

Knut-Ivar Halten Græsdal
Jan Erik Holter
Bjørn Petter Korsedal

En mer bærekraftig byggenæring

3D-printing med betong og cob

Desember 2020

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk

Bacheloroppgave

2020



Knut-Ivar Halten Græsdal
Jan Erik Holter
Bjørn Petter Korsedal

En mer bærekraftig byggenæring

3D-printing med betong og cob

Bacheloroppgave
Desember 2020

NTNU

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet.
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for vareproduksjon og byggteknikk



Kunnskap for en bedre verden

Oppgavens tittel: En mer bærekraftig byggenæring <i>3D-printing med betong og cob.</i>	Dato: 15.12.2020	Antall sider: 77	
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	X
Navn: Knut-Ivar Halten Græsdal, Jan Erik Holter, Bjørn Petter Korsedal			
Veileder: Fred Johansen			

Sammendrag:

Vi har skrevet denne oppgaven med tanke på at den skal være en forstudie for videre fordypende arbeider innen temaet. Tittelen «En mer bærekraftig byggenæring - 3D-printing med betong og cob» gjenspeiler at temaet er 3D-printing av bygningskonstruksjoner, og antyder at teknologien 3DCP kan være med på å bidra til en mer bærekraftig utvikling innen byggenæringen.

Oppgavens problemstilling følger opp tittelen, og lyder som følgende: *Hvordan kan additiv tilvirkning med 3D-printing av betong gjøre byggenæringen mer bærekraftig?*

For å belyse og besvare problemstillingen har vi utført en tradisjonell litteraturstudie der vi gjennomgår dagens status innen bruk av betong og cob som materiale for 3D-printing, idet har vi også studert hvilke aktører og teknologi som er lengst fremme. Som en forlengelse av dette har vi sett nærmere på et spesielt bærekraftprosjekt hvor det er 3D-printet et hus med cob som materiale. Med innspill fra MAPEI, og en av de ledende aktørene innen 3D-printing, WASP, har vi for videre utarbeidelse av en LCA-analyse, satt opp en enkel sammenstilling for prosjektets CO₂-avtrykk.

3DCP er en forholdsvis ung teknologi som fortsatt er preget av utprøving og forskning. Det fremstår sannsynlig at vi vil se sterk vekst og utvikling av denne teknologien i de kommende årene, også for printing med cob som materiale. For å finne ut om 3DCP kan bli en teknologi for bærekraftig bygging fant vi det nyttig å også se nærmere på betong som byggemateriale. Sement- og betongindustrien har høyt fokus på reduksjon av CO₂-utslippene, og det foregår spennende forskning på nye betongsammensetninger. Betong er det byggematerialet som har vært mest brukt i fortid, nåtid, og vil antakelig være det i fremtiden også.

Stikkord:

Bærekraft
Additiv tilvirkning
3D-printing (3DCP)
Betong og cob

Knut-Ivar Halten Græsdal, Jan Erik Holter, Bjørn Petter Korsedal
 (sign.)

ABSTRACT

This thesis is written as a preliminary study for further in-depth research within the topic. The title "A more sustainable construction industry - 3D printing with concrete and cob" reflects that the theme is 3D printing of building structures and suggests that the 3DCP technology can contribute to a more sustainable development in the construction industry.

The thesis problem formulation is connected to the title, and reads as follows:

How can additive manufacturing with 3D printing of concrete make the construction industry more sustainable?

To clarify and address the thesis problem formulation, we have carried out a traditional literature study in which we review the current status of the use of concrete and cob as a material for 3D printing, with this we have also studied which companies and technology are at the forefront. As an additional contribution we have studied a sustainability project where a house is 3D printed with cob as building material. With input from MAPEI, and with one of the leading developers of 3D printing systems, WASP, we have for further preparation of an LCA analysis, set up a simple compilation for the project's CO₂ footprint.

3DCP is a relatively young technology that is still characterized by testing and research. It seems likely that we will see strong growth and development of this technology in the coming years, also for printing with cob as material. To find out if 3DCP can become a technology for sustainable construction, we found it useful to take a closer look at concrete as a building material. The cement and concrete industry have a high focus on reducing CO₂ emissions, and there is exciting research on new concrete compositions. Concrete is the building material that has been most used in the past, present, and will probably be in the future as well.

FORORD

Denne rapporten er vår avsluttende bacheloroppgave ved studiet Bærekraftige Byggeprosesser ved NTNU Gjøvik, høsten 2020. Gjennom hele studiet har det vokst på oss at miljøvennlige løsninger og ny teknologi blir stadig viktigere. Det falt oss derfor naturlig at vi med denne oppgaven forsøkte å finne bærekraftige løsninger for fremtidens byggenæring.

Vi vil takke veileder Fred Johansen for innspill, samt Ivanna Baturynska og Mohammad Hajmohammadian (alle fra NTNU) for gode diskusjoner underveis i prosessen. I tillegg vil vi rette en stor takk til Thomas Beck hos Mapei for gode diskusjoner, og for å ha satt oss i kontakt med Mapei i Italia. Vi takker også Alberto Chiusoli i WASP for alle gode innspill og velvilje til å dele av sin kompetanse og relevant informasjon.

INNHALDSFORTEGNELSE

Abstract	II
Forord	III
Innholdsfortegnelse	IV
Figurliste	VI
Tabelliste	VII
Definisjoner	VIII
Forkortelser	IX
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Presentasjon av problemstillingen med begrunnelse	1
1.2.1 Forskningsspørsmål	1
1.3 Introduksjon	2
1.4 Presentasjon av 3dcp	4
1.4.1 Opprinnelse	4
1.4.2 Materialene	5
1.4.3 Tilsetninger	7
1.4.4 Armering	9
1.5 Besvarelsen i samfunnsmessig sammenheng	10
1.6 Omfang og avgrensninger	12
1.7 Oppbyggingen av rapporten	13
2 Review	15
2.1 Metode.....	15
2.1.1 Litteraturstudie	15
2.1.2 Mini case-studie	16
2.1.3 Oppgavens troverdighet	16
2.1.4 Vurdering av eget arbeid.....	17
2.2 Introduksjon til 3DCP-teknologien – kategorier, begreper og uttrykk	17
2.2.1 Grad av frihet	18
2.2.2 Konstruksjonssted	19
2.2.3 Fabrikasjonstilnærming.....	20
2.3 Printere	21
2.4 Ledende Aktører.....	26
2.5 3DCP som et ledd i å nå bærekraftsmålene.....	32

2.5.1	Redusert materialforbruk	33
2.5.2	Sementerstatninger	34
2.5.3	Armering	35
2.5.4	Nyskapende arkitektur	36
2.5.5	Økt levetid på betongen	37
2.5.6	Kortreiste materialer	39
2.5.7	Robotisert prefabrikasjon og sammenstilling	41
2.5.8	Sirkulærøkonomi og klimavennlig materialbruk	41
2.5.9	LCA-analyser og vurdering av utslipp	43
2.5.10	Relevante bærekraftsmål	47
2.6	TECLA – utslipp fra et 3DCP-prosjekt	47
2.6.1	Konseptet	48
2.6.2	Kommersialisering og økonomi	49
2.6.3	Våre resultater	49
3	Drøfting	52
3.1	Printere / aktører / tilnærming	52
3.2	Materialforbruk og CO ₂ -utslipp	57
3.3	Karbonatisering	63
3.4	Energiforbruk	65
3.5	TECLA – En enkel vurdering av utslipp	67
4	Konklusjon	70
4.1	Videre arbeid	71
5	Vedlegg	77

FIGURLISTE

Figur 1: Delvis digitalisering av byggebransjen (Kloft et al., 2020).	3
Figur 2: Full digitalisering, fra prosjektering til produksjon (Kloft et al., 2020).	3
Figur 3: Eksempel på materialblanding som har krympet (De Schutter et al., 2018).....	6
Figur 4: Eksempel på en videreutviklet materialblanding og printerteknologi, utført av selskapet XtreeE (De Schutter et al., 2018).	7
Figur 5: Printedysens utforming har betydning for materiallagenes kontaktflate og konstruksjonens stabilitet (Paul et al., 2018).	8
Figur 6: Ulike former for armering (Souza et al., 2020).....	10
Figur 7: Skisse av printing med overheng som skaper kurvatur.(Partnerskabet, 2018).	18
Figur 8: Skisse av fri printing i tre dimensjoner Hentet fra (Partnerskabet, 2018).....	19
Figur 9: Skisse av printing med frie objekter (Partnerskabet, 2018).	19
Figur 10: En prinsippskisse av gantry-printer (Partnerskabet, 2018).	21
Figur 11 - Dette er gantryprintereren BOD2 fra danske COBOD. Printereren er 34,9 meter lang. (COBOD, 2020).....	22
Figur 12 - En skisse av en delta gantry-printer.(Partnerskabet, 2018).....	22
Figur 13 - Eksempel på kabelsuspensjonsprinter og konseptet bak. (Partnerskabet, 2018)....	23
Figur 14: Skisse av en robotarm-printer (Partnerskabet, 2018).	23
Figur 15: Oppsett for robotarmprinter (Lu et al., 2019).	24
<i>Figur 16: Eksempel på dødsone for robotarmprinter sett i sammenheng med omriss av et bygg (Partnerskabet, 2018).</i>	<i>24</i>
<i>Figur 17: Illustrasjon av tilnærmingen for printing in-situ for CONPrint3D (Mechtcherine et al., 2019).</i>	<i>25</i>
Figur 18: Skisse som viser mobile robotic printer (Partnerskabet, 2018).....	25
Figur 19 - Denne skissen viser hvordan en fabrikkasjonsprosess med en klatrende robotprinter kan se ut.(Vélez, Toala og Zagal, 2020)	26
<i>Figur 20: To etasjers villa printet av HuaShang Tengda (Florea et al., 2021)</i>	<i>30</i>
Figur 21: Visuelt uttrykk for boligprosjektet "Project Milestone". Kreditering: Houben/Van Mierlo architecten, A.I: YuconVR (3dprinthouse, 2018)	31
Figur 22: Her testes forskjellig type betong og dyser for Project Milestone. Til dette er det benyttet en gantry-printer. (3dprinthouse, 2018)	31
Figur 23: "Office of the future" (Sakin og Kiroglu, 2017)	37

Figur 24: Prosjekt Milestone. Hus tenkt oppført i Meerhoven, Nederland (Boffey, 2018).....	37
Figur 26: Trajans Marked i Roma (Bjørnstad, 2014).	39
Figur 30: Klimaavtrykk fra tre ulike 3DCP-betonger, sammenliknet mot tradisjonell betong (Alhumayani et al., 2020, s. 11).....	45
Figur 32: En mulig inndeling for LCA for 3DCP (Kuzmenko et al., 2020).....	46
Figur 33: Nye former (Goodier, 2020).	48
Figur 34: Printeren Crane WASP	49
Figur 35: Printeren Crane WASP kan settes sammen av flere moduler	49
Figur 36: Byggenæringens energiforbruk, i et bærekraftig utviklingsscenario 2020-2030 (iea.org, 2020)	66

TABELLISTE

Tabell 1: Forklaring på variasjonene av konstruksjonssted.	20
Tabell 2: Forklaring på de forskjellige tilnærmingene en 3D-printer kan benyttes.....	20
Tabell 3: Aktører som har kommet langt innen 3D-printing, global oversikt.	26
Tabell 4: Betong-komponentenes ulike miljøpåvirkninger (Alhumayani et al., 2020, s. 10)..	34
Tabell 5: Forbruk masse for 1 m ² vegg (Alhumayani et al., 2020).....	34
Tabell 6: GWP-verdier for strå, sand, leirholdig jord og leire (Ben-Alon et al., 2019).....	41
Tabell 7: LCA for type betong B30 (EPD.Norge, 2020).....	44
Tabell 8: Prosentvis miljø-påvirkning leirklining (Cob), 3DPC, 3DP Cob i forhold til 1 m ² tradisjonell betong vegg (Alhumayani et al., 2020, s. 7).	45
Tabell 9 - TECLA - antall kWh brukt.....	51
Tabell 10 - TECLA, CO ₂ -utslipp	51
Tabell 11 - Utslipp av CO ₂ , etter type vegg.....	68
Tabell 12: Prosentvis forbedring av tradisjonell cob mot 3D cob (Alhumayani et al., 2020).69	69

DEFINISJONER

GWP	<p><i>Global warming potential</i> er et mål på oppvarmingseffekten som de ulike drivhusgassene har på atmosfæren. GWP-verdiene angir akkumulert oppvarmingseffekt sammenlignet med effekten av karbondioksid (CO₂) over en valgt tidshorison, gjerne mellom 20 og 500 år. GWP – Store norske leksikon (snl.no)</p>
Kalsinering	<p>Varmebehandling av faste råstoffer hvor krystallstrukturen omdannes slik at stoffe blir tunge og kjemisk motstandsdyktige. Bortbrenning av uønsket, organisk material eller avdriving av vann eller gasser er ofte formålet. Kalsinering – Store norske leksikon (snl.no) CO₂-utslipp fra betong kommer i overveiende grad fra en <i>kjemisk prosess som finner sted når grunnmaterialet for sementproduksjon, kalkstein, varmes opp til ca. 1450 grader.</i> https://spenncon.no/spenncon/om-spencon/enok-losninger/betong-og-miljo/</p>
Karbonatisering	<p><i>Kjemisk reaksjon mellom herdet betong og karbondioksid.</i> Karbonatisering er en prosess der kalsiumhydroksid Ca(OH)₂, i mørtel eller betong reagerer med karbondioksid i luften slik at det dannes kalsiumkarbonat, CaCO₃, og vann. Karbonatiseringen av armert betong fører til at pH-verdien synker fra ca. 13 til ca. 9. Derved opphører betongens korrosjonshindrende virkning og armeringen kan begynne å ruste. Dette fører til oppsprekking og senere avskalling av armeringsoverdekningen. karbonatisering – Store norske leksikon (snl.no)</p>
Tiksotropi	<p>Er den egenskap hos en væske at den blir mer tyntflytende dersom den utsettes for skjærspenninger. Dette kan skje ved omrøring eller risting. Væsken tykner igjen dersom den får stå i ro. tiksotropi – Store norske leksikon (snl.no)</p>

FORKORTELSER

Additiv printing	Printing av et materiale lag for lag
AM	Additive manufacturing - Additiv tilvirkning
BIM	Bygnings Informasjons Modelling/ modell
COB	En bærekraftig jordbasert materialblanding, (i Norge, fra gammelt av, kalt leirklining)
CO ₂	Karbondioksid
Flygeaske	Biprodukt av forbrenningsprosess med stor andel silisiumdioksid og kalsiumoksid som resultat. Gjerne som avfallsprodukt fra kullkraft.
Industri 4.0	Den fjerde industrielle revolusjonen
LCA	Life Cycle Assessment - Livssyklusanalyse av miljø og ressurspåvirkning.
Portlandsement	I dag en fellesbetegnelse for vanlige sementblandinger. Opprinnelig fra Portland-stein, tatt ut fra øya Portland i England
SC3DP	Shotcrete - Sprøytebetong
SM	Subtractive manufacturing – Subtraktiv tilvirkning/ Fresing etc.
UHPC	Ultra-High-Performance Concrete. Betong med trykkstyrke >140-150 MPa.
VMA	Viscosity modifying agent / Viskositetsmodifiserende tilsetningsstoffer
3D	Tredimensjonal
3DCP	3D Concrete Printing - 3D printing av betong

1 INNLEDNING

I dette kapittelet presenterer vi kort bakgrunnen for hvorfor vi skriver om valgt tema, før vi presenterer oppgavens problemstilling. Videre gir vi en god introduksjon og presentasjon av valgt tema, med omfang og avgrensninger, samt en liten oversikt over oppgavens struktur.

1.1 BAKGRUNN

Additiv tilvirkning har en stund vært brukt i industrien, og i de senere år har det blitt økt fokus på bruk av additiv tilvirkning for bygninger og større konstruksjoner. 3D-printing med materialer som betong eller betonglignende materialer tilbyr en annen tilnærming til materialbruk og utforming, men også når det gjelder produksjon og automatisering. Vi ønsker å kartlegge hva status er og bli bedre kjent med mulighetene som ligger i denne teknologien fordi vi ser dette som interessant i et bærekraftperspektiv, men også fordi dette er noe som oppdragsgiver ønsker at vi undersøker nærmere. Fokuset vårt i denne oppgaven er å utarbeide en forstudie som et grunnlag for videre arbeid.

1.2 PRESENTASJON AV PROBLEMSTILLINGEN MED BEGRUNNELSE

FN opplyser at byggesektoren i 2018 stod for 40% av de globale CO₂-utslippene og 36% av det globale energiforbruket. For å nå målene om å stoppe klimautslipp innen 2030, og nå løftet som ligger i Parisavtalen, er det nødvendig å redusere utslipp der man kan.

Byggenæringen er stor og berører mange verden over. I oppgaven ønsker vi å se nærmere på hvor utbredt 3D-printing av bygninger er, og om denne teknologien vil kunne påvirke byggenæringen til å bli mer bærekraftig slik at det globale klimautslippet kan reduseres.

Problemstilling:

Hvordan kan additiv tilvirkning med 3D-printing med betong og cob gjøre byggenæringen mer bærekraftig?

1.2.1 Forskningsspørsmål

- *Hvor står denne teknologien i dag?*

Hvordan kan 3DCP-teknologien og videreutvikling av betong som byggemateriale føre til reduksjon i klimagassutslippene?

1.3 INTRODUKSJON

Begrepet Bærekraftig utvikling ble for første gang brukt av Brundtland-kommisjonens sluttrapport i 1987, «Vår felles framtid». Rapporten sier blant annet at ressursbruken og energiforbruket i de rike landene er for stort, og at dagens behov ikke må gå på bekostning av kommende generasjoner, hvilket også er prinsippet for begrepet Bærekraftig utvikling. I de senere år har tanken om bærekraftig utvikling fått betydelig gjennomslag, noe vi nå også ser igjen i utviklingen av FNs bærekraftsmål. En viktig del av dette består i at klimaendringene skal stoppes innen 2030. Dette er et svært ambisiøst mål, og det må derfor skje veldig mye på kort tid dersom man skal klare å innfri denne målsetningen.

FNs Miljøprogram, United Nations Environmental Programme (UNEP), sier at byggesektoren i 2018 stod for 40% av CO₂-utslippene og 36% av det globale energiforbruket (FN, 2020). Og ifølge Alhumayani *et al.* (2020) har det globale energiforbruket mer enn doblet seg siden 2010. Samtidig som Byggenæringens Landsforening (BNL) gir ut sin analyse «Sirkulær økonomi i byggenæringen» (BNL, 2019), sier Direktør for Energi og Miljøpolitikk i BNL, Rannveig R. Landet, at byggenæringens ressursbruk og økonomiske produksjon holder samme vekstkurve, og at om vi skal ha fortsatt vekst samtidig som ressursbruken skal reduseres, så er det mye å ta tak i. Byggenæringen sakter akterut i forhold til andre næringer, og som det påpekes i en studie av Kloft *et al.* (2020), pusher andre industrisektorer integrasjon av Industri 4.0, samtidig som byggenæringen nesten står fastlåst igjen, med alt for mange manuelle prosesser i utførelsesfasen. Som et resultat av dette, uteblir den øvrige teknologiutviklingens produktivitetsvinst for byggenæringen.

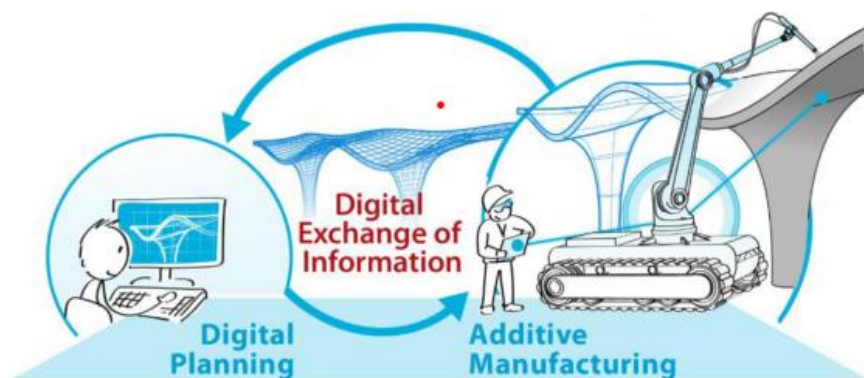
Bygnings Informasjons Modelling (BIM), har gjort sitt inntog i byggenæringen slik at prosjekteringsprosessen nå er på god vei til å bli digitalisert. Men for at næringen skal få fullt utbytte av digitaliseringen og de teknologiske fremskrittene, er det i byggeprosessen nødvendig å digitalisere hele veien, fra planlegging til produksjon og ferdigstillelse. Som også Kloft *et al.* (2020) sier, vil en videre automatisering av produksjonsfasen være avgjørende for at næringen skal kunne øke sin produktivitet.



Figur 1: Delvis digitalisering av byggebransjen (Kloft et al., 2020).

Digitaliseringen av prosjekteringsprosessen, har ved hjelp av BIM, gjort at en har fått bedre kontroll, og raskere og sikrere kommunikasjon mellom byggeledelse og produksjon, ved at en har all informasjon samlet i en modell. Dette har ført til økt effektivitet og mindre feil. Selve produksjonen er imidlertid ikke så mye endret, annet enn at det på noen prosjekter nå benyttes noe mer prefabrikkerte løsninger enn tidligere, hulldekker er et eksempel på dette. Det har imidlertid manglet et siste steg, en digitalisert produksjonsteknologi.

Som Gradeci og Labonnote (2019) er inne på, så ligger det jo i BIM en flerdimensjonal kapasitet, ved at man kan ha kontroll på alt fra planlegging, kommunikasjon, sikkerhet, kostnadsestimering, drift og overvåking av bygget, og til og med tall for prosjektets bærekraft. Og som Bryde, Broquetas og Volm (2013) videre poengterer, så har BIM potensiale til å utnyttes i alle trinnene i et prosjekts livssyklus. Gradeci og Labonnote (2019) sier i sin studie at det er overveiende sannsynlig at prosesser i teknologier som Additive Manufacturing (AM) også kan implementeres og kontrolleres med BIM.



Figur 2: Full digitalisering, fra prosjektering til produksjon (Kloft et al., 2020).

Additive Manufacturing (AM) eller Additiv tilvirkning, er en klasse av produksjonsteknologier utviklet for at en skal kunne produsere et tredimensjonalt objekt, lag for lag, utfra en tredimensjonal digital modell (Gradeci og Labonnote, 2019). Gradeci og

Labonnote (2019) sier videre at AM teknologien finnes det mer enn 20 varianter av, og en av disse er 3D-printing. 3D-printing har vært benyttet i industrien i mer enn 30 år nå, til alt fra produktutvikling, fremstilling av prototyper, og til endelige produkter (Partnerskabet, 2018). Det er i dag godt kjent at man kan kjøpe seg en 3D-printer til å printe ulike små-skala-produkter. Det som er mindre kjent, er at det allerede i mange år har blitt forsket mye på 3D-printing i større skala, og at aktører innen bransjen i de senere årene har oppnådd oppløftende resultater. Dette omtales som 3D Concrete Printing (3DCP), altså 3D-printing av konstruksjoner ved bruk av ulike former for betong, eller betonglignende materiale.

1.4 PRESENTASJON AV 3DCP

***Merk:** Vi ser i litteraturen at begrepet 3DCP benyttes både for 3D Concrete Printing og 3D Construction Printing. Det understrekes at vi i denne oppgaven benytter begrepet 3DCP i betydningen 3D Concrete Printing, som i ekstraktiv 3D-printing av betong.*

1.4.1 Opprinnelse

Ideen til 3DCP ble utviklet av Dr. Behrokh Khoshnevis ved The University of Southern California. Som Khoshnevis (2017) sier i sin forelesning er den store fordelen med denne teknologien er at automatiseringen den fører med seg, samtidig åpner for høy grad av individualisering. «3DCP er en relativt ny produksjonsteknologi som har potensiale i seg til å bli en nøkkelteknologi for digitalisering og automatisering av byggebransjen» (Kloft *et al.*, 2020). Bruk av denne automatiserte og digitaliserte produksjonsteknologien baner ifølge Kloft *et al.* (2020) vei for en designfrihet, som muliggjør produksjon av avanserte konstruksjoner uten at dette behøver å bety økte kostnader. Nettopp designfriheten og muligheten til å bygge konstruksjoner med mer organiske former er en av denne teknologiens store fortrinn. Behrokh Khoshnevis (2017) sier videre i sin forelesning at byggebransjen, i årene som kommer, må bli mer automatisert, enten med 3DCP teknologien, eller med annen type automatisering eller robotisering.

Generelt er dagens industri i rask utvikling, og i noen bransjer er 3D-printing allerede tatt i bruk i deler av produksjonen. Om en ser på byggebransjen og bruk av 3D-printing av betong, virker en vesentlig endring fortsatt et stykke unna, men vi ser at det etter hvert har blitt utført mange forsøksprosjekter i land som Danmark, Nederland, Kina, USA, UAE og Russland. Også i Norge er det nå aktører som er i gang med et prøveprosjekt som er tenkt presentert i løpet av desember 2020. Det er samarbeidsklyngen Construction City med AF Gruppen og

Obos i spissen, sammen med Sintef, som står bak dette prosjektet. Vi har vært i kontakt med noen av de som er involvert i utviklingen av dette prosjektet, men de ville foreløpig ikke gå ut med noe informasjon.

AM-teknologien kan fortsatt regnes som fersk, sett i sammenheng med konstruksjoner og byggenæring. For et bygg med tradisjonelt design ser det i dag ut for at teknologien begrenser seg til å printe veggene. Avhengig av hvilken printe metode, og type betong, kan man i dag utvilsomt printe solide betongvegger. Uansett løsning, må denne være testet og akseptert som fullgod konstruksjon før den kan tas i bruk kommersielt. Et dansk konsortium av flere større aktører i byggebransjen utarbeidet i 2018 en rapport (Partnerskabet, 2018), hvor det sies at «prosjektet viste tydelig, at det er mulig, allerede i dag, at 3d-printe en bygning, som lever op til Europeiske normer.»

1.4.2 Materialene

Det mest brukte byggematerialet i verden er betong (Behzad, Ming og Jay, 2017; Marie *et al.*, 2014). Betong som byggemateriale kan tilpasses og formes til forskjellige formål, samt at det er holdbart og tåler høye temperaturer. I tillegg har det tradisjonelt lav produksjonskostnad. Ifølge Paul *et al.* (2018) kan selve produksjonskostnaden deles inn i tre deler: betong, armering og forskaling. Arbeidet med forskaling kan utgjøre så mye som 35-53 % av konstruksjonskostnaden og 50-75% av konstruksjonstiden for en tradisjonell konstruksjon. Ved 3D-printing derimot, trenger det ikke være nødvendig med forskaling i det hele tatt, eventuelt kan også «forskalingen» printes før man støper inni en printet, hul vegg.

