



3D-Printet Armering

Ole Andreas Teigen

Sayed-Masih Soltani

Gradering: Åpen

Oppgavens tittel: 3D-printet armering for betong	Dato: 20.05.2021		
	Antall sider: 88		
	Masteroppgave:	Bacheloroppgave	x
Navn: Ole Andreas Teigen Sayed-Masih Soltani			
Veileder: Guomin Ji			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere:			

Sammendrag:

3D-printing er en ny teknologi med mange muligheter. Denne teknologien gir mulighet for å designe og skrive ut egne strukturer som kan brukes til egnet bruksområdet. Denne studien ser på muligheten for å skape armering av plaster til betongstrukturer. Ved å 3D-printe kan armeringen modelleres til strukturer som vi ikke ser ved tradisjonell armering, som potensielt kan gi bedre egenskaper. Bruksområder for dette kan være å skape armering for unike bygninger og bytte ut tradisjonell armering dersom krav kan oppfylles. Studien inkluderer prosessen rundt designing, printing og testing av strukturene og hvordan betongen er tilpasset for å passe til de alternative strukturene. I studien kommer det frem at resultatene ikke ble så gode som ønsket, og diskusjon rundt hvorfor dette var tilfellet. Designet til strukturen legger grunnlaget for hva som er mulig å gjøre rundt den. Ved for tett strukturmønster for armeringen kan det ikke brukes betong med stor kornstørrelse som tilslag. Det begrenser egenskapene til betongen om den ikke har høyt sementinnhold. En tett struktur medfører også at betongen må være relativt flytende slik at hele strukturen kan fylles. En struktur med større rom kan være relevant å undersøke, men kan være problematisk da det er vanskelig for 3D printere å lage strukturer med overheng. Om gjort riktig kan teknologien skape mange spennende løsninger, som gjør oss optimistiske til videre forskning på mulighetene dette kan skape.

Stikkord:

Betong
3D printing
Armering
PLA
PETG
Modellering

Ole Andreas Teigen



Sayed-Masih Soltani



(sign.)

Forord

Denne bacheloroppgaven er utarbeidet av Ole Andreas Teigen og Sayed-Masih Soltani fra det 3-årige studiet i byggingeniør ved NTNU Gjøvik, våren 2021. Rapporten tilsvarer 20 studiepoeng og leveres som det avsluttende arbeidet for utdanningen.

Rapporten omhandler 3D-printet forsterkning av betong. Arbeidet som er gjennomført har vært en kombinasjon av praktisk arbeid i form av blanding og testing av betong, i tillegg til opplesning på relevant teori og rapportskrivning. Gruppen har også måtte sette seg inn i diverse programvare for å 3D-printe forsterkningen som skulle testes.

Vi til takke vår veileder Guomin Ji for god informasjon og veiledning gjennom hele prosjektet. Eirik Gillund og Tonje Waal Karlsen fortjener også en takk for korrekturlesning og gode råd om rapportskrivning generelt.

Til slutt vil vi takke NTNU Gjøvik for lærerike år, og ser frem til en spennende yrkeskarriere i byggbransjen.

Abstract

The purpose of this study is to look at the possibilities new technologies, like 3D-printing, can provide. 3D-printing is a new technology that makes it possible to print different structures and materials according to which properties you want. This can create many new opportunities for the way new buildings will be built, and it will be a big part of the future. This review looks at the possibilities of using 3D-printed structures of polymers(PLA/PETG) as a reinforcement in concrete constructions. Themes discussed in this study includes material properties, structure types, printing process, and test results of tensile and flexural strength results of 3D-printed structures. The results did not match the wanted properties and would therefore not be usable. However, with a change of materials and/or cell structure it might achieve good results, and maybe even better than traditional steel reinforcement.

Innholdsfortegnelse

Forord	iv
Abstract	v
Innholdsfortegnelse	vi
Ordliste	viii
Figurliste.....	ix
Tabelliste	x
1 Innledning.....	1
1.1 Problemstilling.....	1
1.1.1 3D-printing	1
2 Teori	2
2.1 3D-printing	2
2.1.1 Fordeler	3
2.1.2 Ulemper.....	5
2.2 Betong.....	6
2.3 Litteraturstudier	8
3 Case/ Materialer	11
3.1 Materialer tilgjengelig på lab.....	11
3.1.1 3D-print material egenskaper	11
3.1.2 3D-printere	14
3.1.3 Betong material egenskaper	18
3.2 3D printede strukturer.....	21
4 Metode.....	24
4.1 3D-print	24
4.1.1 Modellering	24
4.1.2 Printing	28
4.2 Betong.....	31
4.2.1 Forskallingsbokser	31
4.2.2 Siktetest	32
4.2.3 Fuktighetstest	33
4.2.4 Blandeprosedyre.....	33
4.2.5 Synkemål.....	34

4.2.6	Utbredningsmål	36
4.2.7	Støping	37
4.3	Tester	38
4.3.1	Trykktest av 3D-struktur (Test 1-3)	39
4.3.2	Trykktest av betongkuber (Test 4)	41
4.3.3	Bøyetest av betongbjelker (Test 5).....	44
5	Resultater.....	47
5.1	Tidsbruk 3D print	47
5.2	Test 1-3: Trykktester av strukturer	48
5.3	Tester av betong som materiale	53
5.4	Test 4: Trykktest av betong kuber	55
5.5	Test 5: Bøyetest av betongbjelker	59
6	Diskusjon og analyse.....	63
6.1	Strukturvalg	63
6.1.1	Trykktester 1-3	64
6.1.2	Trykktest 4 og bøyetest 5 av betong.....	66
6.2	Materialvalg.....	68
6.2.1	Plaster	68
6.2.2	Betong	69
7	Konklusjon	71
	Litteraturliste	72
	Vedlegg	74

Ordliste

Additiv prosess	Prosess hvor materiale legges til produktet lag på lag.
Asymmetri	Ulikhet, strukturer med asymmetriske egenskaper har forskjellige egenskaper i forskjellige retninger.
Bestandighetsklasse	Forteller om kvalitetene til betongen og hva den tåler.
CAD/STL	Datafil-typer som støtter 3dimensjonelle filer.
Duktilitet	Materialets evne til deformasjon før brudd oppstår.
E-modul	Elastisitetsmodulen forteller om forholdet mellom fasthet og forlengelse.
Kohesjon	Bindekraft mellom molekyler. Hvor godt noe sitter sammen.
Komprimeringsgrad	Hvor mye betongen faller sammen.
Lattice structures	Krystallfigur, figur som har en gitter form.
Ortotrop	Ortotrope deler har tre forskjellige akser hvor det er forskjellige egenskaper for hver akse.
Porøsitet	Forteller forholdet mellom volum og hulrom i materialet.
Slice	Når dataprogrammet konverterer datapunkter fra 3D modellen til data printerer trenger for å skrive ut.
Sprøytstøpt	Metode for masseproduksjon for gjenstander av plaster.
Strekfasthet	Hvor mye strekk et materiale eller struktur tåler før det knekker.
Subtraktiv prosess	Prosess hvor materialer fjernes, som regel kuttes vekk.
Trykkfasthet	Hvor stor belastning en struktur tåler før det knekker.
Tverrgående isotrop	Lik i alle retninger på tvers.
Tverrstivhet	Forteller hvor lite et materiale bøyer seg i tverrgående retning

Figurliste

Figur 1 Akser for 3D printing	2
Figur 2 Kjegle for bestemmelse av konsistens ved måling av synk.....	7
Figur 3 Akser for 3D printing	13
Figur 4 Orginal Prusa i3 MK2,5.....	14
Figur 5 3Dplattform Workbench classic	16
Figur 6 Oppstart 3D modeleringsprogram	24
Figur 7 Kommandoer for modellering	25
Figur 8 Kommandoer brukt for tester	27
Figur 9 Prucaslicer programvare og valg av materiale	28
Figur 10 Eksempler av 3D printede modeller	30
Figur 11 Maskin for siktetest	32
Figur 12 Synkmål.....	34
Figur 13 Former av synkmål	35
Figur 14 Utbredningsmål	36
Figur 15 Ferdigstøpet betong i forskallingsbokser.....	37
Figur 16 Betong i romtemperert vann i 28 dager	37
Figur 17 Trykktest av 3D-printet forsterkning utføres.....	39
Figur 18 Kuber uten forsterkning før og etter test	43
Figur 19 Hvordan kubene med forsterkning knekker på grunn av trykktest	43
Figur 20 Tegning hvordan bøyetest blir utført.....	45
Figur 21 Illustrasjon av bøyetest og hvordan det settes opp	45
Figur 22 Bøyetest av bjelke med armering	46
Figur 23 Bøyetest av bjelke uten armering	46
Figur 24 Trykkraft etter volum.....	48
Figur 25 Trykkraft etter staglengde.....	49
Figur 26 Hvordan trykkraft blir påvirket av diameter til stag	50
Figur 27 Trykkraft etter staglengde.....	51
Figur 28 Bruddlast for alternative strukturer.....	52
Figur 29 Bruddlast betongkuber fra trykktest 4	56
Figur 30 Stolpediagram som illustrerer deformasjonen til strukturene fra trykktest 4	56
Figur 31 Diagram for bruddlast og deformasjon kube uten armering.....	57
Figur 32 Diagram for bruddlast og deformasjon kube med armering.....	57
Figur 33 Diagram for bruddlast for bjelker fra test 5	60
Figur 34 Diagram for nedbøyning av bjelker fra test 5.....	60
Figur 35 Diagram for bruddlast og deformasjon bjelke uten armering.....	61
Figur 36 Diagram for bruddlast og deformasjon bjelke med armering.....	61
Figur 37 linjediagram som viser at en økning av volum gir økt kapasitet.....	65

Tabelliste

Tabell 1 Fordeler og ulemper PLA	11
Tabell 2 Fordeler og ulemper PETG	12
Tabell 3 Mekaniske egenskaper PLA. Print-retningene er illustrert i figur 3.	13
Tabell 4 Mekaniske egenskaper PETG. Print-retningene er illustrert i figur 3.	13
Tabell 5 Egenskaper hos forskjellige 3D printere.	15
Tabell 6 Egenskaper hos 3DP Workbench.....	17
Tabell 7 Resept for betong	18
Tabell 8 Egenskaper til sement	19
Tabell 9 Tekniske data Dynamon SR-N	20
Tabell 10 Simple Cubic printe oversikt.....	22
Tabell 11 Body Centered Cubic printe oversikt.....	23
Tabell 12 Truncated Cube printe oversikt.....	23
Tabell 13 Forklaring av kommandoer	26
Tabell 14 Forskallingsplan	31
Tabell 15 Test 1 - Lik diameter	39
Tabell 16 Test 2 - Likt strukturvolum	40
Tabell 17 Test 3 - Alternative strukturer	40
Tabell 18 Totaloversikt over hva som testes og innstilling på maskinen.....	41
Tabell 19 Betong kuber uten armering som skal testes.....	42
Tabell 20 Betong kuber med armering som skal testes.....	42
Tabell 21 Betong kuber med alternativ armering som skal testes.....	42
Tabell 22 Bøyetestplan.....	44
Tabell 23 Tidsbruk til for printing av armering for Test 1	47
Tabell 24 Tidsbruk til for printing av armering for Test 2.....	47
Tabell 25 Tidsbruk til for printing av armering for Test 3.....	47
Tabell 26 Resultat trykktest 1.....	48
Tabell 27 Resultater trykktest 2	50
Tabell 28 Resultater trykktest 3	52
Tabell 29 Resultater siktetest	53
Tabell 30 Resultater trykktest 4 – Kuber uten armering	55
Tabell 31 Resultater trykktest 4 - Kuber med armering.....	55
Tabell 32 Resultater trykktest 4 - Kuber med alternativ armering.....	55
Tabell 33 Betongklasser	58
Tabell 34 Resultater bøyetest betongbjelker uten og med armering	59
Tabell 35 Forhold mellom økning av volum og styrke i strukturene.....	64

1 Innledning

1.1 Problemstilling

Kan 3D-printede strukturer av plast brukes som forsterkning til betong, og gir dette gode nok trykk- og strekkeegenskaper?

3D-printing er en ny teknologi som gjør det mulig å printe forskjellige strukturer og materialer etter hvilke egenskaper en selv ønsker. Dette kan skape mange nye muligheter for hvordan nybygg blir bygget, og vil være en stor del av fremtiden. I denne studien ser vi på prosessen rundt 3D-printing, og hvordan materiale og struktur kan påvirke egenskapene vi ønsker å oppnå med armering i betong.

1.1.1 3D-printing

3D-printing er en banebrytende teknologi som kan totalforandre hvordan hele byggeprosessen går for seg. I teorien skal 3D-printere være med på å effektivisere hele byggeprosessen fra start til slutt. Teknologien har mange bruksområder, og den gjør det mulig å skape og finslipe løsninger fra byggeplassen. Bruksområder går i alt fra prototyper, til armeringer, og til og med hele hus.

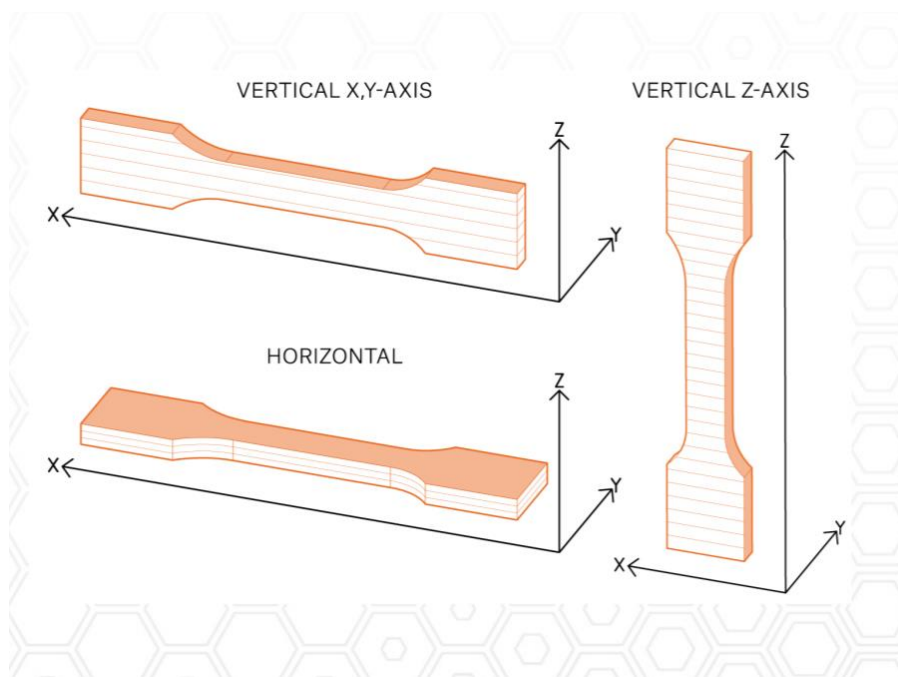
Byggeprosessen skal effektiviseres fra tiden en byggherre får arbeid til produktet står klart. Det skal ikke bare være en raskere prosess, men også billigere. Det kommer til å gjøre at byggherrer kan ta på seg flere arbeidsoppgaver og budsjettere på en bedre måte. Mer penger blir satt i omløp og flere arbeidsplasser kommer til å bli dannet.

2 Teori

2.1 3D-printing

3D-printing er en teknologi som gjør det mulig å bygge egne deler og strukturer etter eget ønske. Ved hjelp av programvare på datamaskinen kan man designe og lagre strukturer som skal printes. Det velges et ønsket materiale og printerens varmer opp materialet og maskinen til riktig temperatur. Materialet vil da smeltes og printerens kan printe ut i ønsket form. Dette er en additiv prosess hvor det bygges i små tynne lag med materiale oppå hverandre. Dette er i motsetning til en subtraktiv metode hvor mindre deler er kuttet ut fra en større del med materiale, som er en mer vanlig metode å bruke i dag. På bakgrunn av dette vil det skape mye mindre avfallsmateriale som bare ville blitt kastet bort og er dermed en mer miljøvennlig metode. («What Is 3D Printing? - Technology Definition and Types»)

Når strukturene printes må en koordinatramme defineres. Det printes lag for lag oppover z-aksen slik det vises i Figur 1. X- og y-aksen er flaten det printes på. Dermed er det flere måter å printe samme struktur på.



Figur 1 Akser for 3D printing

2.1.1 Fordeler

1. Fleksibelt design

3D-printing gjør at man kan skape alternative og mer komplekse løsninger enn en tradisjonell metode. Ettersom man kan designe deler slik de er ønsket gjennom dataprogrammer fjerner det mange restriksjoner som en tradisjonell metode hadde hatt.

2. Prototyper

Det kan i løpet av bare noen timer produseres deler, som gjør prosessen med prototyper mye hurtigere. Når det sammenlignes med maskin-bygde prototyper vil det være mye mer effektivt. 3D-printing er mer kosteffektivt og raskere til å produsere unike deler, som lett kan modifiseres fra print til print. Det gjør at produksjon av prototyper kan fullføres mye hurtigere.

3. Print etter etterspørsel

Printing basert på etterspørsel er også en stor fordel da det krever minimalt med lagerplass. Det printes etter behov og ikke i bulk som ved tradisjonelle metoder. Alle modeller kan lagres i mapper digitalt som CAD eller STL fil, og kan hentes frem når som helst ved behov. Disse filene kan også endres når det passer seg hvis det trenger å modifiseres for en spesiell bestilling. Dette medfører at det ikke er nødvendig å produsere ekstra supplement som blir utdatert, og verktøy til prosesser som ikke lenger er nødvendige.

4. Sterke og lette deler

Plastikk er det mest brukte materialet for 3D-printing, men det er også mulighet for å bruke noen metaller. Fordelen ved å bruke plastikk er at det er et betraktelig lettere materiale som gir flere bruksområder i noen industrier. Det å kunne ha flere materialer å velge mellom gir muligheten til å prioritere hvilke egenskaper som er viktige for det som skal produseres. Noen egenskaper kan være varmeresistans, styrke og vannavstøtende.

5. Raskt design og produksjon

Basert på hvor komplekst designet er, kan 3D-printede strukturer være ferdigstilte i løpet av noen timer. Dette er mye hurtigere enn støpte og maskinbygde deler. Det sparer ikke bare tid i produksjonen, men også designprosessen med filer som er klare for printing.

6. Minimerer produksjonsavfall

I 3D-printing kreves kun materialet som blir brukt i selve delen. Dette gjør at det blir brukt minimalt med materiale som må kastes bort i etterkant, sammenlignet med andre metoder. Prosessen sparer ikke bare ressurser, men også kostnadene rundt materialene.

7. Kost effektivt

3D-printing er en ett-steps prosess, som gjør at man sparer tid og dermed store kostnader som kommer ved bruk av flere maskiner og håndtering rundt dette. 3D-printerne krever ikke fulltids tilstedeværelse, som betyr at man kan bruke tiden til andre arbeidsoppgaver. Det sparer også kostnader med mindre materialbruk.

2.1.2 Ulemper

Som ved de fleste andre teknologier, så finnes det noen ulemper også ved 3D-printing.

1. Begrenset med materialer

Det er begrenset hvilke materialer som kan brukes. Det er flere plaster og metaller som kan brukes, men noen kan ikke brukes da man ikke kan kontrollere temperaturen nok til 3D-printing. Det er også en begrenset mengde av disse materialene som kan gjenbrukes.

2. Begrenset byggestørrelse

Det er foreløpig kun små print-kamre, som begrenser størrelsen som kan printes. Dersom man trenger å printe større deler vil disse printes som separerte deler og montert sammen i etterkant. Dette kan heve kostnader og tid da printereren må printe flere deler og trenger manuell arbeidskraft i etterkant.

3. Produksjon av høyt volum

3D-printing har en statisk kostnad i motsetning til tradisjonelle metoder som støping. Ofte vil støping bli billigere ved større strukturer, men man får ikke de samme kostnadsfordelene med 3D-printing. Det betyr at for større strukturer og masseprodusering vil 3D-printing ikke kunne drive ned prisen.

4. Part Structure

3D-printede strukturer er produsert lag for lag. Selv om lagene er festet sammen kan de falle fra hverandre også under forskjellige trykk- og strekk situasjoner. Strukturens egenskaper vil bli påvirket av hvilken orientering kreftene kommer fra.

5. Design unøyaktigheter

Det kan også påfalle noen feil i strukturene basert på printereren og dens toleranse. Det betyr at noen få enkelte deler kan tidvis ende opp litt annerledes enn det originale designet. Dette kan fikses i etterkant, men det er smart å ta i betraktning med tanke på tid og produksjon. («What Are the Advantages and Disadvantages of 3D Printing?»)

2.2 Betong

Betong er blant de viktigste byggmaterialene som finnes i dagens samfunn. Betong lages ved å blande sement sammen med vann, sand, stein og andre tilsetningsstoffer. Det kan skapes forskjellige typer betong ved å tilpasse blandingsforholdene. Ved å tilsette mer vann vil det dannes en bløtere betong og ved mindre vann blir betongen stivere. Dette gjør betong til et allsidig materiale som kan tilpasses bruksområde, vær og klima. Materialet blir i stor grad benyttet til bygninger som skoler, sykehus, fengsler, kontorer, boliger, anlegg og fabrikker. I tillegg blir det mye brukt i infrastrukturen i Norge, som kaier, flyplasser, broer, tunneller, oljeplattformer og kjernekraftverk («Betong» 2017).

De forskjellige betongtypene kan kategoriseres i forskjellige klasser basert på fasthet og bestandighet. For fasthetsklassen er det normalbetong og tungbetong som har klasse B fulgt av et nummer, for eksempel B20, B25 og B30. Lettbetong har klasse L, fulgt av et nummer. Jo høyere tall, desto større er trykkfastheten. For å bestemme betongklasse utføres det trykk- og bøyetest. Basert på resultatene bestemmes klassen i henhold til NS-EN 12390-3. Fastheten er oppgitt i MPa («NS-EN 12390-3:2019»). Bestandighet klassene har M fulgt av et nummer, som viser til vanninnholdet i betongen. Et lavere tall viser til et lavere vanninnhold som gir høyere bestandighet («Betong,» 2017).

