

PROJEKTNR. 13791

# **3D-printad betong**

## Design och optimering av resurser för hållbart byggande

Helena Westerlind & José Hernández Vargas Kungliga Tekniska Högskolan



## FÖRORD

Projekt 13791, *3D-printad betong: Design och optimering av resurser för hållbart byggande*, är ett samarbete mellan KTH Arkitekturskolan och KTH Byggvetenskap i partnerskap med NCC och Ramboll. Projektet pågick från 2021 till 2024 och genomfördes av en arbetsgrupp bestående av Helena Westerlind (ansvarig forskare och bihandledare), José Hernández Vargas (doktorand), Johan Silfwerbrand (huvudhandledare), Richard Malm (medverkande forskare), och Andreas Sjölander (medverkande forskare). Projektet har även stöttats av en referensgrupp som löpande följt och utvärderat dess genomförande och resultat vid återkommande möten.

#### Projektets arbetsgrupp:

Helena Westerlind, KTH Arkitekturskolan José Hernández Vargas, KTH Arkitekturskolan/KTH Byggvetenskap Johan Silfwerbrand, KTH Byggvetenskap Richard Malm, KTH Byggvetenskap Andreas Sjölander, KTH Byggvetenskap

#### Projektets referensgrupp (utöver arbetsgruppen):

Christina Claeson-Jonsson, NCC Sverige Egil Bartos, Ramboll Malin Löfsjögård, Svensk Betong Erik Stenberg, Institutionen för Arkitektur, KTH Fredrik Johansson, Institutionen för Byggvetenskap, KTH Henrik Vinell, Strängbetong Per Fjellström, BESAB Robert Larsson, Heidelberg Materials Cement Wolfram Oettel, Svensk Processteknik Tobias von Haslingen, ConcretePrint

Arbetsgruppen vill uttrycka sin djupa tacksamhet till projektets finansiärer: Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), det strategiska innovationsprogrammet Smart Built Environment (Formas) samt Hesselmanska stiftelsen. Ett stort tack riktas även till projektpartnerna Christina Claeson-Jonsson på NCC och Egil Bartos på Ramboll för deras värdefulla stöd och samarbete. Vi vill även rikta ett varmt tack till projektets referensgrupp för givande diskussioner och värdefulla synpunkter under projektets gång. Ett särskilt tack går också till Staffan Hinze för hans stöd i projektets tidiga skede samt till Wolfram Oettel, Patrick Rogers och Tobias von Haslingen för ett givande samarbete.

Stockholm, februari 2025.

## SAMMANFATTNING

Projektet har undersökt hur 3D-printning kan användas för att designa och optimera prestandan hos betongelement genom skräddarsydda printbanor. Till skillnad från konventionell gjutning, som resulterar i massiva och homogena betongelement, möjliggör 3D-printprocessen en ny nivå av kontroll över betongens uppbyggnad på storleksnivån av printmunstycket. Denna kontroll kan utnyttjas för att skapa betongelement med porösa och komplexa strukturer, som kan anpassas för att styra materialets estetiska, funktionella och strukturella egenskaper. Materialets fördelning på denna nivå kan definieras som mesostrukturer, för att särskilja från betongens sammansättning på materialnivå (mikroskalan) och utformningen av hela byggelementet (makroskalan). Projektet har vidareutvecklat en integrerad design- och tillverkningsmetod för 3DCP, ursprungligen framtagen på KTH Arkitekturskolan, som möjliggör utformning och manipulation av printbanor redan i ett tidigt designskede. Syftet med projektet har varit att undersöka metodens potential att skapa resurseffektiva betongkonstruktioner genom intern optimering av materialets distribuering efter varierande lastkrav.

Att variera betongens egenskaper på mesoskalan har mycket gemensamt med så kallade "Functionally Graded Materials" (FGM), där materialegenskaper varieras lokalt genom justerad sammansättning eller struktur. En litteraturstudie om "Functionally Graded Concrete" (FGC) identifierade tre huvudsakliga metoder för att utveckla FGC med 3DCP: (i) variabla blandningsförhållanden, (ii) variabel tillsats av partiklar och (iii) varierad förtätning. Projektets metod tillhör kategori (iii), där materialets sammansättning förblir oförändrad, men dess fördelning och geometri i en given volym påverkas genom anpassad utformning av printbanor.

I ett tidigt skede av projektet utvecklades en metodik för att utvärdera den strukturella prestandan hos ett urval av 3D-printade mesostrukturer. Materialdistributionen på mesoskalan visade sig ha en betydande inverkan på betongens bärförmåga, och studiens syfte var att bättre förstå sambandet mellan printbanornas utformning och de resulterande mesostrukturernas bärkapacitet. I studien identifierades både *skrymdensitet* och *maximal last per vikt (kN/kg)* som relevanta parametrar för att jämföra och bedöma mesostrukturers egenskaper. Storleken på kontaktarean mellan successiva printade lager visade sig ha den största påverkan på den resulterande bärkapaciteten.

Insikterna från denna studie lade grunden för fortsatt forskning om hur printbanor kan optimeras för specifika lastkrav. Det integrerade arbetsflödet för 3DCP förbättrades genom att utveckla en funktion för dynamisk anpassning av filamentbredden genom reglering av betongflödet under utskriftsprocessen. Detta nya lager av kontroll ger designern nya möjligheter att styra betongens struktur på mesoskalan, inte enbart genom printbanans utformning, utan även genom aktiv kontroll av materialflödet. Dessutom integrerades en funktion att använda färginformation för att specificera materialegenskaper i 3D-modellen och översätta dem i printbanor med variabelt flöde.

I nästa steg av projektet tillämpades det integrerade arbetsflödet för att designa och tillverka strukturellt optimerade balkar. Utmaningen låg i att optimera den interna materialfördelningen samtidigt som processkraven för utskrift respekterades. Efter att ha definierat balkens form och dimensioner användes topologioptimering för att generera en ideal materialfördelning, som sedan låg till grund för anpassade printbanor med varierat materialflöde. Två optimeringsstrategier testades och jämfördes med en kontrollbalk innehållande ett vanligt tillämpat fackverksmönster. Metoden har testats och verifierats genom tillverkning och provning av nio fullskaliga betongbalkar. När maxbelastning genom vikt jämfördes visade resultaten att balkarna med optimerade printbanor presterade ca 50% bättre än balkarna med det typiska fackverksmönstret.

Projektets centrala slutsatser i punktform:

- För att jämföra olika mesostrukturers egenskaper är skrymdensitet (kg/m<sup>3</sup>) och maximala lasten genom den använda mängden material (kN/kg) användbara värden.
- Bärförmågan hos 3D-printade mesostrukturer beror i hög grad på kontaktarean mellan successiva lager. En generell tumregel är att den högsta bärförmågan uppnås när printbanorna utformas för att maximera kontaktarean.
- De materialparametrar som är viktigast för att upprätta en numerisk modell av mesostrukturer för finit elementanalys är elasticitetsmodulen, betongens hållfasthet vid stukning samt en parameter som beskriver det multiaxiella materialbeteendet.
- För att finita elementmetoden ska kunna användas för att analysera och förutsäga mesostrukturers strukturella prestanda måste deformationen av den färska betongen under utskriftsprocessen beaktas
- Varierande materialflöde inom 3DCP kan uppnås genom att lokalt specificera printbanans rörelsehastighet och kan användas både som en metod för att kompensera och uppnå högre precision vid korsande printbanor samt som en designparameter för att kontrollera filamentets bredd under utskriftsprocessen.
- Färginformation kan användas som ett extra informationslager på en 3D-modell för att specifikt ange printbanans rörelsehastighet, vilket i sin tur påverkar den utskrivna filamentbredden.
- Skräddarsydda printabanor enligt denna metod kan användas för att internt optimera materialfördelningen i ett givet betongelement enligt varierade lastkrav samtidigt som den yttre geometrin bevaras och tillverkningsbegränsningar efterlevs



## Innehåll

FÖRORD	1
SAMMANFATTNING	2
1 INTRODUKTION	5
1.2 Bakgrund	5
1.3 Syfte	7
1.4 Tillvägagångssätt	7
1.5 Avgränsningar	8
1.6 Projektets publikationer	8
2 INTEGRERAD DESIGN OCH TILLVERKNING FÖR 3DCP	9
2.1 Robotstyrt printsystem	9
2.2 Material	10
2.3 Integrerad design och tillverkning	11
3 FUNKTIONELLT GRADERAD BETONG	13
3.1 Resultat	14
3.2 Slutsatser	14
4 STRUKTURELL ANALYS AV MESOSTRUKTURER	15
4.1 Utvärdering av bärförmåga med fysisk provning	15
4.2 Simulering och analys av mesostrukturer med finita elementmetoden	22
4.3 Slutsatser	26
5 VIDAREUTVECKLING AV METOD FÖR ANPASSADE PRINTBANOR	28
5.1 Kompenseringsmodell för konstant filamentbredd	28
5.2 Varierat materialflöde som en designparameter i 3DCP	29
5.3 Färginformation som designparameter i 3DCP	30
5.4 Slutsatser	32
6 OPTIMERING AV DESIGN FÖR 3DCP	33
6.1 Genomförande	33
6.2 Resultat	37
6.3 Slutsatser	38
LITTERATURFÖRTECKNING	39

## **1 INTRODUKTION**

Under de senaste decennierna har framsteg inom materialvetenskap gjort betong till ett alltmer högpresterande och anpassningsbart material. Samtidigt har nya numeriska metoder, såsom finita elementmetoden (FEM), möjliggjort strukturell analys och simulering av betongkonstruktioner på en detaljerad nivå som tidigare inte varit möjlig. Traditionella gjuttekniker begränsar dock möjligheten att applicera betong med skiftande egenskaper inom ett och samma byggelement. Vanligtvis specificeras en homogen betongblandning utifrån övergripande krav på belastning och hållbarhet, oavsett dess placering i konstruktionen. Dessutom är tillverkningen av formoptimerade gjutformar kostsam, vilket gör att materialbesparingar ofta prioriteras bort till förmån för enklare och mer kostnadseffektiva lösningar. Som resultat präglas dagens byggnadsbestånd till stor del av homogena och överdimensionerade betongelement som är både tyngre och mer resurskrävande än vad som egentligen är nödvändigt.

