area      | Less than 1m2      | Less than 2m2                 | Less than 5m2             | Less than 10m2           | Less than 25m2            | Less than 50m2      | More than 50m2    | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Deposition method           | Jetting            | Pressure extrusion            | Mechanical extrusion      | Mechanical movement      | Gravity deposition        | Sintering/Welding   | Other             | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Number of print heads       | Single             | Multiple                      | Array                     | Other                    | Unknown/Undefined         |                     |                   |                   |                   |
|                                 | Print Head/ Nozzle diameter | Less than 1mm      | Less than 5mm                 | Less than 10mm            | Less than 25mm           | Less than 50mm            | Less than 100mm     | More than 100mm   | Unknown/Undefined |                   |
|                                 | Print head/ Nozzle features | Three axis motion  | Rotational/ Tangential motion | Omni-directional motion   | Troweling mechanism      | Other                     | Unknown/Undefined   |                   |                   |                   |
|                                 | Material feeding system     | Manual             | Included, semi-automated      | Included, fully automated | Separate, semi-automated | Separate, fully automated | Other               | Unknown/Undefined |                   |                   |
|                                 | Theoretical printing speed  | Less than 0.1m3/h  | Less than 0.5m3/h             | Less than 0.1m3/h         | Less than 2m3/h          | Less than 5m3/h           | Less than 10m3/h    | Less than 20m3/h  | More than 20m3/h  | Unknown/Undefined |
|                                 | Actual printing speed       | Less than 0.1m3/h  | Less than 0.3m3/h             | Less than 0.5m3/h         | Less than 1m3/h          | Less than 2m3/h           | Less than 5m3/h     | Less than 10m3/h  | More than 10m3/h  | Unknown/Undefined |
|                                 | Accuracy                    | Less than 5mm      | Less than 10mm                | Less than 50mm            | Less than 100mm          | More than 100mm           | Unknown/Undefined   |                   |                   |                   |
|                                 | Printer (dis)assembly speed | Less than 1 hour   | Less than 10 hours            | Less than 24 hours        | Less than 2 days         | More than 2 days          | Other               | Unknown/Undefined |                   |                   |
|                                 | Price per printer unit      | Less than 10.000\$ | Less than 50.000\$            | Less than 100.000\$       | Less than 250.000\$      | Less than 500.000\$       | More than 500.000\$ | Unknown/Undefined |                   |                   |

### D) Materials used

|                                      |                                             |                          |                         |                            |                           |                       |                             |                            |                     |                   |
|--------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|
| M<br>a<br>t<br>e<br>r<br>i<br>a<br>l | Material possibilities                      | Single material          | Multiple materials      | Structure/Support material | Other                     | Unknown/Undefined     |                             |                            |                     |                   |
|                                      | Material type                               | Traditional concrete     | Alternative concrete    | Clay                       | Soil                      | Plastic               | Metal                       | Resin                      | Other               | Unknown/Undefined |
|                                      | Price                                       | Less than 50\$/m3        | Less than 100\$/m3      | Less than 150\$/m3         | Less than 300\$/m3        | Less than 500\$/m3    | Less than 1000\$/m3         | Less than 2000\$/m3        | More than 2000\$/m3 | Unknown/Undefined |
|                                      | Compression strength                        | Less than 5MPa           | Less than 15MPa         | Less than 25MPa            | Less than 50MPa           | Less than 100MPa      | Less than 200MPa            | More than 200MPa           | Unknown/Undefined   |                   |
|                                      | Tensile strength                            | Less than 1MPa           | Less than 3MPa          | Less than 5MPa             | Less than 10MPa           | More than 10MPa       | Unknown/Undefined           |                            |                     |                   |
|                                      | Aggregate size                              | No aggregates (Paste)    | Up to 2mm (Fine mortar) | Up to 4mm (Rough mortar)   | Up to 6mm (Fine concrete) | Up to 16mm (Concrete) | Up to 40mm (Rough concrete) | Over 40mm (Rough concrete) | Other               | Unknown/Undefined |
|                                      | Aggregate weight (kg/m3)                    | Ultra lightweight (<500) | Lightweight (500-1000)  | Normal weight (1000-2000)  | Normal weight (1000-2000) | Heavyweight (>2000)   | Unknown/Undefined           |                            |                     |                   |
|                                      | Material verification                       | Conceptual               | Prototype               | Partially tested           | Extensively tested        | Certified             | Other                       | Unknown/Undefined          |                     |                   |
|                                      | Material hardening time                     | Less than 1 hour         | Less than 10 hours      | Less than 24 hours         | Less than 2 days          | Less than 5 days      | Less than 10 days           | More than 10 days          | Other               | Unknown/Undefined |
|                                      | Material usability time                     | Less than 15 minutes     | Less than 60 minutes    | Less than 2 hours          | Less than 5 hours         | Less than 10 hours    | More than 10 hours          | Other                      | Unknown/Undefined   |                   |
|                                      | Raw material price                          | Less than 50\$/m3        | Less than 100\$/m3      | Less than 150\$/m3         | Less than 300\$/m3        | Less than 500\$/m3    | Less than 1000\$/m3         | Less than 2000\$/m3        | More than 2000\$/m3 | Unknown/Undefined |
|                                      | Raw material availability (in construction) | Industry standard        | Extensively used        | Partially used             | Niche usage               | Not used              | Other                       | Unknown/Undefined          |                     |                   |



## Explanation to terms used in categorization system:

### A) Company, project & development

These categories focus on the company itself, and their current business model.

#### Year of establishment

The year the company was established.

#### Year of entering into construction 3D-Printing

The year the company entered into 3D printing related to construction.

#### Number of employees

Current number of employees of the company.

#### Targeted market

3D Printing within construction can be divided into various markets that a company can focus on. These include:

- **Printers** - The company manufactures 3d printers of a large scale in order to sell them.
- **Printer parts** – The company makes components for large scale printers.
- **Materials** – The company produces raw materials to be used by large scale 3d printers made by other companies.
- **Furniture/Sculptures** – The company has its own printers, and provides only the printing service for smaller objects, which can include furniture or sculptures.
- **Building components** – The company has its own printers, and provides printing services of larger building components (such as walls, floors, etc.) at the customer request. This can include whole buildings, but sliced into large components that need to be assembled on site.
- **Building projects** - The company is involved in constructing buildings partially or fully through 3D printing. The whole process of creating the structure of the building is performed by the company, which can also include the design part.

