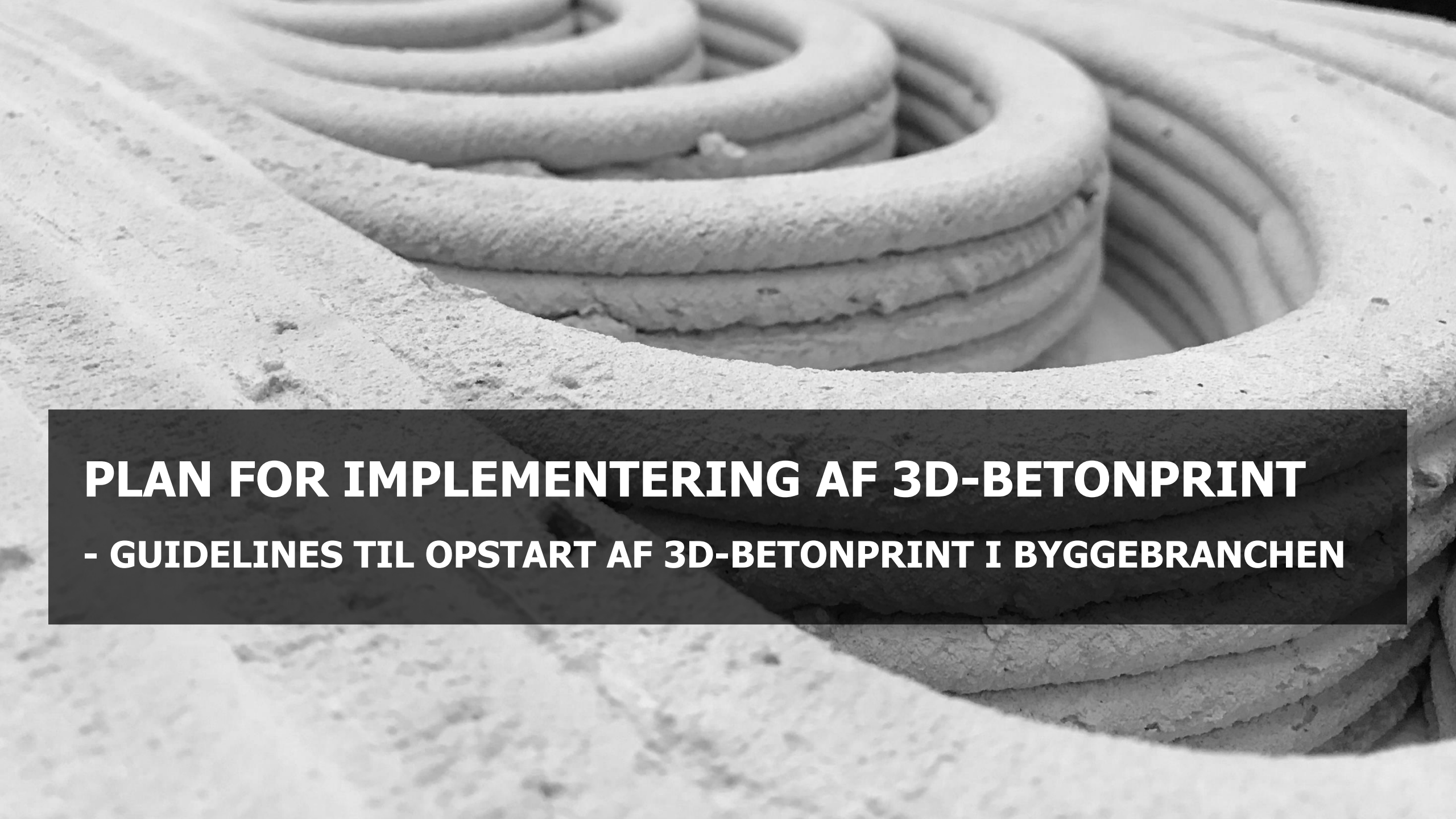




PLAN FOR IMPLEMENTERING AF 3D-BETONPRINT

- GUIDELINES TIL OPSTART AF 3D-BETONPRINT I BYGGEBRANCHEN

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.

Disse guidelines har til give et overblik over, hvilke forhold som er relevante i henhold til, hvordan 3D-betonprint kan implementeres i byggebranchen. Der tages udgangspunkt i den af Teknologisk Institut udviklede robotbaserede 3D-betonprinter samt erfaringer fra projektet "3D-printet byggeri". Projektet, som er støttet af Styrelsen for Forskning og Uddannelse, er et 3-årigt projekt som afsluttes med udgangen af 2018.

