3D-BETONPRINT

ARKITEKTONISKE MULIGHEDER

TEKNOLOGISK
INSTITUT

Titel
3D-betonprint - Arkitektoniske muligheder

Udarbejdet af
Teknologisk Institut
Gregersensvej 1
2630 Taastrup
Betoncentret

Dato
November 2018

Forfattere
Thomas Juul Andersen
Lars Nyholm Thrane
Wilson Ricardo Leal da Silva

Indhold

INTRODUKTION 4
TEKNIKKEN 5
- Printmetoder 6
  - Case: Robotbaseret betonprinter 7
- Produktionsbaseret design 8
- Betonteknologi 9

GEOMETRI 10
- Hjørner 10
- Samlinger 11
- Udhæng 11

OVERFLADE 12
- Dysegeometri 12
  - Case: Dysegeometri 12
- Farver 13
- Printhastighed 13
- Printretning 13
  - Case: Farveprint 14
  - Case: 5-akset print 15

FUNKTION 16
- Materialeoptimering 16
- Installationer 16
- Termisk kapacitet 17
- Akustik 17
- Luftrensning 17
- Transparens 17

KONSTRUKTION 18
- Konstruktionsprincipper 18
- Åbninger 18
- Isolering 18
  - Case: Betonprint på kulfibernet 19
- Armering 20
  - Case: Efterspænding af elementer 20

ANVENDELSE 22
- Vægge og facader 23
  - Case: Kurvet væg 25
  - Case: Dobbeltkrumt facadepanel 26
  - Case: En vinduesniche 27
- Søjler 28
  - Case: Søjle med indre rum 29
  - Case: Søjle med rotationer 30
- Bjælker 31
- Dækkonstruktioner 31
  - Case: En topologioptimeret bjælke 32
- Monolitiske konstruktioner 33
  - Case: Buekonstruktion i aarhus 34
- Øvrige anvendelsesmuligheder 36

OPSAMLING 37
REFERENCER 38

Introduktion

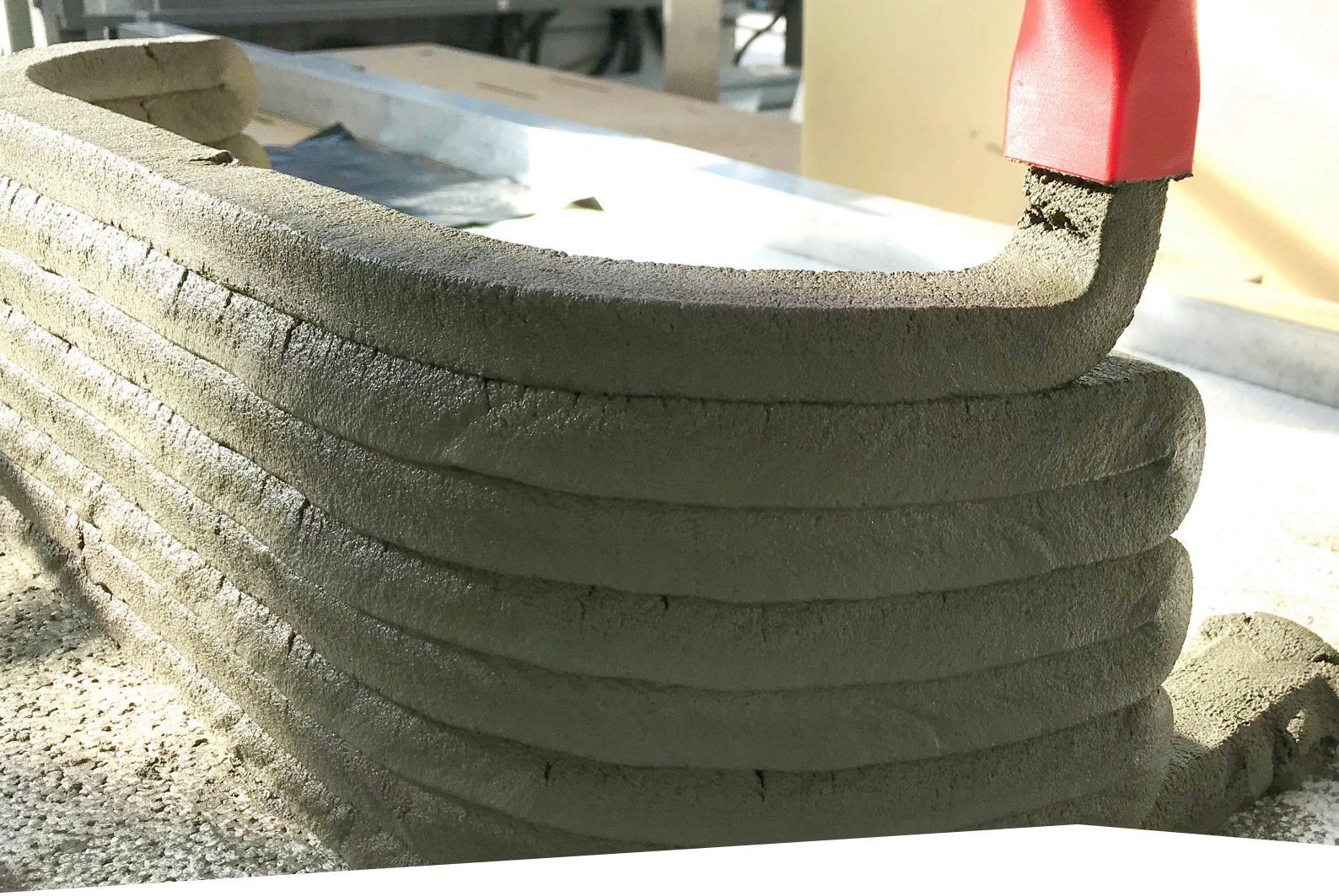
3D-betonprint har fået meget medieomtale de seneste år. Ideen om, at man kan trykke på printknappen, og en printer herefter printer et helt hus i beton, er spændende og tiltagende. Blandt andet derfor er der de seneste år igangsat mange initiativer i hele verden, hvor der udvikles metoder til at kunne 3D-printe med beton til byggebranchen.

I eksempelvis USA, Rusland og især Kina er de kommet forholdsvis langt med at printe beton i bygningsskala. Tendensen i disse lande er, at der er stort fokus på at forbedre produktiviteten i byggeriet. Dette eksemplificeres gennem en række 3D-printede bygningsdele i beton, som ved første øjekast ligner traditionelle bygningsdele, men ved nærmere eftersyn har en overfladetekstur med 3D-prints karakteristiske lagdeling.

Flere steder i Europa er der ligeledes gang i en lang række initiativer omkring 3D-betonprint. Men i Europa synes fokus ikke kun at være rettet mod produktivitetsforbedring, men også mod en udforskning af den nye teknologis arkitektoniske muligheder. Og netop denne afsondring kan vise sig at være rigtig vigtig, hvis 3D-betonprint skal finde sin relevans i fremtidens byggeri. Teknologien skal kunne noget mere end blot at fremstille traditionelle betonkonstruktioner på en ny måde. Den skal kunne fremvise muligheden for at skabe nye konstruktioner som eksempelvis er materialebesparende, har indlejrede funktioner og samlet set giver nye arkitektoniske muligheder.

Formålet med denne redegørelse er, at give et overordnet indblik i, hvilke muligheder og udfordringer der opstår, når 3D-betonprint anvendes til byggeri. Særligt fokus er på de arkitektoniske muligheder der opstår ved introduktion af 3D-print som fabrikationsmetode til fremstilling af betonkonstruktioner. Der gennemgås således forskellige forhold om 3D-betonprint, herunder teknikken bag 3D-print, formgivning af 3D-printede konstruktioner, konstruktionsmæssige forhold samt anvendelsesmuligheder for 3D-printede betonkonstruktioner.

Redegørelsen er udfærdiget i forbindelse med det 3-årige projekt "3D-printet byggeri", som er støttet af Uddannelses – og Forskningsministeriet. Således er konkrete eksperimenter og udviklinger udført i forbindelse med dette projekts fremhævet som cases i redegørelsen.



Teknikken

3D-betonprint er en kompleks teknologi, som kræver ekspertise indenfor flere områder, for at kunne forstå og udnytte teknologien til fulde. Således kræves viden indenfor

- Arkitektur for at kunne designe og udforske nye tektoniske aspekter af 3D-betonprint.
- Bygningskonstruktion for at kunne dimensionere, beregne 3D-printede betonkonstruktioner
- Betonteknologi for at kunne sammensætte betontyper som opfylder de høje krav til 3D-printprocesser
- Robotteknologi for at kunne programmere den digitalt styrede betonprinter baseret på 3D-modeller

Udover at være en multidisciplinær teknologi, adskiller 3D-betonprint sig væsentligt fra den traditionelle måde at støbe beton i støbeforme. Derfor kan 3D-betonprint i mange henseender 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 teglstenene og konstruktionen opbygges i stedet alene af mørtelfugerne printet lag-på-lag.

3D-printprocessen byder således på særlige tekniske udfordringer sammenlignet med traditionel fremstilling af betonkonstruktioner. I det følgende gennemgås nogle af disse tekniske udfordringer samt kendte løsninger hertil.

Printmetoder

Der er mange kendte teknikker indenfor 3D-betonprint. Dog vil de fleste udviklede teknikker typisk være variationer af 2 overordnede tilgange:

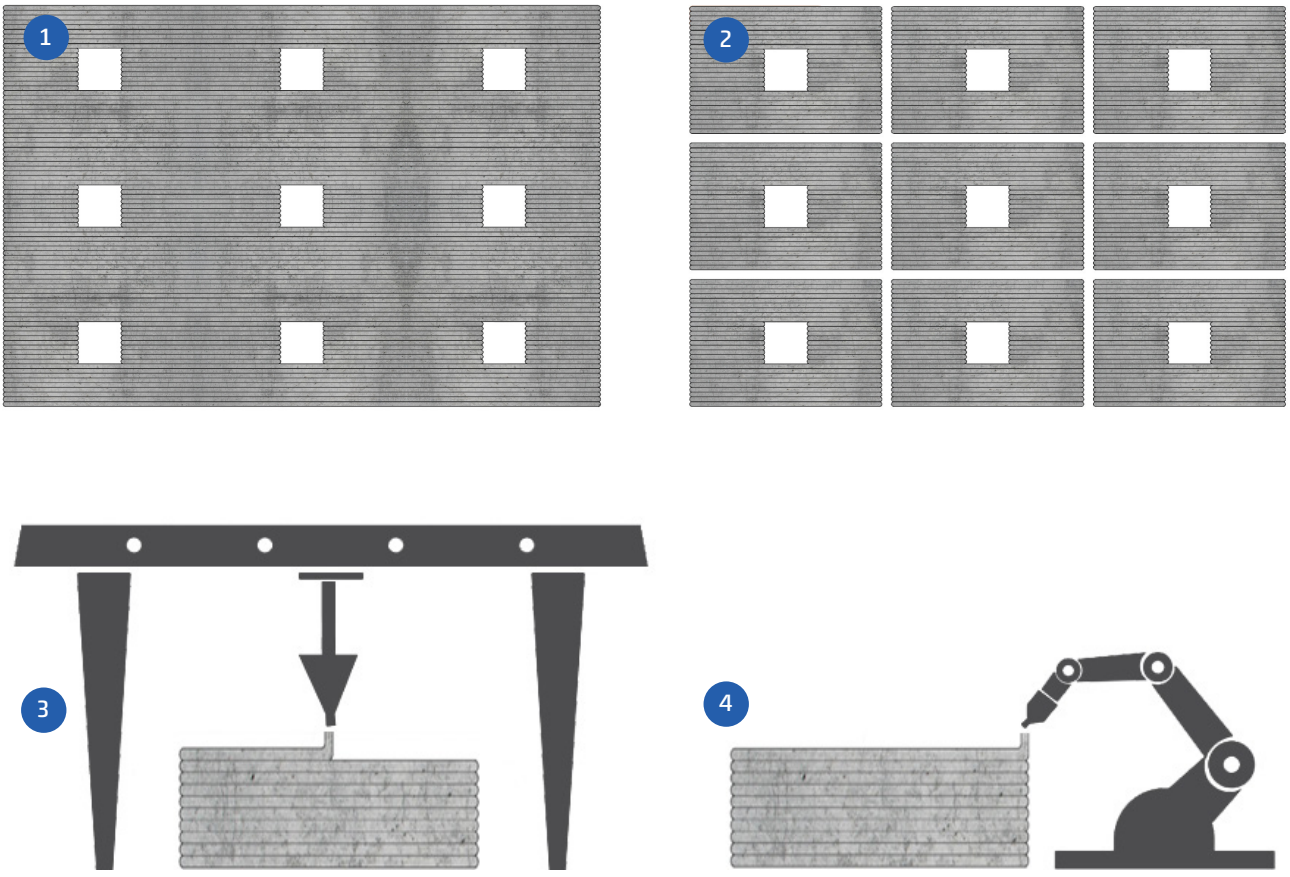
- Ekskstruderingsbaseret 3D-betonprint. Dette er den mest anvendte metode, hvor beton ekstruderes gennem en dyse monteret på et digitalt styret apparat, eksempelvis en robot. Betonen ekstruderes således lag-på-lag baseret på en digital model af den færdige konstruktion. En af de mest kendte variationer er Contour Crafting udviklet i USA af Behrokh Khoshnevis.

- "Particle-bed" 3D-print. Teknik hvor et materiale, typisk sand, udlægges 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. En af de mest kendte variationer er D-Shape udviklet af Enrico Dini.

I denne udredning er der primært taget udgangspunkt i mulighederne med ekstruderingsbaseret 3D-betonprint.

3D-print er velegnet både på byggepladsen til in-situ konstruktioner og på fabrikken til elementfremstilling – eller kombinationen, hvor elementer printes på byggepladsen og løftes på plads.

Ved in-situ print vil printeren ofte være en gantryprinter, dvs. en portalkran med påmonteret printdyse. Dette princip minder mest om en opskalering af plastprinterne. Ved elementfremstilling er også robotprintere en anvendt løsning, dvs. en industrirobot hvorpå der er monteres en printdyse. Der er fordele og ulemper ved begge løsninger. Gantryprinteren har typisk et større arbejdsområde, hvor den skal favne hele den bygning, som skal printes. Robotprinteren er typisk mere fleksibel, hvor dens 6-akser muliggør mere komplicerede printprocesser, herunder 5-akset printning.



3D-print er både velegnet til at printe på byggepladsen, dvs. in-situ print (1), og velegnet til print af betonelementer (2) på fabrik som monteres på byggepladsen. Ved in-situ print vil printeren ofte være en gantryprinter (3), dvs. en portalkran med påmonteret printdyse, og ved elementfremstilling er også robotprintere (4) en anvendt løsning, dvs. en industrirobot hvorpå der er monteres en printdyse.