#### Development stage of printers

The current stage of development of the printer machine.

- **Conceptual** – The company has no working large scale 3d printer, but is limited only to conceptual designs.
- **Prototypes** – The company has one or more prototypes of the machine under construction. The machines are partially working or in need of crucial improvements.
- **Working products** – The company has one or more fully functional products. Their design and function is proven through several successful test prints.
- **Commercial products** – The company sells fully functional printers. This category is limited to companies that have already sold some of their printing machines.

#### Development stage of printed materials

The current development stage of the printed materials.

- **Conceptual** – No physical prints have been carried out up to date.
- **Prototypes / Test prints** – The material has only been printed a limited number of times, to prove the functioning of the printing machine.
- **Usable products** – The material has been printed several times, and its characteristics and behavior are known to the company. Various objects have been produced already.
- **Commercial products** – The printed material has been sold commercially by the company.

## Patent(s) status

The current status of all the patents that the company or its owner has:

- **Not patented** – The company does not own any patent related to its 3D Printing related products
- **Patent pending** – The company has filed one or more patent applications related to its 3D Printing related products
- **Patent granted** – The company owns one or more patents for its 3D Printing related products
- **Other** – There might a special situation that falls under this category, such as patents owned by another company, publicly owned patent, etc.

## Patent coverage

One or more patents can cover different aspect of the 3D Printing related products, such as:

- **Printer design** – The patent covers all the hardware and mechanics related to the printer
- **Printing technology** – The patent covers the mechanism with which the 3D Printed material is formed, creating a fundamentally new Additive Manufacturing category that stands on its own
- **Material** – The patent covers a new kind of material, combination of materials, or the way in which the materials are combined
- **Nozzle/Deposition system** – The patent covers the nozzle or print head, which has different, modified or additional features that make it different from the other technologies
- **Material feeding system** – The patent covers the way the material is transported, mixed or prepared in any other way, before being delivered to the printer head.
- **Movement system** – The patent covers part or all of the movement mechanics that are used to move the printer head around.
- **Software/Firmware** – The patent covers software used in any part of the 3D printing process, including design/modeling, pre-printing preparations, machine movement instructions/optimizations, etc.
- **Other** – All other aspects directly or indirectly related to 3D printing that a patent could cover, and not included above.

## Largest print up to date (by size)

The size of the largest printed part or building up to date expressed in cubic meters.

## Largest print up to date (by category)

The size of the largest prints that the company made, divided into categories according to their size.

- **Minor test prints** – The company has only printed some test prints on very small scale, up to 0.5m in each dimension, mostly for testing the material or proving the concept.

- **Furniture/Sculptures** – The company has printed elements of a scale of around  $1\text{m}^3$  (approx. 1m in each direction), such as furniture elements, sculptures and similar.
- **Building elements** – The company has successfully printed elements or parts of buildings.
- **Less than  $50\text{m}^2$  buildings** – The company has printed actual buildings with a  $50\text{m}^2$  or less footprint.
- **Less than  $100\text{m}^2$  buildings** - The company has printed actual buildings up to a  $100\text{m}^2$  footprint.
- **More than  $100\text{m}^2$  buildings** – The company has printed actual buildings with a footprint of more than  $100\text{m}^2$ .
- **Multiple storey buildings** - The company has printed buildings with 2 floors or more.

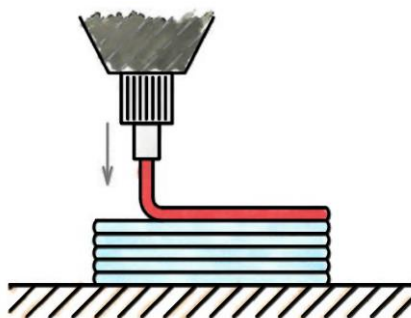
## B) Technology type

### Additive Manufacturing technology

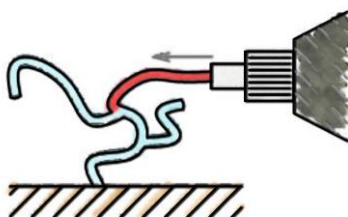
Additive Manufacturing, also known as 3D Printing, is a group of machine technologies that share the similar feature of adding material to create/manufacture objects. The process usually starts from a 3D model of the object that is sliced into layers. This data is then given to the machine, which is able to deposit material in those same layers, one on top of each other, until the entire object is created.

Following the ASTM International standards organization and its Additive Manufacturing categorization as a general guide, the following categories can be considered at a construction scale:

- **Material extrusion (layered)** - An additive manufacturing process in which the added material is selectively dispensed through a nozzle or orifice, creating filaments of material that are deposited horizontally into layers, one on top of the other.

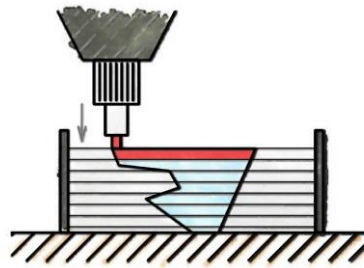


- **Material extrusion (suspended)** - A modified version of material extrusion, where the material hardens immediately after being dispensed through the nozzle, solidifying in mid-air, and attaching itself to the part extruded immediately before. This way it is possible to defy the pulling effect of gravity, and create a suspended filament of the material that attaches onto itself, starting from a point fixed into the ground.



- **Binder jetting** - An additive manufacturing process in which a liquid bonding agent is selectively deposited on top of a layer of powder materials in order to join them. This process is repeated for

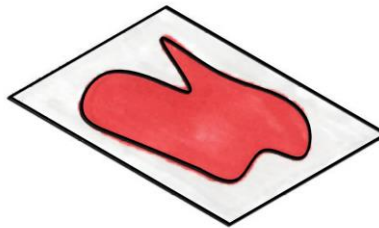
several layers, until reaching the whole height of the printed volume, where the remaining unbound powder material acts as support for each next layer.