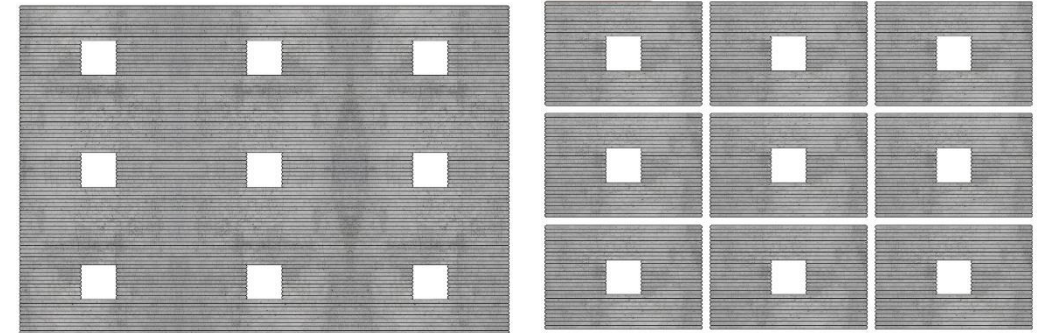
INTRODUKTION

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

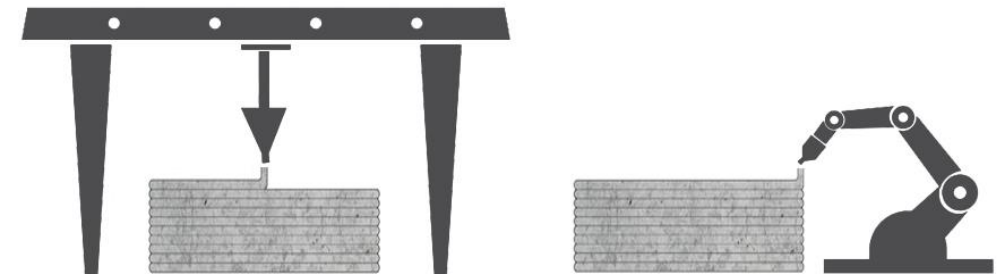
- Ekstruderingsbaseret 3D-betonprint. Dette er den mest anvendte metode, hvor beton ekstruderes gennem en dyse monteret på et digitalt styret apparat, eksempelvis en robot. Betonen ekstruderes således lag-på-lag baseret på en digital model af den færdige konstruktion. En af de mest kendte variationer 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 udlægges 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.

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-betonprint er velegnet til både til in-situ konstruktioner og elementer.



Der kan både anvendes gantry-baserede og robotbaserede printere til 3D-betonprint.

INDHOLD



MATERIALER



BETONBLANDING



BETONPUMPE



ROBOTSTYRING



EKSTRUDERING



ARMERING



DESIGN



MATERIALER



TEKNOLOGISK
INSTITUT

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.

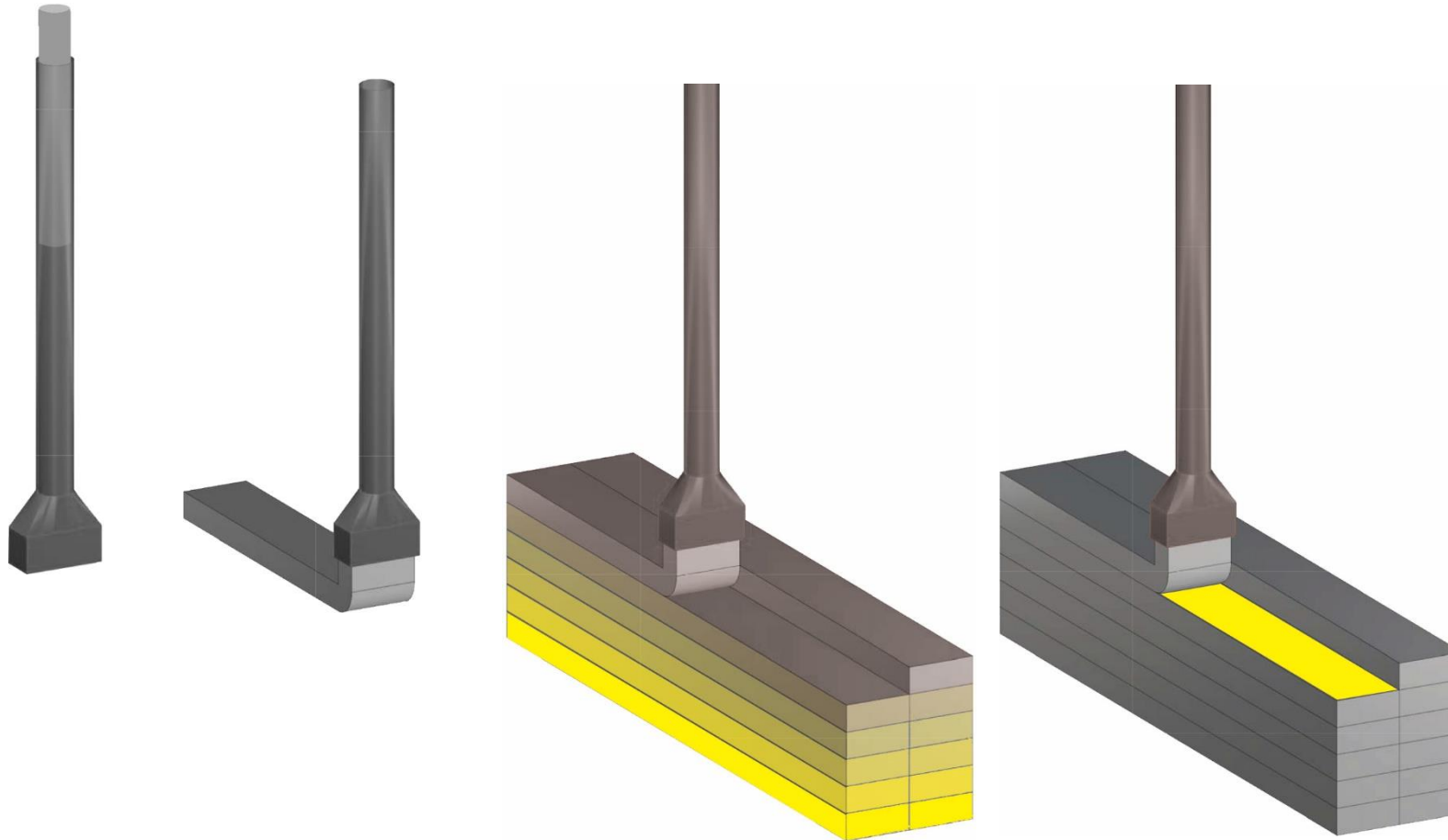
Herudover skal den printede beton naturligvis også opfylde øvrige krav, som ved traditionelle støbninger, såsom styrke, holdbarhed, modstandsdygtighed overfor eksempelvis frost osv. Det tegner et billede af, at det at printe med beton er som at bevæge sig på en knivsæg, og det at have styr på sin betonsammensætning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