Vid extruderingsbaserad 3D-betongutskrift (3DCP) sker formgivningen av betong på munstyckets nivå, vilket ofta är på en betydligt mindre skala än det slutliga byggelementet. Utskriftsprocessen följer ett additivt förlopp där materialet byggs upp lager på lager enligt en fördefinierad printbana. Det tillverkade objektets detaljrikedom är direkt kopplat till storleken på printmunstycket, och jämfört med gjuten betong så är tillverkningsmetoden inte särskilt lämpad för massiva betongstrukturer. En solid effekt kan endast uppnås genom att placera betongfilament tätt samman. Dessutom resulterar 3DCP i anisotropiska egenskaper som skiljer sig från traditionell gjuten betong. Därför är 3DCP inte bara en ny tillverkningsmetod, utan kräver också utveckling av nya metoder för design och analys av betongkonstruktioner.

3D-printteknikens generella löfte, om att kunna producera nästan vilken form som helst, har varit den främsta drivkraften bakom utvecklingen av 3DCP, med tillämpningar som inkluderar skräddarsydda byggelement och strukturellt optimerade konstruktioner. Tidigare forskning har dock främst fokuserat på betongkonstruktionernas yttre form, medan de 3D-printade elementens inre strukturer har fått betydligt mindre uppmärksamhet. Detta kan delvis förklaras av det typiska arbetsflöde som oftast tillämpas för design och tillverkning i 3DCP, vilket utgår från en digital skalmodell för att automatiskt generera en sekvens av staplade konturlinjer som motsvarar skrivarens lagerhöjd. Inom ett litet men växande forskningsområde undersöks dock också hur direkt design och manipulation av printbanor kan leda till nya effekter och designmöjligheter inom 3DCP. Genom att tillämpa integrerade så kallade "design-to-fabrication workflows" har avancerade yttexturer (Anton et. al., 2020) och skräddarsydda materialdistributioner (Breseghello & Naboni, 2022) visat sig vara möjliga. Att integrera utformningen av printbanor tidigt i designprocessen utgör en möjlighet att både förbättra och lokalt anpassa både det arkitektoniska uttrycket och prestandan hos de slutliga 3DCP-strukturerna.

### 1.2 Bakgrund

KTH Arkitekturskolan har bedrivit forskning inom 3D-printning av betong sedan 2014, under ledning av Helena Westerlind och José Hernández Vargas. Forskningsarbetet har fokuserat på att utvidga designmöjligheterna inom 3DCP genom att utveckla tekniker och designmetoder för att kontrollera materialets distribution genom utformning av printbanor. För att särskilja från betongblandningens sammansättning (mikroskalan) och det övergripande objektets form och dimensioner (makroskalan), refererar författarna till denna mellanskala som *mesoskalan* och betongens fördelning på denna nivå som *mesostrukturer* (Fig. 1) (Westerlind, 2021).



Mikroskalan 10<sup>-6</sup>–10<sup>-2</sup> meter



Mesoskalan 10<sup>-2</sup>–10<sup>-1</sup> meter



Makroskalan 10<sup>-1</sup>–10<sup>-0</sup> meter

Figur 1. Betongens struktur på olika skalor inom 3DCP innefattar både mikro-, meso- och makrostrukturella nivåer, varje skala påverkar materialets mekaniska och fysiska egenskaper.

Forskningen fokuserar på en integrerad design- och tillverkningsprocess som baseras på samverkan mellan de programmerbara banor som styr materialets placering och den färska betongens beteende under utskriftsförloppet. Genom att inspireras av stickning har författarna tidigare presenterat en designmetod för att skapa avancerade printmönster inom 3DCP utan behovet av en detaljerad 3D modell. De har visat att den kontinuerliga extruderingen av betong kan generera mesotrukturer med komplexa yttexturer, inbyggda håligheter och permeabla egenskaper – effekter som skulle vara omöjliga att uppnå med traditionella gjutningstekniker (Fig. 2) (Westerlind & Hernández Vargas, 2020).



Figur 2. Framtagna mesostrukturer i tidigare forskning (Westerlind & Hernández Vargas, 2020).

## 1.3 Syfte

Genom att eliminera behovet av en gjutform och dra nytta av digitala arbetsprocesser har syftet med detta forskningsprojekt varit att undersöka hur 3D-printning kan överbrygga motsättningen som oftast finns mellan resurseffektiva betongelement och ekonomiskt effektivt byggande. Förmågan att kontrollera betongens uppbyggnad och fördelning i en given volym, baserat på lokala arkitektoniska, strukturella och funktionella kriterier, utgör en särskilt intressant tillämpning av 3DCP som kan utnyttjas för att både förbättra materialets prestanda och reducera materialanvändningen. Syftet med detta forskningsprojekt har specifikt varit att utforska hur optimerade printbanor kan anpassas efter varierande lastkrav och resultera i resurseffektiva betongelement med minskad materialanvändning och vikt.

För att uppnå detta mål har projektet undersökt hur strukturell topologisk optimering inom 3DCP kan tillämpas för att optimera den interna materialdistributionen av standardiserade byggelement. Topologisk optimering är en effektiv metod för att minska materialmassan i ett byggelement utan att kompromissa med den strukturella integriteten. Metoden fokuserar på att koncentrera materialanvändningen enligt den strukturella spänningsfördelningen och ta bort material som inte är strukturellt avgörande. Följaktligen är topologiskt optimerade objekt ofta i geometriskt komplexa strukturer med ihåligheter. Även om topologiskt optimerade konstruktioner har en given tillämpning inom exempelvis anläggningsbyggande, har de en begränsad praktisk tillämpning inom husbyggande. En vägg ska inte bara bära vertikala laster, utan spelar också en viktig rumslig funktion med termiska och akustiska egenskaper. Eftersom bebyggelsen till stor del består av enkla och standardiserade byggelement, kommer 3D-printningens potential för brett genomslag att vara begränsad så länge tillämpningen enbart är inriktad på komplexa byggelement. Samtidigt är resurseffektiva betongelement en förutsättning för att 3DCP ska kunna anses som ett mer hållbart alternativ till traditionella gjuttekniker. Även om den totala volymen av betong i en 3DCP-konstruktion vanligtvis är mycket mindre, har betongblandningar för 3DCP som regel en hög cementhalt och ett stort koldioxidavtryck. Det är därför ytterst viktigt att användningen av betong i 3DCP optimeras (Fig. 3).

Environmental 
$$\propto \frac{Material \ CO_2 \ \times \ \text{Total volume} + \ Process \ CO_2}{\text{Service life}}$$

Figur 3. En anpassad ekvation för klimatpåverkan inom 3DCP (Hernández Vargas, 2023).

## 1.4 Tillvägagångssätt

Projektet har genomförts i tre arbetspaket och omfattar både ett licentiatprojekt och medverkande forskare från KTH Arkitekturskolan och KTH Byggvetenskap. De tre arbetspaketen kan sammanfattas som:

1. Metodutveckling för analys och jämförelse av 3D-printade mesostrukturers bärförmåga (kapitel 4).

2. Vidareutveckling av en integrerad design och tillverkningsmetod för optimering av printbanor (kapitel 5).

3. Design och tillverkning av resurseffektiva betongelement med strukturellt optimerade printbanor (kapitel 6).

I projektets första fas har även förbättringar av ett robotstyrt 3DCP-system vid KTH Arkitekturskolan genomförts för utförande av de experiment och 3D-printade prototyper som ingått i projektet (kapitel 2). En omfattande litteraturstudie om funktionellt graderad betong (FGC) har också genomförts (kapitel 3).

## 1.5 Avgränsningar

Projektets omfattning är begränsad till extruderingsbaserad 3D-printning med färsk betong och optimering av printbanor för oarmerad 3D-printad betong.