Case: Robotbaseret betonprinter

I perioden 2016 udviklede Teknologisk Institut en robotbaseret metode til at udføre 3D-betonprint. Metoden er udviklet til print af betonelementer – primært pga. mulighederne i det specifikke laboratoriesetup – men størstedelen af metoden kan overføres til in-situprint. Metoden er baseret på følgende overordnede delelementer:

CAD-CAM: Baseret på CAD-model af den printede konstruktion anvendes offline pro-grammerings systemet RoboDK til simulering af robotbevægelse og generering af robot programmer. RoboDK har udviklet et plugin til CAD-softwaret Rhinoceros, som giver bedre og hurtigere dataflow mellem CAD og CAM.

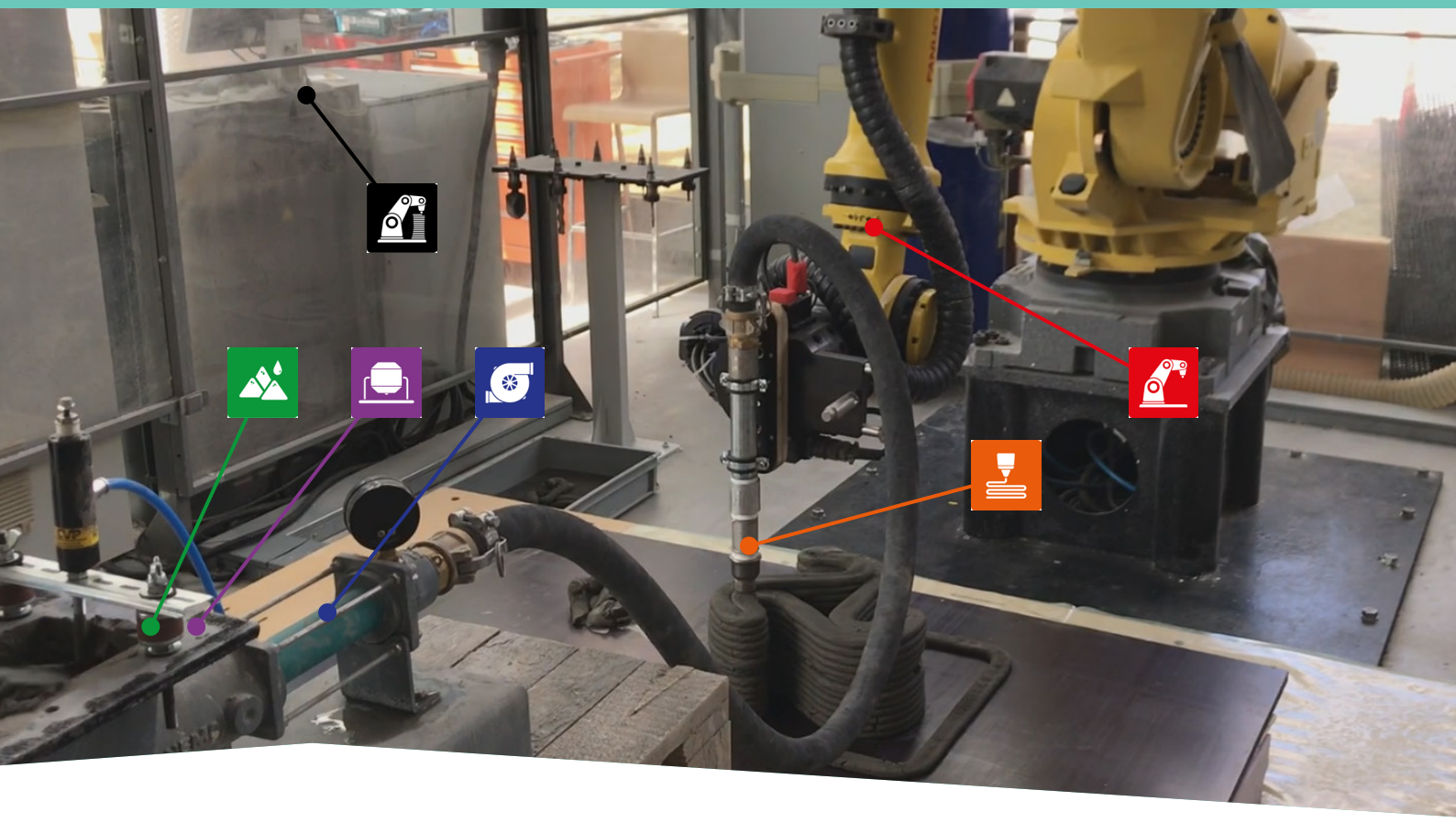
DELMATERIALER: Betonsammensætningen er særligt udviklet til at imødekomme de mange krav til materialer velegnet til 3D-print.

BETONBLANDING: Til metoden anvendes batch-mixing, dvs. at betonens grundsam-mensætning blandes i batches på traditionelt blandeanlæg. Afhængig af specifikke krav til forskellige printopgaver tilsættes yderligere additiver til hvert batch.

PUMPE: Hvert batch fyldes i pumpe som føder betonen op til printdysen monteret på industrirobotten. Pumpen er en excentersnekkepumpe.

ROBOT: Industrirobotten er en Fanuc R-2000iB 165F som – baseret på input fra robotprogrammeringen – bevæger sig i de forudbestemte baner og hastigheder.

EKSTRUDERING: På industrirobottens hoved er monteret en printdyse. Denne består af en fast del, som er forbundet til pumpen med en slange, samt en udskiftelig del, hvor der er mulighed for at montere nye dysegeometrier og funktionaliteter.

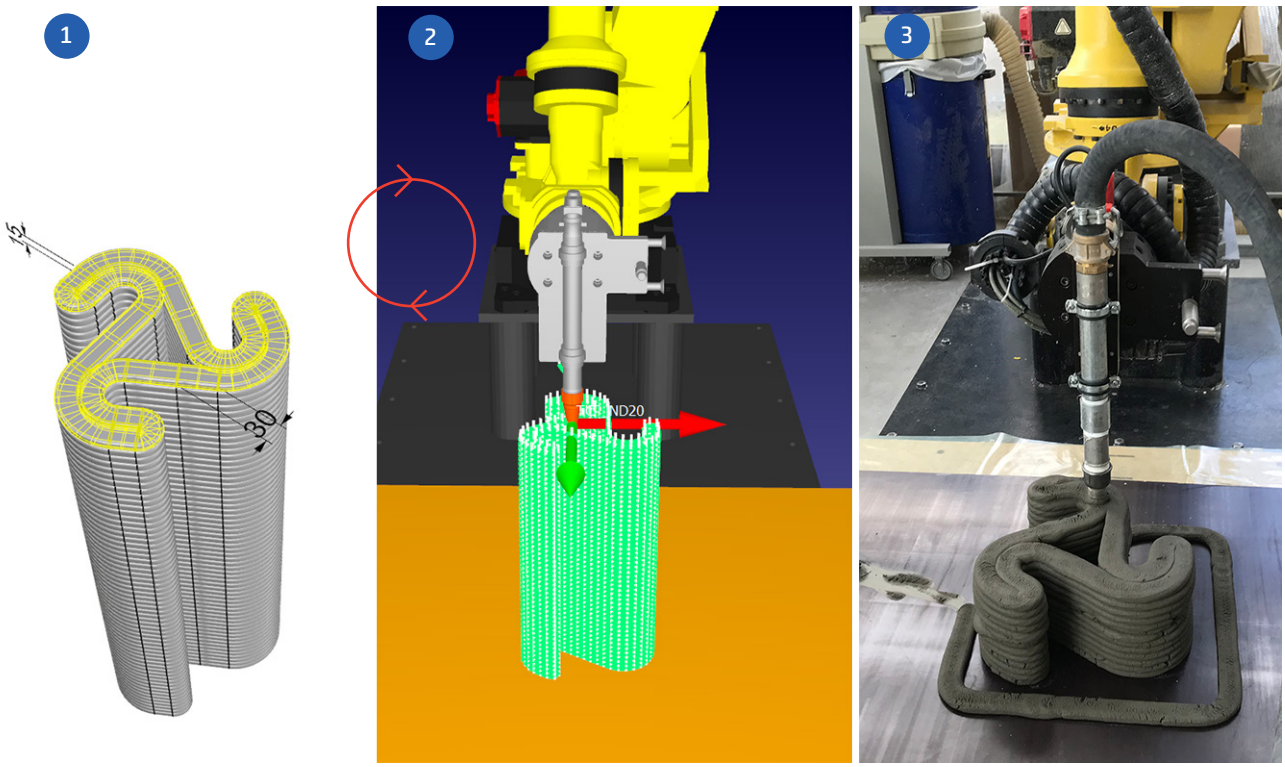


Produktionsbaseret design

Sammen med øvrige digitale fabrikationsteknologier er 3D-betonprint som udgangspunkt baseret på digitale 3D-modeller af de konstruktioner og objekter som skal printes. 3D-modellen frembringes i et CAD-modelleringssoftware og vil oftest være i form af en solid geometri. Via et såkaldt slicer-software, kan 3D-modellen omformes til et program som kan indlæses på betonprinteren.

Dette er dog en meget simplificeret proces, hvor der ikke er mulighed for at udnytte 3d-printteknologiens mange muligheder for at skabe nye typer konstruktioner. Derfor vil der være behov for fabrikationsbaserede designværktøjer, hvor betonprinterens muligheder integreres, eventuelt som plugin til det anvendte CAD-modelleringssoftware. Her vil fabrikationsmetoden vælges allerede i modelleringssoftwaret, hvorefter der tages stilling til eksempelvis geometri, strukturel opbygning af konstruktionen, armeringstype, højde og bredde på printlag, printretning og hastighed samt eventuelle skift i materialeegenskaber.

Herudover kan der være flere parametre tilknyttet den konkrete betonprinter, som er nødvendige for at udfærdige det endelige program til printeren. I teorien vil modelleringen af konstruktionen således ende op med et program som kan indlæses direkte i printeren. Dog er udviklingen endnu ikke helt der, hvor vi blot kan trykke på print. Der er fortsat behov for udvikling på materialer, printprocesser, armeringskoncepter, betonprintere samt især mere præcis forudsigelse af en printproces baseret på valgte parametre og materialeegenskaber. Denne udvikling er nødvendig før pålidelige fabrikationsbaserede 3D-modelleringsværktøjer kan anvendes i praksis.



For at sikre et godt fysisk resultat af et 3D-betonprint (3) - samt for at kunne udnytte nye funktionelle og formgivningsmæssige muligheder - er det vigtigt at have kendskab til processen allerede i designfasen (1). Derved kan der tages højde for både design samt produktionsmæssige forhold som printhastighed, dysegeometri og størrelse mv, som skal anvendes i programmeringsfasen (2).

Betonteknologi

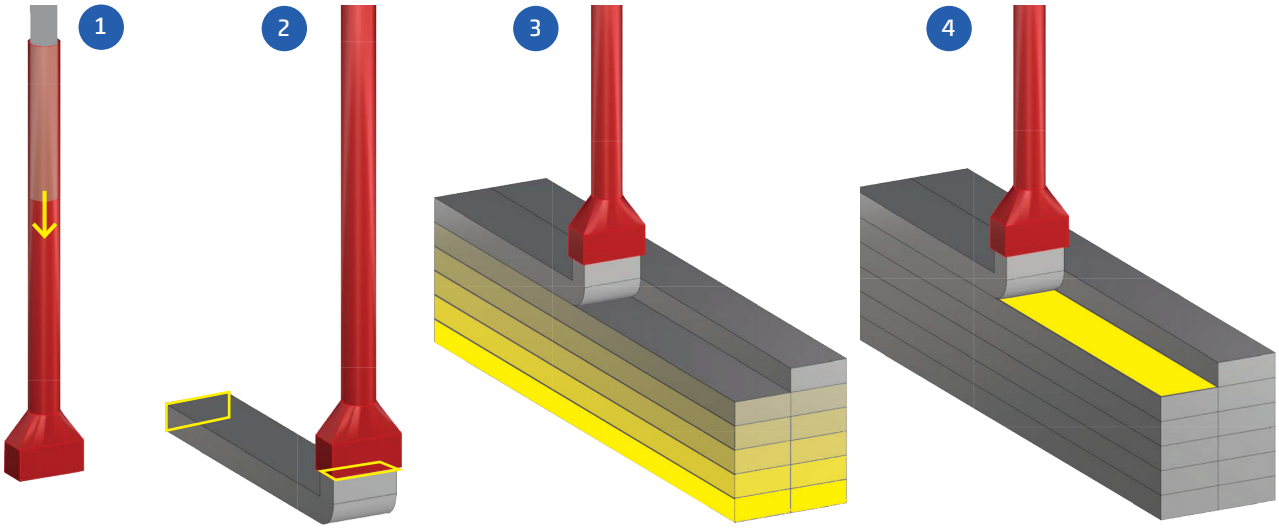
3D-betonprint er en radikal anderledes måde at fremstille betonkonstruktioner på sammenlignet med traditionelle metoder. I dagens betonproduktion bygges en støbeform, hvori der hældes beton som hærdner, og formen fjernes igen. Selvom der selvfølgelig skal være styr på betonens sammensætning og udstøbning, kan resultatet alligevel blive acceptabelt ved variationer i sammensætning og udstøbningsproces. Dette gør sig imidlertid ikke gældende ved 3D-betonprint. Her er vinduet for succes markant indsnævret, og blandt andet er tidsfaktoren en særlig vigtig parameter. Således gennemgår betonen i en printproces 4 overordnede faser, hvor hver fase kræver forskellige betonegenskaber:

1. Pumpbarhed. Som udgangspunkt skal betonen have en konsistens, som gør det muligt at pumpe betonen frem til printdysen. Derfor kræves blandt andet en tilpas lav viskositet. Herudover minimeres typisk stenstørrelsen i betonen, blandt andet for at undgå akkumulering af tilslag, som kan føre til blokering i pumpesystemet.
2. Ekstruderbarhed. Når betonen pumpes gennem printdysen skal betonen holde sin geometri som ekstruderet. Til dette kræves en tilpas høj flydespænding.
3. Bygbarhed. Når der printes lag-på-lag øges vægten på de nederste lag. Derfor skal hvert lag opbygge styrke indenfor relativt kort tid, så de kan holde til vægten af de efterfølgende lag.
4. Vedhæftning. Det er vigtigt at der sker en god vedhæftning mellem hvert printet lag. Derfor skal betonens "åbningstid" være justeret til printhastigheden og hvert lags længde, så der ikke når at ske en udtørring mellem lagene med dårlig vedhæftning som resultat.

