

12.9 3D-betonprint

Af Thomas Juul Andersen og Wilson Ricardo Leal da Silva

Tanken om at lade en 3D-printer udføre en betonkonstruktion er ikke ny. Således er der siden midt 1990'erne udført mange eksperimenter med henblik på at udvikle en metode, som kunne realisere den kreative ide: at printe betonkonstruktioner uden brug af støbeform.

Begrebet 3D-betonprint er en oversættelse af den engelske term 3D Concrete Printing udviklet på Loughborough University i England i 2012. Begrebet dækker over den digitale fabrikationsproces, hvor et cementbaseret materiale ekstruderes med henblik på at fremstille byggekomponenter [1]. Teknikken kan i sin opbygningsproces sammenlignes med processen i dagens 3D-printere til plast, hvor et materiale ekstruderes gennem en dyse og opbygges lag-på-lag på baggrund af en digital 3D-model.



Figur 1: 3D-betonprint ekstruderes lag-på-lag i en digital fabrikationsproces.

De første egentlige konstruktioner blev printet fra omkring 2012, og i 2018 var der printet ca. 20-30 fuldskala konstruktioner (primært vægge og facader) på verdensplan [2]. Herfra har udviklingen for alvor taget fart, og mange konstruktioner er blevet printet siden – hvortil kommer et stort antal udviklingsprojekter, som har haft til formål at videreudvikle metoder til 3D-betonprint.

Til trods for den rivende udvikling indenfor 3D-betonprint, er teknologien i 2023 stadig i en udviklingsfase, og der er fortsat behov for videreudvikling på flere områder, før teknologien er robust, bæredygtig og fuldt implementeret i bygge- og anlægsbranchen. I dette kapitel om 3D-betonprint gennemgås teknologiens bestanddele samt de udfordringer, der fortsat arbejdes på at løse.

12.9.1 Printmetode

3D-betonprint er en multidisciplinær teknologi, som kræver ekspertise indenfor flere områder for at kunne forstå og udnytte teknologien til fulde. Således kræves ekspertise indenfor arkitektur, bygningskonstruktion, betontechnologi og robotteknologi.

3D-betonprint adskiller sig væsentligt fra den traditionelle støbning af beton i en støbeform. I mange henseender kan 3D-betonprint bedre sammenlignes med fremstillingen af murværk. Her bygges en konstruktion op lag-på-lag i en kombination af teglsten og mørtel. I 3D-betonprint undlades dog teglstenene og konstruktionen opbygges i stedet alene af mørtelfugerne – opbygget lagvis vådt-i-vådt.

En helt afgørende forskel fra traditionelle byggemetoder er, at 3D-betonprint udføres af en digitalt styret robot eller en automatiseret portalkran, som har påmonteret en printdyse. Baseret på en digital 3D-model af konstruktionen, genereres en digital arbejdstegning (typisk en G-code), som printerens følger ved at ekstrudere materiale ud lag-på-lag, mens den bevæger sig i henhold til geometrien i en afpasset hastighed.

3D-betonprint er velegnet både til in-situ konstruktioner og til elementfremstilling – eller en kombination, hvor elementer printes lokalt på byggepladsen og efter hærkning løftes på plads.

Der er flere teknikker indenfor 3D-betonprint. Forskellige typer af støbninger med eksempelvis glideforskalling og sprøjtebeton kan i en bred forstand betragtes som 3D-print. Dog dækker begrebet 3D-betonprint – eller det engelske 3D Concrete Printing (3DCP) typisk over variationer af 2 overordnede tilgange:

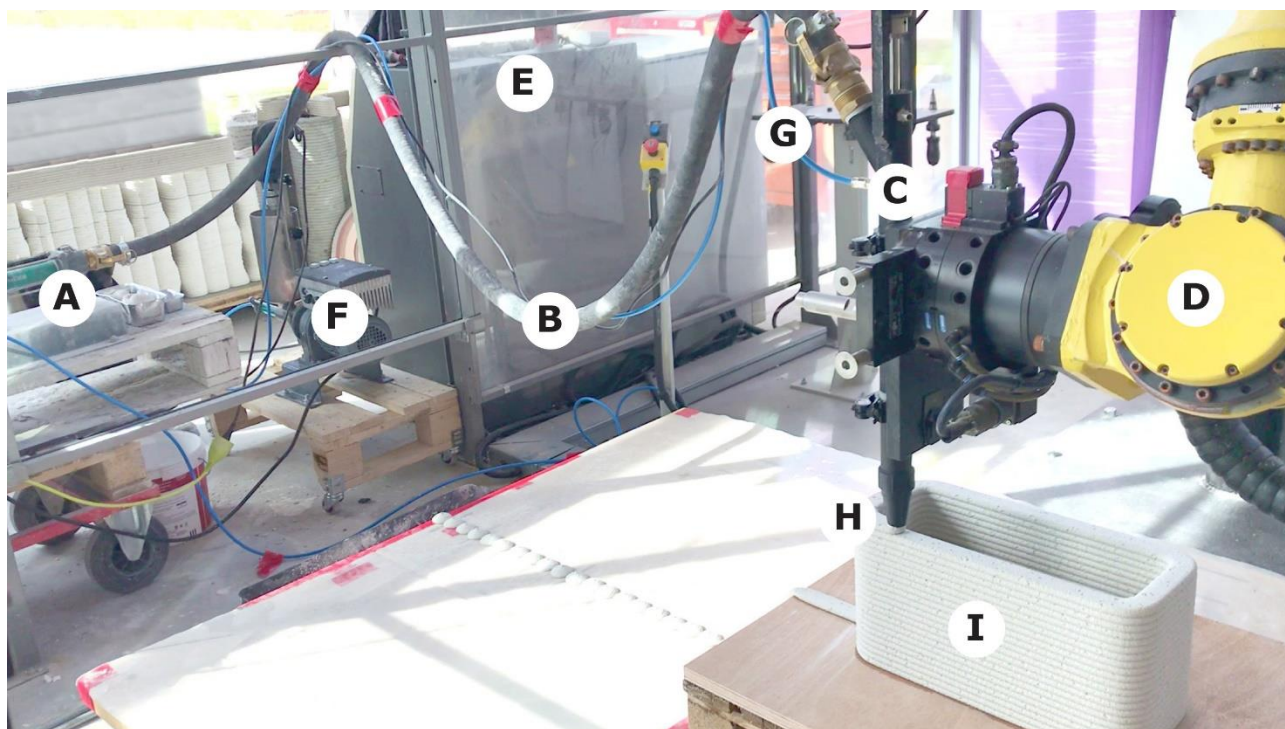
- Ekstruderingsbaseret 3D-betonprint. Dette er den mest anvendte metode, hvor beton ekstruderes gennem en dyse monteret på robot eller automatiseret portalkran. Betonen ekstruderes således lag-på-lag baseret på en digital model af den færdige konstruktion.
- "Particle-bed" 3D-print. Med denne teknik udlægges et materiale, typisk sand, lagvis i store felter. Mellem hvert lag udlægger en printer så en binder der, hvor materialet skal hærde op. Efterfølgende fjernes alt det løse materiale og den færdige konstruktion står tilbage [3].