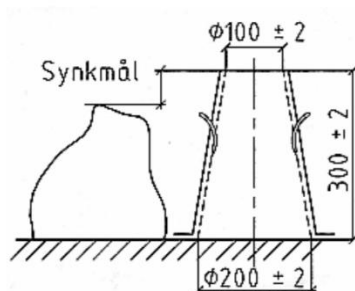
Betong har en strekkfasthet, men den er svært liten i forhold til trykkfastheten, den utgjør ikke mer enn 10%. For å forbedre strekkfastheten kan man armere betongen. Stål som er mest brukt har en strekkfasthet på minst 500 MPa, som er 200 ganger mer enn vanlig betong. Betongens stivhet er basert på fastheten, og derfor klassifiseres det ikke på stivhet. Stivhet bestemmer hvor deformert en konstruksjon kan bli når den er under trykk av en last («Betong» 2017).

Synkmål og utbredelse er to faktorer som hjelper med å bestemme betongens støpelighet basert på konsistensen den har. Dette bestemmes ved å fylle en synkkjegle med fersk betong for så å fjerne den og se hvor mye betongen faller og fordeler seg utover underlaget.

Synkmål måles ved å finne avstanden fra toppen av synkkjeglen til betongen sitt høyeste punkt etter at kjeglen er fjernet. Prosessen illustreres i Figur 2. Dette testes vanligvis på stiv plastisk til flytende, fersk betong. Avhengig av betongen kan man forvente fra 2-5 cm synk til 15-20 cm synk.

Ved utbredningsmål måler vi diameteren på sirkelen betongen danner etter vi har fjernet kjeglen. Det skal først måles etter at betongen har falt 20mm 15 ganger. Ettersom betongen skal falle en del gjøres testen på flytende og lett flytende betong som har 15-25 cm i synkmål («Konsistens; synkmål, vebetall og utbredningsmål»).

Når konsistensmålingene gjøres burde det tas en vurdering av flyteevne og kohesjon til den ferske betongen, altså hvordan betongen "henger" sammen eller separerer. Betongen kan beskrives med vurderinger som kremaktig konsistens, rund, skarp med tilslagskorn stikkende opp av mørtelen, ikke sammenhengende, død og levende. Betongen vurderes å ha god kohesjon dersom det ikke løsner steiner fra betongen. Ved all konsistensmåling av betong har tilslagets kornform stor betydning. Kornformen kan også påvirke betongens egenskaper med tanke på vibrering. Derfor bør tilslagets flisighet undersøkes og oppgis hvis synkmål eller utbredningsmål har uvanlig lave verdier. («Konsistens; synkmål, vebetall og utbredningsmål»)



Figur 2 Kjegle for bestemmelse av konsistens ved måling av synk

2.3 Litteraturstudier

Mechanical characterization of 3D-printed polymers

3D-printing, som er additiv produksjon, er allerede plukket opp og brukt for å hurtig kunne skape prototyper og snart produksjon. Denne teknologien har utviklet seg betraktelig gjennom årene, og kan skape produkter som tidligere ble produsert med tradisjonelle metoder. Selv om det ikke er mulig å erstatte delene med det samme materialet grunnet anisotropi. Basert på hvilken retning strukturen er satt, kan den få forskjellige egenskaper og ha relativt mindre styrke i noen retninger. Grunnet en stor mengde tilgjengelige materialer så vil man kunne tilfredsstillende egenskapene man ønsker i strukturen, og til og med få bedre egenskaper enn produkter produsert med tradisjonelle metoder. Med flere forskjellige additive produksjonsteknologier og printe-parametere, finnes det ikke en spesifikk, mekanisk test som kan standardiseres. Det er viktig å ha flere teststandarder satt som gir grunnlag for at produktene er reproducerbare, tillitsverdige og trygge. (Dizon mfl. 2017)

Anisotropic mechanical performance of 3D-printed fiber reinforced sustainable construction material

Det er gjort banebrytende prosjekter og studier som viser potensialet av digital produksjon av betong, kjent som 3D-printet betong. Målet med denne forskningen er å kunne skape 3D-betong som gir stabil struktur med høy styrke og duktilitet. Tradisjonelt så brukes det armering i betong for å oppnå egenskapene man ønsker. Ved å designe printbart fiber forsterket betong, eller betong med «in-process»-printet forsterkning kan man muligens unngå armeringsprosessen totalt. I denne studien ble det forsket på bruken av betong forsterket med korte glassfibre i forskjellige lengder (3 mm, 6 mm and 8 mm) og prosenter (0.25%–1%). Denne betongen var spesialtilpasset til prosjektet for å ha et bærekraftig konstruksjonsmateriale som er utviklet til 3D-printing.

I studien er det oppdaget hvordan retningen påvirker egenskapene til 3D-printet geopolymer med forskjellige fibre og innhold. Det er klart fra eksperimentene at bruken av fiber knapt forbedrer trykkstyrken, men er merkbart bedre for bøyestyrke og strekkraft når fiberinnholdet er 1%.(Panda, Paul, og Tan 2017)

Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA

Studien testet 3D-printede blokker med PLA som var printet med full densitet. Prøver ble kuttet fra trykte blokker ved bruk av konvensjonell maskinering og ble brukt til å utføre spennings-, kompresjons- og bruddeksperimenter langs forskjellige materialretninger. Materialresponsen ble funnet å være ortotrop og preget av en sterk asymmetri med strekk-kompresjon. Materialet vil tåle mer i samme retning som det ble printet enn hva det er på tvers. Materialet viser at det forbedrer egenskapene sine ved produksjon gjennom 3D-utskrift. Dette skjer på bakgrunn av at materialet blir varmet opp, som endrer den molekylære strukturen.

Viktige punkter fra studien

- Porøsiteten til det 3D-trykte materialet kan minimeres noe som fører til en forbedring av den mekaniske responsen. Dette gjøres ved å optimalisere temperaturen og hastigheten på printingen. Prøvene hadde 1% porøsitet da de ble testet i denne studien.
- Sammenlignet med den homogene polymeren, øker materialets krystallinitet ved 3D-utskrift. Dette reduserer duktiliteten og øker trykkapasitet og følsomheten for den pålagte belastningshastigheten.
- Den elastiske responsen til det 3D-trykte materialet er tverrgående isotrop, både aksial og tverrstivhet er lik som for støpt PLA, noe som indikerer at 3D-utskrift ikke påvirker materialeelastisiteten vesentlig.
- Materialet viser en uttalt asymmetri for spenning / kompresjon, med trykkspenningen som i stor grad overstiger strekkspenningen i hver retning. Dette er et resultat av tap av kohesjon fra de tidlige stadiene av strekkresponsen
- Bruddresponsen til materialet er tøffere når dette testes i aksial retning enn i tverretning

- 3D-printet PLA er tøffere enn sprøytetøpt PLA. Dette skyldes den lagdelte og filaments-opbygde strukturen til det 3D-printede materialet. Dette skaper en større kompleksitet i de mikroskopiske mekanismene for brudd.

(Song mfl. 2017)

Effekt av tilslag på betongens mekaniske egenskaper

Målsettingen ved denne studien har vært å undersøke hvilke egenskaper ved tilslaget som virker inn på betongens trykkfasthet, E-modul og spaltestrekfasthet. Det ble valgt ut fire sandfraksjoner (0/8 mm) og fire steinfraksjoner (8/16 mm).

Konklusjoner fra denne undersøkelsen:

Trykkfasthet:

- Studien har vist at valg av tilslag har stor effekt på betongens trykkfasthet, ved at det var 38 % forskjell mellom laveste og høyeste trykkfasthet etter 28 og 91 døgn.
- Det grove tilslaget (8/16 mm) har isolert sett gitt betydelig større effekt på trykkfasthet enn det fine tilslaget (0/8 mm).

E-modul:

- Studien har vist at valg av tilslag har stor effekt på betongens E-modul, det er registrert opp til 40 % forskjell mellom laveste og høyeste verdi. Det ble registrert størst relativ forskjell ved det høyeste masseforholdet på 0,59.
- Det grove tilslag (8/16 mm) har betydelig større effekt på E-modul enn det fine tilslaget (0/8 mm).

(Vegvesenet 2019)

3 Case/ Materialer

3.1 Materialer tilgjengelig på lab

3.1.1 3D-print material egenskaper

På labben er det diverse polymer filamenter som kan brukes til printeren. PLA og PETG er i hovedsak de materialene som blir brukt på labben. PolyCarbonat, ASA, ABS, E-PLA, og Nylon er også tilgjengelig og kan printes på labben hvis de finnes i tykkelse 1,75 mm.

Prusament PLA (polylactide) er et materiale som er bevist for å kunne printe med 50 mikron i laghøyde. Dette materiale er et hardt material, som gjør at ved høyt trykk så knekker det fremfor å få en deformasjon. Materialet er heller ikke veldig varme resistant og tåler ikke er mer enn 60 grader. En del ulemper og fordeler av materialet kan leses i Tabell 1.

Tabell 1 Fordeler og ulemper PLA

Fordeler	Ulemper
Enkel å skrive ut	Skjør
Kan skrive ut små deler	Tåler ikke høy temperatur
Kan skrive ut store gjenstander	Vanskelig å etterbehandle
Hardt og tøft materiale	-
God torsjonskapasitet	-

Vi har valgt for oss å bruke prusment PLA på grunn av tilgjengelighet, mulighet for å 3D-printe med tilgjengelige maskiner på lab og at materialet har god torsjonskapasitet.(«Prusament PLA Jet Black 1kg - Prusa Research»)

Prusment PETG (Polyethylene terephthalate glycol) er et annet material som kan benyttes av printeren. Materialet er hardere og tåler mer varme enn Prusment PLA. PETG har egenskaper som kan gjøre det til et bedre alternativ enn PLA. Dette materiale har god bestandighet som gjør at det kan brukes for å produsere deler for innendørs og utendørs. Materiale er svært temperaturbestandig og sterk mot slitasje. Dette materiale finnes også i forskjellige farger. Fordeler og ulemper med PETG kan ses i Tabell 2. («Prusament PETG | Prusament»)

Tabell 2 Fordeler og ulemper PETG

Fordeler	Ulemper
Tåler høy temperatur	Ikke egnet til små deler
Lett å 3D-printe	Kommer lett «strenger» i åpne rom i strukturen
God styrke og holdbarhet	Lett for nedbøyninger i printe-prosess dersom det lages «bro» mellom vertikale deler (bro som er lenger enn 15mm)
Vanskelig å knekke	Sterk adhesjon til over platen på printerens
Enkelt å pusse	Kan ikke glattes med aceton
Sterkt lag over lag adhesjon	Vanskelig å fjerne støtter
Lav vannabsorpsjon	-
Resilkulerbar	-

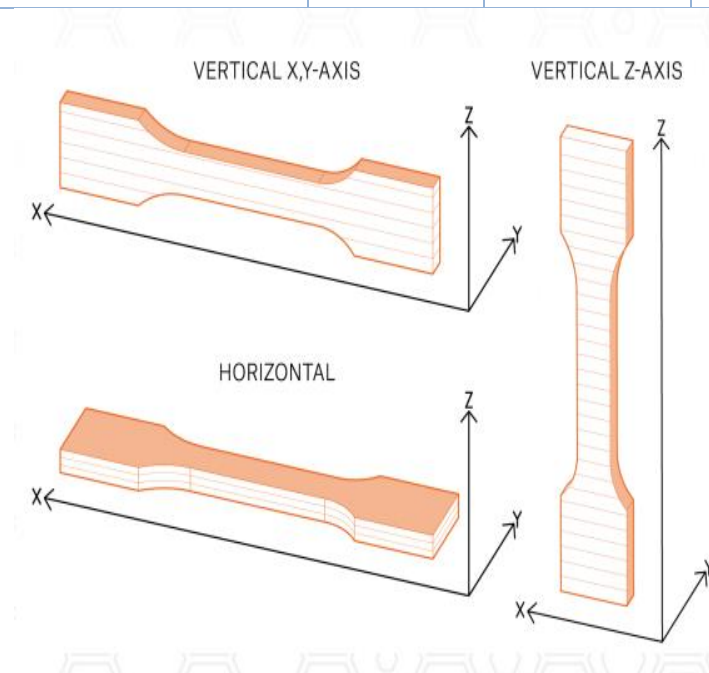
Både PLA og PETG sine mekaniske egenskaper kan leses i Tabell 3 og Tabell 4 respektivt. Tabellene viser verdier for hvordan print-retning påvirker egenskapene til strukturene som printes. Figur 3 illustrerer print-retningene beskrevet i tabellene. Ved flere lag så blir det større svakhet i strukturen, som gjør det til en fordel å skrive ut figurene horisontalt fremfor vertikalt.

Tabell 3 Mekaniske egenskaper PLA. Print-retningene er illustrert i figur 3.

PLA - Egenskaper/Print retning	Horisontal	Vertikal X, Y-Akse	Vertikal Z-Akse	Metode
Strekstyrke(Maks spenning) [MPa]	50,8 ± 2,4	59,3 ± 1,9	37,6 ± 4,0	Iso 527-1
Elastetsmodul [GPa]	2,2 ± 0,1	2,4 ± 0,1	2,3 ± 0,1	Iso 527-1
Forlengelse ved avkastningspunkt %	2,9 ± 0,3	3,2 ± 0,1	1,9 ± 0,3	Iso 527-1
Slagstyrke Charpy(4) [kJ/m²]	12,7 ± 0,7	13,7 ± 0,7	5,0 ± 1,4	Iso 179-1

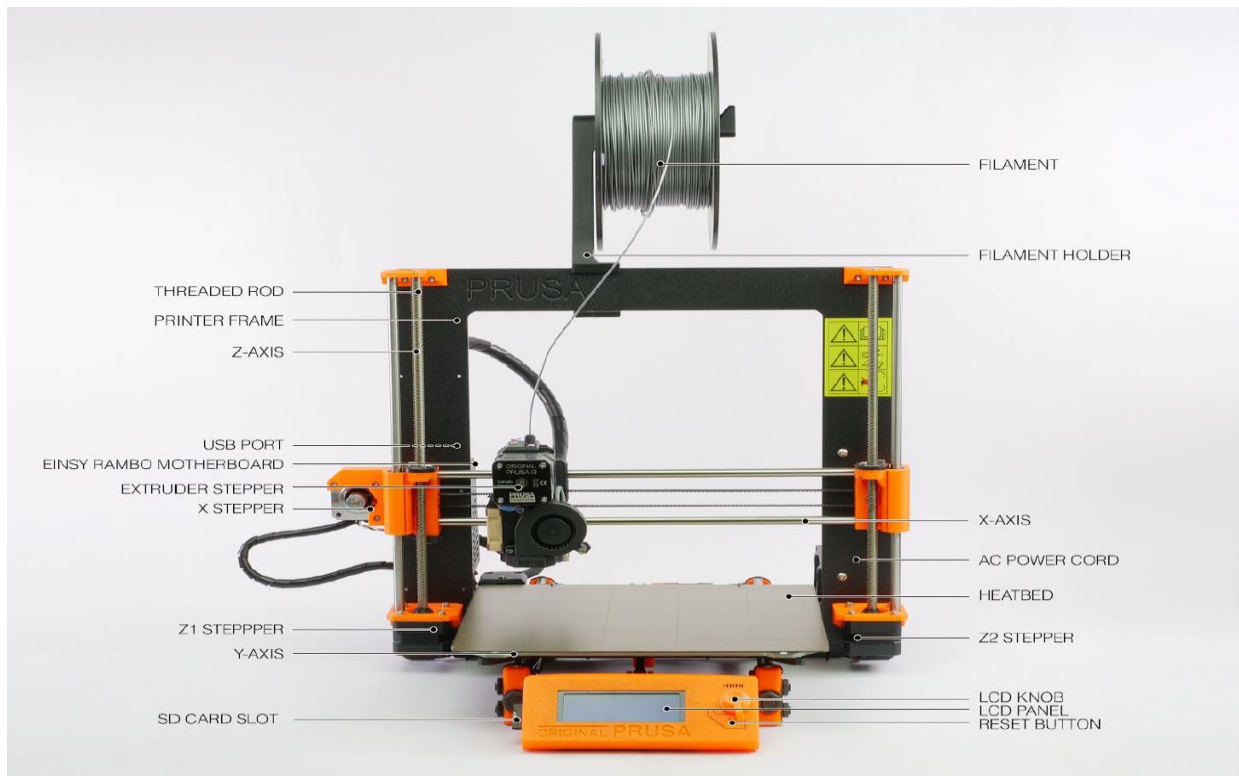
Tabell 4 Mekaniske egenskaper PETG. Print-retningene er illustrert i figur 3.

PETG - Egenskap/Print retning	Horisontal	Vertikal X, Y-Akse	Vertikal Z-Akse	Metode
Strekstyrke(Maks spenning) [MPa]	47 ± 2	50 ± 1	30 ± 5	Iso 527-1
Elastetsmodul [GPa]	1,5 ± 0,1	1,5 ± 0,1	1,4 ± 0,1	Iso 527-1
Forlengelse ved avkastningspunkt %	5,1 ± 0,1	5,1 ± 0,1	2,5 ± 0,5	Iso 527-1
Slagstyrke Charpy(3) [kJ/m²]	NB © (4)	NB(4)	5 ± 1	Iso 179-1



Figur 3 Akser for 3D printing

3.1.2 3D-printere



Figur 4 Original Prusa i3 MK2,5

3D-print maskiner finnes i forskjellige størrelser og modeller. Noen kan 3D-printe forskjellige materialer mens andre har flere begrensninger på materialer, temperaturer og størrelser. Det finnes maskiner som kan printe i titan og andre typer metall, men som er svært kostbare.

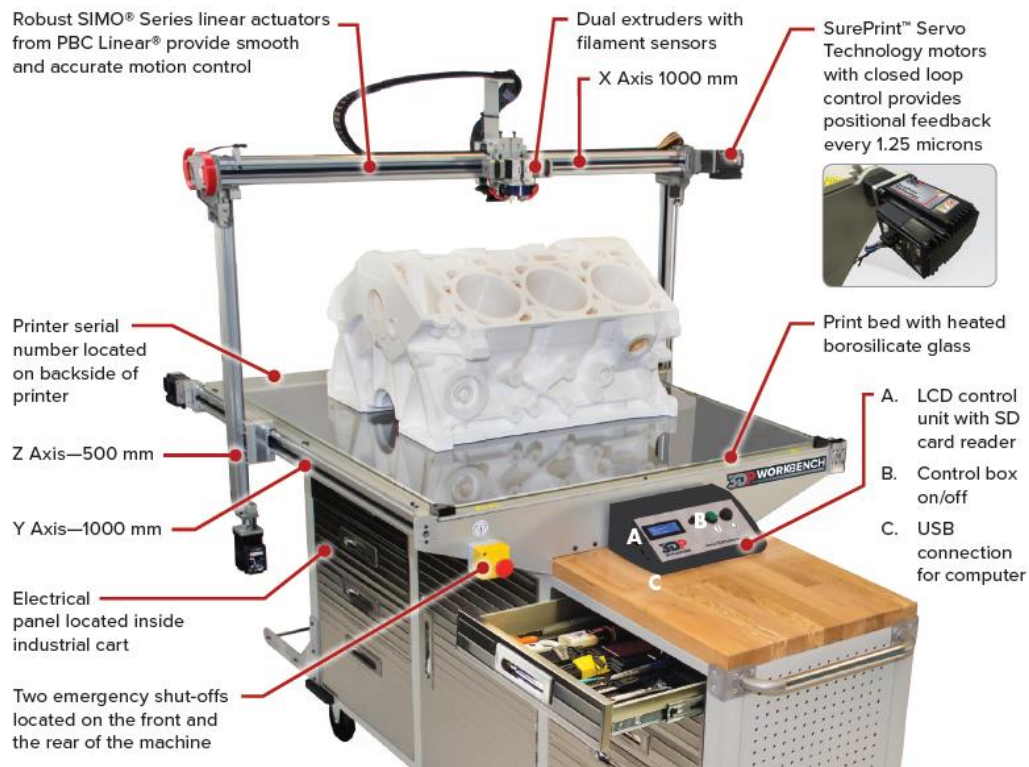
MK2,5 er en eldre generasjon av 3D-print maskiner som fortsatt er tilgjengelig på labben. Original Prusa i3 MK2.5S MMU2S, Original Prusa i3 MK2.5 MMU2, Original Prusa i3 MK2,5S, Original Prusa i3 MK2,5 er fra samme familie, egenskaper kan studeres i Tabell 5. («Original Prusa I3 MK3S 3D Printer»)

Tabell 5 Egenskaper hos forskjellige 3D printere.

	MK3 Family	MK2,5
Byggevolum	25 × 21 × 21 cm (9,84 "× 8,3" × 8,3 ")	25 × 21 × 21 cm (9,84 "× 8,3" × 8,3 ")
Laghøyde	0,05 - 0,2 mm	0,05 – 0,3 mm
Printer hodet	0,4 mm standard, bredt spekter av andre diametre / dyser støttes	0,4 mm
Filament diameter	1,75 mm	1,75 mm
Støttede materialer	Bredt utvalg av termoplast, inkludert PLA, PETG, ASA, ABS, PC (polykarbonat), CPE, PVA / BVOH, HIPS, PP (polypropylen), Flex, nGen, Nylon, - karbonfylt, trefyll og andre fylte materialer	PLA, PETG, ASA, ABS
Maks kjørehastighet	200+ mm / s	100+ mm / s
Maks temperatur i Printer hodet	210 - 300 °C (410 °F/572 °F)	210 - 300 °C (410 °F/572 °F)
Maks temperatur i varmesengen	100 °C (212 °F)	100 °C (212 °F)
Utskriftsflate	Avtakbare magnetiske stålplater med forskjellige overflatebehandlinger, varmeseng med kompensasjon for kalde hjørner	Ikke avtakbare stålplate, har varmeseng

(«Original Prusa MINI+»)

3DPlatform Workbench Classic



Figur 5 3Dplatform Workbench classic

3DP Workbench, er en printer som er produsert av 3D-platform som er lokalisert i USA. Den er designet å være i samsvar med EØS-markedet, som vil si at produktet har riktig CE-markering for å importeres til Norge.

