

Anvendelsesområder for 3D-printing av betongkonstruksjoner

Mulighetsstudie for bruk av 3D-printing av betong i byggebransjen



KRISTOFFER VESTBØSTAD



ALFRED GUNDERSEN

VEILEDER

Rein Terje Thorstensen

Universitetet i Agder, 2022
Fakultet for teknologi og realfag
Institutt for ingeniørvitenskap



Obligatorisk gruppeerklæring

Den enkelte student er selv ansvarlig for å sette seg inn i hva som er lovlige hjelpemidler, retningslinjer for bruk av disse og regler om kildebruk. Erklæringen skal bevisstgjøre studentene på deres ansvar og hvilke konsekvenser fusk kan medføre. Manglende erklæring fritar ikke studentene fra sitt ansvar.

1.	Jeg/vi erklærer herved at min/vår besvarelse er mitt/vårt eget arbeid, og at jeg/vi ikke har brukt andre kilder eller har mottatt annen hjelp enn det som er nevnt i besvarelsen.	<input checked="" type="checkbox"/>
2.	Jeg/vi erklærer videre at denne besvarelsen: <ul style="list-style-type: none"> - ikke har vært brukt til annen eksamen ved annen avdeling/universitet/høgskole innenlands eller utenlands. - ikke refererer til andres arbeid uten at det er oppgitt. - ikke refererer til eget tidligere arbeid uten at det er oppgitt. - har alle referansene oppgitt i litteraturlisten. - ikke er en kopi, duplikat eller avskrift av andres arbeid eller besvarelse. 	<input checked="" type="checkbox"/>
3.	Jeg/vi er kjent med at brudd på ovennevnte er å betrakte som fusk og kan medføre annullering av eksamen og utestengelse fra universiteter og høgskoler i Norge, jf. Universitets- og høgskoleloven §§4-7 og 4-8 og Forskrift om eksamen §§ 31.	<input checked="" type="checkbox"/>
4.	Jeg/vi er kjent med at alle innleverte oppgaver kan bli plagiatkontrollert.	<input checked="" type="checkbox"/>
5.	Jeg/vi er kjent med at Universitetet i Agder vil behandle alle saker hvor det forligger mistanke om fusk etter høgskolens retningslinjer for behandling av saker om fusk.	<input checked="" type="checkbox"/>
6.	Jeg/vi har satt oss inn i regler og retningslinjer i bruk av kilder og referanser på biblioteket sine nettsider.	<input checked="" type="checkbox"/>

Publiseringsavtale

Fullmakt til elektronisk publisering av oppgaven

Forfatter(ne) har opphavsrett til oppgaven. Det betyr blant annet enerett til å gjøre verket tilgjengelig for allmennheten (Åndsverkloven. §2).

Alle oppgaver som fyller kriteriene vil bli registrert og publisert i Brage Aura og på UiA sine nettsider med forfatter(ne)s godkjenning.

Opgaver som er unntatt offentlighet eller tausehetsbelagt/konfidensiell vil ikke bli publisert.

Jeg/vi gir herved Universitetet i Agder en vederlagsfri rett til å gjøre oppgaven tilgjengelig for elektronisk publisering:

JA NEI

Er oppgaven båndlagt (konfidensiell)?
(Båndleggingsavtale må fylles ut)

JA NEI

- Hvis ja:

Kan oppgaven publiseres når båndleggingsperioden er over?

JA NEI

Er oppgaven unntatt offentlighet?

JA NEI

(inneholder taushetsbelagt informasjon. Jfr. Offl. §13/Fvl. §13)


Forord

Denne masteroppgaven er utarbeidet ved Institutt for Ingeniørvitenskap som en avsluttende del av masterprogrammet Bygg ved Universitetet i Agder (UiA). Oppgaven er skrevet med veiledning fra UiA våren 2022. Vi er svært takknemlige for at Fakultet for teknologi og realfag, UiA har gitt oss muligheten til å nå målet vårt om å bli Sivilingeniør innen Bygg.

I masteroppgaven studerer vi 3D-printing av betong i byggebransjen, der hovedfokuset er rettet mot å se på dagens eksisterende muligheter for fullskala 3D-printing på byggeplass, samt utforske teknologiens fremtidige potensial i bransjen. Kunnskapsgrunnlaget for utarbeidelsen av denne masteroppgaverapporten er opparbeidet gjennom et toårig studieløp med fordypning innen konstruksjonsteknikk.

Vi vil gjerne takke vår veileder Rein Terje Thorstensen som har bidratt med engasjement, faglig innsikt og konstruktive tilbakemeldinger. Vi vil også takke AF-Gruppen og Hyperion Robotics som gladelig stilte opp til intervju på Teams, der vi fikk viktig informasjon som tilførte oppgaven ekstra tyngde. Til slutt ønsker vi å gi en takk til studiekoordinator på Byggstudiet Anette Heimdal, Ingrid Lande og andre ansatte på UiA som har bidratt med gode innspill og tilbakemeldinger.

Vi gir også en stor takk til hele avdelingen, fakulteter, professorer og medstudenter for å skape et godt miljø for læring ved UiA i Grimstad. Vi håper denne masteroppgaven kan være nyttig for den enkelte leser, som har sitt fagfelt innen bygg og konstruksjonsteknikk.



Alfred Gundersen



Kristoffer Vestbøstad

Summary

The intention of this master thesis is to investigate the application area for 3D printing of concrete in the construction industry and was written during the spring of 2022 at the University of Agder. 3D printing or "additive manufacturing" is a process that combines materials in liquid- or powder-form, where a printer produces the digital 3D model. Productivity in today's construction industry does not satisfy society's growing need for rapid completion of today's new buildings, and projects exceeding in time and cost is not uncommon. Through this work, the authors will investigate challenges and possibilities of various projects such as large-scale 3D printed concrete constructions on-site, as well as 3D printing of pre-produced concrete elements on-site or in the vicinity of the construction sites. The study will explore the methods for 3D-printing of concrete, associated design possibilities and the technology's economic and environmental aspects. The report is mainly based on a literature study, but qualitative interviews were also conducted for better insight into how 3D printing of concrete is used in the current construction industry and what the future potential is. The results indicated that 3D printing of concrete can streamline the construction industry through automation of manual work processes and reduce total construction time and labor compared to conventional construction methods. 3D printing of concrete strengthens the interaction with the BuildingInformationModeling (BIM) platform. It also turns out that printing large-scale concrete structures will reduce cold bridges. The area of application will depend on the type of construction, project characteristics, geographical location and the weather and climate environment. The use of 3D printing in the construction industry will provide greater freedom in the design and building of more geometrically complex constructions, as the printer is unaffected by the level of complexity of the design. The use of topology-optimized constructions will also create opportunities for slimmer and lighter constructions, as well as new economic and environmental savings compared to conventional construction methods. The technology also places different demands on concrete technology than that of conventional casting of concrete, and today's 3D printers mainly print smaller constructions up to a maximum of three floors. On the same note, this will also create substantial challenges regarding the design phase, standardization and implementation.

Sammendrag

Intensjonen med denne masteroppgaven er å undersøke anvendelsesområde 3D-printing av betong kan ha innenfor byggebransjen og er skrevet våren 2022 på Universitetet i Agder. 3D-printing eller «additiv tilvirkning» er en prosess som adderer materialer flytende eller i pulverform, hvor en printer så produserer den digitale 3D-modellen. Produktiviteten i dagens byggebransje tilfredsstillende ikke samfunnets økende behov for hurtig ferdigstillelse av dagens nybygg, og tids- og kostnadsoverskridelser er ikke uvanlig. Gjennom dette arbeidet vil forfatterne undersøke utfordringer og muligheter ved ulike prosjekter som fullskala 3D-printer betongkonstruksjoner på byggeplass, samt 3D-printing av preproduserte betongelementer på byggeplass eller nærliggende lokasjon. Denne studien vil utforske metodene for 3D-printing av betong, tilhørende designmuligheter og teknologiens økonomiske- og miljømessige aspekter. Rapporten baserer seg i hovedsak på en litteraturstudie, men kvalitative intervjuer ble også gjennomført. Intervjuene ble gjennomført for å opparbeide bedre innsikt i hvordan 3D-printing av betong benyttes i dagens byggebransje, og med tanke på fremtidig potensial. Resultatene indikerte at 3D-printing av betong kan effektivisere byggebransjen gjennom automatisering av manuelle arbeidsprosesser og redusere total byggetid og arbeidskraft sammenlignet med konvensjonelle byggemetoder. 3D-printing av betong styrker samhandlingen på BygningsInformasjonsModellering (BIM)-plattformen. Det viser seg også at printing av fullskala betongkonstruksjoner vil redusere kuldebroer. Bruksområde vil avhenge av konstruksjonstype, prosjektkarakteristikk, geografisk lokasjon samt vær- og klimaomgivelser. Anvendelse av 3D-printing i byggebransjen vil gi større frihet innen design og bygging av mer geometriske komplekse konstruksjoner, da printeren er upåvirket av designets kompleksitetsnivå. Bruk av topologioptimaliserte konstruksjoner vil også åpne muligheter for slankere og lettere konstruksjoner, samt nye økonomiske- og miljømessige besparelser sammenlignet med konvensjonelle byggemetoder. Teknologien stiller også andre krav til betongreologi enn ved konvensjonell støping av betong, samt at dagens 3D-printere i hovedsak printer mindre konstruksjoner inntil maksimalt tre etasjer. På samme måte vil dette også skape betydelige utfordringer når det gjelder designfase, standardisering og implementering.

Innholdsfortegnelse

Obligatorisk gruppeerklæring	i
Publiseringsavtale	ii
Forord	iii
Summary	iv
Sammendrag	v
Innholdsfortegnelse	vi
Figurliste	x
Tabelliste	xii
Nomenklaturliste	xiii
1. Innledning	1
2. Samfunnsperspektiv	2
3. Kunnskapsbakgrunn	4
3.1 Hva er 3D-printing?	4
3.1.1 Ugunstige aspekter med 3D-printing	6
3.2 Dagens situasjon	6
3.3 Andre materialområder for 3D-printing	7
3.3.1 Plastikk	7
3.3.2 Metall	7
3.3.3 Trevirke	8
3.3.4 Alternativ utnyttelse	9
3.3.5 Printing av verktøy	10
3.4 3D-printede byggeprosjekter i betong	11
3.4.1 Moskva, Russland	11
3.4.2 Wallenhausen, Tyskland	11
3.4.3 Tabasco, Mexico	12
3.4.4 Illinois, USA	12
3.4.5 Westerlo, Belgia	13
3.5 Alternativer til direkte 3D-printing av betong	14
3.5.1 3D-printet forskalingsløsning for betongstøping i Berlin	14
3.5.2 3D-printet forskalingsløsning med isolerende polyuretanskum i Frankrike	15
4. Forskerspørsmål	17
4.1 Avgrensninger	17

5. Case	18
6. Metode	20
6.1 Litteraturstudie.....	20
6.1.1 Flytskjema.....	20
6.2 Siteringskriterier	22
6.2.2 H- indeks.....	23
6.2.3 Backward- og forward snowballing	23
6.3 Loggbok	23
6.4 Intervju	24
6.5 Metodekritikk	24
7. Resultat	26
7.1 3D-printing av betongkonstruksjoner	26
7.1.1 Ekstruderings-/deponeringsmetoden	27
7.1.2 Aggregate-bed 3DCP metoden og Selective paste intrusion	28
7.1.3 Alternative metoder til 3D-printing.....	28
7.2 Byggeplassløsninger	29
7.2.1 Teknologi og styresystemer for 3D-printing.....	29
7.3 Armering og betongkvalitet/betongreologi	32
7.3.1 Betongpasta.....	32
7.3.2 3D-print ved bruk av UHPC.....	34
7.3.3 Armering.....	37
7.4 Digitalisering.....	38
7.4.1 Generell designprosess for 3D-printing av betong.....	38
7.4.2 Bygningsinformasjonsmodellering	39
7.5 Anvendbarhet og integrasjon.....	40
7.5.1 Utfordringer og begrensninger	40
7.5.2 Standardisering.....	41
7.6 Fullskala betongprinting on-site	41
7.6.1 Hensyn og videreutvikling for prosjektet «The BOD»	41
7.6.2 Betongkvalitet og printerskala «The BOD»	42
7.6.3 Armeringsmetode «The BOD»	44
7.7 Prefabrikkerte- og preproduserte elementer	44
7.7.1 Preprodusert 3D-printet utleiehus i Bosrijk, Nederland	47
7.8 Kabelopphengt printerløsning (Cable robot)	48

7.8.1	Sky Big Area Additive Manufacturing.....	50
7.9	Muligheter innenfor design.....	52
7.9.1	Topologioptimalisering.....	52
7.9.2	Topologioptimalisering i CAD.....	54
7.9.3	Topologioptimalisering og 3D-printing.....	55
7.10	3D-printing og økonomi.....	57
7.11	3D-printing og miljø.....	60
7.11.1	Materialalternativer, energi og arbeidsmarked.....	62
7.12	Intervju om byggebransjens perspektiv på 3D-printing av betong.....	64
7.12.1	Intervju AF-gruppen.....	64
7.12.2	Intervju Hyperion Robotics.....	65
8.	Diskusjon.....	68
8.1	Muligheter og begrensninger for 3D-printet betong.....	68
8.1.1	Eksisterende metoder for 3D-printing av betongkonstruksjoner.....	68
8.1.2	Dagens teknologi og ulike styresystemer for 3D-printing.....	69
8.1.3	Forutsetninger for betongkvalitet og armering.....	69
8.1.4	Kjennetegn på en printbar betong, herdeegenskaper UHPC og dyseutforming.....	70
8.1.5	Armerings-muligheter for 3D-printing av betong.....	71
8.1.6	Digitalisering av byggebransjen.....	72
8.1.7	Anvendbarhet og implementering av 3D-printing i Byggebransjen.....	73
8.2	Fullskala 3D-printing vs printing og montering av enkeltelementer.....	73
8.2.1	Fullskala 3D-printede betongbygninger på byggeplass.....	73
8.2.2	Europas første 3D-printede betongbygning on-site.....	74
8.2.3	3D-printing av prefabrikkerte- og preproduserte betongelementer.....	75
8.2.4	Preproduksjon av 3D-printede betongelementer i nærhet til byggeplass.....	75
8.2.5	Kabelopphengt printerløsning (Cable robot) på prototypstadiet.....	76
8.3	Designmuligheter og optimalisering.....	77
8.3.1	Topologioptimalisering.....	77
8.4	Økonomisk perspektiv.....	77
8.5	Miljøperspektiv.....	79
9.	Konklusjon.....	80
10.	Anbefalinger.....	82
11.	Referanser.....	83

12. Vedlegg	92
A. Intervjuer.....	92
A1 Intervju AF-Gruppen	92
A2 Intervju Hyperion Robotics	92
B. Publikasjon NB 38.....	92
C. Loggbok	92
D. “Radix”-prosjektrapport fra Hyperion Robotics	92

Figurliste

Figur 1-1: 3D-printing av en optimalisert betongsøyle [6].	1
Figur 1-2: Illustrasjon av 3D-printet kontorhotell i betong [7].	1
Figur 2-1: FNs Bærekraftsmål tilknyttet 3D-printing av betong [11].	2
Figur 3-1 viser 3D-printeprosessen stegvis [19].	4
Figur 3-2: Spørreundersøkelse om erfaring med 3D-printing av betong [22].	6
Figur 3-3: Printing av termoplastikk [24].	7
Figur 3-4: motordel produsert ved 3d-printing av metal for en formel 1 bil [26].	8
Figur 3-5: 3D-printet konstruksjon av tre [29].	9
Figur 3-6: Paviljong i tre bygget ved NTNU [30].	9
Figur 3-7: 3D-printede knutepunktløsning [30].	10
Figur 3-8: 3D-printede tvinger [32].	10
Figur 3-9: Viser ferdig eksteriør av det komplette 3D-printede betonghuset i Moskva [35].	11
Figur 3-10: Visualisering av det 3D-printede leilighetsbygget i betong [36].	12
Figur 3-11: Fasaden av komplett betongbolig [37].	12
Figur 3-12: Komplet 3D-printet militærbrakke i betong med manuelt konstruert tak [39].	13
Figur 3-13: Komplet hus produsert med 3D-printeren, utviklet av «COBOD» [42].	13
Figur 3-14: Støping av buet vindussegment i 3D-printet forskalingsform [43].	14
Figur 3-15: Ferdig sammensatt buet vindusramme klar til montering [44].	15
Figur 3-16: Robotarmprinter til deponering av polyuretan skum [45].	15
Figur 3-17: Byggeprogresjon tidlig byggefase [46].	16
Figur 3-18: Ferdigprodusert bygg [46].	16
Figur 5-1: BIM-modell og plantegning av «The BOD» [47].	18
Figur 6-1: Flytskjema illustrerer arbeidsforløpet i litteratursøket, del 1/2.	21
Figur 6-2: Flytskjema illustrerer arbeidsforløpet i litteratursøket, del 2/2.	22
Figur 7-1: Konsept Selective paste intrusion [55].	27
Figur 7-2: Material extrusion (layered) [39].	27
Figur 7-3: Material extrusion (suspended) [39].	28
Figur 7-4: 3D-betongprinterprosessen av aggregate-bed 3DCP [56].	28
Figur 7-5: Illustrasjon av prosessene i «Smart Dynamic Casting» [52].	29
Figur 7-6: Gantry printer [39].	30
Figur 7-7: Robotarmprinter [39].	30
Figur 7-8: Robotisert lastebil m/tårnpumpe printer boligblokk [52].	31
Figur 7-9: Ferdigprintet boligblokk [60].	31
Figur 7-10: Heisekransystem [52].	31
Figur 7-11: Robotarmprinter med aktiv printerdyse [61].	32
Figur 7-12: (a) Prosess for betongekstrudering i felles system [61].	33
Figur 7-13: (b) Adskilt leverings- og ekstruderingsprosess [61].	33
Figur 7-14: Gaffelutformet vertikal betongdyse [47].	34
Figur 7-15: Porøsitet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].	35
Figur 7-16: Bulkdensitet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].	36
Figur 7-17: Trykkfasthet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].	36
Figur 7-18: Heftfasthet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].	37

Figur 7-19: Ulike manuelle armeringsmetoder for 3D-printing av betongvegger [61].	38
Figur 7-20: Generelle trinnvise steg fra 3D CAD modell til ferdig fysisk modell [67].	39
Figur 7-21: Flere ulike typer dataprosesser med bruk av BIM [69].	40
Figur 7-22: Påbegynt printing av betongvegger [74].	42
Figur 7-23: Sluttproduktet av BOD [47].	42
Figur 7-24: Printing av «The BOD» på 8 x 8 meter [39].	43
Figur 7-25: Robotarmprinting av «The BOD», rekkevidde grønt område [39].	43
Figur 7-26: Robotarmprinter kan ikke printe i rødt område [39].	44
Figur 7-27: Printing av betongsøyler [77].	45
Figur 7-28: Byggetrinn for produksjon av betongsøyler [77].	46
Figur 7-29: Preprodusert 3D-printet betongelement på byggeplass [78].	46
Figur 7-30: Ferdig preprodusert 3D-print av betongvegger på byggeplass [76].	47
Figur 7-31: Utformingen av husprosjektet «Milestone» [81].	48
Figur 7-32: 3D-printet betongsøyle utviklet av HINDCON [82].	49
Figur 7-33: Kabelopphengt printerløsning til 3D-printing av betong on-site [84].	50
Figur 7-34: Oversikt kabelkonfigurasjoner SkyBAAM-systemet [85].	51
Figur 7-35: Største 3D-printede objekt utført av «SkyBAAM» [85].	51
Figur 7-36: Illustrasjon av topologioptimalisering som konsept [86].	52
Figur 7-37: Endring av fysisk design etter FEM-analyse [80].	53
Figur 7-38 Illustrering av stegvis design prosess [87].	54
Figur 7-39: Stegvis topologioptimaliserings prosess [86].	55
Figur 7-40: Elastisk knekking ved 3D-printe simulering [87].	56
Figur 7-41: Topologioptimalisert drager [87].	56
Figur 7-42: Kostnadsfordeling for byggeaktiviteter [97].	58
Figur 7-43: Kostnad for ulike nivåer av kompleksitet for en betongvegg ved bruk av konvensjonell konstruksjon og robotproduksjon [99].	58
Figur 7-44: Produktivitet (h/m ³) for ulike nivåer av kompleksitet for en betongvegg ved bruk av konvensjonell konstruksjon og robotproduksjon [99].	59
Figur 7-45: «Break-even» analyse mellom konvensjonell og 3d-printet [99].	59
Figur 7-46: «Break-even» analyse mellom konvensjonell og robotarm printer per kubikkmeter betong printet, med ±20 % fluktusjon i robotkostnad [99].	60
Figur 7-47: Rammeverk for LCA-metoden [102].	61
Figur 7-48: Resirkulerbare tilslag [104].	62
Figur 7-49: Forskjellige prosjektforløp basert på tradisjonelle og digitale konstruksjonsmetoder [104].	63

Tabelliste

Tabell 6-1: Utsnitt med eksempelvis søketermer fra loggboken.	23
Tabell 7-1: Evalueringsgrunnlag for utvelgelse av bygningsdel som skulle 3D-printes i betong [82]. ...	49
Tabell 7-2: 3D-printing av betong sammenlignet med tradisjonell byggemetode [18].	62
Tabell 7-3: Intervju AF-gruppen	64
Tabell 7-4: Utdrag intervju Hyperion Robotics.	65

Nomenklaturliste

3D-printing	3D-printing/ additiv tilvirkning
3DCP	3D concrete/ construction printing
SPI	Selective paste intrusion
BOD	Building of development
SkyBAAM	Sky Big Area Additive Manufacturing
HPFRCC	High-performance fiber-reinforced cementitious composite
CAD	Computer aided design
UHPRFC	Ultra-high performance fiber reinforced concrete
UHPC	Ultra-high performance concrete/ ultrahøyttelses betong
STL	Stereolithography
BIM	Building Information Modeling/ bygningsinformasjonsmodellering
FEM	Finite element method
FEA	Finite element analysis
LCA	Life cycle analysis
LCC	Life cycle cost

1

1. Innledning

Dagens byggebransje er i stadig utvikling, noe som også er nødvendig for å tilfredsstille samfunnets økende behov og fokus på effektivisering og redusert miljøpåvirkning. Prosjekter i byggebransjen har i tillegg en tendens til å få tids- og kostnadsoverskridelser [1]. Rapport fra Statens vegvesen viser til at treffsikkerheten for byggetidsestimering uansett prosjektstørrelse har forverret seg over tid [2]. Dette gjelder særlig for små- og mellomstore prosjekter. Det er vanskelig å si om dette er en midlertidig trend, eller om dette er en trenden som vil være et økende problem fremover [2]. Behovet for innovative løsninger både for dagens, og fremtidens byggenæring anses uansett for å være stort. Byggeselskaper jobber derfor stadig mer målrettet for å fremstille nye innovative løsninger. Innovering og utvikling er det som skal sikre bedrifters konkurransedyktighet i fremtiden, hvor en risikerer å miste konkurransefortrinn dersom en ikke holder tritt med den teknologiske utviklingen.

3D-printing av betong er en ny teknologi, vist i Figur 1-1, som er under utvikling og i fremmarsj i byggebransjen. Det første vellykkede 3D-printede bygget i Europa har allerede blitt oppført i Danmark, hvor prospektet er illustrert i Figur 1-2. 3D-printing eller additiv tilvirkning er en teknologi som baserer seg på å gradvis bygge opp et objekt eller en konstruksjon gjennom å tilføre byggematerialer additivt, basert på en digital 3D-modell [3]. 3D-printing er en form for digital produksjon, som er en produksjonsmetode hvor hele byggeprosessen er tilknyttet samme digitale nettverk [4]. Investeringer i digital produksjon vil kunne føre til en gjennomsnittlig økning på 10% i produksjonstall, og en økning på 12% i arbeidsproduktivitet [5].



Figur 1-1: 3D-printing av en optimalisert betongsøyle [6].

Figur 1-2: Illustrasjon av 3D-printet kontorhotell i betong [7].

Dette fører videre til et behov for nye innovasjoner innen teknologi, slik at byggebransjen skal klare å følge den digitale produksjonstrenden. Heldigitalisering av bransjen gjennom teknologier som 3D-printing vil kunne gjøre byggeprosjekter mer forutsigbare, og hindre tids- og kostnadsoverskridelser i prosjekter. 3D-printing vil også kunne åpne for ny fleksibilitet innen komplekse design, og materialbesparelser med tanke på bransjens miljøavtrykk. For å kunne anvende teknologien og utnytte disse mulighetene, vil det derfor være viktig å også utforske teknologiens begrensninger og implementeringsutfordringer i bransjen.

2

2. Samfunnsperspektiv

Verdensbefolkning er i dag på 7,9 milliarder mennesker [8], og mer enn 40% av disse menneskene lever i fattigdom som ifølge «World Bank Group» tilsvarer under 50 kroner dagen [8, 9]. Videre omtales covid-19-pandemien som en mulig faktor til at anslagsvis også 100 millioner mennesker vil måtte leve under ekstrem fattigdomsgrense på omtrent 17 kroner dagen. Overbefolkning påvirker ikke bare aspekter som økonomi, men har også innvirkning på miljø og sosiale forhold i form av likestilling og menneskerettigheter. Disse utgjør i totalsammenheng bærekraft som er per definisjon; et tankesett der dagens generasjon må leve og dekke sine behov, uten å ødelegge for kommende generasjoners evne til å møte sine behov [10]. For å arbeide mot en grønnere klimapolitikk og et mer bærekraftig samfunn i fremtiden, har FN utarbeidet 17 overordnede bærekraftsmål [11]. For å videre undersøke potensialet 3D-printing av betong kan ha for å nå målene, er følgende fem bærekraftsmål utvalgt, som illustrert i Figur 2-1:

- 3** God helse og livskvalitet
- 8** Anstendig arbeid og økonomiskvekst
- 9** Industri, innovasjon og infrastruktur
- 11** Bærekraftige byer og lokalsamfunn
- 12** Ansvarlig forbruk og produksjon



Figur 2-1: FNs Bærekraftsmål tilknyttet 3D-printing av betong [11].

I bygge- og anleggsbransjen er det produksjonen av betong, nærmere bestemt sement som representerer det største CO₂-utslippet og utgjør 7-8% av det totale klimagassutslippet i verden [12]. Da betong er det nest mest konsumerte materialet i verden etter vann [13], vil det være avgjørende å utvikle nye og bedre produksjonsmetoder av sement for å gjøre byggebransjen mer bærekraftig. Med andre ord har byggeindustrien en stor innvirkning på den globale oppvarmingen, der FNs bærekraftsmål er en pådriver for å redusere denne påvirkningen.

FNs Bærekraftsmål 3, skal sikre god helse og fremme livskvaliteten for alle, uansett aldersgruppe [11]. 3D-printerteknologien går ut på at en printer utfører hoveddelen av arbeidet knyttet til betongstøping, noe som vil kunne redusere etterspørselen av menneskelig arbeidskraft på byggeplassen. Dette kan bedre helsen og livskvaliteten for blant annet stålbindere og betongarbeidere på byggeplass. Med hensyn på bærekraftsmål 8, vil dette kunne være negativt da det kan skape færre arbeidsplasser for industrifagarbeidere. På en annen side kan 3D-printing av betong

Åpne muligheter for flere «høykvalitets arbeidsplasser» i form av at bygg kan reises med mindre fysisk innsats av menneskelig arbeidskraft, samtidig som det trengs kvalifiserte personer til å operere og overvåke 3D-printerutstyret. Kvaliteten av disse arbeidsplassene vil kunne avta i mindre utviklede land der HMS ikke blir ivaretatt i samme grad [14].

Bærekraftmål 9 går ut på å styrke innovasjon, infrastruktur og bærekraftig industrialisering. Da 3D-printing av betong er en relativt ny teknologi i Norge, vil videre satsing og innovasjon på området skape nye muligheter og gi bedre bærekraftig utnyttelse av ressursene. Et eksempel på dette kan være materialbesparelser i form av at man ikke har behov for forskaling. I dag bor 4.4 milliarder mennesker i byer på verdensbasis, og i 2030 vil andelen av verdensbefolkningen som bor i byer øke til 5.5 milliarder, noe som kan knyttes til bærekraftmål 11 [15]. I denne sammenheng arbeides det med å utvikle betongvegger som tilfredsstillende norske spesifikasjoner, integrert i et produkt som kan 3D-printes. Forskerne ser størst potensiale for 3D-printing av hus i utviklingsland, da dette vil være en hurtig byggemetode med enkle standardkrav [16]. 3D-printing av betong kan fremme bærekraftmål 12 ved å forbedre utnyttelsen av ressurser i bransjen [17], og åpner opp for nye muligheter der man kan produsere strukturer og former, som ikke er mulig med tradisjonell betongstøping. Man kan med andre ord oppnå materialbesparelser i form av å kunne 3D-printe slankere og lettere konstruksjoner ved hjelp av geometrioptimalisering.

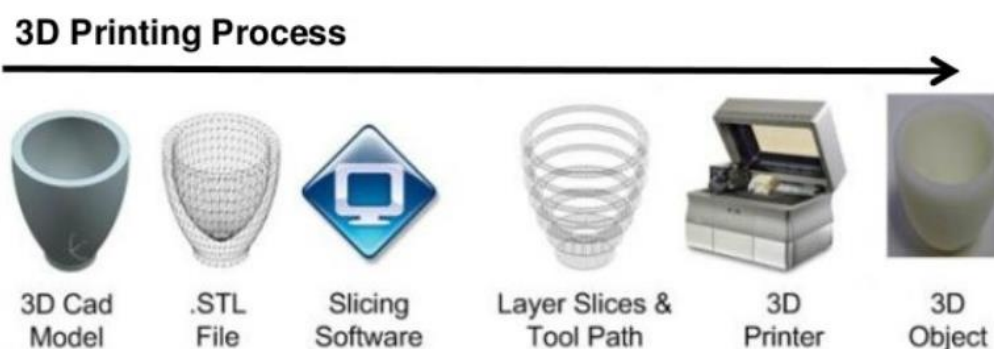
3

3. Kunnskapsbakgrunn

3.1 Hva er 3D-printing?

Tradisjonell produksjon har gjennom den industrielle revolusjonen formet den teknologiske verden vi kjenner i dag. Dagens samfunn har likevel kommet til et punkt hvor det er et behov for nye produksjonsmetoder for å fremme videre utvikling [18]. 3D-printing eller «additiv tilvirkning» kan være et svar på dette behovet. 3D-printing er en teknologi som baserer seg på å bygge opp et produkt gjennom å tilsette eller produsere gradvise tverrsnittslag av et eller flere byggematerialer [3]. Dette er et konsept som kan sammenlignes med barndommens bygging med legoklosser. 3D-printing er en prosess som tilsetter materialer flytende eller i pulverform, hvor en printer så produserer den digitale 3D-modellen i x-, y- og z-retning. Prosessen for additiv tilvirkning starter med en 3D-modell eller et scann av en eksisterende modell som vist ved Figur 3-1 [3]. Videre blir modellen konvertert til en stereolithography (STL) -fil, for så å bli prosessert av et oppkuttingsverktøy for tverrsnittsmoeller. Modellen får så kartlagt en printerrute gjennom tverrsnittslagene, før den blir lastet opp til en printer og deretter produsert [3].

Det blir i dag forsket på hvorvidt denne teknologien kan bli implementert i byggebransjen. Teknologien har i fremtiden et stort potensial til å skape bedre boliger for folk flest [3]. Noe av drivkraften bak denne utviklingen er teknologiens fleksibilitet når det gjelder å kunne skreddersy bygninger på en personlig måte, og kan tilpasses lokale forhold uten ekstra kostnader. 3D-printing og robotisering av byggebransjen vil kreve økt kompetanse og nyutvikling hos både entreprenør, leverandør og myndigheter [3].



Figur 3-1 viser 3D-printeprosessen stegvis [19].

Ifølge Lipson og Kurman [20] eksisterer det 10 prinsipper for 3D-printing:

1. Det første prinsippet er at produksjonskompleksitet skal være kostnadsuavhengig. For tradisjonell produksjon vil en mer komplisert objektsform føre til større produksjonskostnader. Produksjonsgrunnlaget for 3D-printing vil ikke medføre større tidsbruk, kostnader eller behov før økt ekspertise med hensyn på objektets kompleksitet.

2. Det andre prinsippet for 3D-printing er prosessens evne til å kunne produsere unike og ulike objekter hver gang. For tradisjonell produksjon blir maskiner og mannskap spesialisert for objekter de skal produsere, og det vil kreve tid og ferdighetsutvikling for å endre på objektet. Dette vil ikke være tilfelle for 3D-printing.
3. Det tredje prinsippet omhandler 3D-printerens evne til å sammenstille objektet i sin helhet, uten løse deler. Dess flere komponenter et objekt innehar, desto høyere monteringskostnad. Muligheten til å bygge objektet som en enhet eller komponent, vil kunne føre til kortere forsyningskjede og mindre utslipp.
4. Prinsipp nummer fire heter «Zero lead time». Dette prinsippet bygger på printerens sin evne til å printe nye produktløsninger når det trengs. Selskapene vil kunne redusere fysisk inventar i form av lagerbeholdning og isteden basere seg på printerens evne til å produsere objekter i sanntid når behovet dukker opp.
5. «Unlimited design space» blir nevnt som det femte prinsippet. Ved hjelp av 3D-printing vil man kunne fjerne barrierer for hvilke former som er mulig å lage, og vil kunne fremstille former som frem til nå bare har vært teoretiske eller kun forekommet i naturen.
6. Det sjettede prinsippet kalles «Zero skill manufacturing». Tradisjonelle maskiner er preget av behov for personell med spesiell ekspertise for bruk og kalibrering. En 3D-printer har lavere brukerskel, noe som bistår byggpersonell på avsidesliggende og enklere lokasjoner.
7. Prinsipp nummer syv heter «Compact, portable manufacturing», og setter søkelys på evnen 3D-printing har for å produsere volum per produksjonsareal. 3D-printere utkonkurrerer tradisjonelle produksjonsmaskineri på dette området. En alminnelig 3D-printer kan ikke produsere større objekter enn printerens sitt printbare hullvolum ved standard produksjon. Ulike modeller som lar printerhodet bevege seg fritt, åpner muligheter for å printe elementer i størrelser som overskrider dette.
8. Libson og Kurman snakker om «Less waste by-product» som prinsipp nummer åtte. Dette prinsippet omhandler hvordan tradisjonelle produksjonsmetoder, der blant annet sliping og støpning ofte medfører unødvendig materialforbruk. For maskindeler er det estimert at opp mot 90 prosent av den originale materialmengden gjenstår etter produksjonsprosessen.
9. «Infinite shade of materials» er det niende prinsippet som blir nevnt. Det å kombinere ulike råmaterialer til et enkelt produkt, viser seg å være komplisert for dagens byggemetoder. Ved videre utvikling av 3D-printing sitt multi-materielle potensiale, vil man i fremtidig produksjon kunne designe og produsere objekter sammensatt av flere råmaterialer, for å oppnå maksimal utnyttelse av hvert materiale.