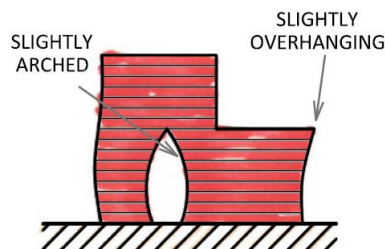
## Form freedom

One of the main features of 3D printing is a certain degree of freedom in creating complex shapes, which separates it from traditional techniques that usually imply simple shapes, such as lines, squares or circles at best. The degree of freedom can be divided into different categories:

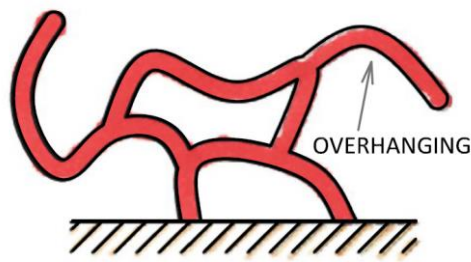
- **2D freedom** – The technology is only able to create shapes within a two dimensional plane. This can be compared to an inkjet printer, which is limited to the two dimensional freedom of the paper it prints on.



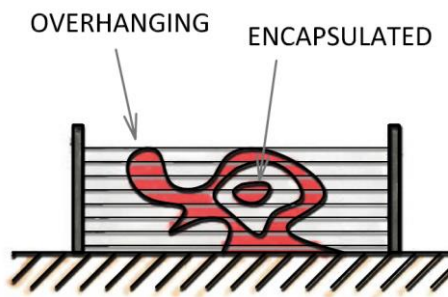
- **2.5D freedom** – The technology allows to create shapes mostly in two dimensional planes that are stacked on top of each other through gravity. This allows either to create layers with the same shape on top of each other, or to stack smaller layers on top of larger layers, keeping each layer contained within the boundaries of the layer below. It is also possible to have slightly larger layers on top of smaller ones, by creating slightly overhanging structures, but that depends mostly on the characteristics of the printed material.



- **3D freedom** – The technology creates objects in such way that it can produce material in any direction, including overhanging structures, as long as it has a previously printed section of the material on which it can attach the new printed section. This allows the material to branch out into all three dimensions, similarly to the growth of a tree.



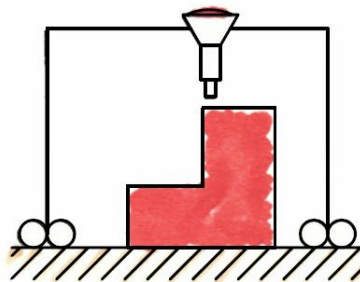
- **Full 3D freedom** – The technology allows the printed materials to be completely supported in all directions, usually by some form of supporting material. This way the object is embedded and surrounded by support material, meaning that it can be placed virtually anywhere inside the printing space, without worrying about the downward pulling effects of gravity. It also allows for objects to be trapped within other objects, without a contact point between the two. The only consideration remains that once the support material is removed, the entire object will again be subject to gravity, and will look for the nearest way to the ground, or any other firm support underneath.



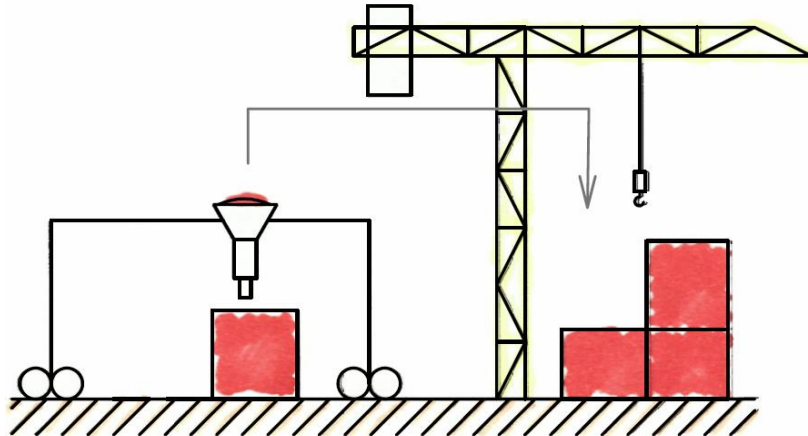
## Fabrication location

Construction elements don't necessarily need to be created on the construction site, but can also be built on various other locations. Therefore, construction size 3D printing follows the same rules. There are several different categories, based on where the fabrication occurs:

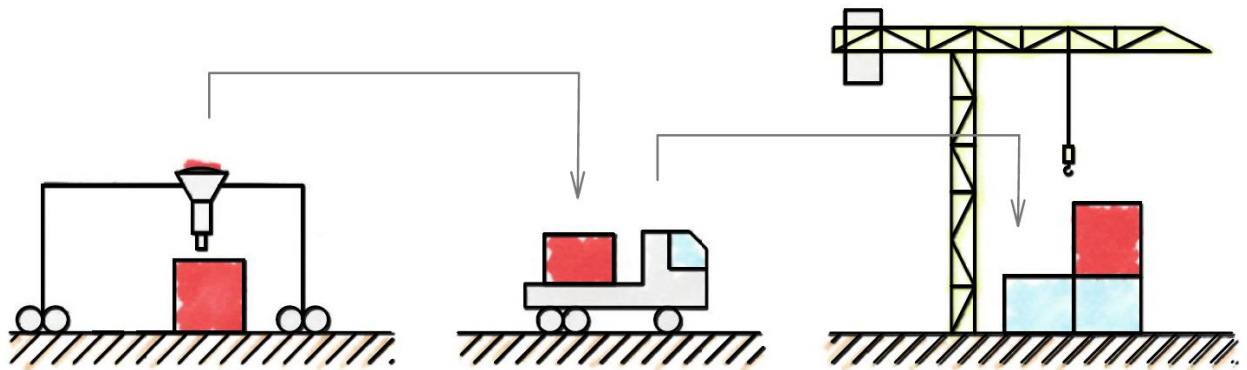
- **In situ** - The object is constructed directly in the place where it needs to stay, much like in traditional construction.



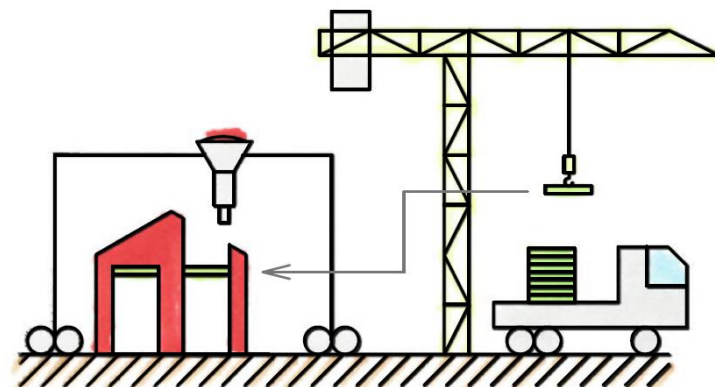
- **On-site prefabrication** – The object or its components are printed in the proximity of their final position (next to or inside the construction site), and then placed into position. The environment can be partially controlled or sheltered, depending on the necessities and possibilities that the site offers.