### 1.6 Projektets publikationer

Hernández Vargas, José, Andreas Sjölander, Helena Westerlind & Johan Silfwerbrand (2024). "Internal topology optimisation of 3D printed concrete structures: a method for enhanced performance and material efficiency". *Virtual and Physical Prototyping*, 19:1, e2346290, DOI: 10.1080/17452759.2024.2346290

Westerlind, Helena, José Hernández Vargas, & Johan Silfwerbrand. (2024) "Towards the Application of Mesostructures in 3D Concrete Printing – Evaluating Load-Bearing Performance". *Nordic Concrete Research*, vol 69, no. 1, pp. 87–100. DOI: 10.2478/ncr-2023-0011.

Hernández Vargas, José. (2024). "Strategier för att minska miljöpåverkan – Optimering av 3Dbetongutskrift". *Bygg & Teknik*, no 6, pp. 36-39.

Hernández Vargas, José. (2023). Design for 3D Concrete Printing: Optimisation Through Integrated Workflows. (Licentiatuppsats). Kungliga Tekniska Högskolan.

Hernández Vargas, José. (2023). "Spatially Graded Modeling: An Integrated Workflow For 3D Concrete Printing". García Amen, F, Goni Fitipaldo, A L and Armagno Gentile, Á (eds.), *Accelerated Landscapes - Proceedings of the XXVII International Conference of the Ibero-American Society of Digital Graphics* (SIGraDi 2023), Punta del Este, Maldonado, Uruguay, 29 November - 1 December 2023, pp. 361–372.

Burton, Magnus, & Karolina Näsén. (2022). Simulation of load capacity of 3D printed concrete patterns. (Examensarbete). Kungliga Tekniska Högskolan.

Hernández Vargas, José, Helena Westerlind & Johan Silfwerbrand (2022). "Grading Material Properties in 3D Printed Concrete Structures". Nordic Concrete Research, vol. 66, no. 1, pp. 73-89. DOI: 10.2478/ncr-2022-0004.

Westerlind, Helena. (2021). "Digital Betong". Bygg & Teknik, no 6, pp. 40-42.

## 2 INTEGRERAD DESIGN OCH TILLVERKNING FÖR 3DCP

3DCP omfattar tre huvudsakliga delområden: (i) digital design och kontroll, (ii) robotik och mekanik samt (iii) materialvetenskap. Även om projektet huvudsakligen har fokuserat på design av printbanor och utskriftskontroll, har en del arbete också innefattat utveckling av teknisk utrustning och materialtester.

## 2.1 Robotstyrt printsystem

Experimenten och de 3D-printade prototyperna som ingått i projektet har huvudsakligen framställts med ett robotstyrt 3DCP-system vid KTH Arkitekturskolan (Fig. 4). Under projektets inledande fas lades fokus på att förbättra det befintliga printsystemet genom att utveckla och implementera ett nytt printmunstycke utrustat med en matarskruv.

Det nya extruderingsverktyget består av en öppen trattformad behållare och en vertikalt monterad motor som driver en matarskruv, vilken transporterar färsk betong från behållaren till printmunstycket. Behållaren fylls manuellt på med en förberedd betongblandning från en närstående mixer. För att säkerställa ett jämnt materialflöde och förhindra att betongen stelnar eller fastnar, har ett extra blad integrerats på den roterande axeln för att kontinuerligt hålla materialet i rörelse i behållaren. Beslutet att manuellt mata extruderingsverktyget direkt vid munstycket gjordes av två huvudskäl: dels för att säkerställa bättre kontroll över materialets konsistens, dels för att öka resurseffektiviteten. Prototyperna som tillverkades i projektet var relativt små, och om ett externt pumpsystem använts skulle en betydande mängd material gått till spillo i själva systemet.

Printsystemet är begränsat till "offline programmering", vilket innebär att inga justeringar av robotens rörelse kan göras under pågående utskriftsprocess. Extruderingshastigheten kan dock regleras manuellt via en separat kontrollpanel genom justering av matarskruvens rotationshastighet. Rotationshastigheter finns tillgängliga mellan 0 och 60 RPM med 3 RPM-intervall. Typiska utskriftshastigheter sätts inom intervallet 18 till 30 RPM. Extrudern kan hantera munstycken mellan 20 och 40 mm. I detta projekt användes ett 20 mm munstycke för alla experiment.



Figur 4. 3DCP-system, KTH Arkitekturskolan (Hernández Vargas, 2023).

### 2.2 Material

Två kommersiellt tillgängliga torrblandningar, särskilt utvecklade för 3DCP, testades för kompatibilitet med printsystemet: en från Italcementi och en från Sika (Fig. 6). Efter genomförda printförsök visade sig Sikacrete<sup>®</sup>-751 vara det mest lämpliga materialet för fortsatt arbete, då dess färska egenskaper var mer stabila och öppentiden längre.

Sikacrete<sup>®</sup>-751 är ett kommersiellt enkomponents bruk, speciellt framtagen för 3DCP. Blandningen har en maximal kornstorlek på 1 mm och rekommenderas att blandas med 14,5 % vatten per vikt. Tester visade att materialet kunde användas mellan 10 och 90 minuter efter blandningstillfället. Materialets tidiga hållfasthetutveckling presenteras i Figur 5.



Figur 5. Tidig hållfasthetsutveckling hos Sikacrete-751 3D (Hernández Vargas, 2023).

	1.	IECE JD N	SIKA	CKEIE-131 3D		
Manufacturer	It Heidelb	alcemnti, ergcement Group		Sika		
Aggregates		0-2 mm	0-1 mm			
Fibres		Yes	No			
Water content	(	16% 16 - 18%)	14.5 % (14 - 15%)			
Bulk density (fresh)	2	150 kg/m <sup>3</sup>	2110 kg/m³ (15% vatten)			
Open time		28 min	TBC			
Bulk density (solid)	2	000 Kg/m <sup>3</sup>	2	2140 Kg/m <sup>3</sup>		
Compressive strength	1 day	15 MPa	1 day	30 MPa		
	7 days	40 MPa	7 days	N/A		
(mra)	28 days	60 MPa	28 days	50 MPa		
	1 day	3 MPa	1 day	3.5 MPa		
strength	7 days	8 MPa	7 days	N/A		
(MPa)	28 days	9 MPa	28 days	10 MPa		

Figur 6. Två kommersiella torrblandningar för 3DCP som har testats i projektet.

### 2.3 Integrerad design och tillverkning

Ett typiskt design- och tillverkningsförlopp för 3DCP utgår från en 3D-modell och består av tre distinkta steg: i) utformning av den övergripande geometrin, ii) planering av materialfördelningen och iii) generering av tillverkningsinstruktioner. Medan det första steget I regel sker inom en CADmiljö, utförs genereringen av printbanor och det som kallas "slicing" vanligtvis i en separat programvara. Detta kräver att den framtagna modellen exporteras i ett kompatibelt filformat, vilket skapar en tydlig uppdelning mellan design och tillverkning. Denna klyfta mellan design och tillverkning förmedlas oftast genom STL-filer – ett enkelt triangulerat format som enbart beskriver objektets yta utan information om skala, färg, textur eller annan relevant metadata. I detta arbetsflöde begränsas designprocessen således främst till den övergripande geometrin, medan detaljerade utskriftsparametrar hanteras separat.



Figur 7. Alternativa arbetsflöden för materialfördelning och "slicing" av geometrin för 3D-utskrift (Hernández Vargas et. al., 2024).

Jämfört med den standardiserade design- och tillverkningsprocess som beskrivs ovan använder detta projekt specialutvecklade skript för att designa utskriftsbanor direkt inom en utökad CAD-miljö (Fig. 7). Verktyget är utvecklat i Python inom Grasshopper<sup>®</sup>, ett visuellt programmeringsverktyg för parametrisk modellering i Rhinoceros<sup>®</sup>. Genom denna integrerade design- och tillverkningsmetod utvidgas designutrymmet för 3DCP, vilket gör det möjligt för designern att generera och visualisera avancerade utskriftsbanor direkt i 3D-modelleringsmiljön, utan krav på en detaljerad förutbestämd 3D-modell. Tidigare forskning har främst tillämpat metoden för att skapa varierade yttexturer i 3DCP, men den gör det även möjligt att anpassa den interna materialfördelningen och geometrin på mesonivå både för funktionella och strukturella syften (Westerlind & Hernández Vargas, 2020; Westerlind, 2021). I detta projekt vidareutvecklades och förfinades metoden, som här definieras som "post-slicing"-metoden (Fig. 7).

## **3 FUNKTIONELLT GRADERAD BETONG**

Att kunna kontrollera betongens distribution och funktion på mesonivå har stora likheter med konceptet "Functionally Graded Materials (FGM)" inom materialvetenskap. Det är ett begrepp som myntades på 1970-talet för att beskriva tillverkade material vars egenskaper kan varieras lokalt inom samma volymenhet genom förändring av materialets sammansättning, porositet eller inre mikrostruktur. I det här projektets inledande fas genomfördes en omfattande litteraturstudie kring begreppet "Functionally Graded Materials" (FGM) samt möjligheten att skapa funktionellt graderad betong (FGC) med hjälp av 3DCP. Studien är publicerad i sin helhet i *"Grading Material Properties in 3D Printed Concrete Structures"* (Hernández et. al, 2021), och sammanfattas kortfattat nedan.