I dette kapitel om 3D-betonprint fokuseres på den ekstruderingsbaserede metode. Til trods af flere vellykkede eksperimenter ved brug af "particle-bed"-metoden, er den ekstruderingsbaserede metode med tiden blevet altdominerende såvel indenfor forskning og udvikling som de indledende kommercielle tiltag. Det har bragt metoden i en position som den mest udviklede og optimerede teknologi indenfor 3D-betonprint [4].

Det er værd at bemærke, at til trods for betegnelsen 3D-betonprint, har der indtil videre primært været tale om eksperimenter med mørtler med største partikelstørrelse op til 4 mm. Læs mere om delmaterialer i afsnittet om materialesammensætning.

12.9.2 Udstyr

Med 3D-betonprint kræves der ikke en omsluttende støbeform, blot et plant underlag til at understøtte den printede konstruktion. Til gengæld er det nødvendige støbeudstyr mere omfangsrigt end ved traditionel betonproduktion- og støbning. I det følgende gennemgås det typiske udstyr, som anvendes til 3D-betonprint.



Figur 2: Et eksempel på et set-up for 3D-betonprint med beton/mørtel-pumpe (A) som via en slange (B) fører materiale til printdysen (C), som er monteret på en industrirobot (D) der er styret via den digitale kontrol (E), hvortil en arbejdstegning (G-code) indlæses. Fra en mindre pumpe (F) kan diverse additiver tilføres via en slange (G) til printdysen, hvori det blandes med mørtlen/betonen, som føres videre gennem mundstykket (H), der ekstruderer materialet ud lag-på-lag, hvormed en printet konstruktion (I) fabrikere.

12.9.2.1 Pumpe

En pumpe sikrer, at der er en konstant materialeforsyning til selve printeren. Imellem pumpe og printer er der derfor en betonslange, der er fleksibel og kan følge printeren, som konstant vil være i bevægelse.

Pumpen kan være udformet med en betonblander, der blander og tømmer materiale ned i selve pumpen. Denne proces vil typisk foregå med præblandede tørblandinger, hvor der blot skal tilsættes vand og eventuelle additiver. Uden monteret betonblander vil betonen løbende blive tømt ned i pumpen fra ekstern blandestation med en betonkanon.

Ved nogle printsystemer er det pumpen som dikterer fremføringshastigheden af det printede materiale. Her vil pumpen typisk være en såkaldt excentersnekkepumpe, som sikrer en nogenlunde konstant materialefremføring uden pulsering. I andre

printsystemer er der en materialeopsamler og særskilt fremføringssystem i forbindelse med printdysen, hvorved en konstant materialefremføring ikke er nødvendig.

12.9.2.2 Printdyse

Printdysen er monteret som sidste led på selve printeren. Med printdysens mundstykke dikteres geometrien på selve printet - typisk cirkulært eller rektangulært. Størrelsen dikterer samtidig bredden på det printede lag, og typisk vil lagbredden for mørtler være 20-60 mm og for beton 40-100 mm. Lagtykkelsen varierer afhængigt af materialeegenskaberne, men er typisk som ca. halvdelen af lagbredden.

I nogle tilfælde er mundstykket endvidere forsynet med vinger, der skal sikre plane overflader samt i nogle tilfælde have en glitte-funktion. Når mundstykket har vinger monteret, er det nødvendigt, at hele mundstykket kan dreje, så vingerne konstant er orienteret korrekt i forhold til printlagene.

Printdysen kan være passiv eller aktiv. Ved en passiv printdyse forstås en dyse, hvis eneste funktion er at diktere størrelse og geometri på printlagenes tværsnit. Ved en aktiv dyse forstås en dyse, hvori materialets egenskaber kan ændres, inden det ekstruderes ud af mundstykket.

En aktiv dyse er forbundet med et særskilt pumpesystem, hvor en pumpe via en slange forbundet til dysen kan injicere et flydende additiv ind i printdysens kammer, hvor det blandes sammen med betonen, umiddelbart inden det ekstruderes. Aktive dyser er typisk udviklet og anvendt til at iblande accelerator til betonen, hvormed hærdeprocessen præcist kan accelereres fra ekstruderings tidspunktet. Aktive dyser anvendes også til tilsætning af additiver for at ændre andre egenskaber på betonen umiddelbart inden ekstrudering, eksempelvis konsistens og farve.

12.9.2.3 Robot

Printdysen er placeret på en robot, som dikterer printretning- og hastighed baseret på en forprogrammeret kode. De to mest hyppige robotter anvendt til 3D-betonprint er en 6-akset industrirobot og en automatiseret portalkran. Mens industrirobotterne mest anvendes til fremstilling af betonelementer, hvor deres store fleksibilitet kan udnyttes, bliver automatiserede portalkraner mest anvendt til at printe betonkonstruktioner på byggepladsen, hvor deres størrelse kan udnyttes til fremstilling af større, sammenhængende konstruktioner.

12.9.2.4 Software fra design til fabrikation

I projekteringsfasen af en given betonkonstruktion udarbejdes en digital model (CAD). Denne model danner udgangspunktet for printprocessen, hvor den skal omsættes til en fabrikationsmodel (CAM), der kan fungere som anvisning for 3D-betonprinteren.

Der findes mange forskellige CAM-software afhængigt af, hvilken type 3D-betonprinter der skal benyttes. Den typiske funktion er, at den pågældende CAM-software analyserer CAD-modellen, og splitter den op i de nødvendige printbaner på baggrund af valg af lagtykkelse, hastighed mv. I sidste ende genereres en såkaldt G-code, som kan aflæses af 3D-betonprinteren.