- **Off-site prefabrication** – The object or its components are printed in a controlled environment, away from the construction site, and then transported and assembled there. This process resembles traditional industrial prefabrication within construction, such as the production of prefabricated concrete elements, various bricks, fixtures, etc.



- **Partial prefabrication (Off- and On-site)** – Some parts of the construction are prefabricated (by the machine or by traditional methods) and then afterwards put into their final position, while the rest is constructed directly in place, at the construction site.

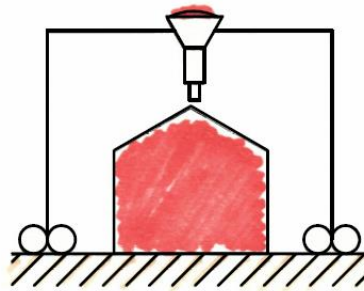




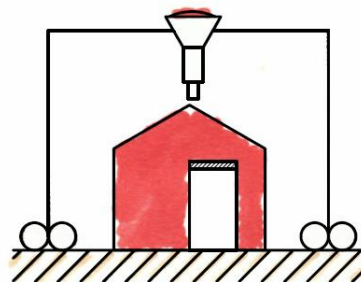
## Fabrication approach

There can be several ways that the printer can use the printed material to create construction size objects. These include:

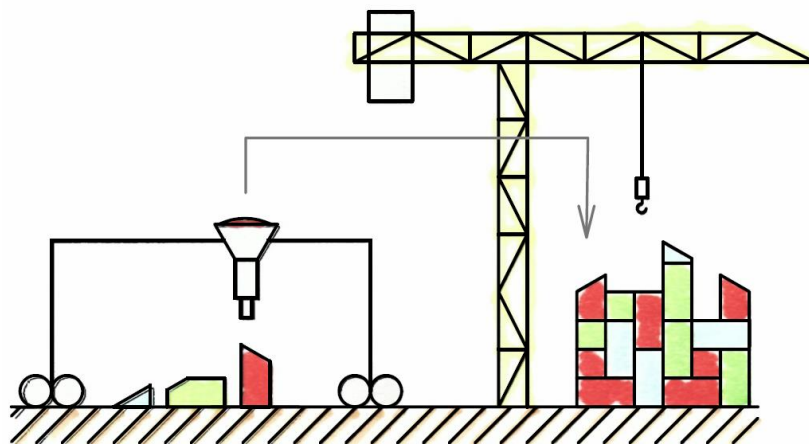
- **Direct fabrication** - The printed object is the definitive construction itself, and no erection or assembly is required.



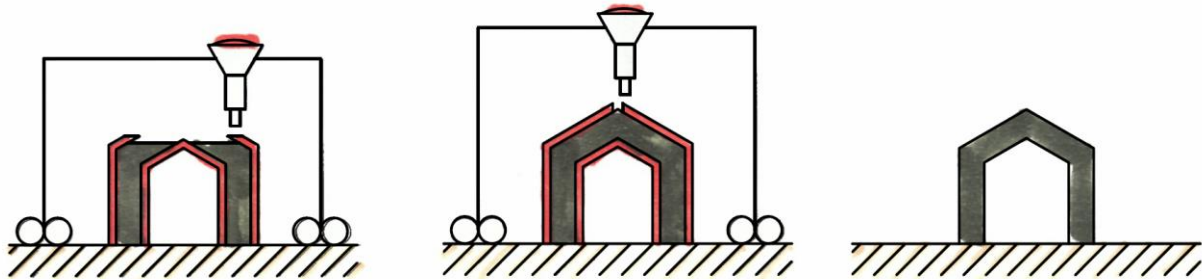
- **Semi-direct fabrication (parts are introduced)** - The printed object is the definitive construction, but certain parts are added during the printing procedure, to facilitate the process or to overcome some physical obstacles. As an example, lintels can be installed where doors or windows will be, to simplify the printing of layers that need to go over them.



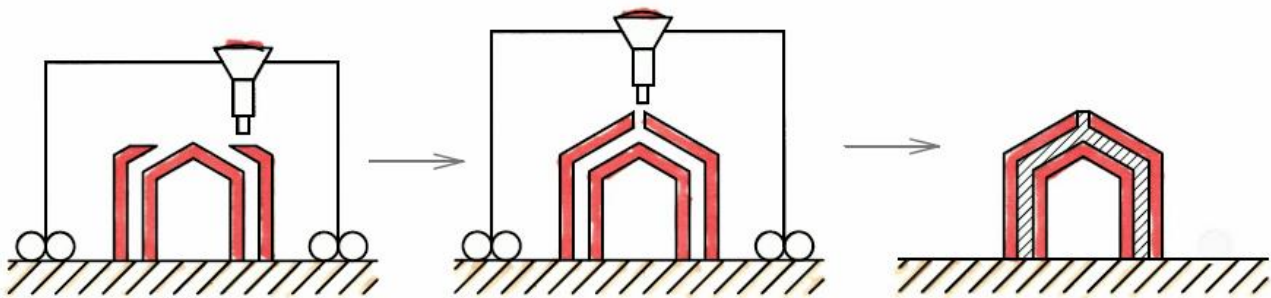
- **Component fabrication** – The object is divided into components that are printed as separate parts. The parts are then assembled into the final object.



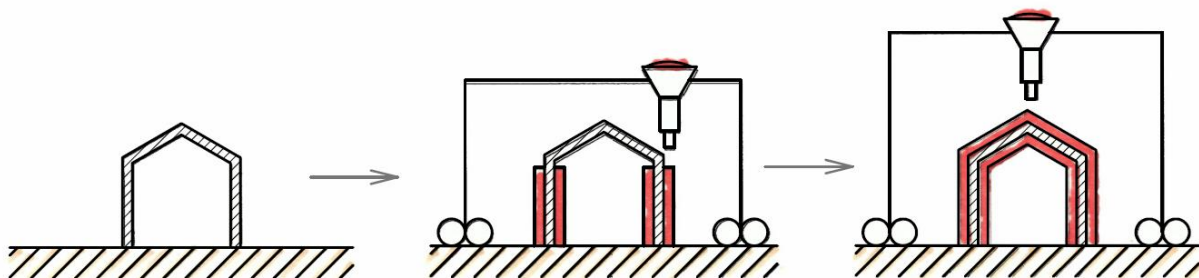
- **Formwork fabrication** - The printed object acts only as formwork to another material, such as concrete, that will be cast within. The printed object is removed afterwards. The formwork can be printed in parts or as a single object.