3DP Workbench maskinen på labben kan 3D-printe med 2,85 mm filament. Det brukes en annen programvare for å slice modellene før man kan 3D-printe med denne maskinen. Selv om maskinen er egnet til å printe 1m x 1m x 0.5m, anbefales det ikke å printe i denne størrelsen av lab-ingeniør. Nedbøyning mellom stagene kan skje her også. Printerens egenskaper kan sees i tabell 6. («3DP Configurator»)

Tabell 6 Egenskaper hos 3DP Workbench

3DP Workbench	
Byggevolum	1 m x 1 m x 0.5 m (39.3" x 39.3" x 19.6")
Laghøyde	Ned til 0,07 mm (0.0027")
Printer hodet	0.6 mm
Filament diameter	3 mm anbefalt
Støttede materialer	Bredt utvalg av termoplast, inkludert PLA, ABS, PC (polykarbonat), PVA / BVOH, HIPS, Ninja Flex, Nylon.
Maks temperatur i Printer hodet	195 °C - 280 °C
Maks temperatur i varmesengen	40 °C - 135 °C
Utskriftsflate	Borosilikatglass, 5 mm tykt

3.1.3 Betong material egenskaper

Sand

Det skal støpes 53 liter betong. Ettersom armeringen som ble valgt hadde 20mm store celler måtte betongens innhold vurderes. Det kunne blitt valgt en sandtype som hadde 8-16mm store korn, men det kunne lett ha festet seg i åpninger i armeringen og medført at hele strukturen ikke ble fylt. Det ble derfor valgt å fokusere på betong som ikke hadde større enn 8mm i kornstørrelse. Resept kan sees i tabell 7.

Sand fins i forskjellige størrelser: 0-8 mm, 8-16, og videre. Dersom behovet for sand er i mindre størrelser, må den sorteres før blanding av betong.

Resept:

Tabell 7 Resept for betong

BETONGRESEPT:	B1 Hovedresept					Fukt i sand:	0,2 %	Blandeskjema	
						Fukt i stein:	0,0 %	53	Liter
Delmaterialer		%	liter	kg/l	Vann i TSS		Fukt	kg oppveid	
STANDARD FA	400	96,2	133,3	3,00		20,7548		20,755	STANDARD FA
SILIKA	16	3,8	7,3	2,20		0,830192		0,830	SILIKA
FLYVEASKE	0	0	0,0	2,30		0		0,000	FLYVEASKE
DYNAMON SR-N	5,00	1,25	4,8	1,05	80,5 %	0,259435	0,208845175	0,259	DYNAMON SR-N
DYNAMON U100	0,00	0,00	0,0	1,07	73,5 %	0	0	0,000	DYNAMON U100
MAPECRETE SRA-N	0,00	0,00	0,0	0,91	99,5 %	0	0	0,000	MAPECRETE SRA-N
EXPANCRETE	0	0,00 %	0	2		0		0,000	EXPANCRETE
0-8mm	1668,7	100,0	625,0	2,67		86,5838369	-0,432919185	86,151	0-8mm
8-16mm	0	0,0	0,0	2,77		0	0	0,000	8-16mm
16-22 mm	0	0	0,0	2,77		0	0	0,000	16-22 mm
Stålfiber	0	0,0	0,0	7,80		0		0,000	Stålfiber
LUFTINNHOOLD I						0			LUFTINNHOOLD I
FERSK BETONG	2,1		21,0			1,113		1,113	FERSK BETONG
									0
V/(c+s*2+F*,7)	0,5000							0,500	V/(c+s*2+F*,7)
VANN	216,0			1,00		11,207592			VANN
Tilsatt vann	208,6		208,6	1,00		10,82557915	-0,22407401	11,258	Tilsatt vann
								119,254	kg
SUM	2298,3		999,99					53,000	liter

Standard FA Sement

Sementen typen som vi har brukt er av høy fasthets betong. Det er Norcem som står for produksjonen av sementen, mens Adda står for distribusjon. Sementen tilfredsstiller kravene i NS-EN 197-1:2011 til portlandingssement CEM 11/B-M 42,5 R. Egenskapene for sementen finnes i tabell 8. («Standardsement FA»)

Tabell 8 Egenskaper til sement

Egenskaper	Deklarere data	Krav Ifølge NS-EN 197-1:2011
Finhet (Blaine m²/kg)	450	
Spesifikk vekt(kg/dm³)	3.00(B) / 2.99(K)	
Volumbestandighet (mm)	1	≤ 10
Begynnende størkning(min)	140	≥ 60
Trykkfasthet (MPa)		
1 døgn	20	
2 døgn	31	≥ 20
7 døgn	42	
28 døgn	55	≥ 42.5 ≤ 62.5
Sulfat (% SO₃)	≤ 4.0	≤ 4.0
Klorid (% Cl⁻)	≤ 0.085 (B)/ ≤ 0.05(K)	≤ 0.10
Vannløselig krom (ppm Cr⁶⁺)	≤ 2	≤ 2 ¹
Alkalier (% Na₂O_{ekv})	1,4 (B)/ 1,5(K)	
Klinker (%)	78	65-79
Flygeaske	18	21 - 35
Kalkmel (%)	4	21 – 35

Silikastøv

Silikastøv er det andre navnet til mikrosilika. Silika er røykgasstøv fra ferrosilisium og silisiumproduksjon. Silika har bedre egenskaper enn flygeaske og er derfor det som blir mest brukt. I følge standarden fra Statens Vegvesen er 3-10% tilsetning av silikastøv et krav i Norge.

Silikas viktigste egenskap er den positive påvirkningen den påfører både fersk og herdet betong, hvor betongen får god mekanisk styrke. Silika reduserer faren for korrosjon. Når silika blir blandet starter det en kjemisk reaksjon og betongen blir herdet.

Dynamon SR-N

Dynamon SR-N er en gullfarget flytende væske som forbedrer bearbeiding og reduserer vannmengden i blandingen. Egenskaper for tilsetningsstoffet finnes i tabell 9.

Tabell 9 Tekniske data Dynamon SR-N

TEKNISKE DATA (typiske verdier)		
PRODUKTBESKRIVELSE		
Form:	væske	
Farge:	gulbrun	
Viskositet (Brookfield Viscometer DV-1, LV1, 100rpm ved 20±2°C):	lettflytende; < 30 mPa·S	
Tørrestoffinnhold, %:	17,5 ± 1,7	
Spesifikk vekt, g/cm³:	1,040 ± 0,02	
pH-verdi:	6,0 ± 1,0	
Kloridinnhold, %:	< 0,05	
Alkaliinnhold (Na ₂ O-ekvivalenter) %:	< 2,0	
BRUKSEGENSKAPER I BETONG		
Som vannreducerer	Referanse	Dynamon SR-N
Sementmengde, kg/m³ (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,1
Masseforhold (v/c-tall):	0,50	0,41
Trykkfasthet (i N/mm²):		
- 1 døgn	26	37
- 7 døgn	43	56
- 28 døgn	52	66
Som SP-stoff	Referanse	Dynamon SR-N
Sementmengde, kg/m³ (Norcem standard sement):	350	350
Tilsetningsmengde (i % av sementvekt):	0	1,1
Masseforhold (v/c-tall):	0,49	0,49
Luftinnhold:	2,4	1,9
Konsistens, mm:		
- synkmål, 5 min	40	200
- synkmål, 30 min	30	200
- synkmål, 60 min	20	210
- synkmål, 90 min	20	180
- synkutbredelse, 5 min	200	430
- synkutbredelse, 30 min	200	340
- synkutbredelse, 60 min	200	330
- synkutbredelse, 90 min	200	320

3.2 3D printede strukturer

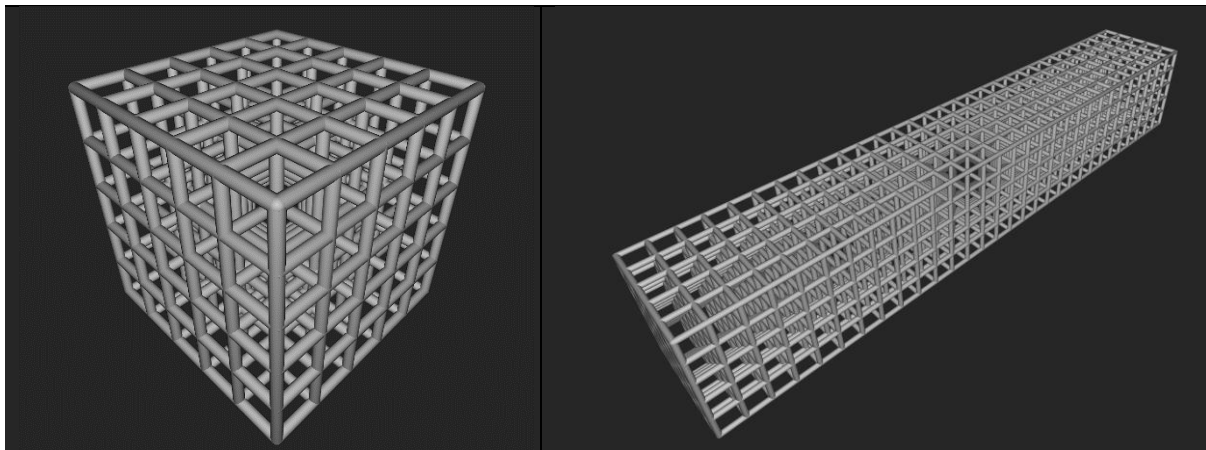
De 3D-printede strukturene er designet i et 3D-modelleringsprogram. Dette gjør det lett å endre de egenskapene som er ønsket under forskningen. Det er valgt forskjellige parametere til de forskjellige testene. Hvilke egenskaper vi testet under de forskjellige testene står nummerert i listen under og tabellene til strukturene.

Vi gjorde tester hvor vi testet følgende parametere

1. Lik stag diameter
2. Likt strukturvolum for alle
3. Ulike lattice strukturer
4. Trykktest av kube-struktur armering som er støpt i betong
5. Bøyetest av bjelke-struktur armering som er støpt i betong

Simple Cubic

Dette er en enkel lattice structure hvor alle stag er lik størrelse satt i en kubisk struktur. I hvert knutepunkt er det 6 stag som støtter opp rundt. Dette gjør at det burde være god støtte i hvert knutepunkt. Vi får antagelig knekking i stagene mellom knutepunktene. Ettersom strukturen har vertikale stag som står 90° på grunnen, vil det være godt egnet for trykk som går ortogonalt på bjelken.



Kube 100x100x100

Test nr.	Materiale	Cellestørrelse (mm)	Stag diameter (mm)	% av total volum
1	PLA	10x10x10	2,5	15,3%
1	PLA	20x20x20	2,5	5,0%
1	PLA	25x25x25	2,5	3,5%
1	PETG	10x10x10	2,5	15,3%
1	PETG	20x20x20	2,5	5,0%
1	PETG	25x25x25	2,5	3,5%
2				
2	PLA	10x10x10	2,5	15,3%
2	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
2	PLA	25x25x25	5,4	15,2%
2	PETG	10x10x10	2,5	15,3%
2	PETG	20x20x20	4,5	15,1%
2	PETG	25x25x25	5,4	15,2%
4				
4	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
4	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
4	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
4	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
4	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
4	PLA	20x20x20	4,5	15,1%

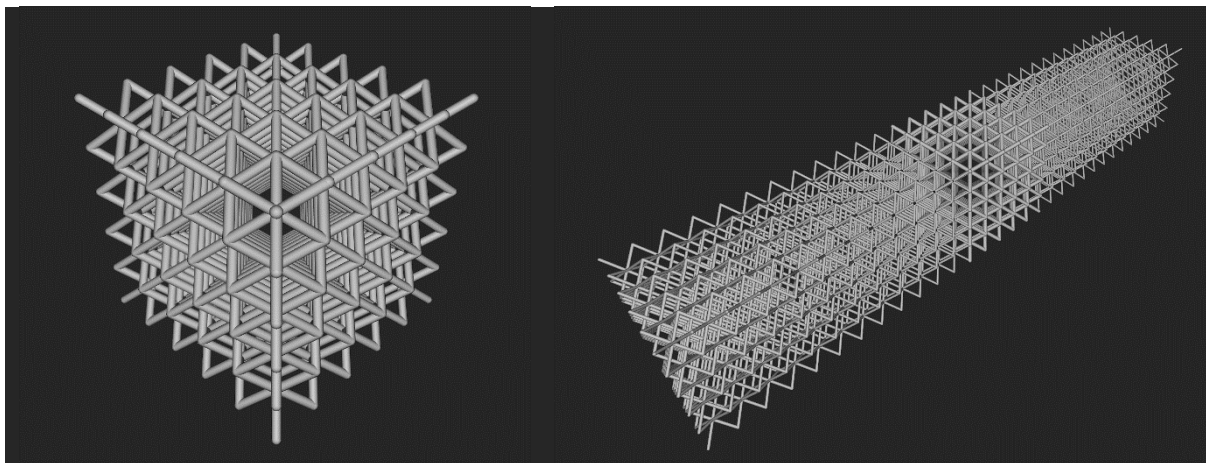
Bjelke 600x100x100

Test nr.	Materiale	Cellestørrelse (mm)	Stag diameter (mm)	% av total volum
5	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
5	PLA	20x20x20	4,5	15,1%

Tabell 10 Simple Cubic printe oversikt

Body centered cubic

Denne lattice strukturen har også en kubisk form. Her er det 8 stag som støtter rundt hvert knutepunkt. Forskjellen her er at ingen stag står ortogonalt på det horisontale plan. Dette minker mengden trykk bjelken vil kunne tåle.

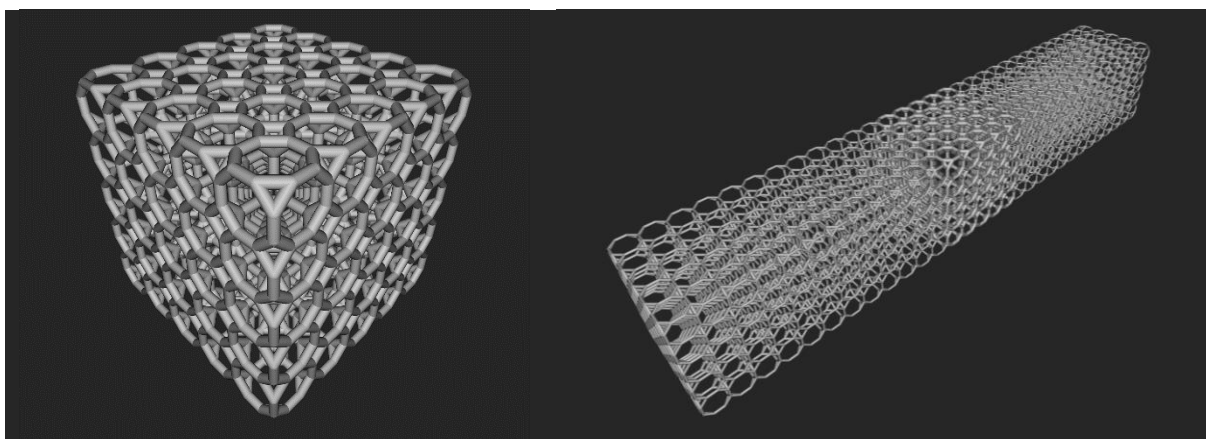


Test nr.	Materiale	Cellestørrelse (mm)	Stag diameter (mm)	% av total volum
3	PLA	20x20x20	3,6	15,1%
4	PLA	20x20x20	3,6	15,1%

Tabell 11 Body Centered Cubic printe oversikt

Truncated cube

Denne lattice strukturen har en større oppbygning i knutepunktene. Hvert knutepunkt har 4 stag. Selv om hvert enkelt knutepunkt kun har 4 stag så har hvert knutepunkt flere knutepunkt i seg og stag blir kortere. Dette gjør strukturen mer stabil og vil kunne tåle mer trykk.



Test nr.	Materiale	Cellestørrelse (mm)	Stag diameter (mm)	% av total volum
3	PLA	20x20x20	3,6	15,2%
4	PLA	20x20x20	3,6	15,2%
4	PLA	20x20x20	3,6	15,2%

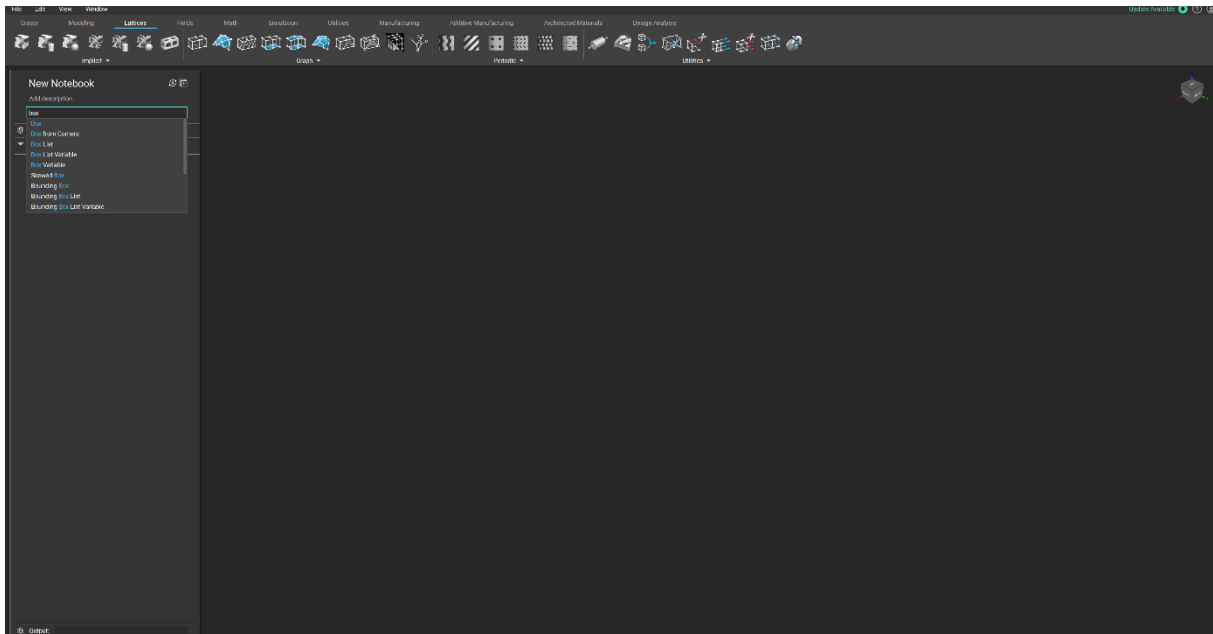
Tabell 12 Truncated Cube printe oversikt

4 Metode

4.1 3D-print

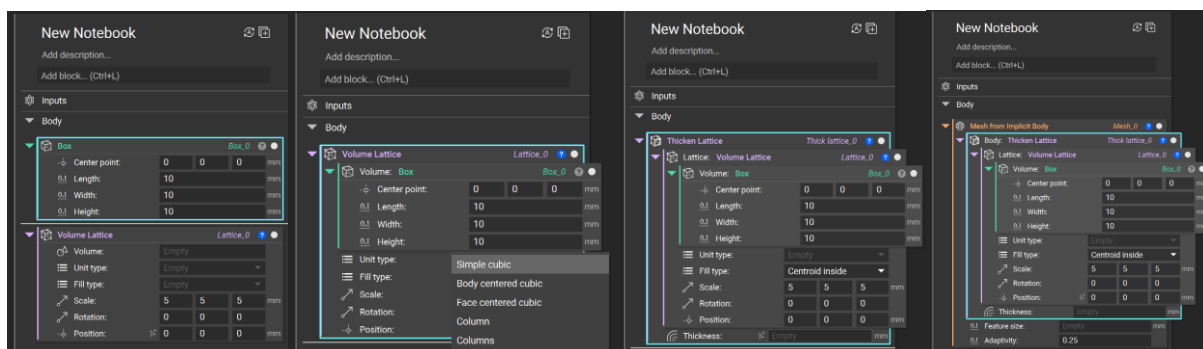
4.1.1 Modellering

For å 3D-modellere strukturene våre har vi brukt nTop Platform som er ingeniørprogramvare for digital produksjon. Programmet skal gjøre det raskt og effektivt å designe og kjøre simuleringer for deler. Vi valgte programmet da det allerede har en mengde lattice structures innebygd som vi kunne forske på.



Figur 6 Oppstart 3D modelleringsprogram

Når man starter opp programmet så starter man med blanke ark for å starte og designe. For å navigere seg i programmet kan en enten klikke seg frem i navigeringsbaren på toppen eller bruke kommandoer i søkefeltet til venstre. Når en begynner å skrive inn en kommando kommer det opp diverse forslag til hvilke kommandoer en kan bruke.



Figur 7 Kommandoer for modellering

Figur 7 viser de forskjellige kommandoene og hvordan de kombineres

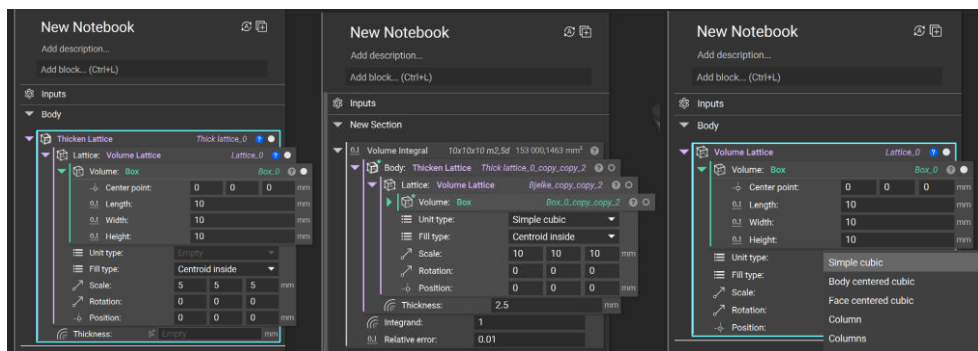
- Vi brukte kommandoene «box» og «volume lattice». «Box» brukes til å definere størrelsen på den totale strukturen, mens «Volume Lattice» definerer struktur og cellestørrelse.
- Vi kombinerte de to ved å definere «box» som volumet strukturen skal holde seg inne i. Ved å velge unit type kan man velge hvilken type lattice struktur man ønsker.
- Etter det brukes det «thicken lattice» for å definere hvilken tykkelse stagene skal ha.
- Vi brukte kommando «Mesh from implicit body» som tillater oss å eksportere filen til printing. Vi høyreklikker, klikker på export og velger «stl» som filtype.

Tabell 13 forklarer funksjonen til hver av kommandoene.