12.9.3 Materialesammensætning

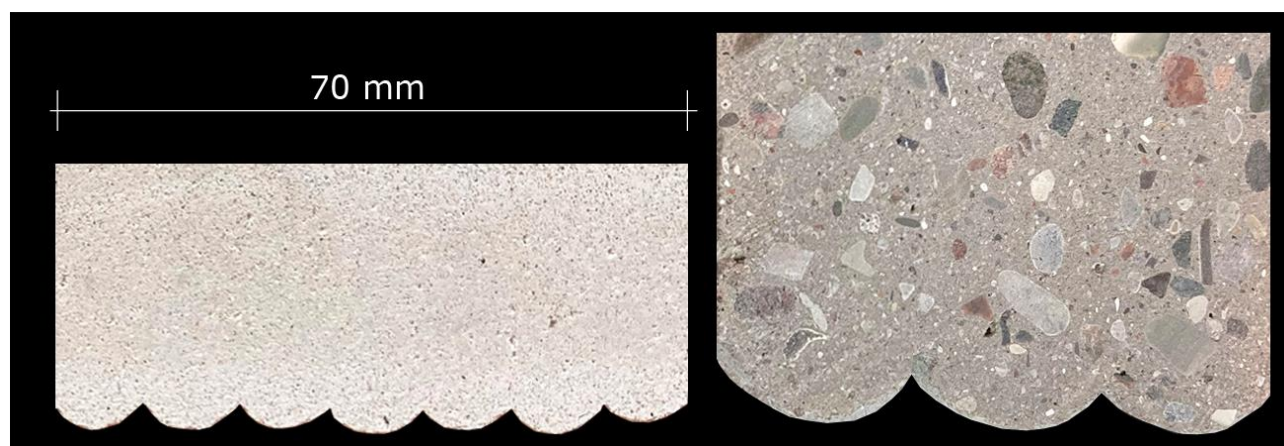
Sammensætning af et materiale til 3D-betonprint er mere kompliceret end til traditionelle betonstøbninger i støbeform. Et helt særligt forhold er, at materialets egenskaber skal udvikle sig indenfor et begrænset tidsinterval – i nogle tilfælde indenfor få minutter.

Generelt gælder det for sammensætningen af en beton, at den skal opfylde kravene, som er opstillet til det givne projekt. Her stilles typisk krav til trykstyrkeklasse, eksponeringsklasse, konsistens og største stenstørrelse – samt opfyldelse af betonstandarden DS/EN 206 DK NA [5], som er sat i kraft igennem det danske bygningsreglement.

Et fællestræk for de hidtil printede konstruktioner er, at langt størstedelen er printet med præfabrikerede tørmørtler (med tilslag på op til 4,0 mm partikelstørrelse) som det primære råmateriale. Selv om disse tørmørtler med tiden er udviklet henimod et lavere cementindhold, er omkostningerne fortsat høje sammenlignet med traditionel beton, og CO₂-udledningen er høj.

I udviklingen af materialesammensætninger til 3D-betonprint ligger der et potentiale i at opskalere fra mørtler til beton. Besparelsen kommer særligt af, at pastavolumenet kan reduceres – og dermed reduceres cementforbruget – ved at øge mængden af større tilslag, samtidig med at den nødvendige konsistens kan bevares. Opskalering fra præfabrikerede tørmørtler til beton vil endvidere muliggøre, at lokale betonproducenter kan producere beton til 3D-betonprint, hvilket kan minimere transportafstande og CO₂-udledning herfra [6].

Herudover er det vigtigt at nævne, at hvis betonen skal kunne designs til bærende konstruktioner, skal det kunne defineres som beton. I Danmark har vi valgt, at det kræver indhold af tilslag på minimum 8 mm.



Figur 3: Der er store CO₂-besparelser at hente i opskaleringen fra mørtelprint (venstre) til betonprint (højre). Bemærk at tykkelsen på hvert lag også er skaleret op som følge af det opskalerede materiale.

I det følgende gennemgås nogle af forhold, som der skal tages i overvejelse, når der skal sammensættes et materiale til 3D-betonprint.

12.9.3.1 Pumpbarhed

Som udgangspunkt skal betonen have egenskaber, som gør det muligt at pumpe betonen frem til printdysen. Derfor kræves blandt andet en tilpas lav viskositet, så der sikres en homogen fremføring af betonen. Viskositeten styres typisk via tilsætning af additiver, eksempelvis superplastificerende tilsætningsstoffer. Ved at optimere pakningen af tilslaget, kan der tillige opnås forbedrede flydeegenskaber – og dermed forbedret pumpbarhed – pga. et højere pastaoverskud.

Mange pumpesystemer velegnet til 3D-betonprint er ikke dimensioneret til at håndtere kornstørrelser større end ca. 8 mm., hvorfor den maksimale kornstørrelse i den udviklede beton ofte må reduceres. Både størrelse og mængde af tilslag kan føre til blokering af pumpesystemet. Geometrien på tilslaget har også en indvirkning på pumpbarheden, idet afrundede tilslag typisk skaber mindre friktion i slangen.

Hvis der anvendes større batches i printprocessen, vil betonen typisk tilsættes en retarder, som kan sikre, at betonen holder sin pumpbare konsistens i længere tid, indtil materialet skal ekstruderes.

12.9.3.2 Ekstruderbarhed

Når betonen forlader printdysen, skal betonen gerne bevare den geometri, som dikteret af printdysens mundstykke. Dette skal sikre præcisionen af de printede lag. Derfor sammensættes betonen typisk med en tilpas høj flydespænding. I nogle printsystemer tilsættes additiver i printdysen, som skal justere konsistensen – eksempelvis et viskositetsmodificerende tilsætningsstof.

12.9.3.3 Bygbarhed

I takt med at der printes flere lag ovenpå hinanden, øges vægten tilsvarende på de underliggende lag. Dette stiller krav til at hastigheden, hvormed betonen udvikler styrke, matcher hastigheden hvormed vægten af oven liggende lag øges. Hvis der er tale om et længere interval mellem hvert lag, kan en normal styrkeudvikling være tilstrækkelig. I mange tilfælde vil der dog være behov for at accelerere betonens styrkeudvikling. Dette gøres ved at tilsætte en accelerator til betonen. Ved at tilsætte acceleratoren i selve printdysen, kan den nødvendige mængde udregnes og tilsættes med stor nøjagtighed som en funktion af materialets fremføringshastighed og mængde.