- **Stay-in-place formwork fabrication** - As above, the printed object acts as formwork for casting another material within, but remains in place, as an integral part of the construction. Usually, the printed material acts as a secondary structure, while the poured material is the primary load-bearing structure.



- **Cover/Engulfing fabrication** – The exact opposite of the formwork fabrication, this process starts with a readymade supporting structure that is positioned into place. The printed material is then deposited around the supporting structure, and covers/engulfes it permanently.

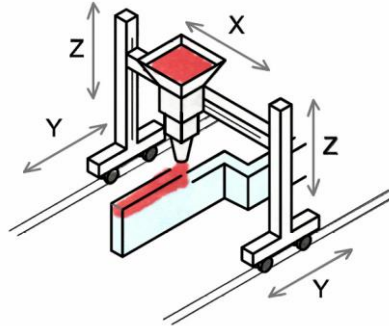


## C) Printer characteristics

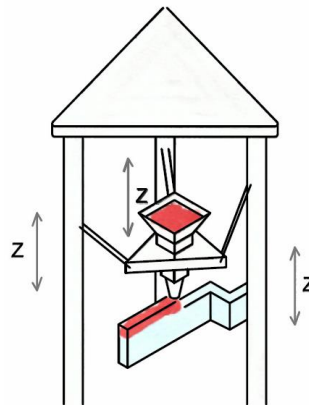
### Movement system

To be able to perform the printing procedure, the printer head needs to be moved around the printable surface. There are several movement systems, which include:

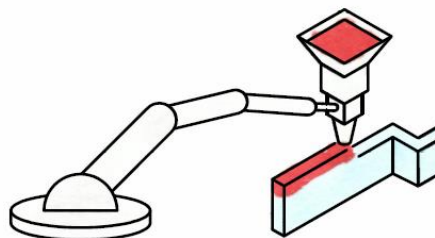
- **Cartesian gantry** - The system is moved on a rectangular frame independently in 3 different directions, one for each axis: X (east and west), Y (north and south), and Z (up and down). Each independent movement direction can be performed differently, through rolling, pulling, pushing or similar, and each one requires at least one separate motor to activate the movement.



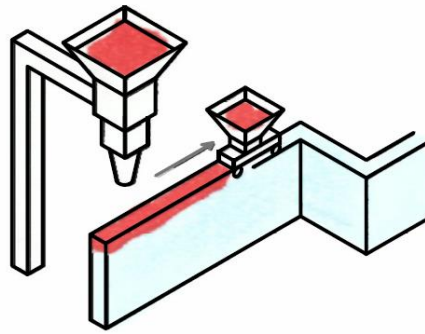
- **Delta gantry** – the printer head sits on a suspended plate that is placed centrally between 3 vertical pillars. The suspended plate is connected to each of the pillars through a pair of arms that are allowed to move up and down along the pillars, independently. By pulling the arms up or down along the pillars, the suspended plate moves around the printer area, covering its whole surface.



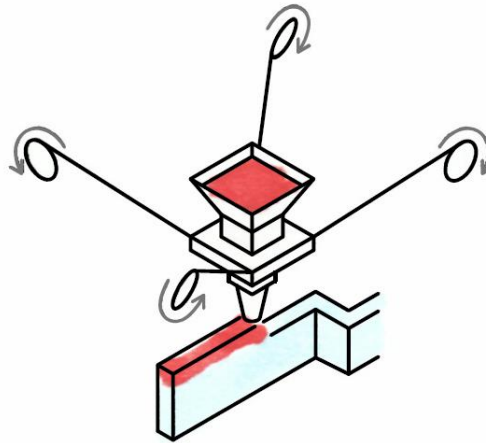
- **Robotic arm** - The deposition system is moved in all possible directions by the means of an articulated robotic arm. The arm uses several articulated joints in a variety of sequences, in order to perform every possible movement within its reach.



- **Mobile robotic vehicle** - The deposition system is mounted on top of a separate vehicle capable of moving around a certain area or volume, through the use of its own motors. This can include climbing on top of previously printed parts, hovering in mid-air, or similar. The vehicle can be loaded with a certain amount of material and then refilled once empty or it can be constantly connected to a feeder, through a pipe/hose.



- **Cable suspension** – Similar to the delta gantry, the system is suspended on three or more cables. The suspended plate is moved around by pulling or releasing the cables independently from each other.



### Maximum printable volume

The maximum printable volume that the machine is able to produce.

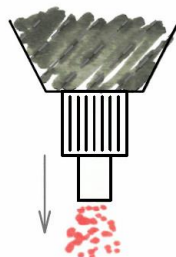
### The maximum size of the printable area

The maximum printable surface that the printer that the printer can print in.

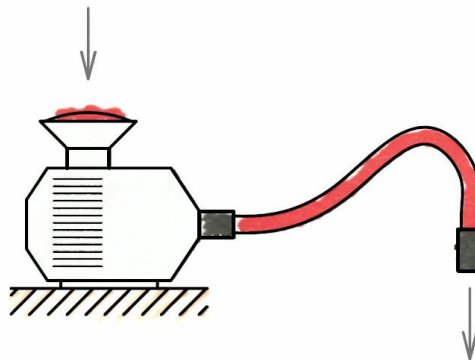
### Deposition method

The materials can be pushed through the nozzle to the printable surface in a variety of ways:

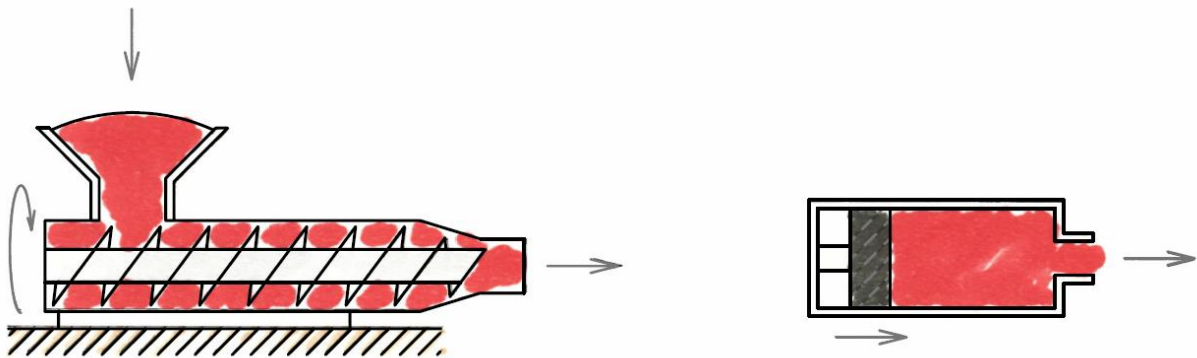
- **Jetting** – The deposition involves liquid materials, and is done by creating a pressure on the material, usually through a pump, and depositing it at fast speeds on the printable surface.



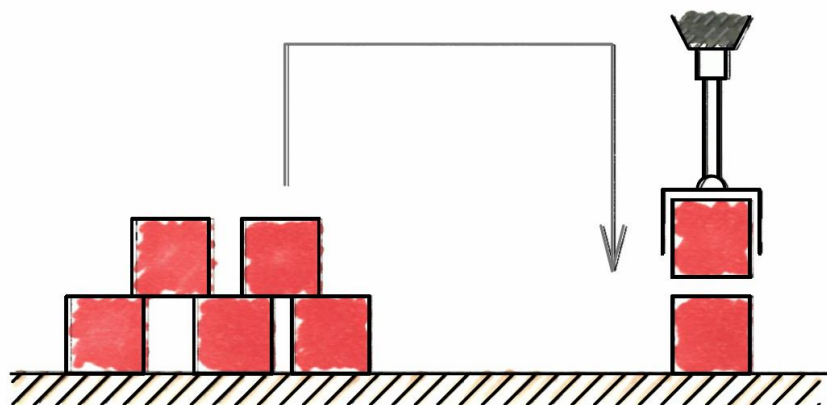
- **Pressure extrusion** – This method is the most common in 3D printing at large scale, and is applied to very dense, partially fluid materials. As above, a pump creates a pressure on the material, moves it through a pipe and slowly deposits on the printable surface or on the previously extruded material.



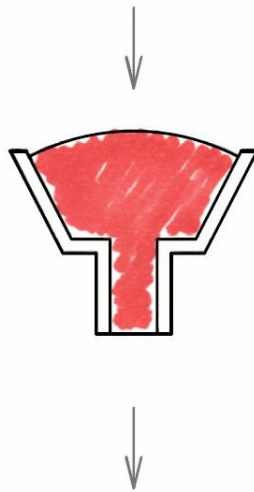
- **Mechanical extrusion** – Similarly to above, another common way of extruding materials is through a mechanical push or drive, such as with an auger coil, or a piston.



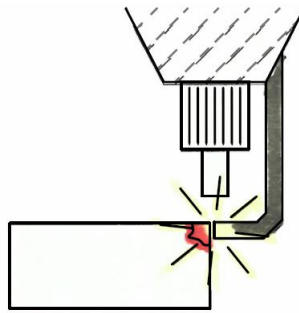
- **Mechanical movement** – The deposition is done by lifting and moving the material in place, which makes it mostly suitable for solid materials.



- **Gravity deposition** – The material is dropped onto the printable surface simply through the use of gravity, which is mostly suitable for dense fluid or powder materials.



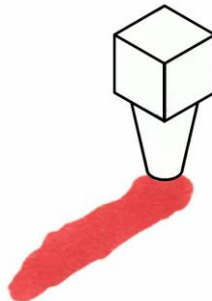
- **Sintering/welding** – The materials are deposited into their position on the printable area, and then subject to a high amount of energy, through laser, electricity, or similar sources. This is able to produce a rapid increase in temperature and fuse/ weld the material in the correct place, attaching it to the material deposited before.



### Number of print heads (nozzles/orifices)

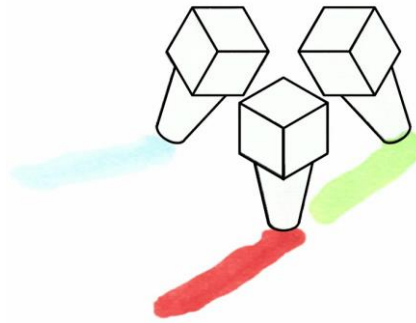
The material in a 3D printer is usually deposited through one or more nozzles or similar orifices. These can usually be moved or rotated to reach the areas where the material needs to be deposited.

- **Single** – most commonly, 3d printing technologies use a single nozzle which is then moved around to place the material everywhere where it is needed.

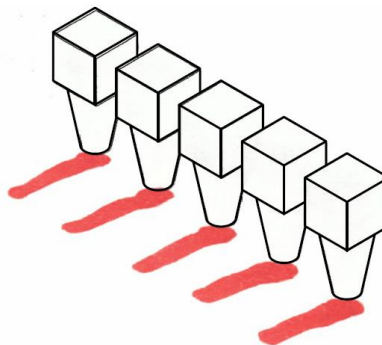


- **Multiple** – the technology uses two or more nozzles, with connected or independent movements, that are used either to deposit different materials from each one of them or to multiply the speed of the process.





- **Array** – the technology uses a series of nozzles all placed in a row, and moving together. This way, instead of moving one nozzle in all directions to deposit the material, there can be several that are programmed to selectively deposit the material where necessary, and this way reduce the movements of the whole system.



### Print head (nozzle/orifice) diameter

This parameter indicates size of the nozzle through which the material needs to pass. It defines the quantity and the size of material that can be extruded in every instant.