Tabell 13 Forklaring av kommandoer

Komando	Bruksområde
Box	Definerer totale størrelsen av strukturen. Størrelser oppgis i mm.
Volume Lattice	Bestemmer hvordan hver enkelt celle ser ut i strukturen. Du velger hvilket volum den skal holde seg innenfor ved å velge samme box som tidligere. Du kan deretter velge strukturtype ved «Unit Type» og velge hvor stor hver enkelt celle skal være med «Scale»
Thicken Lattice	Lar deg bestemme diameteren på stagene i strukturen. Oppgis i mm.
Mesh from Implicit Body	Omgjør strukturen til datapunkter slik at man kan printe ut strukturen. Dersom filen blir for stor kan det skape problemer for printeren og burde ikke overskride 10000kb. For å få ned størrelsen på filen kan man gjøre «Feature size» større da det blir færre datapunkter. Man kan sette denne opp mot 1mm.
Volume Intregal	Beregner volumet for deg av selve strukturen. Vi justerer våre egenskaper som cellestørrelse og stag diameter slik at det passer volumet vi ønsker.

Vi gjorde diverse tester med ulike parametere. For å klargjøre for testene så justerte vi modellene i programmet slik at de passet med egenskapene vi ønsket å teste. I test en og to testet vi i flere cellestørrelser, i test nummer tre valgte vi kun en cellestørrelse for de forskjellige lattice strukturene.



Figur 8 Kommandoer brukt for tester

Vi gjorde tester hvor vi testet følgende parametere

1. **Lik stag diameter:** Vi bruker kommando «Thicken Lattice» og setter 2,5 inn som diameter i «Thickness».
2. **Likt strukturvolum på alle:** Vi bruker kommando «Volume Integral» til å regne ut volumet av strukturen. Vi justerer da diameteren slik at vi ser volumet blir 15% eller 150 000 mm³.
3. **Ulik lattice struktur:** Vi endrer på «Unit type» for å få ønsket strukturtype. Vi må deretter justere diameter og cellestørrelse slik at den følger 15% volum som tidligere.
4. **Trykktest betong:** Vi justerer alle verdiene slik at det passer med det som har prestert best under trykktest uten betong.
5. **Bøyetest betong:** Vi justerer alle verdiene slik at det passer med det som har prestert best under trykktest uten betong og setter box-lengde til 600mm.

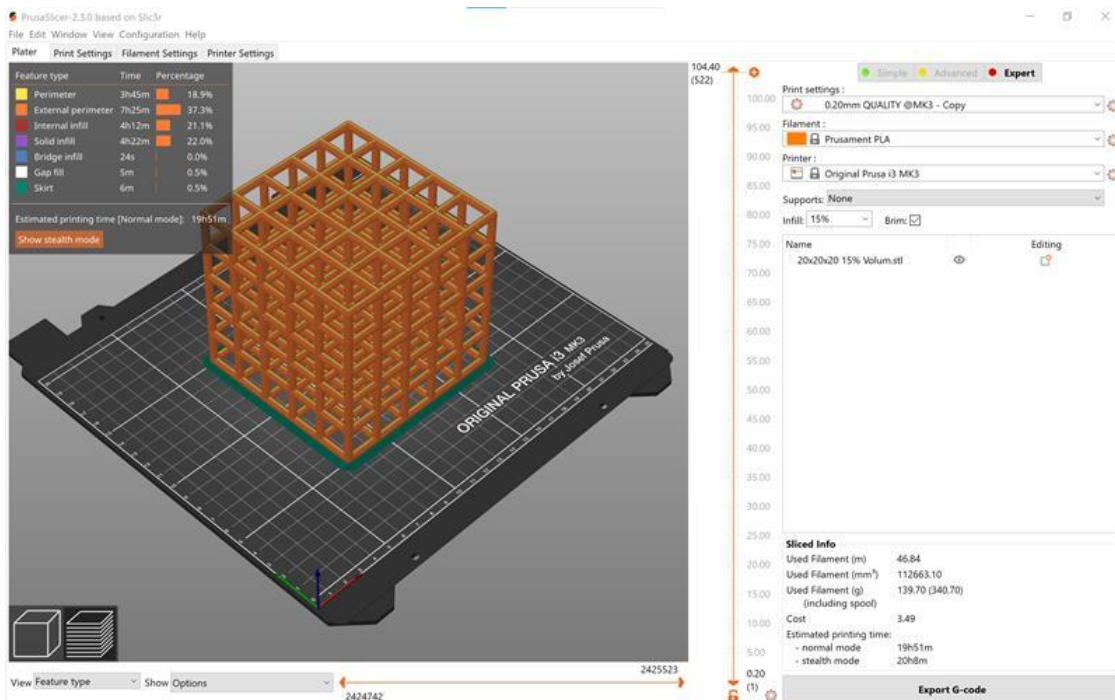
4.1.2 Printing

Printing av bjelker og kubikk skjer hver for seg og krever forskjellige printere basert på den totale størrelsen av modellen som skal printes.

3D-printere er maskiner som krever opplæring for alle studenter som skal bruke maskinen. NTNU tilbyr et todelt kurs med en digital teoridel, og en praktisk del som blir utført på labben med observasjon av lab-ingeniør. Begge delene ble fullført av oss før bruk av maskinene.

For å 3D-printe med tilgjengelige maskiner på labben må programvaren Prusaslicer lastes ned. Der kan man blant annet sjekke om strukturen er riktig modulert og se etter eventuelle feil på strukturene før den printes.

For å laste opp modellen kan man trykke på pluss knappen oppe til venstre. Ved bruk av formene på venstre side kan man snu modulen rundt, opp eller ned for å sjekke om alt stemmer, og for å se om strukturen er riktig modellert. Hvis man finner feil i modellen må man re-modellere slik at det gir riktig resultat. Dersom en feil ikke blir oppdaget ved slicing, vil 3D-printeren gi en feilmelding når den prøver å starte. Programmet kan brukes av forskjellige 3D-printere, så det er viktig å velge riktig printer og material før modellen slices.



Figur 9 Prucaslicer programvare og valg av materiale

Etter å ha lastet inn modellen i programmet kan man velge materialet som brukes under «filament», og hvor fyldig strukturen skal være under «infill». Vi har satt infill til 15% i alle tester, figur 9 viser siden hvor modellen gjøres klar for printing. Når materiale velges i programmet, har det forhåndsregistrerte parametere for varme og printehastighet for materialet. Tilgjengelige materialer på labben var PLA og PETG som hadde noe forskjellige egenskaper, begge materialene ble brukt før en beslutning av materialet ble tatt. Deretter er det viktig å bruke riktig maskin. Maskinene har nesten samme ferdigheter, men de nye versjonene har en avtagbar utskriftsplate. Det er ikke mulig å bruke PETG som krever å varme opp til 85 grader ettersom platen på de gamle printerne ikke tåler såpass høy varme. Overføring av filer mellom dataprogrammet Prusaslicer og maskinen skjer via SD-kort, ettersom maskinen har en egen port for SD-kort.

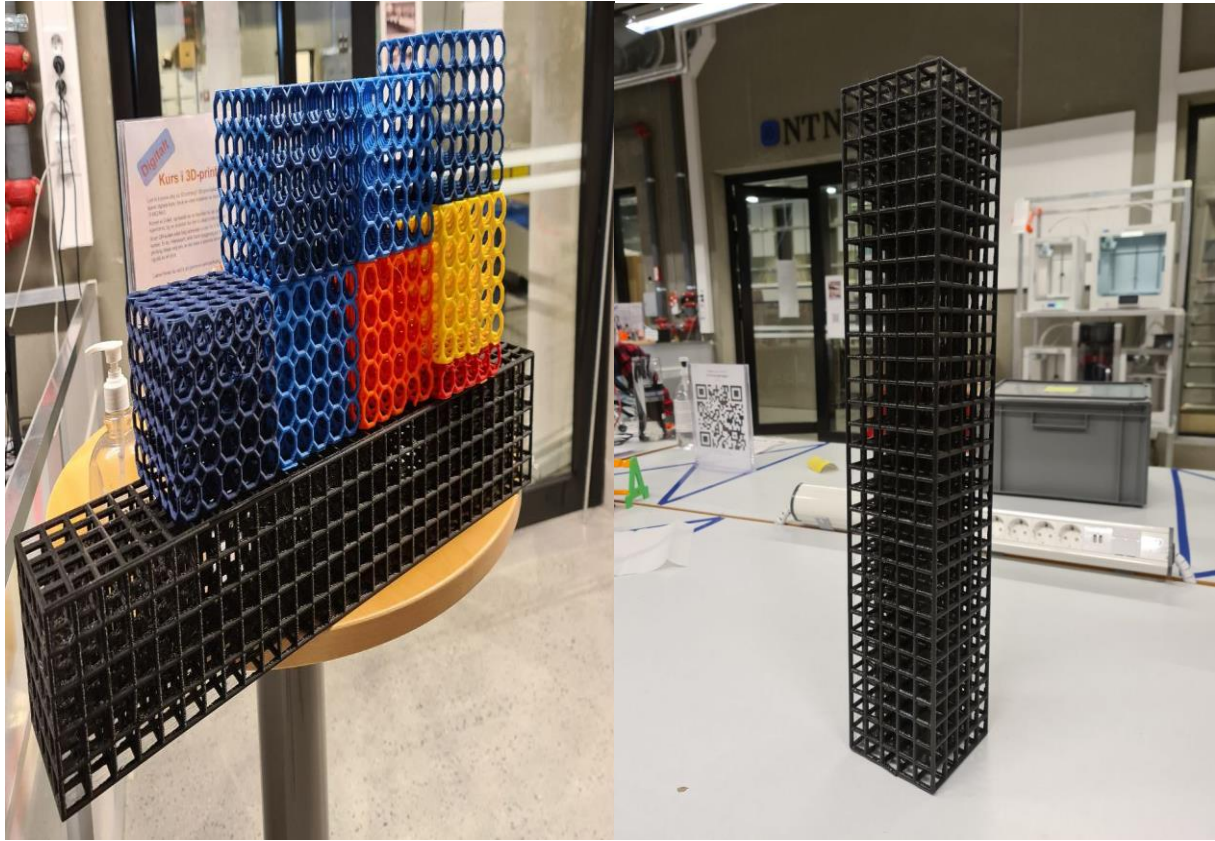
Rengjøring av platen

Platen på de nye modellene på 3D-printere er avtagbare, noe som gjør fjerning av modellene mye lettere, samtidig som det er lettere å rengjøre. De nye platene tåler også mer varme, dette skaper flere muligheter for hva man kan gjøre. Rengjøringen skjer med vaskemiddel som er tilgjengelig på labben, og vaskes med tørkepapir. Rengjøringen er viktig fordi det gjør at produktet lettere kan fjernes fra platen etter avsluttet printing.

Oppstart av maskinen

Ved oppstart av maskinen krever det litt tid for at den skal varme seg opp. Etter oppstart velger man materiale i menyen på skriveren, og den vil varme seg opp til temperaturen som er innebygd og tilpasset for materialets termiske egenskaper. Da kan maskinen fylles med filament og maskinen vil deretter starte å kalibrere når den har nådd riktig temperatur. Når kalibreringen starter vil den markere hvor den er i forhold til platen og printe ut gammelt materiale som er inne i printerhodet. Deretter kan SD-kortet kobles til for å importere modellen som skal printes. Maskinen vil vise estimert tid det vil ta å printe denne strukturen. Skjermen på maskinen viser temperatur, tid og eventuelle feil med modulen. Før printerens etterlates er det viktig å se at den klarer oppstarten først.

Figur 10 viser noen av kubene og bjelkene som er printet i denne studien.



Figur 10 Eksempler av 3D printede modeller

4.2 Betong

4.2.1 Forskallingsbokser

For å støpe strukturene til ønsket størrelse ble forskallingsbokser snekret. Det skulle utføres bøyetest for 4 bjelker og trykktest for 15 kuber. Det ble laget 4 avlange forskallingsbokser for bjelkene og 5 avlange forskallingsbokser som rommet 3 kuber hver for kubene.

Det ble laget en forskallingsplan som kan sees i tabell 14, for å ha full kontroll over dimensjoner og antall bokser som trengtes til forskalingen. Det ble brukt vinkelsliper, bordsag, sirkelsag, boremaskin og skruer.

Tabell 14 Forskallingsplan

Bjelke		
Langside (mm)	Kortside (mm)	Bunn (mm)
610x110	134x110	634x134
2	2	1
8	8	4

Prøvestykk	Antall
Bøy	4
Trykk	15

Bokser			
Langside (mm)	Kortside (mm)	Kortside innside (mm)	Bunn (mm)
354x110	134x110	110x110	378x134
2	2	2	1
10	10	10	5

4.2.2 Siktetest

Siktetesten ble utført ved hjelp av maskinen tilgjengelig på labben som sees i figur 11. Maskinen lager vibrasjoner som sorterer sementen gjennom siktene på holderne. For å ikke overbelaste siktene er det viktig å finne riktig mengde av sand som skal testes. For å finne mengden brukes følgende formel:

$$M_{\max} = \frac{A \cdot \sqrt{d}}{200}$$

A er arealet av den største sikten som blir benyttet i testen i mm^2

d er mellomrommet mellom trådene i sikten, i mm.

Blandet sand skal veies først, før den skal bli satt i maskinen. Maskinen vibrerer og sorterer sanden som skal brukes i betong resepten. Testen skal tas to ganger. Etter at sorteringen er ferdig veies alle kjelene, og vekten skal nullstilles etter hver gang man veier holderne.

Da finner vi ut hvor mye sand i forskjellige størrelser er tilgjengelig. I denne testen måtte vi bruke sand størrelser fra 0-8mm. Hvis vekt forskjellen er mer en 0,1% må testen tas på nytt. Alle data ble registret ved testen.

Data registreringstabell i henhold til NS-EN 933-1 («NS-EN 933-1:2012»)

Formel for omgjøring til prosent av massen til material

$$100 \cdot \frac{R_i}{M_1}$$

- R_i er hvor mye masse som er i hver holder etter testen er utført
- M_1 er masse tilpasset holdere i maskinen.



Figur 11 Maskin for siktetest

4.2.3 Fuktighetstest

Denne testen vil fortelle oss hvor høyt fuktighetsinnholdet i sanden som skal brukes er. Ved å vite dette kan resepten justeres slik at det blir riktig mengde vann i blandingen. I denne testen blir sand veiet og satt i ovnen i ti minutter. Ovnen er justert til $110^{\circ} \pm 5$ grader. Etter at sanden er tatt ut av ovnen veies den på nytt.

Formelen for innhold av fuktighet er følgende:

$$\text{Fuktinnhold} = \frac{m_1 - m_3}{m_3} \cdot 100$$

m_1 er vekten av tilslag

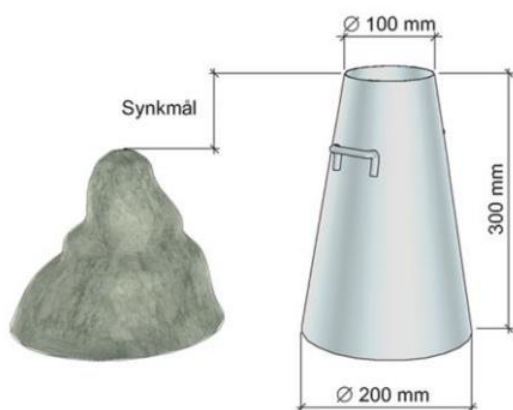
m_3 er ferdig tørket sand

4.2.4 Blandeprosedyre

Etter bearbeiding av resepten ble alle materialene veid og satt ved blandemaskinen fra Zyklos. Til blandingsprosedyren brukte vi en elektrisk blandemaskin. Blandemaskinen kontrolleres med knapper som er plassert på siden av beholderen. Den har en liten åpning på lokket hvor man kan kortollere blandingsprosessen og eventuelt tilsette vann eller andre tilsetningsstoffer.

- Tørr sand, sement og silika er blandet i ett minutt i maskinen,
- Deretter tilsettes vann og tilsetningsstoffet Dynamon SR-N. Vann og tilsetningsstoff er tilsatt forsiktig slik at det blandes godt sammen. Det blandes i to minutter.
- Blanderen stoppes og betongen hviler i ett minutt.
- Betongen blandes i to minutter

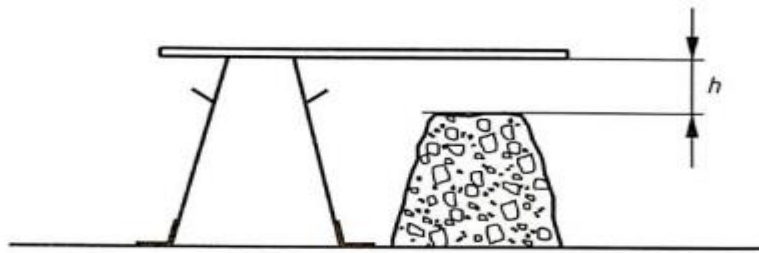
4.2.5 Synkemål



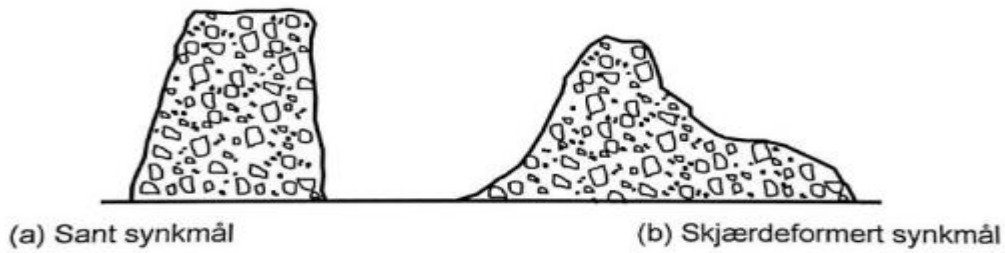
Figur 12 Synkemål

For å måle støpbarheten til fersk betong finnes det tre metoder, Synkemål, utbredningsmål og synkeutbredelsesprøving. Vi følger NS-EN 12350-3 for å utføre testen. («NS-EN 12350-3:2019»)

Synkemål er den mest vanlige metoden for å undersøke betongens støpbarhet. Først så gjøres kjeglen og platen fuktig slik at betongen lett glir av og ikke fester seg. Når synkemål skal utføres fylles kjeglen i tre lag for å la betongen sette seg. Deretter løftes kjeglen rett opp i en tid mellom 2- 5 sekunder. Kjeglen plasseres ved siden av betongen og synkemålet måles. Betongens synkemål defineres som avstanden fra toppen av synkkjeglen til betongens høyeste punkt, som vi ser i figur 12. Typiske synkemål verdier for vegg/gulv er 200-220mm.



Figur 1 – Synkmåling



Figur 13 Former av synkmål

Komprimeringsgrad kan regnes ut ifra følgende formel:

$$C = \frac{h}{h-s}$$

Hvor:

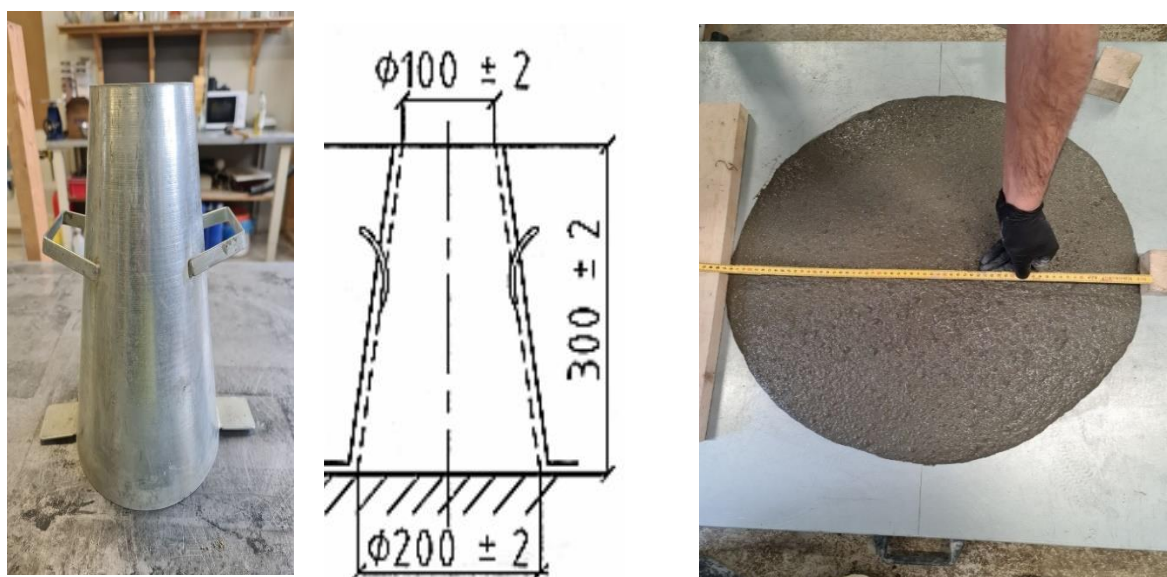
h er innvendig høyde av beholderen i mm

s er avstanden fra toppen av beholderen til betongoverflaten etter komprimering i mm

Det kreves et resultat nøyaktighet med to desimaler. I vårt tilfelle er betongen såpass flytende at vi velger å utføre et utbredningsmål i tillegg.

4.2.6 Utbredningsmål

Denne testen utføres for å teste fersk betong ved bruk av en synkekjegle med standard størrelse. Ettersom betongen var såpass flytende velges det å ta utbredningsmål. Vi plasserte utbredningsplaten på gulvet og sikret oss med niveller slik at platen lå vannrett på gulvet. Både platen og kjeglen ble vasket med klut for å gjøres fuktige før testen. Synkekjegle blir også brukt til utbredningsmålet. Etter at kjeglen er fylt opp tar man kjeglen forsiktig av, som tar omtrent fem sekunder. Sirkelen måles i en øst/vest og nord/sør-retning som i figur 14. Deretter tar man gjennomsnittet av målingene.



Figur 14 Utbredningsmål

$$\text{Utbredningsmål} = \frac{d_{\phi/v} + d_{n/s}}{2}$$

4.2.7 Støping

For støpningen skulle det støpes 4 bjelker, hvor to av dem var med armering og to uten armering. 15 kuber, 6 uten armering, og 9 med armering, hvor 3 av dem hadde alternativ armering. Vi fylte forskallingsboksene med sement og dekket boksene med plastfolie slik at vannet ikke skulle fordampe. Etter 24 timer åpnet vi alle forskalingene og kontrollerte at alt er riktig. Etter at bjelkene og kubene ble klare satte vi terningene og bjelkene i vannkar i 28 dager som i figur 16. Det er viktig at temperaturen i vannet ikke blir for kald, anbefalt temperatur er 20 grader. Etter 28 dager kunne testene utføres.