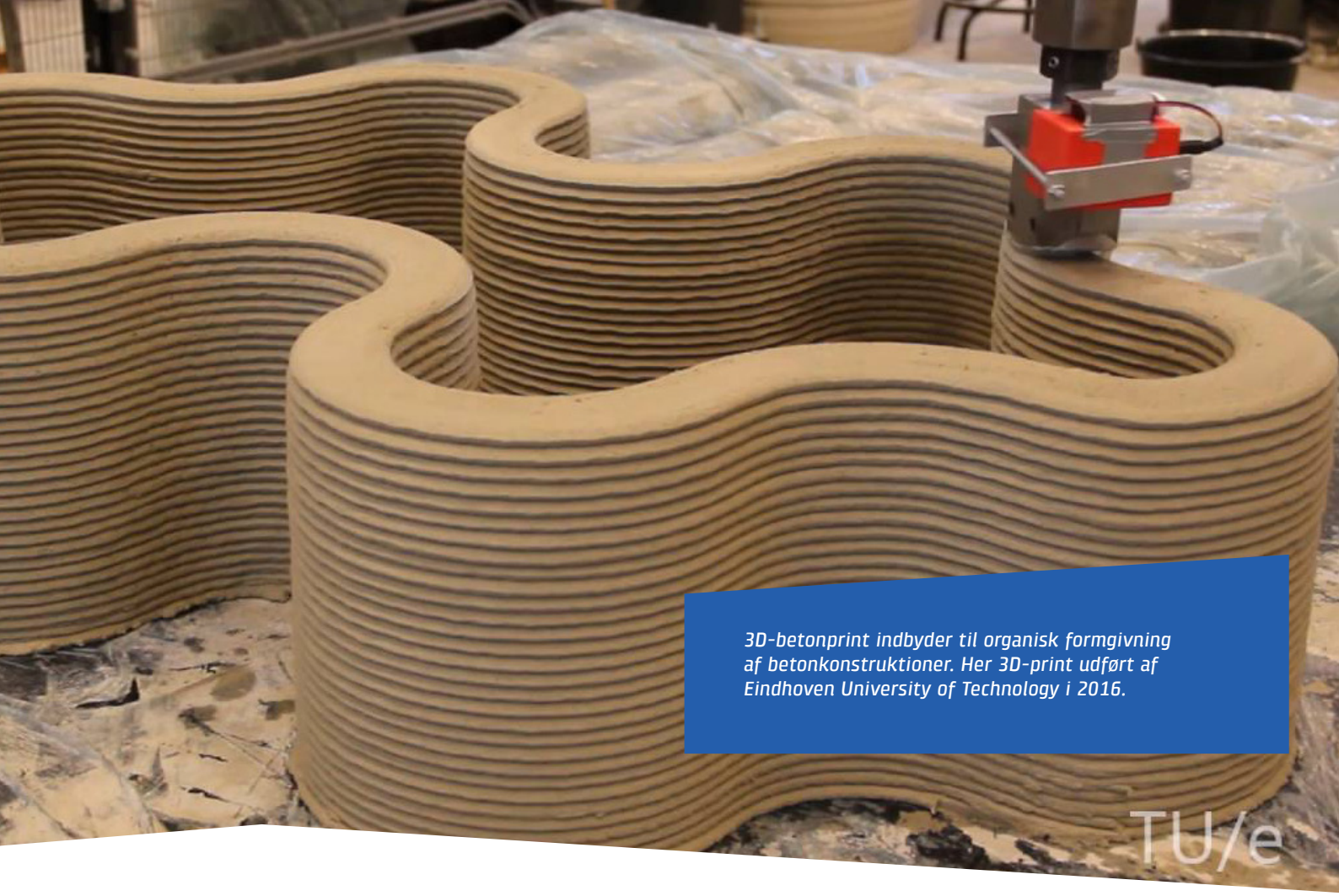
De ovenstående faser og krævede betonegenskaber gør det til en større videnskab at skræddersy betonens sammensætning til 3D-print. Udover grundbestanddele som cement, sand, sten og vand tilsættes forskellige pulvere og tilsætningsstoffer, som skal sikre de ønskede betonegenskaber i de 4 faser.

Herudover skal den printede beton naturligvis også opfylde øvrige krav, som ved traditionelle støbninger, såsom styrke, holdbarhed, modstandsdygtighed overfor eksempelvis frost osv. Det tegner et billede af, at det at printe med beton er som at bevæge sig på en knivsæg, og det at have styr på sin betonsammensætning og printproces er alfa omega i forhold til at opnår et godt resultat med 3D-betonprint.

Eksperimenter fra MIT Media Lab i Californien har endvidere påvist potentialet for at skabe Fuctionally Graded Materials (FGM) med 3D-betonprint. I stedet for at støbe traditionelle, homogene konstruktioner, er det muligt med 3D-betonprint at variere betonens egenskaber i konstruktionens tværsnit, eksempelvis densiteten. Dette princip er inspireret af naturens måde at opbygge eksempelvis knogler, hvor den indre struktur har markant laver densitet med små hulrum. På den måde kan der skabes materialebesparende og lettere konstruktioner uden at gå på kompromis med styrken.



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



3D-betonprint indbyder til organisk formgivning af betonkonstruktioner. Her 3D-print udført af Eindhoven University of Technology i 2016.

Geometri

Der findes i dag mulighed for digitalt at fræse støbeforme ud til beton. Det giver nogle nye formgivningsmæssige muligheder, som man ikke har ved den traditionelle, håndværksfremstillede støbeform. Med 3D-betonprint øges nogle af disse formgivningsmæssige muligheder, dog ikke uden begrænsninger. I det følgende gennemgås nogle af de muligheder og begrænsninger som 3DCP giver i fremstillingen af skræddersyede betonkonstruktioner

Som udgangspunkt tillader 3D-betonprint en fuldstændig fri formgivning. Og det er ikke nødvendigvis mere kompliceret at printe avancerede geometrier i forhold til traditionel formgivning. Det betyder blandt andet, at form ikke koster ekstra, hvilket ellers altid gør sig gældende ved traditionel betonproduktion. Derfor kan det med rette postuleres, at jo mere geometrisk variation, desto mere konkurrencedygtig er 3D-betonprint på prisen sammenlignet med traditionel betonproduktion.

Dog er der en række særlige forhold omkring formgivning med 3D-betonprint, som bør tages med i overvejelserne i udformning af design og arkitektur, som skal fremstilles med 3D-betonprint. De væsentligste gennemgås i det følgende.

Hjørner

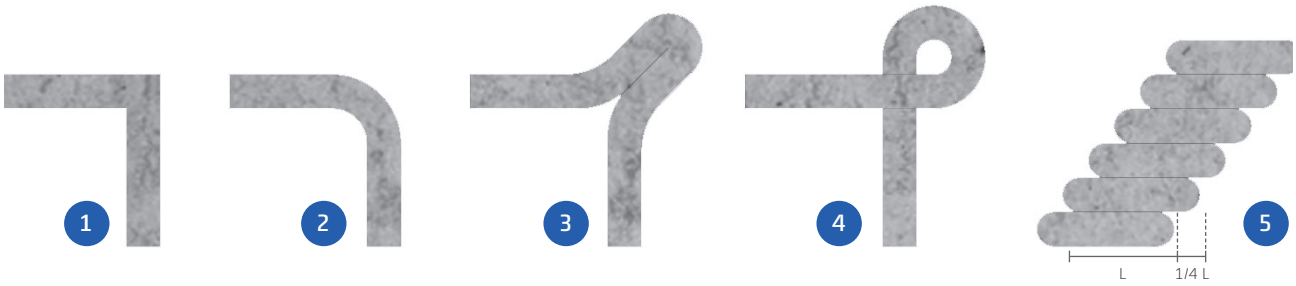
Et af de særlige områder, hvor 3D-betonprint formgivningsmæssigt adskiller sig væsentligt fra traditionel betonproduktion er hjørneløsninger. I traditionel betonfremstilling med støbeforme, vil hjørnerne typisk være skarpe 90 graders hjørner (muligvis med en lille affasning, som hindrer at hjørnet knækker). Ved 3D-betonprint er det rent faktisk vanskeligt at lave et helt skarpt hjørne, som bliver pænt. Et bedre resultat opnås typisk ved at lave afrundede hjørner. Dette iboende karakteristika åbner for nytænkning af hjørneløsninger, så denne umiddelbare problematik vendes til en fordel, hvor der opstår nye arkitektoniske hjørneløsninger som et kendetegn for 3D-betonprint.

Udhæng

Når der printes lag på lag er der en begrænsning i, hvor store udhæng der kan opnås. Som tommelfingerregel skal næste lag ikke hænge udover det forrige lag med mere end 1/4 af lagets/printdysens bredde. Dog vil blot små justeringer af udhænget for hvert printet lag kunne resultere i store variationer i den overordnede geometri på en konstruktion. Udhænget er dog også betinget af, at hele den printede konstruktion er designet til at kunne fastholde stabiliteten.

Samlinger

Med friheden til at formgive betonkonstruktioner, opstår også friheden til at formgive samlinger, så betonkonstruktioner – nok primært betonelementer – kan samles på nye, smarte måder, der både æstetisk og funktionelt giver nye muligheder i byggeriet. Kombineret med parametrisk design, hvor konstruktioner typisk opdeles i et stort antal unikke elementer, opstår mere udtalt behov for skræddersyede samlinger. Med 3D-betonprint vil både formgivning og samlinger kunne fremstilles, uden at der opstår en merpris på grund af det store antal variationer.



Øverst: Ved 3D-betonprint er det vanskeligt at lave et skarpt hjørne (1), hvorfor det bedste resultat typisk opnås ved at lave afrundede hjørner (2). Dette åbner for nytænkning af hjørneløsninger (3, 4). I tilfælde af print med udhæng bør udhænget ikke udgøre mere end 1/4 af lagets bredde.

Nederst: 3D-betonprint indbyder til at eksperimentere med både formgivning og samlinger mellem betonelementer. Emaljehaven fra 2008 af Entasis Arkitekter er et eksempel på, hvordan betonelementer kan formgives og samles på nye måder, så der opstår variation i en facade. Dette kan inspirere til, hvordan den nye teknologi kan tage disse muligheder skridtet videre og skabe nye arkitektoniske variationer.

Case: Dysegeometri

I perioden 2016-2018 blev der afprøvet flere forskellige printdysetyper. Herved blev der afprøvet, hvordan forskellige udformninger af dyser kan fremkomme forskelligt udseende printede lag. Dyserne blev alle fremstillet på en 3D-plastprinter, hvormed et dysedesign indenfor kort tid kunne både designes og fabrikeres klart til betonprintforsøg. På nederste billeder ses 3 udvalgte resultater ved anvendelse af forskellige dysegeometrier og størrelser: 1) Rund printdyse 25 mm., 2) rektangulær dyse, 10x40 mm., 3 rektangulær dyse 20x30 mm.

Overflade

En 3D-printet betonoverflade er typisk karakteriseret af de horisontale linjer, som resultat af lag-på-lag printmetoden. Dermed adskiller den sig fra andre konstruktionstyper- og metoder, herunder også traditionel betonfremstilling, og kan betragtes som et nyt materiale med dets egne karakteristikaer.

Indtil nu har eksperimenter med printede betonoverflader medført en del kritik, som primært går på, at overfladerne har dårlig kvalitet og lag-på-lag metoden giver mindelser om stablede pølser. I flere tilfælde er kritikken måske berettiget, men den bør også føre til en interessant diskussion af, hvilke nye æstetiske kvaliteter 3D-printede betonoverflader kan give i fremtidens byggeri.
I det følgende gennemgås nogle af de forhold, som gør 3D-printede betonoverflader særlige, og hvilke nye æstetiske muligheder som opstår, når betonoverflader printes i stedet for at støbes.

Dysegeometri

Ved at anvende forskellige udformninger af dyser, kan der fremkomme forskelligt udseende printede lag. Eksempelvis vil cirkulære dyser resultere i afrundede lag mens kantede dyser vil give mere kantede udtryk. Ved at variere i dysernes størrelse kan der tilsvarende opnås både små og store lagtykkelse med stor forskel i opfattelsen af skala og det æstetiske udtryk.

Farver

Toner i beton kan skabes ved at ændre cementtypen (hvid og grå) samt anvendelsen af sand i forskellige toner. Herudover kan der skabes en større farvepalet ved at tilsætte farvepigment til betonen. Her skal hvid cement gerne anvendes som cementtype for at opnå stærkere farver. Dette er imidlertid ikke nyt i betonsammenhæng. Dér, hvor 3D-betonprint adskiller sig fra traditionel betonstøbning er muligheden for at skabe farveskift i printprocessen. Dermed kan der skiftes farve fra et lag til det næste, og der kan fremkomme store farvevariationer på en flade.

Printhastighed

Der kan varieres i den printede betonoverflades udtryk ved at variere printhastigheden. Eksempelvis vil en hastighedsreduktion medføre bredere printlag mens hastighedsforøgelse vil medføre smallere lag. Der vil dog typisk kun være tale om hastighedsreduktioner, da udgangspunktet ofte er den højest, mulige hastighed, hvor kvaliteten af printet er acceptabel.

Ved at eksperimentere med printhastigheden kan der endvidere skabes nye overflader med helt andre udtryk end den karakteristiske horisontale lagdeling. Eksempelvis har Technical University of Eindhoven lavet eksperimenter med at printe i ryk, hvormed materialet udlægges i flere retninger. På grund af den digitale proces, som sikrer fuldstændig ensartede bevægelser, opstår der ensartede mønstre.

Printretning

3D-betonprint udføres typisk ensartet lag-på-lag med samme afstand mellem lag. 3D-printprocessen giver dog mulighed for at eksperimentere med printretningen, så der opstår nye udtryk. Eksempelvis kan der printes i mønstre, som kan give helt nye variationer på en flade, og der kan printes "3D-overflader", hvor der printes indre rumdannelser i overfladen. En anden variationsmulighed er at eksperimentere med printdysens orientering. Særligt robotbaserede printer har mulighed for at printe "5-akset", hvor printdysen tiltes i forhold til lodret position.

Øverst: Eksperiment udført af Technical University of Eindhoven, hvor der er printet i ryk, hvilket har resulteret i et ensartet varieret printmønster. Nederst: Inspirationen til at eksperimentere med farveskift i printprocessen kan blandt andet findes i naturen. Her sandstensformationer i Utah/Arizona i USA i røde, gule og hvide nuancer.

Case: Farveprint

For at demonstrere muligheden for at introducere farveskift i løbet af en printprocess, blev der udført en række testprints i 2017 og 2018. I øverst eksempel er der taget udgangspunkt i en hvid beton som er delt op i 3 batches, hvoraf 2 batches er iblandet farvepigment. Således er farven på printet skiftet fra hvid til rød til gul i en kontinuerlig printproces. I nederste eksempel er der 2 batches fra hvid til sort.

Case: 5-akset printretning

I dette eksperiment er der eksperimenteret med printretningen for at skabe et dobbeltkrumt betonpanel. Således er en industrirobot anvendt til først at fræse en dobbeltkrum bund i ekspanderet polystyren. Herefter er samme robot - nu udstyret med printdyse - blevet anvendt til at printe beton følgende den underliggende geometri. Dette kræver 5-akset printning, dvs. hvor printdysen hele tiden ændrer retning, så den står vinkelret på overfladen.

Eksempel på materialebesparende, topologioptimeret betonkonstruktion. Konstruktionen, som blev opført i 2010 gennem udviklingsprojektet Unikabeton, er fremstillet via digital fabrikation af støbeforme.

Funktion

Med nye digitale værktøjer til fremstilling af bygningskonstruktioner, opstår der også nye muligheder for at arbejde med indlejring af funktionaliteter. 3D-betonprint er således også en teknologi som åbner nye muligheder herfor.

Materialeoptimering

Når der støbes beton traditionelt, anvendes en støbeform. Her vil der blive taget højde for, at det støbte emne skal kunne afformes igen. Dette gøres typisk ved at sikre, at eventuelt lodrette sider i støbeformen (vinkelret på støbeformen) gøres en anelse koniske, så der opstår en slipvinkel, der gør afformningen lettere. I nogle enkelte tilfælde ved anvendelse af elastiske formmaterialer, vil dette dog kunne udfordres til en hvis udstrækning.

Med 3D-betonprint er der ikke samme restriktioner til udformning og design, hvilket selvfølgelig skaber en udvidet arkitektonisk frihed i formgivningen. Endvidere skal der ved 3D-betonprint ikke udfyldes et hulrum som i en støbeform, og det er derfor naturligt at optimere processen og kun udlægge materiale dér, hvor der er brug for det. Derfor er printede konstruktioner typisk ikke massive, men har hulrum som både sparer materiale, printtid og vægt.

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.

Installationer

I de fleste konstruktioner vil der være behov for forskellige installationskanaler til vand, varme og el. Med den rette planlægning kan der tages højde for disse installationskanaler i printprocessen, således at der printes hulrum hertil. Hvis denne mulighed skal benyttes, skal der være styr på installationskanalerne allerede i den tidlige fase, inden produktionen af betonen igangsættes.

Termisk kapacitet

Beton har en høj termisk kapacitet, hvilket i praksis betyder, at beton eksempelvis bidrager positivt til at stabilisere indeklimaet. Dette sker ved at betonen i løbet af dagen kan absorbere og lagre varme fra omgivelserne – og dermed bidrage til at holde en mere jævn temperatur i indeklimaet – for derefter at afgive varmen igen om aftenen. Idet varmen optages igennem betonens overflade, kan denne effekt øges ved at øge overfladearealet. 3D-printede betonoverflader har typisk et større overfladeareal end en glat overflade pga. lagdelingen – men ved at eksperimentere med printprocessen (retning, hastighed, geometri osv.) kan der opnås væsentlige overfladeforøgelser, som både kan bidrage positivt til det æstetiske udtryk og den termiske lagring.

Akustik

Tidligere udviklinger har peget på, at beton kan have en positiv akustisk effekt, hvis der eksperimenteres med overfladen. Teknikken kendes blandt andet fra akustiske teglsten, hvor huller i stenene tillader visse lydbølger at passere igennem stenen og ind til et bagvedliggende absorberende materiale. Samme teknik kan overføres til beton – og med 3D-print kan der printes i mønstre som resulterer i huller i betonen. Disse huller kan dermed både have en æstetisk kvalitet og samtidig bidrage til en forbedret akustik.

Luftrensning

Tidligere eksperimenter har vist, at beton iblandet stoffet titaniumdioxid har både en selvrensende og en luftrensende effekt. Det skyldes, at titaniumdioxid katalyserer omdannelsen af giftige NOx'er fra eksempelvis udstødning til uskadelige nitrater. Ulempen er, at det er en relativ dyr betontype, hvorfor det oftest forsøges anvendt blot i betonens overflade, hvor selve katalysen foregår. Dette giver ofte besværlige støbeprocesser – men med 3D-print synes det helt oplagt at kunne printe blot det yderste lag med beton tilsat titaniumdioxid, og den indre struktur med en billigere betontype.

Transparens

Indlejring af lysledere giver mulighed for transparente konstruktioner. I dag anvendes lysledere i betonkonstruktioner typisk ved, at lyslederne placeres i en støbeform, hvorefter formen udstøbes med beton. Det særligt tidskrævende og omkostningstunge ved denne proces er, at hver enkelt lysleder både skal placeres og fastholdes i en bestemt position i støbeformen. Ved 3D-print kan lysledere placeres løbende i printprocessen, eksempelvis efter hvert printede lag. Dermed optimeres processen, da lyslederne ikke skal fastholdes i støbeprocessen.

3D-betonprint åbner op for at indlejre flere funktionaliteter i betonen, eksempelvis lysledere (venstre) og avancerede overflader til akustisk- og termisk regulering (højre).

Konstruktion

3D-printede konstruktioner vil typisk blive anvendt som dele af råhuset i et byggeri, fortrinsvis i form af søjler og vægge – mere om dette i afsnittet om Anvendelse. I nærværende afsnit behandles hvilke grundprincipper der findes i forhold til at lave statiske konstruktioner med 3D-betonprint samt hvordan disse konstruktioner kan armeres, isoleres og udspares.

Konstruktionsprincipper

De 3D-printede betonkonstruktioner som indtil videre har set dagens lys, kan groft set deles op i 3 hovedkategorier:

- Kantvægge. 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. Kantvægge er ikke velegnede til at tage store laster medmindre kanterne printes meget brede eller væggene er buede, så den er statisk stærk.
- 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 formur og bagmur statisk set fungerer som en bred mur. Pga. afstivningen i væggen kan den tage store tryklaster.
- Forskalling. I dette princip udføres konstruktionen som kantvægge – men i stedet for at fylde hulrummet med isolering, fyldes i stedet beton i. Dermed fungerer kantvæggene som en forskalling. Fordelen med dette princip er, at væggen kan armeres som en traditionel konstruktion.

Åbninger

Når 3D-printede betonkonstruktioner anvendes som vægge, vil der i flere situationer være behov for at lave åbninger til døre og vinduer. Her er printprocessen udfordret, da der er behov en understøtning for printet, der hvor der skal være en åbning. I elementproduktion kan dette løses ved at printe liggende (hvilket dog giver nogle formgivningsmæssige begrænsninger). En alternativ løsning er at opstille en understøttende forskalling udvalgte steder eller printe med et materiale, som nemt lader sig fjerne efterfølgende. Ved sidstnævnte løsning pågår der en del eksperimenter blandt andet baseret på ler og majsstivelse som begge er genanvendelige produkter.

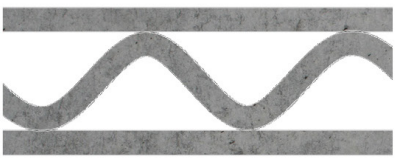
Det skal nævnes, at udfordringen med udsparinger ikke eksisterer i samme omfang med den tidligere omtalte printmetode "Particle-bed" 3D-print. Her sikrer det jævnt udlagte materiale, at det næste lag er understøttet.

Udover en nødvendig specialløsning ved udsparinger, er der ligeledes behov for at tænke på armering – enten i printprocessen eller simpelthen ved at indbygge en armeret bjælke som kan optage konstruktionens laster.

Isolering

Hvis 3D-printede betonkonstruktioner anvendes som en del af klimaskærmen, skal der indtænkes, hvorledes konstruktionerne isoleres. I det følgende gennemgås nogle eksempler på, hvorledes isolering kan indgå i printprocessen.

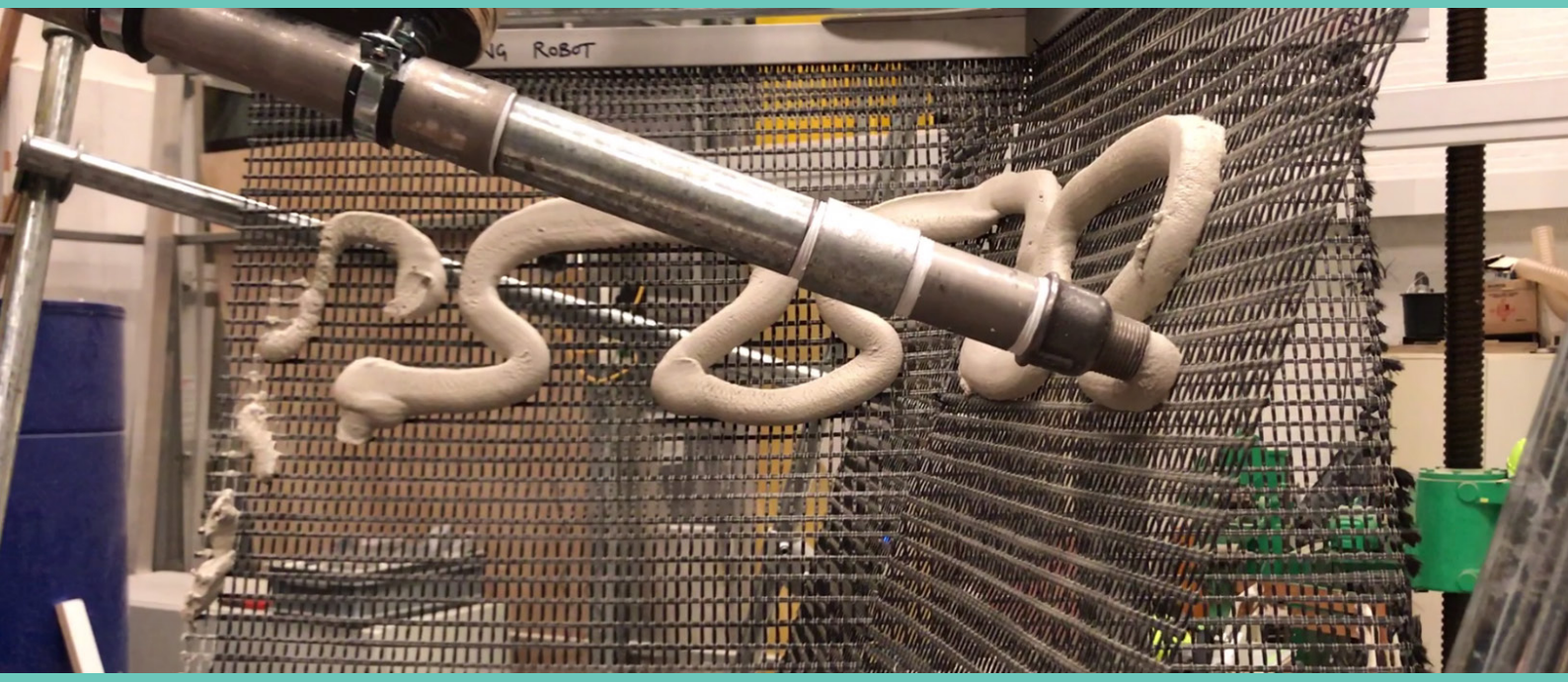
- Printet isolering. Isoleringen printes/sprøjtes ud, så den kan indgå direkte i 3D-printprocessen
- Traditionel isoleringsstrategi. Der printes en formur og bagmur, hvorimellem der kan isoleres med bats, fibre og lignende. Denne teknik er blandt andet blevet anvendt af 3D Printhuset i forbindelse med opførelsen af "The BOD".
- Isolering som forskalling. Isoleringen kan udgøres af skummaterialer, eksempelvis EPS, PUR og lignende. Disse materialer kan fræses til ønskede geometrier og udgøre en form for blivende forskalling.



3D-printede betonkonstruktioner, som indtil videre har set dagens lys, kan groft set deles op i 3 hovedkategorier: 1) Print af kantvægge, 2) Print af sammenhængende gittervægge, 3) Print af forskalling til efterfølgende udstøbning.

Case: Betonprint på kulfibernet

I et samarbejde mellem Teknologisk Institut og CITA fra Det Kongelige Danske Kunstakademis Skoler for Arkitektur, Design og Konservering (KADK) er der blevet udviklet en ny hybridkonstruktion baseret på betonprint på kulfibernet. Metoden er beskrevet i artiklen "Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks", præsenteret på konferencen ROBARCH, Zürich 2018. Metoden udfordrer den traditionelle tankegang i 3D-betonprint om at stable betonlag, ved at printe direkte på kulfiberarmeringsnet udspændt i dobbeltkrumme konstruktioner. Metoden udnytter industrirobottens mulighed for at arbejde 5-akset i rummet og dermed opstår muligheden for at skabe lette, armerede bygningskonstruktioner med 3D-betonprint.



Case: Efterspænding af elementer

Efterspænding af 3D-printede betonelementer blev demonstreret i forbindelse med fremstillingen af et udsnit af en buekonstruktion. De printede elementer havde en triangulær geometri med hulrum i midten. De printede elementer blev samlet 3 og 3 med en spændestav igennem for efterspænding.