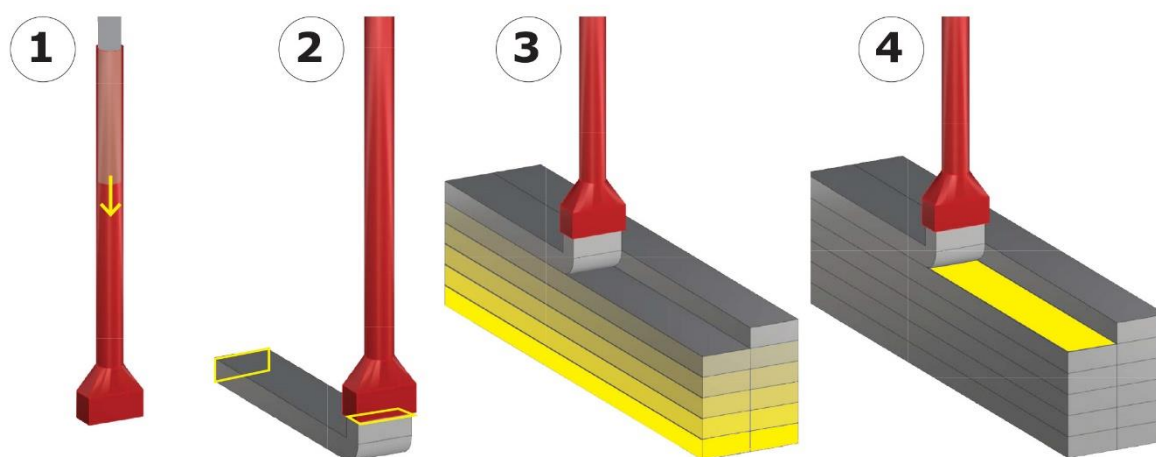
I tilfælde af, at printprocessen skal indkapsle armering, skal der sikres en god omstøbning af denne. Idet der ikke kan anvendes vibrering, skal omstøbningen sikres ved en kombination af betonens reologiske egenskaber samt printstrategi (særligt printretning). Læs mere om armeringsstrategier i afsnittet om konstruktionsstrategier.

12.9.3.4 Vedhæftning

Hvis den printede konstruktion skal betragtes som en homogen konstruktion, skal der være god sammenstøbning mellem printlagene, dvs. at lagene skal printes vådt-i-vådt uden vibrering, og samtidig skal det sikres, at de enkelte lag virker monolitisk.

Udfordringen gælder særligt ved print med lange intervaller mellem printlagene. Her er der behov for at sikre mod udtørring, hvilket kan forværres af forhold som lav fugtighed og meget vind. Dette svarer til modvirkning af kolde støbeskel i konventionel betonstøbning.

Udtørring er ikke kun en udfordring i forhold til vedhæftning. Idet 3D-printede konstruktioner ikke har formsider til at beskytte mod udtørring – samt at printprocessen typisk vil vare længere end en traditionel støbning i støbeform – er der øget risiko for udtørring i forbindelse med alle eksponerede overflader. Risikoen er, at der kan være dårlig vedhæftning mellem de printede lag, samt at der kan opstå uønskede svindrevner [7]. Der er flere løsninger til at minimere problemet, eksempelvis ved dynamisk curing af de eksponerede betonoverflader under printprocessen, tilsætning af additiver til at reducere fordampning, påføring af bindemiddel mellem lagene samt overdækning af byggepladsen i tilfælde af print på byggepladsen.



Figur 4: I en 3D-printproces med beton gennemgås 4 overordnede faser, som stiller forskellige krav til betonens egenskaber: 1) Pumpbarhed, 2) ekstruderbarhed, 3) bygbarhed og 4) vedhæftning.

12.9.4 Materialekarakterisering

En pålidelig 3D-printproces kræver nøjagtig kontrol af reologi, hærdetid og styrkeudvikling gennem de forskellige stadier af printprocessen. Mens lav flydespænding og viskositet er fordelagtig i blande-, pumpe- og ekstruderingsprocessen, er hurtig udvikling af flydespænding og styrkeforøgelse nødvendig efter ekstrudering, for at sikre stabilitet af den printede konstruktion.

Karakteriseringen af disse egenskaber er indenfor betontechnologien blevet udviklet over mange år, men udfordringen indenfor 3D-betonprint udspringer af, at tidsrummet for udviklingen af disse egenskaber er betydeligt kortere end med konventionel beton.

Mens karakterisering af materialeegenskaberne relateret til pumpningen er velkendt og veldefineret, er standardiserede metoder for ekstrudering og den strukturelle opbygning

under hærdeprocessen fortsat under udvikling. I dette afsnit om materialekarakterisering fokuseres der primært på pragmatiske hyppigst anvendte testmetoder til karakterisering af materialer til 3D-betonprint, da disse er mest relevante i forhold til de fleste applikationer samt indledende materialekarakteriseringer.

Karakterisering af pumpbar beton fokuserer på de reologiske egenskaber i den friske beton (læs mere i Betonhåndbogens afsnit 5.1 om konsistens). En af de vigtigste parametre er flydespændingen, og en pragmatisk metode til at definere denne egenskab er ved at måle sætmålet. Herudfra kan den initiale flydespænding ($\tau_{y,s}$) beregnes ud fra følgende ligning [6]:

$$\tau_{y,s} = \rho (25,5 - S_h) / 17,6 , 5 \text{ cm} \leq S_h \leq 25 \text{ cm}$$