Figur 15 Ferdigstøpet betong i forskallingsbokser



Figur 16 Betong i romtemperert vann i 28 dager

4.3 Tester

For strukturene er det gjort diverse tester for å se om det er mulig oppnå de resultatene som er ønsket med 3D-printet armering. Det er valgt forskjellige parametere til de forskjellige testene. Hvilke egenskaper vi testet under de forskjellige testene står nummerert i listen under og tabellene til strukturene.

Vi gjorde tester hvor vi testet følgende parametere

1. Likt stag diameter
2. Likt strukturvolum på alle (15% av totalvolum)
3. Ulik lattice struktur
4. Trykktest av kube-struktur som armering støpt betong
5. Bøyetest av bjelke-struktur som armering støpt betong

Test 1 og 2 er det gjort trykktest kuber i to forskjellige materialer for celledørrelser 10, 20 og 25. Totalt 6 kuber per test.

Test 3 er det bestemt et materiale og celledørrelse, det ble testet for to alternative strukturer. Totalt 2 kuber.

Test 4 er det testet 6 kuber uten armering, 6 med simple cubic struktur og 3 med alternativ struktur. Totalt 15 kuber.

Test 5 er det testet 2 bjelker uten armering og 2 bjelker med armering. Totalt 4 bjelker.

4.3.1 Trykktest av 3D-struktur (Test 1-3)

Prosedyre

Alle strukturene veies og registres størrelse på før trykktest skal utføres. Etter at massen til kubene er registret sorteres de slik at testene blir gjennomført med riktig data. Gjennom dataprogrammet på labben bestemmes det hvor mye trykk per sekund og hastighet som skal utføres på kubene. Trykkpressen vil legge trykk på kubene frem til det når bruddpunktet og registrerer dataen fra forsøket automatisk. Programmet noterer eksakte verdier og lager grafer som viser utviklingen i forsøket.



Figur 17 Trykktest av 3D-printet forsterkning utføres

Tabell 15, 16 og 17 viser egenskapene til de strukturene vi utførte trykktest på i tester 1, 2 og 3. Likt for alle testene var at det var trykk direkte på strukturene som var 100x100x100mm i totalstørrelse

Tabell 15 Test 1 - Lik diameter

Struktur	Materiale	Cellestørrelse(mm)	Stag diameter(mm)	% av total volum
Simple cubic	PLA	10x10x10	2,5	15,3%
Simple cubic	PLA	20x20x20	2,5	5,0%
Simple cubic	PLA	25x25x25	2,5	3,5%
Simple cubic	PETG	10x10x10	2,5	15,3%
Simple cubic	PETG	20x20x20	2,5	5,0%
Simple cubic	PETG	25x25x25	2,5	3,5%

Tabell 16 Test 2 - Likte strukturvolum

Struktur	Materiale	Cellestørrelse(mm)	Stag diameter(mm)	% av total volum
Simple cubic	PLA	10x10x10	2,5	15,3%
Simple cubic	PLA	20x20x20	4,5	15,1%
Simple cubic	PLA	25x25x25	5,4	15,2%
Simple cubic	PETG	10x10x10	2,5	15,3%
Simple cubic	PETG	20x20x20	4,5	15,1%
Simple cubic	PETG	25x25x25	5,4	15,2%

Tabell 17 Test 3 - Alternative strukturer

Struktur	Materiale	Cellestørrelse(mm)	Stag diameter(mm)	Volum
Body centric cubic	PLA	20x20x20	3,6	15,1%
Truncated cube	PLA	20x20x20	3,6	15,2%
Truncated cube	PLA	20x20x20	3,6	15,2%

4.3.2 Trykktest av betongkuber (Test 4)

Tabell 18 Totaloversikt over hva som testes og innstilling på maskinen

Trykktest	Uarmert betong	Armert betong
Antall	6	9
Dimensjoner	110x110x110 mm	110x110x110 mm
Hastighet på maskina	0,6 ± 0,2 Mpa/s	0,6 ± 0,2 Mpa/s
Maskin	x	x
Støpe-Tidspunkt/Uke	uke 13	uke 13
Test-Tidspunkt/Uke	uke 17	uke 17
Standard	NS-EN 12390-3	NS-EN 12390-3
Alternativ standard		
Støpt	02.04.2021	02.04.2021
Testdato	30.04.2021	30.04.2021

For denne testen ble laboratoriets trykkprøvemaskin brukt, som er i samsvar med NS-EN 12390-3. Etter støpning av betong skal den stå i 28 dager til herding for å nå høy fasthet. Alle kubene har blitt målt for masse, høyde, bredde og lengde som er registret i programmet som brukes av testmaskin. Vi ser i tabell 18 en oversikt over hvor mange kuber som skal testes og hvilke innstillinger maskinen er innstilt til. («NS-EN 12390-3:2019»)

Maskinen har flere bruksområder, og kan brukes til å utføre både trykktest og bøyetest. Når testen gjennomføres er det viktig å kontrollere at det ikke ligger småstein eller annen grus som kan forårsake tidligere knekking i strukturen og dermed påvirke resultatene.

Hastigheten på maskinen settes til $0,6 \pm 0,2 \text{ MPa/s}$ ($\text{N/mm}^2 \cdot \text{s}$)

Det er viktig med lav hastighet og kraftøkning for å unngå kollaps slik at bruddet rekker å utvikle seg.

Trykkfastheten finner en med følgende formel:

$$F_c = \frac{F}{A_c}$$

Der

F_c er trykkfastheten i MPa(N/mm²)

F er bruddlast i N

A_c er tverrsnitts arealet på prøvelegemet som trykkraften virker mot

Det er utført trykktest på 15 kuber totalt. 6 uten armering, 6 med Simple cubic armering og 3 som er utført med alternative strukturer. Det ble sett på alternative strukturer for å kunne se om dette ga et bedre resultat. Alle kubene er 110x110x110mm i størrelse. Armeringen i kubene som har det er 100x100x100mm med 20mm i cellestørrelse og har omtrent 15% volum. Vi ser i tabell 19, 20 og 21 en oversikt over hvilke betongkuber vi testet og egenskapene for dem.

Tabell 19 Betong kuber uten armering som skal testes

Uten armering	Struktur	Diameter	Vekt(g)
1 U.Arm			3176,78
2.UArm			3132
3 U.Arm			3155,09
4.U.Arm			3142,18
5.U.Arm			3187,4
6.U.Arm			3126,92

Tabell 20 Betong kuber med armering som skal testes

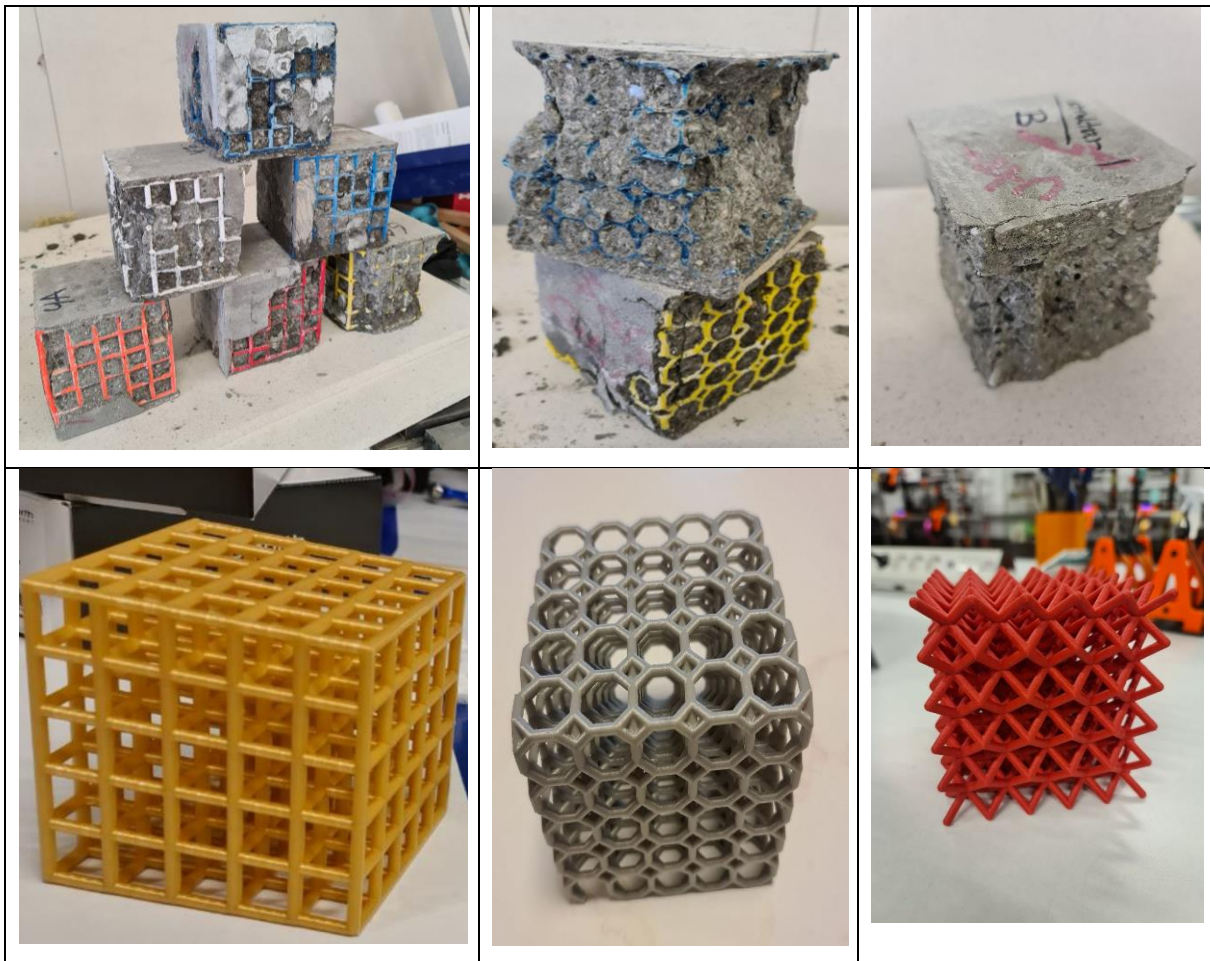
Med armering	Struktur	Diameter	Vekt(g)
7 A1	Simple Cubic	4,5	3033,23
8 A2	Simple Cubic	4,5	2906,31
9 A3	Simple Cubic	4,5	2871,97
10 A4	Simple Cubic	4,5	2957,41
11 A5	Simple Cubic	4,5	2982,59
12 A6	Simple Cubic	4,5	2950,04

Tabell 21 Betong kuber med alternativ armering som skal testes

Alt. Armering	Struktur	Diameter	Vekt(g)
13 B1	Body centered cubic	3,6	2979,22
14 C1	Truncated cubic	3,6	2862,80
15 C2	Truncated cubic	3,6	3062,74



Figur 18 Kuber uten forsterkning før og etter test



Figur 19 Hvordan kubene med forsterkning knekker på grunn av trykktest

4.3.3 Bøyetest av betongbjelker (Test 5)

Tabell 22 Bøyetestplan

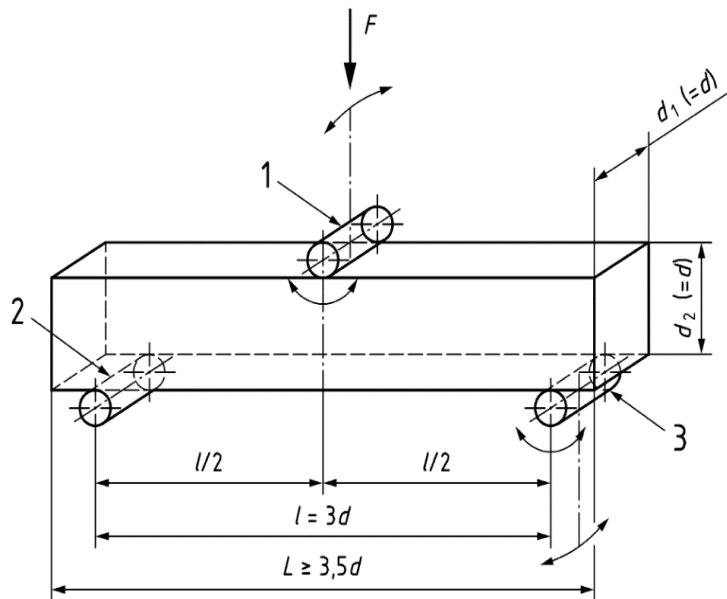
Bøyetest	Uarmert betong	Armert betong
Antall	2	2
Dimensjoner	610x110x110 mm	610x110x110 mm
Hastighet på maskina	0,04 - 0,6 MPa/s	3 mm/min
Maskin	x	x
Støpe-Tidspunkt/Uke	uke 13	uke 13
Test-Tidspunkt/Uke	uke 17	uke 17
Standard	NS-EN 12390-5	NS-EN 12390-5
Alternativ standard	NS-EN 14651	NS-EN 14651
Støpt	02.04.2021	02.04.2021
Testdato	30.04.2021	30.04.2021

For bøyetesten har også bjelkene ligget til herding i 28 dager. Samme trykkmaskin blir brukt for denne testen hvor trykket blir satt midt på bjelken og to opplagere blir satt på undersiden. Tabell 22 viser hvilke bjelker som skal testes og hvilke innstillinger maskinen er satt til. Testen følger Standard NS-EN 12390-5 til bøye-test. («NS-EN 12390-5:2019»)

I figur 22 ser vi hvordan bjelken blir lagt opp for bøyetesten. Det er to opplagsruller som bjelken skal hvile på. Avstanden mellom disse er $3d$, hvor d viser til dybden av bjelken sett fra trykkflaten. Trykket vil være plassert på midten mellom opplagerne.

Tegnings forklaring

1. Belastningsrullen den kan roteres eller vinkles
2. Opplagsrull
3. Opplagsrull som kan justeres



Figur 21 Illustrasjon av bøyetest og hvordan det settes opp

Avstanden for opplagsrullene er $3d$, i hvor tilfelle $3 \cdot 110 = 330\text{mm}$

$$f_{ct,\beta} = \frac{3F \cdot l}{2d_1 \cdot d_2^2}$$

Der:

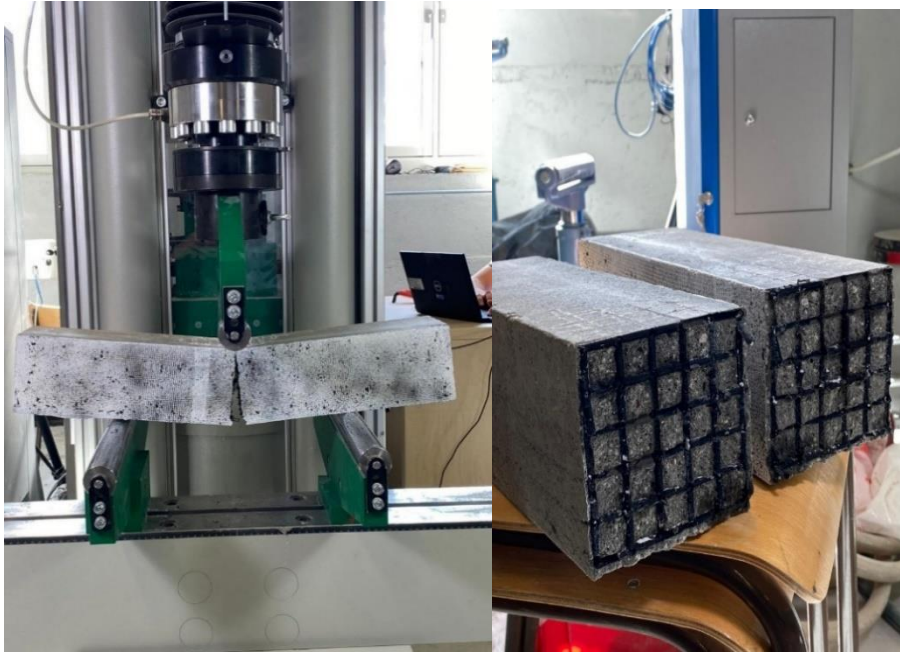
$f_{ct,\beta}$ er bøyestrekfastheten i MPa (N/mm^2)

F er bruddlast i N

l er avstanden mellom de nedre rullene i mm

d_1 og d_2 er tverrsnittets tverrmål i mm

Bøyestrekfastheten skal uttrykkes til nærmeste 0,1 MPa (N/mm^2)



Figur 22 Bøyetest av bjelke med armering



Figur 23 Bøyetest av bjelke uten armering

5 Resultater

5.1 Tidsbruk 3D print

3D-printing som en prosess krever tid å gjennomføre. Hva som påvirker hvor lang tid prosessen tar er struktur, materiale og fyllmengde. Vi ser i tabell 23, 24 og 25. hvor mye tid hver struktur bruker sammenlignet med celle størrelse og vekt.

Tabell 23 Tidsbruk til for printing av armering for Test 1

Navn	Størrelse(mm)	Vekt (g)	Timer Brukt
PLA 10 Simple cubic	100x100x100	122	19t 13min
PLA 20 Simple cubic	100x100x100	39	12t 50 min
PLA 25 Simple cubic	100x100x100	41	12t 59 min
PETG 10 Simple cubic	100x100x100	119	21t 22min
PETG 20 Simple cubic	100x100x100	47	13t 16 min
PETG 25 Simple cubic	100x100x100	41	20t 19min

Tabell 24 Tidsbruk til for printing av armering for Test 2

Navn	Størrelse(mm)	Vekt (g)	Timer Brukt
PLA 10 Simple cubic	100x100x100	122	19t 13min
PLA 20 Simple cubic	100x100x100	125	19t 21min
PLA 25 Simple cubic	100x100x100	121	20t 16min
PETG 10 Simple cubic	100x100x100	119	21t 22min
PETG 20 Simple cubic	100x100x100	133	17t 10min
PETG 25 Simple cubic	100x100x100	122	17t 16min

Tabell 25 Tidsbruk til for printing av armering for Test 3

Navn	Størrelse(mm)	Vekt (g)	Timer Brukt
PLA 20 Truncated	100x100x100	39	23t 39 min
PLA 20 Body centric	100x100x100	41	1 d 4t 29 min

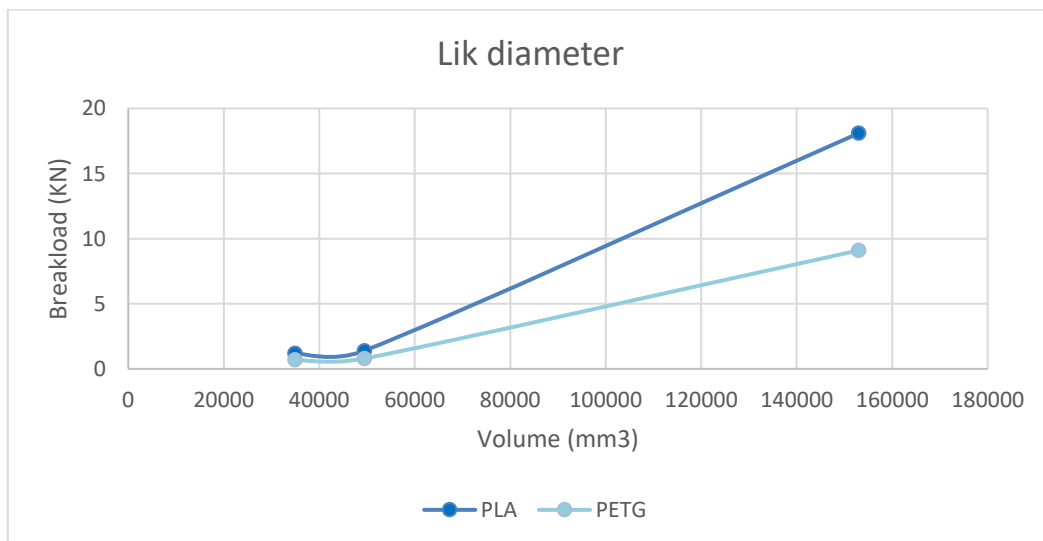
5.2 Test 1-3: Trykktester av strukturer

Test 1: Trykktest med lik diameter

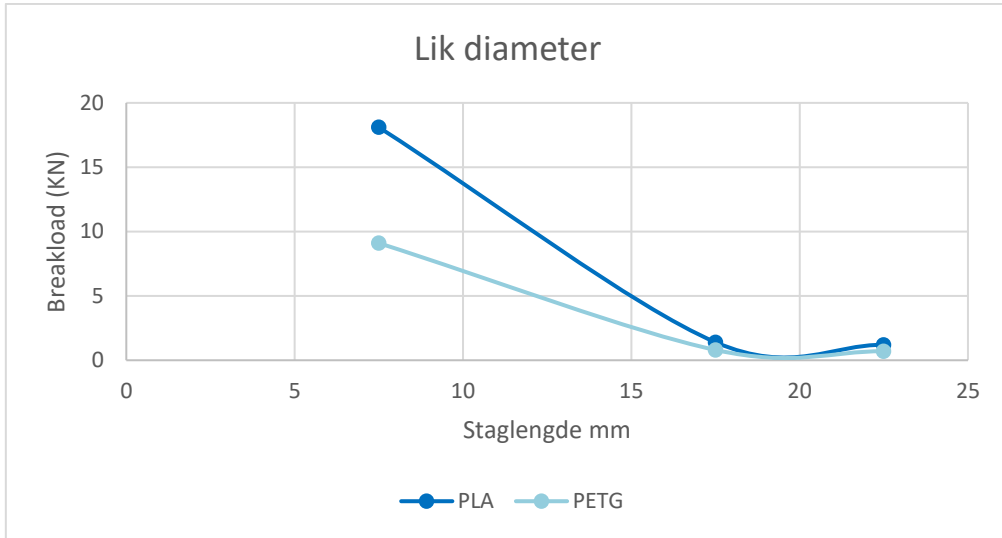
Vi ser i tabell 26 hvor stor bruddlast hver struktur tåler når diameter til stag er lik for alle strukturer. Bruddlasten er markert i farger som kan finnes i figur 24 og figur 25. Vi kan se at et høyere volum gir en høyere bruddlast i figur 24 og at bruddlast blir mindre desto lenger stagene er i figur 25.