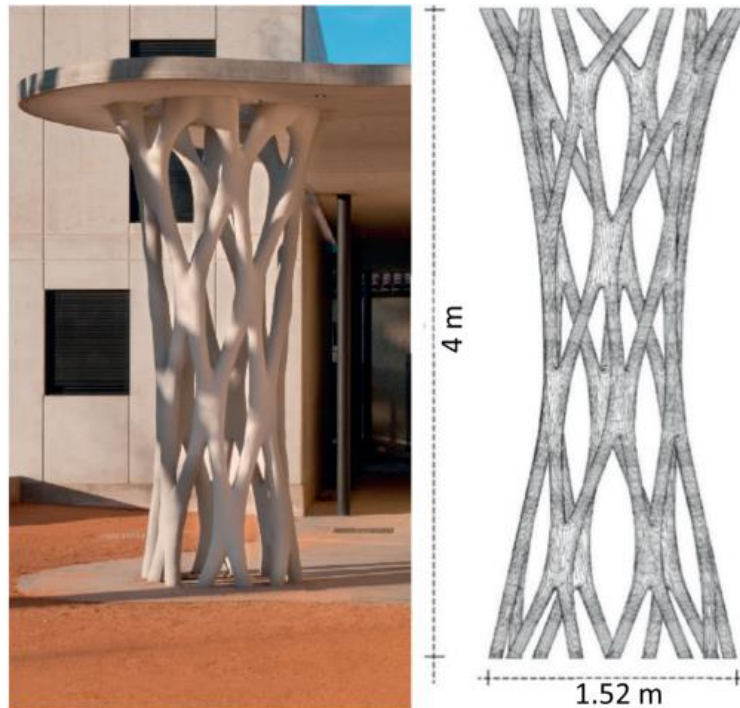
Printematerialer som vi har valgt å omtale i denne besvarelsen, er de vi tenker kan kategoriseres som betonglignende; nær tradisjonell betong og cob. Betong trenger neppe noen videre introduksjon. Cob er likt det som kan kalles leirklining. Mye likt som vi kjenner cob fra gammelt av, kan lignende masser blandes, med utgangspunkt i jorda på tomten der det skal bygges. Det har med årene blitt utviklet tilsetningsmaterialer og teknologi som muliggjør printing av materialer som dette (Industry Europe, 2019). Dette er en teknologi som fint også kan tilpasses for bruk i områder med begrensede ressurser og lite utviklet infrastruktur. Denne byggemåten virker også å være svært miljøvennlig. Vi kommer tilbake til 3D-printing med cob senere i oppgaven, hvor vi ser nærmere på prosjektet TECLA, et bærekraftprosjekt med 3D-printede boliger, med prosjektet: «3D printed global habitat for sustainable living». Her gjør vi en enkel vurdering av de totale CO₂-utslippene fra «TECLA-huset», som er 3D-printet i Bologna, Italia.

3D-printing og teknologien rundt denne tilvirkningsmetoden får stadig mer oppmerksomhet. Men teknologien gir foreløpig en begrensning ved at det til nå er utviklet få materialblandinger med god printbarhet. Materialblandingen som har vært benyttet i tidlige prosjekter, ble utviklet mest med tanke på egnethet i forhold til herdetid og konsistens, for å kunne printe lag på lag med betongpølser som skal feste seg i hverandre uten for mye deformasjon. Dette ser en både gode og mindre gode eksempler på når en ser på de forskjellige prosjektene som til nå har blitt utført. (De Schutter *et al.*, 2018).



Figur 3: Eksempel på materialblanding som har krympet (De Schutter et al., 2018).

Teoretisk sett, om en kunne utnytte det fulle potensialet til denne teknologien vil en kunne printe bygninger i frie organiske former med selvbærende, kompliserte, og estetisk vakre konstruksjoner, til glede for designere, arkitekter og brukere. Det vil åpnes for løsninger som vil være umulig å utføre med konvensjonelle konstruksjonsmetoder (Partnerskabet, 2018). Men printematerialet må også ha andre egenskaper enn bare å være egnet til å kunne lage en ideell form. Hvilke egenskaper printematerialet bør ha, beror på hva en skal printe, og hvilke funksjonskrav en står overfor. Skal man printe veggene på et, hus må materialblandingen være sterk nok til å bære vekten av konstruksjonen, kanskje bestående av flere etasjer. Materialet bør også ha isolerende egenskaper, og må kunne stå i mange år uten at noen av materialets egenskaper taper seg (Partnerskabet, 2018).



Figur 4: Eksempel på en videreutviklet materialblanding og printerteknologi, utført av selskapet XtreeE (De Schutter *et al.*, 2018).

1.4.3 Tilsetninger

For å kunne gå fra en forskalingsbasert byggeprosess til en mer automatisert konstruksjonsprosess må en utvikle materialblandinger som kan 3D-printes og som overholder godkjente strukturelle betongkoder (De Schutter *et al.*, 2018). I motsetning til konvensjonell betong, må materialet som benyttes til 3D-printing av bygninger ifølge Partnerskabet (2018) inneha visse egenskaper. Materialet må ha inneha en konsistens som er egnet for pumping og ekstraksjon tilpasset printerutstyret som benyttes, samt en konsistens som gjør det formstabil i det øyeblikket det ekstruderes. I tillegg må det ha en herdeprosess som er hurtig nok til at det holder sin form når neste lag blir printet, men samtidig skal det ikke herde så raskt at det ikke tåler en midlertidig stans i printingen.

Som rapporten til Partnerskabet (2018) sier er de tiksotropiske egenskapene for en masse som skal nyttes til 3D-printing viktige for et godt resultat. Materialet må være flytende helt frem til det ekstraheres ut gjennom printedysen, men når det kommer ut av dysen må materialet holde sin form slik at massen ikke reaktiveres når det neste laget blir printet. Som Paul *et al.* (2018) sier i sin studie av printematerialets egenskaper, finnes det flere teknikker en kan benytte for å optimalisere resultatet av den printede konstruksjonen. En enkel teknikk er å endre formen på printedysen slik at en får større kontaktflate mellom lagene, se figur 5. En

annen teknikk for å få en stabil konstruksjon er at dens design tegnes og printes med en cellestruktur, se figur 5.



Figur 5: Printedysens utforming har betydning for materiallagenes kontaktflate og konstruksjonens stabilitet (Paul *et al.*, 2018).

Det er viktig at materialblandingen har riktige tiksotropiske egenskaper. For at massen skal være printbar er det som De Schutter *et al.* (2018) sier, viktig at massen har egenskaper som gjør at den er medgjørlig så lenge den utsettes for mekanisk påvirkning, og når denne påvirkningen opphører er det ønskelig at materialet stivner. Dette kan ifølge Li *et al.* (2020) gjøres på flere måter. Enten ved at alt blandes i en blande-prosess, eller ved at en tilsetter en akselerator, i en sekundær blande-prosess, rett før utpumping. Ifølge Partnerskabet (2018) er det forholdet mellom materialblandingen og tilsetning av type bindemiddel styrer materialblandingen egenskaper. Om man i sementen tilsetter flygeaske, som har en kantet partikkelform, vil blandingen kunne bli fastere. Om en i stedet tilsetter sement inneholdende mikrosilika vil blandingen kunne bli seigere.

Materialblandingen egenskaper kan også styres ved å tilsette forskjellige myknere, som gjør at partikler støtes fra hverandre, ved å endre på de elektriske ladningsforhold. For å forbedre blandingens tiksotropiske egenskaper kan det også tilsettes såkalte viskositetsmodifiserende tilsetninger, eller på engelsk viscosity modifying agents (VMA) (Partnerskabet, 2018). Det er i en rapport (De Schutter *et al.*, 2018) omtalt at kostnaden for materialene innenfor 3DCP forventes å være lavere enn i en tradisjonell konstruksjon, men at den også kan bli høyere

med tanke på kostnaden forbundet med dyre tilsetninger. På generelt grunnlag kan man si at kostnaden forbundet med nye produkter er høyest i en tidlig fase av utviklingen.

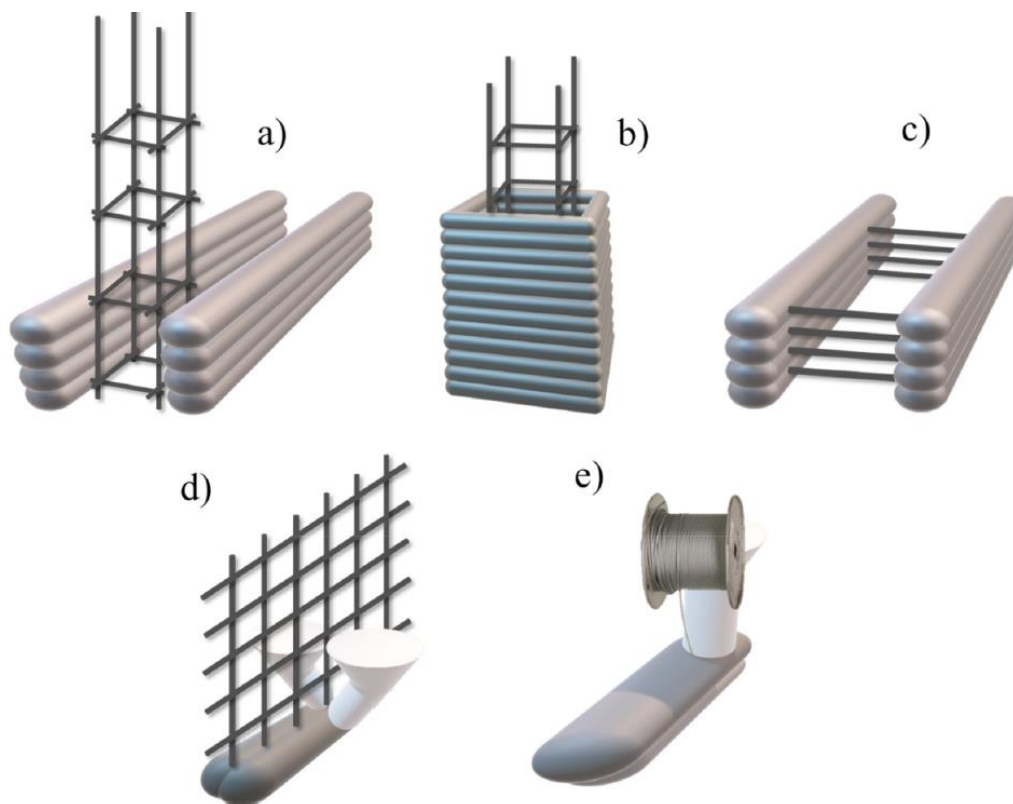
Materialets konsistens bestemmes primært av tettheten mellom materialets fibre, fibrenes størrelse og form, bindemiddelets korngradering, og partiklenes elektriske ladninger og reaktivitet (Partnerskabet, 2018). Reaksjonen mellom basematerialet og tilsetningsstoffene skjer først når en tilsetter væske, og bindemiddelkornenes tetthet styres av tilsatt væske/vannmengde (Partnerskabet, 2018). Når en dimensjonerer betong for støpning under kalde forhold, så vil en betongblanding som er tilsatt luft gjøre den mer motstandsdyktig mot å få frostskafer. Innblanding av luft kan imidlertid være vanskelig å kontrollere da noen myknere har en tendens til å produsere luft/skum, slik at man i de tilfeller må tilsette skumdempere. Andre blandinger kan ha problemer med å holde på luften, som da krever at en tilsetter midler som endrer materialets viskositet. En skal være oppmerksom på at ved tilsetning av luft med større mengde enn 5% så vil materialets styrke reduseres med ca. 5% for hver 1% en øker tilsetningen av luft. I et aggressivt miljø som er utsatt for fukt og frost er det viktig at betongen er tilpasset dette. Dette betyr at vi må ha et blandingsforhold vann/semest på under 0,55 og en styrke på minimum 30 MPa, samt mer enn 300 kg semest pr kubikk betong, samt at tilslag ikke er følsomt for frost (Partnerskabet, 2018)

1.4.4 Armering

Noen betongkonstruksjoner behøver ikke armering, men utformes slik at de i hovedsak bare blir utsatt for trykkrefter. Tidlige konstruksjoner i betong ble bygget helt uten armering, som Pantheon i Roma er et godt eksempel på. Uarmerte betongkonstruksjoner av nyere dato er til eksempel gravitasjonsdammer, som bygges slik at vanntrykket i kombinasjon med demningens form og egenvekt sørger for at betongen alltid står under trykk. (*7 ting du ikke visste om armert betong*, 2020). Når en skal bygge konstruksjoner som har behov for økt strekkfasthet må en tilsette eller montere en eller annen form for armering i betongen. Dette fordi betongmaterialets trykk og strekkstyrke er vidt forskjellig. Spesielt den vertikale armeringen er en stor utfordring i 3DCP. Ulike konsepter er prøvd ut, slik som vist nedenfor.

I forbindelse med 3D-printing av større konstruksjoner, er det ifølge Souza *et al.* (2020), per i dag, mest vanlig med vertikalt printede søyler hvor armeringsstruktur blir plassert før søylene fylles med betong. Se figur b) i bildet nedenfor. Printing av betong på hver side av armering som er montert opp før printingen påbegynnes, er også en metode som har blitt brukt, denne

tilnærmingen har til eksempel blitt brukt kommersielt av det kinesiske selskapet HuaShang Tengda (Souza *et al.*, 2020). Metoden skisseres ved figur d) nedenfor.



Figur 6: Ulike former for armering (Souza *et al.*, 2020).

1.5 BESVARELSEN I SAMFUNNSMESSIG SAMMENHENG

Betongindustrien har i mange år blitt sett på som en klimaversting, og internasjonalt press for å oppnå økt bærekraft har også hatt sin effekt på betongindustrien og byggebransjen generelt. For betongindustriens del har dette ført til økt oppmerksomhet på betongkvaliteter, tilsetningsmaterialer og bindemidler. Derfor tilbyr nå produsentene mer miljøvennlige sementblandinger med redusert andel Portlandsement, (som står for et høyt CO₂-utslipp), for eksempel i bytte med flygeaske (Norcem.no, 2020a). Det er også økt oppmerksomhet rundt miljøfordelene en oppnår ved å benytte alternative brensler, som blant annet næringsavfall og farlig organisk avfall.

FNs bærekraftsmål nr. 11 (FN, 2020) konstaterer at mer enn halvparten av verdens befolkning i dag bor i byer, og at innen 2030 vil andelen være 60%. FN (2020) sier videre at boligbygging og infrastruktur ikke henger med på denne voldsomme befolkningsveksten, som fører til stadig voksende slumområder med dårlige boforhold og manglende tjenester. Som Khoshnevis (2017) sier i sin forelesning kan boligbygging med implementering av

3DCP være en god strategi da denne teknologien kan produsere og bygge boliger mye hurtigere og rimeligere enn tradisjonell byggemåte. Mens det med tradisjonell byggemåte normalt tar flere måneder å føre opp en enebolig, kan en med 3DCP teknologien i prinsippet reise et hus på noen dager.

Utviklingen av 3DCP-teknologien medfører økt fokus på miljøvennlige og bærekraftige materialer og tilsetninger. Teknologien bringer med seg flere positive aspekter enn bare materialsammensetningen i selve sementblandingen. Med 3DCP-teknologien kan en med egnet materialblanding printe lag for lag med utgangspunkt i en 3D-tegning, noe som gjør denne teknologien mer nøyaktig og presis i forhold til normal betongstøpkonstruksjon. Dette fører til at materialforbruket blir redusert i forhold til tradisjonell betongkonstruksjon, som igjen er essensielt med tanke på bærekraft; forbruk av ressurser som strøm, vann, sand og ulike miljøskadelige tilsetningsstoffer. Det er imidlertid flere studier som tyder på at betong-/sementprodukter ikke er så ille som man har gått ut ifra. Karbonatiseringen, eller betongens opptak av CO₂, foregår i sementprodukter som er eksponert for luft, og er en effekt som synes riktig å få med i CO₂-regnskapet.

Vi bemerker oss at det nå er fem år siden Parisavtalen kom på plass i klimatoppmøtet i Paris. Løftet i denne avtalen var å begrense den globale temperaturøkningen ned mot 1,5 grader. FNs generalsekretær António Guterres ledet det digitale klimamøte “Climate Ambition Summit” den 12. desember 2020 som arrangeres av Storbritannia med flere. Ifølge Norges Rikskringkasting (NRK) uttaler han her at tallene fortsatt ikke går riktig veg, og at vi står foran en temperaturøkning på 3 grader innen utgangen av vårt århundre, dersom landene ikke endrer kurs. Flere land har som mål å bli klimanøytrale innen 2050 og 2060, og det opplyses videre i dette møtet om at verden nå, på tross av utspillet til Guterres, kan ha nådd utslippstoppen. Det vil si at 2019 kan være det året i historien med høyest utslipp (NRK, 2020).

I forhold til studiet vi nå straks har gjennomført, Bærekraftige byggeprosesser ved NTNU, så mener vi at temaet vi har valgt å fordype oss i er svært relevant, og berører mange av emnene vi har tilegnet oss kompetanse på i løpet av studiet. Dette gjelder byggenæringens miljømessige, samfunnmessige og økonomiske aspekter, som også er meget viktige aspekter som 3DCP teknologien kan ha innvirkning på.

1.6 OMFANG OG AVGRENSNINGER

Bacheloroppgaven er skrevet høsten 2020 ved Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet (NTNU), ved institutt for vareproduksjon og byggteknikk. Oppgaven vektet med 20 studiepoeng, og omfanget for hver enkelt av oss er stipulert til rundt 500 timer. Grunnet rammene, i både tid og omfang, har vi gjort noen begrensninger i valg av forskningsmetode. Vi har gjennomført en tradisjonell litteraturstudie, hvor vi har begrenset oss til engelsk- og nordiskspråklig litteratur.

Besvarelsen søker å gi innsikt i dagens status for 3DCP-teknologien, og dens bruk av klimavennlige betong- og cob-blandinger, samt øvrige tiltak for å redusere CO₂-utslippene fra byggenæringen. Med henblikk på oppgavens problemstilling valgte vi å se nærmere på utslippene for et spesifikt prosjekt, TECLA, som vi anser som et av de mest spennende prosjektene, sett i lys av bærekraftsperspektivene. FNs Bærekraftsmål består i alt av 17 mål som alle er viktige og gode mål for arbeidet mot å bekjempe ulikhet, utrydde fattigdom og stoppe klimaendringene. Vi har i denne oppgaven begrenset oss til å prøve å se funnene våre opp mot de vi anser som mest relevante for temaet vårt. Disse er bærekraftsmål 11 *Bærekraftige byer og lokalsamfunn*, 12 *Ansvarlig forbruk og produksjon* og 13 *Stoppe klimaendringene*.

For å finne ut hvor utviklet og utbredt denne relativt nye teknologien er, favnet vi de innledende søkene våre så bredt som mulig. Og med tanke på tidsperspektivet følte vi at et teoretisk studie ga oss best oversikt og fremdriftskontroll. Av samme grunn så vi det nødvendig å begrense oss til å studere nærmere kun ett prosjekt. Forkortelsen 3DCP virker for oss å være i omfattende bruk for både «3D Construction Printing», og «3D Concrete Printing». Vi bruker i denne oppgaven det sistnevnte begrepet, altså betong, da dette etter vår oppfatning er den mest utbredte bruken av begrepet. Det foregår imidlertid spennende forskning på, og utprøving av andre betonglignende masser som, sett i lys av bærekraftsaspektet, er langt snillere enn tradisjonell betong. Vi har derfor valgt å omtale disse også. Dette er materialer som omtales som cob, eller det vi fra gammelt av kjenner igjen som leirklining.

Vi legger i oppgaven frem en oversikt over printertyper og går ikke nærmere inn på detaljer for printerteknologien, da dette er omfattende nok til å kunne være en egen oppgave. Denne oversikten og detaljene her er ikke uttømmende, men en gjenspeiling av det vi har funnet i vår studie og som er vurdert som interessant. Vi har forsøkt å se de store linjene i denne forbindelse, og ikke alle små variasjoner. Byggenæringen er stor, og vi har begrenset oss til å

se på bygninger. Annet som også er interessant i sammenheng med 3D-printing og som det er tilsvarende høy aktivitet på, men som ikke er inkludert i denne oppgaven, er eksempelvis broer, trapper og andre bygningskonstruksjoner. Innholdet i diskusjonen, og vurderingen av CO₂-utslippet for «TECLA-huset» er basert på gruppens egne tolkninger av våre funn fra litteraturstudien, samt informasjon og data vi har fått gjennom kommunikasjon med MAPEI, WASP, med flere.

1.7 OPPBYGGINGEN AV RAPPORTEN

I dette delkapittelet presenterer vi rapportens oppbygning, med en kort oppsummering av innholdet i hvert av kapitlene.

Kapittel 1 – Innledning

I bakgrunnen omtaler vi hvorfor vi har valgt dette temaet før vi presenterer problemstillingen og målet for oppgaven. Videre gis en introduksjon til temaet og den aktuelle teknologien, samt at vi presenterer oppgavens omfang og avgrensninger.

Kapittel 2 – Review

I review-kapittelet går vi nærmere inn på metode, og dokumenterer hvordan arbeidet med oppgaven er gjennomført. Hvilke strategier og forskningsmetoder som er vurdert. Deretter begrunner vi valg og beskrivelse av metoden vi har benyttet. Videre blir det gjort en vurdering av rapportens troverdighet, før det til slutt presenteres en kort vurdering av eget arbeid. Vi tar først for oss en liten gjennomgang for hva som er status på 3DCP i verden per i dag, både med tanke på printere, materialer, ulike aktører, og hvor langt disse har kommet. Videre går vi inn på hvordan 3DCP-teknologien kan påvirke bærekraftmålet om lavere klimautslipp. I denne sammenhengen drar vi også inn data vi har fått gjennom aktører i TECLA-prosjektet.

Kapittel 3 –Drøfting

I dette kapittelet drøfter vi materialet vi har funnet og skrevet om i kapitlene ovenfor, samt resultatene fra vår enkle utslippsvurdering for prosjektet TECLA.

Kapittel 4 – Konklusjon

Konklusjonen presenteres basert på materialet vi har funnet gjennom litteraturstudien og utslippsvurderingen vi har gjennomført. Med utgangspunkt i forskningsspørsmålene søker vi her å svare på problemstillingen. Vi ser også på hvordan arbeidet kan videreføres.

Referanseliste

Her er alle referansene vi har benyttet systematisk listet opp og organisert via EndNote. Vi har benyttet Harvard stil.

Vedlegg

Vedlagt følger vedlegg som A3-rapport, resultater fra Tecla og deklareringer for tilsetninger.

2 REVIEW

2.1 METODE

I metodekapittelet dokumenterer vi hvordan arbeidet med rapporten er gjennomført. Det gis en beskrivelse av forskningsmetode og begrunnelse for valg av metode, samt en vurdering av oppgavens troverdighet.

2.1.1 Litteraturstudie

For å belyse, og søke svar på vår problemstilling, har vi gjennomført en tradisjonell litteraturstudie. En litteraturstudie er en søkestrategi for å finne og tolke litteratur som omhandler et valgt tema. Gjennom NTNU og Universitetsbiblioteket vet vi at det opereres med to hovedtyper av litteraturstudie – den ene er tradisjonell, og har til hensikt å få en bred forståelse og oversikt over valgte tema, mens den andre – systematisk litteraturstudie – har et smalere og svært definert tema. Da vi søker relativt bredt etter informasjon, er vår oppfatning at det for denne oppgaven var mest naturlig å benytte en tradisjonell litteraturstudie.

I vårt arbeid med denne oppgaven har vi benyttet Oria, som er forskningsbibliotekenes søkeverktøy, og Google Scholar, som er den akademiske versjonen av Google. Utover disse har vi benyttet plattformene Engineering Village med databasen Compendex, og Science Direct via Elsevier. Vi har også benyttet Researchgate. Tidlig i prosessen søkte vi litt bredere hvor vi benyttet Googles søkemotor for å finne aktørers web-sider, nyhetssaker og omtaler som kunne gi oss nyttig informasjon til det videre arbeidet med oppgaven. Videre benyttet vi søk i vitenskapelige databaser. Vi har begrenset oss til engelsk og nordiskspråklig litteratur. Vi tok utgangspunkt i vårt tema og startet litteratursøket derfra. Etter hvert som vi ble mer kjent med landskapet videreutviklet vi våre fokusområder og samtidig ble søkeordene mer spisset. Vi hentet nye søkeord ut fra funnene vi allerede hadde gjort. Følgende søkeord er benyttet i vårt arbeid: 3D-printing av bygg, 3D printed buildings, 3DCP, 3D concrete printing, additive manufacturing, additiv tilvirkning, automated construction, bærekraftige byggemetoder, concrete printing application, low emission concrete, LCA of concrete, LCA of concrete for 3D-printing / 3DCP, 3DCP concrete cob, journals concrete 3D printing, robotic printer, climbing robotic printer

I søkene vi har utført har vi konsentrert oss om innholdet i nyere vitenskapelige artikler, men under fordypningsprosessen har vi også sett på presentasjoner og dokumentasjon fra forskere,

selskaper og organisasjoner med spisskompetanse på aktuelle områder. Utgangspunktet vårt var å benytte så nye kilder som mulig. Vi ønsket å benytte kilder datert 2018 eller senere. Underveis i arbeidet fant vi imidlertid kilder som var eldre enn dette, men som inneholdt informasjon som ble vurdert til å være relevant og riktig å inkludere. Gyldigheten til alle kildene ble fortløpende vurdert av gruppen, ut fra en helhetsvurdering.

2.1.2 Mini case-studie

I tillegg til litteraturstudien, har vi valgt å se nærmere på et spesifikt prosjekt, der vi gjør en vurdering av CO₂-utslippene fra dette. Til dette arbeidet har vi vært i kontakt med produsent av tilsetningsstoffer som er brukt i prosjektet, samt med utvikler av 3D-printeren, som også er det samme selskapet som har printet bygget. For å innhente informasjon og data benyttet til å lage et oppsett over utslipp for prosjektet, har vi hatt videomøter og kommunikasjon via epost.