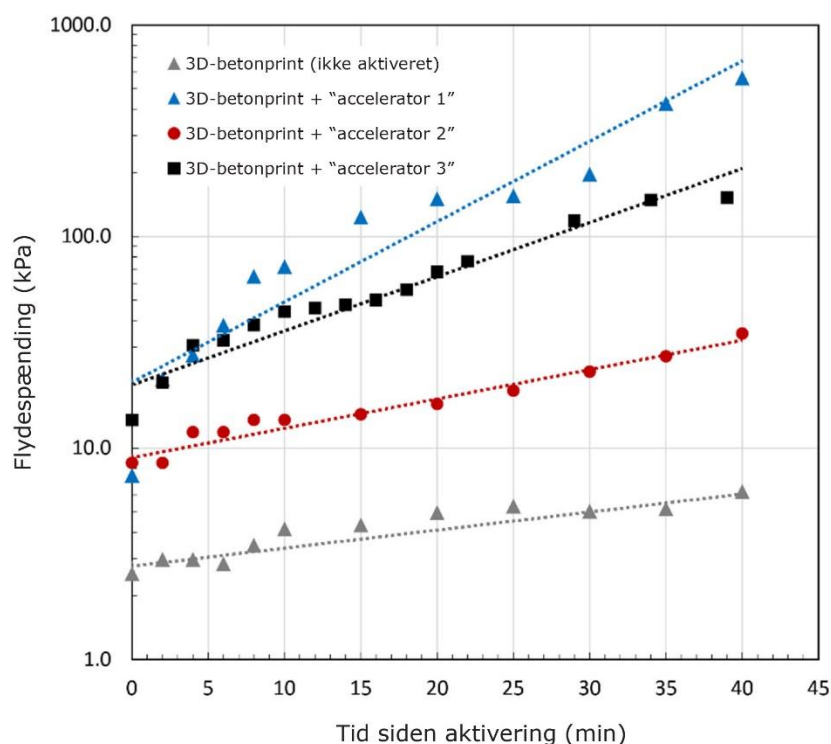
hvor $\tau_{y,s}$ er flydespændingen [kPa], ρ er densiteten af betonen [kg/dm³] og S_h er sætmålet [cm]. For en sætmålsbeton med S_h i intervallet 13 – 22 cm, hvilket typisk er en både pumpbar og ekstruderbar beton, giver det en flydespænding mellem 0,5 og 1,6 kPa. Hvis betonen har selvkompakterende egenskaber – eksempelvis med henblik på at ændre egenskaberne i printdysen inden ekstrudering – kan andre karakteriseringsmetoder anvendes.

Med hensyn til bygbarheden af det printede materiale skal det karakteriseres, hvor hurtigt materialet opbygger styrke, så det kan bære vægten fra de efterfølgende lag ovenover. Hastigheden, hvormed materialet opbygger styrke, er afhængig af størrelsen på den printede konstruktion. For at give en indikation på størrelsesordenen, er den vertikale opbygningshastighed i forbindelse med printede huse på omkring 0,5 m/t, mens den for mindre konstruktioner som søjler er på mellem 2 – 5 m/t. Dermed karakteriseres forskellige printtider og opbygningshastigheder afhængig af konstruktionen, hvorfor det ikke er hensigtsmæssigt at finde én karakteriseringsmetode, som passer i alle situationer.

En af de hyppigst anvendte metoder til at fastlægge den strukturelle opbygning er via et penetrometer beregnet til sprøjtebeton. En anvendt metode er at starte med en Ø20 mm halvkugleformet spids og gradvist reducere størrelsen på spidsen afhængig af materialets udvikling. En sådan test muliggør kvantificering af betonens flydespænding over tid. Ligningen, som knytter penetrationslasten til flydespændingen ($\tau_{y,p}$) for forsøg udført med halvkugleformet spids [8], hedder:

$$\tau_{y,p} = F / 3\pi R^2 ,$$

hvor $\tau_{y,s}$ er flydespændingen [MPa], F er penetrationslasten [N] og R radius [mm] af den halvkugleformede spids. Eksempler på den strukturelle opbygning fra betoner, aktiveret med accelerator, er vist i Figur 5 herunder. Som det fremgår, kan flydespændingen variere markant afhængig af tid og typen af accelerator.



Figur 5: Den målte opbygning af flydespænding for forskellige betoner udviklet til 3D-print med partikelstørrelser op til 8 mm, tilsat forskellige typer af accelerators [6].

Efter en afsluttet printproces er det vigtigt at evaluere, om de mekaniske egenskaber af det printede materiale lever op til kravene. Særligt materialets trykstyrke, bøjestrækstyrke og E-modul er vigtige parametre for det konstruktive design. På grund af den indbyggede lagdeling af den printede konstruktion forventes det, at 3D-printede konstruktioner har en anisotropisk opførsel, dvs. at de mekaniske egenskaber ikke er ens i alle retninger.

Normalt opfattes beton som et isotropt materiale, der opfører sig ens uanset lastretningen, men det er ikke tilfældet med 3D-betonprint. Forskellen varierer i størrelse og afhænger i høj grad af printprocessen; særligt intervallet mellem lagene og udtørningshastigheden.

Derfor bliver materialetests med 3D-printede konstruktioner typisk udført i 3 forskellige retninger på prøver udtaget fra en printet konstruktion med lagdeling, se Figur 6.



Figur 6: Mekanisk bøjetrækprøvning af 3D-printede betonemner. Denne type forsøg udføres typisk i 3 forskellige retninger for at kvantificere indflydelsen af den lagvise opbygning og printretning. Emnet udsættes for tre-punktsbøjning, og brudlasten registreres og omregnes til en trækstyrke.

Et særlig kritisk scenarie er, hvis der printes på byggepladsen med lange intervaller mellem hvert lag. Her kan der risikeres en dårlig vedhæftning mellem de printede lag. Tilgængelige data viser, at et interval på ca. 15 minutter mellem de printede lag er en kritisk grænse, men dette er afhængigt af flere faktorer som betonsammensætning, printstrategi og særligt vejrliget (eksempelvis høje temperaturer og meget vind vil accelerere udtørningshastigheden og kunne medvirke til dannelse af uønskede, kolde støbeskel).

12.9.5 Konstruktionsstrategier

Selv om 3D-betonprint giver nye muligheder – eksempelvis indenfor formgivning – er der også nogle begrænsninger, som der skal tages højde for i planlægning og udførelse af 3D-printede konstruktioner. Lag-på-lag fremstillingsmetoden er radikalt anderledes sammenlignet med traditionelle betonstøbninger i støbeform, hvorfor der kræves nye strategier i fremstillingsprocessen. I det følgende gennemgås en række forhold omkring opbygning, åbninger og armering.