Material vars egenskaper anpassas utifrån yttre och inre faktorer är vanliga i naturen, exempelvis i olika benmaterial och bambu, där materialstrukturen blir tätare i områden med högre inre spänningar. Industriell tillverkning har däremot främst präglats av användningen av homogena material, och FGM har länge varit förbehållna avancerade applikationer inom specialområden såsom rymd- och medicinteknik, eftersom höga tillverkningskostnader har begränsat en bredare användning. Med utvecklingen av additiv tillverkning har förutsättningarna för större tillämpning av FGM emellertid förbättrats avsevärt. Den inbyggda lager-på-lager-principen och den höga precisionen i 3D-printning möjliggör att graderingen av materialegenskaper kan bli en integrerad del av tillverkningsprocessen. Det innebär att specifika materialegenskaper kan definieras direkt i den digitala modellen som en extra designparameter (Fig. 8).



Figur 8. Ett exempel på en 3D-printad FGM genom generation av variabla mikrostrukturer för att kontrollera flexibilitet (Martínez et. al., 2016).

För betongkonstruktioner är tillämpningen av funktionell gradering särskilt intressant, eftersom det ger möjlighet att lokalt optimera olika egenskaper inom ett och samma byggelement. Flera studier har visat på fördelarna med att använda funktionellt graderad betong för att selektivt förbättra betongens materialegenskaper och möta specifika designkrav utan att över- eller underspecificera hela blandningen. Detta gör det möjligt att lösa motstridiga prestandakrav och därigenom balansera olika designmål. I traditionellt gjutna betongelement förstärks konstruktioner antingen genom att använda en högre betongklass eller ökad dimensionering, vilket samtidigt leder till ökad vikt. Med funktionellt graderad betong kan man i stället skapa byggelement med en inre struktur som är tätare och mer koncentrerad i områden med hög belastning, och porösare och lättare i de mindre utsatta delarna. Denna typ av optimerade betongkonstruktioner har stor potential att minska materialförbrukningen och därigenom reducera betongens miljöpåverkan.

## 3.1 Resultat

Studien identifierar tre möjliga tillvägagångssätt för att implementera *Functionally Graded Concrete* (FGC) med hjälp av 3DCP:

1. Variabla blandningsförhållanden – där sammansättningen av betongen anpassas lokalt för att optimera specifika materialegenskaper.

2. Variabel tillsats av partiklar – genom att selektivt tillsätta fibrer, nanopartiklar eller andra förstärkande material kan betongens prestanda skräddarsys i olika zoner.

3. **Varierad förtätning** – där materialets porositet och densitet justeras för att anpassa konstruktionens mekaniska och funktionella egenskaper.

Studien visade vidare att faktiska tillämpningar av FGC fortfarande är begränsade. Detta beror delvis på svårigheten att utnyttja 3DCP-processens fulla potential med befintliga design och modelleringsmetoder. För att möjliggöra en bredare tillämpning av FGC krävs en samordnad utveckling där designmetoder och printsystemens funktionalitet utvecklas parallellt, så att tillverkningsparametrar kan integreras i strukturella och byggtekniska lösningar.

## 3.2 Slutsatser

- Funktionellt graderad betong (FGC) inom 3DCP kan både minska materialförbrukningen och förbättra betongkonstruktioners prestanda.
- Trots att flera exempel på FGC existerar, befinner sig utvecklingen fortfarande i ett tidigt skede och ytterligare teknikutveckling krävs innan fördelarna kan väga upp de ökade kostnaderna för bearbetning och utrustning.
- Inom 3DCP kan FGC uppnås genom variation i materialets sammansättning, tillsats av partiklar eller genom materialets distribution.
- En av de största utmaningarna för en bredare tillämpning av FGC är att existerande designmetoder är anpassade för konventionella byggtekniker och därför saknar stöd för att effektivt integrera funktionellt graderade materialegenskaper.

## **4 STRUKTURELL ANALYS AV MESOSTRUKTURER**

För att optimera mesostrukturer för resurseffektiva 3D-printade byggelement är det avgörande att först förstå deras bärförmåga på en grundläggande nivå. Befintliga analysmetoder är främst utvecklade för konventionellt gjuten betong och utgår därför från antagandet att betongen är en homogen och isotropisk massa. Därför ställdes projektet tidigt inför utmaningen att existerande modellerings- och mätmetoder inte är lika väl lämpade för att utvärdera prestandan hos komplexa 3D-printade mesostrukturer med inbyggda håligheter och oregelbundna tvärsnitt.

Tidigare forskning inom 3DCP har visat att den anisotropiska naturen hos 3D-printade element kräver alternativa metoder för att utvärdera och modellera materialegenskaper (Mechtcherine et. al., 2022). Flera studier har undersökt hur den additiva tillverkningsprocessen påverkar betongens härdade egenskaper och visat att en viss reduktion i den strukturella prestandan kan förväntas till följd av den lager-baserade strukturen (Le et. al., 2012; Buswell et. al., 2018; Wolfs et. al., 2019; Paul et. al., 2019). Dock har majoriteten av dessa studier fokuserat på enkel stapling av filament, medan endast ett fåtal har utvärderat mer geometriskt komplexa materialdistributioner som uppstår genom icke-standardiserade printmönster.

Målet med denna studie var att utveckla en metodik för att utvärdera och jämföra bärförmågan hos framställda mesostrukturer genom fysisk provning. Parallellt genomfördes även initiala försök att analysera digitala tvillingar av mesostrukturerna med hjälp av finit elementanalys (FEA). Syftet var att jämföra simulering med de fysiska provresultaten för att bedöma metodens tillförlitlighet och potential för att analysera och förutse mesostrukturers bärförmåga (Fig. 9).



Figur 9. Fysisk tryckprovning (vänster), Finit elementanalys (höger).

### 4.1 Utvärdering av bärförmåga med fysisk provning

I ett första steg utvecklades en experimentell metod för att utvärdera bärförmågan hos ett urval av framställda mesostrukturer. Testförfarandet utgick från standarden för "Provning av härdad betong" (EN 12390-3:2019), men modifierades avsevärt för att kunna analysera printade mesostrukturer med inbyggda håligheter och varierande tvärsnitt. Som kontrollreferens har även gjutna provkroppar framställts och testats med samma betongblandning. Studien i sin helhet, "Towards the Application of Mesostructures in 3D Concrete Printing – Evaluating Load-bearing Performance", är publicerad i Nordic Concrete Research Journal. Nedan följer en kort sammanfattning.

#### Genomförande

Tre printmönster (A, B och C) genererades med det digitala designverktyg som utvecklats vid KTH Arkitekturskolan och printades för att producera testbara provkroppar. Mönstren utformades utifrån tre olika linjetyper med syftet att skapa mesostrukturer med varierande yttexturer och intern materialfördelning (Fig. 10 & Tabell 1). Utöver dessa utvecklades ett fjärde printmönster (D), baserat på en yttre konturlinje med ett internt fackverk. Denna typ av printbana är vanligt förekommande för vertikala element inom 3DCP, då den ger stöd och minskar risken för instabilitet under utskriftsprocessen, samtidigt som den bidrar till den strukturella stabiliteten hos det färdiga objektet (Roussel, 2018). Mönstrens storlek anpassades för att möjliggöra extraktion av tre lika stora provkroppar med måtten  $I \times w \times h = 15 \times 10 \times 15$  cm från varje prototypmönster. Notera att begreppet *printmönster* här används för att referera till de tredimensionella printbanor som styr printmunstyckets rörelse, medan *mesostrukturer* hädanefter används för att referera till de utskrivna elementen. Dessutom producerades tre gjutna provkroppar med samma dimensioner.



Figur 10. Genererade printbanor för mönster A, B, C och D (Westerlind et. al., 2024).

Pattern	Line type	Stacking	Layer height Nr. of Leng [mm] layers		Length of print path/ layer [cm]	Total length of print path [cm]
Α		1/1	10	15	180	2924
в	elele	1/1	10	15	187	3010
С	ssss	1/1	10	15	140	2315
D	~~~~	1	10	15	217	3262

Tabell 1. Parametrar för generering av printmönster (Westerlind et. al., 2024).



Figur 11. Topp- och sidovy av de utskrivna mesostrukturerna A, B, C och D (Westerlind et. al., 2024).

Direkt efter utskrift täcktes mesostrukturerna med plast för att förhindra snabb uttorkning och lämnades i 24 timmar på utskriftsplattformen innan de flyttades till en lufttät kammare för att härda i ytterligare 27 dagar vid 99 % luftfuktighet och en temperatur på 20 °C (Fig. 11). Efter 28 dagar sågades de utskrivna mesostrukturerna i tre lika långa sektioner (Fig. 12).



Figur 12. Toppvy och vertikalt tvärsnitt av provkropparna A.1, B.1, C.1 och D.2 (Westerlind et. al., 2024).