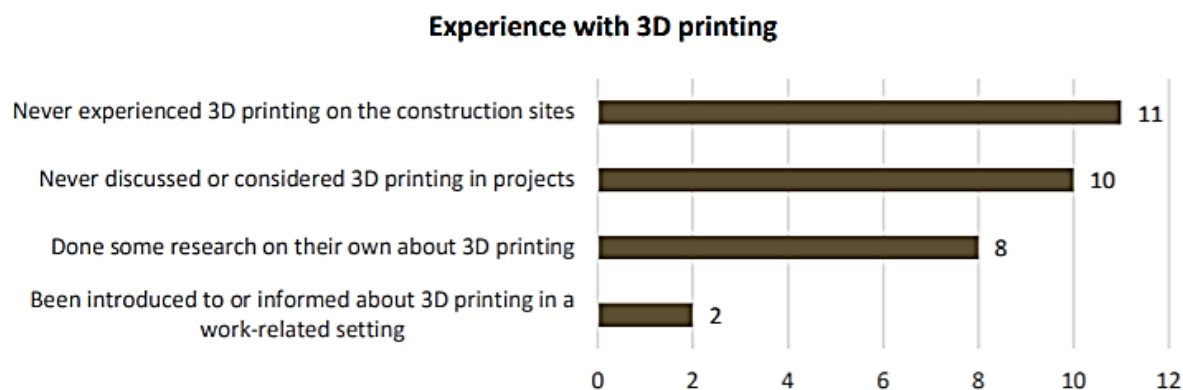
10. Det tiende og siste prinsippet som blir beskrevet av Libson og Kurman er «Precise physical replication». Etter hvert som kunnskapen og bruken av 3D-printing blir mer anerkjent, vil en ideelt sett kunne produsere presise kopier av 3D-modeller ned til minste detalj, på lik linje som å kopiere en datafil.

3.1.1 Ugunstige aspekter med 3D-printing

3D-printing har vært en kjent teknologi i mange år, men den er fortsatt lite anvendt i industrien. Teknologien er svært kostbar og det er en stor investeringskostnad for bedrifter å skulle investere i én av disse 3D-printertypene, som kan koste opp mot flere tusen dollar stykket [21]. Det vil også være tidkrevende å printe ut større produkter sammenlignet med å printe mindre industrideler. Masseproduksjon av samme objekter vil være tidkrevende og ineffektivt i forhold til tradisjonelle produksjonsmetoder. Det er dessuten også kun et begrenset utvalg av materialer som kan 3D-printes [21].

3.2 Dagens situasjon

Hvordan er situasjonen for 3D-printing av betong i byggebransjen i dag? En studie utført av Skeide [22], gjennomførte en kartlegging og undersøkelse av bekjentskap til konseptet 3D-printing i bransjen, som vist i Figur 3-2. Her ble det presentert at de fleste deltagerne i undersøkelsen hadde lite eller ingen kjennskap til 3D-printing på forhånd, men synes konseptet virket interessant etter å ha blitt introdusert til det ved hjelp av en introduksjonsvideo. Respondentene hadde likevel gitt uttrykk for at konseptet så interessant ut, men ikke virket realistisk som byggemetode i nærmeste fremtid [22].



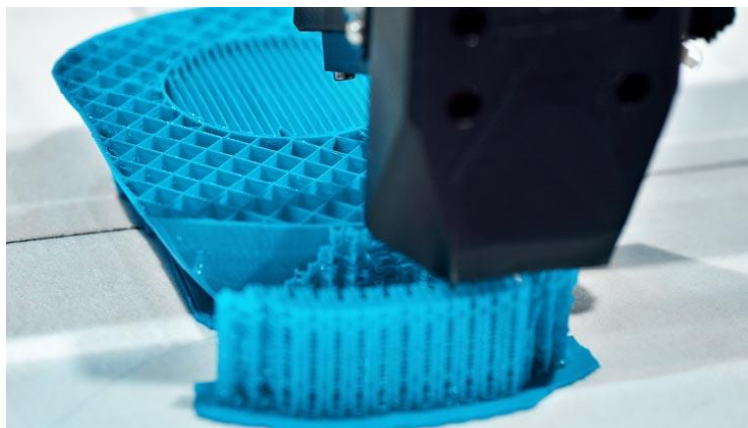
Figur 3-2: Spørreundersøkelse om erfaring med 3D-printing av betong [22].

Respondentene ble også spurt om deres tanker om 3D-printing som et funksjonelt konsept vil kunne effektivisere og forkorte konstruksjonsprosessen i prosjekt. Her svarer respondentene at denne teknologien vil kreve innovasjon og løsninger på flere avgjørende områder, som for eksempel armering, tidkrevende printerprosess og alle tekniske løsninger må kunne bli anvendt på en byggeplass [22].

3.3 Andre materialområder for 3D-printing

3.3.1 Plastikk

Mulighetene for teknologien additiv tilvirkning er mange, og er dessuten ikke begrenset til et enkelt materiale. For ordinære 3D-printere blir en sammensetning av plast som heter «termoplastikk» benyttet [23], som vist i Figur 3-3. Egenskapene som skiller dette materiale fra vanlig plast, er materialets kapasitet til å gjennomgå et antall av oppvarming og smelteprosesser uten at materialets kvalitet blir påvirket. Prosessen for 3D-printing er også reversibel da ingen kjemisk binding oppstår, og kan derfor i teorien blir nedsmeltet og formet igjen gjennom flere sykluser. Gjennom hver av disse syklusene vil materialets egenskaper reduseres en liten margin [23].



Figur 3-3: Printing av termoplastikk [24].

3.3.2 Metall

3D-printing av metall er en teknologi som blir anvendt i flere bransjer. Bransjer som utnytter fordelene med printing av metallkomponenter er blant annet formel 1- og flybransjen [25]. Motivasjonen for å anvende 3D-printing i disse bransjene kommer fra bransjens behov for å gjøre produkter raskere, lettere og mer aerodynamisk. Teknologiens kapasitet for å produsere geometrisk krevende objekter i ønskede metallegering, er et ideelt hjelpemiddel for designere og ingeniører som kontinuerlig arbeider for å optimalisere et fartøy til det ytterste [25]. Figur 3-4 illustrer et eksempel på en krevende geometrisk komponent som er fremstilt for å løse et nøyaktig behov i maskineriet til en formel 1-bil.

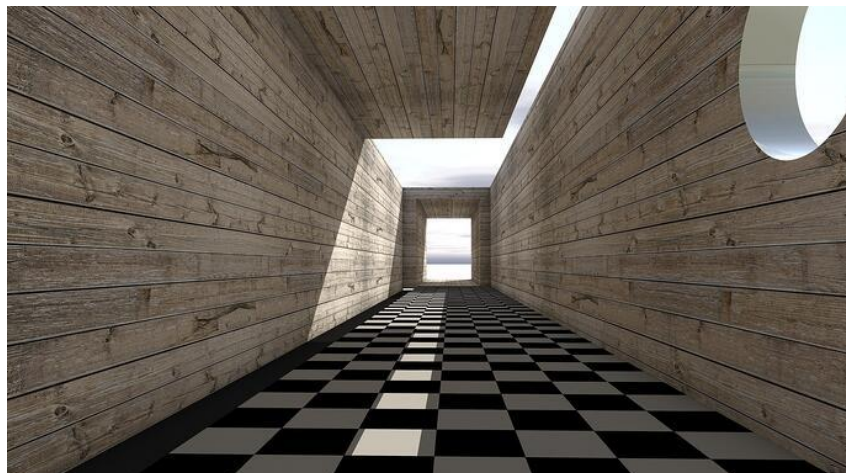


Figur 3-4: motordel produsert ved 3d-printing av metal for en formel 1 bil [26].

For byggebransjen er ikke 3D-printing av metall en byggemåte som blir anvendt mye [27]. 3D-printing avhenger av at materialet må ha visse reologiske egenskaper som gjør den «sprøytbar» for å kunne bli produsert additivt. For metaller kan denne tilstanden oppnås gjennom oppvarming opp mot smeltepunkt, noe som gjør at forbindelser brytes og materialet myknes. Denne prosessen vil være ekstremt kostbar relativt til byggebransjens skala av konstruksjoner. Dette gjør at materialet er avhengig av at kostnadsutbytte per størrelse av printet objekt, og må være ekstremt høy for å gjøre teknologien lønnsom. En mer vanlig produksjonsmetode for å produsere slike industrideler i metal, er gjennom fresing med fresemaskiner [28].

3.3.3 Trevirke

Mulighetsstudier for bruken av tremateriale til 3D-printing i byggebransjen, er av økende interesse i bransjen [29]. Trevirke, som er et naturlig og fornybart materiale, innehar mange egenskaper som gjør det velegnet som konstruksjonsmateriale slik bransjen beveger seg i dag. Materialet innehar gode styrkeegenskaper, isolerer godt, er energieffektivt og tilfører en naturlig tiltrekkende estetikk [29], som vist i Figur 3-5. Laywoo D3, som er utviklet av Kai Parthy [29], er et eksempel på et trefilament som er utviklet for bruk i 3D-printerprosessen. Dette materialet kan ha vektandel av tre fra 15 til 40 prosent, og er fra et etisk perspektiv nærmest identisk til vanlig trevirke som kan observeres på Figur 3-5. Materialet innehar også den karakteristiske lukten av treverk. «The Institute of Wood Technology Dresden» fremmer utviklingen av trebaserte materialer, og forutser at en vil kunne fremstille kompositter med opptil 90 prosent trevirke i fremtiden [29].



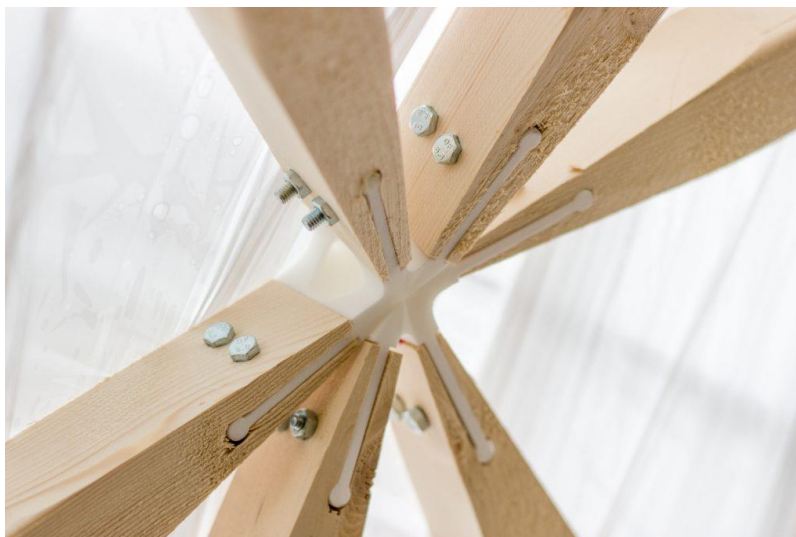
Figur 3-5: 3D-printet konstruksjon av tre [29].

3.3.4 Alternativ utnyttelse

Benyttelsen av 3D-printing i byggebransjen er ikke bare begrenset til fullskala konstruksjoner og printing av elementer. I Trondheim ved NTNU har det blitt bygget en halv-paviljong som vist ved Figur 3-6 [30], der knutepunktforbindelsene er produsert ved hjelp av 3D-printing, som illustrert i Figur 3-7. Dette prosjektet er laget av 160 trestaver og sammenkoblet ved hjelp av 61 spesiallagde 3D-printede knutepunktløsninger. Knutepunkt er ofte kompliserte forbindelser som krever kompliserte løsninger. 3D-printerens kapasitet til å printe kompliserte former, gjør at denne teknologien også kan ha et stort potensial fremover for slike forbindelser [30].



Figur 3-6: Paviljong i tre bygget ved NTNU [30].



Figur 3-7: 3D-printede knutepunktløsning [30].

3.3.5 Printing av verktøy

Printing av verktøy på byggeplass kan bidra til å redusere inventar og lagerplass for store byggeprosjekter [31]. Bruken av 3D-printing kan legge til rette for å printe avanserte verktøy til spesialiserte situasjoner på kort tid [16]. Ved hjelp av denne fleksibiliteten for ulike situasjoner som kan oppstå, kan prosjekter blant annet redusere lagerbeholdningen og behøver ikke forutse alle situasjoner og behov på forhånd [31]. Dette kan lønne seg økonomisk og redusere tidsoverskridelser i byggeprosjekter. Figur 3-8 viser 3D-printede verktøy i form av spesialiserte tvinger.



Figur 3-8: 3D-printede tvinger [32].

3.4 3D-printede byggeprosjekter i betong

Det krever mye arbeid å bygge boliger i dagens samfunn og byggeindustrien blir ofte kritisert når det kommer til krav om fremdrift i dagens byggeprosjekter av nybygg [33]. Byggeindustrien vil av den grunn behøve å undersøke nye teknologiske muligheter og byggemetoder som kan redusere total byggetid i boligprosjekter. En mulig løsning for å kunne dekke dette behovet, kan være å anvende 3D-printerteknologien av betong i fremtidens byggebransje, selv om teknologien per i dag er lite anvendt. Det er i den sammenheng nedenfor beskrevet fem ulike eksempler på fullskala byggeprosjekter, som benytter seg av denne teknologien.

3.4.1 Moskva, Russland

Selskapet «Apis Cor» 3D-printet et fullskala betonghus i 2017, som vist i Figur 3-9. Det er blant de første fullskala husene som ble oppført på byggeplass [33]. Huset befinner seg i hovedstaden til Russland, og har et samlet areal på 38 m². 3D-printeren brukte kun en dag på å printe hele konstruksjonen [34], men man må også regne med ekstra tidsbruk for manuelle arbeidsprosesser som printeren ikke kan gjennomføre [35]. Apis Cor valgte å bygge huset på den kaldeste årstiden i Russland [34], da 3D-printeren skulle kunne tåle temperaturer helt ned til -35°C [34].



Figur 3-9: Viser ferdig eksteriør av det komplette 3D-printede betonghuset i Moskva [35].

3.4.2 Wallenhausen, Tyskland

I Wallenhausen, Tyskland ble den første 3D-printede leilighetsbygget i betong på hele tre etasjer bygget [33]. Leilighetsbygget ble utviklet av «PERI GmbH», og er det største fullskala leilighetsbygget i Europa med et areal på 380 m². Dette arealet ble fullstendig konstruert ved hjelp av 3D-printeren [36], og det komplette leilighetsbygget er visualisert i Figur 3-10. Ifølge markedsdirektør Thomas [33], vil denne konstruksjonsteknologien kunne legge til rette for å 3D-printe enda større fullskalabygg on-site [36]. Prosjektet hadde samlet en ferdigstillelsestid på seks uker frem til det var innflyttingsklart.



Figur 3-10: Visualisering av det 3D-printede leilighetsbygget i betong [36].

3.4.3 Tabasco, Mexico

I tett samarbeid mellom hjelpeorganisasjonen «New Story» og teknologibedriften «ICON» har de nå klart å fullføre de to første 3D-printede betongboligene i den Mexicanske byen Tabasco on-site [37]. Disse boligene tok adskilt til sammen omtrent 24 timer å 3D-printe og begge har et areal på 46 m² [38]. Hver bolig er arealeffektiv, da de inneholder to soverom, stue, kjøkken og bad [37]. 3D-printeren måtte underveis i prosjektet håndtere utfordringer knyttet til uforutsigbar strømtilførsel, og en gjennomgående prosjektutfordring var oversvømte adkomstveier til byggeplass på grunn av store nedbørsmengder [37]. En av de to identiske 3D-printede boligene er visualisert i Figur 3-11.



Figur 3-11: Fasaden av komplett betongbolig [37].

3.4.4 Illinois, USA

I Illinois, USA 3D-printet den amerikanske hær en fullskala betongbrakke on-site på militærbasen [39, 40]. Militærbrakken hadde et areal på 46 m², og ble 3D-printet i underkant av to dager [40]. Ifølge Fridell [40], kan produksjonstiden til militærbrakken reduseres med en hel dag, ved å automatisere

blande- og pumpeprosessene av betongen. En lignende konvensjonell brakke bygget manuelt i tre, vil normalt ta en gruppe på fire marinesoldater totalt fem dager å ferdigstille. Fridell [40], ser også at det kan være fordelaktig å ha betongprintere i områder der marinesoldater opererer, for hurtig ferdigstillelse av bygninger på etterspørsel. Taket på den komplette militærbrakken ble ikke 3D-printet, som vist i Figur 3-12.



Figur 3-12: Komplet 3D-printet militærbrakke i betong med manuelt konstruert tak [39].

3.4.5 Westerlo, Belgia

Det bærekraftige og innovative byggefirmaet «Kamp C» 3D-printet i 2020 det første belgiske fullskala betonghuset på to etasjer, on-site i byen Westerlo [41]. Huset ble 3D-printet av en av de største 3D-printerne i Europa navngitt «BOD2», som vist i Figur 3-13. Printereren er enkel å montere på byggeplass, der det tar cirka en dag i oppriggingstid og en dag i nedriggingstid av 3D-printeren [41]. Det tok bare tre uker å bygge betongkonstruksjonen med et areal på 90 m² fordelt over to plan [42]. Prosjektet er i utgangspunktet ment å brukes som et fullskala modellhus, der formålet er å demonstrere hvilket potensiale 3D-printerteknologien av betong kan ha i byggebransjen.



Figur 3-13: Komplet 3D-printet hus produsert med 3D-printeren, utviklet av «COBOD» [42].

3.5 Alternativer til direkte 3D-printing av betong

3.5.1 3D-printet forskalingsløsning for betongstøping i Berlin

Det Berlin baserte firmaet «BigRep» 3D-printer komplekse forskalingsgeometrier i polymer filament (plast komposittmateriale) til betongstøping [43, 44]. Firmaets satsingsområde er støpning av ukonvensjonelle former og til produksjon av gjentakende betongstrukturer/betongelementer on-site [43]. Ukonvensjonelle former vil i denne sammenhengen være kurvede strukturer som er svært krevende og kostbare å forskale ved bruk av den konvensjonelle forskalingsmetoden. Byggefirmaet «Geiger» restaurerte en bygning med flere gjentakende vindusrammer som hadde en høyde på fem meter [44]. Det ble benyttet 3D-printede forskalingsformer utviklet av «BigRep» til å støpe et buet vindussegment gjentatte ganger til alle vindusrammene var komplette, som vist i Figur 3-14 og Figur 3-15. Forskalingsteknologien åpner opp for å kunne sammenkoble mange mindre 3D-printede segmenter til støping av ett stort sammenhengende betongelement [43]. 3D-printede forskalinger vil ikke kunne erstatte konvensjonelle rektangulære forskalinger, da prosessen vil være for kostbar.



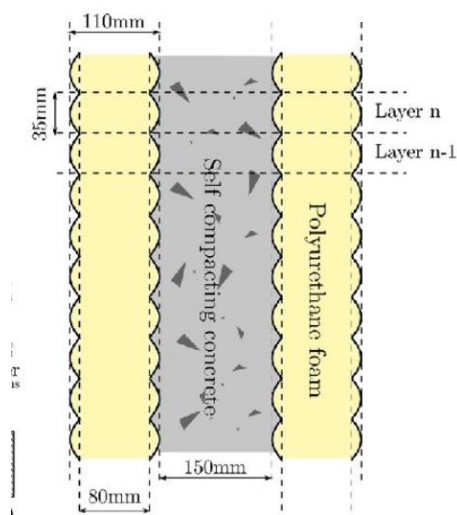
Figur 3-14: Støping av buet vindussegment i 3D-printet forskalingsform [43].



Figur 3-15: Ferdig sammensatt buet vindusramme klar til montering [44].

3.5.2 3D-printet forskalingsløsning med isolerende polyuretanskum i Frankrike

Universitetet i Nantes i Frankrike utviklet en 3D-printeteknikk for å kunne produsere veggelementene til en konstruksjon på byggeplass [45]. Byggeteknikken baserer seg på 3D-printing av to lag med ekspansivt skum (polyuretanskum) til forskaling, og deretter påføre kontinuerlige lag med selvkomprimerende betong underveis, som vist i Figur 3-16. Yhnova i Nantes stod ferdig i 2017, og er det første huset som ble bygget basert på denne teknologien. 3D-printeren brukte totalt 54 timer på å konstruere vegg.



Figur 3-16: Robotarmprinter til deponering av polyuretan skum [45].

Det ble benyttet en seks-akset robotarmprinter med en polyartikulert arm utviklet av «Staübli Group» [45], samt en autonom truck fra «BA systemes», som illustrert i Figur 3-17. Den autonome trucken var utstyrt med laserstrålesystem med millimeterpresisjon, for koordinasjon og posisjonering av 3D-printeren på byggeplass.

I denne sammenheng ble det vellykket printet en bygning navngitt Yhnova på hele 95 m² i fullskala på byggeplass. Det ble også benyttet et byggetelt på arbeidsplassen, for å sikre trygge miljø- og arbeidsforhold til 3D-printeren. I Figur 3-17 og Figur 3-18 kan man se byggeprosessen fra tidlig byggefase til ferdigstillelse av byggeprosjektet Yhnova [46].



Figur 3-17: Byggeprogresjon tidlig byggefase [46].



Figur 3-18: Ferdigproduisert bygg [46].

4

4. Forskerspørsmål

«Hvilke anvendelsesområder vil 3D-printing av betong kunne ha innenfor byggebransjen?»

For å kunne besvare forskerspørsmålet er det utarbeidet fire underspørsmål:

- Hvilke muligheter og begrensninger finnes for 3D-printing av betong?
- Hva er fordeler og ulemper med å fullskala 3D-printe konstruksjoner, kontra printing og montering av enkeltelementer på byggeplass?
- Hvordan kan bransjen utnytte designmulighetene?
- Hvordan kan økonomi- og miljøaspektet påvirke bruksområdene?

4.1 Avgrensninger

For å avgrense omfanget av oppgaven, og besvare forskerspørsmålet på en oversiktlig måte, er følgende avgrensninger lagt til grunn for oppgaven:

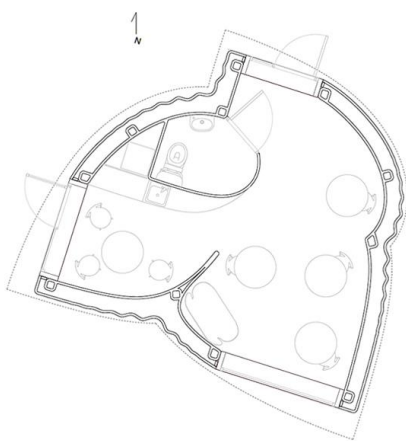
- Labforsøk er ikke utført som en del av denne rapporten på grunn av mangel på kapasitet, utstyr og økonomi.
- Det er ikke sett på 3D-printede knutepunktløsninger eller lignende komponenter med høyt detaljnivå, samt printing av verktøy/utstyr.
- Rapporten tar ikke for seg anleggsbransjen.
- Miljø og økonomianalyser er gjennomført som litteraturstudium og ikke egne beregninger i casestudium.

5. Case

Bakgrunn

Forfatterne har blitt engasjert gjennom byggstudiet på UiA til å se nærmere på 3D-printing eller additiv produksjon i byggebransjen. Denne teknologien begynner så vidt å bli introdusert i byggebransjen, men har i lengre tid vært kjent i diverse vareproduserende industri, som beskrevet i kap. 3.3. Gjennom litteratursøk og undersøkte case-studium, fant forfatterne raskt ut at det var ønskelig å fordype seg mer innen 3D-printing av betong.

«Partnerskabet», en samling av danske teknologibedrifter, har utarbeidet en rapport hvor de tar for seg ulike prosjekter som 3D-printer fullskala betongkonstruksjoner [39], samt printing av enkeltvise betongelementer i byggebransjen. Av de prosjektene som er omtalt av Partnerskabet, velger forfatterne av denne masteroppgaverapporten «The BOD» som hovedcase, som vist i Figur 5-1. Partnerskabet hadde som formål å øke bevisstheten og kompetansenivået om 3D-printerteknologien i byggebransjen i Danmark, samt kartlegge mulighetene teknologien kan tilføre byggebransjen.



Figur 5-1: BIM-modell og plantegning av «The BOD» [47].

Prosjektet «The BOD»

Den første 3D-printede bygningen «Building of development» (BOD) ble vellykket oppført i Danmark i 2017, og printet i en printerprosess på byggeplassen [39]. Bygningen er et kontorhotell på mindre enn 50 m² og har beliggenhet i byen Nordhavn. Det oppstod uforutsette problemer underveis ved printing av bygget, og videre ferdigstilling tok derfor lengre tid enn beregnet. Printerprosessen tok 50 timer, og videre ferdigstilling tok 2 måneder. Kontorhotellet har ingen rette veggflater annet enn bygningselementer som dør og vindu. Printereren som ble benyttet i dette prosjektet var en Gantry printer som kunne printe i x-, y- og z-retning, og den er videre illustrert i resultatkapitlet Figur 7-22. Det ble oppført et stort byggetelt over selve byggeplassen for beskyttelse av det teknologiske utstyret mot miljøforandringer i form av vær og vind [39].

I resultatkapittel 7.6 blir påvirkningseffekten av miljø og omgivelser, betongkvalitet, armeringsmetode, printerhastighet, printerskala og valg av printertype til å 3D-printe bygningen i betong presentert. Videre blir casen i denne oppgaven brukt til å få innsikt i utviklingen innenfor 3D-printing av betong i Europa. Forfatterne ønsker også å undersøke et reelt prosjekt som innfrir gjeldende europeiske standarder samt potensialet teknologien har i byggebransjen.

6

6. Metode

I denne masteroppgaven ble det gjennomført en tradisjonell litteraturstudie, kombinert med kvalitative intervjuer. Disse ble videre brukt for å kunne besvare forskerspørsmålet og til innsamling av data og informasjon. Bakgrunnen for gjennomføring av litteraturstudiet, er at 3D-printing blir sett på som en relativt ny teknologi, og har derav en liten brukerbase med varierende kunnskap om emne. Gjennomføringen av kvalitative intervjuer er utført for å få innsikt i hvordan 3D-printing av betong benyttes i dagens byggebransje. Begge gruppemedlemmene har fra tidligere minimum bachelorgrad innen konstruksjonsteknikk. En av gruppemedlemmene har erfaring fra byggebransjen, som har gitt oss praktisk- og mer detaljert informasjon om selve prosjektgjennomføringen i byggefasen. Dette har gitt oss viktig informasjon og bedre forståelse av tidsaspektet og økonomiperspektivet knyttet til oppgavebesvarelsen.

6.1 Litteraturstudie

Gjennom litteraturstudie har det blitt benyttet ulike akademiske og forskningsrelaterte databaser som Oria, Google Scholar, Science Direct, ResearchGate, Scopus samt masterstudier som omhandlet forskningsemnet. I denne sammenhengen har Scopus søkemotor vist seg nyttig for å finne relaterte vitenskapelige artikler, med likheter innen blant annet overskrift og sammendrag. To av hovedfordelene med Scopus er at man enkelt kan finne nyeste studie som siterer aktuell kilde og aktuelle benyttede referanser. På en annen side oppdaget vi at Google Scholar har høyere treffrate med gjennomsnittlig flere høyt siterte akademiske dokumenter enn Scopus.

Det ble tidlig i litteratursøket gjort visse geografi- og tidsbegrensninger, da teknologiutviklingen innen 3D-printing foregår i ulik hastighet avhengig av landets byggemetoder, tilgang på ressurser, arbeidskraft og kultur. Rapporten benytter seg derfor kun av litterære kilder fra europeiske land, da de overnevnte avhengighetene ikke er så ulike på landsbasis, og bygger dessuten på felles Eurokoder med egne nasjonale tillegg. Tidsbegrensninger knyttet til litteraturutgivelse ble spesifisert for å finne de nyeste forskningsartiklene på området, da informasjon som er skrevet om emne for ti år siden ikke nødvendigvis samsvarer med dagens litteratur. I Resultatkapittelet i oppgaven er det benyttet litteratur publisert de fire siste årene, mens i teoribakgrunn mindre strenge rammer da det finnes mye god forskningslitteratur om emnet også i årene før 2017. Det vil være viktig å inkludere denne litteraturen for å få et fullstendig innblikk i hvilke mulighetsområder som eksisterer innen 3D-printing, og ikke kun mulighetsområder for 3D-printing de fire siste årene.

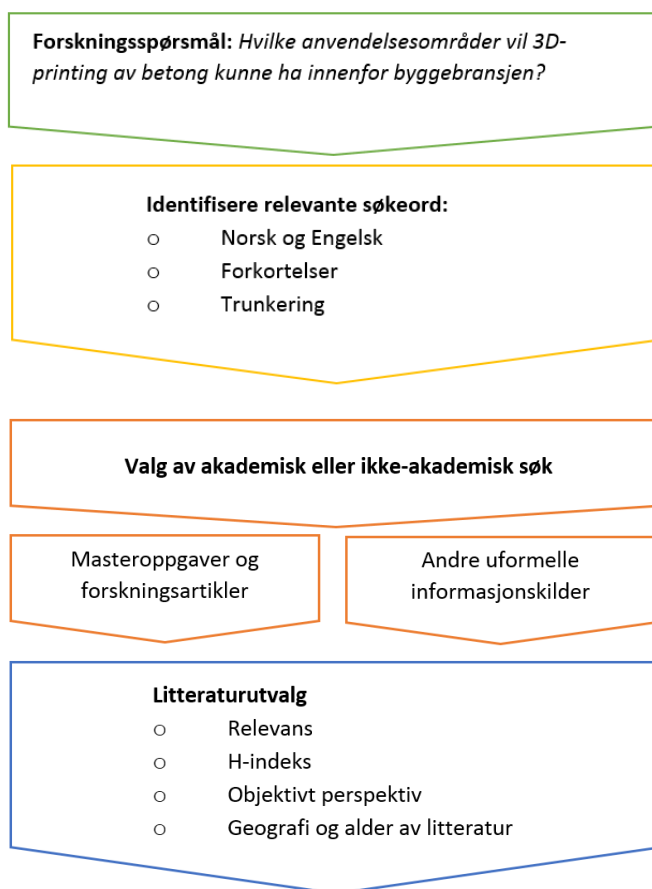
6.1.1 Flytskjema

Det ble også laget et flytskjema, som vist i Figur 6-1 og Figur 6-2, som tar for seg arbeidsforløpet i litteratursøket fra utarbeidelsen av forskningsspørsmålet til analysering av endelig utvalgte rapporter. Utvelgelsen av litteraturkilder ble i denne masteroppgaven utført gjennom målrettet lesning av sammendrag og introduksjon, for å identifisere hvilke artikler som var verdt å gjennomgå. Deretter ble konklusjons- og diskusjonskapitlet lest gjennom, dersom informasjon i sammendrag og

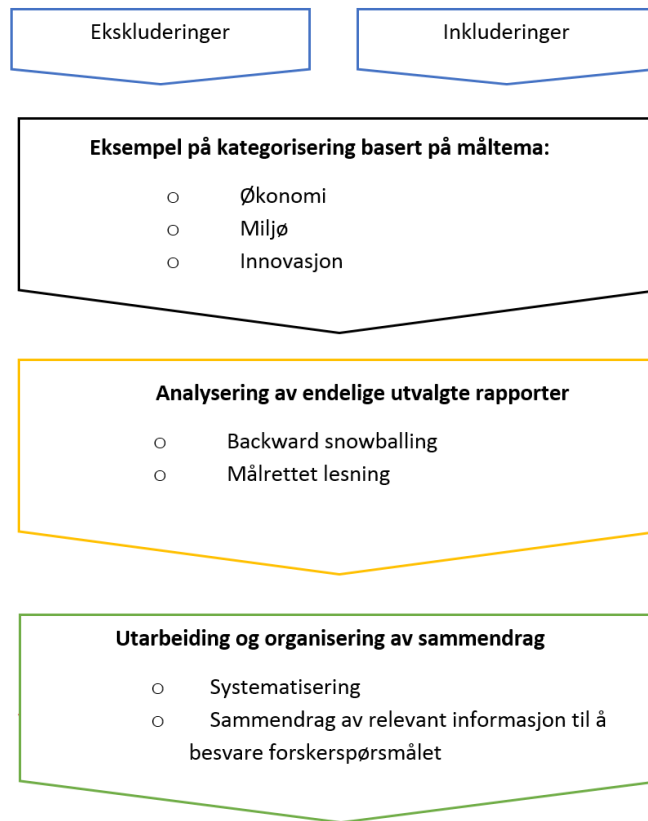
introduksjon tydet på at artikkelen var tilstrekkelig relevant for vår studie. Utarbeidelse og organisering av artikkelsammendrag ble gjort på følgende måte gjennom tre ulike annoteringer [48]:

- Sammendrag bestående av: hovedargumenter, hovedtemaer, teorier, styrker og svakheter og metodikk.
- Evaluering: kontrollerer at kilden er nøyaktig, sammensatt og innehar kvalitet.
- Kombinering av de to øvre kategoriene.

Utformingen av flytskjema ble utarbeidet med inspirasjon fra det Australske Monash Universitetsbiblioteket [49].



Figur 6-1: Flytskjema illustrerer arbeidsforløpet i litteratursøket, del 1/2.



Figur 6-2: Flytskjema illustrerer arbeidsforløpet i litteratursøket, del 2/2.