12.9.5.1 Opbygning

3D-printede betonkonstruktioner fremstilles som udgangspunkt uden støbeform. Derfor er der ikke støttende sider, som kan holde betonen på plads, hvilket giver en begrænsning i, hvor meget en printet væg kan udføres med udhæng. Som en tommelfingerregel kan en printet væg udføres med en hældning på ca. 30 grader fra lodret – men det er dog betinget af rette forhold omkring styrkeudvikling samt at den printede konstruktion er designet til at kunne opretholde stabiliteten.

De 3D-printede betonkonstruktioner som frem til 2023 har set dagens lys, kan groft set deles op i 3 hovedkategorier:

1. Dobbeltvægge. I dette konstruktionsprincip printes en formur og en bagmur i beton. Dette efterlader et hulrum, som kan anvendes til isolering. Formur og bagmur forbindes i printprocessen med murbindere. Disse konstruktioner er ikke velegnede til at tage store laster medmindre væggene printes meget brede eller er buede, så den er statisk stærk.

2. Gittervæg. Som ved kantvægge printes en formur og en bagmur – men i stedet for at udnytte hulrummet til isolering, printes en gitterstruktur mellem formur og bagmur, således at de statisk set fungerer som en bred væg. Pga. afstivningen i væggen kan den tage store tryklaster.
3. Forskalling. I dette princip udføres konstruktionen som kantvægge – men i stedet for at fylde hulrummet med isolering, fyldes i stedet almindelig beton i. Dermed fungerer kantvæggene som en forskalling. Fordelen med dette princip er, at væggen kan armeres som en traditionel konstruktion.



Figur 7: 3 overordnede opbygningsprincipper med 3D-betonprint: 1) Print af dobbeltvæg med isolering i hulrummet, 2) Print af dobbeltvæg med printede forbindelseslinjer for stabilitet samt 3) Print af støbeform, hvori der kan støbes (og armeres) på traditionel vis [2].

12.9.5.2 Åbninger

Normalt vil åbninger til vinduer og døre i betonkonstruktioner udføres som udsparinger i støbeformen eller mellemrum mellem elementer. I fraværet af en støbeform må der ved 3D-betonprint anvendes alternative strategier til åbninger. Strategierne, som minder mere om løsningerne i murede konstruktioner, har typisk forskellige understøtninger som omdrejningspunkt, som udgør en midlertidig konstruktion, indtil betonen er hærdnet. Alternative strategier er forskellige blivende konstruktioner, som ilægges og som spænder over åbningerne, og hvor der kan printes videre ovenpå.

12.9.5.3 Armering

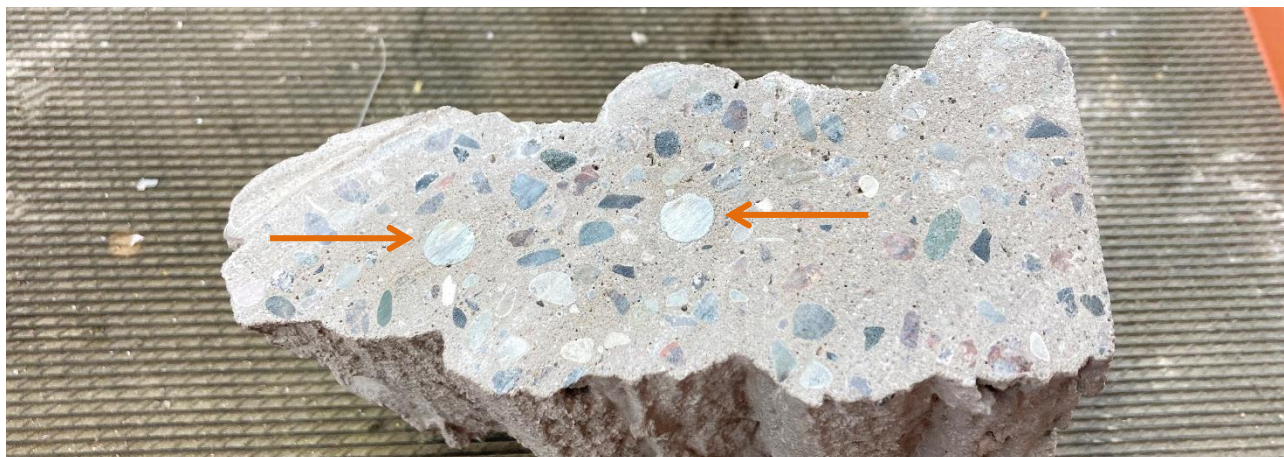
Betons trækstyrke er groft sagt kun mellem 1/10 og 1/20 af trykstyrken. Derfor er langt de fleste betonkonstruktioner armerede, således at der opnås et kompositmateriale med stor styrke i både tryk og træk.

Armering af 3D-printede konstruktioner byder på nogle åbenlyse udfordringer, idet armeringen ikke kan udføres på traditionel vis, hvor armeringen placeres i en støbeform, som efterfølgende udstøbes med beton – enten en selvkomprimerende beton eller en beton som vibreres på plads i støbeformen og skaber en fuldstændig omstøbning af armeringen. Den fuldstændige omstøbning sikrer dels armeringen imod korrosion og nedbrydning og dels sikrer det en god forankring af armeringen.

I det følgende gennemgås en række armeringsstrategier, som anvendes i forbindelse med 3D-printede konstruktioner.