Tabell 26 Resultat trykktest 1

Celle	Struktur	Stag lengde (mm)	d stag (mm)	Volum (mm ³)	Weight (g)	Breakload (kN)
PLA 10	Simple Cubic	7,5	2,5	153000	122	18,1
PLA 20	Simple Cubic	17,5	2,5	49460	39	1,4
PLA 25	Simple Cubic	22,5	2,5	34911	41	1,2
PETG 10	Simple Cubic	7,5	2,5	153000	119	9,1
PETG 20	Simple Cubic	17,5	2,5	49460	47	0,8
PETG 25	Simple Cubic	22,5	2,5	34911	41	0,7



Figur 24 Trykkraft etter volum



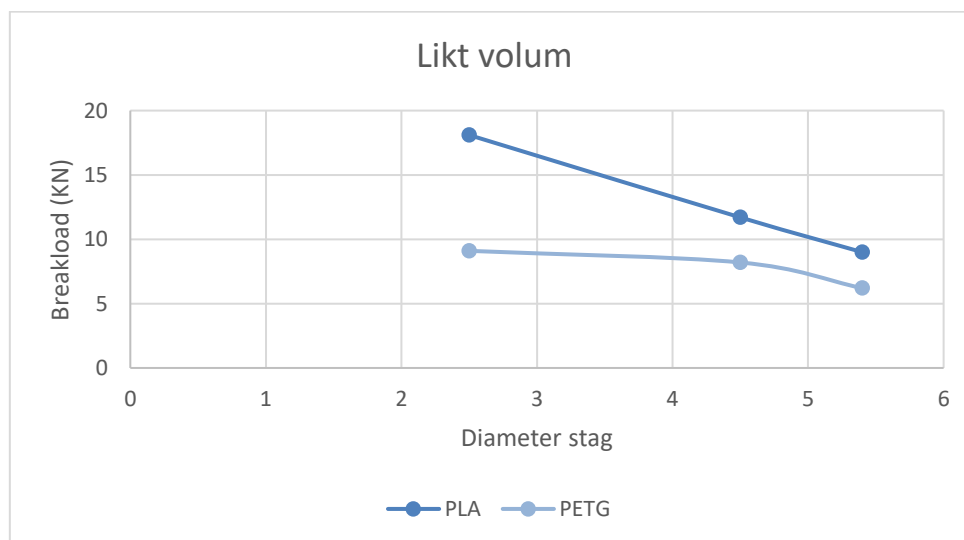
Figur 25 Trykkraft etter staglengde

Test 2: Trykktest med likt volum

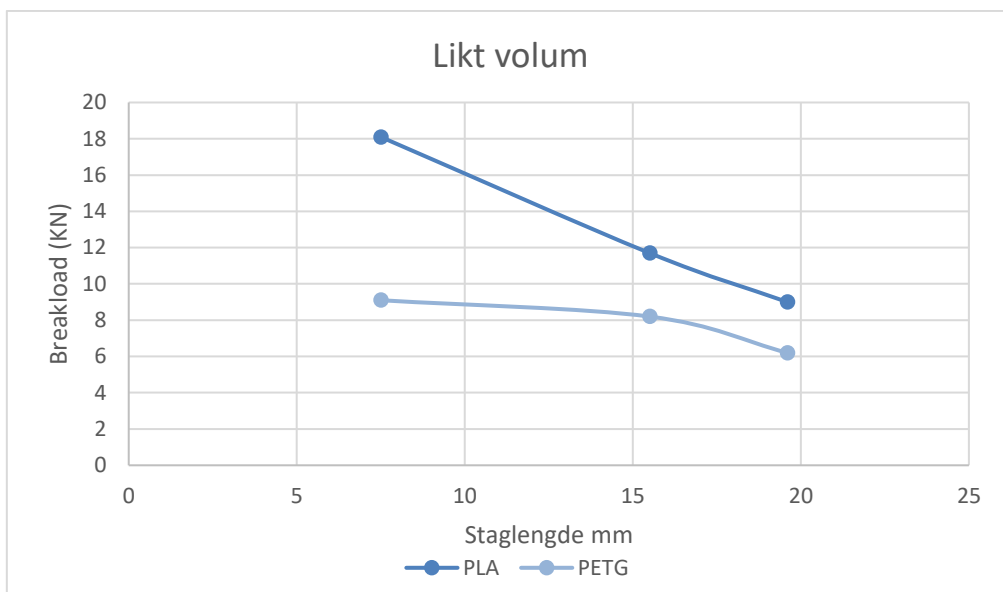
Vi ser i tabell 27 hvor stor bruddlast hver struktur tåler når volum er lik for alle strukturer. Bruddlasten er markert i farger som kan finnes i figur 26 og figur 27. Vi kan se at selv om volumet er likt, er styrken mindre med lenger staglengde som vi ser i figur 27.

Tabell 27 Resultater trykktest 2

Celle	Struktur	Stag lengde (mm)	d stag (mm)	Volum (mm ³)	Weight (g)	Breakload (kN)
PLA 10	Simple Cubic	7,5	2,5	153000	122	18,1
PLA 20	Simple Cubic	15,5	4,5	151140	125	11,7
PLA 25	Simple Cubic	19,6	5,4	152605	121	9
PETG 10	Simple Cubic	7,5	2,5	153000	119	9,1
PETG 20	Simple Cubic	15,5	4,5	151140	133	8,2
PETG 25	Simple Cubic	19,6	5,4	152605	122	6,2



Figur 26 Hvordan trykkraft blir påvirket av diameter til stag



Figur 27 Trykkraft etter staglengde

Test 3 – Trykktest av ulike strukturer

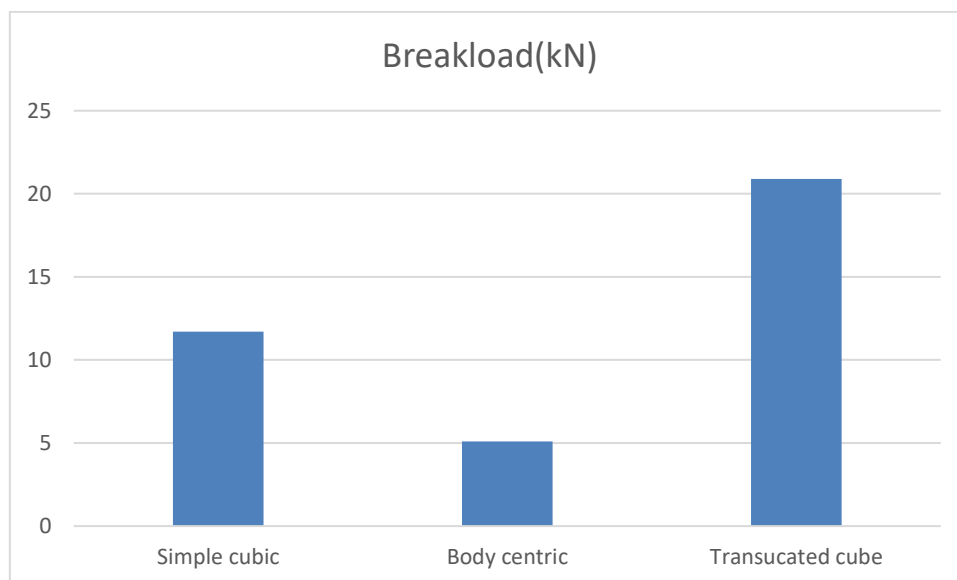
Tabell 28 viser hvor sterke de forskjellige strukturene er sammenlignet med hverandre da alle hadde 20mm celler og 15% volum. Central cubic har skråstilte stag og presterer dårligst.

Simple cubic presterer greit i i testen, men truncated cube er den som presterer best med god margin. Denne figuren har en veldig stabil struktur hvor det er ekstra støtte i knutepunktene.

Denne strukturen tar dog mye lenger tid å printe, som vi kan se i tabell 24 og 25.

Tabell 28 Resultater trykktest 3

Celle	Struktur	Stag lengde (mm)	d stag (mm)	Volum (mm ³)	Weight (g)	Breakload (kN)
PLA 20	Simple cubic	15,5	4,5	151140	125	11,7
PLA 20	Central cubic	16,4	3,6	151140	178	5,1
PLA 20	Truncated cube	-	3,6	152605	145	20,9



Figur 28 Bruddlast for alternative strukturer

5.3 Tester av betong som materiale

Siktetest

$$M_{\max} = \frac{A \cdot \sqrt{d}}{200}$$

A er arealet av den største sikten som blir benyttet i testen i mm²

d er mellomrommet mellom trådene i sikten, i mm.

Teoretisk resultat

$$A = \frac{\pi \cdot 200^2 \cdot \sqrt{8}}{200} = 444,069$$

Praktisk resultat

Mengde sand før siktetest forsøk nr1. 444.06 gram.

Mengde sand før siktetest forsøk nr2. 444,00 gram.

Tabell 29 Resultater siktetest

Siktens trådmellomrom(mm)	Forsøk nr. 1: Masse av sand (g)	Forsøk nr.2: Masse av sand (g)	Forsøk nr. 1: Prosent beholdt	Forsøk nr.2: Prosent beholdt
8	11,56	1.04	2,61 %	0,23%
4	69.94	39.34	15,8 %	8,89%
2	69.97	61.32	15,8 %	13,85%
1	77.11	85.48	17,41 %	19,31%
0,5	79.35	92.39	17,92 %	20,87%
0,25	100.83	121.79	22,77 %	27,51%
0,125	21.41	27.95	4,83 %	6,31%
0,063	12.67	13.35	2,86 %	3,02%

Fuktighetstest i sand

I denne testen er det 499,7 gram sand, som er satt i ovnen for ti minutter. Ovnen er justert til $110^{\circ} \pm 5$ grader. Etter at sanden er tatt ut av ovnen veies den på nytt.

Vekten før tørking 499,7 gram

Vekten etter tørking 498,6 gram

Komprimeringsgrad

$$C = \frac{h}{h-s}$$

$$C = \frac{310}{310-295} = 20,67$$

Utbredningsmål

$$\text{Utbredningsmål} = \frac{d_{\phi/v} + d_{n/s}}{2}$$

$d_{\phi/v}$ er lik 670 mm

$d_{n/s}$ er lik 640 mm

$$\frac{670+640}{2} = 655\text{mm}$$

5.4 Test 4: Trykktest av betong kuber

Oversikt over bruddlast og deformasjon for betongkuber uten armering i tabell 30. I tabell 31 og 32 ser vi at bruddlasten er omtrent 50% bedre i kubene uten armering enn de med armering. Deformasjon er omtrent lik uavhengig om kuben har armering eller ikke.

Tabell 30 Resultater trykktest 4 – Kuber uten armering

Uten armering	Struktur	Breakload kN	Displacement mm
1 U.Arm		579,7	23,12
2.UArm		671,8	21,68
3 U.Arm		625,3	23,37
4.U.Arm		677	23,68
5.U.Arm		678,1	22,18
6.U.Arm		627,1	23,7
Snitt		646,4	23,0
Standardavvik		39,5	0,8
Karakteristisk verdi		603,7	

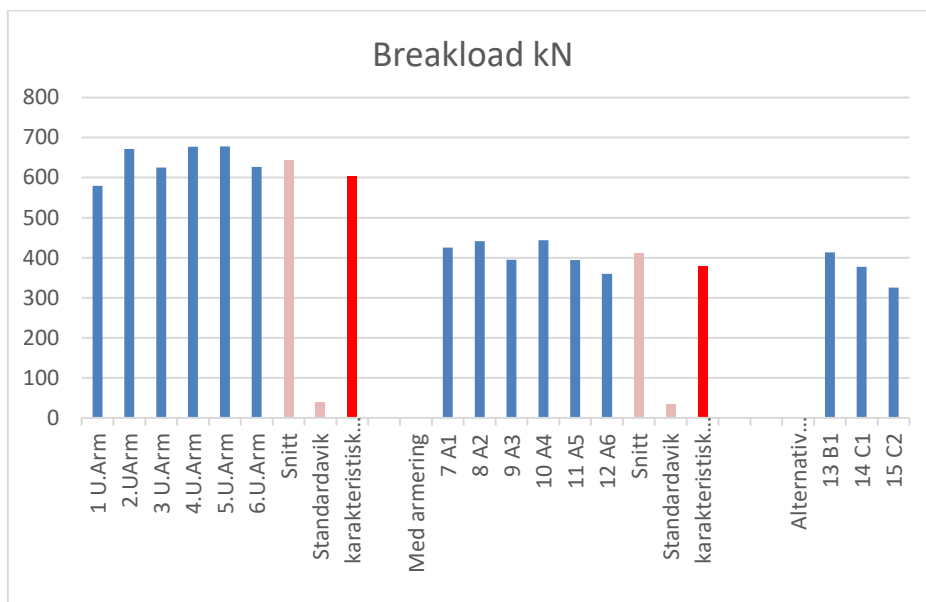
Tabell 31 Resultater trykktest 4 - Kuber med armering

Med armering	Struktur	Breakload kN	Displacement mm
7 A1	Simple Cubic	425,3	22,5
8 A2	Simple Cubic	441,5	22,9
9 A3	Simple Cubic	395,3	23,82
10 A4	Simple Cubic	443,6	22,84
11 A5	Simple Cubic	394,4	22,3
12 A6	Simple Cubic	359,8	22,49
Snitt		410,0	22,8
Standardavvik		32,7	0,5
Karakteristisk verdi		377,3	

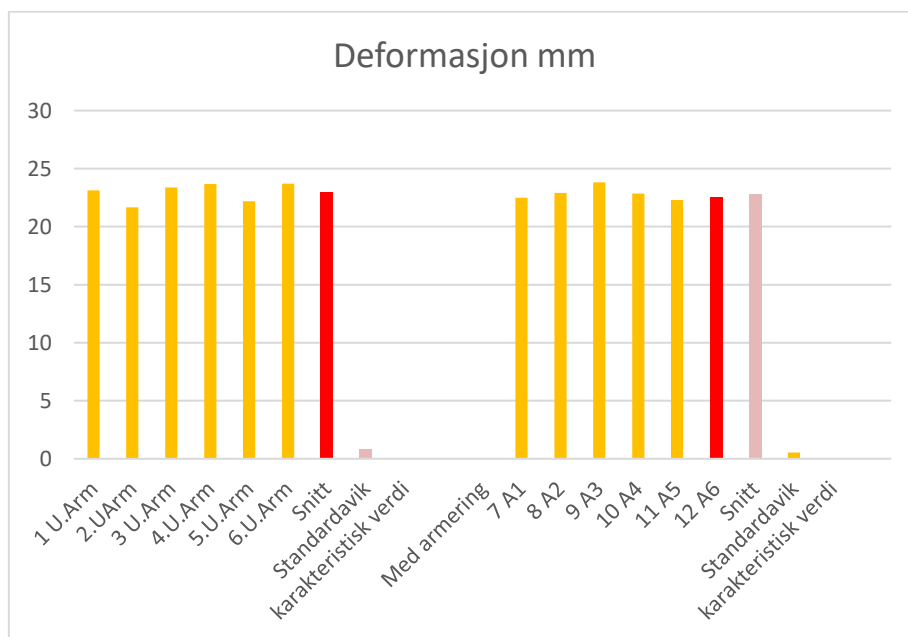
Tabell 32 Resultater trykktest 4 - Kuber med alternativ armering

Alt. Armering	Struktur	Breakload kN	Displacement mm
13 B1	Truncated cubic	413	22,34
14 C1	Body centered cubic	377,4	22,97
15 C2	Body centered cubic	325,6	20,5

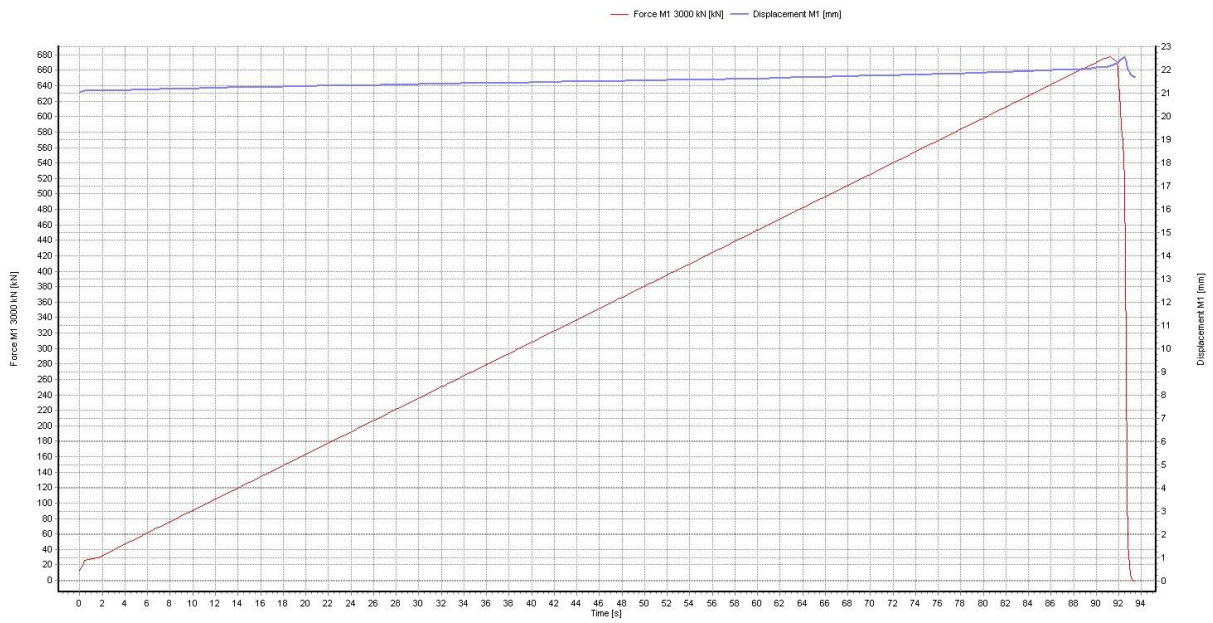
Stolpediagrammer viser hvor stor forskjellen er mellom de forskjellige kubene. Figur 29 viser bruddlast og inkluderer snitt, standardavik og karakteristisk verdi. Vi ser bruddlast er høyere uten armering. Figur 30 viser hvordan deformasjonen er veldig lik for strukturer med og uten armering.



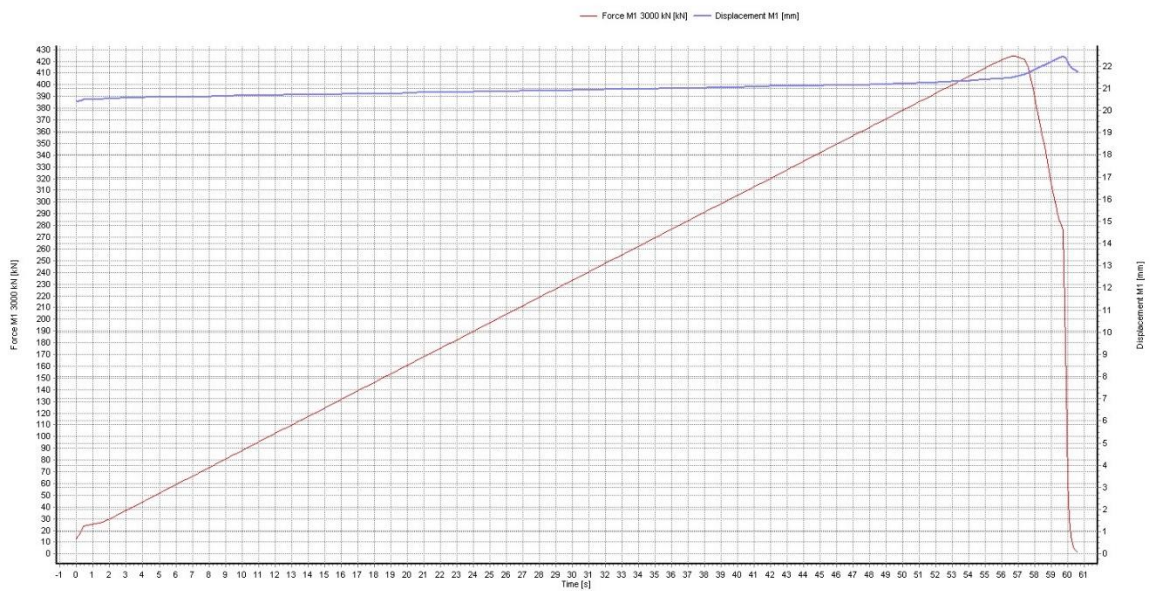
Figur 29 Bruddlast betongkuber fra trykktest 4



Figur 30 Stolpediagram som illustrerer deformasjonen til strukturene fra trykktest 4



Figur 31 Diagram for bruddlast og deformasjon kube uten armering



Figur 32 Diagram for bruddlast og deformasjon kube med armering

Trykkfastheten finner en med følgende formel:

$$F_c = \frac{F}{A_c}$$

Der

F_c er trykkfastheten i MPa(N/mm²)

F er bruddlast i N

A_c er tverrsnitts arealet på prøvelegemet som trykkraften virker mot

Trykkfasthet for kube uten armering

$$\frac{603,7 \cdot 1000}{110 \cdot 110} = 49,9 \text{ MPa}$$

Trykkfasthet for kube med armering

$$\frac{377,3 \cdot 1000}{110 \cdot 110} = 31,2 \text{ MPa}$$

Tabell 33 Betongklasser

Strength classes for concrete														Analytical relation / Explanation	
f_{ck} (MPa)	12	16	20	25	30	35	40	45	50	55	60	70	80	90	
$f_{ck,cube}$ (MPa)	15	20	25	30	37	45	50	55	60	67	75	85	95	105	
f_{cm} (MPa)	20	24	28	33	38	43	48	53	58	63	68	78	88	98	$f_{cm} = f_{ck} + 8$ (MPa)
f_{ctm} (MPa)	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,2	3,5	3,8	4,1	4,2	4,4	4,6	4,8	5,0	$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/60$ $f_{ctm} = 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/60$

For å klassifisere trykkfasthet for kubene ser vi på verdier for $f_{ck,cube}$. Verdien i raden over tilsvarer fasthetsklasse. Kuben uten armering tilsvarer fasthetsklasse B40. Kuben med armering tilsvarer fasthetsklasse B25.