2.1.3 Oppgavens troverdighet

Troverdigheten til oppgaven er vurdert ut fra metoden vi har benyttet, samt vår vurdering av våre kilder og kvaliteten på disse. Litteraturen vi har benyttet oss av kommer i hovedsak fra forskningslitteratur og akademiske oppgaver fra universiteter. Litteraturen er funnet gjennom søk på anerkjente databaser som Oria og Google Scholar. For faglig tyngde har vi blant annet benyttet Elsevier og plattformene Science Direct og Engineering Village. Science Direct er plattformen for fagfellevurderte utgivelser, mens plattformen Engineering Village og databasen Ei Compendex er oppgitt som den mest komplette litteraturredatabasen for ingeniører i verden. Fagfellevurderte utgivelser betraktes som vitenskapelige og ble i utgangspunktet søkt brukt, og mange av våre kilder er nettopp slike. Dette anser vi som et kvalitetsstempel. Litteraturen er hovedsakelig av nyere dato, og bare et mindretall av kildene er eldre enn 2018. Underveis i litteratursøket, hadde vi fokus på å finne litteratur som vi vurderte som pålitelig. Det vil si at vi stilte oss spørsmål til hvor troverdig utgiveren og nettstedet er, om forfatteren var anerkjent eller hadde tilknytning til et anerkjent miljø eller institusjon. Videre vurderte vi hvorvidt litteraturen hadde støtte eller dokumentasjon fra andre kilder som underbygget resultatene og dermed også troverdigheten.

Teknologien som belyses i denne oppgaven har vært i rask utvikling de siste årene. For å kunne danne et mest mulig riktig bilde av teknologien, og status på denne, har vi vært opptatt av å benytte så ny litteratur som mulig. De få referansene som ikke kommer fra disse databasene er hentet fra forelesninger eller foredrag, hjemmesider og tekniske artikler, og er

benyttet til å innhente informasjon om blant annet selskaper og medieomtale av prosjekter. Siden vi har vært ute etter litteratur som kunne bidra til å gi oss et godt oversiktsbilde av teknologien, så er det også mye tilgjengelig litteratur, dog litt varierende i forhold til deltema. Det er i begrenset grad vi benytter oss av flere kilder for samme informasjon, og trolig er det også tilgjengelig mange andre gode kilder som vi ikke har benyttet oss av. Med tanke på at teknologien er under stadig utvikling, utgis også stadig ny litteratur som vi ikke har vurdert i denne oppgaven.

2.1.4 Vurdering av eget arbeid

I gjennomførelsen av dette arbeidet har vi erfart hvor viktig det er å legge ned godt nok arbeid i å bygge opp en god disposisjon i en tidlig fase. Ettersom vi bevegde oss inn i et ukjent tema og brukte lengre tid enn tiltenkt til å opparbeide oss tilstrekkelig oversikt rundt temaet, tok det for lang tid før vi klarte å etablere en tydelig disposisjon for oppgaven. Dette har ført til unødvendig arbeidspress i senere faser av arbeidet.

2.2 INTRODUKSJON TIL 3DCP-TEKNOLOGIEN – KATEGORIER, BEGREPER OG UTTRYKK

3D-printing generelt går ut på at en med utgangspunkt i en digital modell gjenskaper et fysisk objekt ved å ekstrudere et materiale lag for lag. Med utgangspunkt i amerikanske ASTM International standards organization og deres kategorisering for additiv manufacturing, har Partnerskabet (2018) utarbeidet en oversikt over kategorier som er aktuelle for byggenæringen. Disse er som følger:

- | | |
|---------------------------------------|---|
| Lagvis horisontal ekstrudering | Materialet presses gjennom en dyse som legger det ut horisontalt i en bestemt form, lag på lag. Det benyttede materialet har egenskaper som gjør at det ikke siger, samtidig som det er flytende nok til å binde seg sammen med både laget under, og det som kommer over. |
| Fri ekstrudering | Materialet presses gjennom en dyse, og har den egenskapen at det stivner raskt, slik at materialet ikke påvirkes av tyngdekraft eller drakraft fra den videre bevegelsen av dysen, og kan dermed stå av seg selv uten noen form for understøttelse. |
| Binder Jetting | Dette er en additiv produksjonsprosess hvor det først legges et lag med et pulvermateriale før det påføres et flytende bindemiddel på |

pulverlaget der hvor modellen tilsier det. Dette repeteres gjentatte ganger slik at det lagvis vokser seg større. Til slutt tas pulveret som ikke er påført bindemiddel bort, og man sitter igjen med det produktet man ønsket å produsere. Pulveret har i denne prosessen også en rolle som støtte for hvert lag under produksjonen.

2.2.1 Grad av frihet

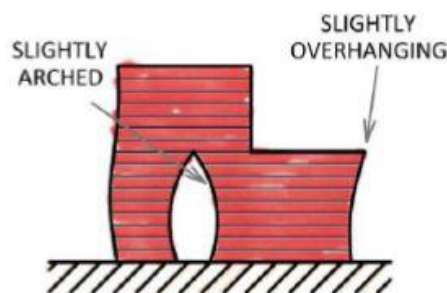
Tradisjonelle konstruksjonsteknikker kan sies å i all hovedsak benytte linjer, firkantede og sirkulære former, mens innen 3d-printing har man større grad av frihet til å lage komplekse former. I følge Partnerskabet (2018) kan teknologiens grad av frihet kategoriseres som følgende:

2D frihet

Denne teknologien kan kun produsere konstruksjoner i to dimensjoner, likt som papirskriveren. Denne graden av frihet gjelder for lagvis ekstrudering uten noen form for forskyvning av lagene.

2.5D frihet

Også her er det i utgangspunktet to dimensjoner som gjelder, men man kan tøyne dimensjonen i form av at man kan skape noe overheng og buede former ved å la det neste laget ligge noe innenfor eller noe utenfor det foregående. Lagvis horisontal ekstrudering med forskyvning av lagene gjør dette mulig.

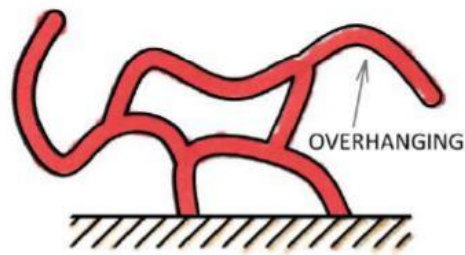


Figur 7: Skisse av printing med overheng som skaper kurvatur. (Partnerskabet, 2018).

3D frihet

Her kan man skape konstruksjoner som går i tre dimensjoner uten understøttelse, gitt at materialet har egenskapen som tillater det. Til eksempel kan man ekstrudere printermassen som grener som står ut

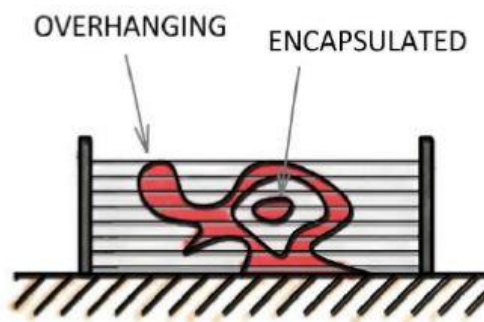
fra en stamme. Dette omtales som fri ekstrudering, jamfør oversikten over kategorier ovenfor.



Figur 8: Skisse av fri printing i tre dimensjoner Hentet fra (Partnerskabet, 2018).

Full 3D frihet

Her er det mulig å printe en konstruksjon hvor man har frie objekter inne i selve konstruksjonen – eksempelvis en kule inne i et bur. Dette er mulig på grunn av det støttende materialet (pulver) som er til stede under produksjonen. Konstruksjonen dannes av bindemiddel som påføres dette pulveret og sammen blir et fast stoff. Alt løst pulver som ikke er eksponert for bindemiddelet tas så bort for å frigjøre det man har printet. Full frihet er mulig med binder jetting, som forklart i oversikten over kategorier ovenfor.



Figur 9: Skisse av printing med frie objekter (Partnerskabet, 2018).

2.2.2 Konstruksjonssted

For de ulike prosjektene vi har funnet fram til i litteraturstudiet vårt, ser vi at det varierer hvorvidt konstruksjonen er prefabrikkert eller produseres på byggeplass, slik det også er i tradisjonell konstruksjon. Det brukes flere steder uttrykk som *in-situ*, *on-site* og *off-site*, blant annet i rapporten fra (Partnerskabet, 2018) og tabellen under gjengir en forklaring på uttrykkene.

Tabell 1: Forklaring på variasjonene av konstruksjonssted.

In-situ	Konstruksjonen printes der den skal stå.
On-site	Konstruksjonen eller deler av konstruksjonen (til eksempel moduler) er produsert på eller ved byggeplass, før objektet plasseres der det skal stå.
Off-site	Konstruksjonen eller konstruksjonens deler er produsert i eksempelvis et produksjonslokale før det fraktes til byggeplass.
Delvis prefabrikasjon	Noe er prefabrikkert og fraktet til byggeplass, mens resten av konstruksjonen produseres på byggeplassen.

2.2.3 Fabrikasjonstilnærming

Nedenfor sees beskrivelser på hvordan 3D-printeren brukes i forbindelse med de forskjellige tilnærminger. (Partnerskabet, 2018)

Tabell 2: Forklaring på de forskjellige tilnærmingene en 3D-printer kan benyttes.

Direkte	Det printede objektet er konstruksjonen i seg selv, og ingen montasje kreves. For denne tilnærmingen er det in-situ som gjelder.
Semi-direkte	Deler introduseres, eksempelvis omramming til dører og vinduer. Det printede objektet er fortsatt selve konstruksjonen. For denne tilnærmingen er det mulig med produksjon både in-situ, on-site eller off-site. Den kan også benyttes i forbindelse med delvis prefabrikasjon, hvor det er både prefabrikkerte deler og produksjon on- eller in-site.
Komponent	Komponenter / elementer produseres og monteres sammen for å danne konstruksjonen.
Forskaling	Den printede konstruksjonen danner en form som fylles av eksempelvis betong. I likhet med tradisjonell forskaling fjernes den printede formen etterpå.

Forskaling inkludert	Likt som forskaling, men her blir den printede formen stående som en sekundær del av konstruksjonen.
Tildekkende	Printeren ekstruderer materialet rundt en allerede etablert støttekonstruksjon. Det motsatte av forskaling / formwork.

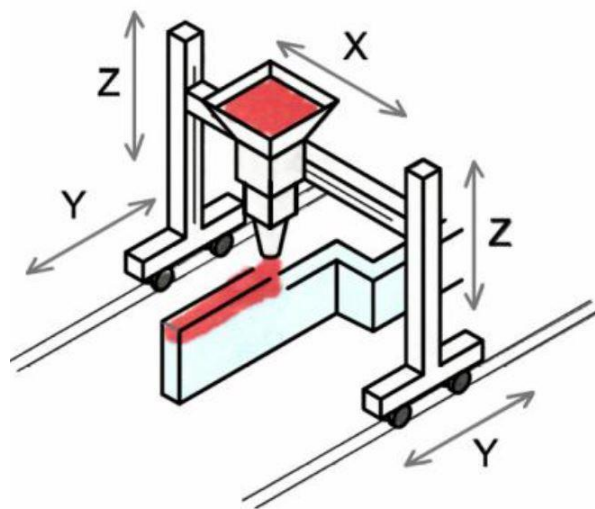
2.3 PRINTERE

Ifølge Partnerskabet (2018) ser vi at det er to typer printere som dominerer innenfor 3DCP. Dette er gantry- og robotarm-printere. Disse to utgjør over 80% av tilfellene. Selv om dette er to ulike typer printere, kan de begge brukes til både direkte produksjon «in-house»/«on-site», hvor printeren er plassert der bygget skal produseres og stå når ferdig, og til elementproduksjon «off-site», som betyr at elementene produseres på et gitt sted, for så å bli fraktet til byggeplassen. Det finnes ekstruderingsbaserte og pulverbaserte printere.

Gantry Kartesisk

En Gantry-printer omrammer det emnet den skal produsere, og har et printerhode som kan beveges presist i bredde, lengde og høyderetning (x-, y- og z-retning) innenfor denne rammen. Emnet som produseres vil ikke komme i konflikt med printerens på grunn av sin beskaffenhet. Begrensningen er gitt av størrelsen på rammen. (Partnerskabet, 2018)

Størrelsen av rammen kan tilpasses størrelsen på objektet som skal printes. Printertypen kan benyttes til flere produksjonstilnærminger, fra prefabrikasjon til in-situ.



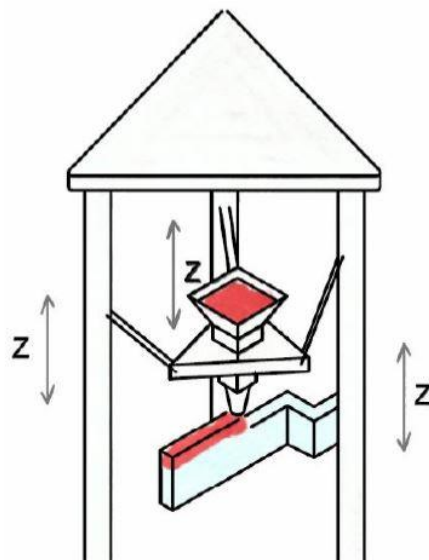
Figur 10: En prinsippskisse av gantry-printer (Partnerskabet, 2018).



Figur 11 - Dette er gantryprinteren BOD2 fra danske COBOD. Printeren er 34,9 meter lang. (COBOD, 2020)

Gantry Delta

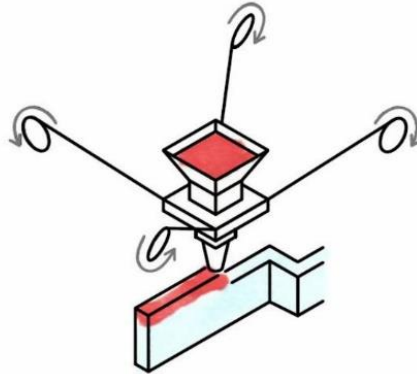
Omrammer det emnet den skal produsere. Består av tre eller flere søyler med en suspendert plate hvor printerhodet er plassert. Denne platen er festet i søylene ved hjelp av armer som kan beveges opp og ned uavhengig av hverandre. Dette muliggjør bevegelsene printerhodet trenger for å produsere innenfor området til de vertikale søylene. Printertypen kan benyttes til flere produksjonstilnærminger, fra prefabrikasjon, in-house til on-site produksjon.



Figur 12 - En skisse av en delta gantry-printer.(Partnerskabet, 2018)

Kabel suspensjon

Printerhodet er plassert på en plate som er suspendert fra tre eller flere kabler. Ellers lik teknologi som delta gantry.

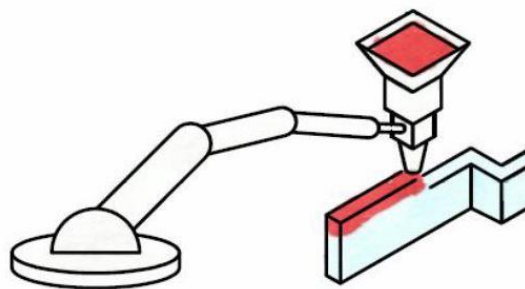


Figur 13 - Eksempel på kabelsuspensjonsprinter og konseptet bak. (Partnerskabet, 2018)

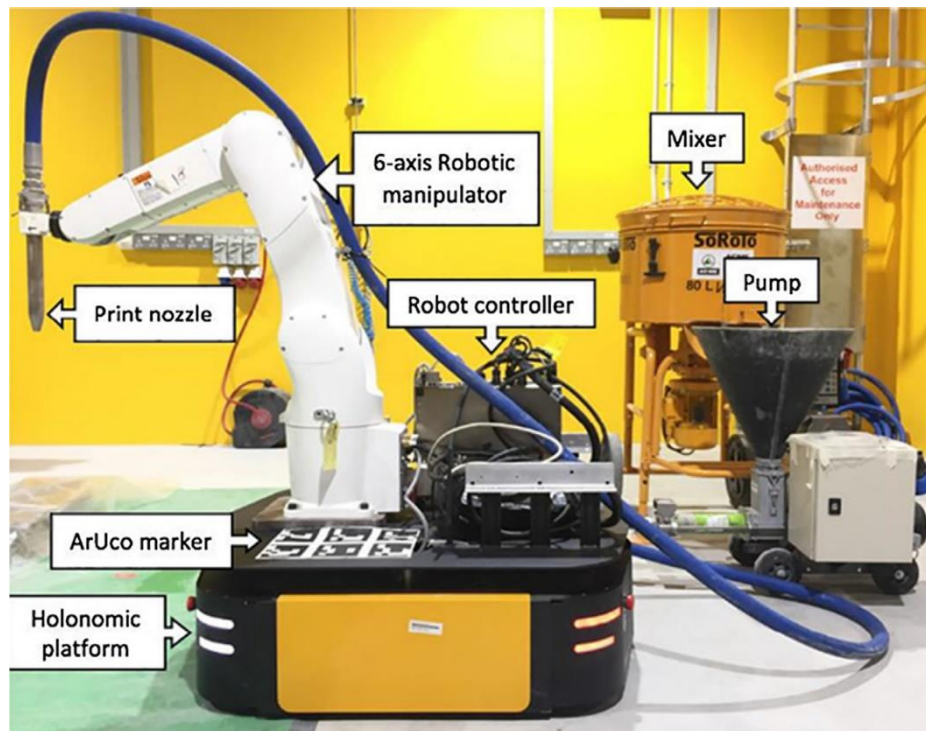
Robotarm

Når det gjelder robotarm-printere har denne, i motsetning til gantry, et fast utgangspunkt innenfor rammene for det emnet den skal printe. Denne printertypen er velegnet til å produsere elementer, men den er også benyttet til å printe mindre bygg. Printertypen kan benyttes til flere produksjonstilnærminger, fra prefabrikasjon til in-site.

Den kan også stå utenfor rammen til emnet som skal printes, Begrensningen for denne printeren vil være rekkevidden for armen. En annen mulig begrensning kan være om utformingen av emnet kan begrense bevegelsen for armen. (Partnerskabet, 2018)

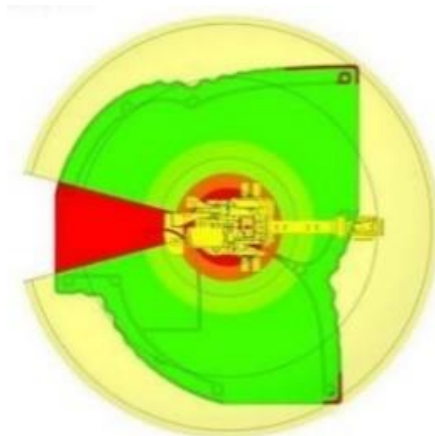


Figur 14: Skisse av en robotarm-printer (Partnerskabet, 2018).



Figur 15: Oppsett for robotarmprinter (Lu et al., 2019).

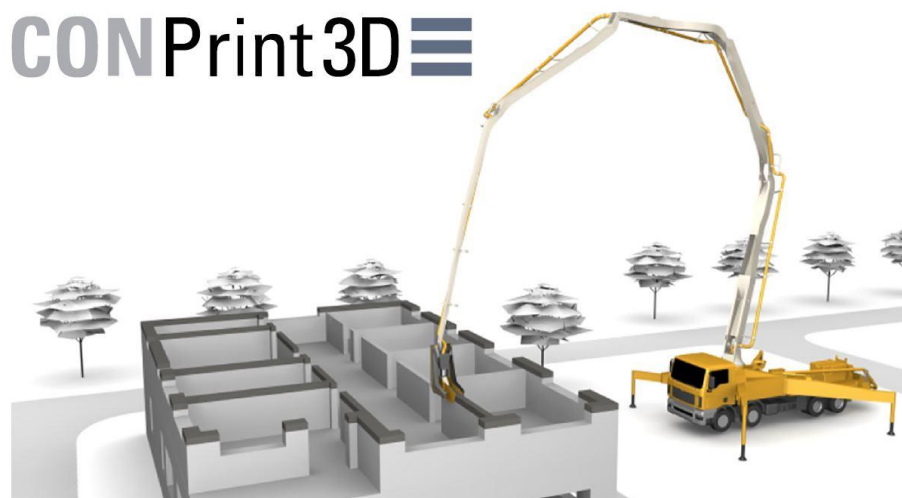
Robotarmprinteren har begrenset rekkevidde og manglende mulighet til å printe 360 grader. Kan kun roteres 330 grader. Prinsipielt velegnet til å printe i et område på 120 grader foran seg. (Partnerskabet, 2018)



Figur 16: Eksempel på dødsone for robotarmprinter sett i sammenheng med omriss av et bygg (Partnerskabet, 2018).

CONPrint3D er en løsning utviklet av det Tekniske Universitet i Dresden, og tilstreber å benytte fordelene med 3d-printing på byggeplass uten å måtte bytte ut maskiner og utstyr. Som bildet under viser er det benyttet en tradisjonell sprøytebil hvor en printerdyse er montert i enden av armen. Denne styres av laserteknologi og skal være tilstrekkelig nøyaktig

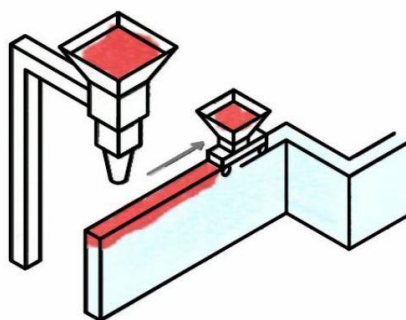
selv i utstrakt posisjon. Denne løsningen skal redusere investeringsbehovet, og dermed senke terskelen for å ta i bruk teknologien. (Mechtcherine *et al.*, 2019)



Figur 17: Illustrasjon av tilnærmingen for printing in-situ for CONPrint3D (Mechtcherine *et al.*, 2019).

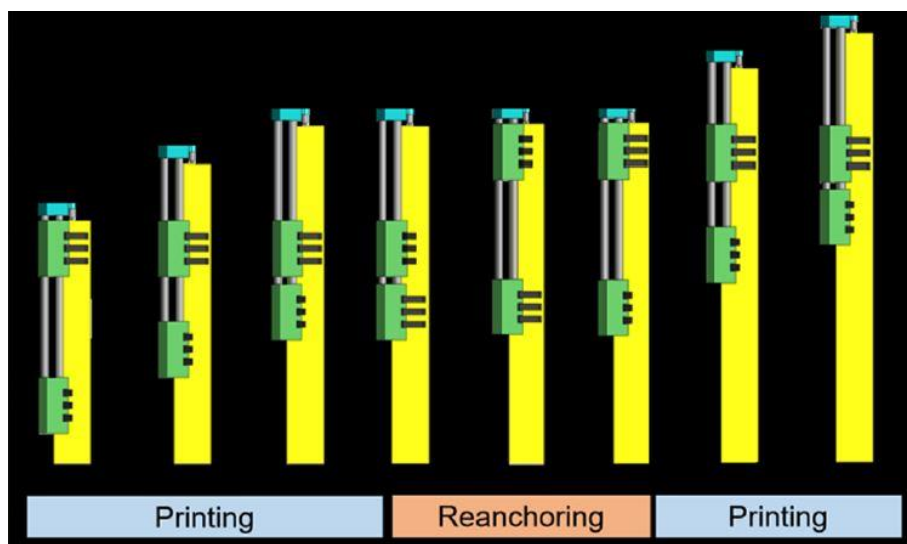
Mobile robotprintere

Består av en ekstruder som beveger seg for egen maskin over eller på emnet den produserer. Dette kan eksempelvis være et kjøretøylignede produkt eller en drone. Materialet som skal ekstruderes kan eksempelvis komme via en tilkoblet slange eller fra en beholder den har med seg. En versjon av mobile robotprintere er mindre klatrende robotprintere.



Figur 18: Skisse som viser mobile robotic printer (Partnerskabet, 2018).

En av fordelene med robotprintere er at de kan produsere objekter større enn seg selv, slik at størrelsen på printeren ikke er en begrensning i seg selv. Et eksempel på en slik printer er den klatrende robotprinter Koala 3D. Denne printeren består av en klatrende robot og en 3d-printer, og er designet til å gjenta selve produksjonsprosessen – printe, klatre til nytt punkt, printe videre – til ønsket objekt er produsert. (Vélez, Toala og Zagal, 2020)



Figur 19 - Denne skissen viser hvordan en fabrikkasjonsprosess med en klatrende robotprinter kan se ut. (Vélez, Toala og Zagal, 2020)

2.4 LEDENDE AKTØRER

Internasjonalt har det de senere årene begynt å bli mange selskaper som satser på 3DCP-teknologien. Dette er både selskaper som produserer og leverer teknologi og utstyr til 3DCP, men også utførende entreprenører (Partnerskabet, 2018). Nedenfor følger noen av disse, fordelt på Europa, Amerika og Asia. Vi presiserer at dette ikke er noen verifisert liste over de «råeste» i bransjen, men at dette er vårt inntrykk. I tillegg har vi merket fem av selskapene med stjerne (*). Dette er selskaper som i en artikkel (Obudho, 2019), utgitt i oktober 2019, i et uavhengig magasin, All3DP.com, ble ansett som de fem selskapene i verden som har kommet lengst innen 3DCP.

Tabell 3: Aktører som har kommet langt innen 3D-printing, global oversikt.

Selskap	Land	Nettside	Kommentarer / Interessante sider	Prosjekter
Apis Cor (*)	USA	https://www.apis-cor.com/	Har bidratt i produksjonen av verdens største konstruksjon i volum i Dubai 2019.	Hus i Louisiana, USA. Demo-hus.
ICON	USA	https://www.iconbuild.com/		Hus i Austin, Texas.
Besix 3D	Forente Arabiske Emirater	https://3d.besix.com/		
Weber Beamix / Van Wijnen	Nederland	https://www.vanwijnen.nl/	Kommersielt 3D-printede betonghus i Meerhoven-disktriktet i Nederland. Første bolig skal være ferdigstilt høsten 2020. Bruk av både	Project Milestone

		https://www.nl.weber/3Dbetonprinten https://www.3dprintedhouse.nl/en/	gantryprintere og robotarmprintere, henholdsvis til testing og produksjon av elementer.	
Sika	Sveits	https://www.sika.com/en/home.html	Etablert eget teknologisenter for prototyp utvikling og har sju patenter innenfor printeprosesser og materialer/tilsetninger. Har printere for prefabrikasjon av elementer (størrelse opp til 5 meter), med printerhastighet opp til 1 meter per sekund.	
CyBe (*)	Nederland	https://cybe.eu/	Bygger 3D-printere med ABB robotteknologi, egenutviklet programvare. Egenprodusert mørtel med gode egenskaper.	
WASP (*)	Italia	https://www.3dwasp.com/en/	Fokus på bærekraft. Utvikler/ produserer Gantry printere.	GAIA, TECLA
XtreeE (*)	Frankrike	https://xtree.com/ https://vinci-construction.com/	Teknologiselskap med fokus på 3D-printing av konstruksjoner/elementer. Vinci Construction er en stor fransk aktør som er deleier av XtreeE. https://vinci-construction.com/en/news/3d-printed-concrete-impression-future/813/	HINDCON Et samarbeid
WinSun (*)	Kina	http://www.winsun3d.com/En/About/	Har utviklet flere materialer til bruk i 3D-printing. Virker å være en betydelig pådriver for bruk av teknologien.	
Huashang Tengda	Kina		Har ikke lyktes med å finne en hjemmeside. Omtalt prosjekt er fra 2016, og vi stiller spørsmålstegn til om de fortsatt er aktive.	2016: Villa på 400m2 printet i løpet av 45 dager.
MudBots 3D Concrete printing	USA	https://www.mudbots.com/index.php	Utvikler egne printere for kommersiell bruk.	
COBOD (Construction Of Building On Demand)	Danmark	https://cobod.com/	Printer utvikler/ produsent av Gantry printere. Virker å være en stor aktør i det europeiske markedet gjennom at flere benytte deres printere.	The BOD. Første huset gjort etter Europeisk standard.
Kamp C	Belgia	https://www.kampc.be/	Benytter COBOD Gantry printere	Første to-etasjers huset i Europa

Amerikanske selskaper

APIS COR (*)

I samarbeid med det russiske husbygger-selskapet PIK Group, printet Apis Cor et fullverdig hus, on-site, allerede i 2017. Huset ble satt opp i Stupino, like sør for Moskva, Russland. Ytter- og innerveggene ble printet med spalte imellom, hvorpå denne ble fylt med en polyuretanblanding som isolasjon (Garfield, 2017).