6.2 Siteringskriterier

6.2.1 Siteringsindeks

Siteringsindeks indikerer antall ganger en artikkel/publikasjon er sitert, og indeksen lagrer disse dataene jevnlig i en bibliografisk database. I denne rapporten ble siteringsindeksen benyttet til å finne de artiklene som hadde størst innflytelse på forskningsfeltet, og medførte at artikler med flest antall siteringer ofte ble prioritert først. Google Scholar er en søkemotor som innehar siteringsindeks, og viste seg som et nyttig verktøy for informasjonsinnhenting, samt for å kunne evaluere forskning. På en annen side er det viktig å være kritisk til siteringsindeksen, da den kan være et misvisende mål på forskningsartiklers informasjonskvalitet. En utfordring kan være at forfatterne ofte selv siterer sine egne artikler, noe som kan redusere kredibilitet og gi en misvisende vurdering av informasjonskvalitet. Dette vil da kunne være gjeldende i tilfeller der brukeren konsekvent velger artikler med høy siteringsindeks, uten å inkludere andre typer siteringskriterier eller søkeavgrensninger sett under ett. Videre er det av den grunn foretatt grundige søk og evaluering av søkeresultatene, med hensyn på ulike siteringskriterier og spesifiserte søkeavgrensninger i denne rapporten.

6.2.2 H- indeks

H-indeks, også kalt Hirsch-index er navngitt etter grunnlegger og fysiker Jorge Hirsch. Ifølge Hirsch er H-indeks definert som en indikator basert på innvirkningsgraden en forsker har på utviklingen av personens vitenskapelige felt [50]. Med andre ord, desto høyere H-indeks en forsker har, desto mer relevant anses arbeidet innen fagfeltet for å være, siden et større antall kolleger leser og refererer til personens publikasjoner. I denne masteroppgaven har H-indeksen vært et hensiktsmessig verktøy til blant annet å finne antall publiserte forskningsmaterialer og siteringene til disse materialene på en balansert måte, som muliggjør sammenligning mellom forskere på samme fagfelt/tema. Google Scholar var den mest sentrale databasen som ble benyttet for å filtrere informasjon. H-indeks og relevans ble benyttet for å begrense søketreff på en effektiv måte.

6.2.3 Backward- og forward snowballing

Backward- og forward snowballing metodene kan benyttes i google Scholar, der de relaterte siteringene knyttet til publiseringen du undersøker, gjør at du enkelt kan identifisere nye relaterte publiseringer. Backward snowballing er en metode der du bruker referanselisten til å identifisere nye forskningsartikler, og ble i denne oppgaven brukt til å identifisere primærkilden i de tilfellene det var mulig. Forward snowballing er det motsatte av Backward snowballing, der en undersøker artikler som siterer en allerede utvalgt artikkel, for å finne ytterligere informasjon om temaet.

6.3 Loggbok

For å videre begrense antall søketreff i databasene og gjøre gode litteratursøk, samt loggføre søkeordene ble en loggbok tatt i bruk. Bakgrunnen er at UIA Grimstad anbefaler sterkt å gjennomføre et strategisk kurs fra København innen akademisk informasjonssøking som gir anbefalinger om hvilken rekkefølge søkestrategiene burde gjøres i, for å kunne effektivisere tidsbruken og tilføre oppgaven kilder av høy akademisk kvalitet. Kurset og loggboken har også vist seg å gi avkastning, da den tidligere ble benyttet i masterstudie. I Tabell 6-1 under, er et utsnitt av loggboken tatt med for illustrasjon. For nærmere informasjon om loggboken, se vedlegg C).

Tabell 6-1: Utsnitt med eksempelvis søketermer fra loggboken.

Facet	Terms in English	Terms in other languages	Number of hits (Google Scholar, english, 2022-2023)
3DP	3D printing	3D-printing	1 590 000
AM	Additiv Manufacturing	Additiv tilvirkning	22 300
3DPC	3D printing concrete	3D printing betong	89 000
3DPFEM	3D printing FEM	3D printing FEM	39 300

6.4 Intervju

Det ble gjennomført to semistrukturerte videointervjuer på Microsoft Teams, hvor det ene var av AF-Gruppen og det andre var av Hyperion Robotics. Forberedende korrespondanse og planlegging av intervjuene foregikk via e-post. I forkant av intervjuene hadde forfatterne tildelt roller, hvor den ene skulle fungere som intervjuer og den andre skulle stå ansvarlig for lydopptak og transkribering. Det ble i begge tilfellene forhåndsinformert om oppgavetema, hvor spørsmålene ble gitt i forkant av intervjuene slik at intervjuobjektene hadde mulighet til å forberede seg. Gjennom å lese en rekke forskningsartikler, relevant faglitteratur og gjøre strategiske databasesøk, dannet dette grunnlaget for utarbeidelsen av spørsmålene. Intervjuobjektene ble holdt anonyme etter eget ønske og oppgaven refererer derav kun til selskapet. Semistrukturert intervju ble benyttet for å gi samtalen bedre vurderingsgrunnlag, hvor intervjuet til dels formes basert på kandidatens egne perspektiver og besvarelser. Intervjuene ble transkribert med tillatelse, og lydopptakene ble spilt av flere ganger for å kvalitetssikre at viktige detaljer og informasjon fremkommer i intervjureferatene, se vedlegg **A**). Lydopptakene var også avgjørende for å få tilgang på direkte sitater, og intervjuet ble mer avslappet.

Webkamera ble benyttet under begge intervjuene og bidro til bedre kontakt mellom deltakerne. Det var i begge tilfellene ikke nødvendig å benytte hele den avsatte tiden på 45 minutter, da begge intervjuene varte omtrent 30 minutter. Med tanke på oppgavens forskerspørsmål passet den semistrukturerte intervjuutypen, da det var enkelte spørsmål rundt oppgavens tema som ikke var fullstendig dekket i litteraturstudiet. Intervjuformen vil også oppleves mer seriøs og profesjonell med faste rammer i forhold til bruk av ustrukturerte intervjuer. Kontakten i AF-gruppen bidro til å komme i kontakt med de rette personene i byggebransjen med relevant kompetanse på fagfeltet. Det ville vært utfordrende å komme i kontakt med disse personene dersom forfatterne ikke hadde kontaktet AF-gruppen i første omgang. En annen viktig grunn for gjennomføring av intervju, var å tilføre oppgaven faglig tyngde i form av praktisk kompetanse og erfaringer med 3D-printing av betong, samt få bredere innsikt i teknologiens potensiale i bransjen.

6.5 Metodekritikk

I startfasen av oppgaven er det viktig å ta i bruk akademiske databaser med høy grad av vitenskapelig litteratur for å skape reliabilitet i informasjonsinnsamlingen. Det vil også være viktig å opprettholde et objektivt synspunkt gjennom rapporten, og benytte kilder som holder samme nøytralitet. Videre er det viktig å sortere ut kilder med mindre grad av objektivitet som følger av subjektiv finansiell støtte for forskningen. Dette kan igjen gi et mer fordelaktig syn på det som undersøkes fremfor hva som er realiteten og eventuelle ulemper. Ellers er det prøvd i størst mulig grad å finne kilder uten økonomisk støtte, og unngå tilfeller der byggebedrifter omtaler deres egne produkter, som gjør at avhandlingen er skrevet på et mindre gyldig grunnlag.

Intervjuene ble gjennomført blant relativt få selskaper, da hovedvekten i denne rapporten ikke blir lagt på resultatene i intervju. For en mer valid helhetsforståelse av anvendelsesområder dagens 3D-printing av betong har i Europa, kunne det blitt gjennomført flere intervjuer blant ulike selskaper i byggebransjen. Dette kunne bidratt til å øke oppgavens troverdighet, da flere intervjuobjekter, fordelt på ulike land, med flere ulike synspunkter ville tilført intervjugrunnlaget ekstra dybde.

Videre har det vært særdeles viktig å gjennomføre gjennomtenkte og strategiske litteratursøk, der vi valgte å benytte oss av loggbok, metoder som backward- og forward snowballing samt H-indeks. Loggboken er et verktøy som gir en overordnet oversikt over søkehistorikken, databaser og utvalgte kildeavgrensinger. Loggboken er derfor etterprøvbart, som innebærer at man vil få samme antall søketreff med å følge de utfylte kildedetaljene i loggboka. En svakhet med loggboken kan være at ved få søketreff, vil det ikke alltid være en garanti for litteraturresultater av høy kvalitet. De identifiserte artiklene kan da videre vurderes med bruk av siteringsindeks, H-indeks samt Backward- og forward snowballing for å kvalitetssikre resultatene. Det er også viktig å nevne at høy H-indeks baserer seg på personer med ulik faglig bakgrunn som har sitert kilden, og betyr ikke nødvendigvis at personene som siterer kilden har et objektivt syn på oppgaven, men kan gi en pekepinn på innholdets kvalitet. I noen av de akademiske databasene som bla. Oria; kan man velge avanserte søk og gjøre begrensinger i form av materialtype, språk, utgivelsesdato og søkefiltre. Dette gjør det enklere å finne det du leter etter av informasjon og begrenser samtidig søketreffene. Det er dessuten viktig å ikke avgrense søket for tidlig, da man kan utelate annen viktig forskningslitteratur.

Kildegrunnlaget til oppgaven baserer seg kun innen følgende geografiske områder: Europa, USA og Australia. Dette fører til redusert representativitet, men er gjort med tanke på at det vil være for bredt å se på 3D-printing av betong på et internasjonalt nivå. Samtidig vil Europa, USA og Australia lettere kunne relateres til hverandre når det kommer til 3D-printing av betong i byggebransjen sammenlignet med verdensdelen Asia, som har til dels helt andre byggemetoder. Det er også verdt å nevne at vi har hatt et så objektivt syn gjennom hele oppgaven som overhodet mulig, for å tilføre oppgaven kredibilitet.

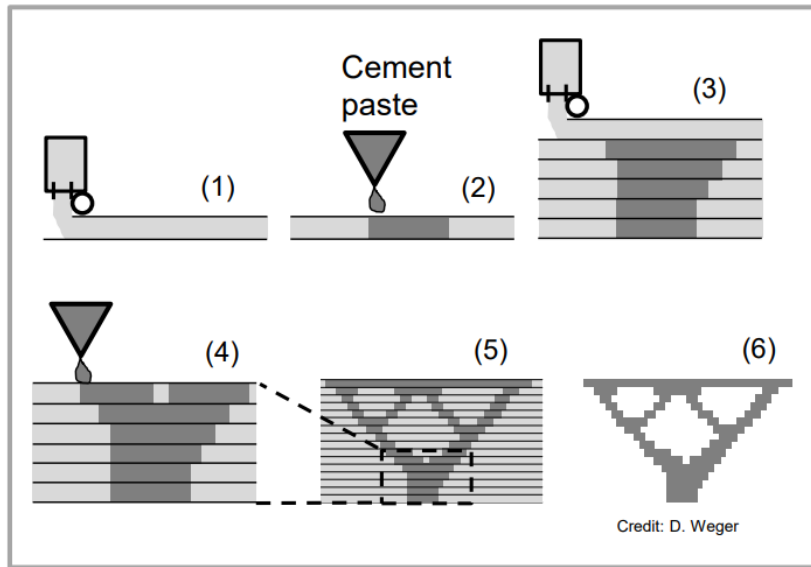
7. Resultat

- I kap. 7.1 til kap. 7.5 blir **muligheter og begrensninger** for 3D-printing av betong undersøkt.
- Fordeler og ulemper med å **fullskala 3D-printe konstruksjoner, kontra printing og montering av enkeltelementer** på byggeplass blir undersøkt i kap. 7.6 til kap. 7.8.
- Utnyttelse av **designmulighetene** i byggebransjen undersøkes i kap. 7.9.
- **Økonomi- og miljøaspektets** innvirkning på bruksområdene undersøkes i kap. 7.10 og kap. 7.11.
- Kapittel inneholder **intervju** som skal gi tilføyende informasjon, og omhandler alle de overnevnte kapitlene i resultatet.

7.1 3D-printing av betongkonstruksjoner

3D-printerteknologien har eksistert i flere tiår [39], men det er først i de siste årene den har fått mer utbredt anvendelse innen industrien. De første europeiske oppføringene av 3D-printede bygningskonstruksjoner i betong ble foretatt for cirka 7-8 år siden [39]. I Norge skal det første 3D-printede næringsbygget nå oppføres på Ulven i Oslo med ferdigstilling i 2023-2024 [51]. OBOS, Betonmast og AF Gruppen er pådrivere for denne teknologiske nysatsingen, og legger vekt på innovasjon og vekst i byggebransjen.

De mest brukte metodene for å 3D-printe betong; er ekstruderings-/deponeringsmetoden og selective paste intrusion (SPI) [52]. SPI er en partikkelbasert metode, der en 3D-printerdyse påfører sementpastaen i spesifiserte tynne lag som videre trenger inn i aggregatlaget/aggregattilslaget og pakker betongen [53], som vist i Figur 7-1. Det er også viktig å påse at inntrengingsdybden av sementpastaen er korrigert for å sikre tilstrekkelig heft mellom aggregatlagene, samt tilse at betongflyten ikke er for høy, da det vil kunne skade konturnøyaktigheten. På grunn av støttefunksjonen til de ubundne partiklene, kan man bygge strukturer med utradisjonelle former [54].

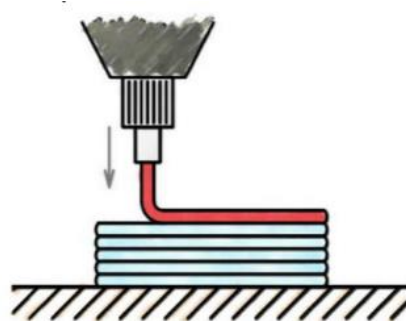


Figur 7-1: Konsept Selective paste intrusion [55].

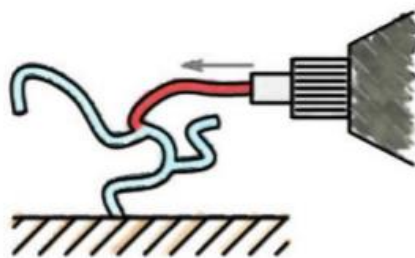
Figurforklaring: (1) Det legges ut et lag med aggregattilslag. (2) Påføring av sementpasta i spesifikt område på toppen av aggregatlaget. (3) Trinn (1) og (2) gjentar seg og danner fire nye lag. (4) Sokkelen til strukturen er ferdig. (5) Alle lagene som utgjør strukturen er påført. (6) Til slutt fjerner man de ubundne aggregattilslagene.

7.1.1 Ekstruderings-/deponeringsmetoden

Ekstruderings-/deponeringsmetoden er den mest anvendte 3D-printe metoden [52]. Den åpner opp mulighetene til produksjon av betongkonstruksjoner og betongelementer i ulike størrelser, fra printing av mindre elementer til hele bygg. Videre deles metoden inn i henholdsvis lagdelt (layered) og suspendert (suspended) [39]. Begge metodene forsyner betongen gjennom dyseåpningen og danner filamenter av betongen som plasseres lagvis i horisontale lag som vist i Figur 7-2 og Figur 7-3. Den suspenderte metoden er en videreutviklet versjon av betongekstrudering, hvor munnstykket på dysen tilsettes en akselerator som gjør at betongen herder tilnærmet umiddelbart og fester seg til underliggende utlagte/ekstruderte betonglag. På denne måten unngår man synkutbredelse av betongen, og lagseparasjon dersom underliggende lag ikke er tilstrekkelig herdet før neste lag påføres, samt at trykket fra overliggende lag kan bli kritisk høyt [39].



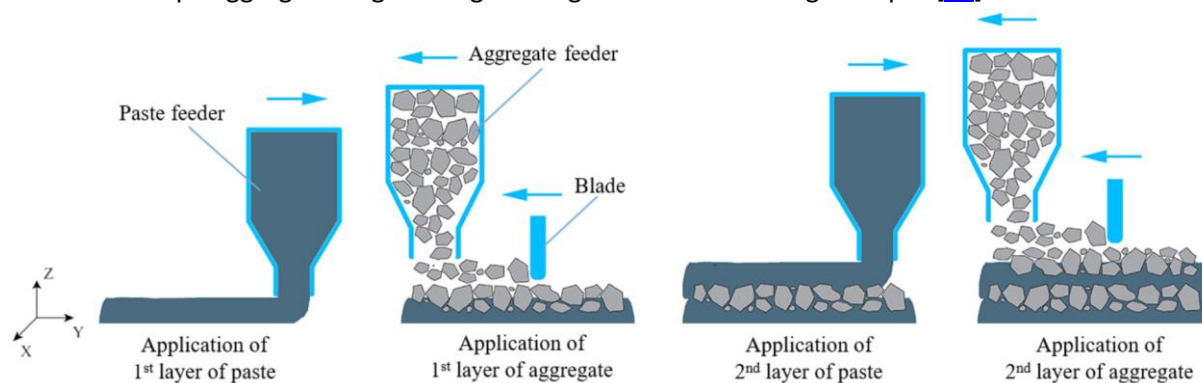
Figur 7-2: Material extrusion (layered) [39].



Figur 7-3: Material extrusion (suspended) [39].

7.1.2 Aggregate-bed 3DCP metoden og Selective paste intrusion

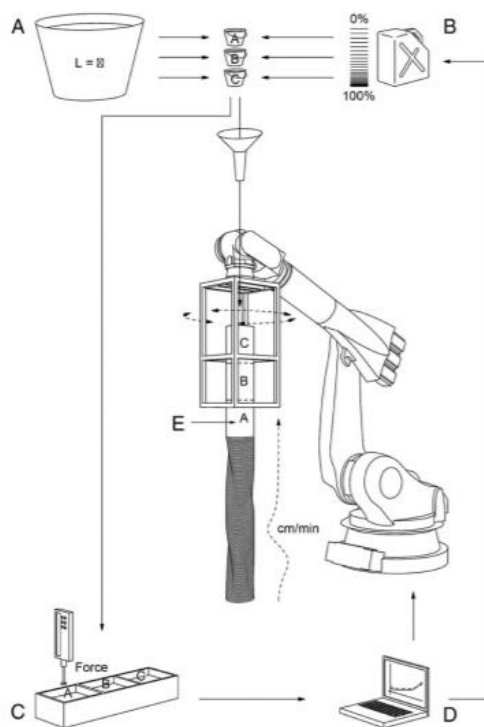
Metodene for å 3D-printe betong er stadig i utvikling, og i et forskningsstudium utført av Shiwei et al. [56], utviklet de metoden «aggregate-bed 3DCP» basert på selective paste intrusion. Metoden la til rette for at man kan printe bredere sementpastalag i x-retning samt økt dimensjon på aggregattilslagene, se Figur 7-4. Da aggregattilslagene har en ujevn overflate, vil en større bredde på sementpastafilamentet være å foretrekke da det vil gi en jevnere overflatestruktur samt at økt kornstørrelse på aggregattilslagene vil gi betongen bedre fasthetsegenskaper [56].



Figur 7-4: 3D-betongprinterprosessen av aggregate-bed 3DCP [56].

7.1.3 Alternative metoder til 3D-printing

En annen alternativ form for 3D-printing er glidestøping (controlled slip forming) som er en prosess der forskalingsformen blir forskjøvet med jevne mellomrom rundt konstruksjonen [52, 57], og jevnlig påfylling av betong [57]. I 2010 ble «Smart Dynamic Casting» utviklet av ETH Zurich, og er en robotisering av glidestøping ved hjelp av en seks-akset-robotarm [52]. Som vist i Figur 7-5 er: A) volum med selvkomprimerende betong tilsatt retarderende tilsetningsstoff. B) Tilføring av betongakselerator lokalisert ved inntak i støpegodset. E) Innstilling av betongformen plassert i støpeområde, mens trinn C) og D) korresponderer med en innebygd kontroll der progresjonen av reologien blir fulgt opp, samt kontroll av hastigheten på løfting av betongformen.

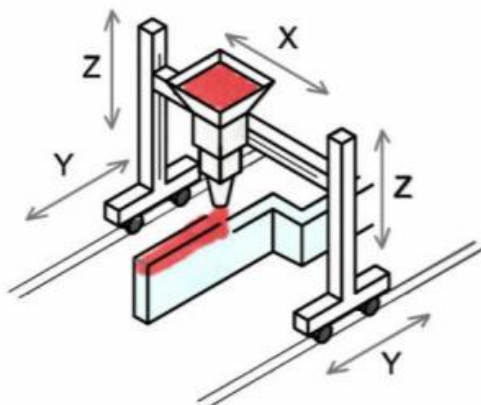


Figur 7-5: Illustrasjon av prosessene i «Smart Dynamic Casting» [52].

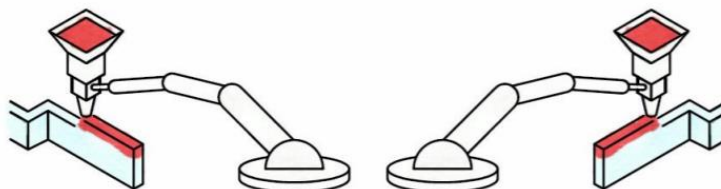
7.2 Byggeplassløsninger

7.2.1 Teknologi og styresystemer for 3D-printing

Det finnes mange ulike typer printere og varianter av styresystemer når det kommer til 3D-printing av betongkonstruksjoner. Andre måter å skille mellom disse typene er at de bruker ulike robotteknologi til å bevege printerhode. De to mest brukte variantene av printere er Gantry printere og Robotarmprintere, og baserer seg på en tidligere gjennomført litteraturinnsamling [52]. Gantry printere består av en ramme med gjerne 2-4 bæresøyler der printerhodet kan bevege seg presist i x-, y- og z-retning innen printerområde for å printe objektet [39], som illustrert i Figur 7-6. Robotarmprintere har i motsetning til Gantry et fast holdepunkt til robotarmen innenfor printerområde, som vist i Figur 7-7. Robotarmens lengde vil begrense rekkevidden for hvilke dimensjoner som er mulig å printe, bortsett fra å manuelt forflytte holdepunktet til robotarmen underveis. Andre egenskaper til disse printerne er at de kan tas i bruk på selve byggeplassen og til elementproduksjon [39].



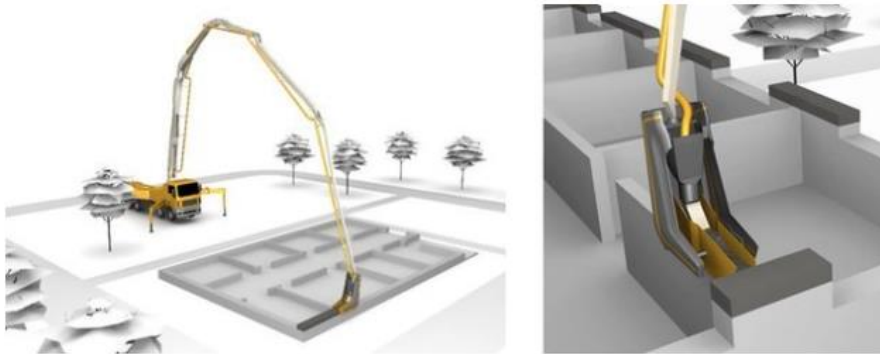
Figur 7-6: Gantry printer [39].



Figur 7-7: Robotarmprinter [39].

Det finnes også andre styresystemer til printere enn overnevnte: Cable robot/Cable suspension, robot truck og tower crane system [52]. HINDCON har utviklet en kabelopphegt printeløsning (Cable robot) som består av en rektangulær plattform utstyrt med en endeeffektor med trykkdyse, som kan justeres automatisk med justerbare motorstyrte kabler [22]. Dette er en enkel løsning å montere på byggeplass, da den kun krever åtte tilkoblingspunkter. Løsningen har i utgangspunktet dessuten også svært lav totalvekt samt, er enkel å transportere.

For å kunne 3D-printe en konstruksjon over flere etasjer vil det være nødvendig å utvikle styringssystemer som uten problemer kan printe i høyden. I denne sammenheng er robotisert lastebil m/tårnpumpe (robot truck) og heisekransystem (tower crane system) på utviklingsstadiet; illustrert i Figur 7-8, Figur 7-9 og Figur 7-10. Robot truck vil ha fellestrekk til en betongpumpebil, hvor betongtobb vil være skiftet ut med et spesialutviklet printerhode på enden av tårnpumpen [58]. Heisekransystemet er utstyrt med et gyroskopisk system som skal ta høyde for skiftende miljøforhold på byggeplassen som vær og vind, og vil kunne retningsstabilisere og rotere skriveren i alle retninger [52]. Konseptet er forsket på i «ConPrint3D-prosjektet» utført ved Dresden tekniske universitet [52]. Denne forskningen undersøkte ideell betongsammensetning, type printerhoder og robotisering [59].



Figur 7-8: Robotisert lastebil m/tårnpumpe printer boligblokk [52].



Figur 7-9: Ferdigprintet boligblokk [60].



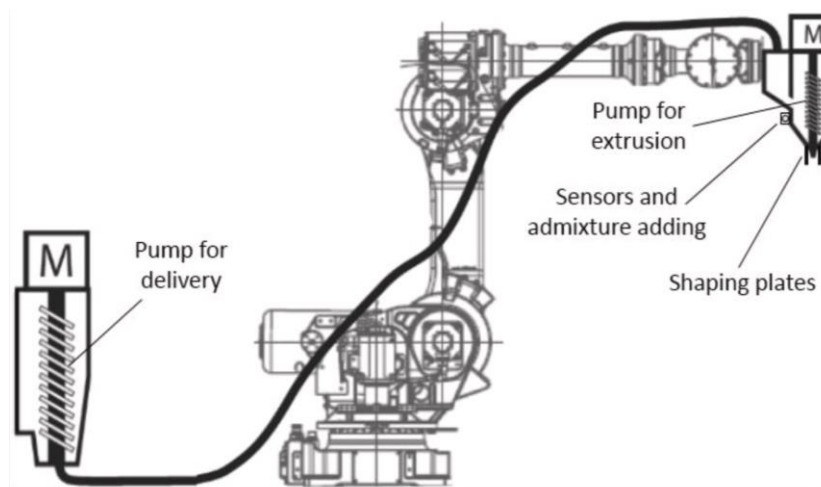
Figur 7-10: Heisekransystem [52].

7.3 Armering og betongkvalitet/betongreologi

7.3.1 Betongpasta

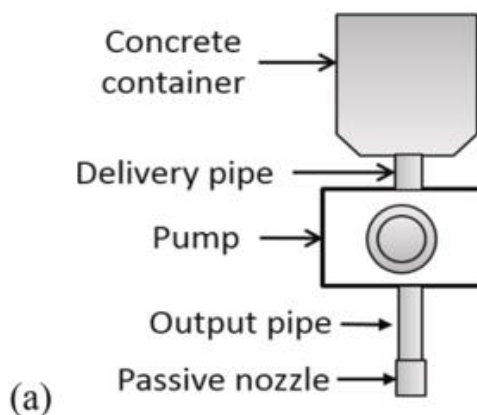
Evnen til å kunne printe betong er en omfattende prosess som innebærer: pumpbarhet, ekstruderbarhet og byggbarhetssegenskaper [61]. Når man 3D-printer betong vil de overnevnte reologiske betongegenskapene i fersk tilstand være forskjellig, kontra for konvensjonell betong. For å produsere en printbar betong vil parametere som: høy flyteevne, lang betongherdetid under lagring, effektiv pumping og ekstrudering, være særdeles viktig før avsetning. Etter avsetning ønsker man å oppnå lav viskositet, høy flytespenning, høy grunnstyrke og hurtig herding av betongen. Hoveddelen av betongblandingen som ble forsynt ut gjennom dysen bestod tidligere kun av sement, men i nyere tid har teknologiutvikling gjort det mulig å printe grovere aggregater gjennom dysen. NASA klarte ved hjelp av en Gantry printer å 3D-printe med en betongblanding, som inneholdt blant annet grovt aggregattilslag med en partikkeldiameter på 9,5 mm [61].

Da betongen ofte skal pumpes over lengre avstander på en byggeplass, vil det være mer utfordrende å finne betongpumper som er kraftige nok til å slynge betongen opp gjennom slangen uten at betongen hoper seg opp i slangen eller at dysen tetter seg [61]. Når flytratio, tid og pumpedistanse øker, vil betongreologien endre seg deretter. Det vil også være mulig å teste pumpbarheten til fersk betong på byggeplass med bruk av «sliding pipe rheometer» metoden. Egenskapene til den ferske betongen blir testet ved å fylle et vertikalt rør med fersk betong, og videre blir måledata som trykk og rørhastighet registrert [25]. I bunnen av røret er det et stempel som har en integrert trykksensor, som måler trykket i røret når røret beveger seg nedover. Dette gjør at man kan måle hvordan betongen vil oppføre seg i den flytende fasen under varierende spesifikke omstendigheter. Kritiske faktorer knyttet til ekstruderbarhet, er type ekstruderingsystem og betongreologi. En kjent måte å klassifisere printerdyser på er passive printerdyser og aktive printerdyser. Den passive printerdysen presser betongen gjennom en rund eller rektangulær dyse, mens aktive printerdyser har mer avanserte kontrollsystemer, som tilførsel av tilsetningsstoffer i betongblandingen, formgivningssystem og overvåking av betongstrømningen som vist i Figur 7-11 [61].

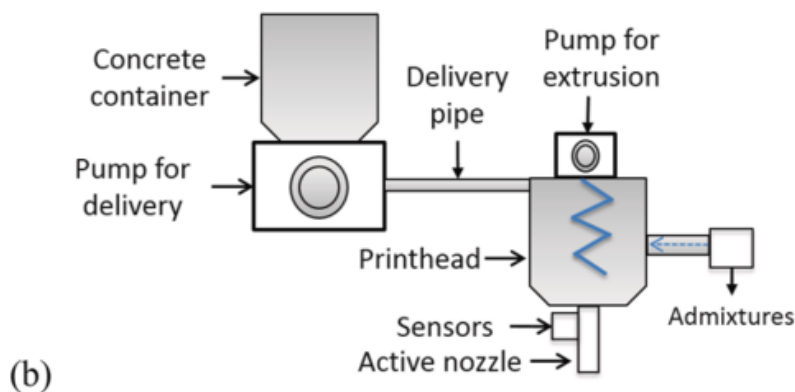


Figur 7-11: Robotarmpriener med aktiv printerdyse [61].

Det finnes blant annet to ulike typer prosesser for ekstrudering av betong, der den ene tar for seg levering og ekstrudering av betong i et felles system [61]. I denne prosessen blir betongmiksen og tilsetningsstoffer blandet i samme beholder. Deretter blir blandingen levert gjennom en slange og ekstrudert gjennom en passiv dyse med bruk av kun en betongpumpe som illustrert i Figur 7-12. Den andre ekstruderingsprosessen av betong har adskilt leverings- og ekstruderingsprosess med bruk av en aktiv printerdyse som vist i Figur 7-13 [61].



Figur 7-12: (a) Prosess for betongekstrudering i felles system [61].



Figur 7-13: (b) Adskilt leverings- og ekstruderingsprosess [61].

Det er viktig å oppnå god betongbyggbarhet for å unngå deformasjoner av deponert betong [61]. Printe størrelsen på filamenter avgjør effektiviteten og filamentfordelingen, der høyt innhold av filamenter vil gi mindre effektiv printerhastighet. Storskala 3D-printing av betong søker å finne en passende filamentfordeling med høy grad av effektivitet, for å tilfredsstille kravene til økonomi og europeiske byggestandarder. Det er dessuten også bevist at høyden på betonglagene som ekstruderes må være mindre enn dysebredden for blant annet å sikre nødvendig mekanisk motstand. Det vil også være avgjørende at underliggende lag herder hurtig for å kunne bære neste påførte overliggende lag, slik at man unngår betongdeformasjoner [22].

7.3.2 3D-print ved bruk av UHPC

Ifølge Arunothayan et al. [62], begrenses den ekstruderte 3D-printerteknologien av at det kun eksisterer et mindre antall betongkonsistenser som er printbare. Karakteristiske egenskaper for en printbar betong er beskrevet i kap. 7.3.1. Lav viskositet sikrer flyt under betongekstruderingen, og den høye flytespenningen forhindrer at det ekstruderte materialet kolliderer etter deponering. En vanlig måte å løse disse motstridende kravene til betongen i fersk tilstand; er å tilsette en akselerator ved enden av dysen som gjør at betongen hurtigherder.

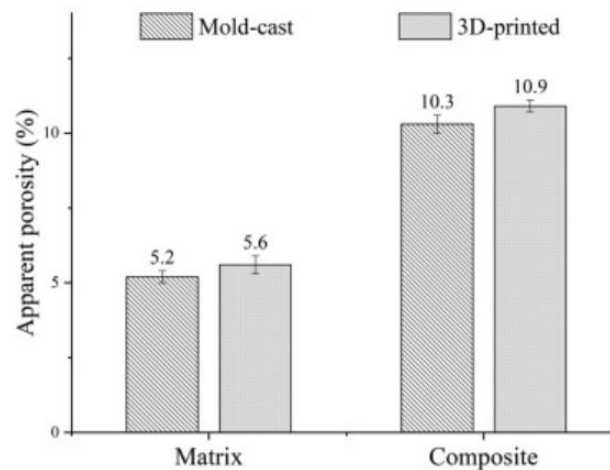
UHPC er en kategori av høytytelsesmaterialer som ofte kjennetegnes ved høyt sementinnhold og bruk av fiberarmering[63]. En type printbar betong som benyttes til 3D-printing av betong er fiberarmert sementholdig kompositt av høytytelsesbetong, og har på engelsk forkortelsen (HPFRCC) [62]. Denne forkortelsen står for high-performance fiber-reinforced cementitious composite. Dette er et alternativ med et mindre materialutvalg som i utgangspunktet ble designet for en bestemt ekstruderbasert 3D-printer med særegne printekonfigurasjoner. Disse konfigurasjonene vil være faktorer som blant annet: dyseutforming, dysetype, dysediameter, strømningshastighet og andre pumpespesifikasjoner. Ved 3D-printing av det første kontorhotellet i Europa [39], ble det i forkant av prosjektet testet ut ulike utforminger av dyser, der blant annet sirkulære og rektangulære utforminger ble testet [39]. I denne sammenheng viste det seg at en sirkulær vertikalt orientert dyse ikke er den mest effektive, men at en rektangulær dyse med endekanter på begge sider av dysen (forked nozzle) er et bedre alternativ, som illustrert i Figur 7-14.

I en masteroppgave skrevet av Deivanai og Manikandan [64], fremkommer det av labresultatene at en rektangulær dyse har høyere trykkfasthet og overflateruhet enn en sirkulær dyse. Det sammenfattes videre i masteroppgaven, at en sirkulær dyse vil være mindre egnet til å 3D-printe strukturer som vegger eller søyler, selv om en rektangulær dyse gir høyere gjennomsnittlig konturavvik i forhold til konturmodellen i CAD-programvaren.