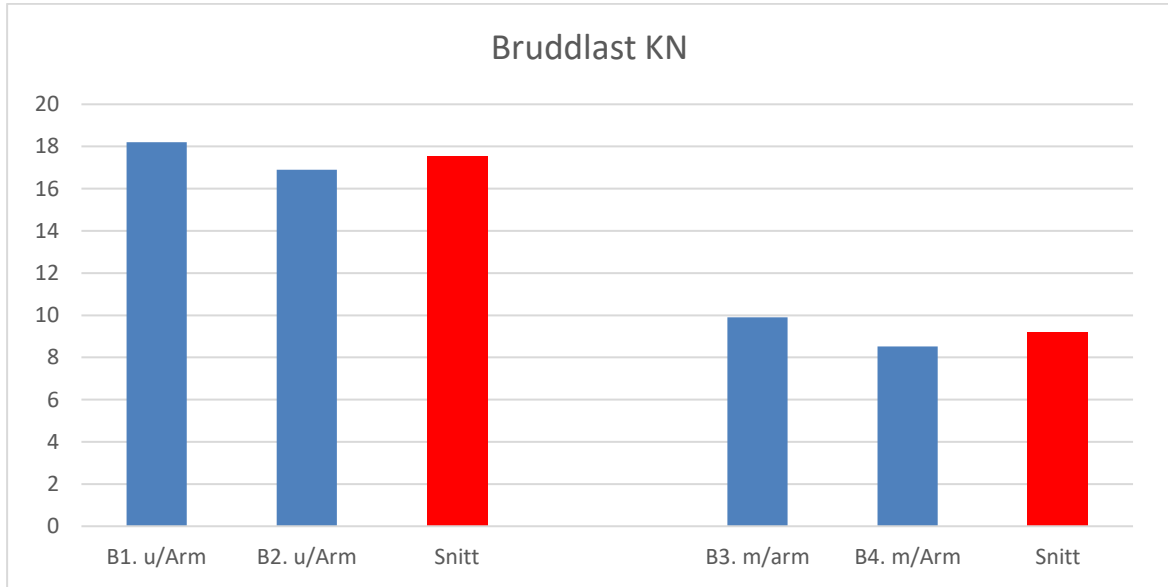
5.5 Test 5: Bøyetest av betongbjelker

Vi ser resultatene for bøyetesten av bjelker med og uten armering i tabell 34. Bjelkene uten armering har omtrent dobbelt så stor bruddlast som de med armering. Det samme gjelder nedbøyning. Figur 33 viser bruddlasten som stolpediagram og figur 34 viser nedbøyningen.

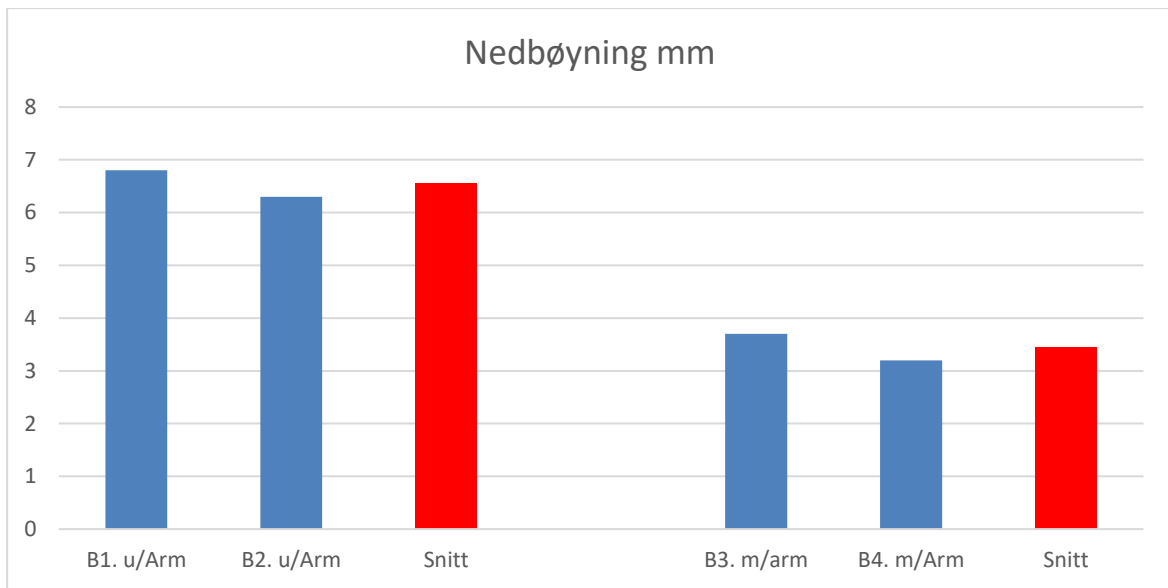
Vi ser i figur 35 at bruddet skjer brått for bjelken uten armering. Bjelken som har armering knekker litt først, før den knekker helt som vi ser i figur 36. Vi ser også at deformasjonen skjer raskere for bjelken uten armering i motsetning til den som ikke har det.

Tabell 34 Resultater bøyetest betongbjelker uten og med armering

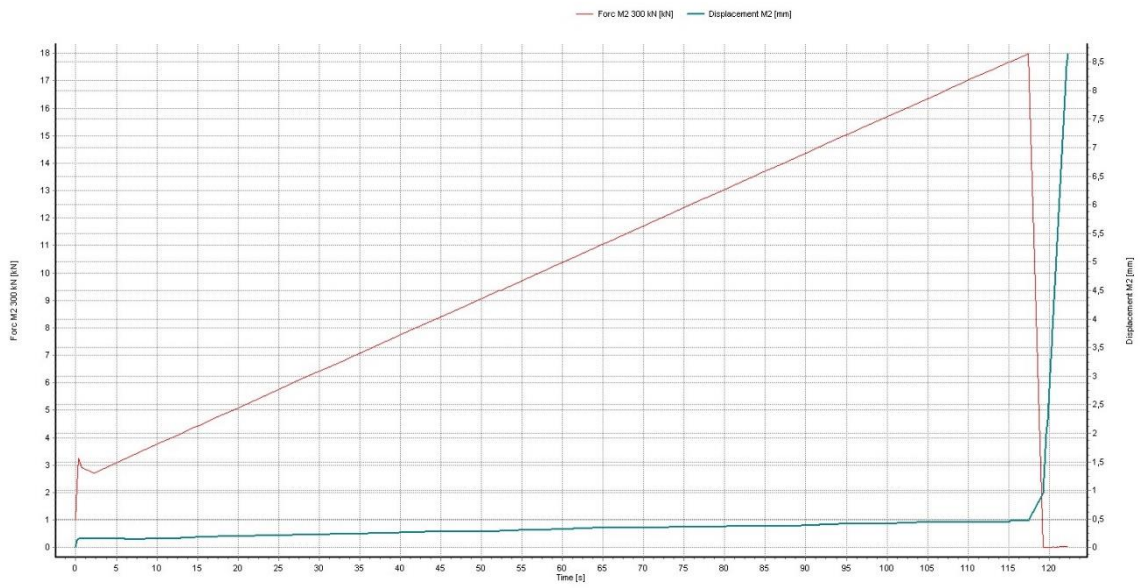
	Størrelse	Bruddlast (kN)	Nedbøyning(mm)
B1. Uten armering	610x110x110	18,2	6,8
B2. Uten armering	610x110x110	16,9	6,3
Snitt		17,55	6,55
B.3 Med armering	610x110x110	9,91	3,7
B.4 Med armering	610x110x110	8,52	3,2
Snitt		9,22	3,45



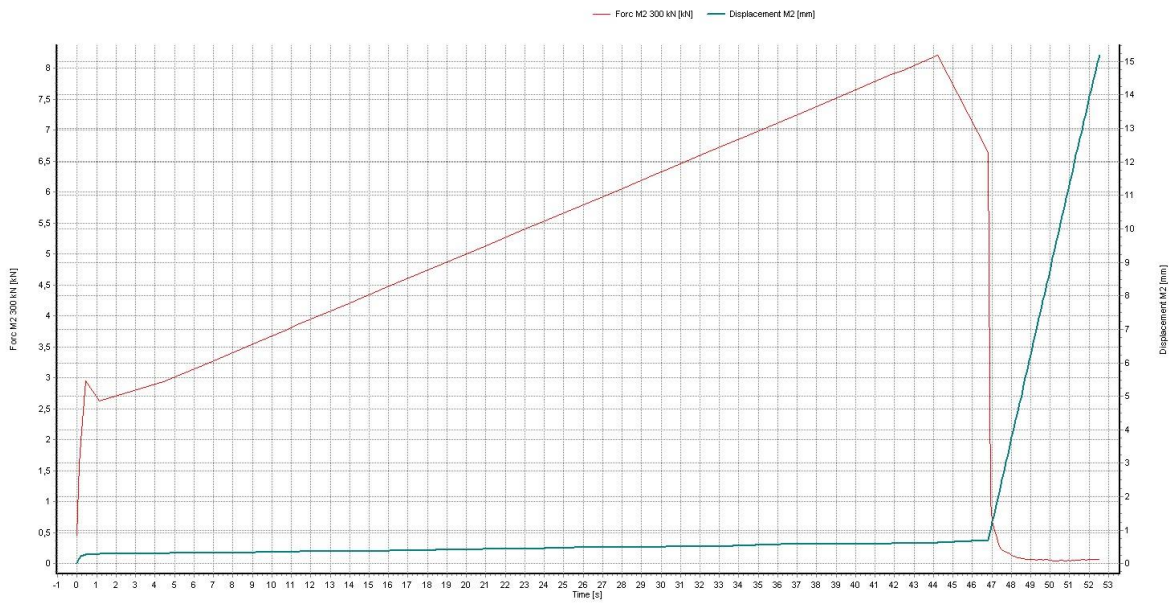
Figur 33 Diagram for bruddlast for bjelker fra test 5



Figur 34 Diagram for nedbøyning av bjelker fra test 5



Figur 35 Diagram for bruddlast og deformasjon bjelke uten armering



Figur 36 Diagram for bruddlast og deformasjon bjelke med armering

$$f_{ct,fl} = \frac{3F \cdot l}{2d_1 \cdot d_2^2}$$

Der:

$f_{ct,fl}$ er bøyestrekkefastheten i MPa (N/mm²)

F er bruddlast i N

l er avstanden mellom de nedre rullene i mm

d_1 og d_2 er tverrsnittets tverrmål i mm

Bjelker uten armering

Bøyestrekkefasthet for bjelke B1

$$\frac{3 \cdot 18,2 \cdot 330}{110 \cdot 110^2} = 6,8 \text{ MPa}$$

Bøyestrekkefasthet for bjelke B2

$$\frac{3 \cdot 16,9 \cdot 330}{110 \cdot 110^2} = 6,3 \text{ MPa}$$

Bjelker med armering

Bøyestrekkefasthet for bjelke B3

$$\frac{3 \cdot 9,91 \cdot 330}{110 \cdot 110^2} = 3,7 \text{ MPa}$$

Bøyestrekkefasthet for bjelke B4

$$\frac{3 \cdot 8,52 \cdot 330}{110 \cdot 110^2} = 3,2 \text{ MPa}$$

6 Diskusjon og analyse

3D-printing som teknologi er et spennende alternativ som kan gi tilpassede løsninger i fremtiden. Per i dag blir teknologien mest brukt for å lage modeller av bygg. Det er ikke brukt mye direkte i bygninger, men mye forskningsarbeid gjøres for å se hvilken bruk og hvilke restriksjoner teknologien kan ha. En av de største fordelene som er listet for 3D-printing er at det hurtig kan gjøres endringer på modellerte deler. Dette vil kanskje være en fordel i forskning-fasen, men det vil være lite rom for å teste ut slik på byggeplassen. Dersom en feil blir gjort kan det ha dramatiske konsekvenser for bygningen og potensielt sette liv i fare. En stor fordel for byggebransjen, som er brukbar, er hvordan man kan designe alternative strukturer, som potensielt kan gi bedre egenskaper enn tradisjonell armering.

6.1 Strukturvalg

Når vi så på potensielle strukturer så valgte vi å se på strukturer med ulike kvaliteter. En enkel struktur, en hvor stagene står skrått i forhold til kraftretninger, og en hvor det er ekstra forsterkning i hvert knutepunkt. «Simple Cubic» var hoved-teststruktur og var enkel å produsere med printeren. De to andre strukturene hadde printeren problemer med å skape, og hadde flere forsøk hvor det var feil i strukturene. Det er vanskelig for printeren å skrive lag på lag skrått oppover da den ikke kan feste stagene i to punkter med en gang. Ved å rette på datapunkter og skrivehastighet fikk vi det til å gå, men det ble en mer langsom prosess. På bakgrunn av at dette ble en lenger og mer komplisert prosess valgte vi «Simple Cubic» for bøyetesten også. Vi planla å printe bjelker for de to andre strukturene for å kunne kjøre bøyetest der, før vi støpte strukturene i betong. Det ble dessverre knapp tid grunnet korona, og med mange feilmarginer i print-prosessen valgte vi å se bort fra bøyetest for bjelker med disse strukturene.

6.1.1 Trykktester 1-3

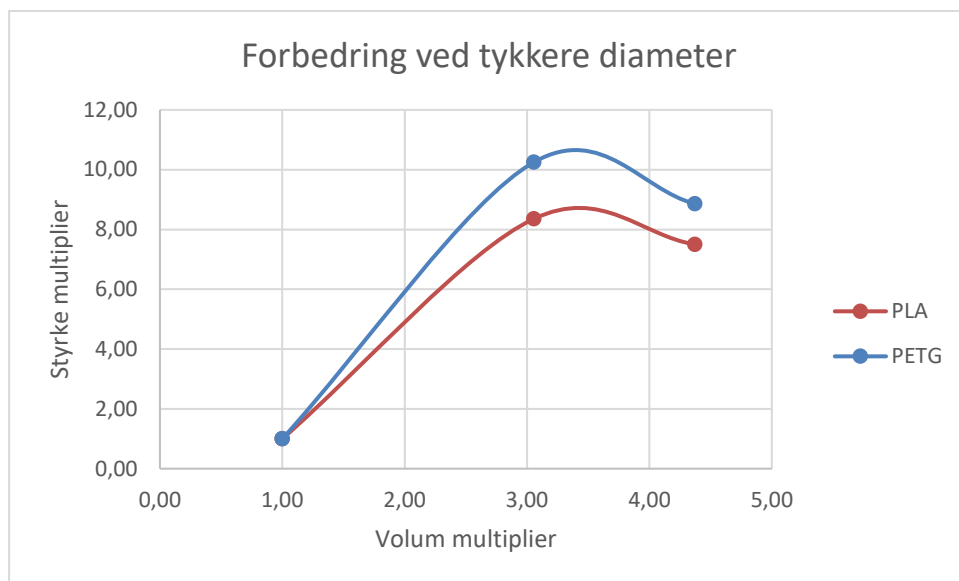
I testene så vi på hvordan forskjellige variabler ville påvirket egenskapene til armeringen. I test en og to ser vi på hvordan volum og stag-tykkelse påvirker strukturene etter hvilken cellestørrelse og materialet som er brukt. I test tre sammenligner vi hvordan selve strukturen påvirker egenskapene etter vi har valgt cellestørrelse og materiale.

I test 1 setter vi en fast diameter, som betyr at volumet varierer mellom testobjektene. Det vi ser er at det er stor forskjell på hvor stort trykk strukturen kan tåle fra 10mm celler til 20mm, uavhengig av materialet. Ettersom trykkraften blir tatt opp av de vertikale stagene velger vi å se på hvor mye hvert stag tåler. Vi ser at stagene som har mindre volum har mye lettere for å knekke. Vi ser også at PLA har omtrent dobbelt så gode trykkegenskaper som PETG.

I test 2 satte vi volumet til strukturene lik hverandre. Det betyr at diameter og staglengde er det som vil påvirke resultatene. Vi ser at med en tykkere diameter tåler strukturene flere ganger større kraft enn de gjorde når alle hadde 2,5 i diameter. Unntaket er de med 10mm cellestørrelse som også hadde 15% volum i test 1. Vi ser at en økning av volum/diameter har stor effekt, og at styrken øker mange ganger mer enn økningen av volum som vi ser i tabell 35. Selv om volumet er likt, tåler strukturene betraktelig mer med kortere staglengder.

Tabell 35 Forhold mellom økning av volum og styrke i strukturene

	Volum test 1 (mm ³)	Volum test 2 (mm ³)	Forhold 2/1	Styrke test 1 (kN)	Styrke test 2 (kN)	Forhold 2/1
PLA 10	153000	153000	1,00	18,1	18,1	1,00
PLA 20	49460	151140	3,06	1,4	11,7	8,36
PLA 25	34911	152605	4,37	1,2	9	7,50
PETG 10	153000	153000	1,00	9,1	9,1	1,00
PETG 20	49460	151140	3,06	0,8	8,2	10,25
PETG 25	34911	152605	4,37	0,7	6,2	8,86



Figur 37 linjediagram som viser at en økning av volum gir økt kapasitet

Formel for kneklengde er:

$$P_k = \pi^2 \frac{EI}{L_k^2}$$

Der:

P_k er knekklasten

E er elasitetsmodulen til materialet

I er stavens treghetsmoment

L_k er stavens effektive kneklengde, den varierer med hvordan staven er festet.

- I denne strukturen er stagene festet i begge ender, så $L_k = 0,5L$

(«Knekking» 2021)

Tregghetsmomentet for et sirkulært tverrsnitt er:

$$I = \frac{\pi D^4}{64}$$

Der D er diameteren til tverrsnittet. («Det annet arealmoment» 2018)

Formelen for knekk lengde har variabler for elastisitetsmodulen, diameter og lengden til staget. Dersom vi sammenligner strukturer med likt materiale vil elastisitetsmodulen være lik i tilfellene og ikke være en påvirkende faktor, da gjenstår kun diameter og lengde. Når diameteren økes, øker den også i de horisontale stagene. Det gjør at selv om volumet øker vil ikke hele økningen gå direkte til å ta imot trykkraften. Lengden vil derfor være en mer bestemmende faktor for hvor mye strukturene tåler.

PETG har en lavere elastisitetsmodul som vi ser i Tabell 2. Dette gjør at stagets diameter får større betydning for hvor mye trykk det tåler.

6.1.2 Trykktest 4 og bøyetest 5 av betong

Når vi ser på resultatene fra trykktesten på betong ser vi at den uarmerte betongen leverer et omtrent 50% bedre resultat enn hva de armerte gjør. Betong har veldig gode trykkeegenskaper, det er derfor ikke overaskende at den kan levere bedre resultater uten armeringen. Armeringen har en glatt overflate som kan medføre at betongen ikke klarer å feste seg godt nok til den. Det kan også tenke seg at på grunn av for små cellediameterer kan betongen lettere knekke fra innsiden når det skjer deformasjoner i strukturen. Vi ser at uavhengig av hvilken struktur, er resultatene for bruddlast på trykktest rundt 400 kN, der de alternative strukturene ligger litt under 400 kN. Betongkubene uten armering hadde omkring 600kN i bruddlast. Det som kommer frem som en fordel under trykktesten er at armeringen hjelper med å holde betongen samlet når den når knekkpunktet. Kubene uten armering faller mer fra hverandre.

I bøyetesten ser vi et liknende resultat. Bjelken med armering har ca. halvparten så god strekkapasitet som den uarmerte betongen. Det er et svært skuffende resultat, da betong er kjent for å ha dårlig strekkfasthet. Strukturen har en ganske tett bygning som medfører at strukturen er stabil og får minimalt med deformasjon før den knekker. Det er lite gunstig når meningen med armeringen er å dekke for de egenskapene som betongen ikke dekker for. For å kunne oppnå et bedre resultat kunne en større cellestruktur vært et alternativ. Det kan også tenkes at et materiale som er mer fleksibelt kunne vært relevant å teste. Dessverre kunne ikke printerene vi hadde tilgjengelig printe større enn 25mm celler da det blir for lang avstand mellom vertikale stagene, som ville medført nedbøying på de horisontale stagene.

Vi ser fra litteraturstudier at betong med glassfibre gir tilnærmet null forbedring i trykkeegenskaper, men gir bedre strekkeegenskaper. Bedre strekkeegenskaper er det viktigste da det er et punkt som betong har en stor svakhet for. Det er usikkert hvor godt en slik fiberblanding vil fungere i praksis. Dersom det ikke blandes godt nok kan det oppstå opphopninger av glassfibre noen steder i betongen mens andre steder kan det være lite og dermed skape svake punkter. Det som kan noteres fra studien er at maksinnholdet av fibre i denne blandingen var 1% glassfiber, og det var med 1% innhold at det kom merkbart bedre resultater. Det viser at forsterkning som ikke tar opp for mye av det totale volumet kan gi bedre resultater for strekkapasitet.

Det kan være interessant å se på armerings-strukturer som har større cellestørrelser som tillater mer bøyelighet i strukturen. Det anbefales derfor å se på strukturer som utgjør maks 5% av volumet til det som armeres. I denne studien ble det kun sett på strukturer med 15% volum. Det kan være utfordrende å skape strukturer med så mye luftvolum, men det kan kanskje være mulig om strukturene printes i flere deler, slik at man slipper så mye overheng og «broer» i strukturen. Dette gir også muligheten til å ta mer hensyn til printe-retning som kan gi en mer holdbar struktur hvor lagene sitter bedre sammen.

6.2 Materialvalg

6.2.1 Plaster

Med plastene som ble brukt oppnådde ikke vi gode nok resultater. Vi ser det at betongen og plasten har veldig like egenskaper, men plasten gjør betongen totalt dårligere selv om vi kunne lage strukturen slik vi ønsket. Materialet i sammenheng med strukturen som er satt gir et dårlig utgangspunkt for strekkeegenskaper. Det er noe som burde tas til betraktning tidligere i testingen om det er mulig. Resultatene vi fikk var dårligere for både trykk og strekktestene, men det ga noen fordeler i at det holdt betongen mer samlet. Når vi ser på bøyetesten skjer ikke knekket like fort, da det først blir strekk og deformasjon i plasten før den faller fra hverandre. Selv om selve knekket tok lenger tid, var det til en mye lavere styrke.