Apis Cor sier på sine hjemmesider (Apis-cor.com, 2020) at målet med demohuset, i Louisiana, USA, er å gi presedens for det første 3D-printede huset som er godkjent som et bolighus, ikke bare som kontor eller utstillingsvindu. Huset vil gjennomgå tillatelses- og testprosesser for å få verifisert veggens material- og bærende egenskaper.

I slutten av 2019 ble et prosjekt ferdigstilt i Dubai. Dette bygget hevdes at, ved fullføring, var verdens største 3D-bygg printet on-site (Zeiba, 2019). Veggene ble i stor grad printet med materialer som var tilgjengelig lokalt, som gips og sement, samt egenutviklede tilsetninger.



Figur 20: Oppføring av to-etajers kontorbygg i Dubai (Zeiba, 2019)



Figur 21: To etasjers kontorbygg i Dubai (Zeiba, 2019)

ICON

Som del av et boligprosjekt for hjemløse, kalt «Community First! Village», fullførte selskapet, i mars 2019, printingen av seks boliger som hovedsakelig har 3D-printede vegger. Prosjektet skal etter hvert huse 480 hjemløse personer. Dette tilsvarer 40% av alle hjemløse i Austin) (Garvett, 2020). De har utviklet en betong de kaller «Lavacrete». Nedenfor sees et bilde med printeren «Vulcan» i virksomhet.



Figur 22: ICON's printer i drift i Austin Texas (Souza et al., 2020)

Asiatiske selskaper

UAE og Dubai er en pådriver for bruk av teknologien. De har som mål at 25% av alle fremtidige bygninger skal bygges ved hjelp av 3D-printing, og at de skal bli et ledende globalt senter for 3D-printing innen 2030. I oktober 2019 ble verdens største 3D-printede konstruksjon, et kontorbygg, offisielt åpnet. Bygget har to etasjer, er 9,5 meter høyt, og er på 640 m² (U.ae, 2016; Guinness World Records, 2019).

Kinesiske **Winsun** hevdet i 2014 at de hadde bygget 10 vanlige hus, hvert på 195 m². Kostnaden var på 4800 USD. Til dette benyttet de en stor ekstruderings-basert printer til å produsere ferdig-elementer som ble fraktet til anleggsplassen. Videre hevdet de i 2015 at de bygget en fem etasjers bygning på totalt 1100 m² (Behzad, Ming og Jay, 2017).

Det kinesiske selskapet **HuaShang Tengda** har printet ut en to etasjers villa på 400 m² på 45 dager. I motsetning til Winsun-selskapet, brukte HuaShang Tengda en prosess som gjør det mulig å «skrive ut» et "helt hus" on-site på en gang (Behzad, Ming og Jay, 2017). De bygger «skjelettet» med armeringsjern først, for deretter å printe rundt/inntil dette etterpå. Det ble i dette prosjektet brukt vanlig C30-betong.



Figur 20: To etasjers villa printet av HuaShang Tengda (Florea et al., 2021)

Europeiske selskaper

CYBE, Nederland (*)

Hva CyBe Construction (2020) sier om sin egen CyBe mørtel (spesielt tørke/herdetid) er interessant: «CyBe MORTAR can be used for architectural, structural, industrial, and design projects regarding 3D concrete printing applications. It is a high-performance, single purpose material and durable in all environments. Besides, it is non-metallic, and contains very low amounts of chloride and sulphate. Use CyBe MORTAR with our 3D concrete print technology to produce high durability objects where low shrinkage is desired. CyBe MORTAR sets in three minutes and achieves structural strength in only one hour. This allows a fast and efficient printing process, a reduction of costs and sustainable results. »

Som vi ser på side 256 i studien til Craveiro *et al.* (2019) sier de her at CyBe mørtel muliggjør 3D-printing i en hastighet på opptil 60 cm/s, og det kan legges strenger fra 10mm til 50mm høyde, med et nytt lag allerede etter fem sekunder. De hevder også at deres printermasse slipper ut 32% mindre CO₂ sammenlignet med Portland-sement. Cybe (Construction, 2020) sier at denne mørtelen er utviklet spesielt for å være printbar, og at den skal ha lang levetid selv i utsatte konstruksjoner.

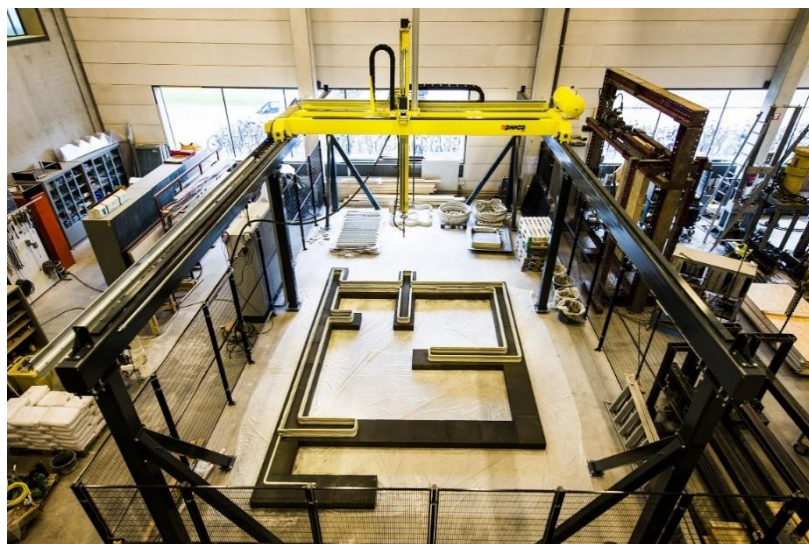
Weber Beamix / Van Wijnen, Nederland

I «Project Milestone», et samarbeidsprosjekt med flere aktører, er det planlagt å bygge et bærekraftig boligfelt med fem 3d-printede boliger til kommersiell bruk. Weber Beamix har levert printematerialet og produsert elementene i sin produksjonshall. Printerens som er benyttet er en robotarmprinter som er plassert på en skinne som beveger seg langs produksjonslinjen. Byggene sammenstilles av disse prefabrikkerte elementene på byggeplass (WeberBeamix, 2020). Byggherre og boligutvikler for prosjektet er Van Wijnen. De andre

aktørene i prosjektet er Eindhoven kommune, Eindhoven University of Technology, Vestada og Witteveen + Bos. Den første boligen skal ifølge hjemmesiden til Van Wijnen ha blitt overlevert til kjøper høsten 2020. (VanWijnen, 2020)



Figur 21: Visuelt uttrykk for boligprosjektet "Project Milestone". Kreditering: Houben/Van Mierlo architecten, A.I: YuconVR (3dprinthouse, 2018)



Figur 22: Her testes forskjellig type betong og dyser for Project Milestone. Til dette er det benyttet en gantry-printer. (3dprinthouse, 2018)

WASP, Italia (*)

Har printere som kan printe med ulike typer fiberarmert betong; polymerisk og ulike natur-fiber, skummet, (foamed) betong, leire, porselen og halm. Også jordbaserte masser kan benyttes, slik som i nevnte TECLA-prosjekt. For realisering av deres ene prosjekt, Gaia, ble

det benyttet vegetabiliske fibre i en blanding som WASP har utviklet, og som består av 25% av jord tatt fra området (30% leire, 40% silt og 30% sand), 40% hakket halm fra ris, 25 % ris skall og 10% hydraulisk kalk. Blandingen foregikk ved bruk av en våt panne-mølle som gjorde blandingen homogen og brukelig (Apis-cor.com, 2020).

XtreeE, Frankrike (*)

XtreeE, et Paris-basert teknologiselskap som fokuserer på storskala 3D-utskriftsløsninger for arkitektur-, ingeniør- og byggebransjen. XtreeE har også samarbeidet med Concreative, det første storskala 3D-print-firmaet i UAE, for å åpne en ny produksjonsenhet i Emiratene.

Denne lanseringen er i tråd med XtreeEs strategiske målsetning om at de innen 2025 skal sette opp et nettverk med mer enn 50 globalt tilkoblede bedrifter som kan utføre 3D-printeroppdrag. Den nye enheten skal drives av Concreative, som de neste fem årene tar sikte på å bruke teknologien i 25 prosent av nybygg, med integrering av XtreeE-teknologi (manufacturingtrade.com, 2019).

2.5 3DCP SOM ET LEDD I Å NÅ BÆREKRAFTSMÅLENE

Byggenæringen utgjør en stor del av den menneskelige aktiviteten på jorda, og er, ifølge De Schutter *et al.* (2018) ansvarlig for anslagsvis 40% av alt fast avfall, 38% av klimagassutslippene, og 12% av vannforbruket i verden (De Schutter *et al.*, 2018, s. 31). En annen studie (Alhumayani *et al.*, 2020, s. 1) oppgir at næringen står for 40% av klimagassutslippene, og 36% av det globale strømforbruket.

Fra tallene ovenfor, forstår man at det er viktig med forbedringer i form av reduserte CO₂-utslipp fra bransjen. 3DCP er en ung teknologi, mye har skjedd i løpet av få år, og det meste virker fortsatt til å være mer eller mindre på forsøksstadiet. Det er derfor også vanskelig å finne konkrete data for de ulike konseptene som så langt er benyttet i bransjen. Generelt er det imidlertid en god del litteratur som omtaler teknologien, og som gjør beregninger og antagelser om hvordan teknologien vil kunne påvirke de ulike aspektene. Videre i dette kapitlet, ser vi på en del forhold som kan bidra i riktig retning.

Som et ledd i den videre utviklingen ble det av EU-kommisjonen, under Horizon 2020-programmet, etablert et prosjekt kalt Hybrid Industrial Construction (HINDCON) (Skeide og Olsson, 2019). Som Friis (2020) beretter i sin avhandling handler dette samarbeidsprosjektet om tilpasning av produksjonsteknologi til byggesektoren, og introduserer additiv og subtraktiv produksjon (SM) i bygg. HINDCON har fire primære utviklingsområder:

Utvikling av additive materialer, AM/SM og robotteknologi, programvareutvikling, og produksjons og konstruksjonsprosesser. Målet er å utvikle produksjonsteknologi til byggesektoren for at næringen skal bli mer industrialisert og overvinne begrensningene som ligger i dagens manuelle produksjonsprosesser.

2.5.1 Redusert materialforbruk

En reduksjon i forbruk av materialer er noe som direkte øker næringens bærekraft. Ulike materialer bidrar til utslipp i forskjellig grad, og det er derfor naturlig at ikke alle får like mye fokus. Betong har i mange år blitt sett på som en klima-versting. Det kan se ut som om at det er selve sementen som den vesentlige årsaken til dette. Sement er et produkt som er energikrevende å fremstille, og det produseres store mengder hvert år. Fra 1930 til 2013, har verdens befolkning anslagsvis produsert 76 gigatonn sement, og for året 2013 alene, var tallet 4 milliarder tonn (Xi *et al.*, 2016, s. 1). For å sette dette litt i perspektiv, har forfatteren av en norsk artikkel (Bjørnstad, 2016) sammenliknet disse tallene med volumet i Mjøsa, som er kjent som Norges største-, og Europas 35. største innsjø. Den har en gjennomsnittlig dybde på ca. 150 meter, og et areal på 365 km². Mjøsa inneholder 56 gigatonn - 56 000 000 000 tonn - med vann. Vektmessig kunne man da fylt Mjøsa med sement nesten 1,5 gang.

Solberg (2016) sier i sin artikkel at verdens betongproduksjon står for ca. 5% av menneskenes totale CO₂-utslipp. Det samme fremgår i en annen artikkel (Xi *et al.*, 2016, s. 1), mens en tredje kilde (Watts, 2019, Chapt. 1) skriver mellom 4% og 8%. Strand (2019) sier at dette gjør betongproduksjonen til den tredje største menneskeskapte kilden til CO₂-utslipp. Ser man kun på de industrielle prosessene i verden, så står sementproduksjonen for hele 90% av CO₂-utslippet (Xi *et al.*, 2016, s. 1). Årsaken til det høye CO₂-avtrykket er at sementproduksjon er en energikrevende prosess i seg selv, og i tillegg er energien i stor grad kull-basert.

I tabellen nedenfor sees et oppsett for det prosentvise bidraget som de ulike bestanddelene i betong har, i forhold til deres påvirkning på klimautslippet. Som det framgår, er dette en sammenligning av tall fra tre forskjellige studier. Bestanddelene listet opp, er alle, i større eller mindre grad, ingredienser i framstillingen av ulike betong-typer som tradisjonell betong, 3D-printing betong og 3D-printing cob/leirklining.

Tabell 4: Betong-komponentenes ulike miljøpåvirkninger (Alhumayani et al., 2020, s. 10).

	Cement and fly ash	Water	Polycarboxylates	Fibre cement	Sand and gravel	Transportation	Electricity (Robot operation)
Le et al. (2012b)	71%	0.05%	5%	0.3%	2.6%	13%	8.3%
Anell (2015)	72.5%	0.05%	4%	0.3%	2.4%	12.50%	8.5%
Nerella and Mechtcherine, (2016)	68%	0.04%	4%	0.0%	3%	15%	10%

Som vi ser, står sement og flygeaske for i størrelsesorden 70% av CO₂-utslippet fra betong. Fra dette er det utvilsomt riktig å ha et høyt fokus på mulighetene til å kunne redusere verdens sement-forbruk. I denne sammenheng, virker 3DCP-teknologien lovende.

I studien til Alhumayani et al. (2020) er det gjort en sammenligning av forbrukt masse for å bygge 1m² vegg med henholdsvis tradisjonell betong, tradisjonell cob, og betong og cob for 3D-printing. Fra tabellen nedenfor, framkommer det at det ved 3D-printing kun brukes halvparten av massen som for tilsvarende masse ved tradisjonelle konstruksjoner.

Tabell 5: Forbruk masse for 1 m2 vegg (Alhumayani et al., 2020).

The specifications for each wall section per method.					
Wall name	Method	Area m ²	Thickness	Type	Volume m ³
Conventional Concrete	Conventional	1	NA	solid	0.3 ^a
Conventional Cob	Conventional	1	0.6	solid	0.6
3DP Concrete	3D printed	1	0.4	patterned	0.16
3DP Cob	3D printed	1	0.5	patterned	0.31

^a This volume includes concrete mix, framework, concrete block, reinforcement steel, and mortar.

2.5.2 Sementerstatninger

Av det totale CO₂-utslippet i forbindelse med sementproduksjonen, utgjør karbonatisering av kalkstein 60% av CO₂-utslippet (Norcem.no, 2020a). I en teknisk artikkel (Justnes, 2020), benytter professor Harald Justnes også tallet 60% for kalsineringsprosessen i seg selv, mens en annen kilde (Souto-Martinez, Arehart og Srubar, 2018) oppgir 50%. Dette er høye tall, og det er derfor bra for klimaavtrykket om man får til en reduksjon i bruken av sement. Dette kan skje ved å bruke alternative tilsetninger i stedet for en del av sementen, og/eller ved å redusere mengden av produsert betong.

Som vi så i tabellen ovenfor, står sement og flygeaske for ca. 70% av klimagassutslippet ved produksjon av betong. Flygeaske er meget godt egnet som erstatning for deler av sementblandingen, og bidrar blant annet til lavere herdetemperatur, og til at betongen blir tettere. Selv om flygeaske i seg selv er et resultat av prosesser med høyt utslipp av CO₂, så er det et biprodukt fra blant annet forbrenning av ulike typer farlig avfall, og fra kullkraftverkene. I miljøsammenheng er det derfor positivt å kunne benytte dette i betongproduksjonen. Sementen «Norcem standard FA» har et flygeaske-innhold på 18% (Norcem.no, 2020b), mens det i ulike sammenhenger blir brukt langt høyere konsentrasjoner.

Som et eksempel består sementen brukt i senketunnelen i Bjørvika i Oslo av 44% til 50% flygeaske (Smeplass, 2014, s. 15).

Som et spennende og lovende innspill, i det å kunne få til en reduksjon i sementforbruket, har et norsk forskningsprosjekt foregått ved SINTEF siden januar 2017. Det er berammet til å vare ut 2021 (Kulmo, 2019), og utføres i samarbeid med NTNU, hvor prosjekteier er Hydro, og med Norcem og Veidekke som industripartnere. Forskningsprosjektet har fått navnet DARE2C, og står for **Durable Aluminium Reinforced Environmentally-friendly Concrete Construction**. Forkortelsen spiller også på utsagnet «dare to carbonate» (Kulmo, 2019). Det forskes altså på en ny type betong, der mye av sementen byttes ut med brent leire for å gjøre betongen mindre basisk. På denne måten skal aluminium kunne brukes som armering, uten at denne korroderer (Strand, 2019). I artikkelen siteres SINTEF-forsker Harald Justnes der han sier: «Egentlig bygger vi med altfor høy styrke i betongen i dag. Vi lager tett betong for å beskytte armeringen, og dermed får vi høyere styrke enn det vi trenger».

Brent leire som erstatning for sement gir, ifølge Kulmo (Kulmo, 2019), to vesentlige fordeler i forhold til klimaregnskapet: Langt lavere CO₂-utslipp som følge av en sterkt redusert sement-produksjon, samt et langt mindre energiforbruk i forbindelse med brenning av leire istedenfor sement. Dette da leiren brennes på mye lavere temperatur enn ved kalsinering i sementproduksjonen. I en LCA-studie (Souto-Martinez, Arehart og Srubar, 2018, s. 8) for CO₂-utslippet fra sementproduksjon, der det har blitt gjort forsøk på lignende forhold, konkluderes det med at det totale CO₂-utslippet kan reduseres med 40% gjennom å bruke de rette blandingsene av vanlig sement og tilsetninger som flygeaske, slagg og lignende (SCM's på engelsk). Strand (Strand, 2019) skriver også at DARE2C-betongen kan lages mer porøs enn det som er ønskelig i tradisjonell betong. På denne måten gjøres betongen mer mottagelig for CO₂ via karbonatiseringsprosessen, og kan i større grad enn i dag bidra til karbonfangst.

2.5.3 Armering

I en studie (Alhumayani *et al.*, 2020), som tok for seg klimaavtrykket ved bygging av en vegg, er det for eksempel vist at for en tradisjonell betongkonstruksjon er armeringsjernets bidrag til klimaavtrykket så mye som 49%, mens selve betongen kun bidrar med 19%. Avtrykket fra armeringsjernet er høyt, og det ligger derfor en mulig klimagevinst i å kunne redusere dette forbruket. Dette er noe av grunnen til at det også forskes på alternative armerings typer/former, slik som i det norske forskningsprosjektet DARE2C (Strand, 2019) og (Kulmo, 2019). Ved 3D-printing av bygg, benyttes gjerne relativt smale printebaner. Ved

bruk av jern som armering, men uten tilstrekkelig betongoverdekning, vil jernet raskere korrodere. Det er i denne sammenheng spennende med forskning på bruk av aluminium som armering. I Strands artikkel (Strand, 2019) om DARE2C, siteres Hydros prosjektleder, som uttaler:

Her har man muligheten til kreativt design, både av armeringen og konstruksjonen. Vi tenker at vi må være innovative, og at man ikke trenger å bruke aluminium på samme måte som vi bruker stål i dag. Vi må tenke nytt, og ved å bruke mindre sement, tror vi kanskje at vi kan komme ned på samme pris som i dag.

I artikkelen fremgår også at de tenker at forskjellig skrapaluminium, med blant annet gamle motorblokker, kan gjenvinnes til armering.

2.5.4 Nyskapende arkitektur

I studien (Alhumayani *et al.*, 2020) vises det også til at 3D-printede betongkonstruksjoner har mer enn 50% lavere klimaavtrykk enn for tradisjonell betong. Dette skyldes ulike forhold som kan bidra til kraftige reduksjoner i forbruk av betong. Ved 3D-printing, ligger godt til rette for å konstruere fasonger forskjellig fra tradisjonell betongstøping. Ved for eksempel å bruke avrundede hjørner, kan trykk- og strekk-krefter tas opp på en annen måte enn i mer tradisjonelle former. Generelt kan da tykkelsen på konstruksjonene gjerne reduseres, samt at det ligger til rette for å kunne variere tykkelsen alt etter behovet i den gitte konstruksjon. Dessuten blir det lettere å lage hulrom i betongkonstruksjonene. Generelt vil digitalt fabrikerte betongkonstruksjoner (Digital Fabricated Concrete) med samme funksjonalitet som konstruert på tradisjonelt vis, yte miljømessig bedre over hele levetiden (De Schutter *et al.*, 2018, s. 10).

I mange av 3D-prosjektene som så langt har blitt reist rundt om i verden, er det i hovedsak veggene som har blitt printet, mens etasjeskillere og takkonstruksjoner har blitt bygget på tradisjonell måte. Dersom man også printer taket, eller kanskje mer riktig sier at man ikke har tak i vanlig forstand, men mer en type iglo-konstruksjon, så vil den positive miljø-effekten bli enda større. Ikke bare vil vi få en reduksjon i konstruksjonsmaterialene i seg selv, men det vil også medføre betydelig mindre bygge-avfall. Som et eksempel kan nevnes det såkalte «Office of the future» (se bildet nedenfor), som ble bygget for de Forente Arabiske Emiratenes nasjonale komité, og fungerer som hovedkvarteret til Dubai Futures Foundation (Sakin og Kiroglu, 2017).



Figur 23: "Office of the future" (Sakin og Kiroglu, 2017)

Byggene ble bygget i Kina, og fraktet til Dubai. Avfallsmengden under byggingen ble anslagsvis redusert med mellom 30 og 60 % i forhold til tradisjonell byggetype (Sakin og Kiroglu, 2017, s. 3).

I Nederland har et firma som heter Van Wijnen også tenkt utradisjonelle hus-former (Boffey, 2018). Se bildet nedenfor. Professor Theo Salet, ved Eindhoven University of Technology, som er med i prosjektet, sier i en promoterings-video (Eindhoven, (2018)): "We only put concrete down in places where we need it. We use a lot less material, so we're much more sustainable".



Figur 24: Prosjekt Milestone. Hus tenkt oppført i Meerhoven, Nederland (Boffey, 2018)

2.5.5 Økt levetid på betongen

En god betong har i utgangspunktet lang levetid. Tidligere nevnte Pantheon i Roma er trolig et av de beste eksemplene vi har på holdbarheten til en kvalitetsbetong. Bygget er ca. 2000 år gammelt, bygget med en kuppel med diameter på ca. 43 meter, og det hele står like fint i dag.

Årsaken til at bygget har så god levetid, skyldes en god sementsammensetning og at det ikke er armering i betongen. I moderne betongkonstruksjoner har det i all hovedsak vært vanlig å

benytte jern som armering. Dette reduserer imidlertid levetiden betraktelig, fordi jernet korroderer på grunn av både utettheter og selve karbonatiseringen som skjer i betongen. Karbonatisering er en prosess der betongen gradvis tiltrekker seg CO₂ fra lufta, og derved reverserer prosessen som foregår under produksjon av sementen. Jo større overflate som er eksponert, dess raskere tiltrekkes CO₂. For en gitt betong-kvalitet, vil betongen, uavhengig av fasing og tykkelse, over tid ta til seg lik mengde CO₂ (Galan *et al.*, 2010).

Umiddelbart skulle man anta at det kun er positivt at betongen tar til seg CO₂ igjen. Konstruksjonsmessig er det imidlertid uønsket at betongen tar til seg for mye CO₂. Dette fordi betongens surhetsgrad endres betraktelig etter hvert som denne prosessen foregår, og pH-verdien kan gå fra 12 til under 8 (Galan *et al.*, 2010). Dette forårsaker at armeringsjernet i betongen mister sin beskyttende passivfilm, bestående av stabile jernforbindelser som dannes i det sterkt basiske miljøet ved støp av betongen. Ifølge Norcem (Norcem.no, u.å.) vil betong med pH < 10 slutte å beskytte armeringen mot korrosjon.

På grunn av frykt for korrosjon av armeringsjernet, overdimensjoneres mange betongkonstruksjoner. Dette for å sikre en tilstrekkelig overdekning av armeringen, og på denne måten sørge for å forlenge initieringsperioden; tiden som karbonatiseringsfronten bruker for å nå inn til armeringen (Galan *et al.*, 2010). Nettopp problemstillingen med kort levetid for armeringsjernet er den hovedsakelige bakgrunnen for forskningsprosjektet DARE2C, som nevnt i tidligere kapittel, der de har kommet fram til lovende resultater med bruk av aluminium som armering istedenfor jern. I artikkelen til Strand (Strand, 2019) sier en entusiastisk professor Justnes: «Hvis vi virkelig lykkes med arbeidet vi gjør i dette prosjektet, kan vi i teorien få uendelig levetid uten vedlikehold.»

Da det kommer til sement sammensetningen, har studier vist at romerne benyttet vulkansk aske som tilslag. Innholdet av de ulike mineralene i sementen forårsaket kjemiske reaksjoner som gjorde at krystallstrukturer utviklet seg i selve mørtelen/betongen. Små sprekker reparerer seg nærmest av seg selv på grunn av denne veksten (Marie *et al.*, 2014). Tidligere nevnte Pantheon og Trajans Marked, som på bildet nedenfor, begge lokalisert i Roma. Trajans Marked er fra ca. 100 år e.Kr. og har også holdt seg veldig bra, til tross for mange kraftige jordskjelv.



Figur 25: Trajans Marked i Roma (Bjørnstad, 2014).