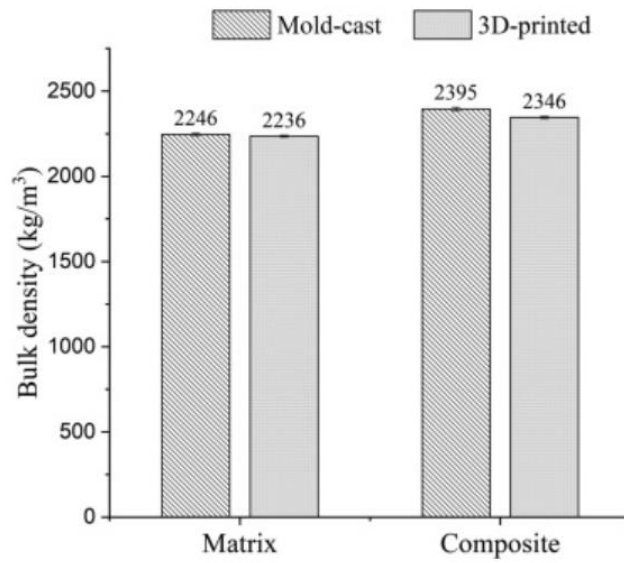


Figur 7-14: Gaffelutformet vertikal betongdyse [47].

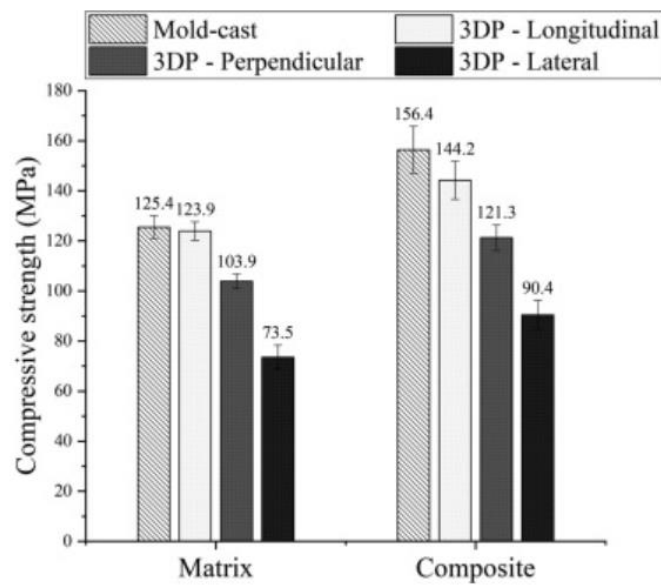
Ultrahøyttelses fiberarmert betong som på engelsk heter ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC) blir ofte benyttet til 3D-printing av betong, og er kjent for sin høye trykkfasthet, samt mulighet for å printe slanke profiler med høyere grad av geometrisk frihet [62]. Da (UHPFRC) også øker strekkfastheten til betongen gjennom bla. tilsetning av fiberarmering i sementen, gjør dette at man er mindre avhengig av konvensjonell stålarmering. I fra tidligere forskningsstudier har ultrahøyttelses betong (UHPC) blitt printet uten bruk av fiber i betongblandingen. Betongsammensetningen til (UHPFRC) vil kunne variere etter bruksområde. I studiet utført av Arunothayan et al. [62], bestod denne av: Portland sement, mikro silica, silica sand med ulike partikkelstørrelser, viskositetsmodifiserende middel, SP-stoff (superplastiserende tilsetningsstoff) som øker vannreduksjonen i betongen, samt korte rette stålfiber og vann. Det ble videre undersøkt UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC med to prosent stålfibertilsetning. UHPFRC komposittmateriale påviste best herdeegenskaper gjennom standard tester av porøsitet, bulkdensitet, trykkfasthet og heftfastheten mellom de ekstruderte betonglagene, som vist i Figur 7-15 til og med Figur 7-18.



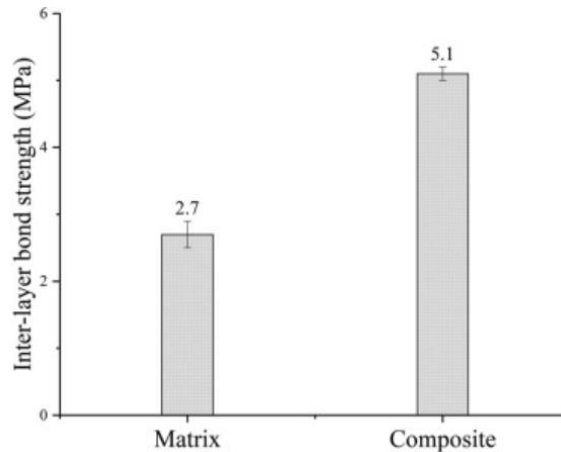
Figur 7-15: Porøsitet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].



Figur 7-16: Bulkdensitet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].



Figur 7-17: Trykkfasthet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].



Figur 7-18: Heftfasthet av UHPFRC matrix (uten fiber) og UHPFRC komposittmateriale [62].

7.3.3 Armering

Det finnes i dag flere ulike metoder for plassering/implementering av stålarmering i 3D-printerprosessen av betong [61]. Betongen armeres for å kunne ta opp strekkrefter, da betongen har neglisjerbar strekkfasthet, men høy trykkfasthet. Dessuten må bærende betongelementer som er utsatt for strekkrefter armeres i henhold til gjeldende Eurokoder. Foreløpig er det ikke utviklet en metode som automatisk plasserer armeringsnett eller armeringsstenger, men det arbeides med å utvikle en 3D-printer som kan automatisere disse prosessene [65]. Det nærmeste man kommer en automatisert prosess, er å tilsette fiberarmering i betongpastaen før den ekstruderes ut gjennom dysen. Fiberarmeringen kan bestå av ulike materialer, der de vanligste er komposittfiber med basalt eller polymer, samt stålfiber i bærende konstruksjoner, se vedlegg **B**). Ifølge Eurokode 2 er det foreløpig ikke tillatt å kun armere med fiberarmering i bærende konstruksjonsdeler, men publikasjonen NB38 tilrettelegger for at man kan bruke en kombinasjon av fiberarmering og konvensjonell kamstålarmering.

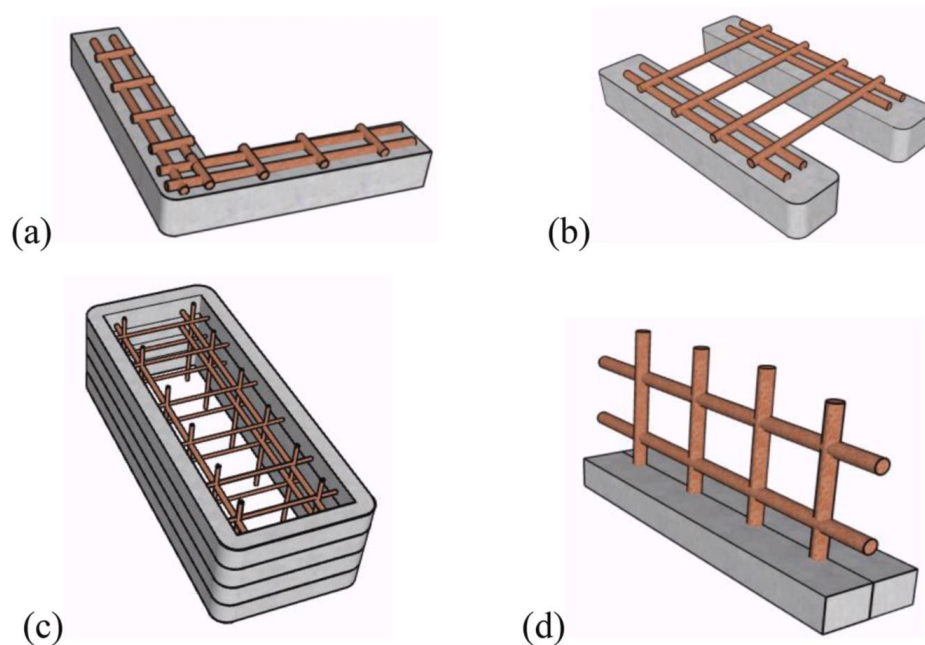
Armeringen plasseres i dag manuelt i forkant eller i ettertid av printerprosessen [65], der et formtilpasset printerhode trykker ut betongen [61]. Fire vanlige armeringsmetoder for printing av betongvegglementer er illustrert i Figur 7-19, med inndeling **(a)**, **(b)**, **(c)** og **(d)** [61].

(a): Horisontalarmering blir manuelt plassert mellom underliggende og overliggende ekstruderte betonglag, der denne fremgangsmåten gjentar seg til ønsket vegg høyde er oppnådd.

(b): Er en videreutvikling av den overnevnte armeringsmetoden, der man plasserer horisontale armeringsstenger på tvers av to betongvegger. Denne metoden forbinder og styrker strukturen til de doble trykte betongveggene.

(c): Forskning viser at 3D-printing av betongvegger ofte tar i bruk den trykte delen som et skall der armeringen plasseres i det trykte skallet/forskalingen etterfulgt av betongstøping.

(d): Den siste metoden baserer seg på å først plassere et pre-posisjonert armeringsnett i midten av underliggende betonglag. Videre benyttes et omvendt U-format printerhode for å trykke den ekstruderte betongen jevnt på begge sider av armeringsnettets.



Figur 7-19: Ulike manuelle armeringsmetoder for 3D-printing av betongvegger [61].

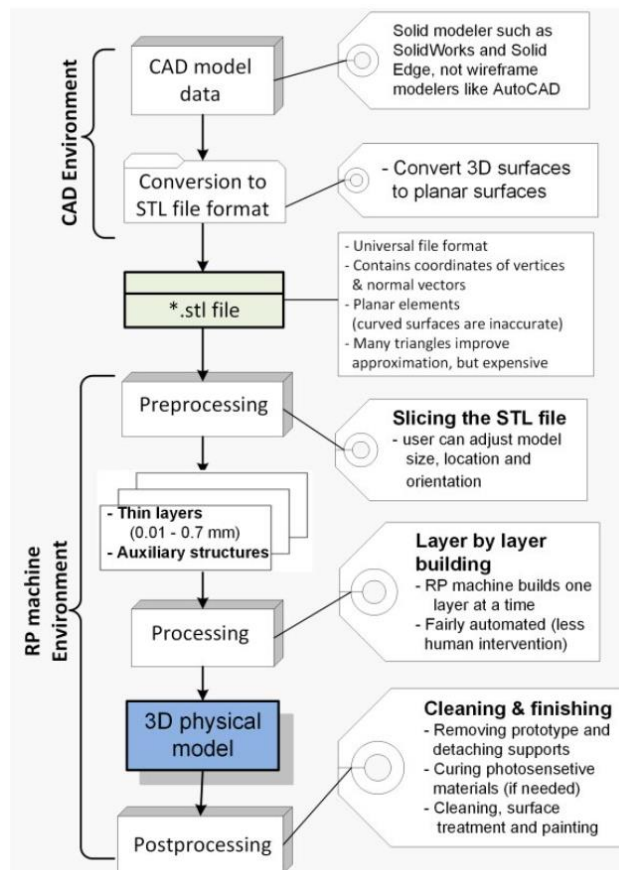
Det er i nyere tid også utviklet et 3D-printersystem som kan printe vertikale betonglag og automatisk plassere stålkabler parallelt med betonglagene [61]. Det negative med denne nyutviklingen er at bindestyrken mellom den støpte betongen og stålkablene er lavere enn for konvensjonell ribbet kamstålarmoring. Det positive er at stålkablene har høy reststrekkfasthet, som med andre ord betyr at den resterende fastheten i stålkabelarmoringen etter opprissing er betydelig motstandsdyktig. Det kan i denne sammenheng være et potensiale for å bruke denne typen automatiserte tilnærming for å armere konstruksjoner i fullskala på byggeplass.

7.4 Digitalisering

Byggebransjen stiller i bakre rekke når det kommer til utnyttelsesgraden av digitale verktøy og industrialisering av bransjen [52, 66]. Byggebransjen har historisk sett gjennom tidene båret preg av lav produktivitet, mindre prosessautomatisering og bruk av manuelle produksjonsprosesser, sammenlignet med den teknologiske utviklingen i andre bransjer [52]. Det kommer også frem at byggebransjen øker med omtrent 1% i produktivitet årlig på verdensbasis, noe som er svært lavt. Det er utfordrende å automatisere byggebransjen, da hver konstruksjon som bygges ofte er unik, og prosessene vil variere samt begrense muligheten for reproduksjon.

7.4.1 Generell designprosess for 3D-printing av betong

3D-printing av betong er en metode som gjør det mulig å automatisere prosessene i byggefasen og bruker digitale verktøy til å programmere det man ønsker å printe. Det finnes ulike programmer til digital modellering, der CAD programmer (computer-aided-design) ofte blir brukt til å lage en tegningsfil [52]. Digital modellering er eksakte digitale 3D-modeller av det man ønsker å printe. Videre må man konvertere filformatet til STL (stereolithography), som genererer 3D mesh til den innhentede geometriske datainformasjonen fra den digitale CAD modellen. STL filformatet blir videre bearbeidet av spesifikke 3D-programmer som oppstykker/splitter objektet i flere deler. Disse delene danner en ny fil som utgjør informasjonen for hvert lag. Neste steg er å konvertere den digitale modellen til leselige lister av kommandoer som 3D-printeren kan kjøre. Til slutt må tilkobling av skriver gjennom et datadelingssystem, klargjøring til 3D utskrift, og etterbehandling av 3D utskriften i form av fjerning av støttemateriale samt rengjøre og bearbeide flater gjennomføres [52]. Hele prosessen forklart ovenfor er illustrert i Figur 7-20, og tar for seg de vanligste digitale prosessene som inngår i å konvertere en digital 3D CAD modell til fysisk ferdigprintet sluttprodukt.



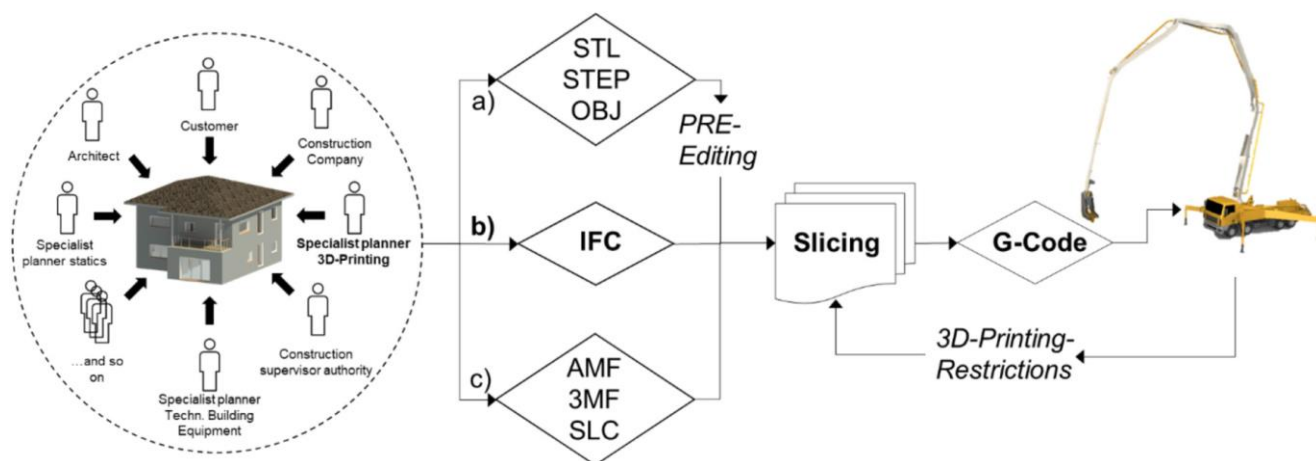
Figur 7-20: Generelle trinnvise steg fra 3D CAD modell til ferdig fysisk modell [67].

7.4.2 Bygningsinformasjonsmodellering

BygningsInformasjonsModellering (BIM) er et digitalt verktøy som brukes til å designe detaljerte visuelle 3D-modeller, og tar for seg arbeidsprosessene som skaper den digitale modellen [68]. BIM teknologien har i dag en stor brukerbase i byggeindustrien, og kan i den sammenheng kombineres med 3D-printerteknologien [22]. BIM vil kunne bidra til å automatisere byggeprosessene samt gi en mer intelligent prosess, der all informasjonen angående konstruksjonen er samlet på en felles

plattform. En slik sammenkobling vil kunne gi mindre avvik fra BIM modellen til ferdig 3D-printet bygg. Det Tekniske Universitetet i Dresden har allerede utviklet en måte å 3D-printe betong på, ved bruk av BIM teknologien [69].

Figur 7-21 tar for seg en BIM modell inkludert de involverte aktørene som utarbeider den digitale strukturen i et BIM program. I neste steg må nødvendige data for å kunne 3D-printe betongkonstruksjonen hentes ut. Deretter splittes BIM modellen opp i flere lagdeler som konverteres til det geometriske STL (stereolithography) -filformatet. De andre filformatene, som illustrert i Figur 7-21 herav kun **b)** og **c)** har potensiale til å erstatte STL-filformatet i fremtiden. Videre fremkommer det at dette ikke enda er mulig, da dagens oppsplittings programvarer ikke støtter eksportering av disse filformatene. Siste steg er konvertering til programvarspråket G-kode som automatiserer og kontrollerer printerprosessen. Det viser seg at Dresden Tekniske Universitet nå har klart å integrere den komplekse planleggingen med utførelsesprosessen av konstruksjonen.



Figur 7-21: Flere ulike typer dataprosesser med bruk av BIM [69].

7.5 Anvendbarhet og integrasjon

7.5.1 utfordringer og begrensninger

I en forskningsartikkel utarbeidet av Ramadany og Bajjou [70], fremkommer det at anvendeligheten og implementeringen av 3D-printing av betong i byggebransjen medfører utfordringer knyttet til: 3D-printerteknologi, juridiske lover, miljøaspekt, økonomiaspekt, standardisering, gjeldende byggestandarder, mekanisk styrke, betongstruktur, kvalitetskontroller, tilpasningsdyktighet og menneskelig arbeidskraft. Det viste seg at 3D-printeteknologien krever fysiske operatører til håndtering av teknologisk utstyr; i form av avanserte programmer og roboter, samt til vedlikeholdsarbeid av aktuell robot. Det ble også gjennomført en spørreundersøkelse blant 63 firmaer i byggesektoren, der flertallet svarte at 3D-printing av betong vil kunne gi miljøfordeler. Videre vil juridiske aspekter i forhold til risikofaktorer tilknyttet dataangrep på de digitale modellfilene kunne forsterkes og kreve sikkerhetstiltak. Maskindrift av 3D-printeren viser seg å være mer energikrevende, kreve ekstra spesialisert opplæring av personell og totalt sett gi høyere kostnader enn den konvensjonelle støpemetoden av betong [70].

Et mulig problem under 3D-printerprosessen er dannelse av luftlommer mellom de ekstruderte betonglagene, som vil svekke betongens mekaniske egenskaper [70]. Påvisning av geometriske modellfeil, og validering av påliteligheten gjennom blant annet materialtesting til den 3D-printede konstruksjonen mangler en felles gjeldende utarbeidelse. Andre usikkerhetsmomenter tilknyttet 3D-printing er skepsis til å ta i bruk ny teknologi, og uviss teknologikapasitet medvirker også til manglende interesse og tillit i byggebransjen. Mindre behov for menneskelig arbeidskraft, da man kun trenger personell med egnet kompetanse til å kunne operere 3D printerne og programvarene [70].

7.5.2 Standardisering

Konsulentselskapet «Boston Consulting Group» [71], gjorde lignende funn som Ramadany og Bajjou [70], der 3D-printing av betong i byggebransjen hemmes av byråkratiske faktorer som: langsom innføring av teknologien i byggeforskrifter, ingen bestemmelser for teknologien i byggestandarder og varierende nasjonale regelverk [71]. Sosiale faktorer er også her en underliggende faktor til at stabene i byggebransjen er underinformerte, tvilende til sikkerhet og levetid av 3D-printede betongkonstruksjoner. To hovedutfordringer med å utarbeide en standard for 3D-printing i byggebransjen er at det finnes mange varierte 3D-printerprosesser av betong tilpasset ulike formål. Den andre utfordringen er at teknologien bærer preg av komplekse, nyskapende og ikke standardiserte designutfordringer av strukturer, som gjør den svært krevende å standardisere [71].

7.6 Fullskala betongprinting on-site

7.6.1 Hensyn og videreutvikling for prosjektet «The BOD»

Det er essensielt å ivareta kontrollerte omgivelser under 3D-printerprosessen på byggeplass. Dette er viktig for å kunne håndtere eksterne faktorer som påvirker kvaliteten på ekstrudert betong, som blant annet: temperaturstigning i betong og vindkrefter som kan skape forskyvning i betonglag [39, 72]. Kontorhotellet innfrir også kravene og bestemmelsene i Danske og Europeiske standarder for blant annet armeringskrav og betongsertifisering [39]. Printerene som ble benyttet i prosjektet «The BOD» var en Gantry printer som kunne printe i x- og y-retning som illustrert i Figur 7-22. Figur 7-23 viser det ferdige kontorhotellet i Nordhavn. Det har i nyere tid blitt utviklet en oppgradert printerversjon av BOD kalt BOD2 som skal kunne bevege printerhode en meter i horisontalretning per sekund [73]. Med et slik utgangspunkt ville BOD kunne bli printet på kun noen få timer, da printerhastigheten til BOD kun er på 0,1 m/s.



Figur 7-22: Påbegynt printing av betongvegger [74].

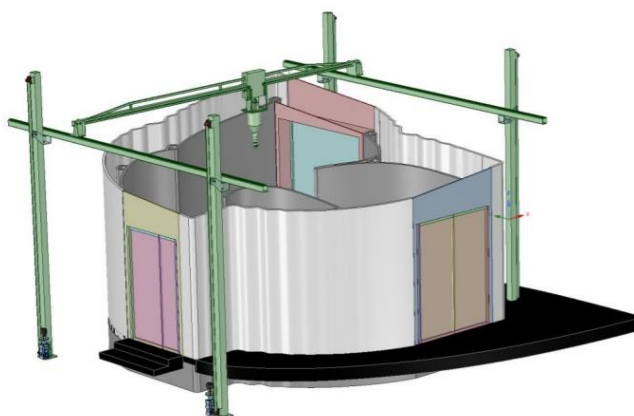


Figur 7-23: Sluttproduktet av BOD [47].

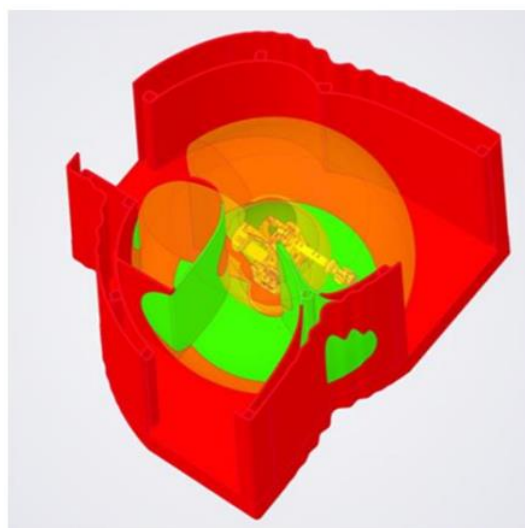
7.6.2 Betongkvalitet og printerskala «The BOD»

Det ble i forkant av prosjektet «The BOD» utført ulike tester av betongblandinger og av to småskala Gantry printere, før endelig valg av løsning ble bestemt [39]. Det viste seg at betong bestående av Sement, 0/2 mm sand, 0/4 mm grus, 0/8 mm gjenbrukt teglstein, vann, Glenium sky 631 (superplastiserende tilsetningsstoff) og polyester crackstop (polypropylen fiber) var den best mulige betongsammensetningen til printing. Den innfridde også best printerresultater med tanke på betongparameter som: flyteevne, tiksotropiske egenskaper, herdeegenskaper, synk og V/C-tall.

Printertyper som blir vurdert opp mot hverandre nedenfor, er bruk av robotarmprinter og Gantry printer. Disse typene ble benyttet i minst 80% av de undersøkte prosjektene i forskningslitteraturen som var undersøkt i prosjektet «The BOD» [39]. Gantry printeren ble i dette prosjektet benyttet fremfor en av de standard robotarmprinterne utviklet av CyBe og Xtrees, da de ofte har mindre justeringsmuligheter på rekkevidden av robotarmen som vist i Figur 7-24 og Figur 7-25. Det ble suksessfullt benyttet en Gantry printer med et printerområde på 8 x 8 meter, da printerhode kun kan bevege seg innenfor sin egen ramme. Det fremkommer også at en Gantry printer ikke har en bestemt begrensning når det kommer til maksimalt printerområde, og Quindao i Kina bygget en Gantry printer som kan printe 12 x 12 meter [39].



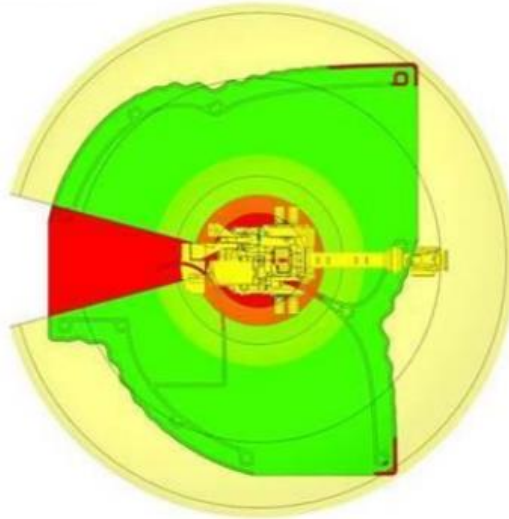
Figur 7-24: Printing av «The BOD» på 8 x 8 meter [39].



Figur 7-25: Robotarmprinting av «The BOD», rekkevidde grønt område [39].

Det finnes også andre større robotarmprintere på markedet, men selv ikke den lengste robotarmprinter som eksisterer kan alene printe «The BOD» [39]. De er også svært kostbare samt at printeren ikke kan printe hele 360 grader rundt sin egen akse, men kun 330 grader. Det fremkommer også at det vil være problematisk å plassere en robotarmprinter i sentrum av en bygning som skal oppføres. Dette skyldes at robotarmprinter ikke kan oppføre en komplett bygning i en omgang, samt ikke printe i rødt område som vist i Figur 7-26.

Det begrunnes videre i rapporten utarbeidet av Partnerskabet [39]; at disse overnevnte årsakene medfører at robotarmprintere i liten grad egner seg til 3D-printing av fullskala bygg på byggeplass, men er bedre egnet til preproduksjon av betongelementer. Det underbygges også av at selskaper som CyBe og Xtreee så langt har begrenset seg til kun å produsere 3D-printede enkeltelementer/enkeltkomponenter, som blant annet betongsøyler eller betongelementer som printes og monteres på byggeplass.



Figur 7-26: Robotarmprinter kan ikke printe i rødt område [39].

7.6.3 Armeringsmetode «The BOD»

I fullskalaprojektet «The BOD» [39], ble det benyttet en kombinasjon av fiberarmering i betongblandingen, samt manuell plassering av den konvensjonelle armering i veggstrukturen. Fiberarmeringen var av typen polypropylenfiber som forhindret uttørkingssvinn og autogensvinn i betongen, mens den konvensjonelle armeringen ble montert manuelt av utførende fagarbeidere. Den anvendte konvensjonelle armeringen var av typen armeringsbur, samt bindetråder i stål til å forankre innervegg med yttervegg og sikre stabilitet under betongprint. Det viste seg også at svinnriss kan unngås med å tilsette polyesterfiber.

7.7 Prefabrikkerte- og produserte elementer

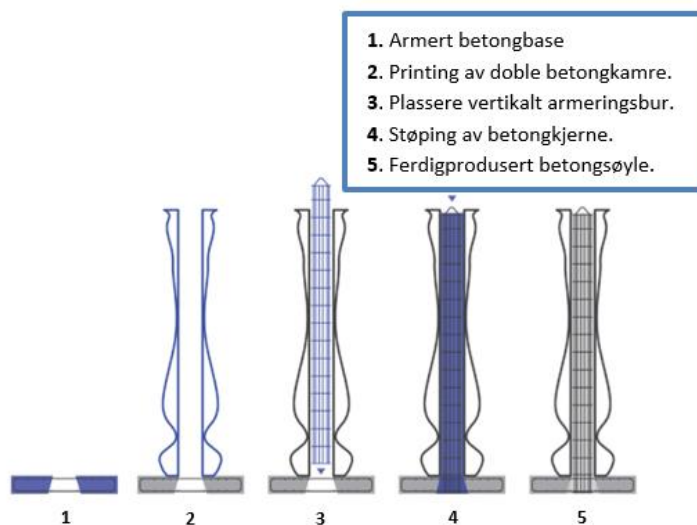
En større andel av byggeindustrien benytter seg av prefabrikkerte betongelementer som: veggelementer, bjelker, søyler og betongdekker/etasjeskillere, da dette resulterer i en hurtig, plassbesparende og kvalitetssikker byggemetode [75]. Produksjonen av prefabrikkerte betongelementer oppsto i Norge på 1950 tallet. Produksjonen av slike prefabrikkerte betongelementer står for cirka 15 % av sementforbruket i Norge. Prefabrikasjon av betongelementer foregår i kontrollerte omgivelser, ved bruk av kalibrerte og presise maskiner som samlet oppnår høyere kvalitetskontroll av produktet som produseres enn ved byggeplass-løsninger, samt mer kvalitetssikkert arbeidsmiljø og herdemiljø [76]. Høyere produksjonskvalitet, skyldes at produktet kan

masseproduseres i delvis automatiserte prefabrikasjonsanlegg og oppnå tilnærmet samme foretrukne produktkvalitet hver gang. Prefabrikkerte betongelementer produseres på fabrikk, for så å transporteres og monteres på byggeplass [75]. Transporten av disse elementene foregår ved hjelp av semitrailere, som videre blir montert på byggeplass ved bruk av kranbil. Prefabrikasjon viser seg i dag å være en av de beste strategiene for gjennomføring av geometrisk kompleksitet i byggeprosjekter [76]. Prefabrikasjon foregår ofte ved hjelp av støpeformer som kan gjenbrukes, og regnes ikke som en form for direkte 3D-printing, men er fortsatt relevant å sammenligne.

Seks masterstudenter på ETH Zurich med fordypning innen arkitektur og digital fabrikasjon utviklet sammen med forsker Ana Anton ni unike 3D-printede betongsøyler [77]. Den spektakulære utformingen av betongsøylene ble 3D-printet med ekstruderings metoden ved hjelp av en tre-akset robot som vist i Figur 7-27. Betongsøylene målte en høyde på 2,7 meter og suksessraten for vellykket printing var på omtrent 75%. Fabrikasjonen og designet av betongsøylene hadde en varighet på totalt fem uker. Siste uka i prosjektfasen inkluderte støpning rundt den manuelt plasserte armeringen for dannelsen av solide betongkjerner i søylene, samt stålkrok i toppen av søylen for kraning og transport til byggeplassen. Figur 7-28 illustrerer de ulike byggetrinnene for utarbeidelsen av betongsøylene. Da de prefabrikkerte betongsøylene er mulig å printe i kontrollerte omgivelser, vil det også tilrettelegge for å kunne printe preproduserte elementer på byggeplass [77].



Figur 7-27: Printing av betongsøyler [77].



Figur 7-28: Byggetrinn for produksjon av betongsøylar [77].

Preproduksjon skjer på byggeplass eller en annen nærliggende lokasjon. Det Nederlandske firma CyBe produserer preproduserte 3D-printede betongveggelementer på byggeplass [78], som vist i Figur 7-29 og Figur 7-30. Denne mobile robotarmprinteren baserer seg på ekstruderingsmetoden og kan være ideell å bruke til å printe preproduserte betongelementer til konstruksjoner på byggeplass.



Figur 7-29: Preprodusert 3D-printet betongelement på byggeplass [78].



Figur 7-30: Ferdig preprodusert 3D-print av betongvegger på byggeplass [76].

7.7.2 Preprodusert 3D-printet utleiehus i Bosrijk, Nederland

I en artikkel skrevet av Overbeeke [79], fremkommer det at ett av totalt fem 3D-printede utleiehus i betong er gjennomført i 3D-printerprosjektet «Milestone». Det ble benyttet en seks-akset-robotarm til å 3D-printe betongelementene i en industrihall [80]. Huset bestod totalt av 24 betongelementer som ble 3D-printet i nærhet til byggeplass og fraktet med lastebil til tomten i Bosrijk [81]. Betongelementene ble videre installert og fastmontert på betongfundamentet, samt forsynt med tak-, vindus-, dørdeler og isolasjonsmateriale [79]. Eindhoven Teknologiske Universitet og en rekke andre aktører med relevant spesialkompetanse fra byggeprosjekter samarbeidet i prosjektet «Milestone» [79], hvor hovedmålet med prosjektet var å opparbeide praktisk kompetanse på fagfeltet og bidra til å ekspandere produksjonen av 3D-printede hus [81].

Huset overholdt alle de teknisk gjeldende Nederlandske byggekravene, og innfrir kravene til komfort og energieffektivitet med en U-verdi på 0,25 W/m²K [79]. Huset er bygget på ett plan med et bruksareal på 94 kvadratmeter som inneholder kjøkken og spisestue i ett, samt to soverom og ett bad [81]. Bygget er utformet steinaktig med hensyn på den landlige beliggenheten, som illustrert i Figur 7-31, og skal demonstrere formfrihetsmulighetene 3D-printing av betong muliggjør [79]. 3D-printerprosessen av huset tok totalt fem dager og viser seg å kunne være hurtigere å ferdigstille enn tilsvarende konvensjonelle hus [80].