### Print head (nozzle/orifice) features

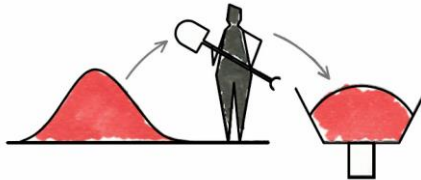
There are often some features or additional capabilities that the print head can have, which directly influence the 3D Printing process:

- **Three-axis motion** – The standard movement of the print head for most 3D printing systems, which usually includes three different motors that work together to move the print head within its printable volume.
- **Rotational/tangential motion** – An additional motor that enables the print head to rotate in the horizontal plane, which allows it to follow the curvature of the printed layer, and helps create a more precise edge on the extruded material.
- **Omni-directional motion** – While the typical material extrusion is done vertically and top-down, in this case the printer head allows to extrude in all different directions. This is usually possible for 3D printing systems that are moved through the means of an articulated robotic arm.
- **Troweling mechanism** – Some print heads on concrete extruders are equipped with flaps or trowels attached just after the extrusion nozzle/orifice, which help leveling and spreading the paste material to create a better surface finish (similarly to a manual trowel used by masons).

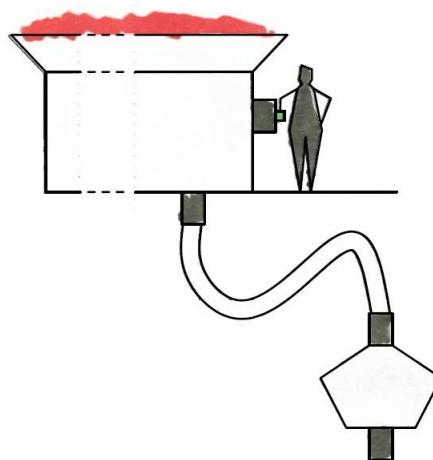
## Material feeding system

Before reaching the nozzle, the material needs to be delivered through it from a container, which is also known as a feeder. These material feeding systems can be:

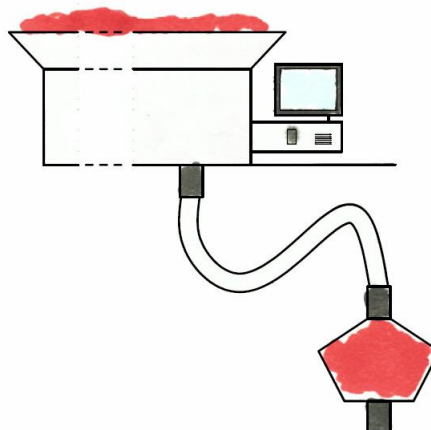
- **Manual** – The material is fed to the nozzles manually by a worker



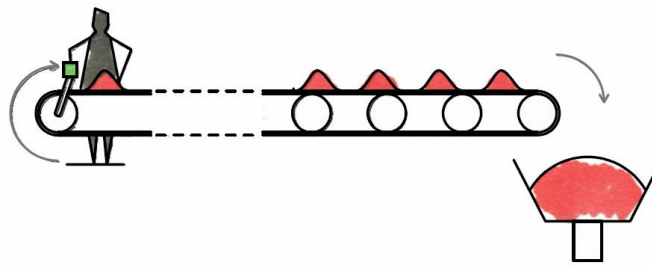
- **Included, semi-automated** – There is a feeding system for the material, which is mounted on top of the printer. The system is not autonomous and needs an operator to activate or control it.



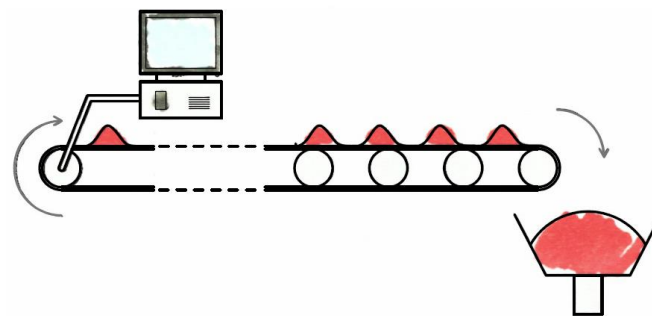
- **Included, fully-automated** – There is an autonomous feeding system for the material, which is mounted on top of the printer, and is fully commanded by the printer.



- **Separate, semi-automated** – There is a separate feeding system connected to the printer and located near it. The system is not autonomous and needs an operator to activate it or control it.



- **Separate, fully-automated** – There is a separate feeding system connected to the printer and located near it. The system is fully autonomous, and the feeding is commanded by the printer.



## Theoretical printing speed

The maximum printing speed that can be achieved, if the whole printable area is used.

## Actual printing speed

The actual printing speed is often reduced compared to the theoretical one, if the printing technology involves also the printing of supporting structures. The value is estimated as a percentage of the theoretical speed, by excluding the quantities of support material necessary in a regular printing procedure for that machine.

## Accuracy

This parameter defines the maximum error that the printer can make, or how much the physically constructed print can deviate from the 3D model it has originated from. The accuracy parameter can often vary in each dimension, depending on many factors related to the printing technology and the printer itself. The accuracy is here defined as the worst one of all three dimensions.

## Printer (dis)assembly speed

This parameter defines the time necessary to erect or dismantle the printer, depending on which one is more time consuming.

## Price per printer unit

The price of each printer unit. If the company has different types of printers, the main one described in the report is considered.

## D) Materials used

### Material possibilities

The category defines how many materials can be used by the printer.

- **Single material** - The printer is designed specifically for a single type of material.
- **Multiple materials** - The printer can use different types of materials, either one at a time, or simultaneously through the use of multiple nozzles.
- **Structure/Support materials** - The printer is designed to use two separate materials, one for the actually printed object, and one for support. It can print them one at a time, or both in the same printing procedure. The peculiar feature of the two materials is that one is meant to stay and become the final structure, while the other is designed to be removed after the printing procedure is finished.

### Material type

There are several types of materials suitable for 3DPrinting at a construction scale

- **Traditional concrete** – The most commonly used material, it includes all concrete material that are based on standard cement (also known as Portland Cement).
- **Alternative concrete** – All other types of concrete material that use alternative or less common cements as their base material.
- **Clay**
- **Soil**
- **Plastic** – All plastic materials, including those used in traditional desktop 3D Printers (such as PLA or ABS)
- **Metal**
- **Resin**

### Price

The price of material is referred to the final commercial price of a cubic meter of printed material.

### Compression strength

Compression strength is a common characteristic of a material that defines its resistance to pressure. It is measured as a resistance of a cube of material to failure (breaking), when subject to a compression force on two of its parallel surfaces. The value is calculated as the maximum compression force before breaking the cube, divided by the area of one of the surfaces of the cube.