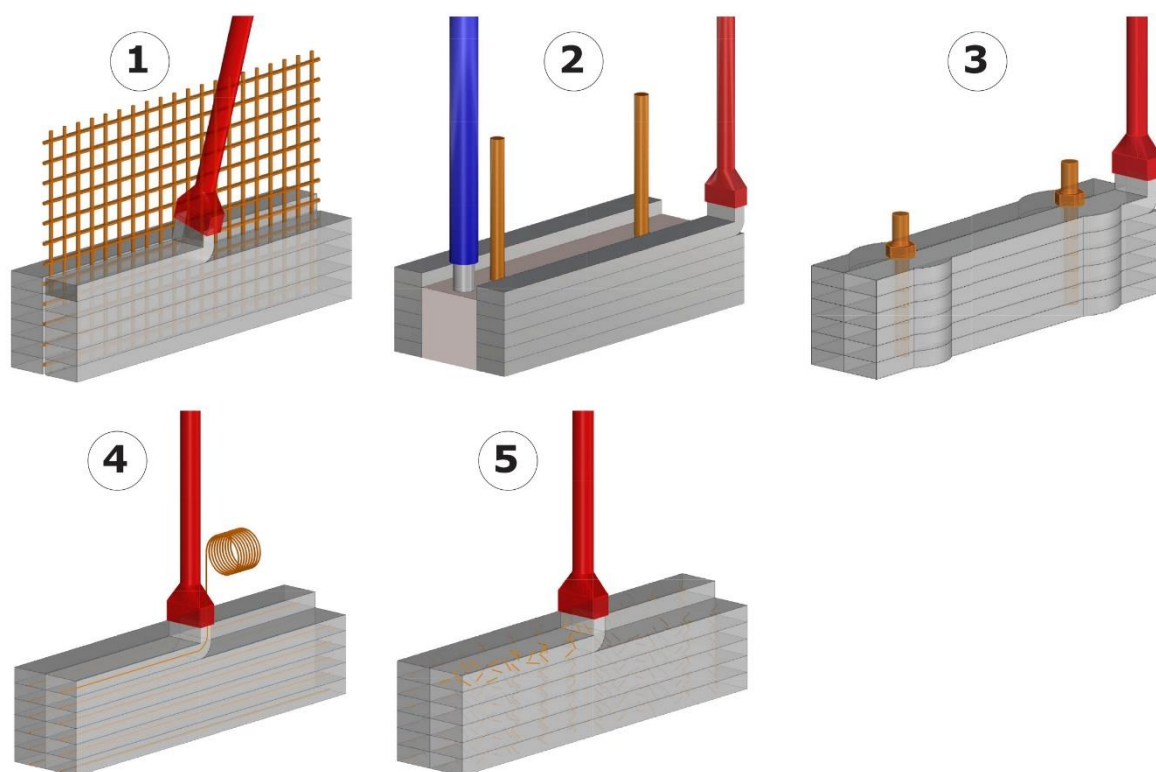
1. Print mod armering. Armeringen – eksempelvis et net i stål eller kulfiber – placeres og fastholdes (her er ikke en støbeform til at fastholde armeringen). Nu printes der udenom og ind imod armeringen for at omslutte denne samtidig med at der opbygges lag-på-lag af beton. Denne metode kræver en fleksibel robotarm

for at undgå kollision med armeringen. En særlig udfordring ved denne metode er, at det kan være vanskeligt at sikre en fuldstændig omstøbning af armeringen. Derfor må det sikres, at materialet ekstruderes ind mod armeringen, eksempelvis ved at dreje printdysens orientering.



Figur 8: Eksempel på omstøbning af traditionel armering via 3D-print, hvor der er blevet printet simultant fra begge sider af armeringsjernet.

2. Print af forskalling. Der printes en forskalling i beton, hvorefter der traditionelt kan placeres armering som udstøbes med beton. Med denne metode kombineres muligheden for fri formgivning via 3D-print med traditionel armeringsstrategi. Metoden er relativt udbredt indenfor 3D-betonprint.
3. Efterspænding. Den printede konstruktion indeholder hulrum, hvorigennem den kan armeres via efterspænding med stålkabler eller gevindstænger. Denne konstruktionsmetode efterlader typisk konstruktionen i konstant tryk.
4. Placering af horisontal armering i printprocessen. I printprocessen placeres horisontal armering mellem de printede lag. Det kan eksempelvis være i form af forbukkede armeringstænger, som placeres manuelt, eller en ståltråd som automatisk bukket og udlægges via printdysen.
5. Fiberarmering. Fibre kan tilsættes til betonmixet eller tilsættes i printprocessen, eksempelvis ved afklipning og blanding ved dysen.
6. Kombination af ovenstående. Typisk vil armering af en konstruktion kræve flere forskellige strategier for at opfylde kravene til den efterfølgende påvirknings-situation.



Figur 9: Armeringsstrategier i forbindelse med 3D-betonprint: 1) Omslutning ved at printe udenom traditionel armering, 2) Print af forskalling og traditionel armerings- og udstøbningstrategi, 3) Efterspænding af printede konstruktioner, 4) Horisontal armering i printprocessen, 5) Fiberarmering hvor fibre iblandes i betonmix.

12.9.6 Anvendelse og potentiale

Selv om 3D-betonprint har vanskeligt ved at konkurrere på især pris og robusthed sammenlignet med standardiserede betonkonstruktioner, åbner teknologien op for helt nye muligheder indenfor blandt andet formgivning, æstetik, materiale- og konstruktionsoptimering, variationer og funktionaliteter.

3D-betonprint giver nogle særlige frihedsgrader i formgivningen, hvor det som udgangspunkt ikke er mere besværligt for 3D-printeren at printe i organiske former end rette linjer. Populært sagt koster formgivning ikke ekstra, mens en støbeform typisk bliver dyrere og vanskeligere at fremstille i takt med øget kompleksitet i formgivningen. Dette giver mulighed for en mere organisk udformning af betonkonstruktioner og dermed arkitekturen.

12.9.6.1 Overflader

En 3D-printet betonoverflade er karakteriseret af afrundede hjørner, som en naturlig konsekvens af printprocessen, samt de horisontale linjer som resultat af lag-på-lag printmetoden. I nogle tilfælde kan disse linjer sløres, hvis der eksempelvis foretages en form for udglatning eller glitning mellem lagene. I andre tilfælde kan lagdelingen udnyttes til at skabe nye mønstre og relieffer i betonen. Dette kan både skabes ved at

varierte printbanerne fra lag til lag samt ved at justere i fremføringshastigheden, hvilket medfører, at printlagenes tykkelse varierer.

En anden mulighed for at udnytte printlagenes opdeling er tilsætning af farvepigment. Normalt vil en betonkonstruktion kun udgøres af én farvenuance, men med 3D-betonprint kan der foretages dynamiske farveskift i printprocessen, hvormed eksempelvis hvert lag kan få sit eget farveudtryk.



Figur 10: Ved dynamisk tilsætning af farve i printprocessen, kan der skabes farvemæssige variationer de printede lag imellem.