MATERIALER



TEKNOLOGISK
INSTITUT



De 4 kritiske faser i 3D-betonprint: Pumpbarhed, ekstruderbarhed, bygbarhed og vedhæftning.



MATERIALER

Teknologisk Institut



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Teknologisk Institut har udviklet flere mix-designs til 3D-betonprint. Fælles for alle mix-designs er, at de er baseret på stenstørrelser under 1 mm. af hensyn til pumpeudstyret. De forskellige sammensætninger indeholder:

- Basis cement / Hvid cement
- Flyveaske / kalkfiller
- Sand <1 mm.
- Vand
- Retarder
- Viskositet modificerende tilsætningsstof
- Superplastificerende tilsætningsstof
- Accelerator





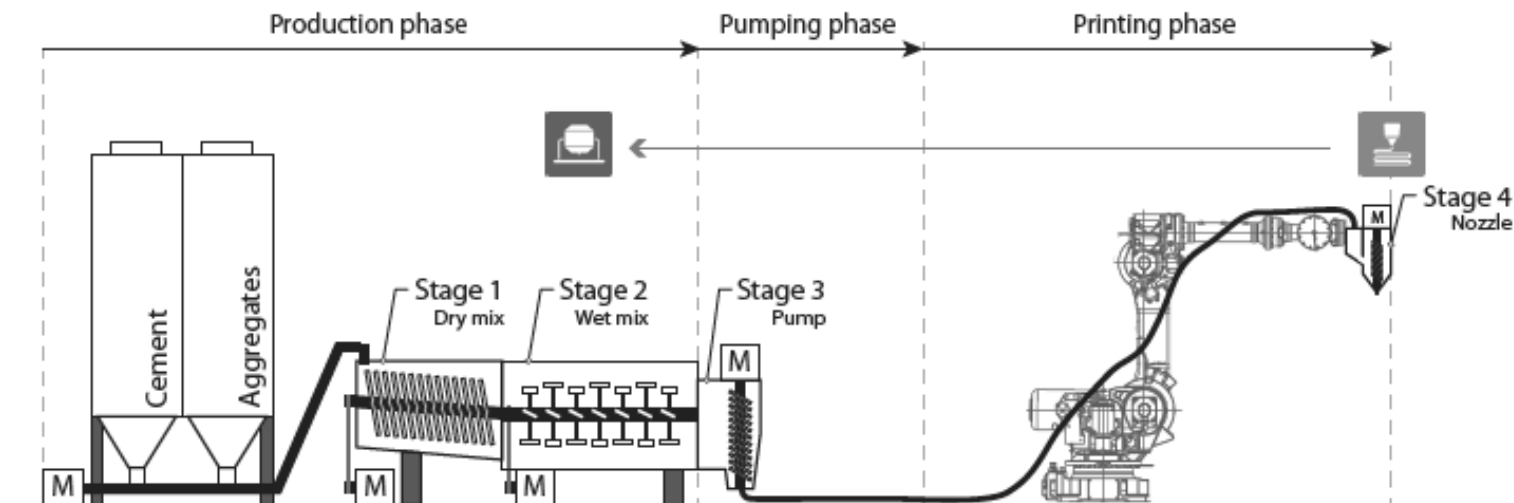
BETONBLANDING



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Ved 3D-betonprint er der typisk 2 blandemetoder som anvendes:

1. Batch blanding. Dette er den traditionelle blandemetode, hvor der blandes et batch af en konkret betonsammensætning. Her er hvert batch konstant i forhold til sammensætning – men egenskaberne i den friske fase kan justeres ved at tilsætte additiver under printprocessen.
2. Kontinuerlig blanding. Dette er en mere uпрøvet metode som har stor bevågenhed indenfor 3D-betonprint. Her blandes betonen kontinuerligt i takt med selve printprocessen. Det giver mulighed for at justere egenskaberne på betonen løbende under printprocessen via forskellige betonsammensætninger.



Udkast til en kontinuerlig blandeproces i forbindelse med 3D-betonprint – her med en robotbaseret betonprinter.



BETONBLANDING

Teknologisk Institut



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Til 3D-betonprint anvender Teknologisk Institut traditionel batch blanding. Dette gøres med en Eirichblander, hvor der kan blandes op til 50 liter beton.

Der er lavet flere eksperimenter med at tilsætte additiver i selve printprocessen, herunder farver og accelerator.



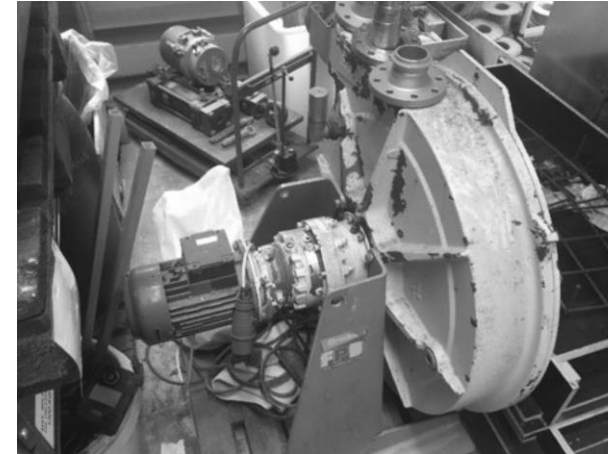


BETONPUMPE

I en 3D-betonprintproces skal betonen pumpes frem til selve printdysen. Til dette kræves pumpeudstyr som udvælges ud fra behovet i det konkrete setup.

Der er typisk to typer af pumper, som anvendes til 3D-betonprint:

1. Peristaltisk betonpumpe. Disse pumper kører i pulserende bevægelser og kan være velegnet til at føde betonen til en dyse med et sekundært pumpesystem. Som eneste pumpesystem er denne type ikke velegnet til 3D-betonprint, da det pulserende flow giver et uensartet printresultat.
2. Excentersnekkepumpe. Denne pumpe er mere velegnet til 3D-betonprint til at styre betonflowet ud af printdysen.



Øverst peristaltisk betonpumpe. Nederst excentersnekkepumpe.



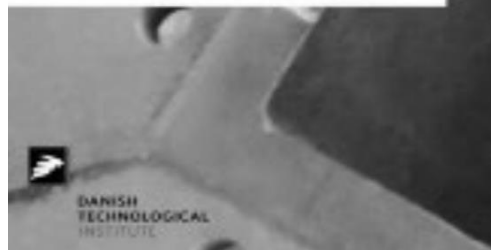
BETONPUMPE

Teknologisk Institut



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Til 3D-betonprint anvender Teknologisk Institut en excentersnekkepumpe som kan pumpe op til 100 liter i timen.





ROBOTSTYRING



TEKNOLOGISK
INSTITUT

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 betonprinter.

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 printer. I teorien vil modelleringen af konstruktionen således ende op med et program som kan indlæses direkte i printer. 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.