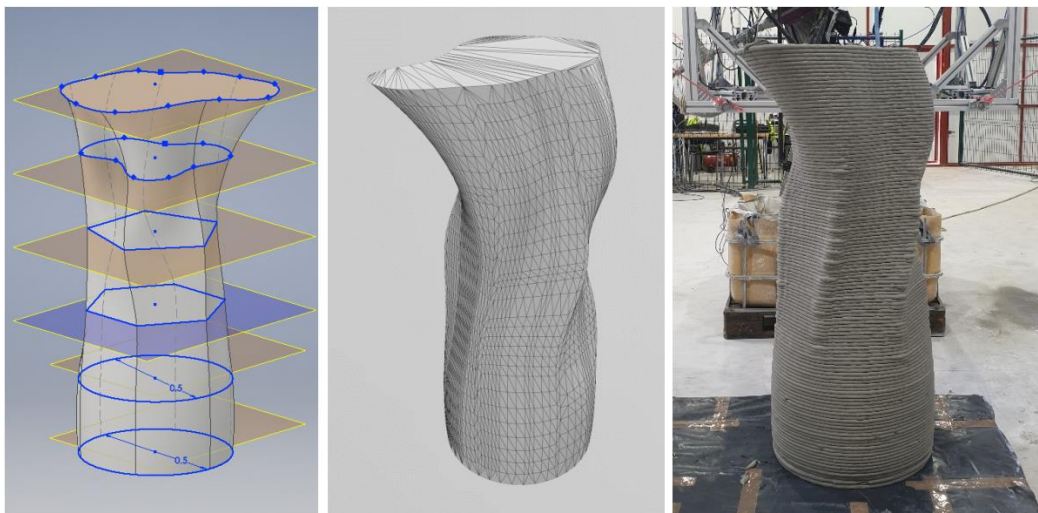


Figur 7-31: Utformingen av husprosjektet «Milestone» [81].

7.8 Kabelopphegt printerløsning (Cable robot)

I forskningsprosjektet «HINDCON» med oppstart i 2016 [82], har de klart ved bruk av en kabelopphegt prototypeprinterløsning å 3D-printe en betongstøyle som vist i Figur 7-32. Bygningsdeler som vegg, trapp, tak, samt strukturelle betonegenskaper som her inkluderer skjøter og koordinasjon, ble analysert med hensyn på de ulike 3D-printerprosessene. Videre ble de alternative 3D-printermulighetene evaluert, som vist i Tabell 7-1, på en skala fra 1-3 der førstnevnte var best og sistnevnte fikk dårligste score. 3D-printeren fra HINDCON er ikke realisert på markedet enda, men prosjektet har som mål å utvikle og demonstrere 3D-printing av betong i byggebransjen [22]. Parameterne som ble vektlagt i utvelgelsen av 3D-printet bygningsdel var følgende [82]:

- **Popular:** Produktet finnes i konvensjonelle bygninger
- **Complexity:** Utfordrende fabrikasjon
- **Cost:** Kjøpskostnad
- **Coordination:** Relasjonsbehov mellom ulike aktører
- **Materials:** Krevende tilpasningsprosess/materialutviklingsprosess for 3D-printing av betong
- **Geometry:** kompleksitetsgrad til geometriutformingen



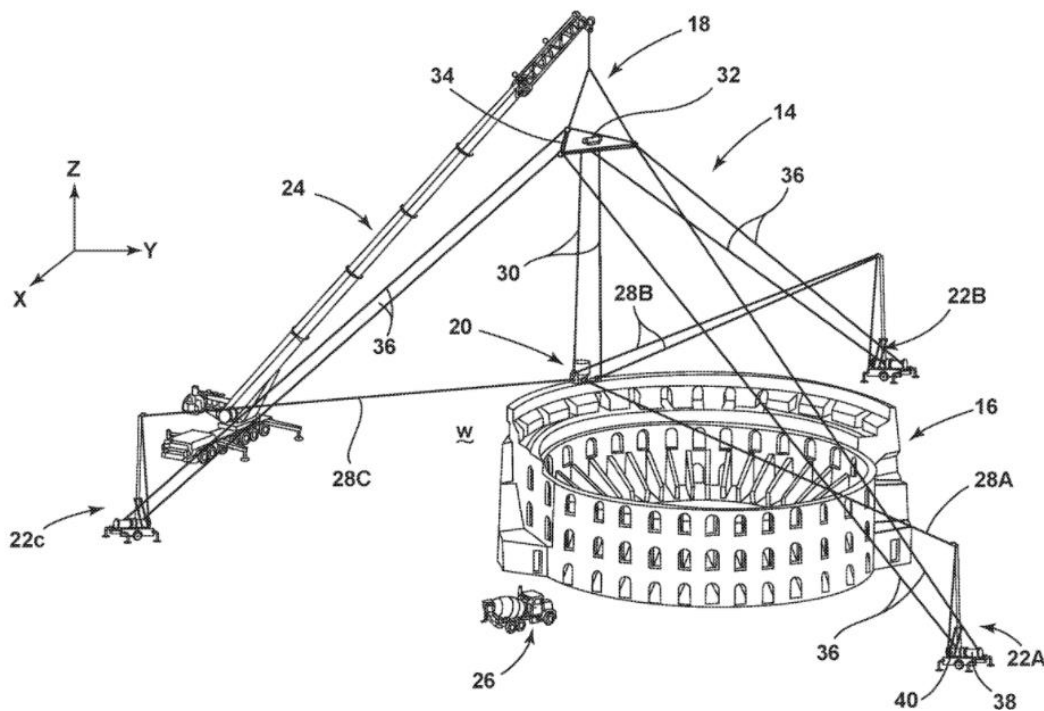
Figur 7-32: 3D-printet betongsøyle utviklet av HINDCON [82].

Tabell 7-1: Evalueringsgrunnlag for utvelgelse av bygningsdel som skulle 3D-printes i betong [82].

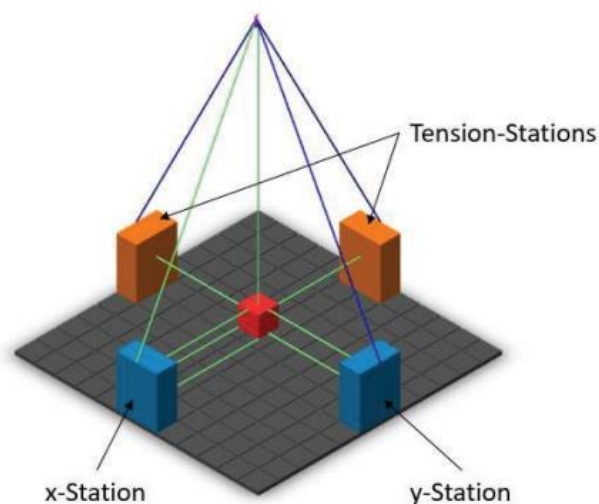
		popular	complexity	cost	coordination	materials	geometry
1.	WALL						
1.1.	Entrance						
1.1.1.	Outside	2	2	2	2	2	1
1.1.2.	Inside	3	1	1	2	2	1
1.2.	Technical						
1.2.1.	Outside	2	2	3	3	3	2
1.2.2.	Inside	3	1	1	2	2	1
1.3.	Lattice						
1.3.1.	Outside	2	3	2	2	2	3
1.3.2.	Inside	1	1	1	1	1	2
1.4.	Organic						
1.4.1.	Outside	1	3	2	2	2	3
1.4.2.	Inside	1	1	1	2	1	2
2.	STAIR						
2.1.	Outside	2	3	3	3	2	2
2.2.	Inside	3	3	3	3	2	1
3.	ROOF						
3.1.	Parts	3	2	3	2	2	1
3.2.	Ceiling floor	2	1	1	1	1	1
3.3.	Joints	2	2	2	2	2	2
4.	STRUCTURAL						
4.1.	Joints	2	3	3	2	3	3
4.2.	Coordination	2	3	2	2	3	2

7.8.2 Sky Big Area Additive Manufacturing

I en forskningsstudie utført ved Oak Ridge laboratoriet i USA [83], arbeides det med å utvikle en kabelopphegt printerløsning som kan benyttes til automatisert fullskala 3D-printing av betong på byggeplass, som illustrert i Figur 7-33. Det kabelopphegte printersystemet «Sky Big Area Additive Manufacturing» skal være brukervennlig, og i hovedsak bestå av konvensjonelt utstyr som finnes i byggebransjen. Forkortet heter printersystemet «SkyBAAM», og er kabeldrevet av fire basestasjoner med felles toppunktforankring i en enkelt mobilkran der printerhode sitter [84]. Basestasjonene sørger for stabilitet og nøyaktig koordinasjon av printerhode [85]. To av de blåfargede basestasjonene vist i Figur 7-34, er servostyrt av en motordrevet opprullingstrummel, der den ene kontrollerer bevegelse i x-retning og den andre kontrollerer bevegelse i y- og z-retning. SkyBAAM-systemet består totalt av åtte stålkabler eller nylontau tilkoblet printerhode, som vist i Figur 7-34, der de to resterende strekkablene går ut fra hver sin oransjefargede basestasjon [85].



Figur 7-33: Kabelopphegt printerløsning til 3D-printing av betong on-site [84].



Figur 7-34: Oversikt kabelkonfigurasjoner SkyBAAM-systemet [85].

En prototype av SkyBAAM-systemet har vellykket blitt utviklet, testet og bygget innendørs i laboratoriet til Oak Ridge [85]. Det foreløpig største 3D-printede objektet gjennomført av prototypen til SkyBAAM er vist i Figur 7-35, og tok totalt tre dager å 3D-printe. I motsetning til Gantry-printere fremkommer det at SkyBAAM-systemet vil kunne være enklere å montere og transportere da det har et kompakt mekanisk fotavtrykk i forhold til byggevolum.



Figur 7-35: Største 3D-printede objekt utført av «SkyBAAM» [85].

7.9 Muligheter innenfor design

7.9.2 Topologioptimalisering

Topologioptimalisering er en prosess som optimaliserer materialoppsett og struktur innenfor et gitt geometrisk 3D rom basert på faktorer og forhold definert av designer [86]. Topologien til et element kan bli definert som egenskapene til geometriske konfigurasjoner som punktsett, forblir uendret av elastiske deformasjoner som vridning eller strekking. Fysisk eksempel på denne prosessen er illustrert forenklet ved Figur 7-36. Målet ved bruk av topologioptimalisering er å maksimere objekters avveining mellom styrke og mengde materialer som forbrukes. Dette blir gjennomført ved hjelp av matematiske beregninger for modellering, og for å optimalisere faktorer som «eksterne krefter, lastsituasjoner, grensebetingelser, innspenninger og materialegenskaper innenfor det geometriske 3D-området. For konvensjonell topologioptimalisering blir «Finite Element Analysis» (FEA) anvendt for å evaluere ulike design som kan oppnå ønskede egenskaper [86].

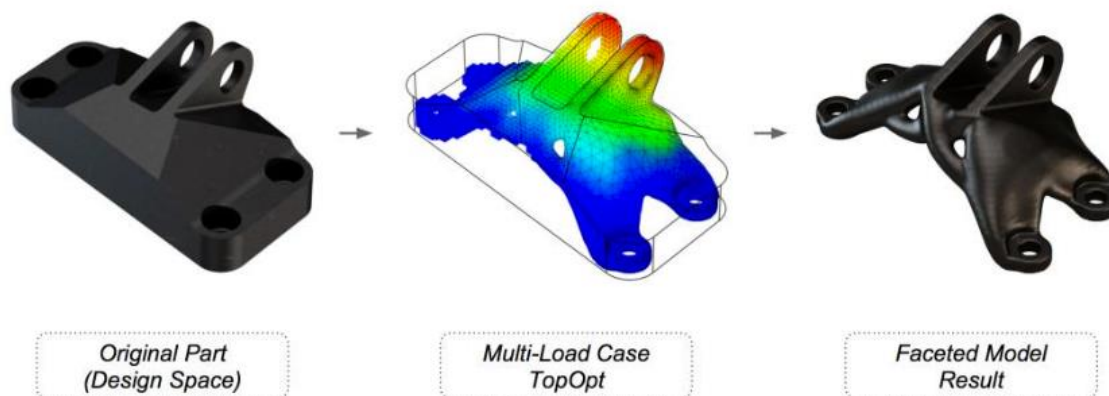


Figur 7-36: Illustrasjon av topologioptimalisering som konsept [86].

Eksempler på egenskaper og objektiv kan være [86]:

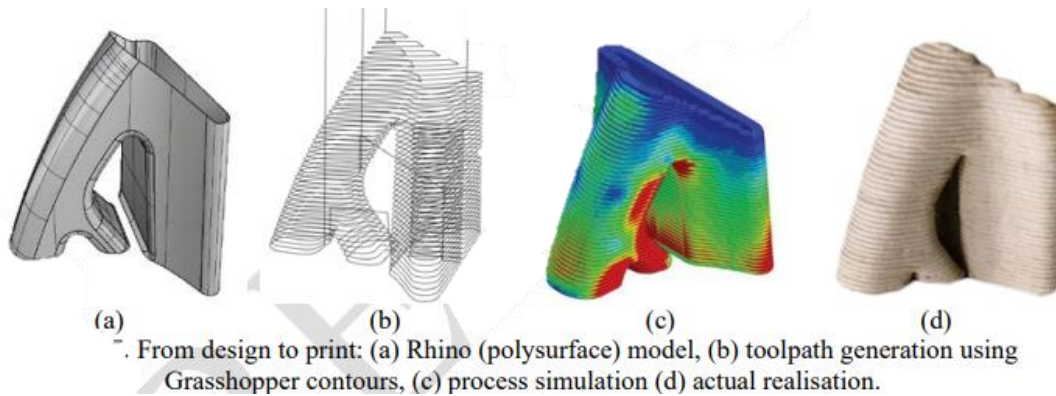
- Redusert stivhet i forhold til vekt
- Bedre belastingskapasitet i forhold til vekt
- Redusert volum per sikkerhetsfaktor
- Naturlig forhold mellom frekvens og vekt

Topologioptimalisering har et vidt spektrum av bruksområder innenfor flere industrier. Det blir mest anvendt i designfasen av nye produkt, for å optimalisere stivhet i forhold til vekt. Optimaliseringen resulterer ofte i design og former som er vanskelig å produsere ved tradisjonelle produksjonsmetoder. Ved hjelp av dagens fremmarsj av teknologier for additiv tilvirkning eller 3D-printing, åpner dette nye muligheter for produksjon og bruk av topologioptimaliserte objekter og elementer. Figur 7-37 viser det originale objektet som også definerer designrammene i 3D rommet. Figuren illustrerer endring i geometri gjennom et forløp av FEA analysering og deretter optimalisering. [86]



Figur 7-37: Endring av fysisk design etter FEM-analyse [80].

Proseduren for topologioptimalisering har definerte steg. Først etablerer designeren de geometriske designrammene i 3D rommet [86]. Videre defineres eksterne forhold som laster, grenseforhold, innspenninger og materialegenskaper. På dette stadiet blir fastpunkt og «keep out areas» også definert, der «keep out areas» er områder som må opprettholdes som de er. FEA blir deretter anvendt for å vurdere minimum geometrisk designomhylling, og bryter deretter ned designrommet i mindre områder som påførte belastningspunkter, monteringssteder og begrensede områder [86]. Topologioptimalisering skaper så et grunnleggende mesh innenfor dette geometriske området ved bruk av FEA. Analysen evaluerer nettets spenningsfordeling og tøyning for å finne den gunstige belastningen hvert element kan tolerere. Deretter anvendes optimaliseringsprogrammet for å legge press på designet fra ulike vinkler, og produserer et estimat av profilets strukturelle integritet. I den endelige fasen blir hver «finite element» testet for stivhet, utmatting, spenning, avbøying opp mot de forhåndsdefinerte kravene for å finne overflødig material. Programvaren knytter deretter FEA elementene sammen til et sammenhengende endelig design [86], hvor denne stegvise designprosessen er vist i Figur 7-38.

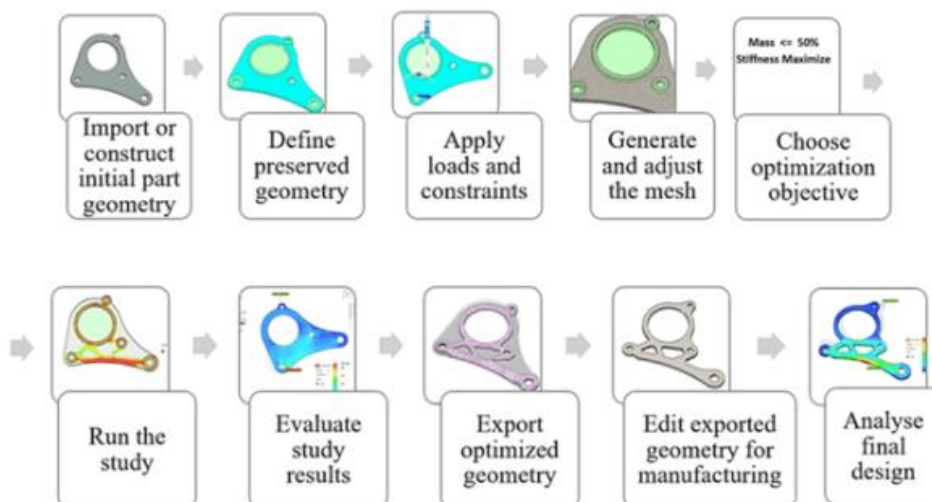


Figur 7-38 Illustrering av stegvis design prosess [87].

7.9.3 Topologioptimalisering i CAD

Figur 7-39 illustrer en stegvis prosess for enkel topologioptimalisering i CAD [86]. Disse stegene består av:

1. **Innledende del-geometridesign** – Brukeren lager en delramme eller et designrom.
2. **Definer bevarte geometriområder** – Her definerer brukeren noen av de kritiske områdene for montering som må bli bevart.
3. **Definer belastninger, begrensninger og materiale** – På dette stadiet definerer brukeren belastninger og begrensninger. Her blir delen også tildelt materiale og dets egenskaper.
4. **Generer og avgrens mesh** – Definerer og avgrensing av meshing. Dette er et av de mest kritiske trinnene i topologioptimalisering.
5. **Velg optimaliseringsmål** – Bestem deg og velg formålet med optimaliseringen.
6. **Kjør topologioptimalisering** – Programvare overtar og analyserer delen.
7. **Evaluer resultatene** – Evaluer resultatene, men endre nivåene for å identifisere nøkkelområdene som FEA har fremhevet som kritiske.
8. **Eksporter optimalisert geometri** – Eksportering av evaluert geometri.
9. **Rediger eksportert geometri** – for å tilpasse geometrien for produksjon.
10. **Analysering** - av endelig design.

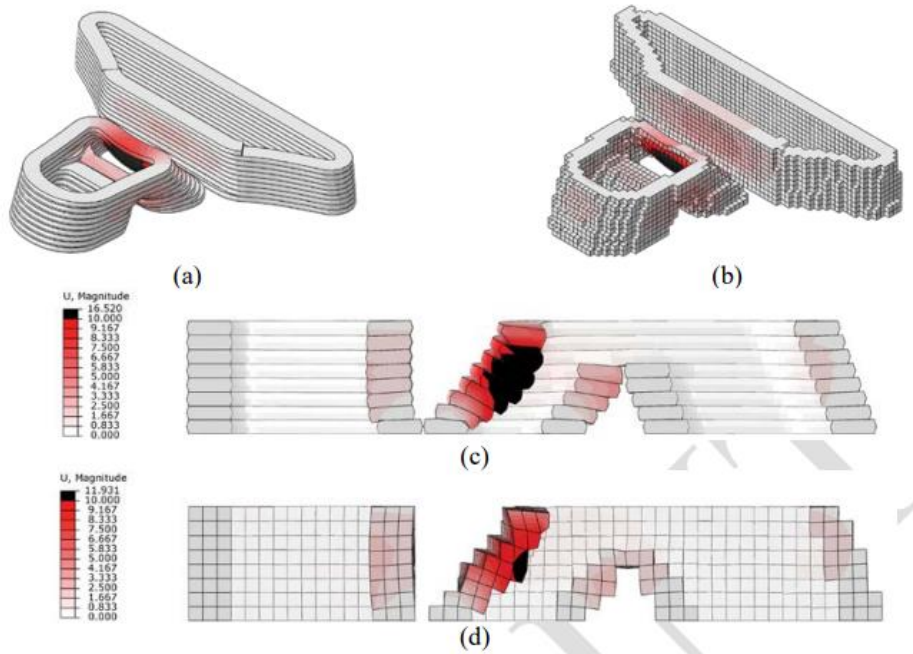


Figur 7-39: Stegvis topologioptimaliserings prosess [86].

7.9.4 Topologioptimalisering og 3D-printing

I denne rapporten blir det sett på metoder for å analysere en 3D-printet struktur som bygger på FEM eller «finite element method». Det er tidligere foreslått modeller for analysing av 3D-printede konstruksjoner [87]. Blant disse har Suiker [88] foreslått en mekanistisk modell for å analysere og optimere printing av rette veggstrukturer. Modellen til Suiker skiller mellom to sviktemekanismer: plastisk kollaps i nederste printelag, og elastisk knekking av den globale strukturen. Resultater fra denne metoden viste god sammenligning med utførte lab-eksperimenter, men modellen er ikke egnet for friere og alternative former for 3D-modeller [87]. En alternativ metode er presentert av Roussel [89], hvor analytiske ligninger beskriver de reologiske kravene til printbare konstruksjoner. I denne rapporten blir grensesnittstyrken for lagene diskutert, samt styrken og stabiliteten til det første laget og generell stabilitet for knekking. Denne metoden gir også gode estimater for bygghøyden til 3D-printede konstruksjoner, men kan igjen ikke bli anvendt for alle kompliserte og buede former.

Wolfs et al. [90], var de første som foreslo å anvende en FE-modell for å analysere den mekaniske oppførelsen til 3D-printet betong i fersk tilstand, se eksempel Figur 7-40 Her importeres den virtuelle 3D-modellen av designet, hvor en statisk/implisitt løsningsmekanisme blir anvendt for å fremstille styrke estimater. Denne modellen blir først delt inn i utskrivbare lag, som illustrert tidligere i Figur 3-1, hvor disse lagene deretter blir lagt oppå hverandre inntil fullføring eller svikt. Tidsavhengige materialegenskaper blir så implementert i et Mohr-Coulomb sviktkriterium, hvor det blir sett på lineær stress-belastning og oppførelse opp mot svikt. Ved bruk av forbedrede materialkarakteriserings metoder beskrevet i Wolfs et al. [91], kan modellen produsere realistiske estimater. Disse estimatene kan ses som en 15 prosent overestimering av det totale antallet printede betonglag, sammenlignet med eksperimentelle resultater for en fem meter lang veggstruktur. Da denne metoden er bedre egnet for frie former og komplekse geometrier, er det ikke presenter noen konkrete eksempler på printede konstruksjoner av denne typen i artikkelen. I tillegg gir artikkelen rom for ytterligere numeriske forbedringer [87].



Figur 7-40: Elastisk knekking ved 3D-printe simulering [87].

Strukturell topologioptimalisering kan bli sett på som en prosedyre for å optimalisere den topologiske oppbygningen av materialet innenfor et design, for å eliminere unødvendig materialvolum [92]. Vantghem et al. [87], har gjennomført en situasjons studie ved Ghent University, hvor de har fremstilt og produsert en topologioptimalisert bjelke fra start til slutt ved hjelp av FEM-analyse. Studien baserer seg på et dragerdesign beskrevet i av Vantghem et al. [93] som vist i Figur 7-41.



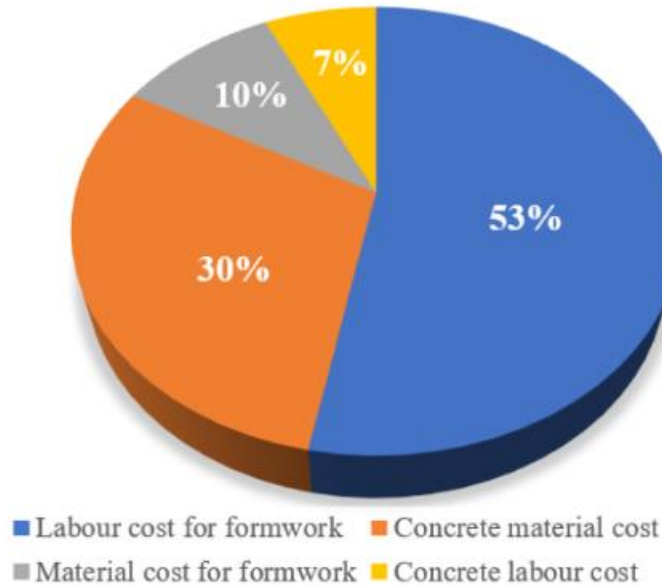
Figur 7-41: Topologioptimalisert drager [87].

7.10 3D-printing og økonomi

Bedrifter i byggebransjen er som i andre bransjer opptatt av å skaffe seg innovasjonsfortrinn i forhold til konkurrentene. Bedrifter med høy innovasjon og tilpasningsdyktighet er de som utkonkurrer konkurrentene og vil bli ledende innen bransjen fremover. 3D-printing av konstruksjoner er en av disse innovative teknologiene som blir utforsket og tatt i bruk.

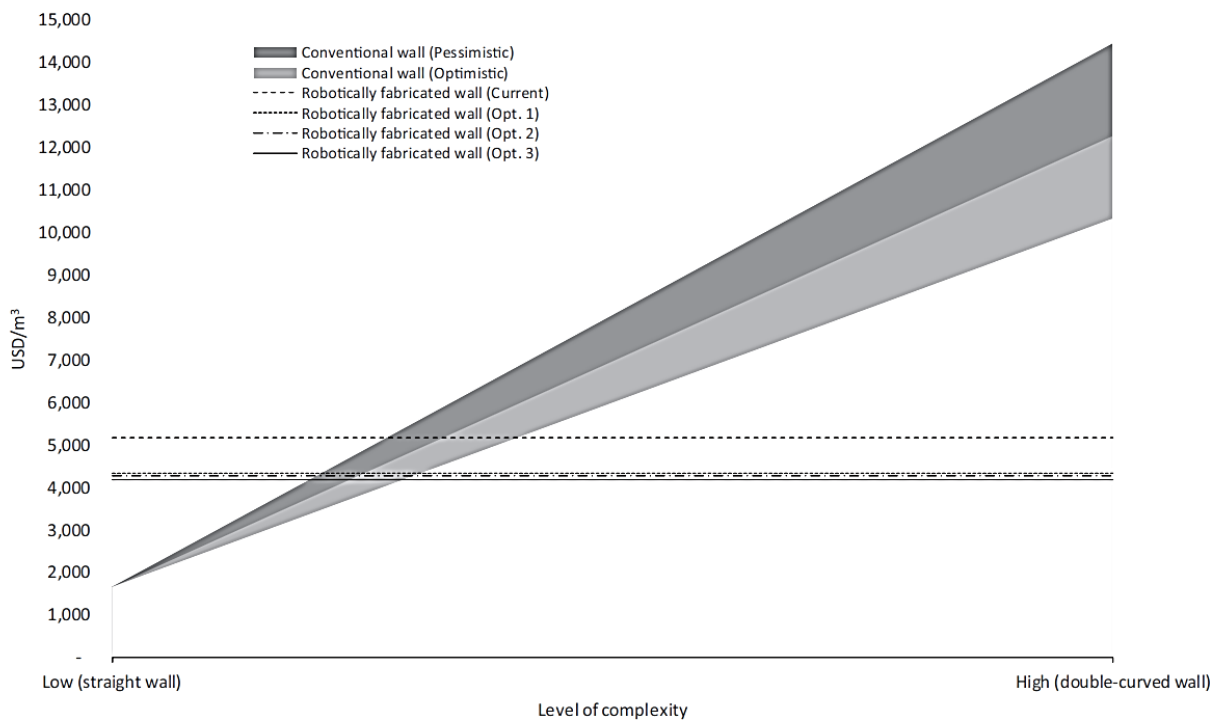
Wu et al. [94], har ved Curtin University i Australia utført en studie hvor de tar et kritisk blikk på bruken av 3D-printing i byggebransjen. Et av områdene som blir analysert i denne studien er bruk av LCC eller «Life cycle costing» for å undersøke det økonomiske perspektivet av 3D-printing. LCC tilsvarer en livssyklus kostnad, og omfatter alle kostnader tilknyttet et bygg gjennom den totale konstruksjonslevetiden [95]. Anvendelse av LCC gir oversikt over totale kostnader forbundet mot en investering, og vil sammen med «Life cycle analysis» (LCA) være en effektiv metode for å sammenligne konstruksjonsalternativer som utgjør samme nytteverdi. De tre anerkjente utgiftskategoriene i et byggeprosjekt er arbeidskraft, materialer og utstyr [96]. Buswell et al. [96], forklarer at et mulighetsområde for økonomisk gevinst for denne teknologien ligger blant annet i sparing av arbeidskraft gjennom produksjonen, da denne prosessen blir nesten helautomatisert. Ettersom 3D-printere har stor kapasitet til å printe komplekse former på lik linje med vanlige former, vil dette også gi besparelser ved printing av slike komplekse og kompliserte strukturer [96]. De overnevnte designmulighetene og muligheter for topologi-optimalisering er også store økonomiske pådrivere for denne teknologien som nevnt i intervju med AF-gruppen 7.12.1. Topologi-optimalisering kan gi slankere konstruksjoner, som man da ved hjelp av 3D-printing kan produsere på en effektiv måte, som er uopnåelig for tradisjonelle byggemetoder.

Andre økonomiske fordeler ved 3D-printing kan også være at en vil redusere eller fjerne behovet for forskalingslementer [97]. Weng et al. [98] rapporterte også at en kunne redusere totale byggekostnader for konstruksjoner opp mot 25% sammenlignet med prefabrikkerte strukturer. Disse besparelsene hevdes det at primært skal komme på grunn av forskalingsbesparelser. Figur 7-42 viser kostnadsfordelingen knyttet til ulike aktiviteter på et generelt byggeprosjekt, hvor en kan se at mer enn 50 % av totalkostnaden knyttes direkte til forskaling og arbeidskraft [97].



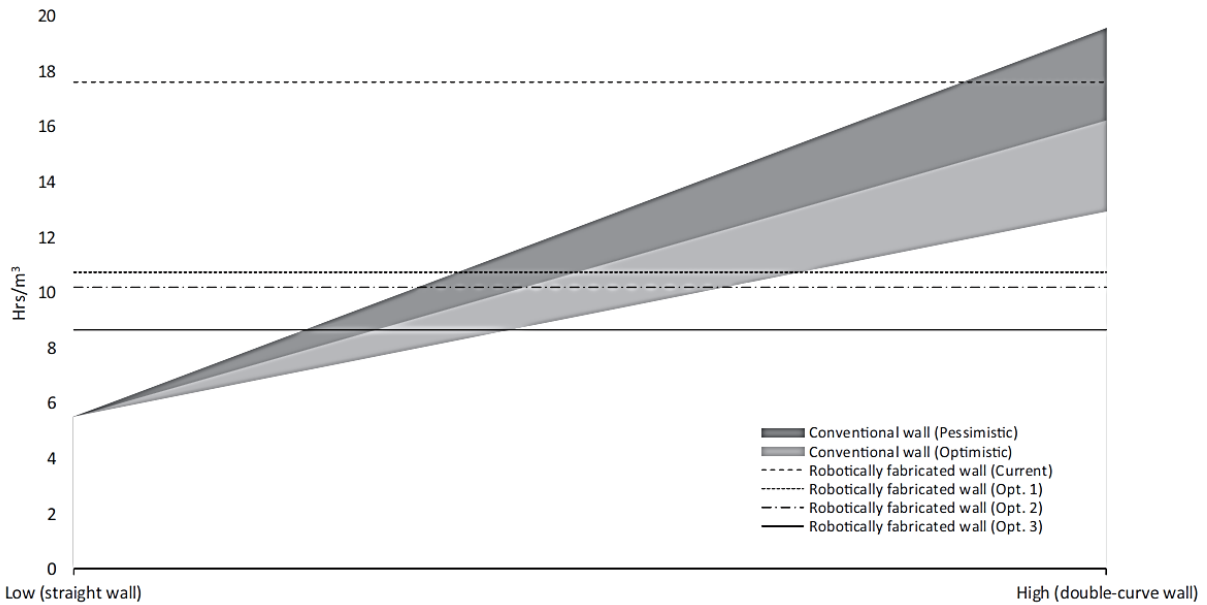
Figur 7-42: Kostnadsfordeling for byggeaktiviteter [97].

På den andre siden kan 3D-printing resultere i større material- og maskinkostnader enn ved konvensjonelle metoder. Soto et al. [99] har undersøkt de økonomiske fordelene ved 3D-printing av en betongvegg, sammenlignet med en vegg bygget ved konvensjonell metode. Resultatet fra denne studien er oppsummert nedenfor. Figur 7-43 illustrerer en kostnadsanalyse for ulike nivåer av kompleksitet for en betongvegg. Her viser resultatene en kost per kubikkmeter (USD/m³) for konvensjonell metode printet øker i takt med kompleksiteten, mens produktiviteten til de 3D-printene alternativene forblir konstant.



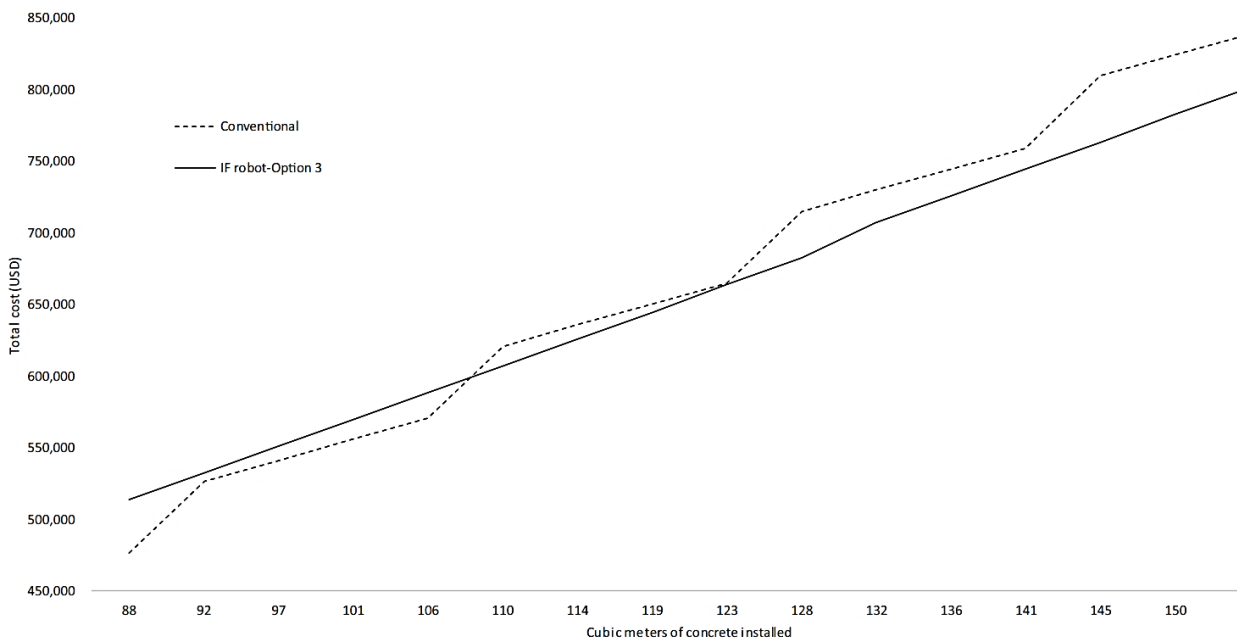
Figur 7-43: Kostnad for ulike nivåer av kompleksitet for en betongvegg ved bruk av konvensjonell konstruksjon og robotproduksjon [99].

Figur 7-44 illustrerer en produktivitetsanalyse for ulike nivåer av kompleksitet for en betongvegg. Her viser resultatene en at timer per bygge volum (Hrs/m³) øker i takt med kompleksiteten, mens kostnaden for de 3D-printene alternativene forblir konstant.

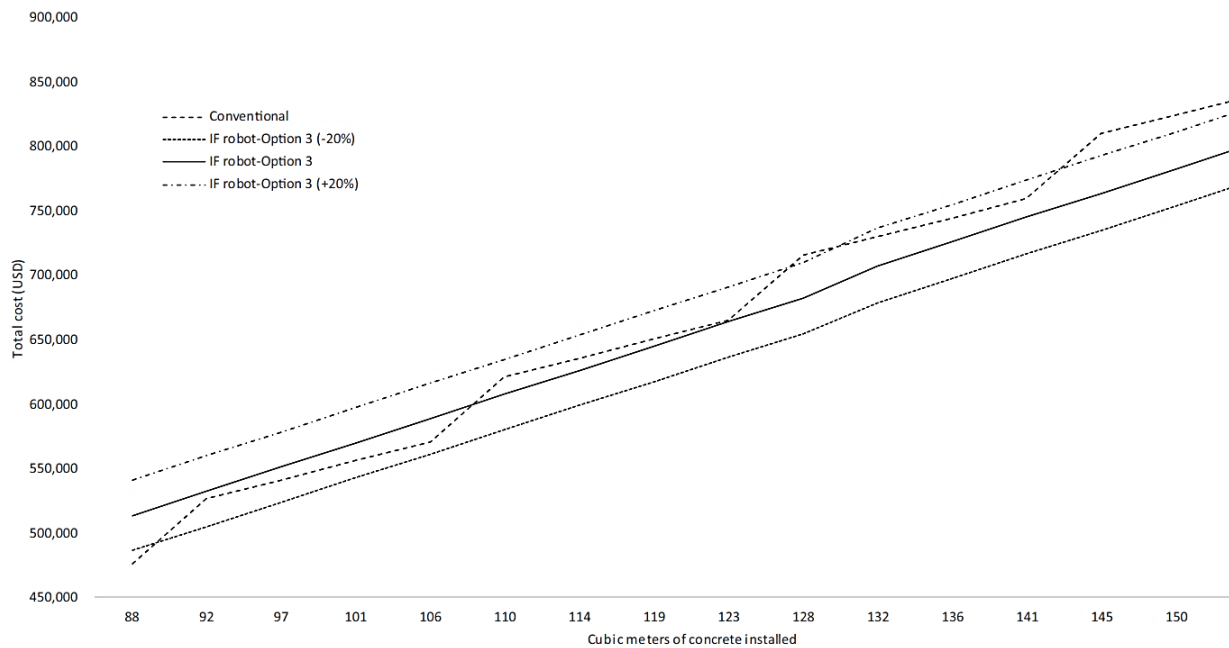


Figur 7-44: Produktivitet (h/m³) for ulike nivåer av kompleksitet for en betongvegg ved bruk av konvensjonell konstruksjon og robotproduksjon [99].

Figur 7-45 og Figur 7-46 illustrerer her en «Break-even» analyse mellom de undersøkte byggemetodene, hvor Figur 7-46 inkluderer en usikkerhet om robotkostnad på +20 %. Her viser resultatene av analysen at det må produseres og installeres over en bestemt mengde kubikkmeter betong for at teknologien skal komme frem som et bedre økonomisk alternativ enn konvensjonell metode.



Figur 7-45: «Break-even» analyse mellom konvensjonell og 3d-printet [99].



Figur 7-46: «Break-even» analyse mellom konvensjonell og robotarm printer per kubikkmeter betong printet, med ±20 % fluktuasjon i robotkostnad [99].

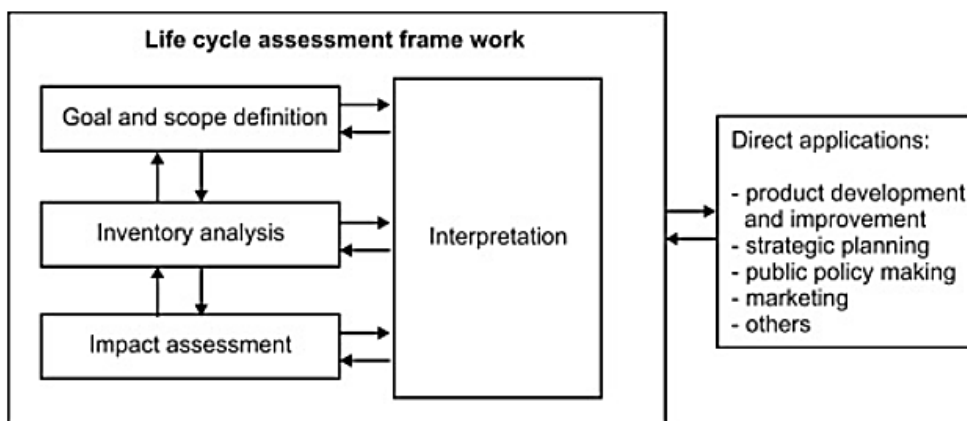
Det kunne deretter rapporteres at store forskjeller ved kostnadseffektiviteten og produktiviteten kunne bare observeres og være fremtredende dersom veggstrukturen var av det komplekse slaget [99].

Videre viser Wu et al. [94], til at en mangel på empiriske studier av relevante prosjekter gjør det vanskelig å konstatere økonomiske fordeler av 3D-printede konstruksjoner gjennom et helt livsløp. På den ene siden kan materialkostnadene for 3D-printede konstruksjoner være lavere enn for konvensjonell konstruksjon på grunn av topologioptimalisering, unngåelse av overprosjektering og reduksjon av avfallsmateriale [100]. På en annen side kan de økonomiske utgiftene også være høyere, på grunn av bruk av dyre, veldig fine tilsetninger som nano-leire, nano-silika og spesielle kjemiske tilsetninger i betong mixen [100].

7.11 3D-printing og miljø

Bygninger er ansvarlig for betydelige miljøbelastninger, og forbruker 48% av den produserte energien globalt på årsbasis [101]. I tillegg til utnyttelse av materialer, står også produksjon av byggematerialer og driftsarbeid ansvarlig for 38 % av verdensomspennende klimagassutslipp. 3D-printing er en nylig adoptert teknologi i byggebransjen som fortsatt er under utvikling. Denne teknikken søker å forbedre både det økonomiske-, men også miljøaspektet for konstruksjoner. Økende urbanisering gir en økende etterspørsel for boliger, noe som produktiviteten i bransjen sliter med å etterkomme [101]. Det er estimert at etterspørselen på boligareal vil nå 230 milliard m² i løpet av de neste 40 årene [101]. 3D-printing av boliger har derfor blitt presentert som et svar på denne etterspørselen. Ved hjelp av 3D-printerteknologien; vil det være mulig å redusere arbeidskraft, samt produsere materialeeffektive boliger som fortsatt vil kunne medføre fleksible design og inneha personlig preg.

«Life cycle analysis» eller LCA er en teknikk for vurdering av miljøaspektene til et produkt gjennom hele levetiden til produktet [102]. LCA blir anvendt både for å lage en miljøprofil for et produkt, men også for sammenligning av produktalternativer og prosjektløsninger. En LCA studie består av fire stadier i henhold til ISO 14040 retningslinjer [102]. Det første stadiet kalles «Goal and scope definition», og omhandler å definere hvilke deler av livssyklusen til et produkt som skal analyseres i studien, samt fastsette formålet med livssyklusanalysen. Steg to «Inventory analysis» eller inventaranalyse, handler om å identifisere konsum av råmaterialer og energiflyten innen produktsystemet, og dets påvirkning på miljøet i form av utslipp. Det tredje steget i studien kalt «impact assessment» består av å evaluere inventaranalysen fra steg to, og deretter etablere relevante påvirkningskategorier for studien, hvor disse er evaluert ved hjelp av normalisering og deretter vektning. Det siste steget i LCA-studien er «interpretation» eller fortolkning av resultater. Dette steget involverer å rette et kritisk blikk på resultatene i analysen, samt etablere et bilde på datasensitivitet, og klargjøre resultatpresentasjon. Disse stegene er gjensidig avhengige, og blir derfor gjennomført som vist i Figur 7-47, før direkte anvendelse [102].



Figur 7-47: Rammeverk for LCA-metoden [102].

Det forutsatt største potensiale for miljøbesparelser innen 3D-printing av konstruksjoner, er muligheten for materialbesparelser ved optimalisering. Tabell 7-2 illustrer mulige miljøeffekter for bruk av additiv tilvirkning i byggebransjen, sammenlignet med tradisjonell produksjon [18]. Disse effektene er i dag vanskelig å konstatere gjennom LCA, på grunn av liten referansegruppe som er relevant for slike prosjekter [103].

Tabell 7-2: 3D-printing av betong sammenlignet med tradisjonell byggemetode [18].

Is AM <i>more</i> or <i>less</i> green than traditional manufacturing?
+ Reduces material waste and scrap
+ Limits the amount of energy used
+ More efficient use of raw materials
+ Minimal harmful (e.g., etching) chemicals needed
+ Environmentally friendly product designs possible
+ Changes to design streamlined
+ Carbon footprint of a given product reduced (via reduced waste and need for global shipping)
- But can it use recyclable materials?
- What about environment, health and safety (EHS) issues, especially with nanomaterials?

7.11.2 Materialalternativer, energi og arbeidsmarked

Khan et al. [104], har gjennomført en studie som undersøker potensialet og utfordringene for 3D-printing av betong fra et miljøperspektiv. Gjennom LCA undersøkelser og sammenligning av ulike utslippsrapporter fra prosjekter, har de kommet frem til flere resultater rundt dette.

Her blir 3D-printing beskrevet som en miljøvennlig teknikk som fører til minimalt med avfall. De potensielle fordelene ved digital fabrikasjon øker proporsjonalt med kompleksitetsnivået til designet som blir printet. Videre vil et integrert verktøy for bærekraftsvurdering være nødvendig for å vurdere miljømessige, økonomiske og sosiale aspekter for 3D-printede betongkonstruksjoner. En ledende komponent når det kommer til miljøavtrykket til betong, er andelen portlandsement i blandingen. Hovedingrediensen i portlandsement er kalkstein, og blir brukt som bindemiddel i betongen [105]. Portlandsement har en betydelig innvirkning på miljøavtrykket til betongen fordi den er energikrevende å produsere, samt bruken av miljøtyngende kjemikalier i produksjonen. Det vitenskapelige samfunnet prøver i lys av dette å unngå konvensjonell betong, til fordel for forskning og utvikling av mer bærekraftige alternativer som flyveaske, marmorslam og resirkulert betong, se Figur 7-48 [104].

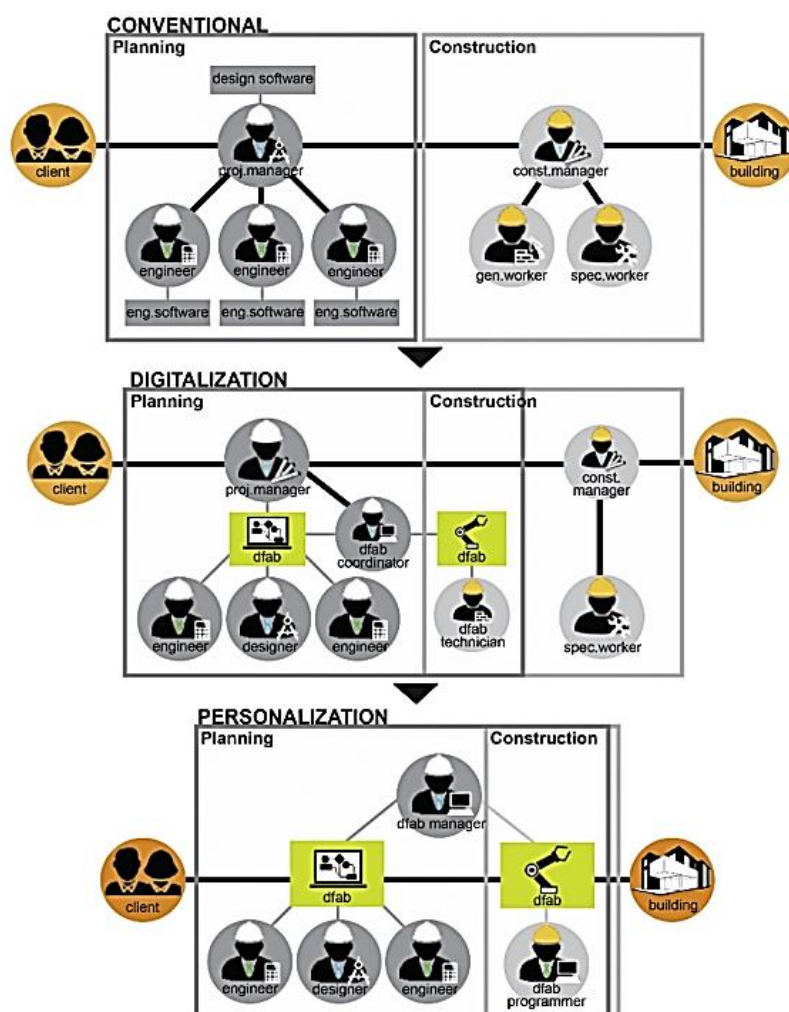


Figur 7-48: Resirkulerbare tilslag [104].

Resirkulert tilslag har også blitt undersøkt som et miljøvennlig alternativ [104]. Her blir transportavstanden trukket frem som en sensitiv variabel i utslippsregnskapet. Khan et al. anbefaler derfor at resirkulert tilslag blir anvendt der produksjonen skjer «on-site» eller ved en nærliggende lokasjon. Den potensielle fordelene med digital produksjon og 3D-printing øker som sagt proporsjonalt med kompleksitetsnivået til design. Miljøpåvirkninger vil da ikke vokse i takt med den arkitektoniske formens egenart og kompleksitet [104].

3D-printing er en energikrevende prosess, hvor applikasjon av fornybare energikilder til printeren kan gjøre prosessen mer bærekraftig, både miljømessig, og økonomisk. Introduksjonen av 3D-printerteknologien kan også redusere behovet for menneskelig arbeidskraft, og dermed redusere samlede kostnader, materiell og utbedringsarbeid [104]. Disse miljøeffektene bygger da på at teknologien vil være økonomisk gjennomførbart, noe den i dag ikke er, sett som et helhetssystem. Dersom det sees bort ifra disse kortsiktige fordelene og ulempene, vil flere empiriske studier på byggekonstruksjoner fortsatt være nødvendig for å forstå det totale bildet av miljøeffektene for et 3D-printet betongbygg gjennom et helt livsløp [104].

3D-printerteknologi kan også påvirke arbeidsmarkedet når behovet for arbeidskraft og arbeidstimer blir redusert [104]. Men teknologien kan også derimot skape flere muligheter for høy-kvalitets arbeidsplasser knyttet til produksjon av 3D-printere. Det vil også være behov for arbeidskraft innen innovasjon, klargjøring av materialer, infrastruktur design og tekniske forsyninger. Khan et al. viser også til at 3D-printing og digitalisering kan åpne muligheter for effektivisering av både planlegging- og produksjonsfasen ved å eliminere unødvendige ledd. Digitalisering vil også gi muligheter for ytterligere personalisering av byggeprosessen, hvilket kan redusere prosjektiden ytterligere ved å utnytte fleksibiliteten til å kunne tilpasse planlegging- og produksjonsfasen spesifikt for de forskjellige prosjektene, som illustrert i Figur 7-49 [104].



Figur 7-49: Forskjellige prosjektforløp basert på tradisjonelle og digitale konstruksjonsmetoder [104].

7.12 Intervju om byggebransjens perspektiv på 3D-printing av betong

På bakgrunn av rapportens tema har forfatteren vurdert det som nyttig å utføre intervjuer, for å innhente informasjon rundt temaet 3D-printing av betong. Rapportens hovedvekt blir ikke lagt på resultatene fra intervju, men disse blir heller benyttet som supplerende informasjon til det som er presentert i kap. 7, og skal gi et bredere perspektiv om tema fra relevante aktører i bransjen.

7.12.1 Intervju AF-gruppen

Intervjuobjektet jobber innen digitalisering og innovasjon.

Fullstendig intervju finnes i vedlegg **A**).

Tabell 7-3: Intervju AF-gruppen

Hvilken erfaring har dere med 3D printing på byggeplass?	<ul style="list-style-type: none"> • AF-Gruppen har med stor sikkerhet ingen erfaring med 3D-printing på byggeplass.
Virker denne teknologien realistisk i nærmeste fremtid?	<ul style="list-style-type: none"> • Denne teknologien kan trolig/høyst sannsynlig være realistisk med tanke på et teknologisk perspektiv i fremtiden. Den vil også kunne ha potensiale til å kunne gjennomføres. • På en annen side handler det om blant annet: modenhet i bransjen, standarder og sertifiseringsordninger som muligens/potensielt vil stikke kjepper i hjulene for å få det kommersialisert.
Hvordan tror dere denne teknologien vil bli utnyttet på best måte i fremtiden? Vil dette være å 3D printe elementer på byggeplass eller som satsing på å printe fullskala konstruksjoner?	<ul style="list-style-type: none"> • AF-Gruppen tror at potensialet ligger i topologi-optimalisering, og at det er hovedgrunnen for at man ønsker å gjøre det (3D-printe betong) og teste det. Ikke at man ønsker å gjøre kostnadsbesparelser i form av at man slipper en eller flere forskalingssekkere.
Vil den stadige utviklingen av 3D printing av betong kunne medbringe nye design muligheter for konstruksjoner?	<ul style="list-style-type: none"> • Det vil her åpne opp for geometri-optimalisering, og for å bygge mer spennende arkitektur eller tilpasset arkitektur.

7.12.2 Intervju Hyperion Robotics

Hyperion Robotics er et finsk selskap som leverer tjenester innen 3D-printing av strukturer og elementer til store deler av Europa. Intervjuobjektet er en ansatt i denne bedriften.

Fullstendig intervju finnes i vedlegg **A**).

Tabell 7-4: Utdrag intervju Hyperion Robotics.

<p>Does this technology seem realistic in the near future?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Yes, this technology seems already today realistic in the near future. We also got plans for making like mobile micro factories. • To conclude this depends on the type of project and on the different characteristics of the location.
<p>How do you think this technology will be used in the best way in the future? 3D printing elements on a construction site, or printing full-scale constructions?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • We think this technology probably will be used in the best way in a combination of both. • Not everything has to be printed and by this means you can have other robots and other automation systems to just places different types of subsystems (In buildings you have all the electrician, plumbing, insulation and more).
<p>Which scale is the largest you have 3D printed? And on what scale do you think you have the capacity to 3D print?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • The largest scale Hyperion Robotics have printed were 2 x 2 x 2 meters. They have also printed in a larger scale, but this was in a modular way where they put together post-tensioning. • Hyperion Robotics think that they have the capacity to print very large structures. They have a client that are looking into 3D-printing structures that are over 10 meters inn dimension.
<p>What are the main challenges of printing on a larger scale?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • You need a material that are versatile enough to resist the cold and also the hot weather. Smaller scale is something you could do in a factory, and it is easier to create and control the environment. • Depending on the design, one can use different kinds of reinforcement, like the conventional rebar, steel fibers and cables. • You have specific location for the different types of steel cables in each layer and that's provides the tensile capacity.
<p>Will the constant development of 3D printing of concrete be able to bring new design possibilities for constructions?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hyperion Robotic think there are certain applications were its possible to take most advantageous of topology optimization, one of this is to use 3D-printing to build foundations were you only use 25% material of what you typically use in a foundation.
<p>What challenges have you experienced with 3D printing when it comes to concrete rheology and reinforcement?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • They actually use pretty small aggregates right now in the concrete mix, because the type of material that they are using is pretty fine-grained, but they have the possibility to 3D-print coarser aggregates up to 8 mm in dimension.
<p>What type of printer do you use, and which operating system do you use?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hyperion use their own software that can be integrated with the software's like Revit or let's say iteration of BIM software. It is their own software that is connected to the software that's comes with the robot for example.

<p>What experience do you have with FEM simulation used for 3D printing of concrete?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • An example is the pile cap project there they ran a simulation and then they wanted to match that's simulation with the real prototype. They had to evolve the FEM analyses and also the real prototype.
<p>What experience do you have with topology optimization for 3D printing of concrete?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • In every structure that Hyperion Robotics do they try to save material, so we have been doing this for now in a manual way or just trying to be creative to come up with this support optimized structure. Another example besides the foundation solution, is a Hyperion Robotics designed a beam that you can see on their website. • The total material saving was 30-40 % of the amount. Again, you really don't need full monolithic structure, and that was why they came up with the hollow concept where you can save a lot of materials.
<p>How can 3D printing of concrete contribute to the digitization of the construction industry regarding BIM?</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Hyperion robotics think one of the big problems with construction is the fact that architecture, engineering and production are very different languages. It is always challenges when working with all this different subcategories and different steps. What Hyperion is doing and what 3D printing are doing is breaching the gap between the sign engineering and production (reduces the probability for mistakes happening between different actors). • This is the main thing that 3D-printing of concrete is bringing to the table. They are eliminating these challenges of having separate stages that don't communicate properly and just having a digital form that you can compare to the actual product. • If you for example let's say you look at the planning and design with BIM, but then there is still a person solving those problems. It is therefore not very well linked together in one single platform where you also should include the production.
<p>What are the financial benefits of 3D-printing of concrete</p>	<ul style="list-style-type: none"> • To determine if it is economic to 3D print constructions in concrete this will mainly depend on type of project, the location and the scale. It may be cheaper if you are building in a country like Norway where the labor costs are very expensive. • Hyperion Robotics were comparing 3D-printing of a foundation with the conventional method where you make a hole in the ground and pour concrete into the hole. Since the conventional method is fast and requires less equipment for producing some foundation, in these scenarios the conventional method is much cheaper. • If you have more complex structures and cases where the forms are varying, then and you don't have a lot of recurring elements. This is where 3D-printing has greater potential and is definitely faster and cheaper.
<p>What are the environmental benefits of 3D-printing of concrete</p>	<ul style="list-style-type: none"> • If you in a project use geopolymers instead of cement or use other lower carbon concrete this will impact the environment in a greener way. • The other main thing about 3D printing is topology optimization there you need less material to make the same structure and the technology brings less material waste.

- Save in transportation fuel from producing lighter structures and less material waste.

8

8. Diskusjon

I diskusjonen vil resultatene i kapittel 7 drøftes i lys av kunnskapsbakgrunn, samfunnsperspektiv og forskerspørsmålet: «Hvilke anvendelsesområder vil 3D-printing av betong kunne ha innenfor byggebransjen?»

8.1 Muligheter og begrensninger for 3D-printet betong

8.1.1 Eksisterende metoder for 3D-printing av betongkonstruksjoner

Det viser seg fra kap. 7.1 at 3D-printerteknologien har eksistert i flere tiår, men har enda ikke blitt en utbredt internasjonal byggemetode eller integrert som en større del av byggeindustrien. I gjennomført intervju med AF-Gruppen ble det presisert at artikkelen som hevdet at de skulle reise det første 3D-printede næringsbygget på Ulven i Oslo var fremstilt på en uheldig/utydelig måte, og at det kun var snakk om å 3D-printe et lite testprosjekt/demonstrasjonsbygg nærmest en hytte. Norge vil kunne ha gode forutsetninger for å ta i bruk teknologien, da de har høy teknologikompetanse, men på den andre siden setter trolig manglende erfaring en stopper for at norske bedrifter skal ta i bruk 3D-printing av betongkonstruksjoner.

Det kommer frem at mange av litteraturkildene som er undersøkt, holder en generell positiv innstilling til 3D-printing av betong. Forfatteren får likevel inntrykk av at flere studier har et overfokus på de positive sidene, og ofte ikke begir like stort fokus til å undersøke de negative sidene. Dette kan derimot være en naturlig tendens, ettersom mulighetsstudier og utforskning av innoverende og nyutviklede teknologier ofte vil ha et naturlig søkelys mot de positive aspektene og potensiale. Uten disse positive aspektene som motivatorer, ville det kanskje ikke vært grunn til å studere og undersøke disse nye teknologiene i utgangspunktet.

Det viser seg av funnene i resultatkapittel 7.1, at 3D-printing av betong deles hovedsakelig inn i ekstruderings-/deponeringsmetoden og selective paste intrusion (SPI), der metodene skiller seg fra hverandre etter hvordan sementpastaen påføres. Det kommer også frem at SPI foreløpig er på forskningsstadiet, og er kun testet i småskala laboratorieundersøkelser. Ekstruderingsmetoden har for øvrig påvist størst potensialet i byggebransjen og blitt benyttet i flere fullskala byggeprosjekter. En av grunnene til dette skyldes trolig at inntrengingsdybden av sementpastaen i aggregatlagene vil kunne avvike og ha utilstrekkelig heft i større grad enn for ekstruderingsmetoden, der betongen dispenserer lagvis i horisontale lag gjennom dyseåpningen. Det er også tungvint å måtte fjerne de ubundne aggregattilslagene etter at sementpastaen er herdet. Dette har ført til en videreutvikling av SPI til metoden «aggregate-bed 3DP» som vellykket kan printe betongstrukturer med økt sementpastafilamentbredde i x-retning.

Det viser seg at alternative former for 3D-printing av betong, som glidestøping har eksistert i byggebransjen over en lengre tidsperiode på over 100 år og brukes fortsatt. Da det stadig stilles høyere krav til hurtigere ferdigstilling av konstruksjoner grunnet faktorer som blant annet

overbefolkning og oppnåelse av bærekraftsmålene, går byggebransjen over til å bli mer innovasjonsrettet. Denne innovasjonsutviklingen medfører digitalisering og optimalisering av konvensjonelle byggemetoder, for å skape byer og lokalsamfunn som bærer preg av bærekraftige løsninger. Eidgenössische tekniske høyskole (ETH) i Zurich utviklet i 2010 metoden «Smart Dynamic Casting» som baserer seg på glidestøping, bare at heisekranen er byttet ut med en bevegelig robotarm som kan justeres og kontrollere løftingen av betongformen. Ulempen med denne videreutviklede metoden er at maks støp høyde begrenses av lengden til robotarmen som vist i Figur 7-5. Hovedfordelene er robotarmen er autonom, og har kontinuerlig innebygde kontroller av betongens reologiske egenskaper, redusert menneskelig arbeidskraft, samt kontroll av betongformens løfthastighet. Fullskala 3D-printing av takkonstruksjoner viser seg å være en utfordring, og ingen av de printede bygningene presentert i kap. 3.4. hadde 3D-printede tak. En mulig løsning på denne problematikken er ved bruk av støttemateriell, da dagens 3D-printere ikke kan printe horisontalt. Denne problematikken vil ikke i samme grad være gjeldende for 3D-printing av enkeltelementer på byggeplass, hvor en takkonstruksjon eller etasjeskiller vil kunne produseres elementvis og deretter monteres i ønsket retning. Da det i den undersøkte litteraturen ikke forekommer noen tilfeller hvor printing av takkonstruksjoner er gjennomført, er dette trolig ikke særlig gunstig, sammenlignet med bruk av prefabrikkerte elementer produsert på fabrikk.

8.1.2 Dagens teknologi og ulike styresystemer for 3D-printing

Det fremkommer at to av de mest brukte variantene av 3D-printere er Gantry printere og robotarmprintere. Begge variantene benytter seg av ekstruderingsmetoden, og er navngitt etter type styresystem som beveger printerhode. Den samme utfordringen som med «smart Dynamic Casting», vil også her være gjeldende i form av begrenset robotarmrekkevidde eller anstrengende forflytting av holdepunktet til robotarmprinterens. Selve robotarmen er forholdsvis enkel å transportere og man har muligheten til å bruke flere robotarmprintere samtidig. Gantry printeren er en god del tyngre å transportere sammenlignet med robotarmprinterens, men åpner opp for å alene kunne printe arealmessig større betongkonstruksjoner, til tross for at printerhode kun kan bevege seg innenfor sin egen ramme.

En annen lovende 3D-printerteknologi utviklet av HINDCON er en kabelopphengt printerløsning (cable robot) som likeledes benytter seg av ekstruderingsmetoden, bare at løsningen er desto enklere å transportere på grunn utstyrets lave totalvekt. Andre styringssystemer som utvikles for å kunne 3D-printe betongkonstruksjoner over flere etasjer er robotisert lastebil m/tårnpumpe (robot truck) og heisekransystem (tower crane system), som vist i Figur 7-8 og Figur 7-10. Heisekransystemet vil kunne ha alle muligheter for å kunne printe i høyden, men det vil trolig være problematisk med presisjon og stabilisering av printerhode, til tross for installering av retningsstabiliserende gyroskopisk system. Dette stabiliseringsbehovet vil kunne være løselig ved hjelp av nye servo og stabiliseringsløsninger, etter hvert som behovet for dette dukker opp i bransjen. På en annen side vil robotisert lastebil m/tårnpumpe kunne 3D-printe boligblokker opptil lengden av robotarmen, og vil derfor være mest egnet til printing av mindre boligblokker eller leiligheter, og ikke fungere til 3D-printing av skyskrapere.

8.1.3 Forutsetninger for betongkvalitet og armering

Det er flere forutsetninger som må ligge til grunn for at 3D-printing av betong skal fungere optimalt. I motsetning til konvensjonell betong, vil 3D-printing av betong i fersk tilstand stille høyere krav til flyteevne da betongen skal kunne pumpes gjennom slangen og videre ekstruderes gjennom printerdyse. En utfordring viser seg å være at mange av betongpumpene som finnes på markedet i dag, ikke er kraftige nok til å kunne pumpe betongen over lengre avstander uten slangeoppnopning eller tetning av dysen. Tetning av dysen kan også skyldes at aggregatene samler seg opp ved inngangen til dysen eller at aggregattilslaget er for grovkornet. Ifølge Hyperion Robotics, som nevnt i Tabell 7-4, kan deres robotarmprinter printe aggregater med maximum 8 mm kornstørrelse, og grovheten vil variere etter produktet som skal printes. Dette er tilnærmet det samme som NASAs partikkeldiameter på 9,5 mm, noe som har ført til at betongblandingen har utviklet seg til å bestå av mer enn bare sement.

3D-printing av betong på byggeplass vil i denne sammenheng stille høyere krav til mengde betong som skal blandes og printes tidseffektivt. Samtidig vil transportavstand for ferdigblandet betong kreve økt transport sammenlignet, med hvor blanding av betong foregår on-site. Arealreduksjon på byggeplass må også tas stilling til, da selve 3D-printeren opptar et større areal. Metoden «sliding pipe rheometer» legger til rette for å kunne teste pumpbarheten til fersk betong på byggeplass, da det er viktig å påse at betongen i den flytende fasen er tilstrekkelig samt innfrir kravet til pumpbarhet.

Det fremkommer at betongreologien endrer seg når flytratio, tid og pumpedistanse øker. Dette skyldes at høyere flytratio gir en bløtere betongkonsistens som vil kunne redusere tiden det tar for å pumpe betongen over lengre distanser, men må ikke ha for høy flytratio da den ekstruderte betongen vil kunne synke sammen. To sentrale faktorer tilknyttet ekstruderbarhet er derfor betongreologi og type ekstruderingsystem. Ekstruderingsystem avhenger av om man har levering og ekstrudering av betong i et adskilt system som inkluderer en aktiv printerdyse eller i et felles system inkludert en passiv printerdyse. En fordel med aktiv printerdyse er at du har en egen pumpe som mer nøyaktig kan regulere tilførselen av tilsetningsstoffer og øke presisjonen av de ekstruderte betonglagene gjennom dysens digitale sensorkontrollsystem. På en annen side vil bruk av en passiv printerdyse kunne gi en mer jevn betongblanding, da betongmiksen og tilsetningsstoffer blandes i samme beholder fra begynnelsen. En annen viktig egenskap er betongbyggbarhet til den ekstruderte betongen. Dette er avgjørende for å hindre at deformasjoner oppstår i tilfeller der underliggende betonglag er utilstrekkelig herdet for å kunne bære neste overliggende betonglag. Dette betyr at det ikke vil fungere å 3D-printe høyere betonglag enn bredden på dysen, da den mekaniske motstanden vil bli for stor. En negative side er at dette gir begrensninger når det kommer til printing av konstruksjoner i høyden. Dette medfører at man må printe flere lag for å oppnå samme høyde eller at man må øke bredden på dysen for å kunne printe færre betonglag som resulterer i tykkere betongelementer. Tykkere betongelementer vil dermed være mindre økonomisk med tanke på økt betongforbruk.

8.1.4 Kjennetegn på en printbar betong, herdeegenskaper UHPC og dyseutforming

Ifølge Arunothayan et al. [62], finnes det kun et mindre antall betongkonsistenser som er mulig å 3D-printe. Dette kan skyldes at det stilles særegne krav for en printbar betong til blant annet egenskaper som lav viskositet, høy flytespenning og hurtig herding etter avsetning. En fordel med lav viskositet er at man kan redusere pumpestrykket, da betongen har god flyt. Derimot vil det i tillegg være

nødvendig å tilsette en herdeakselerator ved enden av dysen for å fremme tidlig fasthetsutvikling, som må være til stede for at 3D-printing kan gjennomføres. I denne sammenheng kan benyttelse av en fiberarmert sementholdig kompositt av høyytelsesbetong (HPFRCC) bidra til økt strekkfasthet og bidra til at betonglagene ikke kollapser etter ekstrudering. En ulempe vil være at denne betongtypen er tilpasset en bestemt 3D-printer som gjør at den kun vil fungere på printere som har samme printekonfigurasjoner. Det finnes også andre printbare varianter av ultra-høyytelsesbetong (UHPC) som ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), og åpner opp for å kunne printe slankere profiler. Dette gjenspeiler noe av potensialet med 3D-printing av betong, da man kan oppnå vektbesparelser i form av at man har større geometrisk frihet og vesentlig høyere trykkfasthet enn for konvensjonell betong.

I Figur 7-15 til og med Figur 7-18 er herdeegenskapene til UHPFRC composite og UHPFRC matrix presentert, som et resultat av gjennomførte standard tester. Porøsiteten til den 3D-printede UHPFRC composite i Figur 7-15 er cirka 5% høyere enn UHPFRC matrix. Høy porøsitet er fordelaktig med tanke på termisk isolasjonsevne, men en negativ konsekvens er at økt porøsitet reduserer betongstyrken. Dette gjenspeiler seg i Figur 7-17 der mold-cast composite betong har 10 MPa høyere trykkfasthet enn UHPFRC composite. Det er minimale forskjeller mellom mold-cast matrix og UHPFRC matrix, noe som skyldes at porøsiteten er tilnærmet lik. Det at UHPFRC composite (longitudinal) har cirka 20 MPa høyere trykkfasthet enn UHPFRC matrix (longitudinal) skyldes trolig i hovedsak at stålfiberarmeringen gir betongen økt styrke. I Figur 7-16 ser vi at bulkdensiteten til den 3D-printede UHPFRC matrix er 110 Kg/m³ lavere enn for den 3D-printede UHPFRC composite, noe som derav betyr at sistnevnte betongtype er tettere pakket og tyngre da den er tilsatt stålfiber. Dette kan ses i sammenheng med heftfastheten til UHPFRC composite som er omtrent det dobbelte av UHPFRC matrix og skyldes trolig hovedsakelig at stålfiberne bedre vil håndtere strekkrefter.

Gjennom litteraturstudie i kap. 7.3.2, viser det seg gjennom ulike prosjekter og tester, at en rektangulær dyse med endekanter på begge sider av dysen er mer effektiv enn en sirkulær vertikalt orientert dyse. Noe av grunnen til dette er at en rektangulær dyse har høyere trykkfasthet og overflateruhet. Dette skyldes trolig at utlegging av en betongpølse har en buet overflate som medfører mindre horisontal flate å fordele trykket på. En annen fordel er at endekantene på den rektangulære dysen kan sikre at man får samme bredde på alle ekstruderte betonglag, samt at den drar med seg overskuddsbetongen som kan gi avkastning i form av ingen eller minimalt materialsvinn.

8.1.5 Armerings-muligheter for 3D-printing av betong

Armerings-muligheten knyttet til 3D-printing av betong viser seg å være mange, selv om det ikke enda eksisterer en metode som automatisk installerer armeringsnett eller armeringsstenger. En årsak kan være at store deler av byggebransjen fortsatt baserer seg på manuell arbeidskraft, da de er skeptiske til å la roboter armere konstruksjoner eller at dagens få automatiserte armeringsløsninger ikke er effektive/tilpasningsdyktige nok ved ulike byggeprosjekter. Tilsetning av fiberarmering i betongen er noe av det nærmeste man kommer en automatisert prosess. I henhold til Eurokode 2 er det ikke tillat å kun benytte seg av fiberarmering i bærende konstruksjoner og setter dermed en stopper for full utnyttelse av armeringsprosessen med bruk av 3D-printing. Armeringen plasseres foreløpig manuelt i forkant eller etterkant av printerprosessen. På den negative siden kan dette by på

varierende lagvis armeringskvalitet/armeringsplassering, da det i praksis ikke er utarbeidet et integrert system som håndterer både armering og betong.

Sammenligning av fire kjente armeringsmetoder for 3D-printing av betongveggelementer, som vist i Figur 7-19, viser at armeringsmetode **(b)** trolig er det beste alternativet. Armeringsmetoden vil totalt sett kunne være mer materialbesparende enn armeringsmetode **(c)**, da hele veggelementet tilhørende sistnevnte metode er bestående av solid betong. Armeringsmetode **(d)** vil kreve mindre arbeid tilknyttet armeringsutlegging, men vil derimot trolig ikke ha styrkeegenskapene til de tversgående armeringsstengene, samt ikke ha isolasjonsmuligheten til de doble ekstruderte betongveggene. Armeringsmetode **(a)** vil ha tilsvarende styrkeegenskaper som armeringsmetode **(b)**, men vil ikke ha den samme isolasjonsevnen. I nyere tid er det på laboratorienivå utviklet et automatisert 3D-printersystem som kan plassere stålkabler synkront med de ekstruderte betonglagene. Det er usikkert om dette konseptet vil fungere effektivt i bygging av fullskala konstruksjoner, men potensialet er der selv om ribbet kamstålarmering har høyere bindingsstyrke.

Ifølge AF-Gruppen og Hyperion Robotics vil ikke armering være et problem for anvendelsen av fullskala 3D-printing av betong i byggebransjen. Dette kan begrunnes med at det allerede finnes ulike armeringstyper som konvensjonell kamstålarmering, fiberarmering og stålkabelarmering, der valget avhenger av hvilket design som skal 3D-printes. Bruk av stålfiberarmering i betongblandingen gjør at man er mindre avhengig av den konvensjonelle armeringen ved 3D-printing, da den tilfører betongen økt strekkfasthet. Hovedsakelig vil det kun være mulig å 3D-printe ett materiale av gangen, men det fremkommer at det er utviklet en automatisert armeringsløsning for spesifikk lagvis plassering av ulike stålkabler med nødvendig strekkapasitet. På grunn av lite detaljert informasjon om hvordan denne automatiserte armeringsløsningen fungerer, samt ulempene, er det vanskelig å trekke en slutning rundt anvendbarheten til denne nyvinningen.

8.1.6 Digitalisering av byggebransjen

Byggebransjen har i en årrekke båret preg av lav produktivitet i forhold til andre bransjer, da den fortsatt i stor grad består av manuelle produksjonsprosesser og mindre grad av automatisering ved bruk av digitale teknologiske verktøy. Dette underbygges videre ved at den årlige produktiviteten i bransjen på verdensbasis kun øker med 1%. Dette skyldes trolig at det er en høy risiko for mange utførende entreprenører; å gå fra en godt opparbeidet metode til å skulle gå over til en mer heldigital og automatisert løsning. Det er dessuten også utfordrende å skulle øke produktiviteten i bransjen, da byggeprosessen vil variere tilpasset ethvert byggeprosjekt og derav begrense mulighetene for at reproduksjon i utgangspunktet er et alternativ.

En hovedfordel med 3D-printing av betong er at man ved hjelp av digitale verktøy kan programmere det man ønsker å printe, samt automatisere prosessene i byggefasen. På en annen side finnes det et bredt utvalg av programvarer til digital modellering, som gjør det utfordrende å generalisere felles rammer. Dette kan underbygges ved at Hyperion Robotics bruker en egen programvare som kan integreres med iterasjoner av BIM-programvarer som Revit, og gjør at deres programvare er koblet til robotens operativsystem. I Figur 7-20 ser vi at prosessen fra utviklingen av digital 3D-modell til ferdig fysisk modell foregår i åtte komplekse hovedtrinn, og kan skape nye typer arbeidsplasser. Dette da metoden etterspør annen ekspertise og kompetanse innen fagfeltet for å manøvrere printerens, og

kode den digitale modellen til kommandoer som 3D-printeren kan kjøre. En negativ konsekvens er at arbeidsplasser også vil forsvinne da 3D-printeren erstatter mange arbeidsoppgaver til de utførende fagarbeiderne.

Det viser seg av resultatene at BygningsInformasjonsModellering (BIM) kan brukes til å 3D-printe betongkonstruksjoner, samt håndtere den komplekse planleggingen mellom ulike aktører innenfor byggebransjen kombinert med utførelsesprosessen av konstruksjonen. BIM-verktøyet samler all informasjon på en felles plattform som i den sammenheng reduserer sannsynligheten for modellfeil, da man unngår unødvendig samhandling mellom de involverte aktørene på e-post. Verktøyet har dessuten også i dag en stor brukerbase i byggeindustrien, som igjen kan gjøre det mer attraktivt å integrere BIM med 3D-printerteknologien. 3D-printing av betong kan med hensyn på BIM bidra til å digitalisere byggebransjen ved å bryte skillet mellom grupperingen engineering og produksjon siden de er tett knyttet sammen. Utfordringer knyttet til å ha separate steg og skiller som overnevnte, gjør at man ikke samkommuniserer på en effektiv måte. 3D-printing av betong kan bidra til å løse dette problemet, da den har flere digitale modellformer som du kan sammenligne med det faktiske printede produktet. Dette innebærer at 3D-printing av betong vil styrke samhandlingen på BIM-plattformen, da den allerede vil inkludere produksjonen i planleggings- og designfasen. Det vil på en annen side fortsatt være en person som designer 3D-modellen, noe som gjør at modellfeil fortsatt kan oppstå.

8.1.7 Anvendbarhet og implementering av 3D-printing i Byggebransjen

Det viser seg gjennom intervjuene at 3D-printing i byggebransjen er en teknologi som vil kunne være realistisk å benytte seg av i nær fremtid. Dette bekreftes av Hyperion Robotics der de allerede vellykket har 3D-printet et mindre betongelement på byggeplass ved hjelp av en robotarmprinter. Det er viktig å poengtere at teknologien kun i noen tilfeller vil kunne være mer gunstig å benytte seg av kontra den konvensjonelle byggemetoden, og vil kunne avhenge av prosjekttype og lokasjon. Faktorer som modenhet i bransjen, standarder og sertifiseringsordninger vil gjøre det utfordrende å kommersialisere anordningen i bransjen. Mangfoldet av dagens 3D-printersystemer og manglende sertifisering av denne byggemåten gjør at det vil være behov for standardisering av de ulike 3D-printersystemene som eksisterer i dag, og standardisering av de ulike digitale designprogramvarene. Da teknologien bærer preg av nyskapende designutforminger gjør dette at en standardisering av teknologien er svært krevende å tilpasse varierte nasjonale regelverk. Til tross for disse utfordringen vil trolig det største usikkerhetsmomentet for implementeringen av 3D-printer teknologien være sosiale faktorer som manglende interesse og tillit i bransjen. Det vil i denne sammenheng være viktig å påvise gjennom testing at 3D-printet betong har tilsvarende kvalitet, sikkerhet og levetid som konvensjonell betong. Dette for å fjerne den underliggende skepsisen fra å våge å ta i bruk teknologien.

8.2 Fullskala 3D-printing vs printing og montering av enkeltelementer

8.2.1 Fullskala 3D-printede betongbygninger på byggeplass

I kap. 3, ble fem ulike fullskala 3D-printede konstruksjoner presentert. Gjennom sammenligning og fordypning av litteraturkilder innen emnet, ser vi at det er en rekke fordeler og ulemper med de

forskjellige fullskala byggeprosjektene. Betongherdeprosessen skapte under kalde omgivelser utfordringer knyttet til 3D-printingen av betonghuset i Moskva. Dette skyldes at betongen krever varmere forhold enn selve 3D-printeren, som igjen må være innfridd for at herdeprosessen ikke skal forsinkes eller stoppe opp [34]. Problemet ble løst ved å sett opp et byggetelt som dekket hele konstruksjonsområde inkludert 3D-printeren. En gjennomgående fordel med 3D-printing i de fem prosjektene viser seg å være at total printertid kun tar få dager, og har samlet raskere ferdigstillestid enn ved bruk av den konvensjonelle metoden. 3D-printerteknologien har gjennom prosjektet i Tabasco bevist at den legger til rette for å kunne bekjempe hjemløsheten i Mexico raskere, og boligene tiltenkt personer som lever i ekstrem fattigdom, med under 3 dollar dagen [37].

Byggeprosjektet i Russland vil kunne være økonomisk dyrere, da man står ovenfor krevende temperaturomgivelser, samt at byggetelt ikke er nødvendig utstyr i varmere land som Mexico. Utstyret vil også kunne være til hinder for implementeringen av teknologien i byggebransjen, da solide byggetelt må være på plass dersom konstruksjonen går over flere plan. 3D-printing av betong gir derfor muligheter for byggebransjen på grunn av den effektive printerprosessen av betongveggene, men per i dag klarer ikke printerene å produsere selve takkonstruksjonen. På en annen side kan man redusere produksjonskostnadene og varmetap, ved at man ikke trenger å ta hensyn til ekstra kuldebroer som oppstår i konstruksjonssammenføyninger eller i tilfeller der hjørner erstattes med buer.

8.2.2 Europas første 3D-printede betongbygning on-site

I resultatkapitlet ble Europas første 3D-printede betongbygning bebreidet i dypere grad, da det ble sett på valg av 3D-printer, armering, betongkvalitet, printerskala og byggestandard. Gantry printeren viste seg å være det naturlige valget for kontorhotellet med bakgrunn i vurderingsgrunnlaget av prosjekttype, rekkevidde, smidighet og anvendbarhet på byggeplass. Hovedgrunnen til at følgende 3D-printer ble benyttet, skyldtes at selv ikke den lengste robotarmprinterene på markedet hadde rekkevidde til å printe arealet av «The BOD». Det er dessuten også vellykket 3D-printet et areal på 12 x 12 meter i Kina, noe som betyr at maksimalt printerområde til en Gantry printer ikke er fastsatt til en printerdimensjon på 8 x 8 meter som prosjektet «The BOD». I 2020 ble en oppgradert printermodell av BOD kalt BOD2 benyttet i prosjektet ved Westerlo, Belgia til å 3D-printe et betonghus over to etasjer på byggeplass i Belgia. Fordeler med denne videreutviklede Gantry printeren er ti ganger raskere printerhastighet, og åpner opp nye fremtidige muligheter for 3D-printing av betongkonstruksjoner i større skala. I et miljøperspektiv vil det være viktig å finne bedre metoder som kan senke eller delvis erstatte sementinnholdet av betongen i 3D-printeprosjekter som «The BOD», da sementproduksjonen utgjør det største CO₂-utslippet. Betongtilslag av gjenbrukt teglstein ble imidlertid tatt i bruk for å gjøre betongen mer miljøvennlig.

Når det kommer til armering av den 3D-printede betongveggstrukturen ble det tilsatt polypropylenfiber i betongblandingen for å motvirke svinnriss, uttørkingssvinn og autogensvinn. En bakside med Gantry printeren er at man er avhengig av manuell arbeidskraft for plassering av konvensjonell armering, da 3D-printeren ikke kan utføre denne oppgaven. Selv om kontorhotellet innfrir alle kravene og bestemmelsene i henhold til Europeiske standarder, finnes det ikke en egen standard som tar for seg 3D-printing av konstruksjoner den dag i dag. Dette gjør det nødvendig for entreprenørselskap å validere metoden gjennom blant annet testing, at egenskapene til

konstruksjonen er minst like gode som kravene i Eurokodene. Byggeteltet som ble benyttet, viste seg og blant annet gi god beskyttelse mot vindkrefter som kan skape forskyvning i ekstruderte betonglag.

8.2.3 3D-printing av prefabrikkerte- og preproduserte betongelementer

I resultatkapitlet nevnes det at man skiller mellom prefabrikkerte- og preproduserte betongelementer, ved at prefabrikasjon skjer innendørs på fabrikk, mens preproduksjon foregår på byggeplass eller nærliggende lokasjon. Klimagassutslippene knyttet til produksjon av prefabrikkerte betongelementer står i dag for 15% av det totale sementforbruket i Norge, og vil være en negativ bidragsyter til oppnåelse av bærekraftsmål 12 innen 2030. Det vil derfor være viktig å finne alternative bindemidler som kan erstatte deler av sementinnholdet i betongen.

I et forsøk utført av seks mastestudenter og forsker Ana Anton [77], ble det 3D-printet ved hjelp av en robotarmprinter ni unike betongsøyler med bruk av ekstruderingsmetoden på ETH Zurich. Forsøket åpner opp muligheten til å masseprodusere betongsøyler med spektakulære arkitektoniske design, som igjen vil kunne øke forsøkssuksessraten på 75%. Det vil trolig også være et mer økonomisk alternativ for reproduksjon av gjentakende ukonvensjonelle former, i tilfeller der betongelementene ikke produseres lengre eller krevende forskalingsarbeid. Fremtredende ulemper i forsøket viste seg å være lang fabrikasjonstid på hele fem uker, samt at lengden på robotarmprinter og transportkapasiteten til kjøretøyet vil skape restriksjoner, for hvor høye søyler som kan 3D-printes på fabrikk og leveres på byggeplass. Det er heller ikke i dette forsøket opparbeidet en automatisert armeringsprosess som kan erstatte kostbar arbeidskraft for plassering av armeringsburet i betongsøylene. På en annen side vil 3D-printing av prefabrikkerte betongsøyler i kontrollerte omgivelser bane vei for at man også kan printe preproduserte elementer på byggeplass. Dette bekreftes gjennom at det Nederlandske firmaet CyBe har lyktes med å produsere 3D-printede betongelementer på byggeplass, og underbygges videre i begrunnelsen utarbeidet av Partnerskabet [39], der robotarmprintere egner seg mest til 3D-printing av preproduserte betongelementer på byggeplass.

8.2.4 Preproduksjon av 3D-printede betongelementer i nærhet til byggeplass

Gjennom litteraturstudiet fremkom det kun ett tilfelle kalt «Milestone» [74], der 3D-printing av preproduserte betongelementer ble utført av en robotarmprinter i nær lokasjon til byggeplassen, for så videre kranbilmontasje av totalt 24 betongelementer. Den preproduserte konstruksjonstypen var et utleiehus i Nederland, og den anvendte produksjonsmetoden vil kunne være bedre for miljøet og mer kostnadseffektiv i forhold til dagens prefabrikasjon. Noe av årsaken er kortere transportavstand, mindre materialsvinn og hurtigere byggetid i form av totalt fem dagers printerprosess av det 94 kvadratmeter store utleiehuset. Produksjonsmetoden viser seg mangelfull, da tak-, vindus-, dørdele og isolasjonsmateriale må etterinstalleres gjennom manuelle arbeidsprosesser. På en annen side kan produksjonsmetoden lette arbeidsoppgavene til de utførende aktørene i byggebransjen, mer bærekraftig transport og gi økt sikkerhet. Dette skyldes blant annet at de tyngste arbeidsoppgavene utføres av maskiner. I tillegg vil risikoen for uhell reduseres da mannskapet kun er til stede ved avlesning, pålesning og montering av betongelementene. Andre fordeler er at 3D-printeren kan automatisere tidligere utførte manuelle arbeidsoppgaver knyttet til betongstøping, samt at robotarmprinter kan jobbe uavbrutt til alle døgnets tider uten å bli overarbeidet. Den steinaktige

utformingen på utleiehuset står i stil til landskapet, og setter mer åpne rammer for arkitektenes formfrihetsmuligheter. I likhet med prosjektet «The Bod», overholdt det ferdigstilte bygget de nederlandske byggekravene til eksempelvis komfort og energieffektivitet.

I Tabell 7-4, viser det seg at den største skalaen Hyperion Robotics har klart å 3D-printe betong i nær lokasjon til byggeplass er 2 x 2 x 2 meter. I likhet med prosjektet «Milestone» benyttet Hyperion Robotics en robotarmprinter. Hyperion Robotics har også 3D-printet enda større dimensjoner med bruk av den modulbaserte metoden som anvendt i prosjektet «Milestone». Videre mener de den beste utnyttelsen av 3D-printerteknologien vil være en kombinasjon av å 3D-printe betongelementer på byggeplassen eller å 3D-printe fullskala betongkonstruksjoner. Selv om det er ønskelig å automatisere 3D-printeprosessen til å utføre arbeidet til fagdisipliner som blant annet elektrikere, rørleggere samt andre oppgaver som isolering, vil det ikke være nødvendig å 3D-printe alle bygningsmaterialer da man heller kan ha ulike delsystemer til å plassere/utføre dette arbeidet. I fremtiden vil trolig Hyperion Robotics kunne 3D-printe mye større dimensjoner enn overnevnte, og planlegger å printe betongstrukturer i skala 10 x 10 x 10 meter.

8.2.5 Kabelopphengt printerløsning (Cable robot) på prototypstadiet

HINDCON har utviklet og laboratorietestet en lovende kabelopphengt printerløsning gjennom de seks siste årene, og vellykket 3D-printet en betongsøyle. Det vil trolig være lite økonomisk lønnsomt å skulle 3D-printe betongsøyler med rette dimensjoner, noe som gjenspeiler valget av den ukonvensjonelle formen på betongsøylen i prosjektet. Dette skyldes at konvensjonell søylestøping vil være mer effektivt, da man hurtig kan sette opp forskaling, samt at man i begge tilfeller må tilføre armeringen manuelt. I Tabell 7-1 fra resultatet, evaluerte de i forkant av prosjektet hvilken bygningsdel som kunne være mest gunstig å bli 3D-printet i forhold til plasstøpte betongelementer. Dette ble sannsynligvis gjort for å finne en nisje der 3D-printing av betong kan konkurrere med eller har potensial til å utkonkurrere konvensjonell metode.

Det viser seg at en lignende prototype kalt «Sky Big Area Additive Manufacturing» (SkyBAAM) har tatt konseptet til HINDCON videre, og utviklet et brukervennlig automatisert system til å kunne fullskala 3D-printe på byggeplass, som illustrert i Figur 7-33. Foreløpig er SkyBAAM-systemet kun testet innendørs ved Oak Ridge laboratoriet i USA, for å tilse at utfordringer knyttet til stabilitet og koordinasjon av printerhode, samt jevn bevegelse i x-, y- og z- retning av de motordrevne opprullingstromlene tas hånd om av basestasjonene. Det vil trolig by på større utfordringer når systemet skal testes i ukontrollerte omgivelser, da vinden vil kunne ta tak i stålkablene som igjen kan gi ujevn påføring av ekstrudert betong. En annen utfordring kan være å utvikle en kraftig nok pumpe som kan pumpe betongen gjennom slangen til ønsket konstruksjonshøyde. På en annen side har prototypen SkyBAAM klart å 3D-printe i løpet av tre døgn et relativt stort betongobjekt på laboratorienivå, som vist i Figur 7-35. Dersom man sammenligner SkyBAAM-systemet med en Gantry printer har begge systemene kort totalprintertid, men SkyBAAM-systemet vil være vekt- og utstyrsmessig enklere å montere og transportere på byggeplass. Dette skyldes at det mekaniske fotavtrykket i forhold til byggevolum er større for en Gantry printer, da fotavtrykket på Gantry printeren vil øke ettersom byggevolumet øker. Totalt sett gjør dette at SkyBAAM systemet bedre vil kunne tilpasses ethvert byggeprosjekt, uten at det er nødvendig å måtte skalere opp

printerstørrelsen. Samtidig er det usikkert om SkyBAAM-systemet vil ha like gode stabilitets- og koordinasjonsegenskaper som en Gantry printer i fullskalaprosjekter på byggeplass.

8.3 Designmuligheter og optimalisering

8.3.1 Topologioptimalisering

Topologioptimalisering blir sett på som et sentralt aspekt når det kommer til muligheter og innovasjoner knyttet til 3D-printing av betong. AF-Gruppen nevnte, som vist i Tabell 7-3, at det var her de trodde det største potensialet for teknologien ville ligge. Materialbesparelser var for AF-gruppen derfor sett på som hoved motivatoren for utvikling og testing av denne nye teknologien, ikke på bakgrunn av besparelser knyttet til arbeidskraft.

Hyperion Robotics drar frem fundamentelementer som eksempel på hvor de har utviklet og gjennomført prosjekter med 3D-printing og topologioptimalisering. Da fundamentene ikke avhenger av det tradisjonelle monolittiske designet, vil det gi muligheter for materialbesparelser ved å designe «hule» konsepter, hvor det ble observert materialbesparelser fra 30-40 % i disse prosjektene. FEM simuleringer av ulike topologioptimaliserte strukturer kan være krevende i designfasen. For å oppnå slike besparelser, vil det kreves ekstra arbeidstimer i design- og prosjekteringsfasen. Hyperion Robotics nevner «pæle-prosjektet» som et eksempel der et design og simulering blir utarbeidet, for så deretter å bli videreutviklet og iterert etter hvert som prototypen ble laget og analysert. Dette gir uttrykk for at design og simulering av slike prosesser og elementer, ikke er rett-frem prosedyre, men heller en itererende aktivitet.

Det kommer frem at datakraft er en utfordring ved gjennomføring av topologioptimaliserte design og FEM-analyser. Videre blir det også sett på lokalisering av ikke-optimaliserbare områder. Store variasjoner i design av konstruksjoner med slike områder, gjør det vanskelig å oppnå standardiserte metoder for topologioptimalisering i henhold til koder og utnyttelse. Videre utfordringer vil være at når størrelsen på design øker, må topologioptimaliseringen revideres. Dette kan føre til en krevende prosess å hele tiden lage nye topologioptimaliserte design, samt forskalle disse. 3D-printing er eneste alternativet som kan håndtere slike endringer i design og topologi.

Topologioptimalisering kan åpne muligheter for flere kreative design, både estetisk og materialeffektivt. I tilfeller der vegger og søyler blir optimalisert, vil dette også åpne for utfordringer ved isolering. Slankere elementer med betydelig mindre volum enn tradisjonelle konstruksjoner, vil ha problemer med å isolere på like effektiv måte som de sammenhengende, monolittiske konstruksjonselementene som tradisjonelt blir bygget. Når den naturlige isoleringsevnen for varme, vær og vind blir svekket av endring i topologi, vil dette måtte bli håndtert i sammenheng med byggets bygningsfysikk, energiutslipp og isoleringstiltak.

8.4 Økonomisk perspektiv

Studier konkluderer med at digitale byggemetoder som 3D-printing av betong, bare utkonkurrerer konvensjonelle metoder økonomisk for veggstrukturer med komplekse geometriske design. De konvensjonelle metodene er fortsatt mer produktive og økonomisk for enklere veggstrukturer som

undersøkt i 7.10. Kostnad- og produksjonsanalysen viste at kostnadsgrafene i Figur 7-43 for konvensjonell i metode har gjennomsnittlig høyere stigningskurve enn den korresponderende produktivetsgrafene i Figur 7-44. Denne sammenhengen tilsier at kostnaden blir mer påvirket enn produktiviteten når kompleksiteten øker, og når en da sammenligner dette med de robot 3D-printede alternativene. Videre kan det også tenkes at de konvensjonelle byggemetodene håndterer uforutsette hendelser og problemer bedre basert på erfaringsmessig kunnskap, noe den nye 3D-printe teknologien ikke innehar på samme måte i bransjen.

Et annet økonomisk aspekt som må bli tatt hensyn til vil være dyrere betongmix. 3D-printing vil generelt kreve et høyere innhold av bindemiddel i betongmixen, hvor dette er regnet som en av de større kostnadsområdene i betongblandingen.

Teknologien blir generelt ikke oppfattet som et reelt alternativ i dag, på grunn av dens utfordringer ved implementering i bransjen. Å implementere en slik og omfattende teknologiløsning, vil kreve ny opplæring og investeringer. På en annen side er slike implementeringskostnader også essensielle for å opprettholde innovasjon og konkurransefortrinn i bransjen, hvor det kan dras paralleller med introduksjonen og implementering av digitale verktøy som BIM.

3D-printing av betong kan som sagt også bli kategorisert som en type heldigital produksjon, hvor maskiner og programmer håndterer selve byggingen uten særlig bruk av manuell menneskelig arbeidskraft. Digitaliserte byggemetoder vil kunne produsere mer nøyaktige modeller med mindre avvik, og nærmere identisk sluttresultat sammenlignet med den modellerte 3D modellen. Færre avvik vil kunne gi økonomisk gevinst, da mengden opprettingsarbeid og unødvendige iterasjoner vil bli redusert. Gjennom økonomisk utvikling og innovering av byggebransjens teknologiske løsninger, vil teknologien da også være med på å støtte opp under FNs bærekraftsmål, spesifikt nummer 8 «anstendig arbeid og økonomisk vekst», og nummer 9 «industri, innovasjon og infrastruktur». Ettersom 3D-printing vil åpne muligheter for større materialbesparelser ved hjelp av topologi-optimalisering, vil bedrifter også kunne spare transportkostnader. Materialbesparelser på opp mot 50 % på visse elementer, vil som nevnt av Hyperion Robotics 7.12.2, gi betydelige kostnadsbesparelser for transport til og fra byggeplass. 3D-printing produserer også betydelig mindre avfall, som videre gir mindre deponeringstransport for avfall og tilknyttede kostnader. Til tross for flere presenterte resultater, vil det fortsatt anbefales å gjennomføre flere empiriske studier hvor fokuset ligger på «cradle-to-grave» og «life-cycle-costing» -analyser. Flere av de undersøkte resultatene og studiene i denne rapporten, bærer preg av en mangel på større analyser som inkluderer alle aspektene og kostnadsområdene gjennom livsløpet til de studerte prosjektene. Tidsomfanget av disse studiene er også ofte begrenset til å ta for seg «fødsel til ferdigstilling», og omhandler ikke brukslivet og det resterende livsløpet.

En annen underliggende utfordring, vil være mangel på standardiserte koder for slike byggemetoder, i alle fall i nærmeste fremtid. Hyperion Robotics nevner at de utfører deres design ved hjelp av metoden «design ved testing», hvilket innebærer å produsere testobjekter og fysisk bevise at disse elementene holder Eurokode standarder. Prosessen av «design ved testing» vil da føre med seg økte kostnader tilknyttet selve testprosessen, men også i selve designfasen, ettersom en ikke kan lene seg på Eurokodene på samme måte som tradisjonelle design.

8.5 Miljøperspektiv

I intervjuet med Hyperion Robotics 7.12.2, viser det seg at geopolymertbetong er estimert til å kunne redusere CO₂-utslippet til konvensjonell betong med 70-80%, for mer informasjon se vedlegg **D**). Dette vil igjen kunne bidra til FNs bærekraftsmål 12, som går ut på å utnytte ressurser på en mer effektiv måte, samt redusere sementforbruket i Norge knyttet til produksjonen av prefabrikkerte betongelementer.

På grunn av 3D-printerens kapasitet til å ikke øke miljøpåvirkningene ettersom kompleksiteten øker, anbefales det å anvende dette på høy kompleksitets design og variable design, for å utnytte den relative miljøpåvirkningen til konvensjonelle byggemetoder på best mulig måte. Det anbefales også å utnytte fornybare energikilder, noe som kan være særdeles stedsavhengig ettersom ikke alle strømnett garanterer strøm fra fornybare kilder. Det kan dermed være en muligheter for grønnere anvendelse på byggeplasser som befinner seg i nærheten av kilder til fornybar energi. Jo nærmere strømmen blir produsert, desto bedre utnyttelse blir det i forhold til effekttap over store kraftlinjedistanser. Slike material og energibesparelser vil stå direkte i tråd med FNs bærekraftsmål nummer 11 «Bærekraftige byer og lokalsamfunn», og 12 «Ansvarlig forbruk og produksjon». Ved hjelp av 3D-printing av betong som en form for «digital produksjon», vil det være lettere å knytte bygg opp mot deres digitale tvillinger gjennom BIM-verktøy. Dette vil igjen åpne flere muligheter for bedre overvåking og kontroll av byggets miljøutslipp, energiforbruk og renoveringsbehov, som igjen vil bidra til å dra ned byggets totale miljøpåvirkning gjennom dets livsløp.

Bruk av 3D-printerteknologien kan også påvirke arbeidsmarkedet, hvor behovet for arbeidskraft og arbeidstimer kan bli redusert. Teknologien kan også derimot skape flere muligheter for «høykvalitets arbeidsplasser» knyttet til produksjon av 3D-printere. Flere «høykvalitets arbeidsplasser» vil være med å fremme FNs bærekraftsmål nr. 3, god helse og livskvalitet. Det vil også være behov for ny arbeidskraft innen innovasjon, klargjøring av materialer, infrastruktur design og tekniske forsyninger.

3D-printere krever som sagt en betongmiks som innehar visse kvaliteter, og kan ofte sammenlignes med sprøytebetong for dens unike herdeevne. Bruk av spesialiserte betongmikser vil stille nye krav til miljøanalyser av disse, og hvilken miljømessig påvirkning et økende forbruk av slike materialer vil ha. Her vil det være kritisk å gjennomføre et stort utvalg av LCA «life-cycle-analysis», for å undersøke disse miljøpåvirkningene gjennom et helt livsløp «cradle to grave».

Flere studier viser seg også positive til bruk av resirkulerbare tilslag, nye materialer som geopolymertbetong og alternative bindemiddel som flyveaske, marmorslam og resirkulert betong. Det er vist en gjennomgående overveldende positivitet rundt dette i flere studier, hvilket får forfatterne til å lure på hva som gjør disse løsningene eksklusive til 3D-printing av betong, og hvorfor disse ikke kan bli benyttet på samme måte som ved konvensjonelle byggemetoder. Manglende standardisering, kan være en av årsakene til dette. Nye materialer må også godkjennes og standardiseres gjennom en langvarig prosess for kunne bli tilført i Eurokodene. Etter dagens situasjon å dømme, vil nye og innoverende materialer, på samme måte som innoverende teknologier, måtte gå gjennom prosessen «design ved testing». Dette tilfellet vil føre til at nye materialløsninger enklere kan bli anvendt i kombinasjon med 3D-printing, da disse designene likevel må igjennom en slik testprosess, som nevnt over i 7.10.



9. Konklusjon

For å besvare hovedspørsmålet har vi valgt å angripe dette gjennom fire underspørsmål:

Hvilke muligheter og begrensninger finnes for 3D-printing av betong?

3D-printing av betong vil skape nye teknologiske muligheter, og ofte redusere total byggetid i boligprosjekter sammenlignet med den konvensjonelle byggemetoden. Teknologien er blitt vellykket anvendt i ulike byggeprosjekter, men effektiviteten avhenger av: type 3D-printersystem, printerskala, betongkvalitet, dyseutforming, armeringsmetode samt utforming av konstruksjonen. En fordel med 3D-printing av betong, er at den styrker samhandlingen på BIM-plattformen, da den allerede vil inkludere produksjonen i planleggings- og designfasen. BIM-verktøyet kan brukes i samarbeid med 3D-printerteknologien til å digitalisere byggebransjen, ved å samle all informasjon på en felles plattform og automatisere prosessene i byggefasen.

Teknologien stiller andre krav til betongreologi i forhold til konvensjonell støping av betong, som gjør det problematisk å printe grove aggregattilslag. Andre utfordringer for 3D-printing av betong er armeringsbegrensninger. Printerene ekstruderer ofte kun et materiale av gangen, samt at dagens 3D-printere i hovedsak printer småskala konstruksjoner inntil tre etasjer. Krevende standardisering og manglende interesse og tillit i bransjen, setter begrensninger for anvendelse av teknologien. Videre er standardisering og sertifisering for 3D-printing under utvikling, hvilket betyr at dagens prosjekter må bli sertifisert og dokumentert gjennom «design ved testing». 3D-printing av betong vil også redusere behovet for fagarbeidere gjennom automatisering av manuelle arbeidsprosesser, og åpne flere muligheter for «høykvalitets arbeidsplasser», ettersom det blir et økt behov for personell med høyere utdanning.