12.9.6.2 Konstruktionstyper

Umiddelbart synes 3D-betonprint at være mest velegnet til fremstilling af vægge og søjler, hvor konstruktionerne primært skal optage tryk. Derimod synes det vanskeligere at udnytte teknologien, når der er tale om bjælker og dæk, hvor trækstyrke – dermed øget behov for armering – er en nødvendighed. Dette afspejles også tydeligt i de konstruktioner, som indtil 2023 er blevet printet, hvor der er klar overvægt i forskellige udformninger af vægge og søjler.

Særligt facadevægge har været genstand for en del eksperimenter med 3D-betonprint. Facaden, som jo udgør en bygnings ansigt udadtil, giver mulighed for at vise nye æstetiske muligheder. Mens der i forbindelse med de første byggerier fulgte en del kritik af den visuelle oplevelse – særligt på grund af varierende kvalitet samt den fremmedartede opbygning med "betonpølser" – har flere af de følgende byggerier vist nogle ret interessante udformninger i både geometri og overflade, hvilket er med til at give beton et nyt, ikke tidligere set ansigt.

Søjler er i sin natur interessant for 3D-betonprint, da den typisk er baseret på rene trykkonstruktioner, samtidig med at materialeforbruget er relativt lille. Søjlen som bygningselement indeholder typisk ikke mange forhold, som der skal tages hensyn til såsom udsparringer til vinduer og døre, isolering samt funktionen at omslutte hele rum og bygninger som vægge og facader. Netop skalaen på en søjle byder dog på

udfordringer i printprocessen, da der ofte vil være relativt kort tidsinterval mellem hvert printet lag. Her er det særlig vigtigt at kunne kontrollere en accelereret styrkeudvikling (se afsnittet om materialesammensætning).



Figur 11: To danske eksempler på printede vægge/facader og søjler. Til venstre: 3D-printet betonhus i Holstebro af virksomheden 3DCP (Foto: 3DCP Group). Til højre: Organisk udformet søjle 3D-printet på Teknologisk Institut.

Når der er tale om printede dæk og bjælker, er der ikke mange eksempler som ved vægge og søjler. Et fællestræk er, at de typisk printes som præfabrikerede elementer, der løftes på plads i det endelige byggeri. Enkelte eksempler på dækkonstruktioner har vist potentiale for at printe den ydre formgivning i filigrandæk, hvormed dækkonstruktioners ydre form kan tilpasses en organisk formet bygningskrop.



Figur 12: Cykelbro i Gemert i Holland printet af Eindhoven University of Technology. Eksempel på en 3D-printet bjælkekonstruktion, hvor 3D-printede elementer er blevet efterspændt til et samlet brodæk (Foto: Marczoutendijk).

12.9.6.3 Optimering

Med 3D-printede betonkonstruktioner skal der ikke tages hensyn til, at konstruktionen skal kunne afformes, hvilket eliminerer behovet for slipvinkler og risikoen for indstøbte formdele. Dermed opstår der hidtil usete muligheder for at lave betonkonstruktioner i komplekse former med indesluttede hulrum.

Disse muligheder kan selvfølgelig udnyttes æstetisk i kraft af fri formgivning – men kan samtidig også spille en vigtig rolle i en mere bæredygtig formgivning. En af præmisserne for 3D-betonprint er, at man kun behøver at udlægge materiale, hvor det gør gavn i forhold til den givne konstruktion. Det resulterer typisk i konstruktioner som ikke er massive, men har hulrum, hvilket reducerer materialeforbrug, vægt og printtid.

Særligt det reducerede materialeforbrug kan have en positiv indvirkning på bæredygtigheden af den printede konstruktion. Hvis materialeoptimeringen skal presses til det yderste, kan der arbejdes med topologioptimerede konstruktioner. Denne type konstruktioner har tidligere vist, at materialeforbruget kan reduceres betydeligt sammenlignet med massive konstruktioner.



Figur 13: Eksempel på topologioptimeret brokonstruktion fremstillet via 3D-betonprint på Ghent University (foto: Ghent University / Gieljan Vantygghem).

12.9.7 Litteratur

- [1] R.A. Buswell, W.R. Leal da Silva, F.P. Bos, H.R. Schipper, D. Lowke, N. Hack, H. Kloft, V. Mechtcherine, T. Wangler, N. Roussel, A process classification framework for defining and describing Digital Fabrication with Concrete, Cement and Concrete Research, Volume 134, 1-10, August 2020.
- [2] T.J. Andersen, L.N. Thrane, W.R. Leal da Silva, 3D-betonprint – Arkitektoniske muligheder, Teknologisk Institut, November 2018, (https://issuu.com-/teknologisk108/docs/3dbetonprint_arkitetur)
- [3] D. Lowke, E. Dini, A. Perrot, D. Wenger, C. Gehlen, B. Dillenburger, Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges, Cem. Concr. Res. 112 (C) (2018) 50–65.

- [4] V. Mechtcherine, F.P. Bos, A. Perrot, W.R. Leal da Silva, V.N. Nerella, S. Fataei, R.J.M. Wolfs, M. Sonebi, N. Roussel, Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review, *Cement and Concrete Research*, Volume 132, 1-13, June 2020.
- [5] Christian Munch-Petersen, *Betonhåndbogen*, 4. Betonsammensætning (https://betonhaandbogen.dk/media/bogen/kap_4.0_betonsammens_tning_18092018.pdf)
- [6] Wilson Ricardo Leal da Silva, Martin Kaasgaard. Green Concrete for Sustainable 3DCP. *Concrete International*, Volume: 44, Issue: 4, s. 34-40.
- [7] Geert De Schutter, Karel Lesage, Viktor Mechtcherine, Venkatesh Naidu Nerella, Guillaume Habert, Isolda Agusti-Juan, Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials, *Cement and Concrete Research*, Volume 112, 25-36, October 2018.
- [8] D. Lootens, P. Jousset, L. Martinie, N.Roussel, R.J. Flatt. Yield stress during setting of cement pastes from penetration tests. *Cement and Concrete Research* 39(5):401-408, 2009
- [9] Salet, T. A. M., Ahmed, Z. Y., Bos, F. P., & Laagland, H. L. M. (2018). Design of a 3D printed concrete bridge by testing. *Virtual and Physical Prototyping*, 13(3), 222-236. <https://doi.org/10.1080/17452759.2018.1476064>
- [10] G. Vantighem, W. Corte, E. Shakour, O. Amir, 3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization. *Automation in Construction* 112, January 2020