Alla provkroppar vägdes och mättes noggrant. Arean på deras över- och undersidor fastställdes genom att skapa avtryck på papper, vilka därefter skannades och analyserades (Fig. 13). Materialvolymen för varje provkropp beräknades med hjälp av vattenförträngningsmetoden. De gjutna provkropparna avformades och genomgick samma vägning och mätning.



STEP 1: Flattening of top and base surfaces



STEP 2: Length measurements



STEP 3: Mass measurement



STEP 4: Measuring volume of specimen



STEP 5: Calculating top and base surface areas

Figur 13. Vägning och mätning av provkroppar.

Trycktesterna genomfördes efter 28 dagar. Provkropparna belastades vinkelrätt mot printriktningen under deformationskontroll med en hastighet på 0,01 mm/s. Tabell 2 visar den maximala last som uppmättes för varje prov innan brott. Tryckhållfastheten beräknades genom att dividera den belastning som applicerades vid brottgränsen med den uppmätta övre kontaktytan på varje provkropp.



Figur 14. Last-förskjutningskurvor för provkroppar från Mesostruktur A vid tryckprovning.



Figur 15. Brottsmönster för Mesostruktur A.



Figur 16. Last-förskjutningskurvor för provkroppar från Mesostruktur B vid tryckprovning.



Figur 17. Brottsmönster för Mesostruktur B.



Figur 18. Last-förskjutningskurvor för provkroppar från Mesostruktur C vid vid tryckprovning.



Figur 19. Brottsmönster för Mesostruktur C.

#### Resultat

Vid jämförelse av provkropparnas densitet måste två densitetsvärden beaktas: materialets egen densitet och skrymdensiteten på mesonivå, det vill säga betongens fördelning i den utskrivna volymen (15 × 10 × 15 cm). Den genomsnittliga materialdensiteten för de gjutna provkropparna uppmättes till 2094 kg/m<sup>3</sup>. För de 3D-printade provkropparna visade materialdensiteten sig vara något högre, vilket tyder på att en viss kompaktion har skett under extruderingsprocessen. Skrymdensiteten beräknades genom att dividera materialets vikt med provkropparnas totala volym (skrymvolym). På grund av skillnader i de utskrivna mönstrens geometri varierar skrymdensiteten för mesostrukturerna, men samtliga är avsevärt lägre än den gjutna betongens densitet. Den lägsta skrymdensiteten uppmättes för Mesostruktur C, med ett genomsnitt på 1250 kg/m<sup>3</sup>, medan mönster A hade den högsta materialförbrukningen med en genomsnittlig skrymdensitet på 1580 kg/m<sup>3</sup>.

Vid jämförelse av Mesostruktur A, B och C uppvisade Mesostruktur B den högsta bärförmågan, med en maximal belastning på 157,8 kN, medan Mesostruktur C sprack vid 92,0 kN. När den maximala

lastkapaciteten i förhållande till materialförbrukning analyserades (se maximal last/vikt i Tabell 2), presterade Mesostruktur B bäst. Detta indikerar att printmönster B gav den mest effektiva materialfördelningen ur ett strukturellt perspektiv.

		Mesostructure A	ucture Mesostructure Mesostructure B C D		Cast concrete E	
Length	mm	150,4	150,4	150,2	146,3	151,8
Width	mm	105,1	104,9	96,1	112,3	101
Height	mm	144,7	145,3	140,3	151,8	150,5
Mass	g	3626	3442	2539	3779	4832
Material volume	cm <sup>3</sup>	1717	1608	1194	1750	2308
Material density	kg/m³	2112	2140	2126	2159	2094
Bulk volume	cm <sup>3</sup>	2342	2347	2049	2494	-
Bulk density	kg/m³	1580	1500	1250	1514	-
Area [top]	mm <sup>2</sup>	7774	8146	4535	8899	15334
Area [bottom]	$\mathrm{mm}^2$	16466	11092	11873	10010	15334
Max load	kN	151,4	157,8	92,0	313,5	669,3
Max load/ weight	kN/kg	41,75	45,83	36,23	82,94	138,5
Comp. strength	MPa	19,4	19,5	20,6	35,16	43,7

Tabell 2. Genomsnittliga värden av testresultat (Westerlind et. al., 2024).

Den stora reduktionen i bärförmåga kan tillskrivas den mindre kontaktytan mellan successiva printlager, vilket resulterat i lägre vidhäftning och en mindre andel överlappande material som aktivt överför laster (Fig. 20). Mesostruktur C kunde motstå den minsta lasten, vilket inte är förvånande med tanke på den lilla kontaktytan mellan successiva lager.



Figur 20. Första utskriftslagret för mönster A, B, C och D i rött (överst) med det andra utskriftslagret i blått och synlig överlappning mellan lagren i lila (nederst) (Westerlind et. al., 2024).

Mesostruktur B uppnådde cirka 20 % av lastkapaciteten hos de gjutna provkropparna. När hänsyn även tas till lastkapaciteten i förhållande till materialförbrukning (kN/kg), presterade Mesostruktur B (45,83 kN/kg) cirka 33 % jämfört med den gjutna betongen (138,5 kN/kg). Mesostruktur D (82,94 kN/kg), som representerar ett standardiserat printmönster, nådde cirka 60 % av gjuten betongs kapacitet. De olika printmönstren resulterade även i varierande styvhet, vilket kan kopplas till den komplexa utvecklingen av mikro-sprickbildning längs mesostrukturerna.

### 4.2 Simulering och analys av mesostrukturer med finita elementmetoden

Att kunna analysera och förutse prestandan hos olika printmönster med hjälp av finita elementmetoden (FEM) skulle vara mycket värdefullt för tillämpningen av mesostrukturer inom 3DCP, i två huvudsakliga avseenden: dels för att möjliggöra en initial utvärdering av nya mönster, dels för att förutspå prestandan hos variationer av samma mönster. Detta skulle i sin tur öppna upp möjligheterna för att optimera printbanor baserade på lokala prestandakrav. En studie genomfördes därför med Rickard Malm vid KTH Byggvetenskap, med följande två syften:

1. **Strukturell analys av mesostrukturer** – Utförande av FEM-analyser för att utvärdera och förutse 3D-printade mesostrukturers bärförmåga.

2. **Simulering av färsk betong i 3DCP** – Modellering och simulering av färsk betongs beteende under utskriftsprocessen med hjälp av finita elementmetoden, med målet att skapa 3D-modeller som mer exakt överensstämmer med de 3D-printade mesostrukturerna.

#### FEM-analyser av mesostrukturers bärförmåga

Precis som den fysiska provningen i 4.1 så krävde FEM-analys av 3D-printade mesostrukturer viss anpassning jämfört med traditionella analyser av betongkonstruktioner. Utvecklingen av en numerisk modell för att utvärdera mesostrukturernas bärförmåga genomfördes huvudsakligen inom ramen för ett examensarbete vid KTH Byggvetenskap. Studien utfördes av studenterna Magnus Burton och Karolina Näsén under handledning av Rickard Malm (KTH), Egil Bartos (Ramboll) och Sten Nilsson (Skanska) samt med stöd av Helena Westerlind och José Hernandez Vargas. Arbetet är redovisat i sin helhet i masteruppsatsen "Simulation of Load Capacity of 3D Printed Concrete Patterns" (Burton & Näsén, 2022), och sammanfattas kortfattat i denna rapport.

I examensarbetet analyserades förenklade 3D modeller av Mesostrukturerna A, B och C som ingått i den fysiska provningen (Fig. 21). Syftet med studien var att utveckla en numerisk modell som så nära som möjligt efterliknade de fysiska labbresultaten erhållna i 4.1. Som en del i detta arbete ingick en studie om vilka materialparametrar som spelar störst roll vid modellering av 3D-printade mönster.



Figur 21. Importerade CAD-modeller för studerade mesostrukturer i STEP (.stp) format. Mönster A (vänster), Mönster B (mitten) och Mönster C (höger) (Burton & Näsén, 2022).

Av de sex olika materialparametrarna som studerades visade det sig att de mest avgörande för att uppnå resultat som är jämförbara med de genomförda labbtesterna var elasticitetsmodulen, betongens hållfasthet vid stukning samt en parameter som beskriver det multiaxiella materialbeteendet. De övriga parametrarna hade mindre inverkan på modellen.



Figur 22. Last-förskjutningskurvor för gjutna provkroppar vid simulering av bärförmåga (Burton & Näsén, 2022).

Simuleringarna av de fysiska labbtesterna i sektion 4.1 genomfördes med den numeriska modellen som förfinats i Abaqus, och utfördes med samma inställningar för alla provkroppar. Simulering av den solida provkroppen visade på en bärförmåga som väl överensstämde med tryckprovningen i labbförsöken (Fig. 22).



Figur 23. Last-förskjutningskurvor för Mesostruktur A vid simulering av bärförmåga (Burton & Näsén, 2022).

Simulering av Mesostruktur A resulterade i 83% av bärförmågan som uppmättes i den fysiska provningen (Fig. 23).



Figur 24. Last-förskjutningskurvor för Mesostruktur B vid simulering av bärförmåga (Burton & Näsén, 2022).