I senere tid har forskere analysert den gamle betongen, og eksperimentert med lignende sementblandinger. Begrepet smartbetong har blitt tatt i bruk om typen betong som til dels har selvhelbredende egenskaper. Sementen kan for eksempel blandes med nanomaterialer som nanosilika (na-SiO₂), nanojernoksid (nano-Fe₂O₃) og karbonnanorør (CNT) (Makul, 2020).

Som et moment er det verdt å nevne vedlikeholdskostnadene /reinvesteringer på armert betong. I en artikkel (Keulemans, 2016) henvises det til boken «Concrete Planet», der det fremgår at de fremtidige kostnadene for reparasjon og erstatning av skadde konstruksjoner, bare for USA, beløper seg til billioner av dollar.

2.5.6 Kortreiste materialer

For å redusere utslippene forbundet med transport, fokuseres det på bruk av lokale råvarer. Det italienske 3D-print selskapet WASP («Worlds Advanced Saving Project»), har hatt en mulighetsstudie som de har kalt Gaia (3dwasp.com, 2020). Navnet er tatt etter jordens gudinne i den greske mytologien, Gaia, og henspiller på at de har brukt jord (leire, silt og sand) fra byggeplass som hovedbasis for «betong»-massen. De har også stått for printingen i prosjektet TECLA, som også brukte jord direkte fra byggeplassen. Som isolasjon, ble det i Gaia-prosjektet brukt oppkuttete strå og skall fra ris-planten, samt 10% hydraulisk kalk (3dwasp.com, 2020). Risskall er et organisk avfall fra risproduksjonen. Andre materialer som kan være miljøvennlige å benytte som isolasjon, er halm eller hamp. Disse dyrkes/kan dyrkes nær sagt hvor som helst, tar til seg CO₂ under vekst, og får dermed et veldig snilt miljøavtrykk.

3D-printing muliggjør økt bruk av kortreiste materialer, både ved å benytte tilsvarende tradisjonelle betong-typer, og ved bruk av «betong» basert på jord og leire. Med

utgangspunkt i lokal jord og leire, har det også blitt eksperimentert med organiske tilsetninger som tre og halm som tilslag i betongen (De Schutter *et al.*, 2018). Dette blir gjerne omtalt som cob i engelsktalende land, og tilsvarer i stor grad det som fra gammelt av her til lands er kjent som Leirklining. Med cob, som er et bærekraftig jordbasert materiale, er det gjort forsøk med å 3d-printe en veggkonstruksjon, hvor viser at det har noen fordeler sammenlignet med betong. Det har blant annet lavere klimaavtrykk, og det kan være mulig å hente materialene i nærheten av eller fra selve byggeplass. Slik vil transport og materialhåndteringen bli redusert kraftig. Cob skal ifølge kunne brukes til å generere komplekse former som er vanskeligere med tradisjonell betong. Begrensningen for cob er dens strukturelle styrke. (Alhumayani *et al.*, 2020)

Vi ser i en studie at én kvadratmeter stort ytterveggelement produsert i cob har GWP på 13,2 kg CO₂-ekvivalenter (Ben-Alon *et al.*, 2019). Dette veggelementet har økende tykkelse fra 305mm ved toppen til 610mm nede, og er bestående av strå, sand, leirholdig jord, leire og vann. Systemets grense for den aktuelle beregningen omfatter utvinning av råmaterialer, transport av råmaterialer, prosessering og transport av byggematerialet. Det vil si at nevnte GWP på 13,2 kg CO₂-ekvivalenter gjelder kun fram til det stadiet hvor det er prosessert til et byggemateriale og er transportert til byggeplassen. Selve bygge-, drifts- og avhendingsfase er ikke inkludert i dette tallet. Vekten på denne kvadratmeteren er 772 kg.

Vi ser videre i samme studie av Ben-Alon *et al.* fra 2019 at GWP-verdien for det enkelte material fordeler seg som vist under. Disse tallene gir en pekepinn på hvilken størrelsesorden GWP for materialet brukt i TECLA-prosjektet kan ha.

Tabell 6: GWP-verdier for strå, sand, leirholdig jord og leire (Ben-Alon et al., 2019).

Environmental impacts for a 1 m² cob wall assembly according to each constituent material.

	Weight per 1 m ² wall (kg)	Stage	Energy Demand [MJ _{eq}]	Global Warming [kg CO _{2eq}]
Straw	10.1 (0.61 bales)	Production	13.4	2.59
		Harvesting	1.79	0.0238
		Baling	0.00	0.00
		Transportation	0.409	0.0874
		Sub-Total	15.6	2.70
Sand	292	Production	16.1	1.83
		Transportation	11.9	2.57
		Sub-Total	28.0	4.40
Clay-rich soil	256	Production	19.6	2.43
		Transportation	10.4	2.25
		Sub-Total	30.0	4.68
Clay plaster	28.1	Production	8.88	0.727
		Transportation	2.86	0.616
		Sub-Total	11.7	1.34
Water	185	Conventional Treatment	1.09	13.2
Total	772		86.4	13.2

2.5.7 Robotisert prefabrikasjon og sammenstilling

3D-printing vil kunne utnytte potensialet i en BIM modell på en langt bedre måte enn i konvensjonelle konstruksjonsmetoder. Det ligger godt til rette for en mer integrert design- og konstruksjonsprosess, og teknologien åpner for langt mer energieffektive løsninger. Dette gjelder både konstruksjonene i seg selv, og selve konstruksjonsprosessen. Den østerrikske arkitekten Wolf D Prix sier at de i forbindelse med byggingen av «The Museum of Contemporary Art and Planning Exhibition» (MOCAPÉ) i Shenzhen i Kina, brukte 8 arbeidere 12 uker på en del av prosjektet, noe som ellers ville krevd 160 arbeidere i 8 måneder (Sakin og Kiroglu, 2017). MOCAPÉ består av prefabrikkerte 3d-printede elementer og stålkonstruksjoner, og er sammenstilt av roboter. Dette gir dramatiske besparelser i et prosjekt. Blant annet vil kortere byggeperiode føre til lavere energiforbruk i byggeperioden, samtidig som færre arbeidere vil redusere lokalt energiforbruk på byggeplass. Om elementer er 3D-printet on-site, vil det redusere transportbehovet og dermed også reduksjon i energibehovet. Videre betyr det mindre avfall fra forskalingsarbeider, som betyr lavere energiforbruk for håndtering og behandling av dette

2.5.8 Sirkulærøkonomi og klimavennlig materialbruk

Miljødirektoratet definerer sirkulærøkonomi som «å utnytte naturressurser og produkter effektivt og så lenge som mulig, i et kretsløp der minst mulig ressurser går tapt». Dette innebærer at et produkt må vare så lenge som mulig gjennom reparasjoner, oppgradering og gjenbruk. Når det ikke lengre kan benyttes i sin opprinnelige form er det hensiktsmessig å gjenvinne avfallet som råvare til ny produksjon (Miljødirektoratet, 2020a). Som et

virkemiddel i å få redusert utslippene i byggebransjen, som ellers i samfunnet, vil gjenbruk av materialer være et viktig bidrag. Et eksempel på et initiativ i Norge er Miljøpark, som er eid av AF-gruppen, hvor de gjenvinner materialer som er levert hos deres massedeponi. Inntil 80 prosent av massene som leveres til Miljøparks deponier kan friskmeldes og brukes på nytt i samfunnet (Miljøpark.no, 2020).

FN har med sine bærekraftsmål en ambisjon om at vi innen 2030 skal redusere avfallsmengden betydelig. Dette skal skje gjennom forbud, reduksjon, samt gjenvinning og ombruk av materialer. Europakommisjonen har også satt seg mål for den sirkulære økonomien og håndtering av avfall og masser. De sier blant annet at alt avfall som egner seg for gjenvinning eller annen behandling ikke tillates deponert fra 2030.

Med bakgrunn i FNs bærekraftsmål, er det tidligere nevnte forskningsprosjektet DARE2C spennende, og det retter seg dessuten direkte mot målet om økt gjenbruk av avfalls-materialer. Som en spinn-off, i forbindelse med prosjektet, har det blitt utviklet en løsning for å ekstrudere aluminiumstråd/kabel, til bruk som armering, direkte fra skrapmetall av aluminium (Justnes, 2020). I forhold til tradisjonell omsmelting av skrap-metall til aluminiums-barrer, eller ved produksjon av tradisjonelt armeringsstål, brukes det altså ikke energi på omsmelting i forkant, og det spares på denne måten mye energi. I 3DCP-sammenheng, kan slik armering benyttes horisontalt, og rulles ut samtidig med printingen.

Løsningen utviklet i DARE2C-prosjektet blir ytterligere miljøvennlig dersom sement-erstatningene utvinnes fra resirkulerte materialer som finmalt, resirkulert murstein eller keramikk basert på kalsinerte leire. Det har også vist seg at fliser av keramikk og sanitæravfall fra oppussingsprosjekter har et potensial som SCM'er, dersom de males tilstrekkelig fine. (Justnes, 2020). Videre ligger det et potensial i å gjenvinne blant annet armeringsjern og annet stål, og betong fra konstruksjoner som rives. Til isolasjon kan både gammelt oppfliset treverk være aktuelt til gjenbruk, samt risskall som er et avfallsprodukt fra risproduksjon.

Under fremstilling av sement, der kalkstein knuses, settes det i gang en prosess der materialet reagerer med oksygenet i lufta, og CO₂ frigjøres. Denne prosessen står for ca. 67% av det totale utslippet i forbindelse med produksjon av sementen, mens de resterende 33% slippes ut som følge av energibruken i ovnene som benyttes til brenning av sementen (Stensvold, 2015). Tilsvarende tall oppgis i en annen artikkel (Justnes, 2020) til å være henholdsvis 60% og

40%. Dette tallet vil endre seg i forhold til blandingsforholdet mellom sement og andre sement-erstatninger, kalt SCM's på engelsk (står for **S**upplementary **C**ementious **M**aterials). Justnes skriver i sin artikkel at det meste av sement-blandingene som brukes, globalt sett, per 2014, hadde et sementinnhold på ca. 65%. Det fastslås at det forventes å bli vanlig med en høyere grad av variasjon i sement-sammensetningen i framtiden. Vanlige sementerstatninger vil være flygeaske, slagg, kalsinert leire og kalkstein. I Norge er flygeaske vanlig, og utgjør 20% av sementblandingen. På grunn av den gode tilgjengeligheten, vil leire og kalkholdig leirstein (mergel) være økende som scm'er i framtiden.

Den motsatte prosessen av at CO₂ frigjøres under produksjon av sement, kalles karbonatisering. Dette er den kjemiske prosessen mellom sementprodukter og CO₂ i luften, hvor CO₂ altså tas opp igjen i betong og andre sementbaserte produkter. Beregningene for hvor mye av utslippene som tas opp igjen, varierer en del. En studie (Souto-Martinez, Arehart og Srubar, 2018, s. 2) henviser til ulike andre studier, der tallene for opptak av utslippet fra sementproduksjonen spriker fra å være så lave at de er ubetydelige, til å være et sted mellom 13% og 48%. Den kjemiske reaksjonen mellom sement og CO₂ har vært godt kjent lenge, og bør ikke neglisjeres i klimaregnskapene. Forskerne i en kinesisk studie (Xi *et al.*, 2016) har kommet fram til at så mye som 43% av CO₂-mengden som ble frigjort ved produksjon av sement i perioden 1930 til 2013, faktisk har blitt tatt opp igjen i betongen i samme periode. Selv hevder forskerne i studien at effekten av karbonatisering har fått for lite oppmerksomhet i modellene for utslipp av CO₂, og mener at CO₂-lagringen som foregår i betongen må tas med i klimaregnskapene til FNs klimapanel.

2.5.9 LCA-analyser og vurdering av utslipp

Life Cycle Assessment (LCA) er som forkortelsen tilsier en analyse av livssyklusene for objektet, eller enheten som observeres. En LCA benyttes gjerne for å kunne se helheten i de totale miljøpåvirkningene fra en konstruksjon, eller et prosjekt, hele veien fra oppstart, gjennom produksjon, bruk, rivning og avhending. LCA-regnskapet er imidlertid bygget opp slik at man kan definere de ulike faser og moduler som man bestemmer at skal omfattes av analysen.

Dersom LCA-resultater fra ulike produkter skal sammenliknes, er det naturligvis viktig at analysene bygges opp på samme måte, slik at man har et likt sammenligningsgrunnlag. Måten en LCA settes opp reguleres blant annet gjennom ISO-14040. Et eksempel på LCA-oppsett sees i figuren nedenfor, der vi ser at totalen er splittet opp i de ulike bruksfasene til

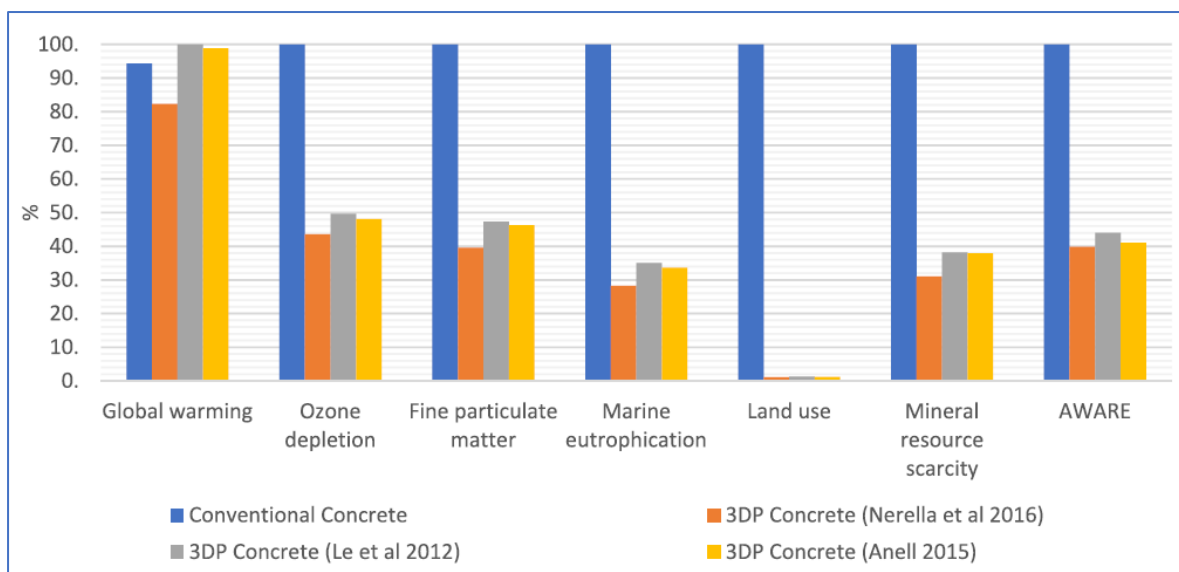
produktet, og disse er igjen delt opp i moduler som råmaterialer, transport og tilvirkning under produktfasen, samt transport ut til byggeplass. Videre ser vi den totale klimapåvirkningen nedbrutt på de ulike måle-parameterne GWP, ODP osv.

Eksemplet viser en del av en LCA analyse for en gitt betong-type (EPD-Norge.no, 2016), der vi ser miljøavtrykket fordelt på ulike parametere. Vi ser at GWP, Global Warming Potential, det vil si CO₂-utslipp, har den desidert største verdien i kolonne A1, som representerer råmaterialene i betongen.

Tabell 7: LCA for type betong B30 (EPD.Norge, 2020)

LCA: Resultater																
System boundaries (X=included, MND=module not declared, MNR=module not relevant)																
Product stage			Construction installation stage		User stage							End of life stage				Beyond the system boundaries
Raw materials	Transport	Manufacturing	Transport	Construction/ Installation stage	Use	Maintenance	Repair	Replacement	Refurbishment	Operational energy use	Operational water use	De-construction/ demolition	Transport	Waste processing	Disposal	Reuse-Recovery- Recycling-potential
A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D
X	X	X	X	MNR	MNR	MNR	MNR	MND	MNR	MNR	MNR	MNR	MND	MNR	MNR	MNR
Miljøpåvirkning (Environmental impact)																
Parameter	Unit	A1		A2		A3		A4		A5		C1		C2		
GWP	kg CO ₂ -eqv	2,38E+002		1,24E+001		6,11E+000		2,03E+000								
ODP	kg CFC11 -eqv	3,89E-006		0,00E+000		7,59E-007		0,00E+000								
POCP	kg C ₂ H ₄ -eqv	4,11E-001		1,73E-002		4,02E-002		1,10E-003								
AP	kg SO ₂ -eqv	1,11E-001		9,97E-002		9,80E-003		5,46E-003								
EP	kg PO ₄ ³⁻ -eqv	2,97E-002		9,77E-003		7,24E-003		9,37E-004								
ADPM	kg Sb -eqv	3,26E-004		0,00E+000		2,57E-006		0,00E+000								
ADPE	MJ	1,25E+003		1,65E+002		7,98E+001		2,66E+001								
<small>GWP Globalt oppvarmingspotensial; ODP Potensial for nedbryting av stratosfærisk ozon; POCP Potensial for fotokjemisk oksidantdannning; AP Forsurningspotensial for kilder på land og vann; EP Overgjødslingspotensial; ADPM Abiotisk uttømmingspotensial for ikke-fossile ressurser; ADPE Abiotisk uttømmingspotensial for fossile ressurser</small>																

I tabellen nedenfor vises klimaavtrykket fra tre ulike 3DCP-betonger, sammenliknet med tradisjonell betong.



Figur 26: Klimaavtrykk fra tre ulike 3DCP-betonger, sammenliknet mot tradisjonell betong (Alhumayani et al., 2020, s. 11).

Kolonnen til venstre, «Global warming», viser at klimaavtrykket er i samme størrelsesorden, uavhengig av hvilken type betong vi ser på. Nettopp på grunn av dette, er det grunn til å tenke at de tre 3DCP-betongtypene som er studert inneholder en relativt lik (og tradisjonell) andel sement. Situasjonen blir imidlertid en helt annen dersom vi ser på cob/leirklining. I en studie (Alhumayani et al., 2020, s. 7) framkommer følgende data, der vi tenker at 3DP cob er et materiale i nærheten av det som er brukt i TECLA-prosjektet. Fra tabellen nedenfor, ser vi at GWP for 3DP cob har en miljømessig ytelse som er 87,9% bedre enn vanlig betong konstruksjon. Dette vil si at dersom en vanlig betong konstruksjon skulle hatt en verdi på 1000, så utgjør 3DP cob bare 121.

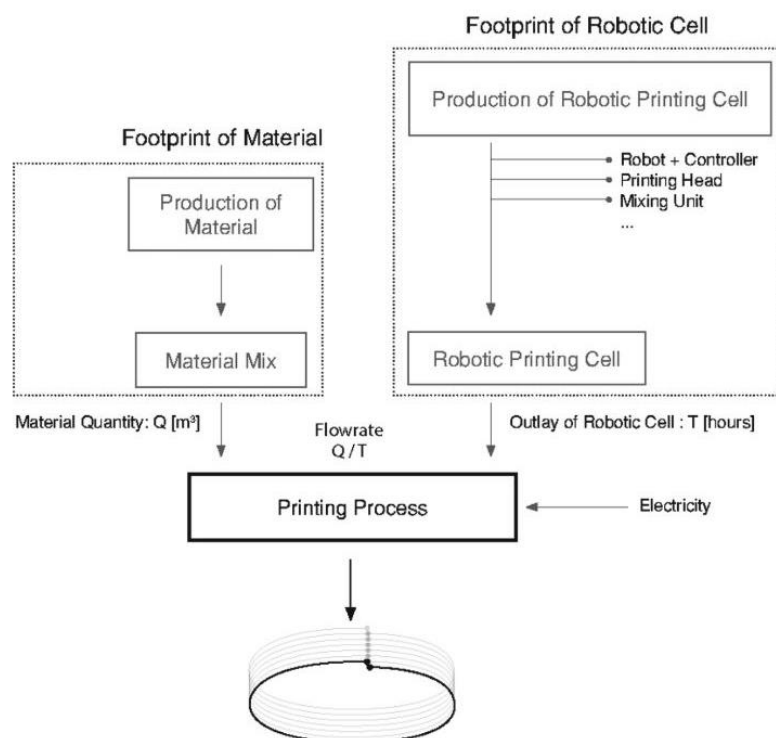
Tabell 8: Prosentvis miljø-påvirkning leirklining (Cob), 3DPC, 3DP Cob i forhold til 1 m² tradisjonell betong vegg (Alhumayani et al., 2020, s. 7).

Impact categories	NF/person	WF/person	Conv. Cob	3DP Conc.	3DP Cob
Global warming	8095.53	22.19	98.2%	-27.2%	87.9%
Stratospheric ozone depletion	5.37E-2	6.75	29.8%	10.7%	32.0%
Particulate matter	5.95E-4	9.54	97.8%	23.9%	85.7%
Marine eutrophication	19.545	3.12	-34.0%	47.7%	11.7%
Land use	81.94E+4	8.42	74.3%	93.8%	83.3%
Mineral resource scarcity	6.36E-2	8.08	-18.3%	60.1%	26.4%
AWARE (water depletion)	11468.7	9.03	34.3%	14.7%	49.7%
Overall improvement	-	-	96%	24%	85%

I forhold til geografisk plassering av byggeplass, kan imidlertid den totale miljøbelastningen variere relativt mye. I studien (Alhumayani et al., 2020) vises det til at ved å gå fra en byggeplass i Saudi Arabia til Sør-Australia resulterte beregningene til en forbedring i den totale miljø-ytelsen på hele 52%, mens det for GWP var en forbedring på 36%.

Vi ser i studien til Ben-Alon et.al fra 2019 at én kvadratmeter stort ytterveggelement produsert i cob har GWP på 13,2 kg CO₂-ekvivalenter (Ben-Alon *et al.*, 2019). Dette veggelementet har økende tykkelse fra 305mm ved toppen til 610mm nede, og er bestående av strå, sand, leirholdig jord, leire og vann. Systemets grense for den aktuelle beregningen omfatter utvinning av råmaterialer, transport av råmaterialer, prosessering og transport av byggematerialet. Det vil si at nevnte GWP på 13,2 kg CO₂-ekvivalenter gjelder kun fram til det stadiet hvor det er prosessert til et byggemateriale og er transportert til byggeplassen. Selve bygge-, drifts- og avhendingsfase er ikke inkludert i dette tallet. Vekten på denne kvadratmeteren er 772 kg. Volumet for denne ytterveggen er 0,475 m³ med snittdybde 457,5 mm.

For 3DCP kan man dele printeprosessen i to deler – en for materialet og en for printerteknologien. Et eksempel på slik inndeling er vist under. Kuzmenko et.al har sett nærmere på klimaavtrykk for printerteknologien, nærmere bestemt en seksakset robotarmprinter. Vi ser i denne studien at det totale klimaavtrykket til den undersøkte printeren tilsvarer 2,2 kg CO₂-ekvivalenter for hver time med printing.



Figur 27: En mulig inndeling for LCA for 3DCP (Kuzmenko et al., 2020).

2.5.10 Relevante bærekraftsmål

FNs bærekraftsmål nummer 11 *Bærekraftige byer og lokalsamfunn* har som mål å gjøre byer og lokalsamfunn inkluderende, trygge, robuste og bærekraftige. Per i dag bor mer enn 50% av verdens befolkning i en by, og tallet er økende. Det forventes at i 2030 er andelen som bor i by økt til 60%. Denne urbaniseringen skaper både muligheter og utfordringer. Byene vokser ofte raskere enn tilgang på boliger og arbeidsplasser, og dette presser fram en utvikling som danner slumområder. For å sikre alle i befolkningen er det viktig å bruke ressursene på en bærekraftig måte. Delmål 11c sier at man skal *bistå de minst utviklede landene med å oppføre bærekraftige og solide bygg ved bruk av lokale materialer*.

FNs bærekraftsmål nummer 12 *Ansvarlig forbruk og produksjon* skal sikre bærekraftig forbruks- og produksjonsmønstre. Vi trenger å gjøre mer med mindre, og trenger som enkeltperson og samfunn å redusere klimautslipp og ressursbruk. Delmål 12.5 sier at vi innen 2030 skal *redusere avfallsmengden betydelig gjennom forebygging, reduksjon, materialgjenvinning og ombruk*.

FNs bærekraftsmål nummer 13 *Stoppe klimaendringene* sier at klimaendringene skjer raskere enn antatt, og at vi bør handle umiddelbart for å bekjempe klimaendringene og de medfølgende konsekvensene. Det er viktig å finne globale løsninger, se på løsninger for både reduksjon av utslipp og lagring av CO₂, samt satse mer på fornybar energi og nye industrielle systemer. Det pekes også på nødvendigheten av å investere i å begrense skadeomfanget.

2.6 TECLA – UTSLIPP FRA ET 3DCP-PROSJEKT

I samarbeid med WASP og MAPEI, har vi utført det vi vil kalle en mini case-studie av et spesifikt 3DCP-prosjekt; TECLA. Bak prosjektet står Mario Cucinella Architects og WASP. WASP er en av de ledende aktørene på 3D-printer-teknologien. Som samarbeidspartner innen materialutvikling, har de med seg MAPEI, en global produsent av ulike tilsetnings- og overflatebehandlings-materialer. TECLA-prosjektet er lokalisert i Bologna i Italia.

Rob Goodier er redaktør for engineeringforchange.org, og har skrevet en artikkel om TECLA-prosjektet. I artikkelen (Goodier, 2020) uttaler Charles Newman, som er arkitekt og grunnlegger av «Infrastructure Design and Expert Research Fellow at Engineering for Change» følgende om TECLA-prosjektet: «Their design looks to be very well developed and much closer to achieving 100 percent local materials». Det fremheves at i forhold til andre

aktører innen 3DCP, så er det dette konseptet som Newman, gjennom sin forskning, mener har kommet lengst i retning mot fullstendig bærekraft.

Så langt, har det ikke blitt utført noen LCA for TECLA-huset, og vi har derfor gjort en sammenstilling av data for å kunne sammenlikne utslippene fra dette prosjektet mot andre type byggemetoder.

2.6.1 Konseptet

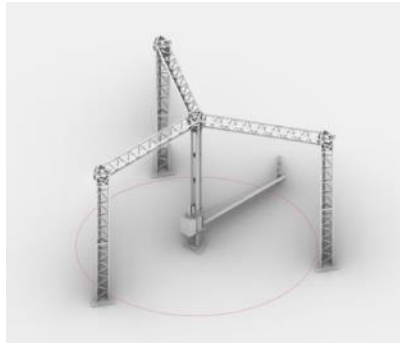
Husene printes med fasong som en iglo, og som materiale, benyttes en materialblanding bestående av leire, jord og sand fra tomteområdet. Dette er et konsept som de to selskapene tenker kan være en løsning på det de sier er en ventet boligmangel, som er forventet å bli enda større ettersom prognosen for verdens befolkning går mot 11 milliarder i 2100 (Goodier, 2020).