ROBOTSTYRING

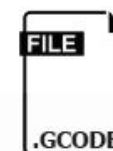
Teknologisk Institut



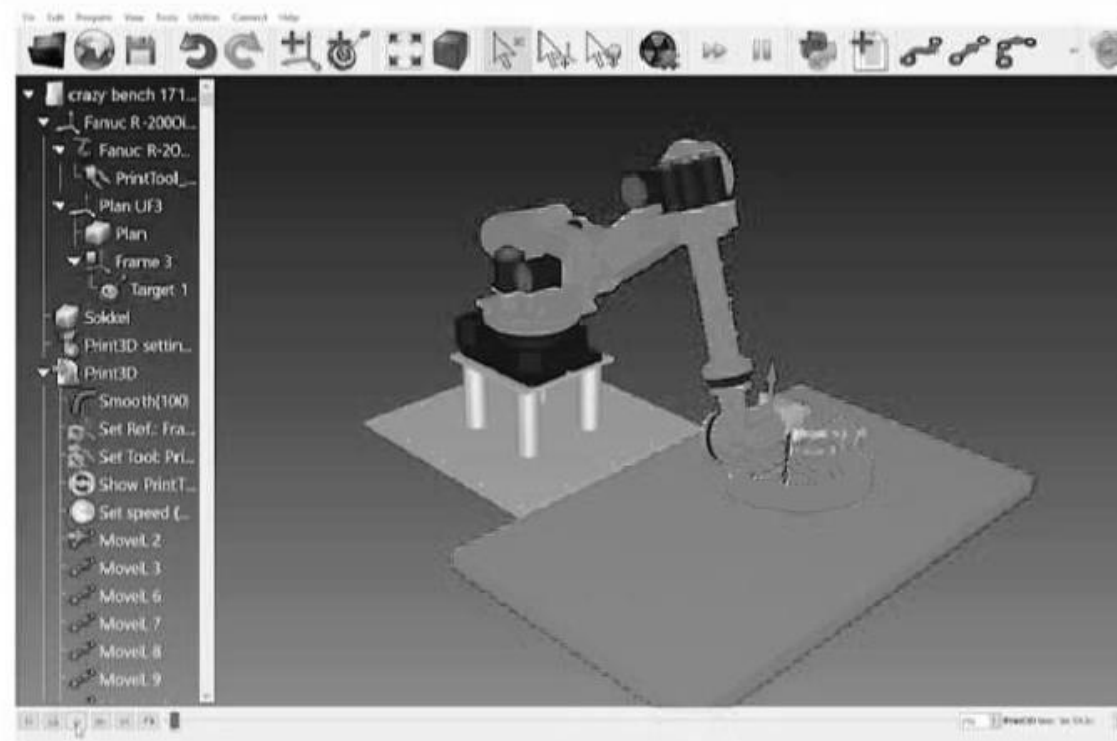
TEKNOLOGISK
INSTITUT

På Teknologisk Institut anvendes et digitalt flow frem mod endelig robotstyring som følger:

1. I 3D-modelleringssoftwaret Rhinoceros designs objektet som skal printes
2. Der anvendes et plug-in til Rhinoceros – Grasshopper – til at frembringe arbejdsbanerne for betonprinter
3. Programmeringsværktøjet Python anvendes til at generere den endelige G-kode som beskriver printprocessen
4. Robotsoftwaret RoboDK anvendes til at oversætte G-koden til det sprog som betonprinter forstår - i dette tilfælde en industrirobot.



RoboDK
ROBOT DEVELOPMENT KIT





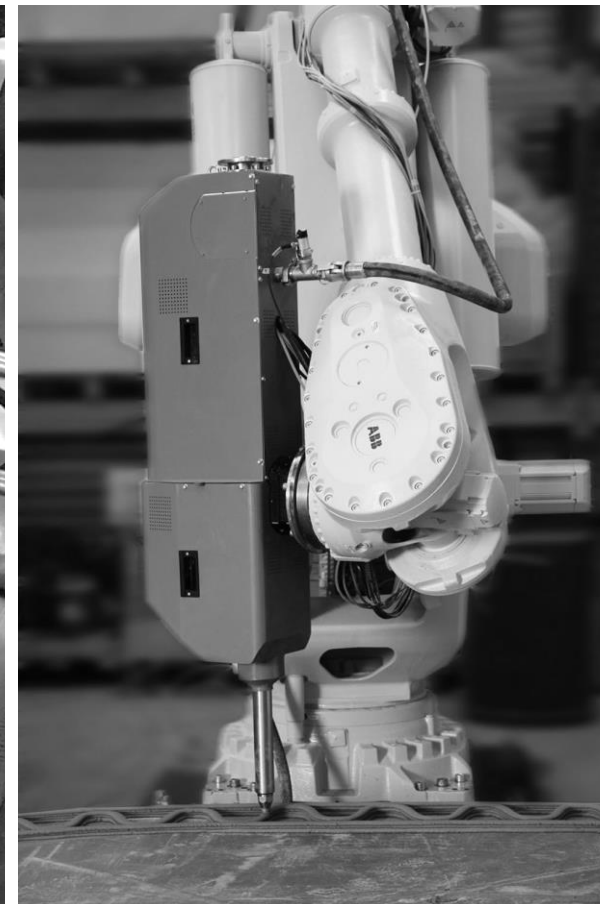
EKSTRUDERING



TEKNOLOGISK
INSTITUT

Betonen pumpes til en printdyse hvorudfra betonen "formes" til geometrien for hvert lag. Der findes overordnet set 2 typer af dyser:

1. Passive dyser. Ved passive dyser menes dyser som blot sørger for at forme betonen til den endelige geometri. Dysen er som sådan styret af robotens bevægelser samt betonpumpens fødding af materiale.
2. Aktive dyser. Her er dysen styret af en sekundær pumpe i selve dysen. Dette system tillader tilsætning af additiver i selve printdysen, hvor pumpen sørger for tilstrækkelig sammenblanding.



Venstre: Passiv dyse. Højre: Aktiv dyse (XtreeE)



EKSTRUDERING

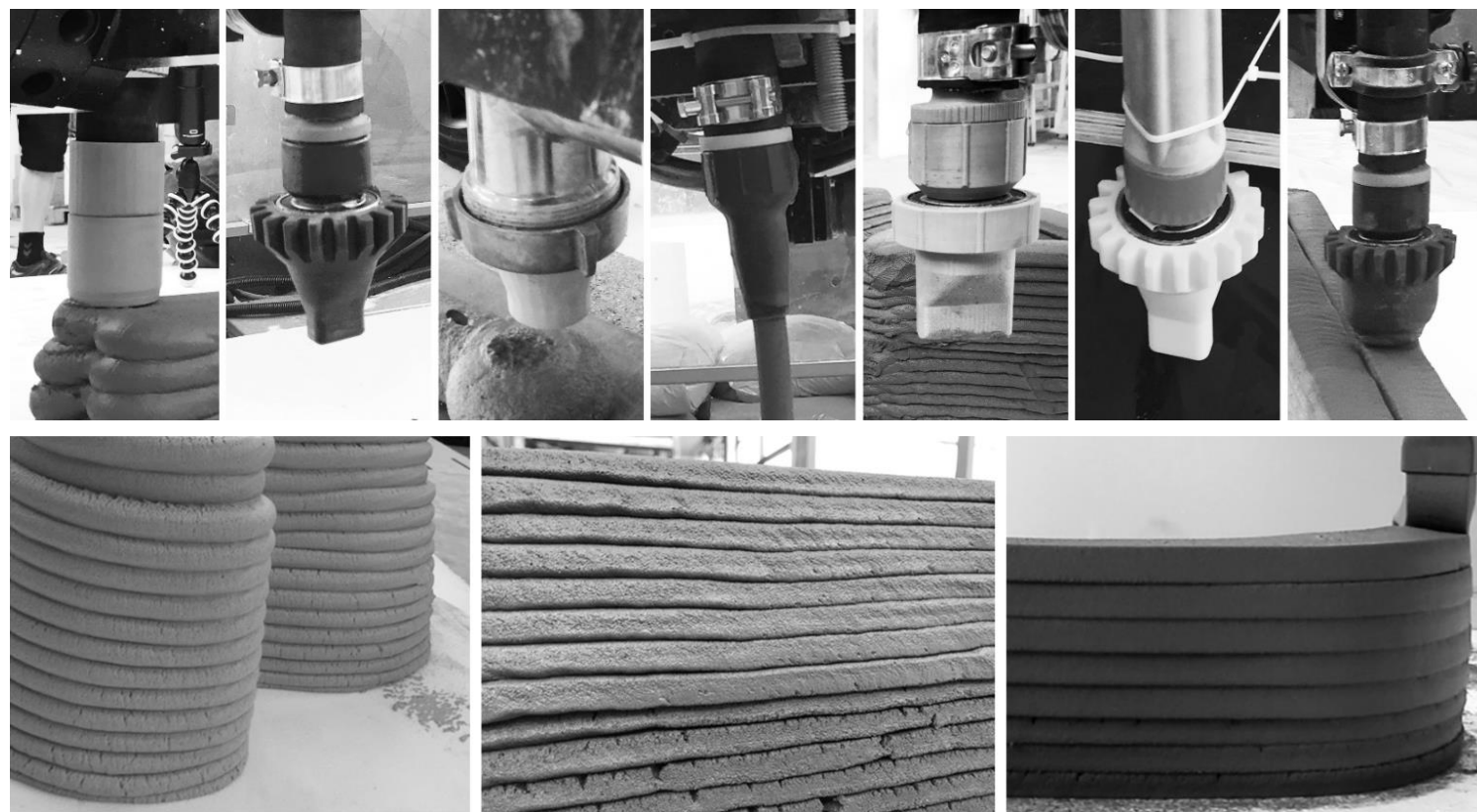
Teknologisk Institut



TEKNOLOGISK
INSTITUT

På Teknologisk Institut anvendes passive dyser til 3D-betonprint. Der er blevet 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.





ARMERING



TEKNOLOGISK
INSTITUT

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:

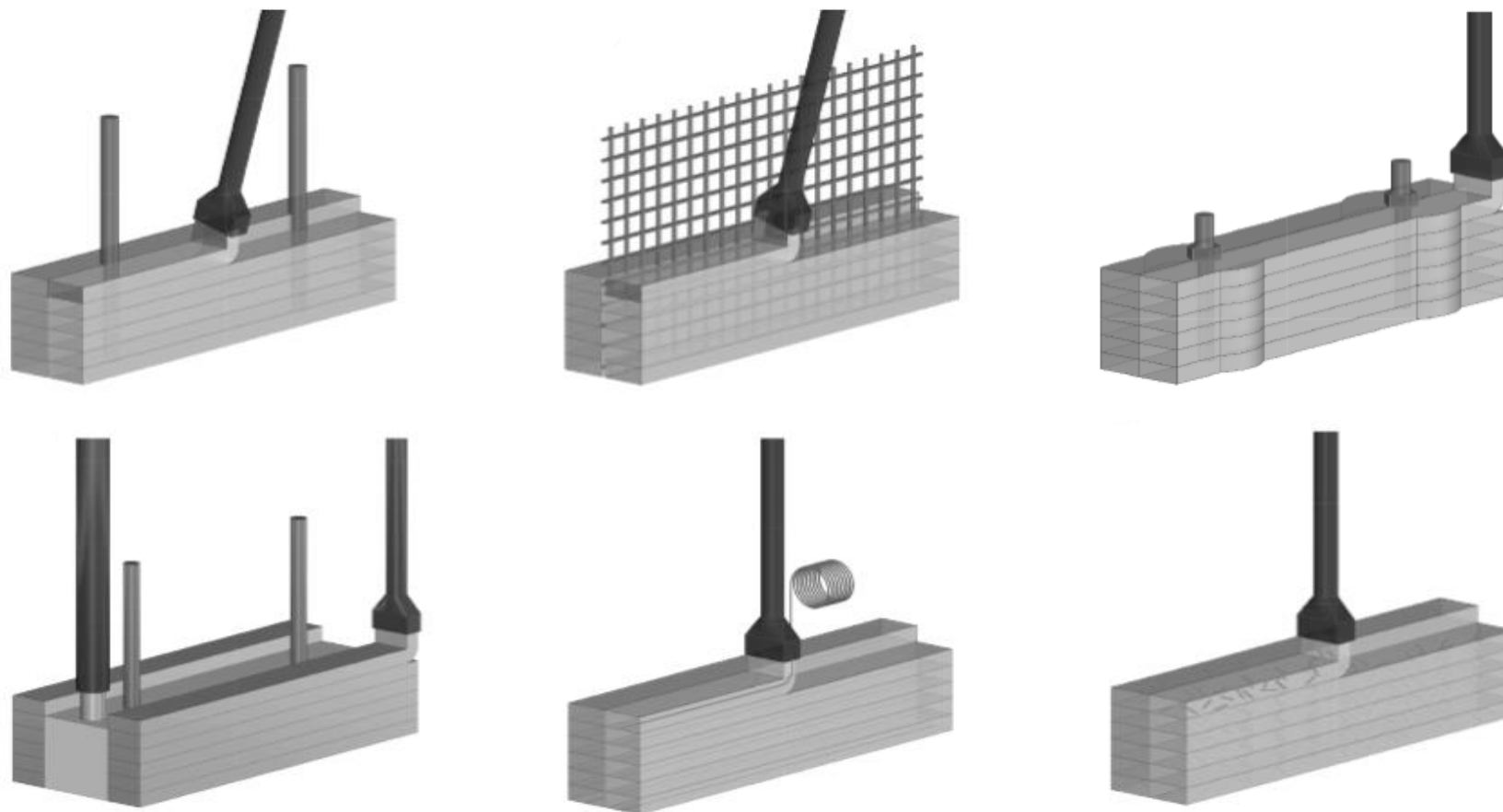
1. Omslutning af armering. Armering placeres og fastholdes inden printprocessen. Der printes nu udenom armeringen. Det er vigtigt at armeringen omstøbes korrekt, eksempelvis ved at dreje printdysen, så der printes ind mod armeringen, eller ved at sikre en tilpas flydende beton, som kan omslutte armeringen efter udlægning.
2. Traditionel udstøbning om armering. Der printes en forskalling i beton, hvorefter der traditionelt kan placeres armering som udstøbes med beton.
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.
4. Kulfiberarmering. Kulfiberarmering er fleksibelt og kan relativt nemt formes til den ønskede geometri. Herefter kan der printes på kulfibernettet, så det omslutes af beton.
5. Trådarmering. Via flerfunktionsdyse udlægges betonprint og armeringstråd i samme proces. Dermed placeres en fleksibel armeringstråd mellem hvert printet lag eller i faste intervaller.
6. Fiberarmering. Fibre kan tilsættes til betonmixet eller tilsættes i printprocessen, eksempelvis ved afklipping og blanding ved dysen. Ved sidstnævnte skal fibrene ikke via pumpeprocessen og risiko for at ødelægge pumpeudstyret minimeres.



ARMERING



TEKNOLOGISK
INSTITUT



Nogle af de anvendte principper for armering: ø.tv.) Omslutning ved at printe udenom traditionel armering, ø.m.) Kulfiberarmering hvor betonen printes på kulfibernettet, ø.th.) Efterspænding af printede konstruktioner, n.tv.) Traditionel armering ved print af forskalling og normal udstøbning, n.m.) Trådarmering hvor armeringstråd automatisk udlægges mellem printlag i printprocessen, n.th.) Fiberarmering hvor fibre er iblandet betonen.



ARMERING

Teknologisk Institut



TEKNOLOGISK
INSTITUT

2 eksperimenter på Teknologisk Institut, hvor der er anvendt armering i en 3D-betonprint kontekst:

1. Efterspændt konstruktion, som er frembragt i et samarbejde mellem Kim Utzon Arkitekter, NCC Danmark A/S og Teknologisk Institut. 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.
2. 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 udfordrer den traditionelle tankegang i 3D-betonprint om at stable betonlag, ved at printe direkte på kulfiberarmeringsnet udspændt i dobbeltkrumme konstruktioner. Metoden udnytter industrirobotens mulighed for at arbejde 5-akset i rummet og dermed opstår muligheden for at skabe lette, armerede bygningskonstruktioner med 3D-betonprint.





DESIGN



TEKNOLOGISK
INSTITUT

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.

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.

Printede betonoverflader kan varieres ved at anvende forskellige dysegeometrier og printe ved forskellige hastigheder og retninger. Herudover findes udvidede muligheder for at variere en printet betonoverflade via forskellige farver. Modsat traditionel betonstøbning, kan farverne ændres imellem de printede lag i selve

printprocessen. Dermed kan der skiftes farve fra et lag til det næste, og der kan fremkomme store farvevariationer på en flade.

En af de helt store potentialer med 3D-betonprint er at skabe materialebesparende konstruktioner. Med 3D-betonprint er der ikke samme restriktioner til udformning og design som ved traditionel støbning i støbeform, 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.

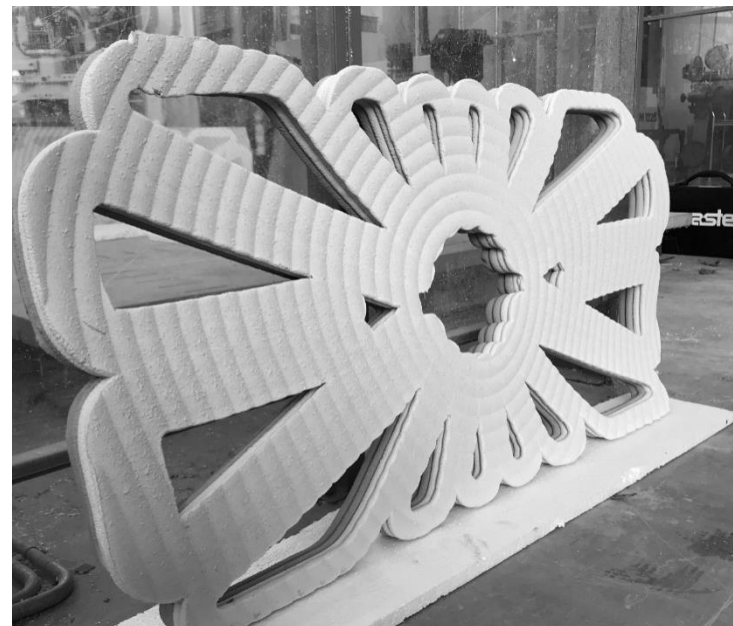
Der refereres ofte – lidt fejlagtigt – til 3D-printede bygninger, når medierne omtaler projekter med 3D-betonprint. I praksis er der ikke tale om, at hele bygningen 3D-printes – oftest vil der være tale om, at dele af råhuset er printet, typisk søjler og vægge. Her synes teknologien at være mest oplagt, 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. Der er flere eksempler på 3D-printede vægge, facader og søjler som allerede er produceret, primært prototyper og forsøgsbyggerier. Et af disse er placeret i Danmark. Således har 3D-printhuset printet deres 50 m² store bygning "The BOD", i København, som viser, hvordan der kan printes kurvede vægge, facader og søjler på stedet.



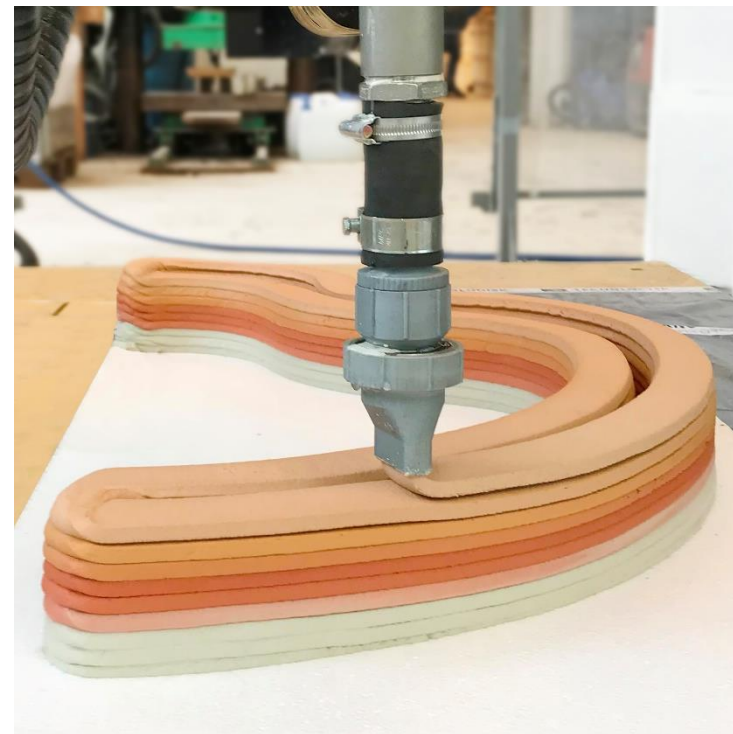
DESIGN

Teknologisk Institut

Teknologisk Institut har de seneste par år frembragt et større antal eksempler på 3D-printede betonkonstruktioner. Hver konstruktion har haft til formål at vise nogle af muligheder ved teknologien.



TEKNOLOGISK
INSTITUT



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 betontechnologien 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 funktionaltiteter i betonkonstruktioner. Her er termisk kapacitet, akustik, luftrensning og transparens nogle af de interessante funktionaltiteter. 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.