Hva er fordeler og ulemper med å fullskala 3D-printe konstruksjoner, kontra printing og montering av enkeltelementer på byggeplass?

En hovedfordel med å 3D-printe fullskala betongkonstruksjoner på byggeplass, er at man reduserer kuldebroer som oppstår når enkeltelementer monteres eller hvor hjørner erstattes med buer. Det vil i tillegg ikke være behov for tyngre løftekjøretøy, i form av kranbil ved montering av betongelementer. For 3D-printing av betongkonstruksjoner over flere etasjer, vil fullskala 3D-printing i større grad begrense konstruksjonshøyden enn hva mobilkran rekkevidden utgjør for 3D-printing av enkeltelementer. Fullskala 3D-printing av takkonstruksjoner viser seg å kunne være en utfordring, da dagens printere i hovedsak ikke kan printe horisontalt.

Printerhastighet og printerskala vil være tilnærmet identiske for både fullskala 3D-printing, og printing av enkeltelementer på byggeplass. Det fremkommer likevel få tilfeller i dagens byggebransje hvor printing av enkeltelementer faktisk foregår på byggeplass. De 3D-printede betongelementene produseres stort sett i kontrollerte omgivelser eller nærliggende lokasjon. Dette setter videre begrensninger til hvilke dimensjoner av betongelementer som kan printes, dette med tanke på transporteringsalternativer til byggeplass. 3D-printing av enkeltkomponenter bør også utføres i kontrollert og beskyttet nærliggende lokasjon til byggeplass, med hensyn på ytre påvirkningsfaktorer,

kvalitetssikring og presisjon. Det anbefales å benytte en kombinasjon av fullskala 3D-printing, og printing av enkeltelementer på byggeplass, basert på konstruksjonstype, prosjektkarakteristikk, geografisk lokasjon samt vær- og klimaomgivelser.

Hvordan kan bransjen utnytte designmulighetene?

Anvendelse av 3D-printing i byggebransjen vil gi større frihet innen design og bygging av mer geometriske komplekse konstruksjoner, da printeren er upåvirket av designets kompleksitetsnivå. Design og bygging av topologioptimaliserte konstruksjoner, kan også åpne muligheter for slankere og lettere konstruksjoner. I kontrast til tradisjonelle byggemetoder, kan volumbesparelsene i disse tilfellene bli betraktelige. Nye muligheter for design gjennom topologioptimalisering og digital produksjon vil også føre med seg utfordringer innen standardisering, og vil kreve flere arbeidstimer i designfasen.

Hvordan kan økonomi- og miljøaspektet påvirke bruksområdene?

Utnyttelse av topologioptimaliserte strukturer kommer frem som det største mulighetsområdet sett i økonomisk- og miljøperspektiv. Topologioptimalisering av elementer, vil kunne gi store materialbesparelser for både fundament, søyler og bjelker, hvor besparelsene kan nå opp til 70%. 3D-printing av konstruksjoner vil kreve mindre råmaterialer og produsere mindre avfall, noe som vil redusere transportkostnader og transportutslipp. Prosessen for 3D-printing av betongkonstruksjoner har også et lavere energiforbruk sammenlignet med tradisjonelle byggemetoder, hvor den dominerende energitypen vil være elektrisk energi. 3D-printing kan også åpne muligheten for utnyttelse av nye miljøvennlige materialer som eksempelvis geopolymerbetong. Økonomiperspektivet viser mye usikkerhet rundt hvilken grad teknologien vil være økonomisk lønnsom. Mangel på flere empiriske studier gjør det vanskelig å danne et nøyaktig bilde. Det blir anbefalt å gjennomføre «cradle-to-grave» LCC analyser av flere prosjekter for å få et mer stabilt økonomisk bilde i fremtiden. Bruksområdet vil avhenge av å velge prosjekter som utnytter styrkene ved 3D-printing, som prosjekter av høy geometrisk kompleksitet, og med mulighet for optimalisering.

«Hvilke anvendelsesområder vil 3D-printing av betong kunne ha innenfor byggebransjen?»

Det finnes flere anvendelsesområder for 3D-printing av betong i byggebransjen, men per i dag er teknologien fortsatt under utvikling og har i den sammenheng liten utbredelse blant de utførende selskapene i bransjen. Teknologien har i hovedsak blitt benyttet til å printe veggelementer, søyler, fundamenter og bjelker. Fullskala 3D-printing av konstruksjoner er foreløpig mest benyttet i bransjen, og vil være fordelaktig å anvende i prosjekter av større skala sammenlignet med printing og montering av enkeltelementer på byggeplass. Anvendelsesområdet tilhørende 3D-printing av enkeltelementer på byggeplass, vil kunne benyttes på lik linje med fullskala printing, men effektiviteten er mindre dokumentert, og er kun benyttet i mindre prosjekter. Det vil også være mulig å bygge tidligere uoppnåelige former, estetikk og design, gjennom topologioptimalisering, uten ekstra påkjenning i selve byggefasen for 3D-printede prosjekter. Det vil være gunstig å anvende teknologien for produksjon av mer komplekse geometriske design, hvilket vil gi både miljø og økonomiske besparelser sammenlignet med tradisjonell metode. Teknologien vil også møte på flere implementeringsutfordringer, innenfor standardisering, kontrollering av klimaomgivelser relatert til printerpresisjon, samt begrenset konstruksjonskala.

10

10. Anbefalinger

Nedenfor presenteres punktvisse anbefalinger for videre forskning innen dette temaet. Anbefalingene baserer seg på funn gjort i litteraturstudie, intervjuer og egne synspunkter/drøftinger i diskusjonskapitlet.

- Det kunne vært interessant å gjennomføre en større studie om anvendelsesområdet 3D-printing av betong kan ha i anleggsbransjen, og videre sammenligne med funnene gjort i byggebransjen i denne rapporten.
- Gjennomføre en masteroppgave basert på intervjuer av de ulike aktørene i byggebransjen.
- Det kunne vært interessant og gjort en full LCA-analyse og LCC i samarbeid med bedrift, for å undersøke miljø og økonomi opp mot hverandre.
- Videre kan det være interessant å undersøke grundigere 3D-printing med geopolymerbetong.
- Dimensjonering av 3D-printing i forhold til Eurokoder.
- Tilgjengeliggjøre 3D-printere av betong for forskning og laboratorieundersøkelser på utdanningsinstitusjoner.
- Mer forskning på 3D-printing av preproduserte betongelementer på byggeplass.
- Videreutvikle dagens forskningsbaserte 3D-printemetoder av betong og styresystemer.
- Bidra til utarbeidelse av en felles standardisering for 3D-printing av betongen og tilhørende betongkvalitet.
- Undersøke dagens testmetoder som utføres for å innfri bestemmelsene i henhold til dagens gjeldende Eurokoder.
- Befaring ved oppførelse av en 3D-printet bygning/konstruksjon på byggeplass for en mer praktisk forståelse, der man får bredere innsikt i opptredende problemer og overblikk over prosessene som gjennomføres underveis.
- Økt forskning på anvendelse av konvensjonell byggemetode i en kombinasjon med bruk av 3D-printing av betong.
- Økt forskning på hvilken effekt bruken av konvensjonell byggemetode kombinert med 3D-printing av betong vil påvirke byggebransjen.

11

11. Referanser

- [1] K. F. Samset, *Prosjekt i tidligfasen*, 1. ed. NTNU, Trondheim: Vigmostad & Bjørke AS, 2008, s. 1-10.
- [2] T. K. Okland, "Kostnads- og byggetidsoverskridelser i Norge: En empirisk undersøkelse av utviklingen fra 1993-2015," *STATENS VEGVESENS RAPPORTER*, vol. 444, no. 1, pp. 1-10, 01.09.2017. [Online]. Available: <https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2670446/Rapport%20444%20Kostnads%20og%20byggetids%20overskridelser%20i%20Norge.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] Sinus magasinet. "3D-PRINTING PÅ BYGGEPLASSEN." 2021. [Online]. <https://www.sinusmagasinet.no/3d-printing-pa-byggeplassen/> (accessed 01.03.2022).
- [4] K. Queen. "What is digital manufacturing?" 2020. [Online]. <https://www.themanufacturer.com/articles/what-is-digital-manufacturing/> (accessed 03.05.2022).
- [5] Deloitte, "2019 Deloitte and MAPI Smart Factory Study," DELOITTE'S RESEARCH CENTER FOR ENERGY & INDUSTRIALS GROUP, USA, April, 2019. [Online]. Available: https://www2.deloitte.com/content/dam/insights/us/articles/6276_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study/DI_2019-Deloitte-and-MAPI-Smart-Factory-Study.pdf
- [6] Hyperion Robotics. "COLUMN EXPLORATIONS." 2020. [Online]. <https://www.hyperionrobotics.com/project/column-explorations> (accessed 01.05.2022).
- [7] 3DPrintehuset. "THE CONSTRUCTION OF EUROPE'S FIRST 3D PRINTED BUILDING HAS BEGUN AND IS ALMOST COMPLETE." 2018. [Online]. <https://3dprinthuset.dk/europes-first-%203d-printed-building/> (accessed 15.04.2022).
- [8] H. Solerød and M. Tønnessen. "verdens befolkning." i Store norske leksikon, 2022. [Online]. https://snl.no/verdens_befolkning (accessed 27.01.2022).
- [9] D. Malpass *et al.*, "REVERSALS OF FORTUNE," The World Bank Group, 23.12, 2020. [Online]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/34496/9781464816024.pdf>
- [10] World Commission on Environment, "Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future," Tech. rep. UN, 1990. Accessed: 27.01.2022. [Online]. Available: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>
- [11] FN Sambandet United Nations Association Of Norway. "FNs bærekraftsmål." 2021. [Online]. <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (accessed 27.01.2022).
- [12] A. K. Kvellheim and K. Bramslev. "Betong er en del av klimaløsningen." 2020. [Online]. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2020/-betong-er-en-del-av-klimalosningen/> (accessed 28.01.2022).

- [13] C. R. Gagg, "Cement and concrete as an engineering material: An historic appraisal and case study analysis," *Engineering Failure Analysis*, vol. 40, no. 1, pp. 114-140, May. 2014. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.004>.
- [14] R. G. Lucchini and L. London, "Global Occupational Health: Current Challenges and the Need for Urgent Action," *Annals of Global Health*, vol. 80, no. 4, pp. 251-256, 25.11. 2014. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aogh.2014.09.006>.
- [15] FN Sambandet United Nations Association Of Norway. "Hvordan ligger vi an?" 2022. [Online]. <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/baerekraftige-byer-og-lokalsamfunn> (accessed 29.01.2022).
- [16] T. S. JOHANNESSEN. "– Innen ti år vil de fleste nye bygg ha 3D-printede elementer." 31.01.2019. [Online]. <https://www.tu.no/artikler/innen-ti-ar-vil-de-fleste-nye-bygg-ha-3d-printede-elementer/456031?key=ha612Kqs> (accessed 29.01.2022).
- [17] FN Sambandet United Nations Association Of Norway. "Ansvarlig forbruk og produksjon." 2022. [Online]. <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon> (accessed 29.01.2022).
- [18] T. Campbell, C. Williams, O. Ivanova, and B. Garrett, "Could 3D Printing Change the World?," Atlantic Council, Strategic Foresight report October, 2011. [Online]. Available: https://www.atlanticcouncil.org/wp-content/uploads/2011/10/101711_ACUS_3DPrinting.PDF
- [19] Kholoudabdolqader. "Digital Model to Printed Artefact." 16.01.2016. [Online]. <https://libguides.baylor.edu/3dprinting101/process> (accessed 26.03.2022).
- [20] H. Lipson and M. Kurman, "Fabricated: The New World Of 3D Printing," *THE NEW WORLD OF 3D PRINTING*, vol. 1, no. 1, pp. 3-5, feb. 2011. [Online]. Available: <https://www.ilpoggio.net/sites/default/files/webform/pdf-fabricated-the-new-world-of-3d-printing-hod-lipson-melba-kurman-pdf-download-free-book-b18eef9.pdf>
- [21] 3DPrinterGEEKS. "15 Disadvantages of 3D Printing Technology." 2019. [Online]. https://3dprintergeeks.com/3d-printing-disadvantages/?fbclid=IwAR0IAghOEGc1TV4BZvesMhV4bAwwP_ql8z1tnRgIJB7sqAcKiY4HNa9-Tfw (accessed 24.05.2022).
- [22] M. Skeide, "How to Prepare the Construction Industry for 3D Printing of Concrete," Master, Institutt for maskin- og industriteknikk, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Trondheim, 3186, 2019. [Online]. Available: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/2623338>
- [23] Formlabs. "Guide to 3D Printing Materials: Types, Applications, and Properties." 2022. [Online]. <https://formlabs.com/blog/3d-printing-materials/> (accessed 20.02.2022).
- [24] R. Conrad. "Elastomers in 3D printing." 2022. [Online]. <https://www.elastomer.kuraray.com/applications/3d-printing/> (accessed 02.03.2022).
- [25] 3Dprinting.com. "3D Printing and Formula 1." 2020. [Online]. <https://3dprinting.com/automotive/3d-printing-and-formula-1/> (accessed 02.03.2022).
- [26] Race Tech Motorsport Engineering. "3D Printing Productivity Drives R&D at Renault Sport F1." 2021. [Online]. <https://www.racetechmag.com/article/3d-printing-productivity-drives-rd-at-renault-sport-f1/> (accessed 03.03.2022).

- [27] C. Buchanan and L. Gardner, "Metal 3D printing in construction: A review of methods, research, applications, opportunities and challenges," *Engineering Structures*, vol. 180, pp. 332-348, 02/01 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.045>.
- [28] NDLA. "Fresing." 2018. [Online]. <https://ndla.no/subject:1:84d4651b-fc52-4876-a066-f8567ecf79a6/topic:33bfce1a-118c-4027-9b84-d84cff4d3e78/topic:db100753-3f48-4cd1-9626-6cb1faacb533/> (accessed 24.05.2022).
- [29] Allplan. "3D print of wood - architecture of the future." 2017. [Online]. <https://blog.allplan.com/en/3d-print-of-wood-architecture-of-the-future> (accessed 15.03.2022).
- [30] R. Stormo. "3d-printet paviljong i Trondheim." 2016. [Online]. <https://3dpnorge.no/2016/09/3d-printet-paviljong-i-trondheim/> (accessed 07.03.2022).
- [31] M. J. Werkheiser, J. Dunn, M. P. Snyder, J. Edmunson, K. Cooper, and M. M. Johnston, "3D Printing In Zero-G ISS Technology Demonstration," *Aerospace Research Central*, vol. 1, no. 1, pp. 1-11, 01.08.2014. [Online]. doi: <https://doi.org/10.2514/6.2014-4470>.
- [32] T. Hullette and J. O'Connell. "The Best 3D Printed Tools of 2022." 2021. [Online]. <https://all3dp.com/2/3d-printed-tools-10-great-curated-models-to-3d-print/> (accessed 21.02.2022).
- [33] M. Sheikh and Y. Zahedi, "3D-Printing av betongÄr det möjligt att printa ut enfamiljshus i Sverige?," Professional, School of Science and Technology, Örebro University, Örebro, no.1, 2021. [Online]. Available: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:oru:diva-94403>
- [34] C. Clarke. "APIS COR 3D PRINTS A HOUSE IN ONE DAY." 2017. [Online]. <https://3dprintingindustry.com/?s=Russian+company+Apis+Cor+has+successfully+3D+printed+a+full-scale+house> (accessed 01.03.2022).
- [35] L. Garfield. "A startup invented this \$10,000 house that can be built in one day." 2017. [Online]. <https://www.businessinsider.com/house-built-one-day-apis-cor-2017-3?r=US&IR=T> (accessed 01.03.2022).
- [36] STIRworld. "PERI group makes Germany's first 3D-printed apartment building." 2020. [Online]. <https://www.stirworld.com/see-features-peri-group-makes-germany-s-first-3d-printed-apartment-building> (accessed 01.03.2022).
- [37] C. Valdivieso. "World's first 3D printed community project is officially underway." 2019. [Online]. <https://www.3dnatives.com/en/worlds-first-3d-printed-community-141220194/> (accessed 02.03.2022).
- [38] C. Valdivieso. "3D Printed Houses: All the Completed Projects on the Market." 2020. [Online]. <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-houses-market-250220204/#!> (accessed 02.03.2022).
- [39] Partnerskabet, "3D Printet Byggeri," Grøn omstillingsfond, Danmark, Februar, 2018. [Online]. Available: <http://www.3dprintetbyggeri.dk/pdf/Afslutningsrapport.pdf>
- [40] R. S. Aouf. "US military 3D prints concrete barracks on site." 2018. [Online]. <https://www.dezeen.com/2018/09/05/us-military-3d-prints-concrete-barracks-on-site-technology/> (accessed 02.03.2022).

- [41] C. Carlson. "Kamp C completes two-storey house 3D-printed in one piece in situ." 2020. [Online]. <https://www.dezeen.com/2020/12/22/kamp-c-completes-two-storey-house-3d-printed-one-piece-onsite/> (accessed 02.03.2022).
- [42] A. Muminova. "A house 3D printed in a single block in Belgium." 2020. [Online]. <https://www.3dnatives.com/en/3d-printed-house-in-belgium-230720204/#!> (accessed 02.03.2022).
- [43] K. Stevenson. "BigRep Gets Into Construction 3D Printing." 2021. [Online]. <https://www.fabbaloo.com/news/bigrep-gets-into-construction-3d-printing> (accessed 04.03.2022).
- [44] P. HANAPHY. "BIGREP AND FORWARD AM LAUNCH NEW CONCRETE FORMWORK FOR CONSTRUCTION 3D PRINTING." 2021. [Online]. <https://3dprintingindustry.com/?s=BIGREP+AND+FORWARD+AM+LAUNCH+NEW+CONCRETE+FORMWORK+FOR+CONSTRUCTION+3D+PRINTING> (accessed 04.03.2021).
- [45] P. Poullain, E. Paquet, S. Garnier, and B. Furet, "On site deployment of 3D printing for the building construction – The case of Yhnova TM," presented at the MATEC Web of Conferences, Nantes, France, 01.01, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201816301001>.
- [46] P. Kotecki. "A French family just became the first to permanently live in a 3D-printed home — take a look." 2018. [Online]. <https://www.businessinsider.com/french-family-is-first-to-live-in-3d-printed-home-2018-9?r=US&IR=T#the-university-of-nantes-teamed-up-with-the-city-council-and-a-local-housing-association-to-create-the-house-2> (accessed 21.02.2022).
- [47] COBOD. "THE BOD: Europe's first 3D printed building." 2022. [Online]. <https://cobod.com/the-bod/#> (accessed 05.02.2022).
- [48] C. Seburn. "ANNOTATED BIBLIOGRAPHY | APA FORMAT |." U.S.A. Smart Student, (Feb. 04, 2021). [Online Video]. https://www.youtube.com/watch?v=O8nO9rezBNk&list=RDCMUC_bzaUN4sHvKY8O7VPtKulg&index=4 (accessed 22.03.2022).
- [49] Monash University. "Researching for your literature review: Literature reviews." 2022. [Online]. <https://guides.lib.monash.edu/researching-for-your-literature-review/literature-review?fbclid=IwAR0Nc6BFdcn3Levhfociiidaa5LWZSISb-a7F8HH5V2zCw-6LOCgs-TXck0> (accessed 26.01, 2021).
- [50] J. E. Hirsch and G. B. Casal, "The meaning of the h-index," *International Journal of Clinical and Health Psychology*, vol. 14, no. 2, pp. 161–164, feb. 2014. [Online]. doi: [https://doi.org/10.1016/S1697-2600\(14\)70050-X](https://doi.org/10.1016/S1697-2600(14)70050-X).
- [51] R. Stormo. "Skal føre opp Norges første 3D-printete bygg." 2020. [Online]. <https://3dpnorge.no/2020/09/skal-fore-opp-norges-forste-3d-printete-bygg/> (accessed 16.02.2022).
- [52] A. Perrot and S. Amziane, *3D Printing in Concrete: General Considerations and Technologies*, 1. ed. France: Sofiane Amziane, 2019, pp. 1-40. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1002/9781119610755.ch1>.
- [53] A. Pierre, D. Weger, A. Perrot, and D. Lowke, "Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: analytical and experimental study," *Materials and Structures*, vol. 51, no. 1, pp. 1-12, jan. 2018. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1148-5>.

- [54] D. Weger, A. Pierre, A. Perrot, T. Kränkel, D. Lowke, and C. Gehlen, "Penetration of Cement Pastes into Particle-Beds: A Comparison of Penetration Models," *Materials*, vol. 14, no. 1, pp. 1-24, jan. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.3390/ma14020389>.
- [55] A. Straßer. "Selective Paste Intrusion, Targeted adjustment of workability and setting behavior of cement paste." 2021. [Online].
http://www.schleibinger.com/cmsimple/downloads/k2021_Strasser.pdf (accessed 29.01.2022).
- [56] S. Yu, H. Du, and J. Sanjayan, "Aggregate-bed 3D concrete printing with cement paste binder," *Cement and Concrete Research*, vol. 136, no. 2, pp. 1-10, jul. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106169>.
- [57] E. Århaug, T. J. Dymbe, and E. H. Paulsen, "Glidestøping med miljøbetong," Bachelor, Institutt for maskinteknikk, konstruksjonsteknikk og materialvitenskap, Universitetet i Stavanger, Stavanger, no. 1, 2021. [Online]. Available: <https://uis.brage.unit.no/uis-xmlui/handle/11250/2774337>
- [58] V. N. Nerella, M. Krause, M. Näther, and V. Mechtcherine, *Studying printability of fresh concrete for formwork free Concrete on-site 3D Printing technology (CONPrint3D)*, 2016, pp. 1-10. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/296817129_Studying_printability_of_fresh_concrete_for_formwork_free_Concrete_on-site_3D_Printing_technology_CONPrint3D.
- [59] V. N. Nerella and V. Mechtcherine, "Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D)," *3D Concrete Printing Technology*, vol. 1, no. 3, pp. 333-347, mar. 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128154816000166>
- [60] R. Stormo. "Lovende forstudie på tysk betongprinter." 2017. [Online]. <https://3dpnorge.no/2017/03/lovende-forstudie-pa-tysk-betongprinter/> (accessed 15.02.2022).
- [61] J. Xiao *et al.*, "Large-scale 3D printing concrete technology: Current status and future opportunities," *Cement and Concrete Composites*, vol. 122, no. 1, pp. 1-13 doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104115>.
- [62] A. R. Arunothayan, B. Nematollahi, R. Ranade, S. H. Bong, and J. Sanjayan, "Development of 3D-printable ultra-high performance fiber-reinforced concrete for digital construction," *Construction and Building Materials*, vol. 257, no. 1, pp. 1-1018, okt. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119546>.
- [63] A. K. Akhnoukh and C. Buckhalter, "Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges," *Case Studies in Construction Materials*, vol. 15, no. 4, p. 1, apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>.
- [64] G. Deivanai and K. B. Manikandan, "Additive printing for civil infrastructure: Assessing concrete mix design, printability and nozzle effects," Master, Institutt for industri- og produksjonssystemteknikk, Iowa State University, Iowa, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://www.imse.iastate.edu/files/2021/03/GopalakrishnanDeivanaiKarthickManikandan-thesis.pdf>
- [65] T. Marchment and J. Sanjayan, "Penetration Reinforcing Method for 3D Concrete Printing," in *Second RILEM International Conference on Concrete and Digital Fabrication*, Cham F. P.

- Bos, S. S. Lucas, R. J. M. Wolfs, and T. A. M. Salet, Eds., 2020: Springer International Publishing, pp. 680-690, [Online], doi: https://doi.org/10.1007/978-3-030-49916-7_68.
- [66] SINTEF. "Bygg- og anleggsbransjen må lære industrialisering av andre." 2017. [Online]. <https://www.sintef.no/siste-nytt/2017/bygg-og-anleggsbransjen-ma-lare-industrialisering-av-andre/> (accessed 03.02.2022).
- [67] H. Lemu, *Beyond Rapid Prototyping: Study of prospects and challenges of 3D printing in functional part fabrication*, 1. ed. Narvik: Hirpa G. Lemu, 2016, pp. 138-143. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2991/iwama-16.2016.25>.
- [68] D. Fakhrzad, "Digitalisering og Implementering av BIM," Master, Institutt for ingeniørvitenskap, Universitetet i Agder, Grimstad, no. 1, 2020. [Online]. Available: <https://uia.brage.unit.no/uia-xmlui/handle/11250/2679217>
- [69] V. Mechtcherine, V. N. Nerella, F. Will, M. Näther, J. Otto, and M. Krause, "Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing," *Automation in Construction*, vol. 107, no. 3, pp. 1-100, nov. 2019. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>.
- [70] M. Ramadany and M. S. Bajjou, "Applicability and integration of concrete additive manufacturing in construction industry: A case study," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B Journal of Engineering Manufacture*, vol. 235, no. 1, pp. 1-11, jan. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1177/0954405420986102>.
- [71] B. T. Wang and M. Rimmer, "3D Printing and Housing: Intellectual Property and Construction Law," *Automating Cities: Design, Construction, Operation and Future Impact*, B. T. Wang and C. M. Wang, Eds., 3. ed. Singapore: Springer Singapore, 2021, pp. 113-140. [Online]. Available: https://doi.org/10.1007/978-981-15-8670-5_5.
- [72] A. S. Alchaar and A. K. Al-Tamimi, "Mechanical properties of 3D printed concrete in hot temperatures," *Construction and Building Materials*, vol. 266, no. 1, pp. 1-13, jan. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120991>.
- [73] C. Scott. "3D Printhuset Introduces the BOD2 Construction 3D Printer." 2018. [Online]. <https://3dprint.com/220208/3d-printhuset-bod2-3d-printer/> (accessed 07.02.2022).
- [74] A. Goidea. "The BOD." 2017. [Online]. <https://anagoidea.com/The-BOD> (accessed 09.02.2022).
- [75] G. V. Hjelseng, "Plasstøpt vs. prefabrikkert betong," Master, Institutt for bygg, anlegg og transport, Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet i Trondheim, Trondheim, no. 1, 2014. [Online]. Available: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmlui/handle/11250/233214>
- [76] A. Anton, L. Reiter, T. Wangler, V. Frangez, R. J. Flatt, and B. Dillenburger, "A 3D concrete printing prefabrication platform for bespoke columns," *Automation in Construction*, vol. 122, no. 2, pp. 1-16, feb. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103467>.
- [77] A. Anton *et al.*, *Concrete Choreography: Prefabrication of 3D-Printed Columns*, 2. ed. Zurich: UCL Press, 2020, pp. 286-293. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2307/j.ctv13xpsvw.41>.
- [78] CyBe Construction. "Design & Engineering." 2022. [Online]. <https://cybe.eu/service/design-engineering/> (accessed 13.02.2022).

- [79] B. V. Overbeeke, "Construction: Holland's 3D-printed concrete house welcomes first occupants," *Engineering & Technology*, vol. 16, no. 5, pp. 8-8, Jun. 2022. [Online]. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9690360>
- [80] ABC/Wires. "Netherlands unveils home 3D printed with concrete, and it wants to use the technology to house its growing population." 2021. [Online]. <https://www.abc.net.au/news/2021-05-01/3d-printed-home-in-dutch-city/100109484> (accessed 07.03.2022).
- [81] J. Parkes. "First tenants move into 3D-printed home in Eindhoven." 2021. [Online]. <https://www.dezeen.com/2021/05/06/3d-printed-home-project-milestone-eindhoven/> (accessed 07.03.2022).
- [82] G. S. Ortega, J. Alonso, N. Olsson, and J. Tenorio, "The Application of 3D-Printing Techniques in the Manufacturing of Cement-Based Construction Products and Experiences Based on the Assessment of Such Products," *Buildings*, vol. 10, no. 9, pp. 1-18, aug. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.3390/buildings10090144>.
- [83] M. S. Khan, F. Sanchez, and H. Zhou, "3-D printing of concrete: Beyond horizons," *Cement and Concrete Research*, vol. 133, no. 2, pp. 1-14, Jul. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106070>.
- [84] P. HANAPHY. "ORNL GAINS PATENT FOR 'SKYBAAM' CABLE-HOISTED CONSTRUCTION 3D PRINTING TECHNOLOGY." 2022. [Online]. <https://3dprintingindustry.com/news/ornl-gains-patent-for-skybaam-cable-hoisted-construction-3d-printing-technology-203113/> (accessed 14.03.2022).
- [85] B. P. Phillip Chesser, Randy Lind, Alex Roschli, Celeste Atkins, Alex Boulger, and P. L. Paritosh Mhatre, "SKYBAAM LARGE-SCALE FIELDABLE DEPOSITION PLATFORM SYSTEM ARCHITECTURE," presented at the Conference: 30th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference, Austin, Texas, United States of America, 08.01, 2019. [Online]. Available: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1607073>.
- [86] Engineering Product design. "Introduction to Topology Optimization." 2022. [Online]. <https://engineeringproductdesign.com/knowledge-base/topology-optimization/> (accessed 20.03. 2022).
- [87] G. Vantghem, W. D. Corte, E. Shakourb, and O. Amirb, "3D printing of a post-tensioned concrete girder designed by topology optimization," *Automation in Construction*, vol. 112, no. 1, pp. 1-11, jan. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103084>.
- [88] A.S.J.Suiker, "Mechanical Performance of Wall Structures in 3D Printing Processes: Theory, Design Tools and Experiments," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 137, no. 4, pp. 145-170, jan. 2018. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.010>.
- [89] Nicolas Roussel, "Rheological requirements for printable concretes," *Cement and Concrete Research*, vol. 112, no. 1, pp. 76-85, mai. 2018. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.005>.
- [90] R.J.M.Wolfs, F.P.Bos, and T.A.M.Salet, "Early age mechanical behaviour of 3D printed concrete: Numerical modelling and experimental testing," *Cement and Concrete Research*, vol. 106, no. 5, pp. 103-116, feb. 2017. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.02.001>.

- [91] R.J.M.Wolfs, F.P.Bos, and T.A.M.Salet, "Triaxial compression testing on early age concrete for numerical analysis of 3D concrete printing," *Cement and Concrete Composites*, vol. 104, no. 10, p. 104, jun. 2019. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103344>.
- [92] I. K. Georgios Kazakis, Stefanos Sotiropoulos, Nikos D.Lagaros, "Topology optimization aided structural design: Interpretation, computational aspects and 3D printing," *Interpretation, computational aspects and 3D printing*, vol. 3, no. 10, pp. 1-10, okt. 2017. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2017.e00431>.
- [93] G. Vantghem, T. Ooms, and W. D. Corte, "FEM modelling techniques for simulation of 3D concrete printing," *Concrete Structures for Resilient Society, Proceedings of the fib symposium 2020*, vol. 1, no. 1, pp. 1-8, feb. 2021. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/1854/LU-8693775>
- [94] P. Wu, J. Wang, and X. Wang, "A critical review of the use of 3-D printing in the construction industry," *Automation in Construction*, vol. 68, no. 2, pp. 21-31, apr. 2016. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.04.005>.
- [95] Multiconsult. "Veiledning til praktisk bruk av LCC." 2006. [Online]. https://www.byggemiljo.no/wp-content/uploads/2014/10/24_Byggemiljo-LCC-med-energieksempel.pdf (accessed 04.04.2022).
- [96] R. A. Buswell, R. C. Soar, A. G. F. Gibb, and A. Thorpe, "Freeform Construction: Mega-scale Rapid Manufacturing for construction," *Automation in Construction*, vol. 16, no. 2, pp. 224-231, mar. 2007. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.05.002>.
- [97] M. K. Mohan, A. V. Rahul, G. D. Schutter, and K. V. Tittelboom, "Extrusion-based concrete 3D printing from a material perspective: A state-of-the-art review," *Cement and Concrete Composites*, vol. 115, no. 10, pp. 11-13, jan. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103855>.
- [98] Y. Weng *et al.*, "Comparative economic, environmental and productivity assessment of a concrete bathroom unit fabricated through 3D printing and a precast approach," *Journal of Cleaner Production*, vol. 261, no. 12, pp. 1-33, jul. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121245>.
- [99] B. G. d. Soto, I. Agustí-Juan, J. Hunhevicz, S. Joss, K. Graser, and B. G. Habert, "Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall," *Automation in Construction*, vol. 92, no. 1, pp. 297-311, mai. 2018. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>.
- [100] G. D. Schutter, K. Lesage, V. Mechtcherine, V. N. Nerella, G. Habert, and Isolda Agusti-Juan, "Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials," *Cement and Concrete Research*, vol. 112, no. 7, pp. 25-36, okt. 2018. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.06.001>.
- [101] H. Abdalla, K. P. Fattah, M. Abdallah, and A. K. Tamimi, "Environmental Footprint and Economics of a Full-Scale 3D-Printed House," *Sustainability 2021*, vol. 13, no. 21, pp. 1-3, sep. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.3390/su132111978>.
- [102] I. V. Muralikrishna and V. Manickam, *Environmental Management*, India: Butterworth-Heinemann, 2017, pp. 57-75. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811989-1.00005-1>.

- [103] H. Alhumayani, M. Gomaa, V. Soebarto, and W. Jabi, "Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete," *Journal of Cleaner Production*, vol. 270, no. 12, pp. 5-11, okt. 2020. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122463>.
- [104] S. A. Khan, Muammer, KoçSami, and G.Al-Ghamdi, "Sustainability assessment, potentials and challenges of 3D printed concrete structures: A systematic review for built environmental applications," *Journal of Cleaner Production*, vol. 303, no. 2, pp. 6-12, jun. 2021. [Online]. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127027>.
- [105] The Editors of Encyclopaedia Britannica. "Portland cement." 2019. [Online]. <https://www.britannica.com/technology/portland-cement> (accessed 20.04.2022).

12

12. Vedlegg

Vedlegg er vedlagt i zip. filen med følgende nummerering: **A), B), C), D).**

A. Intervjuer

- A1 Intervju AF-Gruppen
- A2 Intervju Hyperion Robotics

B. Publikasjon NB 38

C. Loggbok

D. “Radix”-prosjektrapport fra Hyperion Robotics