Figur 28: Nye former (Goodier, 2020).

Fundament/gulv konstrueres i mer tradisjonell betong, mens resten har en langt lavere sement-mengde i seg, mye for å oppnå tilstrekkelig motstandsdyktighet mot vann (Goodier, 2020).

TECLA-prosjektet vil være det første prosjektet som printer et hus med lokal jord/leire som materiale. MAPEI har forsket på og identifisert de ulike bestanddeler av den lokale jorda, og de tilsetninger som var nødvendig for å få til den optimale massen til bruk for 3D-printingen (3dwasp.com, u.å.). Materialet er biologisk nedbrytbart, og vil ha lite byggeavfall. Prosjektet baserer seg på en printer fra WASP som de har kalt Crane WASP. Om ønskelig kan flere moduler monteres i sammen for å håndtere printing av større bygg.



Figur 29: Printeren Crane WASP



Figur 30: Printeren Crane WASP kan settes sammen av flere moduler

2.6.2 Kommersialisering og økonomi

Per mars 2020, var det ikke fastsatt noen bastant tidshorisont for kommersialisering, men tanken er at de skal utvikle en løsning som kan brukes over hele verden. WASP har derfor utviklet en selvbygger-pakke, «Maker Economy Starter Kit», som er tenkt å kunne tilbys kommuner og eventuelle selskaper som er interessert (Goodier, 2020). Imidlertid sies det videre at det ikke er forsket ferdig på hva som er beste løsning for oppskalering.

Selskapene ser for seg at husene skal kunne finne sin nisje i den sirkulære økonomien med bærekraftig bruk og gjenbruk av lokale materialer (Goodier, 2020). Formen på husene er valgt for å gjøre de mer energigjerrige, og for å kunne brukes i mange ulike miljøer/sammenhenger. Det trekkes fram at materialenes naturlige isolasjonsevne vil bidra til redusert behov for energi til fyring og avkjøling.

2.6.3 Våre resultater

Vi har samlet informasjon og verdier fra Mapei og WASP for materialer, utstyr og prosess. Videre har vi funnet verdier for CO₂-avtrykk og GWP for strømforbruket i framstillingen og produksjonen. Materialene er i all hovedsak lokale og transportbehovet er dermed minimalt, kun for tilsetninger og for utstyr til og fra byggeplass. Dette har vi sett bort fra i den videre

fremstillingen. Etter å ha vært i direkte kontakt med WASP og MAPEI, har vi fått informasjon som danner grunnlaget for det vi vil kalle et forenklet estimat for CO₂-utslippet, det som omtales som GWP, i fase A1 til A4, altså fra produksjon av råmaterialer til sammenstilling on-site.

Tallene vi baserer estimatet vårt på, er hentet inn fra WASP og MAPEI. Dataene er ikke nøyaktige, og vi har måttet gjøre en rekke antagelser. Ris-skall og ris-strå er organiske biprodukter fra risproduksjon, og har naturligvis bundet opp i seg. Ved innhøsting av ris, har bruk av maskiner, håndtering og transport bidratt med en gitt belastning for klimaet. Da det kommer til CO₂-utslippet, har materialene dermed både et positivt og et negativt bidrag i seg. Vi har imidlertid ikke funnet noen verdi for disse materialene, og da det er både et negativt og et positivt bidrag, antar vi at verdien for de organiske materialene er lik null. Vi har også antatt at den oppgravde jorda i seg selv ikke gir fra seg noe CO₂-utslipp. Videre har vi fått opplyst at det har blitt brukt offentlig vann, men vi har ikke funnet noen verdi for produksjon/levering av vann på byggeplass. Denne verdien er også satt til null. Vi har hatt dialog med MAPEI for å få verdier til bruk for produktene de har levert, og fått oppgitt at vi kan bruke samme verdi for alle fire produktene. Vi har fått opplyst leverandør av kvartssanden som er brukt, men vi har ikke funnet verdien for denne sanden, og har istedenfor gjort en antagelse om at den vil ligge i samme størrelsesorden som for sand tatt ut på liknende vis i Norge (EPD.Norge, 2020). Til utførelsen av dette prosjektet har det blitt benyttet 55 m³ cob printemateriale. Dette er ekstrudert ut til 170 m² med printet overflate. Veggene har et fotavtrykk tilsvarende 12 m², og total gulvflate er 65 m². Printehastigheten har vært ca. 0,15 m³ per time.

Vi har i beregningene utelatt bidrag fra transport da vi ikke fikk innhentet data for det. På tross av dette har vi tatt noen forutsetninger og gjort en enkel vurdering av hvilket bidrag transport kan ha i et prosjekt. Det er da forutsatt at all transporten er gjennomført med en lastebil tilsvarende en gjennomsnittlig lastebil i Norge, og at transportbehovet er totalt 200 km. Det er hentet verdier for gjennomsnittlig utslippsfaktor for CO₂ for lastebil fra Miljødirektoratet, som sier at utslippet er 877 CO₂ g/km (Miljødirektoratet, 2020b). Med disse forutsetningene ville bidraget blitt i størrelsesorden 180 kg CO₂.

Tabellen nedenfor viser utregningen av strømforbruket til maskinene benyttet i prosjektet. I første omgang fikk vi opplyst dataene i kolonnen "volum. Vi fikk senere beskjed om at vi kunne beregne et snitt på 250 timer per maskin. Kolonnen for "teoretiske timer" er

timeforbruket utregnet fra opplyste data for henholdsvis totalt volum og volum per dag eller time. Tallet som viser volum/tid for gravemaskinen, er fra WASP oppgitt i m³/dag. Vi har antatt at det er 7,5 timers dag.

Tabell 9 - TECLA - antall kWh brukt

Strømførbruk	Volum	enhet	m3	teoretiske timer	Forbruk timer	Forbruk kW	Totalt kWh
<i>Maskin-bruk oppsett 1 (TECLA setup)</i>							
Graver (1,6 tonns), antatt elektrisk	10	m3/d	65	49	250	11,6	2900
Screening	0,1	m3/t	65	650	250	11,6	2900
Wet pan mill	0,15	m3/t	55	367	250	2,2	550
Crane WASP ink pumpe	0,07	m3/t	55	786	250	3,5	875
Totalt energiforbruk maskiner							7225

Videre ser vi i tabellen nedenfor et oppsett over konstruksjonens ulike bestanddeler og deres respektive utslippsverdier.

Tabell 10 - TECLA, CO2-utslipp

Materiale	kg/stk	kg/m3	stk	Totalt forbruk i kg	kg/m2	totalt antall kWh	kWh/kg	gCO2e/kWh, Italia 2019	GWP - kg CO2/kg	kg CO2
Siktet jord	1600	1600	38,8	62080					0	0
Mapesoil 100	15		130,4	1956					1,88	3677
Cement 42,5 R	25		61,5	1538					0,58	897
Ris-skall	140		9,3	1302						0
Ris-strå	270		0,4	108						0
Silica-sand, steinbrudd	1800		7	12600					0,75	9450
Dynamon SR4	25		7,8	195					1,88	367
Planiseal WR100 (migrerende og hydrofo)	20		5	100					1,88	188
Planicrete (Lateksgummi for bedre vedhe)	25		8	200					1,88	376
Vann (offentlig)	1000		21,34	21340						0
Sum				101419	597					14955
Strøm maskiner, som oppsett nedenfor.						7225	0,071	233	0,00118	120
CO2 utslipp									0,149	15075

For fullstendige tabeller for våre beregninger se vedlegg.

3 DRØFTING

I dette kapittelet drøftes funnene vi har gjort i teorien opp mot forskningsspørsmålene og problemstillingen.

3.1 PRINTERE / AKTØRER / TILNÆRMING

Vi har i studien vår sett at det er to printertyper som er blitt brukt på majoriteten av prosjektene; gantry og robotarm-printere. Det er tydeliggjort gjennom vårt reviewkapittel at det benyttes lagvis horisontal ekstrudering for printing av bygninger. Gantry-printere er tilpasningsdyktige i forhold til størrelsen på objektet som skal printes, ettersom printerhodet henger suspendert i en ramme som kan bygges i den størrelsen objektet krever. Videre er robotarmprintere også brukt i flere prosjekter. Disse har en dødsone hvor de ikke får printet, noe som er en markant svakhet dersom man ønsker å få printet sammenhengende på et stort avtrykk. Dersom robotarmprinter skal klare å produsere en stor konstruksjon er den i utgangspunktet avhengig av å kunne stå på utsiden for å konstruere hele omrisset. Dette betyr at printeren trenger å ha en rekkevidde større enn selve konstruksjonen. Når printeren må stå på utsiden av konstruksjonen vil den måtte kunne printe like nøyaktig også i fullt utstrakt posisjon. Av dens beskaffenhet er det med høy sannsynlighet vanskelig å opprettholde en slik presisjon på en utstrakt arm når avstanden blir stor. Det vil nok til dels kunne ivaretas gjennom større dimensjoner og derfor bedre margin for nøyaktighet på printerarmen, men det vil nok etter hvert kreve omfattende håndtering av printeren i opp- og nedrigg når vekt og mål blir store. Dette vil være en begrensende faktor med tanke på å velge en robotarmprinter sammenlignet med for eksempel en gantryprinter, så lenge printeren skal stå en annen plass enn i en produksjonshall. Dersom robotarmprinter står på et produksjonssted, vil ikke dette ha den samme betydningen. Så en robotarmprinter vil kanskje være best egnet til produksjon av elementer. Elementproduksjon betyr i de aller fleste tilfeller behov for transport, mens printing in-situ har transportbehov for materialer og tilsetninger.

Tilnærmingen til printing av betong som CONPrint3D presenterer, med et ønske om å kunne benytte eksisterende maskiner og utstyr, slik som sprøytebilen med påmontert printer i enden av armen, virker å være noe begrensende med tanke på å omfavne mulighetene som ligger i utviklingen. I en overgangsfase, og kanskje med et bredere nedslagsfelt i bransjen blant mindre og mellomstore bedrifter, vil dette kunne bidra til å være et steg på veien mot økt bærekraft. Selv om bedriftene ikke har økonomiske rammer til å omfavne teknologien

umiddelbart, vil de kunne ta CONPrint 3D som et steg på vegen og skaffe seg gode erfaringer som senere gjør de bedre rustet til å omfavne alle mulighetene som 3d-printing kan tilby. I forhold til designfrihet og arkitektonisk tilnærming, framstår det for oss som at CONPrint3D er best egnet til å printe i tradisjonelle former og rammer. Dermed ser vi ikke at denne løsningen havner i samme kategori som de andre, mer fullstendige løsningene, med hensyn på bærekraft. Det største bidraget i bærekraftperspektivet vil kunne være god utnyttelse av allerede produsert maskinelt utstyr.

Vi ser at WASP har benyttet en type printer hvor printerhodet er plassert på en arm som står på en søyle sentrert i det arealet printeren opererer i. De kaller den Crane WASP. Vi vurderer disse printerne som en variasjon av gantry-printer ettersom den består av en ramme som omfavner printerarealet, og har et printerhode som er tilknyttet dette. Disse modulene kan slås sammen og etablere et ønsket areal, og samtidig kunne mate flere ekstrudere på samme tid, og som jobber i hvert sitt område. Dette vil kreve et større system for å ivareta samtidig produksjon, men det vil være mulig. Så lenge transporten av printematerialet opprettholdes, og styringen av printerhodene, samt grensesnittene mellom modulene ikke skaper kollisjoner vil dette kunne fungere. At det kreves at flere uavhengigheter spiller på lag gjennom hele prosessen er nok også den største utfordringen med dette modulsystemet. Samtidig kan dette tilpasses forskjellige omriss, slik at det enklere kan benyttes på byggeplasser som stiller krav til tilpasning – for eksempel plassbehov eller tilkomst. For denne type printer består av lettere håndterbare elementer sammenlignet med en robotarmprinter, og det gjør det håndterlig på steder som krever det.

På lignende måte som for Crane WASP, bør også robotarmprintere kunne settes opp til å jobbe i team, og overlappes hverandres dødsoner. For å få flere roboter til å «samarbeide» på denne måten, er det etter vårt syn i hovedsak snakk om utvikling og bruk av rett type programvare. Her ligger det et uforløst potensial som med stor sannsynlighet kan løfte utviklingen ytterligere. Det er som kjent stor aktivitet og utvikling blant aktører og tilbydere av BIM, samtidig som det er sterk utvikling i bransjen for 3D-printing av konstruksjoner. Dersom disse leirene hadde landet en løsning som integrerer bruken av begge styrker, ville det skapt en forbedring som ytterligere ville bidratt til bærekraftige løsninger for byggenæringen gjennom større grad av automatisering, enklere helhetlig planlegging, og en mer effektiv byggeprosess.

Når vi går over våre kilder, og ser på hvordan utviklingen har pågått med tanke på hvor i verden det har vært mest utbredt, har vi en opplevelse av at Asia og Kina var tidlig ute med å printe bygg av litt størrelse, men uten at de helt omfavnet mulighetene i teknologien. Vi har ingen kilder som tydelig påviser dette, men ut fra bildene vi har sett fra enkelte referanseprosjekter som vi har vist til i denne rapporten, mener vi å se spor etter en del tradisjonelle produksjonsmetoder. Blant annet virker huset fra Winsun produsert med prefabrikkerte 3d-printede moduler, mens HuaShang Tengda produserte toetasjes villa ved hjelp av vanlig betong rundt armeringen. De var tidlig ute, henholdsvis 2014 og 2017, og utviklingen har vært stor, men det er for oss usikkert hvorvidt aktiviteten i dag gjenspeiler pågangsmotet de hadde for noen år siden. Vi opplever at asiatiske selskaper var tidlig ute med å ta i bruk 3DCP-teknologien, og var langt framme på verdensbasis en tid. Selv om de var tidlig ute føler vi at de var mindre knyttet til forskningsinstitusjoner og arbeid mot videre utvikling. I de senere virker det på oss som at momentumet har flyttet seg til Europa.

En region med mye aktivitet er Midtøsten. Her er det stor økonomisk muskelkraft, og det er en nasjonal satsing i UAE med Dubai, med målsetning om at innen 2030 skal 25% av alle nybygg være 3d-printet. Videre er det sagt at det skal printes et helt by-kvartal innen 2030. Dette er ambisiøse mål, og ut fra våre kilder trolig det mest fremoverlente i verden i dag. Samtidig er dette planlagt i en del av verden som er kjent for dårlige arbeidsvilkår og -rettigheter. Dette viser seg i forbindelse med forberedelsene til verdensmesterskapet i fotball som skal arrangeres i Qatar i 2022. Det internasjonale fotballforbundet FIFA har fra flere hold fått «rødt kort» for å tildele mesterskapet til Qatar. Og det er med en viss bismak at Dubai har disse ambisiøse målene for teknologien i årene som kommer. På den andre side kan dette på lengre sikt ha en positiv virkning på det etiske perspektivet ettersom det vil kunne endre arbeidsoppgaver og tilnærming. En annen utfordring som kan vise seg gjeldende for områder med lite tilgang på vann, er forbruket av vann i denne prosessen og klimaavtrykket dette bidrar med. Blant annet ser vi fra vår vurdering av utslipp fra TECLA at vannmengden som er brukt for 55m³ printet masse løper seg til 21,3 m³. Dette tilsvarer en andel på over 38 % av den totale mengden. Samtidig har landene her bygget storby midt i ørkenen fra før og har kanskje håndtert vannproblematikken på en ok måte. Det er mulig det er mye elementproduksjon og at disse transporteres inn til byggeplass. Vi ser i produktdatablad for standard B25 sement at det går med gjennomsnittlig 160-230 liter vann per m³ (BMC-Norge.no, 2019). Ved bruk av 3DCP on-site, vil et potensielt stort

transportbehov reduseres drastisk. Vi ser det som sannsynlig at 3DCP vil bidra til en bedring av klimagassutslippet totalt sett, og dette er i tråd med FNs bærekraftsmål.

Det er aktivitet innen 3DCP også i Norge. Construction City er en innovasjonsklynge som i disse dager slipper informasjon rundt sitt ferske 3DCP-prosjekt. Partnerskabet i Danmark har konkludert med at det var mulig å 3d-printe et bygg i tråd med europeiske normer tilbake i 2018. I Norge er det Direktoratet for byggkvalitet (dibk) som forvalter det byggtekniske regelverket, og deriblant fører tilsyn med regler om dokumentasjon av egenskaper til byggevarer. Byggteknisk forskrift (TEK17) er en del av dette regelverket som DIBK forvalter, og er en forskrift med tekniske krav til byggverk som sier noe om hvilke egenskaper et byggverk minimum må ha for å kunne føres opp lovlig i Norge. Vi slår opp §1.1 – Formål - i TEK17 som sier: «Forskriften skal sikre at tiltak planlegges, prosjekteres og utføres ut fra hensyn til god visuell kvalitet, universell utforming og slik at tiltaket oppfyller tekniske krav til sikkerhet, miljø, helse og energi.» Videre sier veiledningen at forskriften skal bidra til god kvalitet gjennom kravene som er nedfelt i de forskjellige delene forskriften består av. Det stilles krav til blant annet sikkerhet mot naturpåkjenning, energi, konstruksjons- og brannsikkerhet, inneklima og helse. Kravene som settes her i Norden kan på grunn av klimatiske forhold være forskjellige fra andre deler av verden. Uten at vi har fått noen nærmere informasjon om prosjektet til Construction City, forventer vi at det er grunn til å være optimistiske med tanke på at kravene er innfridd og at det nå skal 3d-printes et bygg i Norge for kommersiell bruk. Det blir spennende i ettertid å se resultatet og hvilke erfaringer de har gjort seg.

Grad av frihet

Som nevnt åpner denne teknologien til utvidet grad av frihet i tilvirkningen. Dette innebærer at vi tenker nytt når det kommer til form og struktur, og kanskje kan man tenke nytt når det kommer til arkitektur og utforming. Hvorfor skal man bygge tradisjonelt når ny teknologi åpner for nye muligheter? Her er det viktig å bruke de fordelene og mulighetene ny teknologi gir, og ikke holde seg til det trygge og tradisjonelle. Det er begrenset hvor utviklende det er å produsere boligene likt. Wasp med prosjektet TECLA har gått for organiske former på konstruksjonen, og har dermed gått bort i fra tradisjonell arkitektur for boliger. Dette er etter vår mening nødvendig for å kunne ta fullt nytte av potensialet som teknologien tilbyr.

Man har fortsatt anledning til å tilpasse materialblanding til aktuelt prosjekt, slik at forbruk og avtrykk av material optimaliseres for det som skal oppføres. Veggene i en bolig med kun

én etasje burde for eksempel kunne ha en tilsetning av mer tre/fiber/halm o.l. sammenlignet med en bygning med flere etasjer.

Konstruksjonssted

Transport til og fra byggeplass er en stor faktor for utslipp, og selve transportbehovet avhenger av hvilket konstruksjonssted som benyttes. Dersom man velger å produsere in-situ eller on-site, vil transportbehovet helt eller delvis forsvinne. Videre vil transportbehovet være markant større dersom det skal fraktes elementer til byggeplass. I forbindelse med fabrikasjon av elementer vil størrelsen av disse måtte tilpasses transportgjennomføringen, som igjen kan bety at prosjektspesifikke elementer ikke kan formes optimalt. Transport internt på byggeplass må også håndteres på en god måte for å ikke bli en unødig faktor til utslipp.

Ved produksjon in-situ vil bemanningsbehovet reduseres på grunn av at det ikke er nødvendig med personell til prefabrikasjon, opplasting, transport, lossing og montasje på byggeplass, ei heller bruk av kran for å løfte elementer på plass. Ved at det er flere prosesser som sammen skal skape flyt i en byggefase, er det også flere avhengigheter og faktorer som må spille på lag. Normalt er planleggingen og gjennomføringen god, men det er flere potensielle feilkilder til at prosessen kan stoppe opp, og venting i en byggefase er kostbart. Dersom man velger in-situ vil faktorene bli langt færre. I all hovedsak vil feilkildene da være eventuell stopp i mating av printematerialet eller tekniske feil på printeren. Disse ville man uansett måtte håndtere i en prefabrikasjon off-site også. På dette stadiet forventer man at printematerialet er tilpasset printeren og produksjonen, slik at dette ikke påvirker prosessen. Selvfølgelig kan det skje menneskelige feil i blanding av materialet, dersom dette gjøres manuelt.

XtreeE i Frankrike planlegger å etablere et nettverk av produksjons-huber som kan benyttes av aktører som ønsker det. Dette skaper arbeidsplasser for de som skal drive hubene, og gjør det mulig for aktører som ikke har anledning til å ta investeringen i ny teknologi til å benytte teknologien som en tjeneste. Dette er med å senke terskelen for bedriftene, og dermed kan det tenkes at det direkte bidrar til å fremskynde et skifte i byggenæringen. For at slike huber skal fungere godt er det nødvendig at det benyttes et underlag som er samkjørt mot programvare og teknologi. Kanskje hadde det vært fornuftig og ivaretatt dette med en manual som forklarer krav til prosessen for å gjøre gjennomføringen god, noe likt en BIM-manual?

3.2 MATERIALFORBRUK OG CO₂-UTSLIPP

Vi har sett at sementproduksjonen står for ca. 5% av det globale CO₂-utslippet, og at dette utgjør hele 90% av alle industrielle utslipp, og dermed også er den største industrielle bidragsyteren til klimagass-utslipp. Ifølge IEA.org (u.å.) nådde sementproduksjonen en topp i 2014, og har holdt seg på omtrent samme nivå etter det. Videre opplyses at Kina står for hele 55% av den globale produksjonen, og at India er den nest største med 8%. I forhold til at det ikke er så stor forskjell i folketallet hos de to landene, fremstår dette som en betydelig forskjell i produksjonen. Det kan derfor være nærliggende å tenke at vi for India sin del vil komme til å se en betraktelig økning i produksjonen, etter hvert som landets utvikling og levestandard øker. IEA skriver at dersom det ikke settes inn tiltak for å redusere produksjonen, er den ventet å stige moderat fram til 2030, men at følgende tiltak kan bidra til å hindre en fortsatt økning; optimalisering av sementinnholdet i betongen, bruke betong mer effektivt, minimere spill, samt å maksimere designet på bygg og konstruksjoner.

Ser vi tallet 5% opp mot at byggenæringen står for hele 38% av de globale CO₂-utslippene, så fremstår allikevel ikke betongens andel som spesielt høy. Majoriteten av utslippene fra byggenæringen kommer altså fra andre materialer, maskiner og transportmidler. I kildene vi har benyttet, ser vi ellers at det opereres med forskjellig ordlyd da det henvises til sement/betongproduksjonens bidrag til CO₂-utslipp. Solberg (2016) opererer med at *betong*-produksjonen står for ca. 5% av det *totale* CO₂-utslippet, mens Xi *et al.* (2016, s. 1) skriver at *sement*-produksjonen står for 5% av alle *industrielle* prosesser, og en tredje kilde, (Watts, 2019) skriver, i likhet med Solberg, at betongproduksjonen utgjør mellom 4% og 8% av totalt CO₂-utslipp. Det kan slik se ut til at det er kalsineringsprosessen som er den største kilden til utslipp i forbindelse med betongproduksjonen.

I en studie (Alhumayani *et al.*, 2020) som tar for seg klimaavtrykket ved bygging av en vegg, er det for eksempel vist at det i en tradisjonell betongkonstruksjon er armeringsjernets bidrag til klimaavtrykket hele 49%, mens selve betongen kun bidrar med 19%. Dette kan kanskje høres høyt ut i forhold til at den globale sementproduksjonen står for et utslipp på «bare» 5%. Men inn i de 19% inngår imidlertid nettopp også disse 5% fra sementproduksjonen, alle øvrige ingredienser til betongen, energi for fremstilling, øvrige materialer for støpning av vegg, samt transport av disse. Totalt sett kan det se ut som at betongens andel av klimaavtrykket ikke er spesielt høy. Det er tross alt mange andre materialer som også må til i oppføringen av et bygg. 3D-printede bygg vil derimot typisk ha lavere andel andre materialer

i seg, men det er nærliggende å tenke at byggene, etter hvert som konseptene blir mer kommersialiserte, vil få en høyere andel andre materialer i seg enn det vi har sett i prototypene så langt.

I forbindelse med tallene over er det tidligere nevnte forskningsprosjektet DARE2C spennende. Dersom konseptet fører frem, vil denne betongtypen utgjøre en god effekt i forhold til klimautslippet fra betongen. Det er flere ulike forhold som vil gjøre denne til en mer bærekraftig betongtype. Vi har her forhold som at det vil bli redusert behov for kalkstein, ergo frigjøres mindre CO₂. I motsetning til kalkstein så gir ikke leire fra seg CO₂ ved forbrenning, og leirens lave forbrenningstemperatur åpnes det også opp for bruk av biobrennstoff (Justnes, 2020). Blåleire brennes på kun 850 grader, mot 1450 grader for kalsinering av kalkstein, og på den måten brukes langt mindre energi, som gir lavere CO₂-utslipp. Lavere forbrenningstemperaturer gir også muligheter for andre energiformer, som forbrenning av avfall. Dette bør derfor kunne bidra til redusert forbruk av kull.

At aluminium kan benyttes som armering i stedet for jern, er det som på lang sikt trolig vil ha mest å si for det totale miljøregnskapet. Dette da aluminium med riktig legering varer «evig», og vil hindre at det oppstår skader i betongen som følge av korrosjonssprengning. Fra omtalen av forskningsresultatene, virker det sannsynlig at denne betongtypen vil kunne gi oss betongkonstruksjoner med levetider som er mangedoblet i forhold til den tradisjonelle betongen. Vi vil trolig også kunne se en reduksjon i betongforbruket. Dette som følge av at betong-overdekningen i konstruksjonene kan beregnes kun etter behovet for lastoverføring mellom armering og betong, uten at en behøver ekstra overdekning for å hindre korrosjon. At man for en gitt konstruksjon, kan redusere tykkelsen med kanskje så mye som 10 cm totalt, vil kunne bety store besparelser i forbruket av betong.

Da aluminium er svakere enn jern, må det, volummessig, brukes omtrent tre ganger så mye aluminium sammenlignet med jern. Det er trolig en studie i seg selv å finne ut av hva dette vil bety for CO₂-utslippene, og vi går ikke videre inn på dette i denne besvarelsen. Det er imidlertid klart at ny teknologi, som for eksempel tidligere nevnte kald-ekstrudering av aluminiums-skrap, vil kunne bidra i positiv retning. Aluminium krever mye energi å framstille og av den grunn vil det være helt nødvendig med gjenbruk av aluminium for å kunne nyttiggjøre seg potensialet i denne forbindelse. Man kan printe mindre hus uten, eller med sterkt redusert bruk av armering. Dette gjør at vi ikke trenger like tykk betongkonstruksjon på grunn av at betongen skal beskytte armeringen mot korrosjon. Det

betyr at man kan redusere materialbruk av betong, som igjen betyr redusert CO₂-avtrykk. Betongen eller cob-blandingen kan for øvrig styrkes betraktelig ved tilsetninger av ulike former for fiber. I mye av dagens betongproduksjon benyttes stålfiber, men det vil være interessant å studere andre materialer som kan være med å senke CO₂-utslippene fra 3D-printing av bygg så vel som betong forøvrig. Ulike former for naturfiber er allerede prøvd ut som fiber for forsterkning i materialene brukt i 3D-printing.