Simulering av Mesostruktur B resulterade i 82% av bärförmågan (Fig. 24) och Mesostruktur C resulterade i 60% av bärförmågan som uppmättes i den fysiska provningen (Fig 25).



Figur 25. Last-förskjutningskurvor för simulering av Mesostruktur C vid simulering av bärförmåga (Burton & Näsén, 2022).

Att simuleringen av den solida provkroppen stämde väl överens med resultaten från tryckprovningen tyder på att den numeriska modellen som användes i simuleringarna på ett tillförlitligt sätt representerar materialets egenskaper och beteende. Att simuleringarna av mesostrukturerna skiljde sig avsevärt från de experimentella resultaten kan ha tre möjliga orsaker: För det första kan analyserna underskattat de svaga zoner som förekommer i mönstren. För det andra kan elasticitetsmodulen vara felaktig, vilket resulterat i att materialet uppfattas som för mjukt. Slutligen kan en ytterligare orsak vara att kontaktarean i modellerna inte varit helt överensstämmande med verkligenheten.

Eftersom simuleringarna baserades på en förenklad 3D-modell av mesostrukturernas geometri har betongens deformation under utskriftsprocessen inte beaktats. Därför är det inte förvånande att FEM-analysen inte exakt återspeglar resultaten från de fysiska testerna. Den färska betongens deformation i de utskrivna strukturerna har synbarligen lett till en större kontaktarea mellan lagren, vilket kan förklara den högre bärförmåga som uppmättes vid tryckprovningen

I enlighet med resultaten från den fysiska studien visade de mönster som hade större kontaktarea mellan lagren de bästa resultaten. Jämförelsen mellan geometri och kontaktarea för de analyserade mönstren avslöjar betydande skillnader. Enligt resultaten uppmättes en kontaktarea per lager på 55 % för mönster C, medan för både mönster A och B observerades en kontaktarea på över 70 %. Detta är en möjlig förklaring till den lägre bärförmågan hos mönster C.

#### Simulering av färsk betong i 3DCP

En av de största förbättringspotentialerna för att uppnå mer tillförlitliga FEM-resultat skulle vara att använda en 3D-geometrisk modell som mer exakt återspeglar de faktiska 3D-utskrivna strukturerna från de specifika printbanorna. För detta ändamål undersökte projektet därför även möjligheten att modellera och simulera färsk betongs beteende under utskriftsprocessen med hjälp av finita elementmetoden.

Det enklaste sättet att skapa en 3D-modell av printbanor är att tilldela varje printbana en tjocklek och ett tvärsnitt som motsvarar det extruderade filamentet. Denna modell tar dock inte hänsyn till materialets beteende under printprocessen och kan därför endast ses som en förenklad representation av den utskrivna geometrin. Även om detta tillvägagångssätt kan anses vara tillräckligt för att representera enkla staplade filament, är det mindre lämpligt för att återspegla 3Dprintade strukturer baserade på komplexa printmönster. Exempel på relevant materialbeteende som uppstår under utskriftförloppet inkluderar:

• Betongens sättning under sin egentyngd vid extrudering och deformation i områden där materialet inte har fullständigt stöd från ett underliggande lager (så kallat "overhang" och "bridging").

• Variationer i flödeshastighet (flow rate) och printfart (travel speed), vilket påverkar volymen av material som deponeras och kan leda till ojämnheter i filamentets bredd och struktur.

• Betongens tixotropiska egenskaper och potentiella deformation över tid som ett resultat av tyngden från de övre lagren under uppbyggnadsprocessen, vilket kan påverka den strukturella integriteten och precisionen i de utskrivna delarna.

En FEM-baserad metod för att simulera den färska betongens beteende under printprocessen utgick från en förenklad 3D geometri av en given printbanana och utfördes i programvaran Abaqus (Fig. 26).



Figur 26. Förenklad 3D modell av mesostruktur.

Därefter introduceras en fördröjning i elementen i respektive lager för att simulera det tidsbaserade utskriftförloppet. Detta innebär att modellens storlek växer under simuleringens gång (Fig. 27).



Figur 27. Uppdelning av lager över tid.

Vidare specificerades relevanta materialegenskaper, randvillkor och laster för simulering innan simuleringen av utskriftsprocessen initierades (Fig. 28).



Figur 28. Modell av mesostruktur efter simulering i Abaqus.

### 4.3 Slutsatser

- För att jämföra olika mesostrukturers materialfördelning kan skrymdensitet användas som en lämplig måttenhet, det vill säga mängden betong i förhållande till den givna yttre printvolymen (kg/m<sup>3</sup>).
- Mesostruktur C visade sig vara det mest resurseffektiva mönstret med en skrymdensitet på 1250 kg/m<sup>3</sup>.

- I stället för att använda tryckhållfasthet (N/mm<sup>2</sup>) användes maximala lasten innan brott genom den använda mängden material (kN/kg) som ett värde för att jämföra de printade mesostrukturernas förmåga att motstå last.
- Mesostruktur D med ett konventionellt fackverksmönster, hade 60% av bärförmågan jämfört med konventionell gjuten betong. Mesostrukturer A-C, som representerade ickekonventionella printmönster hade ungefär 30% av kapaciteten jämfört med konventionell gjuten betong.
- En jämförelse mellan mesostrukturerna A, B och C visade att B var den starkaste i förhållande till den använda mängden material. Detta tyder på att B erbjuder den mest effektiva materialfördelningen ur ett strukturellt perspektiv.
- Bärförmågan hos 3D-printade mesostrukturer är nära kopplad till kontaktarean mellan successiva lager. Som tumregel gäller att högst bärförmåga uppnås med printbanor som resulterar i störst kontaktarea. Därför är det mest effektiva mönstret, både vad gäller bärförmåga och materialanvändning, ett mönster med en stor kontaktarea.
- Detta samband mellan printbanans geometri och den resulterande bärförmågan indikerar att designkrav för porösa mesostrukturer med intrikata yttexturer inte är förenliga med strukturellt optimerade printbanor i 3DCP.
- Ett verktyg för att simulera kontaktareorna och hur de förändras under utskriftsprocessen skulle vara fördelaktigt för att fastställa hur printbanor kan optimeras för att förbättra strukturella prestandan.
- De materialparametrar som är viktigast för att upprätta en numerisk modell för FEM-analys av mesostrukturer är elasticitetsmodulen, betongens hållfasthet vid stukning samt en parameter som beskriver det multiaxiella materialbeteendet
- För att finit elementanalys ska kunna användas för att skapa modeller som efterliknar 3Dprintade mesostrukturer och deras strukturella beteende måste deformationen av den färska betongen under utskriftsprocessen beaktas.

## 5 VIDAREUTVECKLING AV METOD FÖR ANPASSADE PRINTBANOR

#### 5.1 Kompenseringsmodell för konstant filamentbredd

Under utvärderingen av mesostrukturer i Kapitel 4 observerades att mönster med korsande banor tenderade att generera ojämna filamentbredder. När utskriftsbanor överlappar eller när materialflödet varierar kan filamentets bredd bli oregelbunden, vilket påverkar både precision och strukturell kvalitet. För att motverka detta och säkerställa en så konstant filamentbredd som möjligt under hela utskriftsprocessen utvecklades en kompenseringsmetod som integrerades i det digitala designverktyget.



Figur 29. Kompenseringsmetod för korsande printbanor.

Metoden bygger på lokal justering av rörelsehastigheten (V) vid korsande banor genom att öka hastigheten för att minska mängden extruderat material vid dessa specifika punkter (Fig. 29). Denna modulering av rörelsehastigheten erbjuder en enklare och mer direkt kontrollmekanism jämfört med att justera extruderingshastigheten (U), eftersom hastigheten kan regleras direkt från robotens styrsystem. Efter kalibrering av relationen mellan rörelsehastighet och filamentbredd resulterade kompensationsmodellen i en jämnare filamentbredd och förbättrad precision vid självkorsande printbanor (Fig. 30).



Figur 30. Testobjekt med kompenseringsmetod (vänster), och utan kompenseringsmetod (höger).

#### 5.2 Varierat materialflöde som en designparameter i 3DCP

Den ovan beskrivna kompenseringsmetoden möjliggör nyvunnen kontroll över filamentets dimensioner genom att justera robotens rörelsehastighet. Sammanfattningsvis ger högre rörelsehastighet ett smalare filament, medan lägre rörelsehastighet resulterar i bredare filament. Förutom utformningen av själva printbanan, tillför denna förbättrade processkontroll ytterligare en möjlighet för att justera materialdistributionen under utskriftsprocessen. Eftersom utvärderingen av mesostrukturerna i Kapitel 4 visade att printmönster med korsande och icke-överlappande banor inte resulterar i strukturellt effektiva lösningar, riktades i stället fokus mot varierat materialflöde som en möjlig designparameter för att optimera 3D-printade betongelement enligt specifika lastkrav.



Figur 31 Testbana för varierat flöde genom modulerad rörelsehastighet.

Genom att utföra utskriftstester med olika hastigheter och mäta den resulterande bredden på det utskrivna filamentet kunde relationen mellan rörelsehastighet och filamentbredd kalibreras och integreras i det digitala verktyget (Fig. 31 & 32).



Figur 32. Testbana för varierat flöde genom modulerad rörelsehastighet.

I nästa steg utvecklades även en kompenseringsmetod för att begränsa denna effekt till enbart en sida av den utskrivna delen. Detta uppnåddes genom att förskjuta printbanorna proportionellt till den förväntade variationen i filamentbredd (Fig. 33). Det exakta förskjutningsvärdet beror på den färska betongens reologi och behövde fastställas experimentellt för den använda betongblandningen.



Figur 33. Kompenseringsmetod för att justera effekten av printbanor med varierande bredd så att de är i linje med ena sidan av utskriftbanan (Hernández Vargas, 2023).

Figur 35 visar utskriftsresultaten före och efter kalibrering. Det är värt att notera att även efter kalibrering förblir spåren av den variabla filamentbredden delvis synliga från utsidan, sannolikt till följd av accelerationseffekter under utskriftsprocessen.



Figur 34. Exempel på mismatch av kompenseringsinställningarna för justering innan kalibrering (vänster) och efter att metoden uppdaterats med experimentella värden, (Hernández Vargas, 2023).

#### 5.3 Färginformation som designparameter i 3DCP

Nästa steg i förbättringen av arbetsflödet för 3DCP var att utveckla en metod för att specificera lokala materialegenskaper i en utskriftsmodell genom att använda färginformation för att anpassa printbanorna (Fig. 35). På så sätt fungerar färginformationen som ett extra informationslager som kan justeras oberoende av den ursprungliga 3D-modellens geometri. Inom datorgrafik finns flera etablerade metoder för att applicera färginformation på en 3D-modell. I projekt undersöktes både bildprojicering och så kallad "color mesh mapping" som möjliga tillvägagångssätt.



Figur 35. Det föreslagna arbetsflödet för design av graderade strukturer för 3D-utskrift genomförs helt inom en integrerad mjukvarumiljö, där GH/Python-skript i Rhinoceros används, och exporteras därefter som KRL (.src) för utskrift (Hernández Vargas, 2023).

I ett första experiment undersökts hur färginformation specifikt kan användas för att styra den variabla filamentbredden under utskriftsprocessen, vilket i sin tur leder till varierande väggtjocklek. Studien är publicerad i sin helhet i konferensbidraget "Spatially Graded Modeling: An Integrated Workflow For 3D Concrete Printing" (Hernández Vargas, 2023), och sammanfattas nedan.



Figur 36. Projicerat mönster och som översätts i kontrollpunkter med varierande hastigheter (Hernández Vargas, 2023).

I studien projicerades ett mönster på en cylinderformad 3D-modell med målet att skriva ut bredare filament i mörkare områden och smalare i ljusare (Fig. 36). Färgvärden mellan 0 och 1 specificerade utskriftshastigheter mellan 45 och 150 mm/s, vilket resulterade i filamentbredder som varierade från 28 till 22 mm (Fig. 37). Variationerna i utskriftshastighet kopplades även till den kompenseringsmetod som beskrivs ovan, vilket säkerställde att det projicerade mönstret endast blev synligt på cylinderns yttre yta (Fig. 38).



Figur 37. Filamentbredden moduleras genom att justera utskriftshastigheten, en parameter som representeras av färg och storlek för varje kontrollpunkt längs printbanan (Hernández Vargas, 2023).



Figur 38. Utskriven prototyp som visar den projicerade bilden som variabel väggtjocklek. Variationer i utskriftshastighet kombineras med en kompensationsalgoritm för att begränsa effekten av variationen till den yttre ytan av den utskrivna cylindern (Hernández Vargas, 2023).

#### 5.4 Slutsatser

- Kontrollen av 3DCP-systemets rörelsehastighet (V) ger möjlighet att modifiera flödet av material under utskriftförloppet.
- Varierande materialflöde inom 3DCP fungerar både som en kompenseringsmetod för att uppnå högre precision vid korsande printbanor och som en ytterligare designparameter för att styra materialdistributionen under utskriftsprocessen.
- Genom att förskjuta printbanan kan effekten av den varierande filamentbredden koncentreras till en sida av printbanan.
- Färginformation kan användas som ett extra informationslager på en 3D-modell för att specifikt ange printbanans rörelsehastighet, vilket i sin tur påverkar den utskrivna filamentbredden.
- Både bildprojicering och "mesh coloring" är effektiva metoder för att applicera färginformation på en 3D-modell. Eftersom bilder enkelt kan manipuleras med vanlig fotoprogramvara, är de mer användarvänliga.

## 6 OPTIMERING AV DESIGN FÖR 3DCP

I projektets nästa steg tillämpades det integrerade arbetsflödet, beskrivet i kapitel 5, för design och tillverkning av strukturellt optimerade balkar (Fig. 40). Den huvudsakliga utmaningen låg i att uppnå en optimerad materialdistribution samtidigt som processkraven för utskriftsförloppet respekterades. Enligt projektets syfte var grundförutsättningen att bevara betongelementets yttre form och enbart optimera den interna materialfördelningen utifrån förväntade spänningar. Balkar valdes som en lämplig fallstudie eftersom de är vanligt förekommande bärande element och enklare att utvärdera experimentellt än väggelement.

Efter att ha definierat balkens övergripande form och dimensioner användes topologioptimering för att generera en ideal materialfördelning enligt angivet lastscenario, vilken sedan låg till grund för skapandet av skräddarsydda printbanor med varierat materialflöde. Två olika optimeringsstrategier för genererandet av printbanor testades och jämfördes med en kontrollbalk med standardfackverksmönster. Resultaten från trepunktsböjningstester visade att balkar med optimerad materialfördelning uppnådde en högre styrka i förhållande till sin vikt, med en genomsnittlig ökning på 47 % respektive 63 % jämfört med en konventionellt 3D-printad balk. Dessa resultat visar att intern topologioptimering har potentialen att både reducera materialförbrukningen och förbättra strukturella prestandan inom 3DCP. Studien är publicerad i sin helhet i artikeln "Internal topology optimisation of 3D printed concrete structures: a method for enhanced performance and material efficiency" (Hernández Vargas et. al., 2024), och sammanfattas kort nedan.

#### 6.1 Genomförande

Formen och dimensioneringen av balkarna i studien baserades på standarden för böjhållfasthet (SS-EN 12390-5:2019) samt den detaljnivå som ett 20 mm printmunstycke möjliggör, vilket resulterade i måtten L × W × H =  $70 \times 10 \times 10$  cm<sup>3</sup> (Fig. 39).



Figur 39. Diagram som visar dimensioneringen av balken (vänster). Beskrivning av provning av böjhållfasthet hos härdad betong med en punktlast i mitten, enligt EN 12390-5:2019 (höger) (Hernández Vargas et. al., 2024).

Genereringen av printbanorna utgick från följande tre tillverkningsrestriktioner:

- 1. Utskriftsorienteringen är begränsad till att skriva ut balken på dess bas (XY-planet)
- 2. Utskriftsbanorna måste utgöra en kontinuerlig slinga på varje lager.
- 3. En minimimängd material måste användas för att bevara elementets yttre gräns och ge stöd för efterföljande lager.

Samtidigt användes topologiska optimering för att ta fram den mest effektiva materialfördelningen i balken enligt det givna lastscenariot.



Figur 40. Integrerat arbetsflöde för design och produktion av strukturellt optimerade balkar (OPT-A och OPT-B) (Hernández Vargas et. al., 2024).

I nästa steg implementerades två olika strategier (OPT-A och OPT-B) för att anpassa de genererade printbanorna med varierat materialflöde till bilden av den topologiskt optimerade materialfördelningen (Fig. 41). OPT-A syftade till att efterlikna den topologiska optimeringen så nära som möjligt genom att tillåta maximal variation i materialflödet, medan OPT-B fokuserade på en jämnare gradvis övergång mellan områden med specificerat material och områden utan material. Den resulterande interna strukturen speglar det optimeringsmönster som definieras av topologioptimeringen (TO), samtidigt som de yttre ytorna bibehåller den specificerade formen för balken.



Figur 41. Diagram som visar de olika stegen i optimeringsprocessen. OPT-A (vänster) och OPT-B (höger), (Hernández Vargas et. al., 2024).

Projected values



Figur 42. Design av printbana med anpassad filamenttjocklek enligt topologiskt optimeringsresultat (Hernández Vargas et. al., 2024).

Dessutom förbereddes printinstruktioner för balkar med ett typiskt fackverksmönster som referens för att jämföra med prestandan hos de optimerade balkarna OPT-A och OPT-B (Fig. 43).



Figur 43. Printbanor med utskriftshastighet för studiens tre balktyper. Kontrollbalk (vänster), OPT-A (mitten) OPT-B (höger) (Hernández Vargas et. al., 2024).

Varje balktyp tillverkades i tre exemplar med printsystmet vid KTH Arkitekturskolan. Efter utskrift täcktes balkarna med plast och fick härda i 24 timmar. Därefter förvarades de i en klimatkontrollerad härdningskammare vid 20 °C och 99 % relativ luftfuktighet (Fig. 44).