### Tensile strength

Tensile strength is a common characteristic of a material that defines its resistance to pulling/splitting forces. The strength is measured as a resistance of a cylinder of material to a pulling force. The value is calculated as the maximum pulling force before breaking the cube, divided by the surface of the middle transversal section of the cylinder.

### Aggregate size

Aggregates are filler materials (such as sand and gravel) that resist to compressive strength and make the bulk of many composite materials, such as cementitious materials (concrete). They are categorized by the size of their particles, by measuring the maximum diameter. They can be divided into:

- **No aggregates (Paste)** – No aggregates are added to the material, and the only component is the adhesive ingredient, such as cement
- **Up to 2mm (Fine mortar)** – The material contains only fine sands as aggregates up to approximately 2mm in diameter.
- **Up to 4mm (Rough mortar)** – The material contains fine aggregates, such as sands and small pebbles up to approximately 4mm in diameter, in various compositions. Its characteristics still resemble a mortar, however.
- **Up to 6mm (Fine concrete)** – The material contains mostly fine aggregates, such as sands, pebbles or fine gravel up to approximately 6mm in diameter, and its characteristics are more resembling a concrete than a mortar.
- **Up to 16mm (Concrete)** – The material contains both coarse and fine aggregates, such as sand and gravel in various sizes and compositions up to 16mm in diameter. The aggregate sizes are those seen in typical structural concretes.
- **Up to 40mm (Rough concrete)** - The material contains both coarse and fine aggregates, such as sand and gravel in various sizes and compositions up to 40mm in diameter. The aggregate sizes are those seen in rough structural concretes used in most civil construction works.
- **More than 40mm (Rough concrete)** - The material contains both coarse and fine aggregates, but the maximum sizes extend over 40mm in diameter. These sizes are generally used only in very large civil works, such as large bridges and dams.

## Aggregate weight

Aggregates, as described above, can also be divided by their density or specific weight, which describes and affects how strong, heavy and porous the material is. It can be divided into the following categories:

- **Ultralightweight (less than 500kg/m<sup>3</sup>)** – These are very lightweight aggregates such as expanded polystyrene beads, expanded perlite etc. They are characterized by a large quantity of trapped air, which favors insulation properties and reduces weight, but also impacts heavily on the strength of the material. They are therefore not suitable for structural use.
- **Lightweight (500kg/m<sup>3</sup> to 1000kg/m<sup>3</sup>)** - These lightweight aggregates (such as expanded shale, clay, brick etc.) are a middle way solution, that still maintain a certain amount of structural strength, while providing a less heavy and potentially more insulating material.
- **Normal weight (1000kg/m<sup>3</sup> to 2000kg/m<sup>3</sup>)** – These are normally sized aggregates found in most typical concretes and mortars (such as crushed stone, pebbles, sand etc.). These are heavy, but structurally stable materials that are crucial for strong concrete mixtures.
- **Heavyweight (more than 2000kg/m<sup>3</sup>)** – These are aggregates that can be found in most typical concretes, but also in high-mass situations, such as counterweights or radiation shielding structures. They include materials such as limestone, granite, and all the way up to magnetite, hematite, steel etc.

## Material verification

The level of verification of the material defines how well known are the characteristics and behavior of the 3D printed material. These can be divided into:

- **Conceptual** – The material has never been physically created or tested. There have only been some conceptual predictions of its behavior or function.

- **Prototype** – The material has been printed only a few times, mostly as preliminary tests to attest the capabilities of the printer machine.
- **Partially tested** – The material has been printed and tested a limited amount of times, to identify some of its core characteristics.
- **Extensively tested** – The material has been printed and tested several times. Its characteristics are well-known and predictable.
- **Certified** – The material has been tested according to standards, and has a certified acceptance as a construction material with verified and consolidated properties.

## Material hardening time

Hardening time is an approximate time that is required for the material to become hardened enough to be handled.

## Material usability time

Usability defines the active time of the material, in which it can be deposited, before it becomes unusable and needs to be replaced with a new active material.

## Raw material price

The raw material price is the summed up commercial price of all the raw ingredients that are contained in the printed material. This excludes the whole printing procedure, and all the movements and treatments that are part of it, leaving only the value of the material itself.

## Raw material availability

The availability of the raw material ingredients is focused mostly on the main ingredient of the printed material that is the least available on the market, while still being very crucial for the printing process. These can be divided into:

- **Industry standard** – The material is one of the most important and well-known in the industry, and is used in large quantities (such as concrete, steel, wood, etc.)
- **Extensively used** – The material is widely used in the construction industry, but in smaller quantities than the industry standards.
- **Partially used** – The use of the product within construction is limited, mostly to specialized sectors and products
- **Niche usage** – The material is used very rarely in the construction industry, usually for very specific and highly specialized products
- **Not used**



## Appendix 6: Partnerskabets deltagende virksomheder og personer

| <b>Virksomhed</b>        | <b>Person</b>         | <b>Titel</b>                       | <b>Mobil</b> | <b>Email</b>         |
|--------------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------|----------------------|
| <b>3D Printhuset A/S</b> | Jakob Jørgensen       | Technical Manager                  | 42 77 55 52  | jj@3dprinthuset.dk   |
|                          | Michael Holm          | Development Manager                | 20 68 26 20  | mh@3dprinthuset.dk   |
|                          | Ana Goidea            | Arkitekt                           | 50 18 22 34  | ag@3dprinthuset.dk   |
|                          | Simon Klint Bergh     | Salgschef                          | 22 47 70 55  | skb@3dprinthuset.dk  |
|                          | Asger Dath            | Kommunikationschef                 | 20 67 95 35  | ad@3dprinthuset.dk   |
| <b>NCC Danmark A/S</b>   | Hans Blinkilde        | Forretningsudviklingschef          | 24 40 80 56  | hsb@ncc.dk           |
|                          | Anders Kudsk          | Områdechef, Koncepter & Innovation | 24 88 78 59  | aku@ncc.dk           |
|                          | Kåre Flindt Jørgensen | Konceptudviklingschef              | 86 75 43 72  | karjor@ncc.dk        |
| <b>Force Technology</b>  | Jens D. Henriksen     | Geolog, betonspecialist            | 22 69 72 28  | jdh@force.dk         |
| <b>Gips Recycling</b>    | Henrik Lund-Nielsen   | Adm. dir.                          | 24 47 73 37  | hln@gipsrecycling.dk |