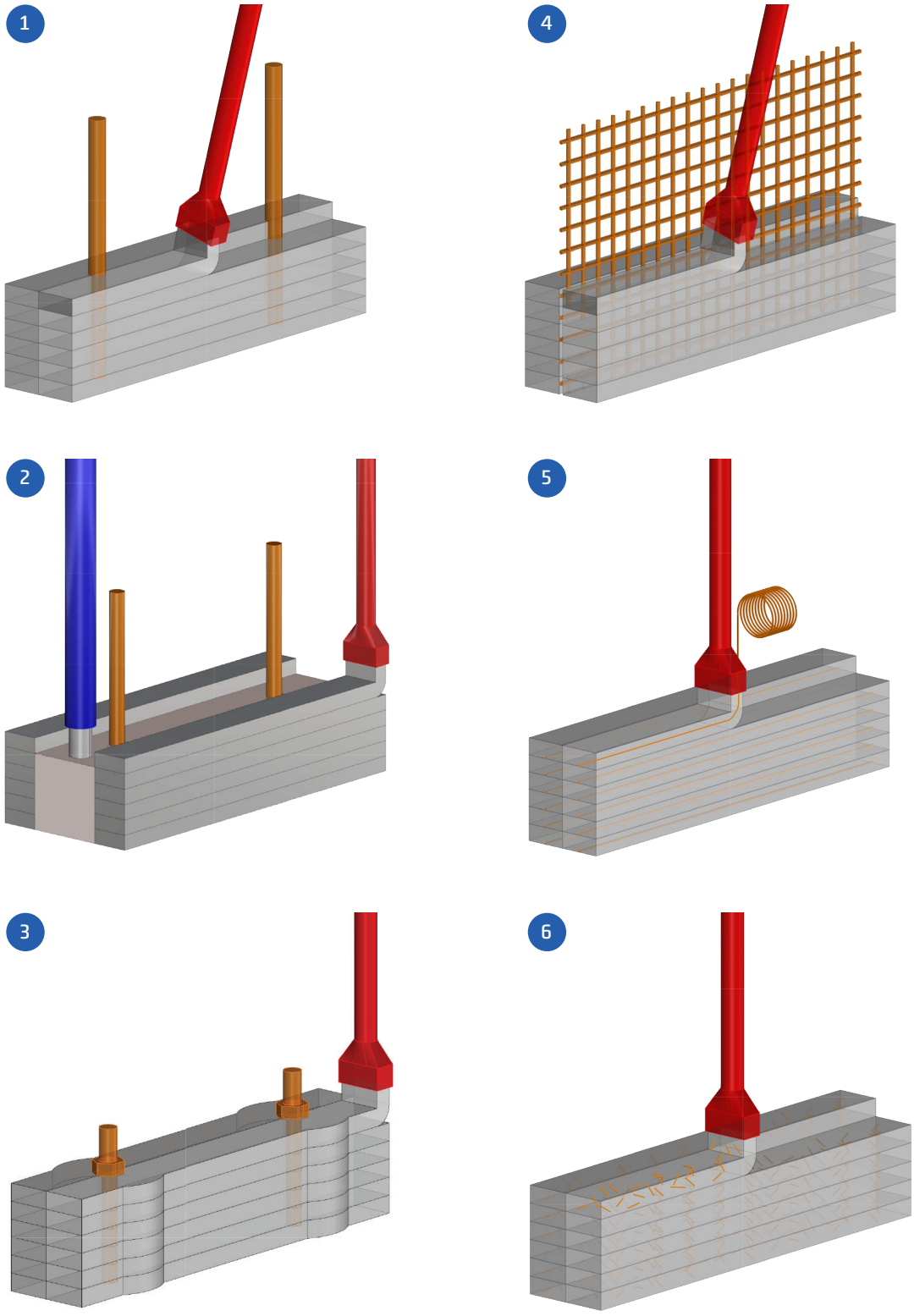
Armering

Betons trækstyrke er groft sagt kun 1/20 af trykstyrken. Derfor er langt de fleste betonkonstruktioner armerede, således at der opnås et kompositmateriale med stor styrke i alle retninger.

Med 3D-betonprint findes der fine metoder til at lave rene trykkonstruktioner, hvor behovet for armering er minimalt. Dog giver uarmerede konstruktioner store begrænsninger i forhold til udnyttelsen af betons statiske- og formgivningsmæssige muligheder.

Der er gennemført forskellige eksperimenter med at implementere armering i en 3D-printproces. Udvalgte principper gennemgås i det følgende:

1. Omslutning af armering. Armering placeres og fastholdes inden printprocessen. Der printes nu udenom armeringen. Det er vigtigt at armeringen omstøbes korrekt, eksempelvis ved at dreje printdysen, så der printes ind mod armeringen, eller ved at sikre en tilpas flydende beton, som kan omslutte armeringen efter udlægning. Teknikken er blandt andet blevet benyttet af den kinesiske byggevirksomhed HuaShang Tengda.
2. Traditionel udstøbning om armering. Der printes en forskalling i beton, hvorefter der traditionelt kan placeres armering som udstøbes med beton. Teknikken er blandt andet anvendt af den danske virksomhed 3D Printhuset i forbindelse med opførelsen af "The BOD".
3. Efterspænding. Der printes uden armering – men de printede elementer armeres ved efterspænding af kabler mellem elementer. Dette kan både udføres i selve konstruktionen – eller som et slags exoskelet udenpå konstruktionen. Sidstnævnte er blandt andet blevet demonstreret i Italien af Universitetet i Napoli gennem fremstilling af en efterspændt 3D-printet betonbjælke.
4. Kulfiberarmering. Kulfiberarmering er fleksibelt og kan relativt nemt formes til den ønskede geometri. Herefter kan der printes på kulfibernettet, så det omsluttes af beton. Princippet er blevet demonstreret gennem et samarbejde mellem Teknologisk Institut og CITA, se CASE-beskrivelse
5. Trådarmering. Via flerfunktionsdyse udlægges betonprint og armeringstråd i samme proces. Dermed placeres en fleksibel armeringstråd mellem hvert printet lag eller i faste intervaller. Teknikken er blandt blevet udviklet og demonstreret på TU Eindhoven i Holland.
6. Fiberarmering. Fibre kan tilsættes til betonmixet eller tilsættes i printprocessen, eksempelvis ved afklipning og blanding ved dysen. Ved sidstnævnte skal fibrene ikke via pumpeprocessen og risiko for at ødelægge pumpeudstyret minimeres. Fiberarmeret 3D-betonprint er blandt andet blevet demonstreret af Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) via fremstillingen af en 3D-printet fodgængerbro i Madrid.



Der eksperimenteres fortsat med at finde egnede løsninger til at armere 3D-printede betonkonstruktioner. Nogle af de anvendte principper er: 1) Omslutning ved at printe udenom traditionel armering, 2) Traditionel armering ved print af forskalling og normal udstøbning, 3) Efterspænding af printede konstruktioner, 4) Kulfiberarmering hvor betonen printes på kulfibernettet, 5) Trådarmering hvor armeringstråd automatisk udlægges mellem printlag i printprocessen, 6) Fiberarmering hvor fibre er iblandet betonen.

I Kina er der opført flere huse med 3D-betonprint. Dog synes de arkitektoniske muligheder ved anvendelsen af den nye fabrikationsteknologi ikke udnyttet.

Anvendelse

Hvor der i de foregående afsnit er kigget på, hvordan 3D-betonprint adskiller sig fra traditionel betonproduktion – muligheder og begrænsninger – bliver der i dette afsnit set på, hvilke konstruktionstyper der er relevante i forhold til at blive produceret med 3D-betonprint. Således gennemgås nogle allerede printede eksempler samt nogle betragtninger om, hvilke konstruktionstyper der synes oplagte at printe og indpasse i fremtidens byggeri.

3D-betonprint synes ikke at kunne konkurrere med dagens fremstilling af standardiserede betonkonstruktioner. Her er metoderne i forvejen optimerede, så der kan leveres standardprodukter i høj kvalitet til en forholdsvis lav pris. Måske kan der ændres på dette i en senere fremtid. Dér, hvor 3D-print har en særlig berettigelse, er når konstruktionerne enten er særlige i forhold til formgivning og overflade eller har indlejret diverse funktionaliteter – eller en kombination af form, overflade og funktion.

Udviklingen især i Asien har dog vist, at 3D-print har slået igennem uden at byde på hverken ny formgivning eller indlejrede funktionaliteter. Her er de fleste printede huse blot traditionelle huse fremstillet med en ny teknologi. I denne kontekst er det primært potentielle fordele, såsom at fjerne manuelle håndværksoperationer og øge produktiviteten, som er den potentielle gevinst. Om disse gevinster er opnået i de konkrete eksempler fra Kina er uvidst. Emner som produktivitet, arbejdsmiljø mv. er meget relevante i diskussionen om indførelse af 3D-betonprint, men behandles ikke yderligere i denne redegørelse, hvor der i stedet er fokus på de arkitektoniske muligheder.

I stedet rettes i denne redegørelse fokus mod, hvordan 3D-betonprint som en ny teknologi i byggebranchen kan bibringe nye arkitektoniske løsninger. Der refereres ofte – lidt fejlagtigt – til 3D-printede bygninger, når medierne omtaler projekter med 3D-betonprint. I praksis er der ikke tale om, at hele bygningen 3D-printes – oftest vil der være tale om, at dele af råhuset er printet, typisk søjler og vægge. Derfor nedbrydes nedenstående gennemgang i nogle overordnede konstruktionstyper, hvor potentialet med 3D-betonprint vurderes.

Vægge og facader

Den nuværende udvikling indenfor 3D-printet beton har særligt fremvist eksempler på forskellige væg- og facadeudformninger – samt søjler som behandles i det efterfølgende. Her synes teknologien at være mest oplagt, måske på grund af den fundamentale tilgang med lag-på-lag, som i det traditionelle byggeri mest minder om måden af bygge sten-på-sten med mursten. Her ses også primært murede vægge og facader, mens mursten ikke anvendes nævneværdigt til udformning af bjælker og dæk.

Sammen med åbninger, i form af døre og vinduer, er det facaden som udgør en bygnings ansigt udadtil. Derfor er der særligt fokus på, hvordan en 3D-printet facade fremstår æstetisk. Som beskrevet i afsnittet om overflader, har metoden medført en del kritik af den visuelle oplevelse af overfladerne. Men med alle de nye muligheder som opstår, bør der åbne sig en værktøjskasse som blot venter på at blive anvendt. Hermed kan 3D-printede overflader give nye æstetiske oplevelser i facaden, som gør, at betonen ikke ønskes pakket væk af andre materialer.

Der er flere eksempler på 3D-printede vægge og facader som allerede er produceret, primært prototyper og forsøgsbyggerier. Disse har i større eller mindre grad vist mulighederne ved især formgivning af 3D-printede konstruktioner. Den kinesiske virksomhed Winsun har stået bag flere byggerier, primært i Kina. Deres tilgang er at 3D-printe vægge og facader på deres fabrik, hvorefter de flyttes og monteres på byggepladsen. De har udviklet et konstruktionssystem bestående af en formur og bagmur og med zig-zag printmønster til at binde sammen. Dog er deres tilgang snarere at opføre traditionelle huse med den nye teknologi frem for at undersøge nye arkitektoniske muligheder med den nye teknologi.

Andre projekter udfordrer arkitekturen mere, eksempelvis russiske Apis Core, som har opført et 100 m^2 stort hus i Stupino i Rusland med kurvede vægge og facader er printet i beton på stedet. Også 3D Printhuset (Danmark) viser med deres 50 m^2 store bygning "The BOD", i København, hvordan der kan printes kurvede vægge og facader på stedet. Her er facaderne printet med ydermur og indermur og isolering i hulrummet. Mens Apis Cor og 3D Printhuset fokuserer på in-situ printede konstruktioner, fokuserer den hollandske virksomhed Cybe Construction i højere grad på print af betonelementer – dog gerne på stedet, hvilket et printet hus i Milan vidner om. Her er huset opført at betonelementer printet på stedet og som udgør husets vægge og facader.

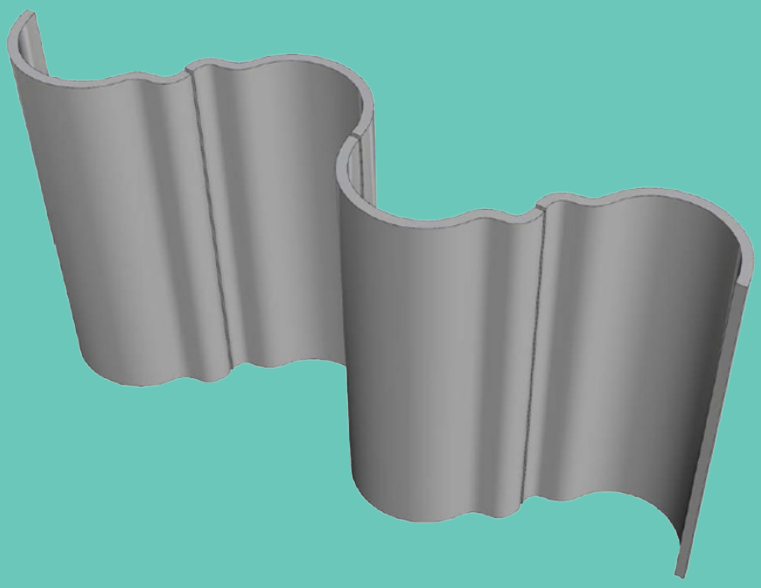
Udover de nævnte eksempler findes der pt. ca. 20 kendte eksempler på fuldskala-konstruktioner – vægge og facader – opført med 3D-betonprint, herunder et hus i Austin, USA af ICON, en etageejendom i Beijing, Kina af Huashang Tsenda, et hus i Yaroslavl, Rusland af Specavia, en hotelsuite i Manilla, Filippinerne af TotalKustom og en militærbarak i Illinois, USA af CERL. Dog har ingen af de nævnte eksempler for alvor udfordret 3D-printteknologien til at skabe helt nye arkitektoniske udtryk.

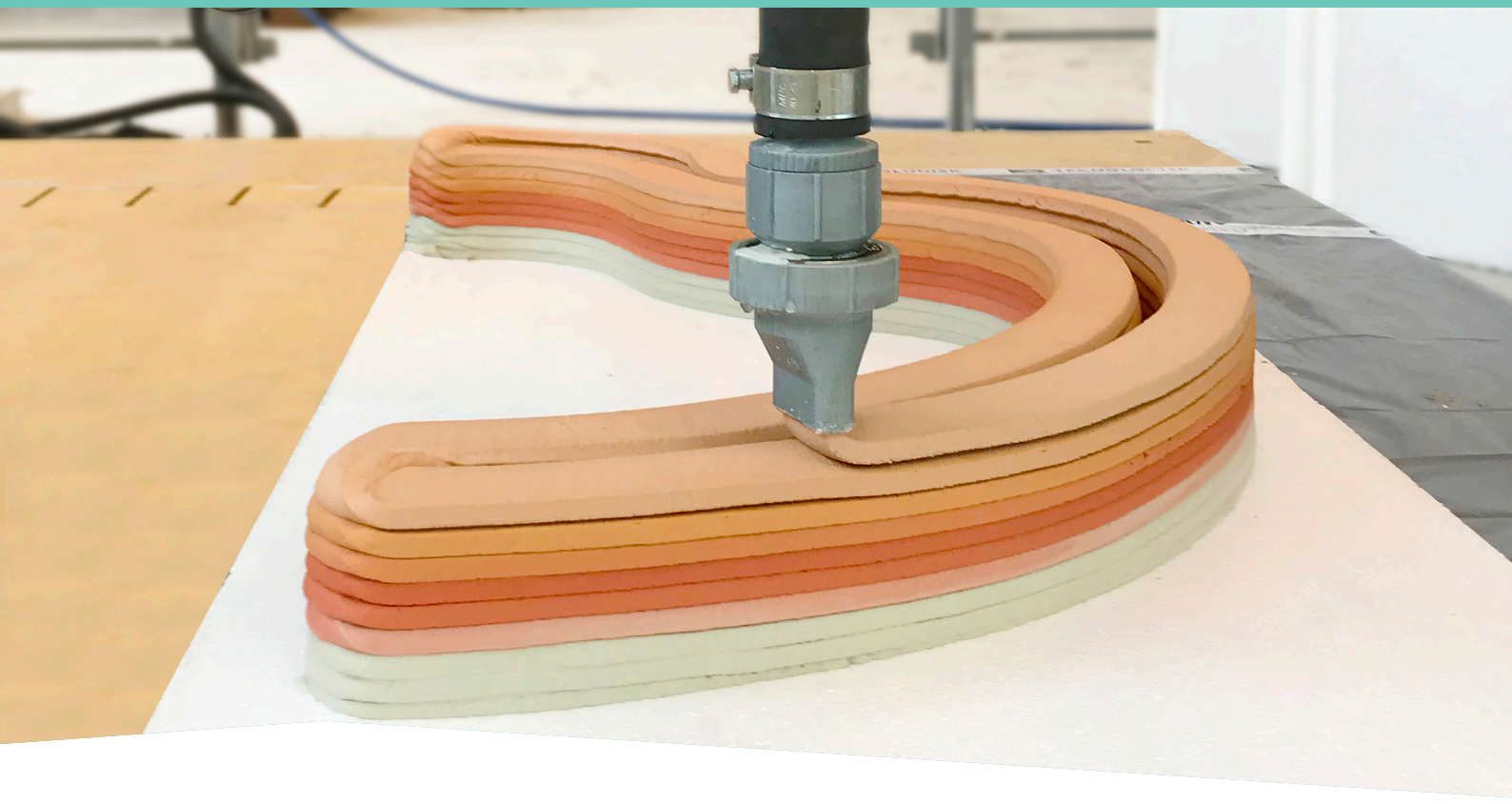
Eksempel på 3D-printet betonfacade udført af den amerikanske virksomhed Totalkustom.

To eksempler på bygninger, hvor vægge og facader er 3D-printet i beton. Øverst et hus i Milano printet med betonelementer på stedet af hollandske Cybe Construction. Nederst "The BOD" i København printet af den danske virksomhed 3D Printhuset.

Case: Kurvet væg

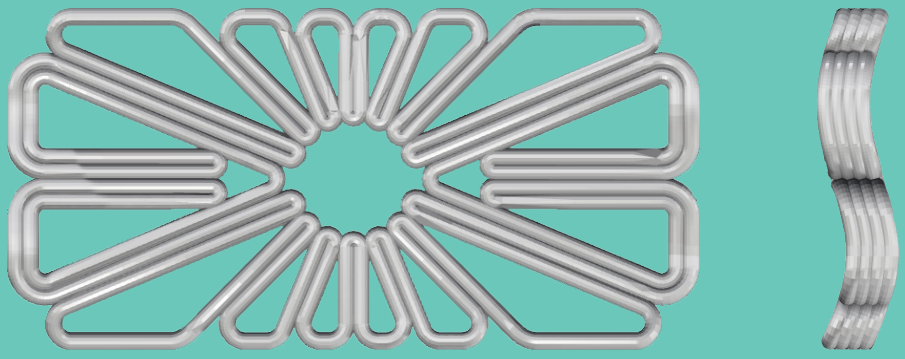
Designet tager udgangspunkt i 3D-printets formfrihed – samt tanken om at et antal ens elementer kan sammenstilles til en ny geometri. Et udsnit af vægmodulet blev produceret med 3D-print via robot, hvor der blev varieret på betonfarven i løbet af printet. Således blev der anvendt hvid beton, der løb over i en rød beton for at ende som en gul beton. Dette farveskift skulle kunne varieres henover hele væggen.





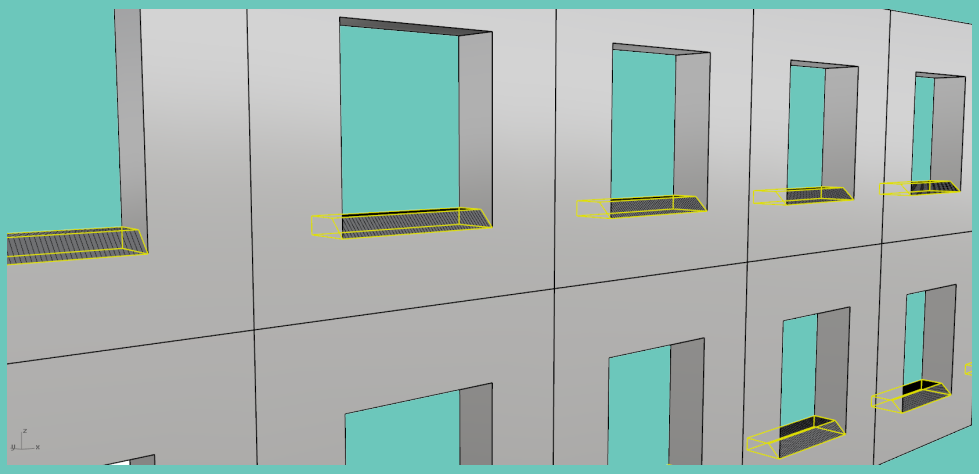
Case: Farveprint

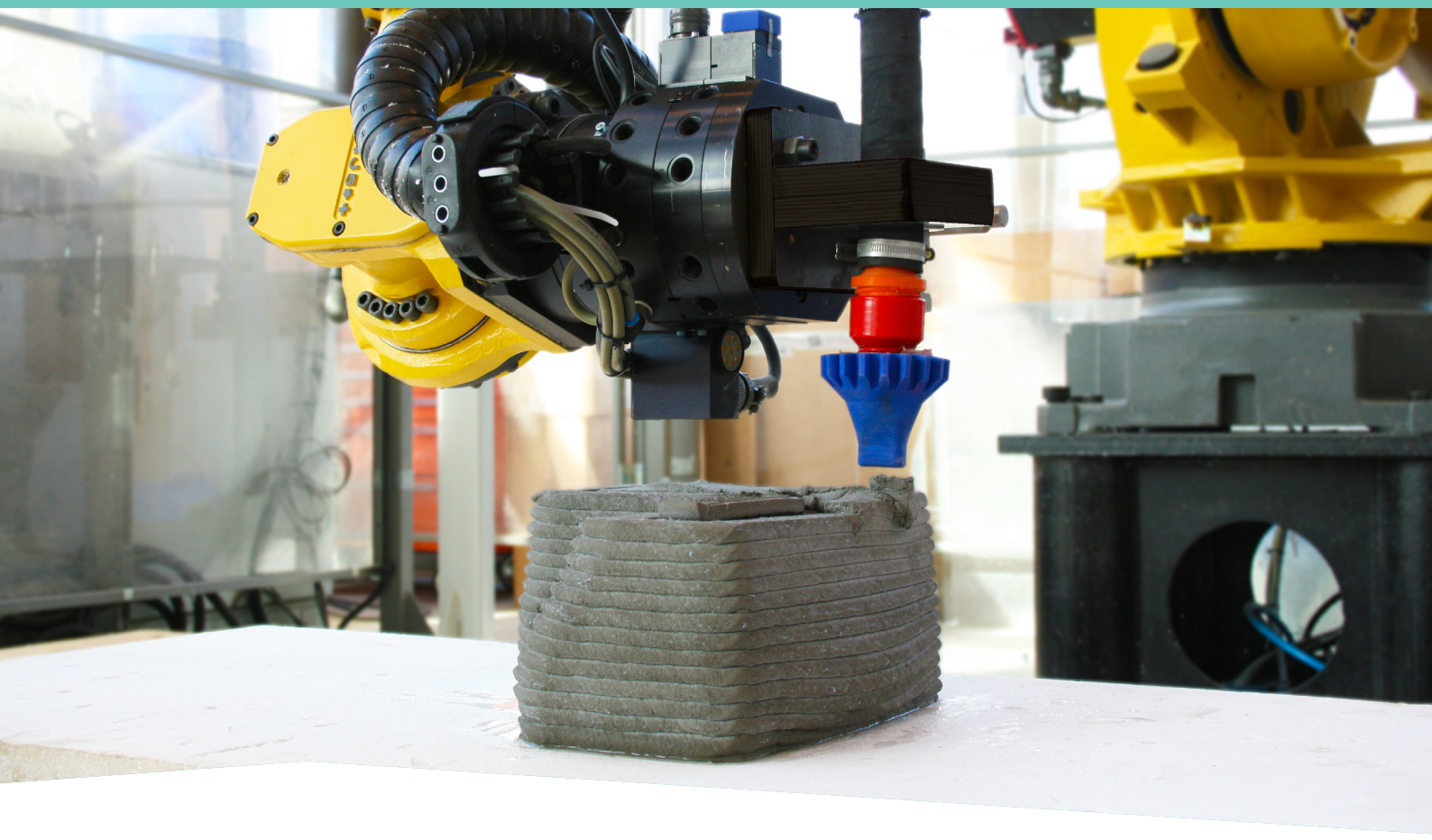
Panelet tænkes anvendt som facadebeklædning, hvor det sammen med tilstødende paneler vil udgøre en æstetisk yderbeklædning. Panelet er designet ud fra en kontinuerlig linje som gentages gennem 4 lag. Imellem linjerne fremkommer rumdannelser, som både giver panelet sin æstetiske fremtoning samt giver et lavere materialeforbrug sammenlignet med et massivt panel. Panelet er printet liggende, hvorfor de horisontale lag fra 3D-printprocessen kun ses i randen samt i de indre rumdannelser. Panelet er printet med en overgang mellem hvidt og gråt, dvs. forsiden er hvid og bagsiden er grå. En særlig del af eksperimentet findes i blandingen af to digitale fabrikationsteknologier. Således kombineres digital fræsning af dobbeltkrum form med en 3D-printproces. Forsiden, som printes mod den fræsede form, er præget af det spiralformede metamønster fra fræsningen, som går på tværs af printretningerne.



Case: En vinduesniche

Lille prototype på en konstruktionsdel som udgør et detaljeudsnit af en facade. Udsnittet viser mødet mellem den printede beton og et vindue. Prototypen udgør således en del af en sålbænk i beton, som blandt andet illustrerer muligheder ved at udnytte printretningen til at lede vand bort ifm. vindueshuller i en facade.





Søjler

Søjler er i sin natur interessant for 3D-betonprint, da den typisk er baseret på rene trykkonstruktioner, hvor lag-på-lag printmetoden synes oplagt samtidig med at materialeforbruget er relativt lille. Netop skalaen på en søjle byder dog på udfordringer i printprocessen, da der ofte vil være relativt kort tid mellem hvert printet lag. Derfor er det ekstra vigtigt, at opnå relativt høj styrkeudvikling i den printede beton, hvis processen skal være rentabel.

Søjlen som bygningselement indeholder typisk ikke mange forhold, som der skal tages hensyn til såsom udsparinger til vinduer og døre, isolering samt funktionen at omslutte hele rum og bygninger som vægge og facader. Søjlen skal typisk "blot" overføre en kraft fra en overliggende konstruktion til en underliggende konstruktion. Ved at benytte 3D-betonprint til fremstilling af søjler i byggeriet opstår derfor en større eksperimenterende rum for udformningen, hvor der eksempelvis kan arbejdes med, hvordan geometrier kan vrides og formes om midteraksen samt skabelsen af indre rumdannelser – som vil være nærmest umulige at skabe med anvendelsen af støbeforme – som giver visuelle variationer rundt om søjlen.

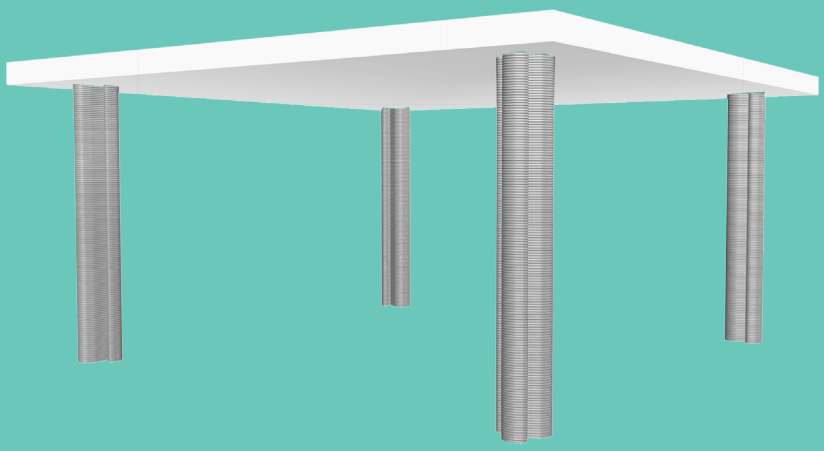
Der er flere eksempler på 3d-printede betonsøjler. Til projektet "The BOD" i København brugte 3D Printhuset teknikken, hvor de printede forskalling til søjler, som efterfølgende kunne armeres og udstøbes traditionelt. Total Kustom udforskede mulighederne for ny formgivning af søjler i deres 3D-printede hotelsuite på Filippinerne. Således vrider to søjler sig om deres akse og udgør en slags indgangsportal. Også den hollandske virksomhed Bruil har eksperimenteret med udformning af søjler på prototypeniveau – eksempelvis en søjle bestående af 3 bånd som flettes sammen i en vredet søjle.

Den franske virksomhed XtreeE tager skridtet videre med flere eksempler på printede søjler, hvor søjlens geometri nedbrudt i hele tværsnittet, således at der opstår kig gennem søjlen. De har anvendt en teknik, hvor de har printet et støttemateriale for betonen. Materialet er efter printets afslutning blevet fjernet igen.

To eksempler på 3D-printede søjler. Til venstre: Hotelsuite på Filippinerne af Total Kustom, hvor vredne søjler udgør en indgangsportal. Til højre: Eksempel på prototype skabt af XtreeE, printet med et midlertidigt støttemateriale, som har muliggjort den avancerede geometri.

Case: Søjle med indre rum

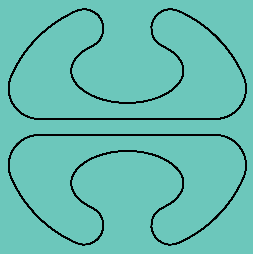
Søjlen udnytter muligheden for at skabe nogle geometrier som vil være meget vanskelige at fremstille med traditionel betonstøbning i støbeform. Plansnittet udgøres af en organisk formet printkurve, hvor der dannes små rumdannelser indenfor søjlens omkreds. Derved bliver søjlens overflade både til inderside og yderside i et skiftende forløb. Søjlen kan armeres i den hule midte, hvori der kan placeres traditionel armering som efterfølgende kan udstøbes med selvkompakterende beton.

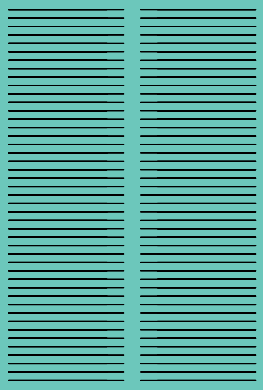


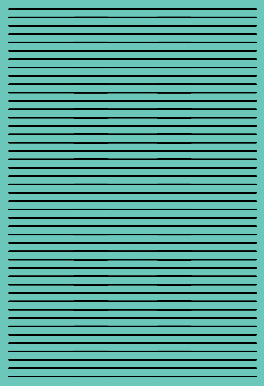
Case: Søjle med rotationer

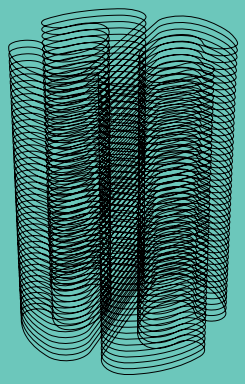
Søjlens design tager – som forrige case – udgangspunkt i muligheden for at skabe indre rumdannelser, som vil være vanskelige at fremstille i en traditionel støbeproces. Herudover udnyttes muligheden for at skabe tiltede flader. Således gennemgår søjlens design 3 designtrin: 1: Søjlens grunddesign adderes op i 45 lag. 2: Hvert lag roteres om søjlens centerlinje så der opstår en stigende hældning af søjlens top afhængig af den totale højde. 3: Der skabes en geometrisk variation rundt om søjlen ved at gentage forrige rotation - denne gang om søjlens vertikale centerakse. Søjlen ventes printet ultimo 2018.

1

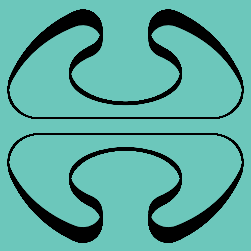


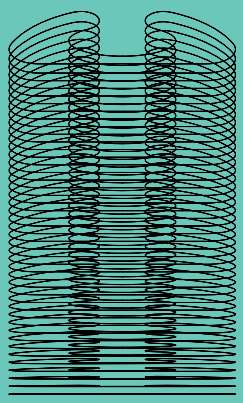


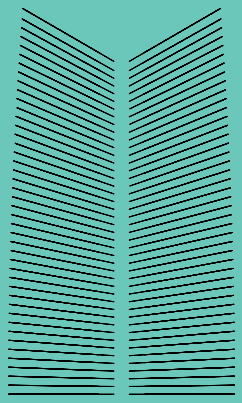


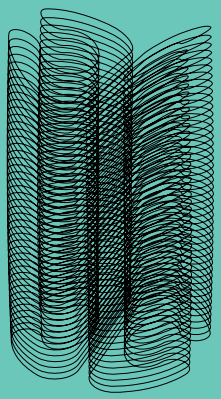


2

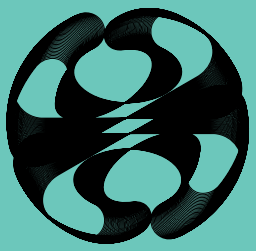


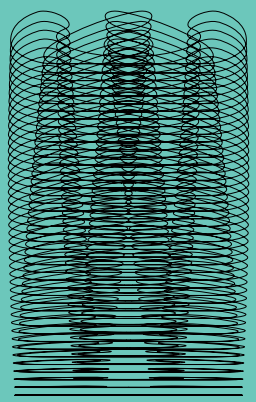


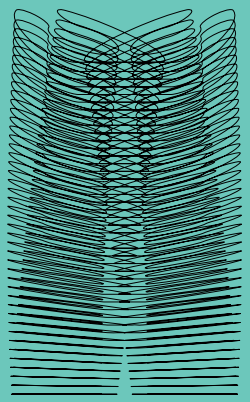


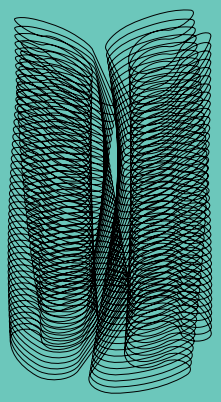


3









Bjælker

Bjælkekonstruktioner i beton er ofte forbundet med kraftig armering. Og idet der endnu eksperimenteres med at forbinde robuste og rentable armeringsløsninger i samspil med 3D-printede betonkonstruktioner, er der endnu ikke mange eksempler på 3D-printede bjælkekonstruktioner i byggeriet.

Dog er der demonstreret en række enkeltstående bjælkeprototyper, eksempelvis en bjælke skabt af WASP (World's Advanced Saving Project), hvor en række 3D-printede betonelementer er efterspændt af en ydre armering.

Herudover er der fremstillet et antal 3D-printede brokonstruktioner i beton, som godt kan betragtes som bjælkekonstruktioner. Af disse konstruktioner tæller blandt andet en cykelbro i Gemert i Holland printet af Eindhoven University of Technology. Broen består af en række trådarmerede 3D-printede betonelementer som er blevet forspændt til et samlet brodæk. I Madrid i Spanien har Institute of Advanced Architecture of Catalonia (IAAC) stået i spidsen for at designe en materialeoptimeret fodgængerbro. Broen er fremstillet via teknikken D-Shape, dvs. en "particle-bed" 3D-printproces. Endelig findes en lille fodgængerbro i Japan skabt af Obayashi Corporation. Broen består af tre 3D-printede betonelementer som er sammenstillet i en trykkonstruktion. Hvert element er printet med hulrum for at spare materiale og vægt.

Dækkonstruktioner

Dækkonstruktioner til at lave etageadskillelser bliver ofte udført med betonelementer. Der er ikke udført nævneværdige projekter med 3D-printede dækkonstruktioner. Dette kan skyldes, at dækkonstruktioner sjældent udformes i komplekse geometrier, hvor 3D-printteknologien primært har sin berettigelse.

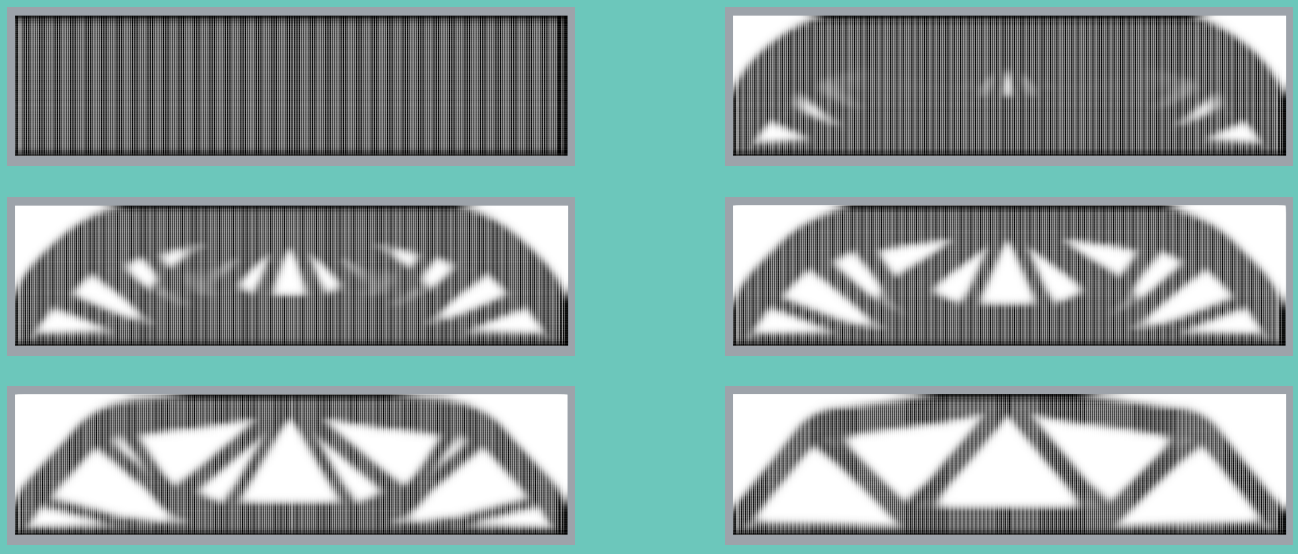
Derimod kan det være interessant at kigge på, hvordan den indre struktur opbygges i en dækkonstruktion for at spare materiale og vægt. Her er der allerede flere muligheder for at skabe materialeoptimerede konstruktioner med mere konventionelle metoder, eksempelvis huldæk og bobledæk.

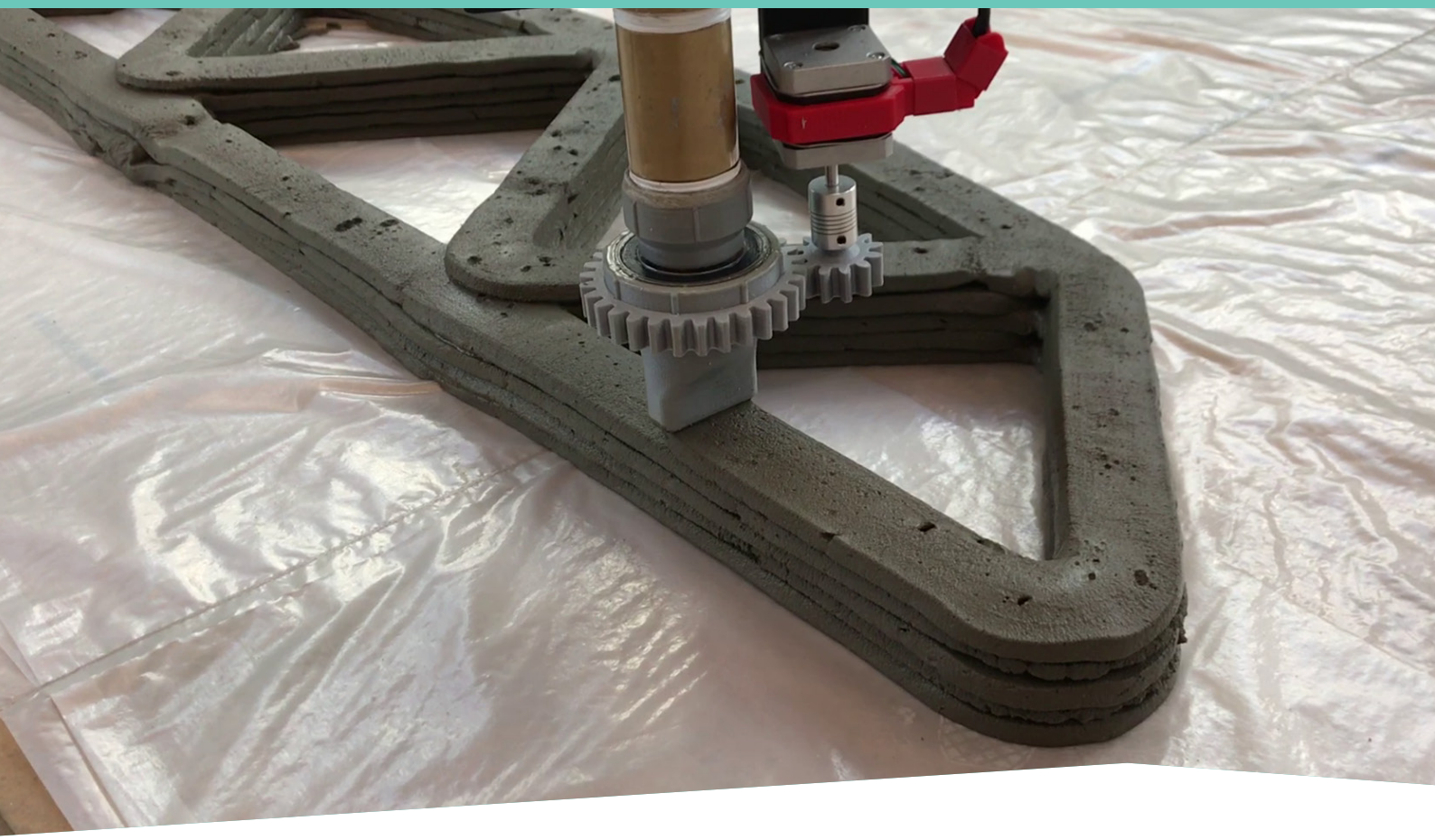
Med eksempelvis topologioptimering kan der udforskes nye muligheder for at skabe nogle interessante mønstre og overfladegeometrier. Disse kan vække mindelser om de gamle gotiske loftkonstruktioner, hvor geometrien antyder, hvordan kræfterne løber og fordeles i konstruktionen. En topologioptimeret konstruktion kan betragtes som en nutidig fortolkning af de samme grundtanker.

Cykelbro i Gemert i Holland printet af Eindhoven University of Technology. Broen består af en række trådarmerede 3D-printede betonelementer som er blevet forspændt til et samlet brodæk.

Case: En topologioptimeret bjælke

Bjælkens design er skabt via topologioptimering, hvormed der er skabt hulrum i bjælkens tværsnit. Bjælken er printet med en aflang dyse, som via en digitalt styret motor hele tiden orienterer dysen vinkelret på printretningen.





Monolitiske konstruktioner

Med opfindelsen af jernbetonen i slutningen af 1800-tallet, opstod grundlaget for en revolution i byggebranchen. Armeret beton skabte således en ny arkitektur, som ikke var underlagt den traditionelle adskillelse mellem det bærende og det bårne i arkitekturen. I tiden frem til i dag er der skabt flere eksempler på disse monolitiske konstruktioner, hvor en konstruktion både kan være bærende og båren samt være væg, dæk, søjle og bjælke – samt danne lange udkragninger.

Særligt interessante er de konstruktioner, som samtidig har udnyttet betonens mulighed for at skabe organiske former og dermed frembragt en radikalt anderledes og inspirerende arkitektur. Nogle af arkitekterne, som har udnyttet disse muligheder, tæller blandt andet Jørn Utzon, Eero Saarinen, Santiago Calatrava og Zaha Hadid.

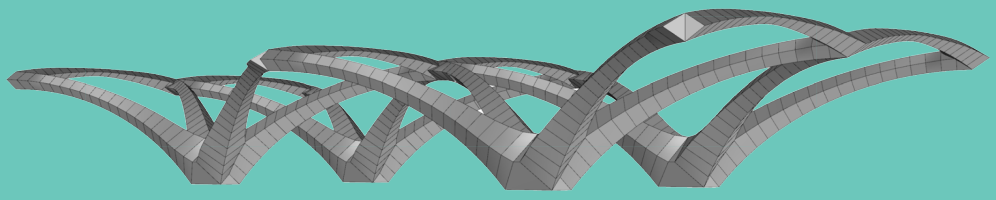
Med en ny teknologi som 3D-betonprint opstår nu nye muligheder for at skabe monolitiske konstruktioner som kan lade sig inspirere af fortiden. Og nu er mulighederne ikke begrænset af fremstillingen af en kompliceret og dyr støbeform. Begrænsningerne – og mulighederne – opstår nu med udgangspunkt i den nye teknologi, hvilket igen kan føre til en ny revolution indenfor betonarkitekturen.