Figur 44. Bilder av de 3D-printade balkarna samt illustrationer av deras respektive tvärsnitt vid mittpunkten (Hernández Vargas et. al., 2024).

Tester genomfördes efter 13 dagar vid KTH Byggvetenskap. De utskrivna proverna testades i trepunktsböjning enligt SS-EN 12390–5-standarden för böjhållfasthet. Lasten applicerades som en punktlast i mitten med en konstant hastighet på 0,55 mm/min (Fig. 45).



Figur 45. Provning av balk, KTH Byggvetenskap (Hernández Vargas et. al., 2024).

#### 6.2 Resultat

Alla balkar uppvisade brott i mittsektionen, direkt under lastpunkten (Fig. 44), vilket överensstämmer med det förväntade beteendet hos oarmerade betongstrukturer. Detta område utsätts för maximal spänning och är därför den mest sannolika platsen för brott.



Figur 46. Testresultat från alla prover (Hernández Vargas, 2023).

På samma sätt som standardmetoden för tryckhållfasthet inte var lämplig för att jämföra bärförmågan hos mesostrukturerna i kapitel 4.1, är böjhållfasthet baserad på balkens tvärsnitt enligt standard mindre relevant i detta sammanhang. Detta beror på provkropparnas oregelbundna tvärsnitt. Därför används i stället maximal last (kN) och maximal last per vikt (kN/kg) som jämförelsevärden.

Resultaten visar en betydande ökning av maximal last för de optimerade designerna, särskilt när de jämförs i termer av maximal last per vikt. Båda optimerade balkarna presterade bättre än referensbalken (CTRL), med en 47 % respektive 63 % högre maximal last/vikt-kvot för OPT-A och OPT-B. Testresultaten sammanfattas i tabell 3.

Beam design	TRUSS OPT-A			OPT-B					
Sample	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Weight (kg) Mean (kg)	9.7	9.85 <b>9.68</b>	9.5	13.95	14.95 <b>14.82</b>	15.5	13.5	13.05 <b>13.43</b>	13.85
Max load (kN) Mean (kN)	2.14	1.53 1.79	1.71	4.12	3.96 <b>4.19</b>	4.5	2.83	4.41 <b>4.24</b>	5.48
$\begin{array}{l} {\rm Max\ load-to-weight\ (kN/kg)}\\ {\rm Mean\ (kN/kg)} \end{array}$	0.22	0.16 <b>0.19</b>	0.18	0.3	0.26 <b>0.28</b>	0.29	0.21	0.34 <b>0.31</b>	0.4
Flexural Stregnth (MPa) Mean (MPa)	1.93	1.38 <b>1.61</b>	1.54	3.71	3.56 <b>3.77</b>	4.05	2.55	3.97 <b>3.81</b>	4.93
Strength-to-weight (MPa/kg) Mean (MPa/kg)	0.20	0.14 <b>0.17</b>	0.16	0.27	0.24 <b>0.26</b>	0.26	0.19	0.30 <b>0.36</b>	0.36

#### Tabell 3. Resultat från proverna (Hernández Vargas, 2023).

Att OPT-B presterade bättre än OPT-A kan förklaras av att printbanorna i OPT-B, med en jämnare fördelning av materialflödet, resulterade i bättre stöd för de övre lagren och därmed en mer sammanhängande intern struktur än den i OPT-A (Fig. 42).

#### 6.3 Slutsatser

- Balkarna med optimerad materialdistribution presterade avsevärt bättre än referensbalken med ett standard ifyllnadsmönster, med en ökning av maximal last-vikt-kvot på 47 % för OPT-A respektive 63 % för OPT-B.
- OPT-B, som kännetecknas av en jämnare intern materialfördelning, uppvisade den bästa prestandan, vilket kan förklaras av en mer sammanhängande intern struktur jämfört med OPT-A.
- Eftersom balkarnas tvärsnitt var oregelbundna var böjhållfasthet mindre tillämplig som jämförelsevärde, och i stället användes maximal last per vikt som mått på prestanda.
- Studien visar att topologisk optimering av materialdistribution kan ligga till grund för skapandet av skräddarsydda printbanor för resurseffektiva 3DCP element där den yttre geometrin bevaras och tillverkningsbegränsningar efterlevs.
- Vidare demonstrerar studien att en optimerad intern materialdistribution i betongelement kan uppnås genom att variera filamentets tjocklek under utskriftsprocessen.
- Genom att använda en kompensationsmetod kan effekten av variationer i filamentets tjocklek begränsas till insidan av utskriften. Trots att det applicerade mönstret förblir subtilt synligt från utsidan, bibehåller de yttre ytorna av den utskrivna delen elementets övergripande form.

## LITTERATURFÖRTECKNING

Anton, A., Bedarf, P., Yoo, A., Dillenburger, B., Reiter, L., Wangler, T., & Flatt, R. (2020). "Concrete Choreography: Prefabrication of 3D-Printed Columns". *Proceedings, Fabricate 2020*, The University College London, London, United Kingdom, September 2020, pp 286–93.

Bos, F., Wolfs, R., Ahmed Z., & Salet, T. (2016). "Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing," *Virtual and Physical Prototyping*, vol. 11, no. 3, pp. 209–225. DOI: 10.1080/17452759.2016.1209867.

Breseghello, L., & Naboni, R. (2022). "Toolpath-based design for 3D concrete printing of carbonefficient architectural structures". *Additive Manufacturing*, Vol. 56.

Burton, M., & Näsén, K., (2022). Simulation of load capacity of 3D printed concrete patterns. (Examensarbete). Kungliga Tekniska Högskolan.

Buswell, R., Leal de Silva, W., Jones, S., Dirrenberger, J. (2018). "3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research". *Cement and Concrete Research*, Vol. 112, pp 37-49.

Hernández Vargas, J., Westerlind, H., & Silfwerbrand, J. (2022). "Grading Material Properties in 3D Printed Concrete Structures". Nordic Concrete Research, vol. 66, no. 1, pp. 73-89. DOI: 10.2478/ncr-2022-0004.

Hernández Vargas, J. (2023). "Spatially Graded Modeling: An Integrated Workflow For 3D Concrete Printing". García Amen, F, Goni Fitipaldo, A L and Armagno Gentile, Á (eds.), *Accelerated Landscapes -Proceedings of the XXVII International Conference of the Ibero-American Society of Digital Graphics* (SIGraDi 2023), Punta del Este, Maldonado, Uruguay, 29 November - 1 December 2023, pp. 361–372

Hernández Vargas, J. (2023). *Design for 3D Concrete Printing: Optimisation Through Integrated Workflows.* (Licentiatuppsats). Kungliga Tekniska Högskolan.

Hernández Vargas, José. (2024). "Strategier för att minska miljöpåverkan – Optimering av 3Dbetongutskrift". *Bygg & Teknik*, no 6, pp. 36-39.

Hernández Vargas, J., Sjölander, A., Westerlind, H., & Silfwerbrand, J. (2024). "Internal topology optimisation of 3D printed concrete structures: a method for enhanced performance and material efficiency". *Virtual and Physical Prototyping*, 19:1, e2346290, DOI: 10.1080/17452759.2024.2346290

Le, T., Austin, A., Lim, S., Buswell, R., Law, R., Gibb, A., & Thorpe, T. (2012) "Hardened Properties of High-Performance Printing Concrete". *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, no. 3, pp. 558–66.

Ma, G., R. Buswell, R., Leal da Silva, W. R., Wang, L., Xu, J., & Jones, S.Z. (2022) "Technology readiness: A global snapshot of 3D concrete printing and the frontiers for development," *Cement and Concrete Research*, vol. 156, p. 106774. DOI: 10.1016/j.cemconres.2022.106774.

Martínez, J., Dumas, J., & Lefebvre, S. (2016). "Procedural Voronoi Foams for Additive Manufacturing", *ACM Transactions on Graphics*, Vol. 35, pp. 1–14.

Paul, S.C., Tay, Y.W.D., Panda, B., Tan, M.J. (2017). "Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction". *Archiv.Civ.Mech.Eng* 18, pp. 311–319.

Westerlind, Helena. (2021). "Digital Betong". Bygg & Teknik, no 6, pp. 40-42.

Westerlind, H. (2021). *Choreographing Flow: A Study in Concrete Deposition*. (PhD Thesis), KTH Royal Institute of Technology.

Westerlind, H., Hernández Vargas, J., & Silfwerbrand, J. (2024). "Towards the Application of Mesostructures in 3D Concrete Printing – Evaluating Load-Bearing Performance". *Nordic Concrete Research*, vol 69, no. 1, pp. 87–100. DOI: 10.2478/ncr-2023-0011.

Westerlind, H., & Hernández, J. (2020). "Knitting Concrete". *Proceedings, Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands, July 2020, pp.988–97.

Wolfs, R., Bos, F., & Salet, T. (2019). "Hardened properties of 3D printed concrete: the influence of process parameters on interlayer adhesion". *Cement and Concrete Research*, Vol. 119, pp. 132-140.