I en bærekraftig byggenæring, er det viktig å fokusere på kortreiste materialer. Kortreiste materialer betyr nødvendigvis at de må være produsert i nærheten av der de skal benyttes, og man må se på nye måter materialer kan brukes på, samt ulike former for gjenbruk av tidligere brukte materialer. I Norge kan vi for eksempel benytte oss av cellulosebaserte isolasjonsmaterialer, både i form av løs masse og som plater. Dette kan være produksjon med utgangspunkt i resirkulerte materialer, eller restmaterialer fra annen produksjon. Et miljøgunstig materiale, er hamp. Hamp kan også brukes som isolasjonsmateriale, og som for alle planter gjelder at man ved å ta høyde for karbonet som er bundet opp i planten, får et produkt som i utgangspunktet har et negativt CO₂-utslipp, vel og merke før all foredling og transport er tatt inn i regnestykket. Hamp kan stort sett dyrkes alle steder, og ble dyrket i Norge siden vikingtiden og fram til på midten av 1900-tallet (Disteler, 2019). Det er for øvrig interessant at det i Norge faktisk ikke er lov å dyrke industriell hamp, selv da denne er umulig å misbruke som narkotika. Ifølge Disteler ble hamp forbudt å produsere i Norge i 1965, og vi er i dag det eneste industrialiserte landet der dette fortsatt er forbudt.

Det er benyttet materialer som knust betong og knust tegl i printermaterialer. Bruk av knuste og oppmalte keramiske fliser er også vurdert. Generelt ved gjenbruk av slike materialer vil fraksjonen på og andelen av det gjenbrukte materialet kunne påvirke hvordan egenskapene til printematerialet vil bli. Det er en forutsetning at printeren klarer å håndtere massene og at det printete materialet har de riktige egenskaper. De reologiske egenskaper vil kunne bli usikre med for høy andel tilsatt material ifølge blant annet Partnerskabet (Partnerskabet, 2018). Det er tydelig at fraksjonen ikke kan være for stor, da printeren vil kunne få problemer med ekstrudering, men samtidig kan det nok også være en ulempe om det blir for mye nullstoff, da dette kan bidra til økt væskebehov. En parallell til bruk av nullstoff i printematerial er bruk av det i vegoverbygning, og hvordan det negativt påvirker egenskapene til å motstå ytre påkjenninger som belastning og temperaturforskjeller. Faktorer som over er diskutert spiller inn i klimaavtrykket for printermaterialet og dermed prosjektet. Det er positivt å kunne

gjenbruke materialer, og er i tråd med bærekraftsmål 11c og 12.5 som begge omtaler bærekraftig produksjon og bruk av lokale materialer, samt gjenbruk av byggematerialer.

Forskningsprosjektet DARE2C ser på muligheten for å gjenbruke aluminium, som eksempelvis motorblokker. Uten at vi har gått nærmere inn på hvordan kapasiteten og tilgangen er på slike produkter, vil vi anta at det er en kapasitet her som gjør det aktuelt å se på hvordan man kan utnytte det. Videre er det et poeng å se på hvordan tilgangen er dersom byggenæringen omfavner en slik løsning med gjenbruk av aluminium. Det vil i så fall kreve stort volum, og dersom tilgangen ikke er god nok vil det være svært uhensiktsmessig i et bærekraftperspektiv å utvinne ny aluminium i dette øyemed, da det krever voldsomme energimengder. Kanskje kan man utnytte overskuddsenergi fra andre industrier til en eventuell utvinning av aluminium. Vil det i denne sammenheng dukke opp noen utfordringer? Uten kjennskaper til bransjen for aluminiumsproduksjon, er det nærliggende å tenke at etterspørselen etter aluminium kommer til å øke drastisk, mens man vil få et tilsvarende fall i etterspørselen etter jern. Hvilken betydning kan dette få for klimautslippene?

Restmateriale fra massedeponier kan bidra til økt gjenbruk i næringen. Rimol Miljøpark utvinner en leirgrøt som er presset sammen til kaker som er et restprodukt etter gjenvinning av avfallsmasser som er kjørt til deponi. Bestående av masser under 63 mikrometer i kornstørrelse, finstoff, som er vasket ut i forbindelse med gjenvinningsprosessen. Leirgrøten består av varierende masser, men ofte av tungmaterialer og annet som ikke nødvendigvis er ønsket gjenbrukt. AF Gruppen som eier Rimol Miljøpark hadde for fire år siden et samarbeid med Mapei for å se på muligheten til å bruke dette restmaterialet til noe. Det ble forsøkt med forskjellige tilsetninger, og det ble referert til et prosjekt i Venezia, men det førte ingen vei den gangen. Vi er usikre på hvor dette står i dag, men i et bærekraftperspektiv ville det vært et flott bidrag om en løsning med slike masser kan benyttes. Det er bevegelse i videreutvikling av betong som printematerialer, og CyBe i Nederland skal ha utviklet en betong som slipper ut 32% mindre CO₂ sammenlignet med portlandsement. Slike initiativer mener vi viser at det er et moment, en positivitet, i bransjen hvor det søkes nye løsninger og utvidede bruksområder.

Dersom man kan redusere bruken av armering, så er dette naturligvis med på å redusere klimaavtrykket i byggenæringen. I en tradisjonell betongkonstruksjon, står, som vi var inne på tidligere, armeringen for nær halvparten av CO₂-utslippet, mens bidraget fra selve

betongen bare er i ca. 19%. Det er derfor tydelig at armeringen, isolert sett, har et stort potensial til å kunne bidra til reduksjon i klimaavtrykket.

Behovet for armering

Vi ser at det med 3DCP-teknologien åpnes muligheter for å konstruere bygninger og konstruksjoner med andre former enn det som tradisjonelt har vært vanlig. Imidlertid er det en stor utfordring at man ikke har muligheten til å montere armeringen før printing starter. Riktignok kan et lite hus, eksempelvis som i Gaia- og TECLA-prosjektene, 3D-printes med en form som for eksempel likner en iglo, og på den måten etterlikne naturens naturlige former for å ta opp og fordele krefter på en best mulig måte, uten armering. Det å bygge et lite hus i én etasje, er naturligvis vesentlig forskjellig fra å skulle reise et bygg i flere etasjer. Veggene må nødvendigvis være stive nok, og man kommer i hovedsak ikke utenom behovet for både vertikal og horisontal armering. Bygger man grovt nok, er situasjonen naturligvis en annen, og man kan bygge fantastiske bygg uten armering overhodet, noe blant annet tidligere nevnte Pantheon i Roma er et bevis på, selv i dag, ca. 2000 år etter at bygget ble reist.

I 3DCP-konstruksjoner er det prøvd ut løsninger der det samtidig med printingen mates ut armering i form av kabel på rull. Kabelen kan naturligvis også bestå av aluminium, og denne aluminiumstråden kan produseres ved gjenvinning som tidligere omtalt. Prosessen baserer seg på at skrapaluminium, i form av spon og lignende, presses gjennom en skrueekstruder uten tilsatt energi for smelting av aluminiumen. Strand fastslår også at aluminium bare har ca 1/3 av styrken til jern, men samtidig også bare 1/3 av vekten til jern, så vekten blir totalt sett den samme. Det må tas med i betraktningen at aluminium er dyrere å produsere enn jern, men at konstruksjonene kan lages slankere på grunn av at man kan gå ned på kravet til overdekning. På denne måten reduseres mengden sement, og derved CO₂-utslippet, samt at kostnaden på betongen i seg selv også reduseres. Kulmo (Kulmo, 2019) fremhever at da det kommer til energiforbruk og utslipp av CO₂ for produksjonsprosessen for armeringstråden, er nivåene bare 10% av det beste av tilsvarende produksjon i dag. Ifølge Kulmo uttaler professor Hans Jørgen Roven, ved NTNUs Institutt for materialteknologi følgende: «Det er ikke lett å vite hvor stort dette kan bli, men det er et voldsomt stort potensial hvis det går bra». (Kulmo, 2019). Denne løsningen fører altså ifølge Kulmo (2019) til at denne betongkonstruksjonen vil kunne redusere CO₂-utslippet til ned mot en tiendedel av tradisjonell konstruksjon. Formuleringen i Kulmo's artikkel virker noe uklar, men det er slik vi tolker teksten hennes. Vi har ikke funnet dette bekreftet i noen andre kilder.

Løsningen med armeringskabel kan naturligvis benyttes i horisontal armering, men hvordan ivaretar man behovet for vertikal armering? For mindre bygg, og litt ettersom formen på konstruksjonen, kan kanskje denne utfordringen løses med en kombinasjon av horisontal, kabelbasert armering, mens vertikale laster ivaretas av en type fiberarmering i printematerialet. Tilsetning av ulike fiber i printermassen kan imidlertid føre til problemer i printingen, ved at selve printedysen klogger seg. Dette medfører uforutsigbarheter i mengde medgått betong, og total produksjonstid. Urasjonell drift og mye nedetid for å rydde opp i problematikk underveis i printingen vil videre kunne skape en rekkefølge av mulige utfordringer som igjen kan påvirke klimaregnskapet. Blant annet har printematerialet egenskaper som tilsier at det må brukes innen et gitt tidsrom. Dette går blant annet på at det skal klare å binde seg til foregående lag, samtidig som det ikke skal flyte utover.

Det vi gjennom studien har sett som en benyttet løsning i test- og prototyper, er vertikal armering i form av at det printes hule søyler i veggene, for etterpå å manuelt senke ned en armerings-struktur, og deretter fylle hulrommene med betong. Dette foregår til dels parallelt med printingen, og gjør derved prosessen mindre selvstendig i form av at den krever manuell arbeidskraft. Teknologien er naturligvis i en tidlig fase, og det er nærliggende å tenke at andre løsninger kommer på banen etter hvert.

Mulig kvantesprang for betongens levetid?

Ved å benytte en betong med tilstrekkelig lav pH-verdi, kan det brukes aluminium som armering. Oppsiden med denne løsningen er at man da teoretisk får en betong som trolig kan vare «evig». Dette vil bety store besparelser for samfunnet, både i form av kostnader, men også i form av lavere klimautslipp gjennom sterkt redusert aktivitet for å reparere og vedlikeholde eksisterende betongkonstruksjoner. Nettopp dette med levetid på armering i betong er bakgrunnen DARE2C, og professor Justnes har uttalt at om de lykkes med dette prosjektet, er det mulig å få uendelig levetid uten vedlikehold. Ordet endelig ville vi vurdert å sette i anførselstegn, for dette er jo en sterk påstand. Men om en kan øke levetiden fra noen tiår til flere hundre år, vil det uansett være en betydelig forbedring. Når en ser hvordan romerne etterlot seg betongbygninger som nå har stått i over 2000 år, og fortsatt er i god forfatning, så vil jo mange tenke at vi burde ha kommet et stykke videre i dag.

Med en løsning som i nevnte forskningsprosjekt, virker det jo absolutt mulig med en dramatisk forbedring av betongens levetid, - selv med armering. Avhengig av påkjenninger og krav til tilstand, varierer levetiden til ulike betongkonstruksjoner riktignok sterkt, men vår

oppfatning er at levetiden for betong normalt ikke strekker seg over flere århundrer. Dette underbygges av det faktum at det er et enormt behov for reparasjon og utskiftning av verdens eksisterende betongkonstruksjoner. Ifølge Keulemans (2016) er det for USA alene et utbedringsbehov som vil beløpe seg til billioner av dollar, og det vil være naturlig å anta at tilsvarende utbedringsbehov også gjelder for andre nasjoner og verdensdeler.

Det gjenstår å se hvordan prosjektet med aluminium utvikler seg, men vi ser at dette med armering i 3D-printing av konstruksjoner per i dag er utfordrende å få til på en god måte. For klimaavtrykket ligger det en stor gevinst her. Skal man klare å utnytte det fulle potensialet i teknologien, er det avhengig at man klarer å løse utfordringen rundt armering på en måte som ikke krever omfattende manuelt arbeid underveis i prosessen.

Reduksjon i betongforbruket

At aluminium som armering ikke korroderer, betyr at betongoverdekningene kan reduseres ned til det som er nødvendig for lastoverføring mellom armering og betong. Dette er typisk 20 mm. På direkte forespørsel til professor Justnes, svarer han at det, i tradisjonell betong, ofte er vanlig med en ekstra overdekning på 30 mm til 50 mm, for å sikre at karbonatiseringsfronten bruker «tilstrekkelig» lang tid inn til armeringsjernet. Det er liten tvil om at det støpes enorme arealer med betong hvert år. En reduksjon på opptil 50 mm i betongens tykkelse, ofte på to eller flere sider av en konstruksjon, vil derfor utgjøre store mengder betong. Hvor store reduksjoner det kan dreie seg om, har vi ikke klart å finne noe tall på. Uavhengig av materiale, så må naturligvis styrken til armeringen opprettholdes. Da volumet, i forhold til styrke, er ca. tre ganger så stort for aluminium som for jern, vil man derfor også få en positiv effekt med redusert betongmengde tilsvarende det økte armeringsvolumet.

3.3 KARBONATISERING

Hvor mye CO₂ en gitt konstruksjon tar til seg avhenger av flere forhold, blant annet sammensetningen med tanke på mengde sement, tettheten på betongen, tykkelse, eksponert overflate mot luft, samt eksponert tid. Vi henviste tidligere til ulike studier som har sett på hvor mye CO₂ som tas opp i støpt betong. Disse resultatene spriker betraktelig, alt fra nærmest intet opptak, og opp til i størrelsesorden 40%. Xi *et al.* (2016) har i sin studie kommet fram til at medianen for opptak ligger på ca 40%, mens en fasade med et tynt lag av murpuss, kan oppnå hele 90% CO₂-opptak. Videre sies det at i perioden etter 1994, har Kinas

betongkonstruksjoner, inklusive mur-fasader, hatt et CO₂-opptak som tilsvarer CO₂-utslippet fra resten av verdens sementproduksjon. Dette forklares med at veksten i Kinas betongforbruk har vært så kraftig. Det hevdes også at en gjennomsnittlig betongkonstruksjon historisk har bestått i 35 år i Kina, mens den for USA og Europa ligger på 65 – 70 år. Dette påvirker det totale CO₂-opptaket ved at opptaket akkumulerer seg ved at stadig mer betong og sement har blitt eksponert mot luft.

Som en digresjon til det ovenfor nevnte, kan igjen nevnes Pantheon i Roma, som trolig må kunne sees på som en ganske ideell konstruksjon, da det gjelder opptaket av CO₂. Med sine store tilgjengelige flater, som er gjort enda større gjennom utformingen med den store kuppelen, integrerte bjelker i kuppelen både horisontalt og vertikalt, og store buer i konstruksjonen innvendig og utvendig. At bygget i tillegg ikke inneholder armering, sammen med konstruksjonens levetid, gjør trolig dette til et miljøprosjekt. Med vår senere tids konstruksjonsteknikker, ville det samme bygget måttet blitt erstattet mange ganger for fortsatt å kunne vært med i bybildet.

Vi ser i en LCA-studie for sementproduksjon, utført av Souto-Martinez, Arehart og Srubar (2018) at ved bruk av de rette blandinger med sement og tilsetninger, kan man redusere betongens CO₂-utslipp med 40 %. Det synes altså mulig med til dels dramatiske reduksjoner i utslippet, men samtidig er det viktig å ta med i betraktningen at om man reduserer sementmengden, vil man også miste en del av det CO₂-opptaket som skjer i den ferdigstøpte betongen. Dette vil naturligvis føre til et mer nyansert bilde, og som nevnt, er det også av betydning hvor tett betongen er. Men selv om en type betong inneholder mindre sement, kan den ha egenskaper som gjør at den tar til seg CO₂ raskere. For eksempel så er den tidligere nevnte DARE2C-betongen mer porøs enn tradisjonell betong, noe som da fører til økt karbonfangst for en gitt eksponert tidsperiode.

Huset som ble printet i TECLA-prosjektet ble printet med cob, og inneholder relativt lite sement. Dersom vi tenker oss det samme huset 3D-printet med betong, vil et slikt bygg være en gunstig konstruksjon med tanke på CO₂-opptaket. Huset har et gulvareal på ca 65 m², og er derved et lite hus. Den totale overflaten derimot, er på hele 170 m², hvilket betyr at det, i forhold til gulvflaten, er en stor overflate eksponert mot luft og derved også mot CO₂. Som for cob, ville det sannsynligvis også for betong blitt brukt et produkt på overflaten for å motstå vann-inntrengning fra utsiden. Dette medfører trolig at CO₂-molekylene ikke slipper like lett inn i konstruksjonen som ellers. Fra innsiden av veggen ligger imidlertid forholdene

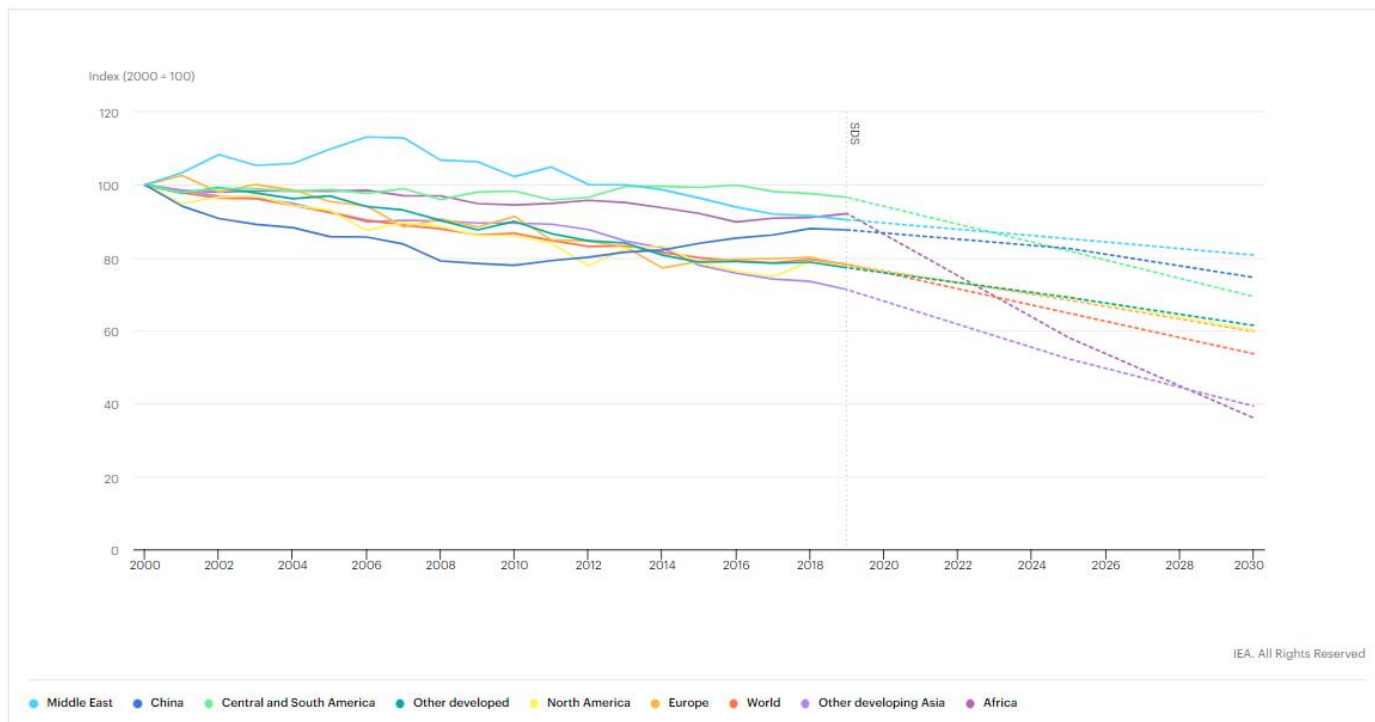
desto bedre til rette, ved at det til dels er tredoble, tynne, vegger der det ene sjiktet er fylt med isolasjonsmateriale, og det andre er fylt med luft.

I studien til Xi (2016) hevdes det at effekten av karbonatiseringen ikke er med i det totale klimaregnskapet. Dette virker for oss uforståelig, da det synes som at de fleste studiene er relativt samstemte i at det foregår et betydelig opptak av CO₂ i støpt betong. Effekter som nevnt ovenfor vil i høyeste grad være med på å påvirke de totale klimagassutslippene, og for oss framstår det som udiskutabelt at dette er en vesentlig faktor som må med i klimaregnskapene.

3.4 ENERGIFORBRUK

For å skaffe til veie sement til verdens betongproduksjon, trengs det store mengder energi for brenning av kalksteinen. Det meste av denne energien kommer fra kull, og verdens sementfabrikker står for et årlig kullforbruk på en halv milliard tonn (Rambæk, 2020). Vi vet at energien til bruk i sementovnene står for mellom 33% og 40% av de totale CO₂-utslippene i sementproduksjonen. Riktignok bidrar sementproduksjonen med «bare» 5% av det totale CO₂-utslippet, men vi ser også at sementproduksjonen står for hele 90% av det totale CO₂-utslippet fra alle de industrielle prosessene i verden (Xi et al., 2016, s. 1). Videre sier Rambæk (2020) at Kina alene for 58% av hele verdens sementproduksjon.

Ifølge Energiogklima.no (2020b) står verdens totale elektrisitetsproduksjon for 30% av det globale CO₂-utslippet. Det totale CO₂-utslippet var i 2018 beregnet til å være nær 37 milliarder tonn (Energiogklima.no, 2020a). Da vi videre, som tidligere nevnt, ser at byggenæringen står for 36% av det globale strømforbruket (Alhumayani *et al.*, 2020), betyr dette at byggenæringen hvert år står for utslipp av ca. 13 milliarder tonn CO₂. Dette er store mengder CO₂, og det er potensiale for store reduksjoner. I figuren nedenfor, vises hvordan International Energy Agency (IEA) ser for seg reduksjonen i energiforbruket i perioden 2020 til 2030.



Figur 31: Byggenæringens energiforbruk, i et bærekraftig utviklingsscenario 2020-2030 (iea.org, 2020).

Vi ser at IEA ser for seg til dels store reduksjoner i energiforbruket, med relativt store forskjeller mellom ulike deler av verden. Det er unektelig blitt et bra fokus på det “grønne skiftet”, og det er mange ideer og forslag til løsninger som vil bidra til reduksjoner. Én utfordring vil være å få til større endringer for byggenæringen i et allerede veletablert samfunn, noe annet er det å ta i bruk klimavennlige løsninger i områder av verden hvor mye av infrastruktur mangler og der bolignøden er stor. I slike områder ligger det trolig best til rette for å kunne få en rask aksept og adopsjon av 3DCP-konsepter som for eksempel TECLA-huset. Enn så lenge ser det ikke ut til at slike bygg er godkjent hos myndighetene, men det er antagelig bare et tidsspørsmål før de blir det, også i velstandssamfunn. Spesielt for unge mennesker, som gjerne også er mer opptatt av miljøet, og i tillegg har behov for tilgang til rimelige boliger, vil dette kunne bli populære boliger.

Med tanke på at mye av energien er basert på kullkraft, som er den verste energibæreren vi har, vil en reduksjon i forbruket gjøre bra utslag på reduksjon i menneskeskapt CO₂-utslipp. Med bruk av 3DCP vil det også trolig være mulig å redusere strømforbruket, blant annet gjennom redusert byggetid og færre prosesser som krever elektrisitet på byggeplass. Som vi også har vært inne på i tidligere kapittel, vil det ved 3DCP konstruksjoner også bli brukt mindre mengder av andre materialer, hvilket betyr reduksjon i energiforbruket relatert til disse. Over store deler av kloden vår, produseres mye av strømmen i sterkt forurensende

kullkraftverk, og det kreves betydelig med energi for å sprengne, knuse og sortere stein og grus, og til å produsere betongen. En reduksjon i forbruket av betong gir naturligvis en proporsjonal reduksjon i både energiforbruket og klimagassutslippene som er relatert til produksjonen av betong.

I 2019 førte norsk strøm til kun 17 gram CO₂/kWh (NVE, 2020). Til sammenligning ga strøm fra EU for 2019 et snitt på 256 gram CO₂/kWh, og det globale tallet for var 442 gram CO₂/kWh (Energiogklima.no, 2020b). Disse tallene innebærer at et byggeprosjekt vil kunne få et vidt forskjellig klimaavtrykk avhengig av hvor det gjennomføres. Dette poengterer en viktig utfordring i forbindelse med arbeid for å nå målene som er satt for klimautslipp. Det er forankret i FNs bærekraftsmål at det er nødvendig å bygge bærekraftige samfunn hvor ressursene forvaltes på en god måte, og i forbindelse med oppføring av konstruksjoner har ikke de minst utviklede landene nødvendigvis fornybare energikilder å benytte seg av. Det gjør det desto viktigere å benytte en produksjonsmetode som reduserer energiforbruket, og om man i tillegg kan benytte lokale materialer er det sannsynlig at reduksjonen kan utgjøre en forskjell på klimaregnskapene.

3.5 TECLA – EN ENKEL VURDERING AV UTSLIPP

I vår mini case-studie av TECLA-prosjektet, har vi hentet inn til dels detaljerte opplysninger om relevante forhold slik at vi kunne sette opp en enkel vurdering av CO₂-utslipp for «TECLA-huset». Oppsettet kan ikke kalles noen LCA i seg selv, men noen av tallene derimot baserer seg på LCA'er som ligger til grunn for noen EPD'er som er benyttet.

I vår studie har vi sett at opphavet til elektrisiteten spiller en vesentlig rolle for klimaavtrykket fra et gitt forbruk. Dersom et prosjekt gjennomføres med elektrisitet fra fornybare ressurser foran strøm produsert i eksempelvis kullkraftverk, vil GWP for elektrisiteten reduseres til en brøkdel. TECLA-huset er printet i Italia. 2019-tall for strøm produsert i Norge og EU førte til GWP-tall på henholdsvis 17 og 256 g CO₂/kWh. Dette betyr at det vil være store regionale forskjeller for klimaavtrykket fra strømforbruket i et gitt prosjekt, alt etter lokasjon. Da det er sagt, skal vi se at utslipps-bidraget fra elektrisitet ikke nødvendigvis utgjør så mye totalt sett for et prosjekt. Som det framgår fra oppsettet over CO₂-utslippene, er det definitivt Mapesoil 100, sement og kvarts-sanden som utgjør de største postene.

For å sammenlikne resultatet vårt med det vi så tidligere i studien, har vi sett at én kvadratmeter vegg i huset, gjennomsnittlig, består av 597 kg. Videre gir dette $597 \cdot 0,149 = 89$ kg CO₂ per kvadratmeter vegg. (Vi ser for øvrig at tallet blir det samme om vannet utelates; $471 \cdot 0,189 = 89$). I studien til Ben-Alon *et al.* (2019) framkommer det at én kvadratmeter stort ytterveggelement produsert i tradisjonell cob er oppgitt til å ha en GWP på 13,2 kg CO₂. Vekten per kvadratmeter er oppgitt å være 772 kg, og er derved i samme størrelsesforhold som for TECLA-huset. I studien til Ben-Alon *et al.* (2019) oppgis at tilsvarende tall for vegg av henholdsvis bindingsverk og isolerte mur-blokker er 63 og 75 kg CO₂. Tallene er oppsummert i tabellen under.

Tabell 11 - Utslipp av CO₂, etter type vegg.

Type vegg	kg CO ₂ /m ² vegg	Studie
3DCP-cob (WASP)	89	TECLA
cob, ordinær bygging	13	Ben-Alon
Bindingsverk	63	Ben-Alon
Isolerte mur-blokker	75	Ben-Alon

I forhold til tallene i fra studien til Ben-Alon, synes tallet for TECLA-huset å være høyt. Det virker imidlertid tydelig at årsaken til der den relativt høye andelen av kvarts-sand, sement, samt de ulike tilsetningene som benyttes for å forbedre printbarheten, sikre vedheft ved «kalde» sammenføyninger, og overflatebehandling for sikring mot vanninntrengning. Det er imidlertid viktig å poengtere at TECLA-huset er en type iglo-liknende konstruksjon. Derved har huset heller ikke noen normal tak-konstruksjon, hvilket virker som en åpenbar grunn til at materialsammensetningen må ha andre egenskaper enn for en tradisjonell cob-vegg.

Vi har kommet fram til at det overordnede tallet for GWP er på 89 kg CO₂ per kvadratmeter 3D-printet overflate. Dette ser ut til å stemme bra i forhold til tilsvarende funn i studien til (Alhumayani *et al.*, 2020). Der framgår det at tradisjonell cob yter 85% bedre enn 3DP cob. Se tabellen nedenfor. Vi tolker tallene dit hen at et GWP-tallet for tradisjonell cob utgjør 15% av 3DP cob. Tilsvarende for tallet GWP på 89 for TECLA, vurdert opp mot GWP på 13 for tradisjonell cob, i studien til Ben-Alon *et al.* (2019) gir oss $13/89 = 14,6\%$, altså ganske likt som i studien til (Alhumayani *et al.*, 2020).

Tabell 12: Prosentvis forbedring av tradisjonell cob mot 3D cob (Alhumayani et al., 2020)

	Percentage of Improvement	
	3DP Cob	Conventional Cob
Global Warming	–	85%
Stratospheric Ozone Depletion	3%	
Fine Particulate Matter	–	84%
Marine Eutrophication	34%	
Land Use	35%	–
Mineral Resource Scarcity	40%	
Aware	23%	–
Overall improvement		83%

Da vi ser på GWP-verdiene funnet i tabellen som viser TECLA's ulike ingredienser, er det kanskje bidraget på 120 kg CO₂ fra forbrukt elektrisitet som overrasker mest. Ved første tanke kan man gjerne tenke at det går mye strøm til flere maskiner som brukes i mange dager. Tallet er beregnet med utslippstall for Italia, fra 2019, og er på 256 g/kWh (Energiogklima.no, 2020b). I dette prosjektet, ser vi at utslippet relatert til strømforbruket nærmest er neglisjerbart, i forhold til totalt utslipp.

For å komme fram til GWP-tallet for TECLA, har vi gjort noen antagelser, og for at vi skulle fått et mer pålitelig tall, skulle vi ideelt sett hatt mer eksakte data på flere av innsatsfaktorene. GWP-tallet som vi har kommet fram til, bør allikevel kunne sees på som en indikasjon på hvilken størrelsesorden av CO₂-utslipp man kan forvente fra denne typen materialsammensetning.

4 KONKLUSJON

I dette kapittelet henter vi frem essensen av teorien og de generelle og holdbare slutningene en kan trekke ut av denne og diskusjonen over.

Hensikten med denne oppgaven har vært å undersøke hva status er for 3D-printing i byggenæringen i dag, og hvordan 3D-printing med betong og cob kan gjøre byggenæringen mer bærekraftig.

I de senere år har det vært en oppblomstring av aktivitet på utvikling av printere og materialer. Flere større bygninger har sett dagens lys, og det utvikles stadig større fagmiljøer som drar utviklingen videre. Kina var tidlig ute i verdenssammenheng med å printe bygninger, men de senere år har aktiviteten spredt seg til flere verdensdeler. Europa har stor aktivitet med foregangsprosjekter iblant annet Italia, Nederland og Frankrike. Også i Midtøsten er det stor aktivitet. Dubai har satt seg som mål å printe 25 prosent av alle nye bygninger som oppføres i 2025. Verdens største 3D-printede bygning i verden i volum står i Dubai og er oppført ved hjelp av printer utviklet i USA. Det fremstår som at utviklingen i Europa er tettere knyttet til forsknings- og utdanningsmiljøer, sammenlignet med blant annet Kina. Vi har dermed grunn til å tro at utviklingen i dag har kommet lengre i Europa enn i Asia. Det er i dag gantry- eller robotarmsprintere som benyttes til produksjon av bygninger og –moduler, og det er mulig å investere i printerpakker hos et knippe selskaper.

I et 3DCP-prosjekt, er det typisk mengde sement, sand og øvrige industrielt produserte tilsetningsmaterialer som er de største bidragsyterne med tanke på CO₂-utslippet. For at 3DCP-teknologien virkelig skal kunne vokse seg til å bli det store, mener vi at det er vertikal armering som er den største utfordringen som må løses. Dersom denne utfordringen løses, ser det ut til at mengden betong kan reduseres betraktelig. I tillegg vil det kunne øke levetiden på betongen betraktelig. Teknologien ser ut til å bidra til billigere og raskere bygging av enkle boliger, noe som vil gjøre det mulig å møte bærekraftsmål 11c som har som mål å *bistå de minst utviklede landene med å oppføre bærekraftige og solide bygg ved bruk av lokale materialer*. utvikle øre til at husløse og fattige kan få seg en bolig. 3D-printing med cob-liknende masser ser også ut til å passe godt inn i varmere og tørrere klimaer, og kan trolig være med å skaffe hus til mange mennesker i utviklingsland i for eksempel Afrika.

Betong er et mye brukt material, og vil trolig være det i lang tid framover også. Teknologien og innføringen av denne gjør det mulig for byggenæringen å se om de kan finne bedre og mer

bærekraftige løsninger for sine oppgaver. Inne i dette ligger det et forventet oppgjør mot tradisjonell utforming og arkitektur, slik at teknologien og dens potensial kan utnyttes til det fulle. Dersom dette ikke skjer, og man fortsetter å benytte tradisjonelle former og arkitektur, vil det trolig være hemmende for hvor mye av potensiale for økt bærekraft som hentes ut. For potensialet, slik det fremstår for oss, er absolutt størst om det tradisjonelle utfordres. Samtidig vil det trolig spille positivt inn i en overgangsfase om det å holde på det tradisjonelle bidrar til at en større del av næringen raskere begynner å bruke ny teknologi, all den tid byggenæringen er litt tro til det kjente. Verden produserer store mengder betong hvert år, og sementen som benytte forårsaker høyt utslipp av CO₂. Det virker imidlertid som at det har vært liten aksept for at eksisterende betongkonstruksjoner, mur-fasader og avhendede betongkonstruksjoner (revet og knust) faktisk tar til seg store mengder CO₂. Dette er påpekt i studier, og det framkommer også at dette forholdet ikke tas høyde for i klimaregnskapet.

Da man får inntrykk av at det betyr være eller ikke være for menneskeheten, så mener vi at CO₂-utslippene er det viktigste momentet i forbindelse med bærekraftaspektet i FNs bærekraftsmål. For å nå ambisjonene i Parisavtalen, er det tydelig for oss at det må tilrettelegges og forankres godt mot næring og bransjer, slik at målene blir en driver for utvikling. Hindcon er et eksempel på hvordan aktører på tvers av miljøer og landegrenser kan arbeide mot utvikling, innføring og bruk av ny teknologi. Vi ser at 3D-printing av konstruksjoner med betong og cob kan gi et positivt bidrag til at målene som er nedtegnet i Parisavtalen kan oppfylles.

4.1 VIDERE ARBEID

Denne oppgaven er et utgangspunkt for videre arbeid innenfor temaet for studenter og ansatte ved NTNU, og det ligger her flere sider som kan sees nærmere på.

En videreutvikling av sprøytebetong, kalt Shotcrete, er en variasjon av 3D-printing vi har funnet i kildematerialet vårt. Ofte er dette omtalt som SC3DP. Her sprøytes materialet ut med hjelp av til eksempel lufttrykk. Vi har ikke gått inn på denne type teknologi i denne oppgaven, men her kan det trolig ligge et potensial for å videreutvikle løsninger for bruk av 3d-printing i konstruksjon.

Hvilke begrensninger har cob med tanke på strukturell styrke? I forlengelse av vår vurdering av utslipp ville det være naturlig å gjennomføre en LCA analyse som tar for seg hele bygget, fra byggestart til ferdigstillelse, samt brukstiden, og riving/resirkulering av bygget.

Interessante tall kan blant annet være å se på resultatene per m² bolig, og sammenligne funnene med tradisjonelle bygg i både mur/betong og tradisjonelt bindingsverk.

Løsning for vertikal armering av printet betong fremstår som en akilleshæl for lagvis ekstrudering av betong. Dersom dette løses og produksjonen kan gjøres ytterligere robotisert, vil det her ligge en forventning om å kunne redusere klimagassutslippet videre. I forbindelse med DARE2C-konseptet: At aluminium ikke korroderer, fører til reduksjon i betongforbruket i form av mindre betongoverdekninger. Hvor stor mengde betong kan det dreie seg om globalt?

Referanseliste

- 3dprinthouse (2018) *Gallery*. Tilgjengelig fra: <https://www.3dprintedhouse.nl/en/downloads/> (Hentet: 15.11 2020).
- 3dwasp.com (2020) *The first 3D printed House with earth - Gaia*. Tilgjengelig fra: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-gaia/> (Hentet: 01.10.20 2020).
- 3dwasp.com (u.å.) *TECLA, a 3D printed global habitat for sustainable living*. Tilgjengelig fra: <https://www.3dwasp.com/en/3d-printed-house-tecla/> (Hentet: 31.10.20 2020).
- 7 ting du ikke visste om armert betong (2020). Tilgjengelig fra: <https://www.kontrollbetong.no/7-ting-du-ikke-visste-om-armert-betong/> (Hentet: 15.10 2020).
- Alhumayani, H. et al. (2020) Environmental assessment of large-scale 3D printing in construction: A comparative study between cob and concrete, *Journal of cleaner production*, 270, s. 122463. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122463.
- Apis-cor.com (2020) *We Print Buildings*. Tilgjengelig fra: <https://www.apis-cor.com/demo-home> (Hentet: 03.10.20 2020).
- Behzad, N., Ming, X. og Jay, S. (2017) Current Progress of 3D Concrete Printing Technologies, *ISARC. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 34. Tilgjengelig fra: https://www.researchgate.net/publication/318472250_Current_Progress_of_3D_Concrete_Printing_Technologies.
- Ben-Alon, L. et al. (2019) Cradle to site Life Cycle Assessment (LCA) of natural vs conventional building materials: A case study on cob earthen material, *Building and environment*, 160, s. 106150. doi: 10.1016/j.buildenv.2019.05.028.
- Bjørnstad, L. (2014) *Hvorfor var romersk sement så bra?* Tilgjengelig fra: <https://forskning.no/historie-bygningsmaterialer/hvorfor-var-romersk-sement-sa-bra/524045> (Hentet: 11.11 2020).
- Bjørnstad, L. (2016) Kan vi bruke betong med god klimasamvittighet?, *forskning.no*. Tilgjengelig fra: <https://forskning.no/bygningsmaterialer-klima/kan-vi-bruke-betong-med-god-klimasamvittighet/379248> (Hentet: 13.10.2020).
- BMC-Norge.no (2019) *Produktdatablad - Scan Standard Sement 25 kg sekk*. Tilgjengelig fra: https://bmc-norge.no/wp-content/uploads/2019/10/PDB_Std_Sement_aug19.pdf (Hentet: 01.12.20 2020).
- BNL, T. D. P. R. R. L. (2019) Sirkulær økonomi i byggenæringen, *Article*, (1), s. 11. Tilgjengelig fra: <https://www.bnl.no/siteassets/dokumenter/presentasjoner/2019-05-10-sirkular-okonomi--analyse-bnl-2.pdf>.
- Boffey, D. (2018) *Netherlands to build world's first habitable 3D printed houses*. Tilgjengelig fra: https://www.theguardian.com/artanddesign/2018/jun/06/netherlands-to-build-worlds-first-habitable-3d-printed-houses?CMP=soc_567 (Hentet: 01.10.20 2020).
- Bryde, D., Broquetas, M. og Volm, J. M. (2013) The project benefits of Building Information Modelling (BIM), *International journal of project management*, 31(7), s. 971-980. doi: 10.1016/j.ijproman.2012.12.001.
- COBOD (2020) *Meet BOD2 - Modular 3D construction printer available now*. Tilgjengelig fra: <https://cobod.com/bod2/> (Hentet: 15.10 2020).
- Construction, C. (2020) *CyBe Mortar*. Tilgjengelig fra: <https://cybe.eu/technology/cybe-mortar/> (Hentet: 15.11 2020).
- Craveiro, F. et al. (2019) Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0, *Automation in construction*, 103, s. 251-267. doi: 10.1016/j.autcon.2019.03.011.

- De Schutter, G. *et al.* (2018) Vision of 3D printing with concrete — Technical, economic and environmental potentials, *Cement and concrete research*, 112, s. 25-36. doi: 10.1016/j.cemconres.2018.06.001.
- Disteler, M. M. (2019) Er det grobunn for hamp i Norge? Tilgjengelig fra: <https://www.harvestmagazine.no/artikkel/er-det-grobunn-for-hamp-i-norge> (Hentet: 24.11.2020).
- Eindhoven, T. ((2018)) *World's first commercial 3D-concrete printing housing project* . [Video]. Tilgjengelig fra: <https://www.youtube.com/watch?v=UFWg6Qb8yYI> (Hentet: Accessed: 03.10.2020).
- Energiogklima.no (2020a) *De totale utslippene. Utviklingen i globale klimagassutslipp*,. Tilgjengelig fra: <https://energiogklima.no/klimavakten/global-utslipp/> (Hentet: 01.11.20 2020).
- Energiogklima.no (2020b) *Live-data: Strøm og CO2*,. Tilgjengelig fra: <https://energiogklima.no/klimavakten/live-data-strom-og-co2/> (Hentet: 28.10.20 2020).
- EPD-Norge.no (2016) *B30 M60 D22 konstruksjonsbetong*,. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/ferdig-betong/b30-m60-d22-konstruksjonsbetong-article1045-317.html> (Hentet: 07.11.20 2020).
- EPD.Norge (2020) *NCC Helle Sandtak*,. Tilgjengelig fra: <https://www.epd-norge.no/asfalt-og-pukk/ncc-helle-sandtak-article2985-326.html> (Hentet: 09.12.20 2020).
- Florea, V. *et al.* (2021) 3D Printing of Buildings. Limits, Design, Advantages and Disadvantages. Could This Technique Contribute to Sustainability of Future Buildings?, i, *Cham*. Springer International Publishing, s. 298-308.
- FN (2020) *Bærekraftige byer og lokalsamfunn - Bærekraftsmål nr. 11*. Tilgjengelig fra: <https://www.fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/baerekraftige-byer-og-lokalsamfunn> (Hentet: 01.09.20 2020).
- Friis, K. (2020) 3D printed concrete bridges : Opportunities, Challenges, and Conditions: University of Agder.
- Galan, I. *et al.* (2010) Sequestration of CO2 by Concrete Carbonation, *Environmental Science & Technology*, 44(8), s. 3181-3186. doi: 10.1021/es903581d.
- Garfield, L. (2017) A startup invented this \$10,000 house that can be built in one day, *Business Insider*. Tilgjengelig fra: <https://www.businessinsider.com/house-built-one-day-apis-cor-2017-3?r=US&IR=T> (Hentet: 03.10.2020).
- Garvett, S. (2020) *Icon completes series of 3D-printed homes for homeless in Austin*. Tilgjengelig fra: https://www.builderonline.com/building/building-enclosure/icon-completes-series-of-3d-printed-homes-for-homeless-in-austin_o (Hentet: 07.10.20 2020).
- Goodier, R. (2020) SUSTAINABLE 3D-PRINTED HOUSING, *Mechanical engineering (New York, N.Y. 1919)*, 142(3), s. 20-21.
- Gradecki, K. og Labonnote, N. (2019) On the potential of integrating building information modelling (BIM) for the additive manufacturing (AM) of concrete structures, *Construction innovation*, 20(3), s. 321-343. doi: 10.1108/CI-07-2019-0057.
- Guinness World Records (2019) *Largest 3D-printed structure (volume)*. Tilgjengelig fra: <https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/397929-largest-3d-printed-structure> (Hentet: 01.09 2020).
- iea.org (2020) *Building sector energy intensity in selected regions in the sustainable development Scenario, 2000-2030*. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/buildings-sector-energy-intensity-in-selected-regions-in-the-sustainable-development-scenario-2000-2030> (Hentet: 14.10 2020).
- IEA.org (u.å.) Cement - more efforts needed. Tilgjengelig fra: <https://www.iea.org/reports/cement> (Hentet: 2020.12.07).
- Industry Europe (2019) *TECLA: A 3D Printed Global Habitat For Sustainable Living*,. Tilgjengelig fra: <https://industryeurope.com/tecla-a-3d-printed-global-habitat-for-sustainable-living/> (Hentet: 30.09.20 2020).

- Justnes, H. (2020) Aluminium Metal Reinforced Concrete - An Environmentally Friendly System with Infinite Service Life, *The Indian Concrete Journal*, Jan 2020. Tilgjengelig fra: https://www.icjonline.com/explore_journals/2020/01 (Hentet: 21.10.2020).
- Keulemans, G. (2016) The problem with reinforced concrete, *theconversation.com*. Tilgjengelig fra: <https://theconversation.com/the-problem-with-reinforced-concrete-56078> (Hentet: 25.10.2020).
- Contour Crafting* (2017). Regissert av Khoshnevis, B.
- Kloft, H. et al. (2020) Reinforcement Strategies for 3D - Concrete - Printing, *Civil Engineering Design*. doi: 10.1002/cend.202000022.
- Kulmo, W. M. (2019) En vill idé har blitt til miljøvennlig betong, *sintef.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.sintef.no/siste-nytt/en-vill-ide-har-blitt-til-miljovennlig-betong/> (Hentet: 20.10.2020).
- Kuzmenko, K. et al. (2020) Environmental Impacts of 6-Axes Robotic Arm for 3D Concrete Printing, i, *Cham*. Springer International Publishing, s. 1023-1030.
- Li, V. C. et al. (2020) On the emergence of 3D printable Engineered, Strain Hardening Cementitious Composites (ECC/SHCC), *Cement and concrete research*, 132(132), s. 106038. doi: 10.1016/j.cemconres.2020.106038.
- Lu, B. et al. (2019) A systematical review of 3D printable cementitious materials, *Construction & building materials*, 207, s. 477-490. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.02.144.
- Makul, N. (2020) Advanced smart concrete - A review of current progress, benefits and challenges, *Journal of cleaner production*, 274, s. 122899. doi: 10.1016/j.jclepro.2020.122899.
- manufacturingtrade.com (2019) XtreeE, Concreative to set up 3D solutions unit in UAE, *TradeArabia*.
- Marie, D. J. et al. (2014) Mechanical resilience and cementitious processes in Imperial Roman architectural mortar, *Proc Natl Acad Sci U S A*, 111(52), s. 18484-18489. doi: 10.1073/pnas.1417456111.
- Mechtcherine, V. et al. (2019) Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing, *Automation in construction*, 107, s. 102933. doi: 10.1016/j.autcon.2019.102933.
- Miljødirektoratet (2020a) *Sirkulær økonomi*. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/avfall/sirkular-okonomi/> (Hentet: 12.12 2020).
- Miljødirektoratet (2020b) *Tabeller for omregning fra energivare til kWh*. Tilgjengelig fra: <https://www.miljodirektoratet.no/myndigheter/klimaarbeid/kutte-utslipp-av-klimagasser/klima-og-energiplanlegging/tabeller-for-omregning-fra-energivarer-til-kwh/> (Hentet: 15.11.20 2020).
- Miljøpark.no (2020). Tilgjengelig fra: <https://miljopark.no/> (Hentet: 10.09.2020).
- Norcem.no (2020a) *Sementproduksjon og CO2*. Tilgjengelig fra: <https://www.norcem.no/no/sementproduksjon-co2>.
- Norcem.no (2020b) Standardsement FA, *Hjemmeside*. Tilgjengelig fra: https://www.norcem.no/no/Standard_FA (Hentet: 16.10.2020).
- Norcem.no (u.å.) GOD BETONG ER BESTANDIG, *Hjemmeside*. Tilgjengelig fra: https://www.norcem.no/sites/default/files/assets/document/godbetongerbestandig_web.pdf (Hentet: 25.10.2020).
- NRK (2020) *Fem år siden Parisavtalen: Dette er status i verdens kamp mot klimakrisen*. Tilgjengelig fra: https://www.nrk.no/urix/fem-ar-siden-parisavtalen_-dette-er-status-i-verdens-kamp-mot-klimakrisen-1.15284549 (Hentet: 13.12 2020).
- NVE (2020) *Strømforbruk i Norge har lavt klimagassutslipp*. Tilgjengelig fra: <https://www.nve.no/nytt-fra-nve/nyheter-energi/stromforbruk-i-norge-har-lavt-klimagassutslipp/> (Hentet: 14.10 2020).

- Obudho, B. (2019) 5 Biggest Companies Building 3D Printed Houses, *all3dp*. Tilgjengelig fra: <https://all3dp.com/2/2019-best-companies-building-3d-printed-houses/> (Hentet: 02.10.2020).
- Partnerskabet (2018) 3D Printet Byggeri, *Hjemmeside*. Tilgjengelig fra: <http://3dprintetbyggeri.dk/pdf/Afslutningsrapport.pdf> (Hentet: 10.08).
- Paul, S. C. *et al.* (2018) A review of 3D concrete printing systems and materials properties: current status and future research prospects, *Rapid prototyping journal*, 24(4), s. 00-00. doi: 10.1108/rpj-09-2016-0154.
- Rambæk, I. (2020) Sementfabrikker kan stagge verdens plastforsøpling. Tilgjengelig fra: <https://gemini.no/2020/04/sementfabrikker-kan-stanse-plastforsopling/> (Hentet: 2020.12.13).
- Sakin, M. og Kiroglu, Y. C. (2017) 3D Printing of Buildings: Construction of the Sustainable Houses of the Future by BIM, *Energy procedia*, 134, s. 702-711. doi: 10.1016/j.egypro.2017.09.562.
- Skeide, M. og Olsson, N. (2019) *Hvordan forberede byggebransjen på 3D printing av betong*, NTNU.
- Smeplass, S. (2014) Senketunnelen i Bjørvika, erfaringsrapport : kontroll med opprissing i betongens herdefase: Statens vegvesen.
- Solberg, M. G. (2016) Betong står for 5 prosent av verdens CO2-utslipp. Slik skal forskerne lage en renere variant som varer lenger, *tu.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/betong-star-for-5-prosent-av-verdens-co2-utslipp-slik-skal-forskerne-lage-en-sterkere-og-renere-variant/347625>.
- Souto-Martinez, A., Arehart, J. H. og Srubar, W. V. (2018) Cradle-to-gate CO2e emissions vs. in situ CO2 sequestration of structural concrete elements, *Energy and buildings*, 167, s. 301-311. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.042.
- Souza, M. T. *et al.* (2020) 3D printed concrete for large-scale buildings: an overview of rheology, printing parameters, chemical admixtures, reinforcements, and economic and environmental prospects, *Journal of Building Engineering*, s. 101833. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352710220334665>.
- Stensvold, T. (2015) Norcem lar seg begeistre av Akers karbonfangstteknologi
- Får bort halvparten av utslippene., *tu.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.tu.no/artikler/norcem-lar-seg-begeistre-av-akers-karbonfangstteknologi/275538> (Hentet: 17.10.2020).
- Strand, S. S. (2019) Kan skape evigvarende betong med leire og aluminium, *Byggeindustrien bygg.no*. Tilgjengelig fra: <https://www.bygg.no/article/1381406?image=dp-image121133-1381408> (Hentet: 19.10.2020).
- U.ae (2016) *Dubai 3D Printing Strategy*. Tilgjengelig fra: <https://u.ae/en/about-the-uae/science-and-technology/key-sectors-in-science-and-technology/3d-printing> (Hentet: 01.12.2020).
- VanWijnen (2020) Project Milestone. Tilgjengelig fra: <https://www.vanwijnen.nl/projecten/project-milestone/>.
- Vélez, M., Toala, E. og Zagal, J. C. (2020) Koala 3D: A continuous climbing 3D printer, *Robotics and computer-integrated manufacturing*, 64, s. 101950. doi: 10.1016/j.rcim.2020.101950.
- Watts, J. (2019) Concrete: the most destructive material on Earth, *The Guardian*. Tilgjengelig fra: <https://www.theguardian.com/cities/2019/feb/25/concrete-the-most-destructive-material-on-earth> (Hentet: 09.10.2020).
- WeberBeamix (2020) *3D Betonprinten*. Tilgjengelig fra: <https://www.nl.weber/3Dbetonprinten>.
- Xi, F. *et al.* (2016) Substantial global carbon uptake by cement carbonation, *Nature geoscience*, 9(12), s. 880-883. doi: 10.1038/ngeo2840.
- Zeiba, D. (2019) Apis Cor claims to have created the largest on-site 3D-printed building, *The Architect's Newspaper*. Tilgjengelig fra: <https://www.archpaper.com/2019/12/apis-cor-largest-on-site-3d-printed-building-dubai/> (Hentet: 03.10.2020).

5 VEDLEGG

- 1) Tecla beregninger
- 2) Dynamon SR