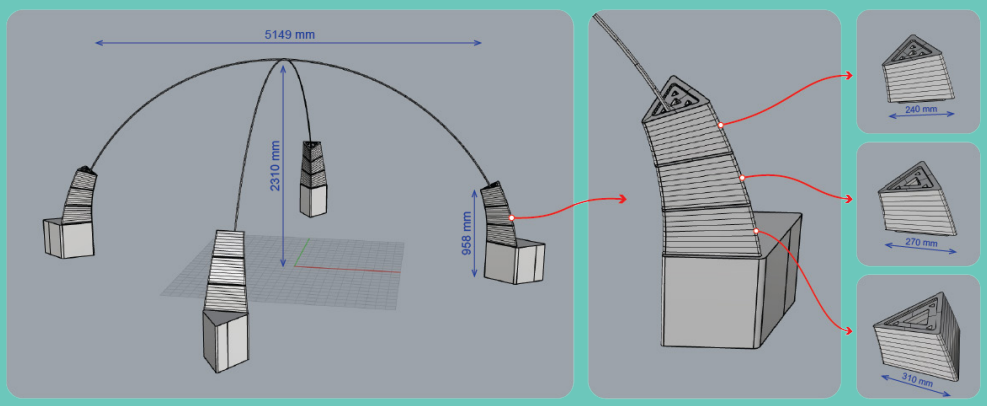
Der er endnu ikke frembragt nævneværdige eksempler på monolitiske konstruktioner baseret på 3D-betonprint, men I Holland er der et projekt på tegnebrættet, som tager nogle af ideerne og mulighederne med monolitiske konstruktioner til sig. Således er der planlagt opførelsen af en række boliger i Eindhoven, udviklet af Houben & Van Mierlo og Eindhoven University of Technology. Facader og tag – som udgør en samlet konstruktion i boligerne, skal 3D-printes med beton.

Arkitekturhistorien viser flere eksempler på monolitiske konstruktioner, hvor en konstruktion både kan være bærende og båren samt være væg, dæk, søjle og bjælke – samt danne lange udkragninger. Og når konstruktionerne samtidig har udnyttet betonens mulighed for at skabe organiske former, er der blevet frembragt en radikalt anderledes og inspirerende arkitektur. I kombination med den nye teknologi - 3D-betonprint - synes det oplagt at udforske nye arkitektoniske muligheder inspirereret af monolitiske konstruktioner fra arkitekturhistorien. Øverst tv: Tenerife Opera House af Santiago Calatrava fra 2003. Øverst th: TWA Terminalen i JFK Internation Airport i New York af Eero Saarinen fra 1957. Nederst tv: Sydney Opera House af Jørn Utzon fra 1973. Nederst th: Tilbygning til Ordrupgaardmuseet af Zaha Hadid fra 2005.

Case: Buekonstruktion i Aarhus

Konstruktionen, som er frembragt i et samarbejde mellem Kim Utzon Arkitekter, NCC Danmark A/S og Teknologisk Institut, giver et bud på, hvordan 3D-printede betonelementer kan sammenstilles til udkragede konstruktioner som udvisker grænserne mellem det bærende og det bårende. En række printede betonelementer i forskellige størrelser er således sammenstillet til en større konstruktion – som eksempelvis kan udgøre facade og tag på en bygning. Konstruktionen armeres ved efterspænding gennem printede hulrum i konstruktionen. Der er fremstillet et udsnit af konstruktionen, hvor 4 printede baser udgøres af en formstøbt plint og 3 sammenspændte printede elementer. De 4 baser er efterfølgende forbundet via en trækstang som visualiserer det kontinuerlige bueforløb. Konstruktionen har været udstillet i efteråret 2017 i forbindelse med forsøgshuset Dome of Visions i Aarhus Havn og er beskrevet i artiklen: "3D Concrete printing of Post-tensioned Elements", som blev præsenteret ved IASS, Boston 2018.

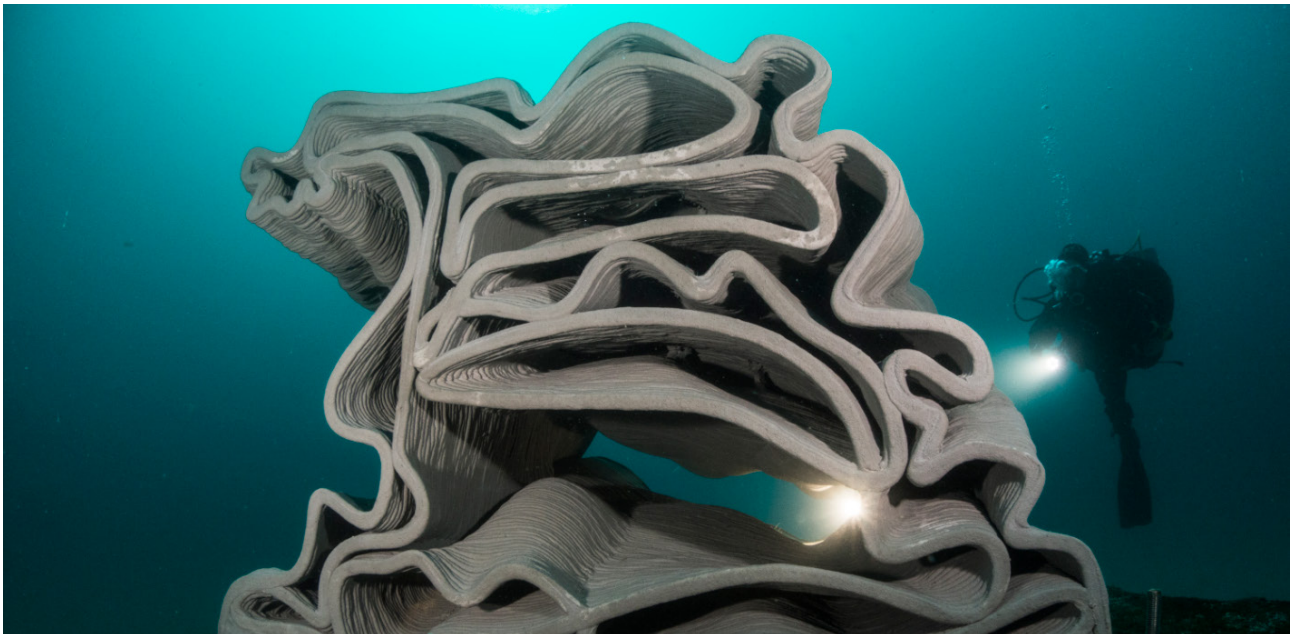




Øvrige anvendelsesmuligheder

3D-betonprint er ikke kun relevant i forbindelse med opførelse af bygningskonstruktioner. Ofte er fremstillingen af mindre konstruktioner, eksempelvis møbler og kunst, meget værdifuldt for videreudviklingen af en ny teknologi. Her er der ikke restriktioner som lovgivning og standarder, og rummet for eksperimenter er betydeligt større. Dette er blevet udnyttet i en række mindre projekter, hvor flere af de anvendte teknikker kan overføres til byggeriet og inspirere til en ny arkitektur.

Tilbage i 2010 fremstillede Loughborough University en betonbænk i samarbejde med Norman Foster Architecs. Bænken er printet med en relativ lille lagtykkelse, hvilket giver bænken en fin detaljering, og printede hulrum demonstrerer muligheden for at skabe plads til rørføringer og lignende. Den østrigske virksomhed Incremental3D har ligeledes eksperimenteret med møbler, eksempelvis deres digitale chaiselongue som er printet i hvid beton. Den franske virksomhed XtreeE har eksperimenteret med 3D-betonprint til forskellige formål, herunder møbler, vandreservoirer mv. Særlig interessant er deres 3D-printede kunstige rev i beton, som er nedsænket i Calanques National Park (France), hvor det skal være med til at vise, hvorledes tabte koralrev kan genskabes med 3D-betonprint.



Eksempler på øvrige anvendelser af 3D-betonprint. Øverst: Betonbænk fra 2010 skabt af Loughborough University i samarbejde med Norman Foster Architecs. Bænken er printet med en relativ lille lagtykkelse, hvilket giver bænken en fin detaljering, og printede hulrum demonstrerer muligheden for at skabe plads til rørføringer og lignende. Nederst: Kunstigt rev, nedsænket i Calanques National Park (France), skabt af den franske virksomhed XtreeE i 2018.

Opsamling

Meget tyder på, at 3D-betonprint vil sætte sig tydelige aftryk i fremtidens arkitektur. Dette kræver dog, at teknologien udvikles til et stadie som både sikrer høj produktivitet og grundlaget for bedre udnyttelse af de nye arkitektoniske muligheder.

3D-betonprint er en meget kompleks teknologi, som kræver ekspertise indenfor flere områder, for at kunne forstå og udnytte teknologien til fulde. Derfor kræves der et endnu mere omfattende samarbejde mellem byggeriets ekspertiseområder for at opnå den fulde succes. 3D-betonprint er en radikal anderledes måde at skabe betonkonstruktioner på end konventionelle metoder. Der kræves et dybdegående kendskab til de digitale processer fra 3D-model til digital fabrikation – og så er selve betonteknologien ret avanceret, hvor der blandt andet stilles krav om pumpbarhed, ekstruderbarhed, bygbarhed og vedhæftning indenfor et snævert tidsvindue.

Med 3D-betonprint opstår særlige muligheder for at frembringe en avanceret formgivning. Udover en fri formgivning kan mulighederne aflæses i selve betonoverfladen, hvor variationer i dysegeometri, printhastighed, printretning og farvetilsætning kan give 3D-betonprintede overflader sit helt eget karakteristika.

Udover formgivning åbner 3D-betonprint op for indlejring af flere funktionaliteter i betonkonstruktioner. Her er termisk kapacitet, akustik, luftrensning og transparens nogle af de interessante funktionaliteter. Helt særligt er muligheden for at lave materialebesparende konstruktioner, som både sparer materiale og vægt og kan være med til at give nye æstetiske variationer. Dette er nærmest en naturlig præmis ved 3D-betonprint, da der kun behøver at blive udlagt materiale dér hvor der gør nytte.

Nogle af de særlige udfordringer ved 3D-betonprint, hvor der endnu ikke findes industrialiserede robuste løsninger, er indenfor armering og åbninger/udhæng. Der findes flere gode eksempler på, hvordan armering af betonkonstruktioner kan implementeres i printprocessen, men der mangler fortsat mere udvikling på området, før det fulde potentiale af armerede 3D-printede betonkonstruktioner kan forløses.

Den nuværende udvikling indenfor 3D-printet beton har særligt fremvist eksempler på forskellige væg- og facadeudformninger og søjler. Her synes teknologien at være mest oplagt, måske på grund af den fundamentale tilgang med lag-på-lag, som i det traditionelle byggeri mest minder om måden af bygge sten-på-sten med mursten.

Gennem det 3-årige projekt "3D-printet byggeri", som er støttet af Uddannelses – og Forskningsministeriet, har Teknologisk Institut udviklet en robotbaseret 3D-printmetode til print af betonelementer. Metoden er blevet demonstreret gennem en række eksperimenter, som har vist nogle af de arkitektoniske potentialer den nye teknologi byder på. I de kommende 4 år vil Teknologisk Institut - sammen med 10 virksomheder og institutioner - udnytte erfaringerne fra projektet i et nyt udviklingsprojekt, N3XTCON. Projektet, som blandt andet er støttet af Innovationsfonden, vil bringe 3D-printteknologien i byggeriet til nye højder i fremstillingen af fremtidens næste generation af betonkonstruktioner i arkitekturen.

Referencer

Litteratur

- T. Salet, F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed. 3D concrete printing-a structural engineering perspective. High Tech Concrete: Where Technology and Engineering Meet, Springer, 2018.
- D. Asprone, C. Menna, F. Bos, T. Salet, J. Mata-Falcon, W. Kaufmann. Rethinking reinforcement for digital fabrication with concrete. Cem. Concr. Res., 112(-):111-121, 2018.
- R.A. Buswell, W.R. Leal de Silva, S.Z. Jones, J. Dirrenberger. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research 112(-):37-49, 2018
- P. Ayres, W.R. Leal da Silva, P. Nicolas, T.J. Andersen, J.P.R. Greissen. SCRIM -- Sparse Concrete Reinforcement in Meshworks. Proceeedings of Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018. Springer International Publishing, pp.207 – 220, 2018.
- W. R. Leal da Silva, T.J. Andersen, A. Kudsk, K.F. Jørgensen. 3D Concrete printing of Post-tensioned Elements. In: Proceedings of IASS 2018 – creativity in Structural Design, Boston, July 2018.
- G. De Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V.N. Nerella, G. Habert, I. Agusti-Juan. Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials. Cement and Concrete Research 112(-):25-36, 2018
- H. Lund-Nielsen. 3D printet byggeri – afslutningsrapport. Februar 2018
- T.J. Andersen. 3D-print åbner for nye arkitektoniske muligheder. BETON nr. 4, november 2017
- W.R. Leal da Silva. Challenges and Opportunities within 3-D Concrete Printing. In: ACI Fall 2017 - American Concrete Institute. October, 2017.
- M.P.A.M. Marijnissen. 3D Concrete Printing In Architecture. Eindhoven University of Technology, August 2016
- F. Bos, R. Wolfs, Z. Ahmed, T. Salet. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual Phys. Prototyp. 11(-):209-225, 2016
- T. Wangler, E. Lloret, L. Reiter, N. Hack, F. Gramazio, M. Kohler, M. Bernhard, B. Dillenburger, J. Buchli, N. Roussel, R.J. Flatt. Digital concrete: opportunities and challenges. RILEM Tech. Lett., 1 (S.I.):67-75, 2016
- N. Oxman m.fl. Functionally Graded Rapid Prototyping. Mediated Matter Group, MIT Media Lab, sept. 2011

Fotos

Side 10: 3D Concrete Printing TUe, https://www.youtube.com/watch?v=XgPJdpGV8mE, sept. 2016
Side 13ø: Juliette Bekkering, Bekkering Adams architects, https://www.bekkeringadams.nl/projects/69/firewall
Side 13n: Scooter Lowrimore, May 2008, www.flickr.com
Side 19: CITA - Centre for Information Technology and Architecture, KADK, February 2018
Side 22: 3D Printhuset, http://www.3dprintetbyggeri.dk/pdf/Afslutningsrapport.pdf, 2018
Side 24n: 3D Printhuset, http://www.3dprintetbyggeri.dk/pdf/bes%C3%B8gsrapporter/WinSun.pdf, 2016
Side 28v: Andrey Rudenko, Total Kustom, USA
Side 28h: XtreeE - http://www.xtreee.eu/wp-content/uploads/2017/01/FBC_8160-%C2%A9-Lisa-Ricciotti.jpg
Side 31: Marczoutendijk, October 2017, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:3D_printed_concrete_bicycle_bridge_in_Gemert_(NL).jpg
Side 33øth: Evan P. Cordes, April 2006, www.flickr.com
Side 33ntv: Bernard Spragg, august 2015, www.flickr.com
Side 36ø: Loughborough University, UK
Side 36n: XtreeE - http://www.xtreee.eu/project-rexcor-artificial-reef/

Alle øvrige fotos og illustrationer tilhører Teknologisk Institut.

TEKNOLOGISK
INSTITUT