PETG har dårlige «broegenskaper» og kan lett få nedbøyninger i printeprosessen den vil ikke være et godt materiale dersom vi hadde brukt større cellestørrelser. Allerede når cellestørrelsene oversteg 15mm ble dette en bekymring. PETG krever mer varme enn PLA i printeprosessen. På grunn av dette var vi nødt til å sette en glassboks rundt printeren slik at den vedlikeholdt denne varmen. Printeprosessen var dermed mer avansert når vi brukte PETG som materiale, og dette skapte også unøyaktigheter i flere av strukturene vi printet. Disse unøyaktighetene inkluderer ujevnheter i overflatene og stag som ble knekt i selve printeprosessen. PLA har en høyere elastisitetsmodul enn PETG, som er mer gunstig til hva vi ønsket å oppnå. Når vi ser på formel for knekkklengde ser vi at en høyere elastisitetsmodul øker trykkapasiteten, som forklarer hvorfor vi oppnådde bedre resultater for PLA under trykktest. På bakgrunn av dette valgte vi å bruke dette materialet videre inn i test 3, 4 og 5.

De printerne som var tilgjengelig på labben var egnet for printing av plastikk og eventuelle plastfibre. Det kan tenke seg at om det hadde vært en printer tilgjengelig som kunne brukt fibertyper eller jern som materiale, kunne det vært mulig å oppnå bedre egenskaper og resultater gjennom det.

6.2.2 Betong

På bakgrunn av strukturen vår ble det en del begrensninger i hvordan vi kunne blande sammen betongen. I testene våre så vi på strukturer for 10, 20 og 25mm som cellestørrelser. Selv om 10mm som cellestørrelse ga betraktelig bedre verdier på trykktestene ville ikke denne strukturen være relevant å bruke ettersom det blir for liten i forhold til kornstørrelsen. På cellene med 10mm cellestørrelse inkluderer det størrelsen til stagene, i realiteten betyr dette at luftrommet mellom stagene er 7,5x7,5mm. Det betyr at selv den minste kornstørrelsen på 8mm ville fått problemer under støpe-prosessen. Vi valgte å gå videre med cellestørrelse 20mm og 4,5 som diameter på stagene. Det betyr at hver celle ville hatt åpning på 15,5x15,5mm, som gjorde at vi ikke kunne bruke en større kornstørrelse som 8-16mm. Det kunne vært smartere å velge en større cellestørrelse som 25x25 med 5,4mm i diameter. Da hadde åpningen vært 19,6x19,6mm, men selv dette kunne vært problematisk da det ikke er stor forskjell mellom sandkornene og åpningen. Det kunne dermed skapt luftrom om deler satt seg fast i strukturen. Totalt sett ville en struktur som for eksempel var 50x50mm i cellestørrelse gitt mange flere muligheter, og kunne tillat for kornstørrelser til og med 24mm. Dessverre var ikke printeren vi hadde tilgjengelig i stand til å printe så store celler med så lange «broer» mellom de vertikale stagene uten at nedbøyning og knekking ville skje.

Som det er konkludert i litteraturstudien fra vegvesenet kan tilslag med 8-16 i kornstørrelse gi 38% bedre trykkfasthet og 40% bedre Emodul når masseforholdet var 0,59 mellom tilslagene. Det viser at dersom vi kunne blandet betong med variasjon i tilslaget kunne vi oppnådd betraktelig bedre resultater med det. Dette hadde krevd en større cellestruktur som vi ikke hadde mulighet til.

Betongen var veldig flytende i konsistensen, som var en egenskap vi ønsket. Ettersom strukturen var så tett var det en fordel at betongen var flytende og lett kunne dekke inn i hulrommene. Når vi gjorde synkmål rant blandingen utover underflaten og ble helt flat. Vi fikk da et synkmål på 295mm kontra 200-220mm som er vanlig for vegg/gulv. Utbredningsmålet ble 655mm, som normalt ligger på 550mm for gulv.

Vanligvis vil en betong med så mye vann i seg få dårligere trykk og strekkfasthet, men siden vi hadde høy andel sement i blandingen fikk den svært gode egenskaper. Betongen som ble blandet har betongklasse B40, som er langt over det vanlige for bygninger som er B20-B30. Uten armering så fikk den også gode nok egenskaper for strekkfastheten. Med armering synker resultatene til det som skulle tilsvart B25 for både trykk og strekk. Det faktum at verdiene synker, selv for strekk, er skuffende og gjør dette til en lite brukbar løsning. Det er ikke bare fordi egenskapene blir dårligere med armering, men også fordi blandingen har så stor sementholdning i seg med 96,2% av blandingen. Sement er et materiale som forurenser mye når det produseres, som er hovedgrunnen for at det brukes mye tilslag i vanlige blandinger. Dersom en kunne resirkulert plast og brukt det som armering kunne en argumentert mer for dette som en løsning, men selv da er totalen negativ for miljøet og sikkerheten til andre.

7 Konklusjon

Mulighetene for 3D-printing er uendelige. Å kunne skape strukturer som er tilpasset for hva enn bruksområdet er kan endre hele byggebransjen. Teknologien er fremdeles i startfasen av hva som kan være mulig, men utviklingen går fort. Under denne studien kom det frem at det er noen viktige faktorer som påvirker hvordan resultatet blir. Strukturen er svært viktig da det setter basen og bestemmer hvilke valg som er mulige videre. Materialet er viktig i den forstand at en ønsker materialer som komplimenterer egenskapene til betong godt.

Strukturen kan designes slik den er ønsket, men vil ha noen begrensninger basert på hvilken printer og hvile materiale en bruker. 3D-printere generelt kan slite med overheng og broer som lett kan skape problemer i strukturen. Det kan være en mulighet å se på strukturer som er laget i flere deler. Studien omfattet hovedsakelig strukturer som utgjorde 15% av totalvolumet, i videre studier vil det være anbefalt å se på muligheten til å skape armering som utgjør <5% av totalvolum. Når strukturene blir laget i en del kan strukturene ofte bli for tette, som setter mange begrensninger på hva vi kan gjøre rundt strukturene. Betongen må ha en liten kornstørrelse og være svært flytende for å kunne tette hele strukturen med betong. Større kornstørrelser som tilslag har vist å gi bedre trykk og strekk egenskaper for betongen. Ettersom vi ikke kunne benytte det var vi nødt til å kompensere med høy mengde sement, som er lite gunstig da det er dårlig for miljøet og lite kosteffektivt. Strukturen blir også svært stiv og stabil, som virker negativt når bøyelighet er det som er ønsket egenskap.

Hardplaster er ikke et materiale som er godt egnet for denne bruken. Materialets egenskaper er for like, og dessverre dårligere enn betongen til tross for at vi kunne lage strukturen selv. Materialer som er mer fleksible vil være bedre egnet for et slik bruksområde. Til videre studier vil det være anbefalt å se på andre materialer som jern eller fiberblandinger. Til tross for lite optimale resultater er vi optimistiske til nytten av 3D-printing som teknologi, og har troen på at det kan bringe frem spennende muligheter og løsninger gjennom dypere forskning.

Litteraturliste

«3DP Configurator». Åpnet 18. mai 2021.

https://theconfig.com/PCM/Configurator/Config.aspx?InstanceID=PBC&AppID=PBCApp&HeaderID=Online&ConfigurationID=62E1DB1F6F&PageTitle=3DP%20Configurator&NameSpace=b&Ruleset=3dprinter&Profile=3DP.Guest&cfgid=62E1DB1F6F&RedirectUrl=https%3A%2F%2Ftheconfig.com%2Fexternal%2Fdefault.aspx%3Fc%3D3%26cfgid%3D62E1DB1F6F&test=true&mkto_token=_mch-3dplatform.com-1621346118480-61300

«Betong». 2017. I *Wikipedia*.

<https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Betong&oldid=18020018>.

«Det annet arealmoment». 2018. I *Wikipedia*.

https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Det_annot_arealmoment&oldid=18871098.

Dizon, John Ryan, Alejandro Espera, Qiyi Chen, og Rigoberto Advincola. 2017. «Mechanical Characterization of 3D-Printed Polymers». *Additive Manufacturing 20* (desember).

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.12.002>.

«Knekkning». 2021. I *Wikipedia*.

<https://no.wikipedia.org/w/index.php?title=Knekkning&oldid=21167427>.

«Konsistens; synkmål, vebetall og utbredningsmål». Åpnet 27. april 2021.

https://www.vegvesen.no/s/vegnormaler/hb/014/Kvalitetsikrede%20filer/14_6_Betong_og_matr_til_betong/14_62_Undsok_av_fersk_betong/014_622_konsistens_apr_05.pdf.

«NS-EN 933-1:2012». Åpnet 16. mai 2021.

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=524953>.

«NS-EN 12350-3:2019». Åpnet 16. mai 2021.

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1104970>.

«NS-EN 12390-3:2019». Åpnet 16. mai 2021.

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1107001>.

«NS-EN 12390-5:2019». Åpnet 16. mai 2021.

<https://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=1096944>.

«Original Prusa I3 MK3S 3D Printer». Prusa Research. Åpnet 16. mai 2021.

<https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/181-original-prusa-i3-mk3s-3d-printer.html>.

«Original Prusa MINI+». Prusa Research. Åpnet 19. mai 2021.
<https://shop.prusa3d.com/en/3d-printers/994-original-prusa-mini.html>.

Panda, Biranchi, Suvash Paul, og M.J. Tan. 2017. «Anisotropic mechanical performance of 3D printed fiber reinforced sustainable construction material». *Materials Letters* 209 (juli).
<https://doi.org/10.1016/j.matlet.2017.07.123>.

«Prusament PETG | Prusament». Åpnet 17. mai 2021.
<https://prusament.com/materials/prusament-petg/>.

«Prusament PLA Jet Black 1kg - Prusa Research». Åpnet 17. mai 2021.
<https://shop.prusa3d.com/en/prusament/959-prusament-pla-jet-black-1kg.html>.

Song, Y., Y. Li, W. Song, K. Yee, K. -Y. Lee, og V. L. Tagarielli. 2017. «Measurements of the Mechanical Response of Unidirectional 3D-Printed PLA». *Materials & Design* 123 (juni): 154–64. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.051>.

«Standardsement FA». Åpnet 16. mai 2021. https://www.norcem.no/no/Standard_FA.

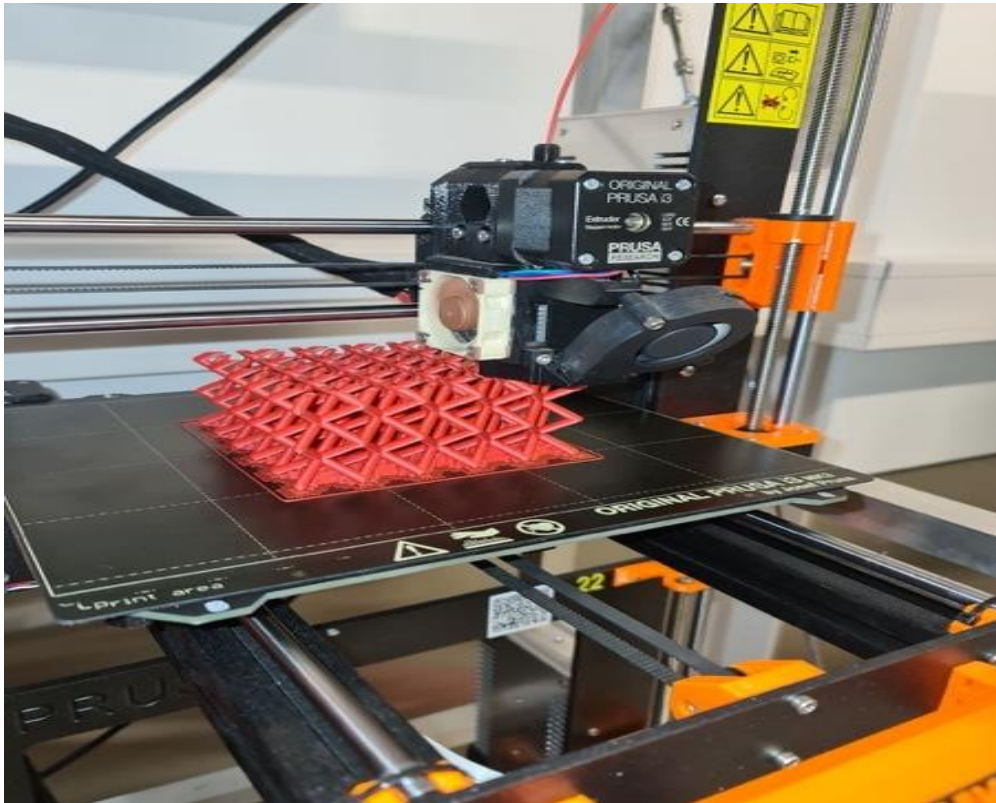
Vegvesenet. 2019. «Effekt av tilslag på betongens mekaniske egenskaper».
<https://vegvesen.brage.unit.no/vegvesen-xmlui/bitstream/handle/11250/2580688/Effekt%20av%20tilslag%20p%C3%A5%20betongens%20mekaniske%20egenskaper%20SVV%20rapport%20181%20%2811%20MB%29.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

«What Are the Advantages and Disadvantages of 3D Printing?» Åpnet 15. mars 2021.
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/pros-and-cons.aspx>.

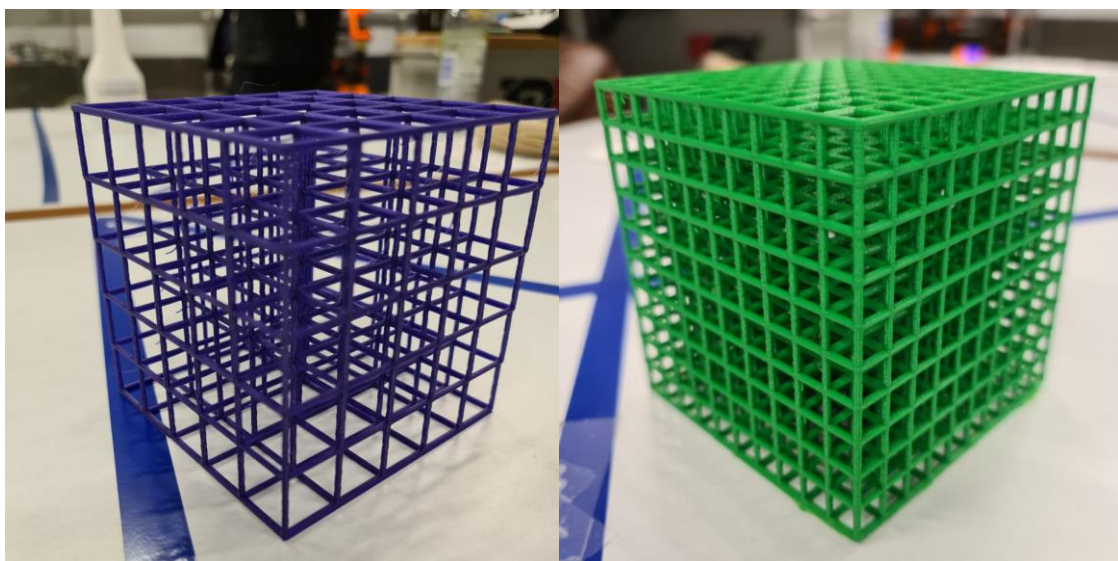
«What Is 3D Printing? - Technology Definition and Types». Åpnet 15. mars 2021.
<https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-3d-printing/home.aspx>.

Vedlegg

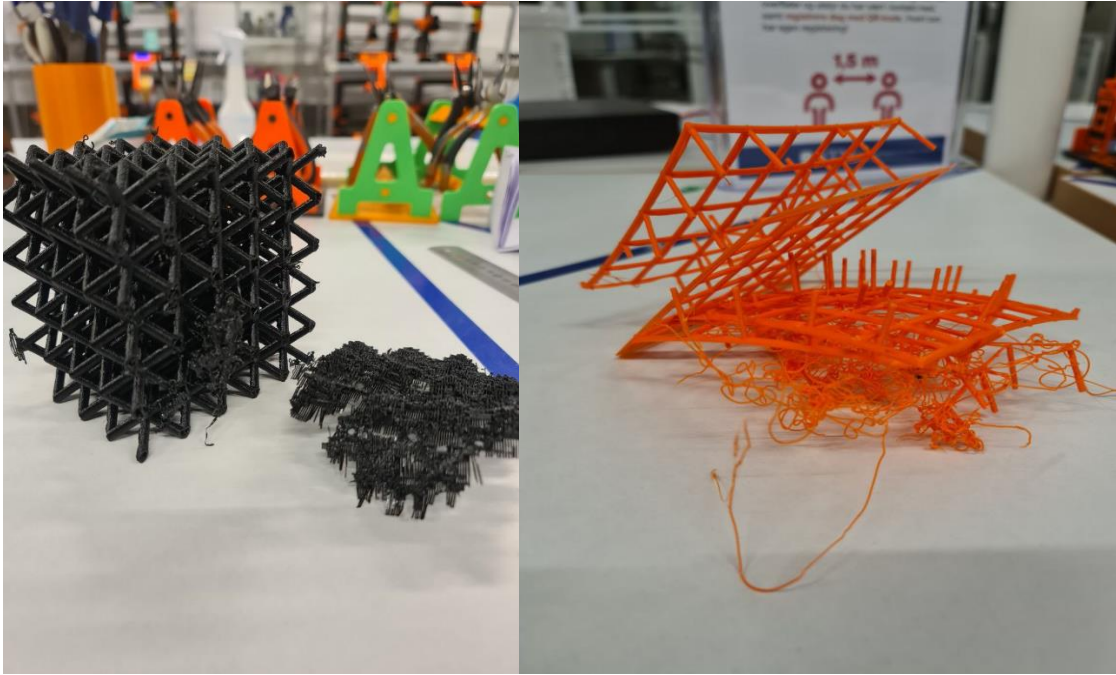
3D-print maskin MK3



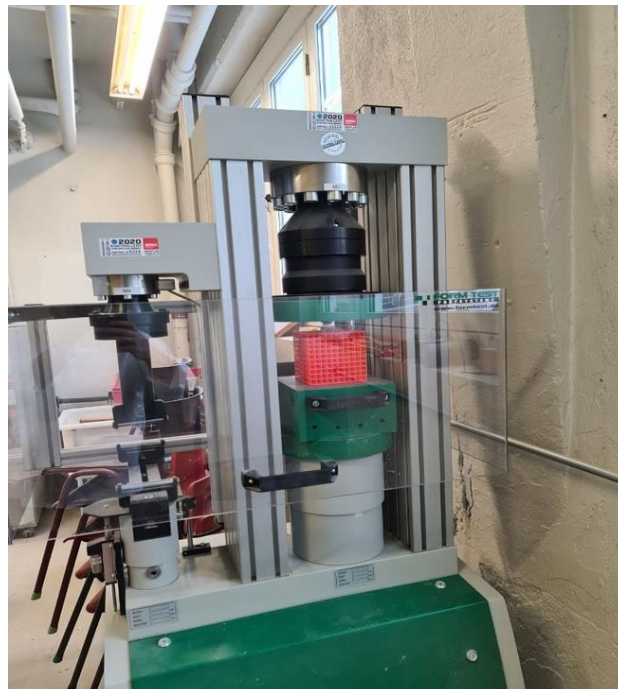
Struktur Simple cubic fra test 1



Avvik i print-prosess



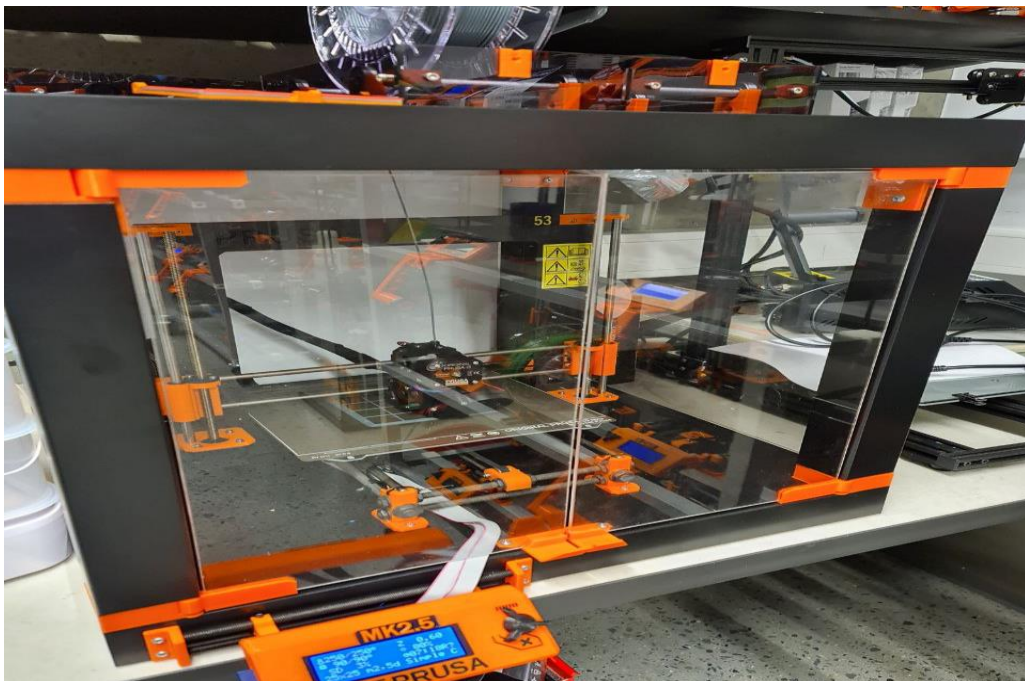
Trykktest for simple cubic struktur



Før og etter trykktest



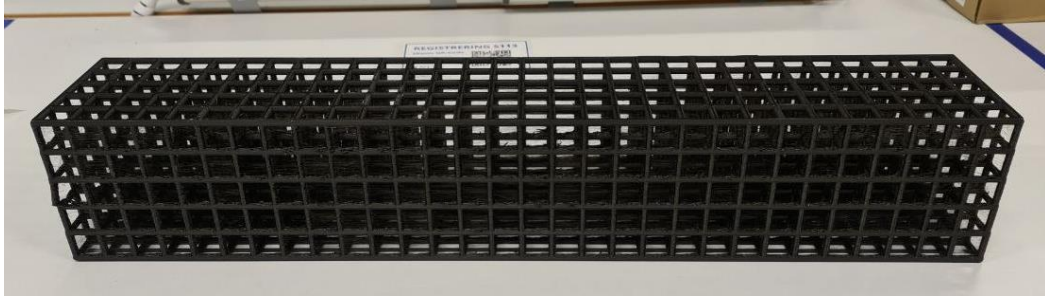
Printing av PETG ble utført med glassboks rundt



Maskin som er brukt for å blande betong



3D-printet armering som skal brukes som forsterkning i betongbjelke.



Etter støpning:



Etter bøye test:

