



## En sammenligning av komprimerende styrke til to ulike infill-mønstre i 3D-printede rektangulære prismer

Forfatter: Sigbjørn Sandberg Nedland, Elvebakken videregående skole

*Denne studien undersøker hvordan infill-mønster og infill-prosent påvirker aksial kompresjonsstyrke i FDM-printede rektangulære prismatiske prøver i PLA. Honeycomb- og gyroid-infill ble testet og ble sammenlignet systematisk i intervallet 5%–25 %. Aksial kompresjon ble utført til brudd eller permanent deformasjon, og maksimal registrert last (topplast) ble brukt som mål på bæreevne. Resultatene viser at honeycomb gir signifikant høyere kompresjonsstyrke enn gyroid ved infill-nivåer  $\geq 10\%$ , med svært store effektstørrelser. Ved 5 % infill ble ingen signifikant forskjell observert. For begge mønstre økte topplast tilnærmet lineært med infill, med brattere stigning for honeycomb. Studien bekrefter at valg av infill-topologi har stor praktisk betydning for mekanisk ytelse ved aksial belastning.*

### Introduksjon

I additiv produksjon ved FDM bestemmes mekaniske egenskaper ikke bare av materialvalget, men i stor grad av komponentenes indre geometri. Infill-mønster og infill-prosent styrer materialfordelingen i volumet og påvirker dermed styrke, stivhet og vekt. For å gjøre informerte designvalg er det nødvendig med systematisk dokumentasjon av hvordan ulike infillstrukturer responderer under mekanisk belastning.

Teori for cellulære materialer skiller mellom to fundamentalt ulike kompresjonsmodi (Gibson & Ashby, 1997). Under ut-av-planet-kompresjon påføres lasten vinkelrett på cellestrukturens plan, altså gjennom tykkelsen på strukturen. Celleveggene belastes da hovedsakelig i ren aksial trykk, og kompresjonsstyrken øker lineært med relativ tetthet: \*. Det motsatte er i-planet-kompresjon, hvor lasten påføres parallelt med strukturens plan, slik at celleveggene i større grad bøyes sideveis i stedet for å komprimeres direkte. Her dominerer veggebøyning, og styrken følger en potenslov med eksponent . Denne distinksjonen er viktig for tolkningen av denne studien: infillmønsteret printes i XY-planet og lasten påføres i Z-retningen. I FDM-printing av honeycomb akkumuleres de heksagonale celleveggene vertikalt i Z-retningen lag for lag, slik at de danner kontinuerlige søyler parallelt med lastretningen. Honeycomb befinner seg dermed i ut-av-planet-regimet og predikeres å vise lineær styrkeøkning med relativ tetthet. Gyroid tilhører gruppen triply periodic minimal surfaces (TPMS) og utgjør et kontinuerlig tredimensjonalt nettverk uten diskrete plane vegger i én bestemt retning. Under aksial last fordeles kraften over bøyning og skjær i den krumme overflategeometrien, og den mekaniske responsen er sterk avhengig av lastretning og relativ tetthet (Maskery et al., 2017).

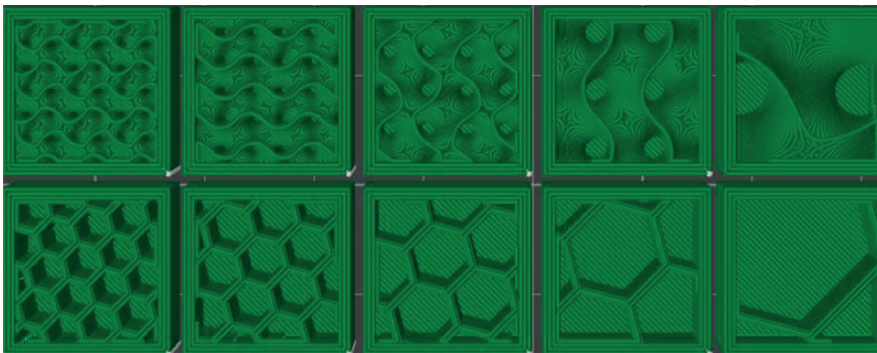
Tidligere forskning på FDM-printede deler viser at honeycomb-infill gir høyere mekaniske egenskaper enn gyroid ved lik infill-prosent i PLA (Eryildiz, 2021). Komparative studier av kompresjonsstyrke bekrefter videre at 2D-infillmønstre generelt presterer bedre enn 3D-mønstre under aksial trykkbelastning, og at dette mønsteret er robust **på tvers av geometrier og infill-nivåer** (Lazaridou et al., 2025). Printinnstillinger som lagretning og lagbindingskvalitet påvirker dessuten mekanisk ytelse i FDM-produserte deler (Ahn et al., 2002). Det er dokumentert god overensstemmelse mellom Gibson og Ashbys prediksjoner og eksperimentelle resultater for additiv-produserte gitterstrukturer, men overførbarheten til lavtetthets FDM-infill i PLA er mindre undersøkt.

Nullhypotese (0): Det er ingen statistisk signifikant forskjell i gjennomsnittlig aksial kompresjonsstyrke mellom honeycomb- og gyroid-infill ved noen av de testede infill-nivåene (5 %, 10 %, 15 %, 20 % og 25 %).

Alternativhypotese (1): Det er en statistisk signifikant forskjell mellom de to mønstrene ved ett eller flere av de testede infill-nivåene.

## Metode

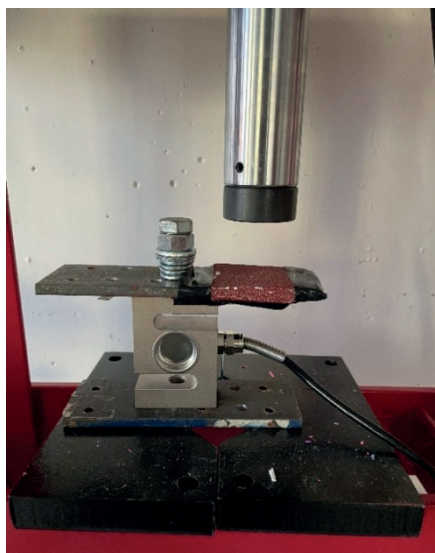
Rektangulære prismatiske prøver med ytre mål og belastningsflate ble fremstilt for å sammenligne honeycomb og gyroid ved infill-nivåene 5 %, 10 %, 15 %, 20 % og 25 % med åtte replikaer per gruppe (n = 8). Provedimensjonene følger ikke en standardisert testprosedyre. Aspektforholdet (høyde/bredde = 2) kan i prinsippet tillate knekking, men ingen systematisk knekking ble observert. Geometriene ble designet i Tinkercad og klargjort for utskrift i Bambu Studio med lagtykkelse 0,2 mm, to yttervegger, tre bunnlag og fem topplag. Se figur 1 for infillmønstrene.



Figur 1: Infill mønstrene brukt i studien sortert etter infillprosent fra 25% til 5%. Øverst er gyroid, nederst er honeycomb.

Utskrift ble gjennomført på flere Bambulab A1 Mini-printere med 0,4 mm dyse, ekstruderingsstemperatur 220 °C, platetemperatur 65 °C og utskriftshastighet 270 mm/s. Filament av typen PLA fra ulike ruller ble brukt til ulike serier, noe som introduserer en potensiell kilde til variasjon mellom grupper. Alle prøver ble visuelt kontrollert for produksjonsfeil og oppbevart i testlokalet i minst to døgn.

Aksial kompresjon ble utført i en hydraulisk presse med manuelt styrt, gradvis økende last inntil brudd eller tydelig permanent deformasjon. Sandpapir ble lagt mellom prøve og pressplate for å redusere glidning (Figur 2). Prøvene ble plassert med topplag vendt mot stempler. Belastningsrekkefølgen var ikke tilfeldig. Alle serier ble testet i stigende rekkefølge etter infill-prosent, noe som medfører en potensiell rekkefølgeeffekt. I anslagsvis 10 %-15 % av testene tippet stempelet under høyt trykk, slik at prøvene fikk en kombinert aksial og bøyelast. Dette er en ukontrollert feilkilde som antas å ha bidratt til noe økt spredning.



Figur 2: Testoppsett. Sandpapir lagt mellom prøve og press-plate for å redusere glidning under aksial trykk-belastning.

Romtemperaturen i testlokalet var om lag 7 °C. ISO 291 spesifiserer kondisjonering av polymere prøver ved °C. **PLA er temperatursensitivt; redusert temperatur øker stivhet og sprøhet, noe som sannsynligvis har hevet de absolutte kompresjonsstyrke-verdiene relativt til hva som ville blitt observert ved standardbetingelser. Ettersom alle prøver ble testet under de samme forholdene, antas ikke temperaturavviket å ha introdusert bias i den relative sammenligningen mellom mønstre, men absolutte MPa-verdier kan ikke sammenlignes direkte med** forskning gjennomført ved 23 °C.

Lastmåling ble utført med DYLY-103 lastcelle koblet til HX711-forsterker og Arduino UNO. Lastcellen ble nullstilt og kalibrert mot kjent referansevekt. **En** kalibreringsfaktor ble brukt gjennom hele studien. Måleusikkerhet var kg MPa) – neglisjerbart relativt til observerte gruppeforskjeller på 3-MPa. Rådata ble logget som topplast (kg) per prøve og omregnet til kompresjonsspenning.

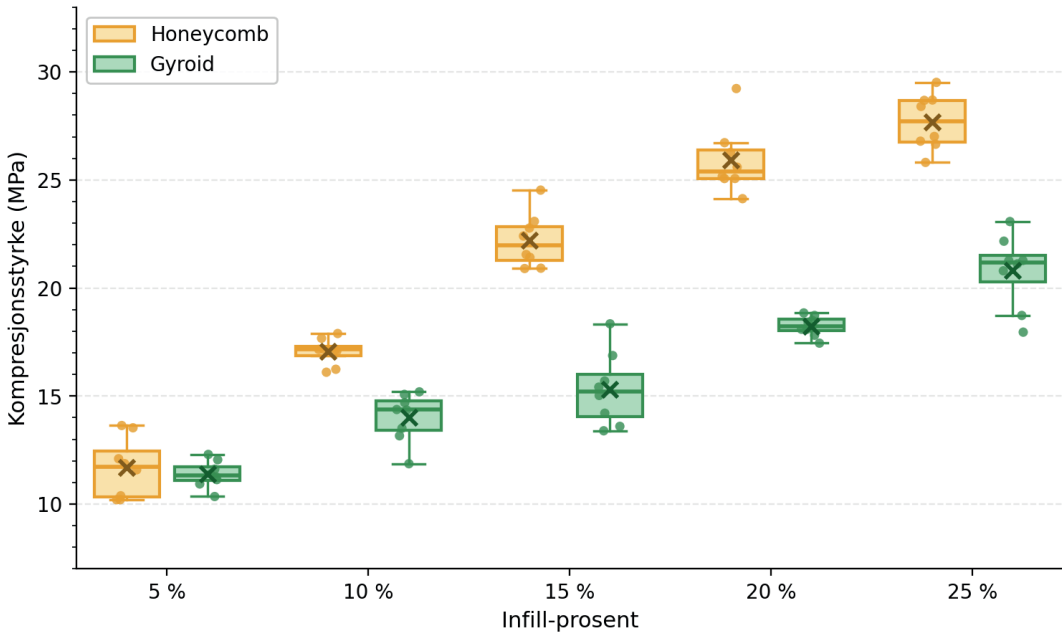
Normalfordeling innen hver gruppe ble vurdert med Shapiro-Wilk-test og likheten i varians mellom mønstrene ved hvert infill-nivå med Levenes test. Parvise sammenligninger ble gjennomført med Student-t-test der varianser var like og Welch-t-test der de var signifikant ulike. Ettersom variansforholdet mellom honeycomb og gyroid ved infill var (SD vs. MPa), ble Welch-t benyttet ved dette nivået. Alle tester er tosidige. Med fem simultane sammenligninger ble Bonferroni-korreksjon anvendt (). Effektstørrelse rapporteres som Cohens  $d$  (poolet SD). Enkel lineær regresjon ble tilpasset gjennomsnittsverdiene per mønster i intervallet 5-25 % – for honeycomb gir Gibson og Ashby (1997) teoretisk grunnlag for en lineær sammenheng i ut-av-planet-regimet.

## Resultater

Gjennomsnittlig kompresjonsstyrke og standardavvik per gruppe er vist i Tabell 1. Kompresjonsstyrken økte monotont med infill-prosent for begge mønstre, men med markert forskjellig stigningstakt.

Tabell 1: Gjennomsnittlig kompresjonsstyrke (MPa) standardavvik (SD) per infill-nivå og mønster (n = 8).

Infill (%)	Honeycomb (MPa)	Gyroid (MPa)
5	11,69 ± 1,30	11,38 ± 0,58
10	17,06 ± 0,58	14,03 ± 1,05
15	22,20 ± 1,17	15,32 ± 1,57
20	25,91 ± 1,46	18,24 ± 0,44
25	27,70 ± 1,21	20,80 ± 1,58



Figur 3: Boksplott av kompresjonsstyrke (MPa) for honeycomb og gyroid ved hvert infill-nivå. Bokser viser interkvartilbredde, strek viser median, kryss (x) viser gjennomsnitt, og prikker individuelle målinger (n = 8 per gruppe).

Parvise sammenligninger er oppsummert i Tabell 2.

Tabell 2: Parvise sammenligninger mellom honeycomb og gyroid per infill-nivå.

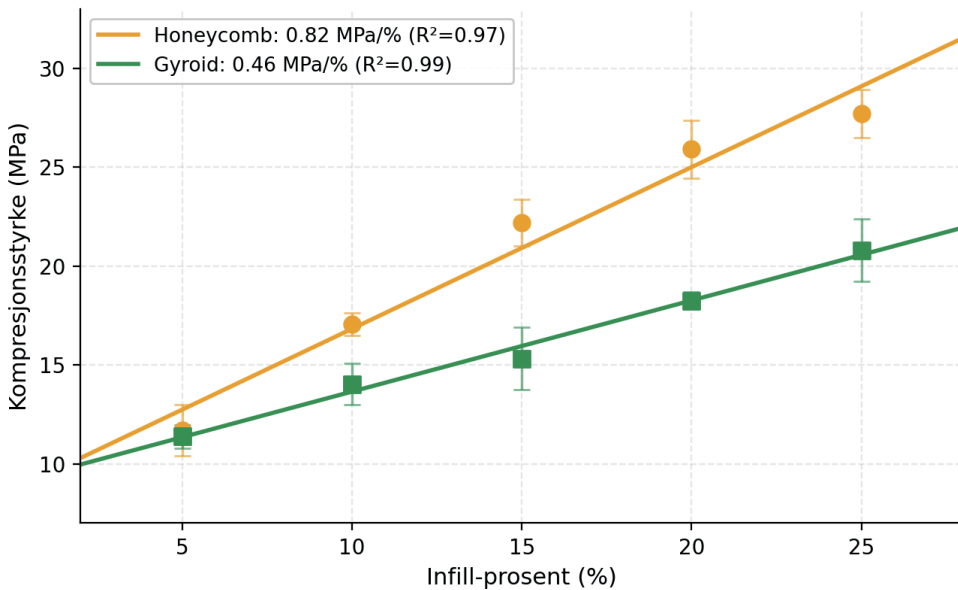
Infill (%)	Diff H-G (MPa)	p-verdi	Cohens d	Test	Signifikant (, Bonferroni)
5	0,31	0,55	0,31	Student-t	Nei
10	3,03	< 0,0001	3,58	Welch-t	Ja
15	6,89	< 0,0001	4,98	Welch-t	Ja
20	7,67	< 0,0001	7,11	Welch-t	Ja
25	6,90	< 0,0001	4,90	Welch-t	Ja

Bonferroni-korrigert signifikansgrense:  $\alpha = 0,01$ .

Lineær regresjon ble tilpasset gjennomsnittsverdiene i intervallet 5-25 % (Tabell 3). Honeycomb viser høyere stigning (0,82 MPa per prosentpoeng) og noe lavere forklaringsgrad ( $R^2=0,97$ ) enn gyroid (0,46 MPa per prosentpoeng;  $R^2=0,99$ ).

Tabell 3: Lineær regresjon mellom infill-prosent og gjennomsnittlig kompresjonsstyrke (MPa).

Mønster	Stigning (MPa/%-poeng)	Skjæringspunkt (MPa)	$R^2$
Honeycomb	0,82	8,65	0,97
Gyroid	0,46	9,04	0,99



Figur 4: Gjennomsnittlig kompresjonsstyrke (MPa) per infill-nivå med lineære regresjonslinjer for honeycomb og gyroid. Feilsøyler viser  $\pm 1$  SD. Regresjonsparametere: se Tabell 3.

## Diskusjon

Nullhypotesen forkastes for infill-nivåene 10-25 % (alle  $p < 0,0001$  etter Bonferroni-korreksjon). Cohens  $d$ -verdier på 3,58-7,11 innebærer at gjennomsnittene for de to mønstrene skiller seg med fire til sju standardavvik – det finnes knapt overlapp mellom fordelingene av individuelle toplaster. Disse forskjellige overstiger estimert måleusikkerhet (MPa) med to til tre størrelsesordener og kan ikke tilskrives instrumentell støy eller tilfeldige produksjonsvariasjoner.

Honeycombs overlegenhet er konsistent med det teoretiske rammeverket til Gibson og Ashby (1997). I FDM-printing akkumuleres heksagonale cellevegger vertikalt i  $Z$ -retningen gjennom utskriften, slik at de danner kontinuerlige søyler parallelt med lastretningen. Under aksial ( $Z$ -rettet) kompresjon befinner honeycomb seg dermed i ut-av-planet-regimet, der Gibson og Ashby predikerer at kompresjonsstyrken øker lineært med relativ tetthet: Den observerte sammenhengen (, stigning 0,82 MPa per prosentpoeng) er i god overensstemmelse med denne prediksjonen. Det lave standardavviket for honeycomb (0,58-1,46 MPa) viser i tillegg at mønsteret produserer konsistente og forutsigbare resultater over alle testede nivåer.

Gyroidens TPMS-geometri mangler diskrete plane vegger. Under aksialt påført last fordeles kraften over bøyning og skjær i den krumme overflaten i stedet for ren søyletrykk, noe som gir lavere styrke per materia-lenhet. Maskery et al. (2017) dokumenterer at mekanisk respons i gyroid-strukturer er sterkt avhengig av lastretning og relativ tetthet, og den observerte lavere stigningen (0,46 MPa per prosentpoeng) gjenspeiler denne reduserte aksiale effektiviteten. En komplementær forklaring er det generelle skillet mellom 2D- og 3D-infillmønstre. Lazaridou et al. (2025) viser at 2D-mønstre systematisk gir høyere kompresjonsstyrke enn 3D-mønstre. Honeycomb er et 2D-mønster og gyroid et 3D-mønster. Det kan fra denne studien alene ikke skilles mellom bidraget fra aksial søyleorientering og bidraget fra den generelle 2D/3D-distinksjonen.

Regresjonsresultatene bør tolkes forsiktig. Den høye fremkommer for begge mønstre, men baserer seg på kun **åtte** gjennomsnittsverdier per mønster over et smalt intervall (5-25 %). Gibson og Ashby (1997) predikerer en lineær sammenheng for honeycomb under ut-av-planet-kompresjon, og data støtter denne prediksjonen. For gyroid er den underliggende funksjonelle sammenhengen mellom styrke og relativ tetthet mer kompleks. En potenslov-modell er ikke formelt testet som alternativ og kan ikke utelukkes som bedre tilpasset over et bredere infill-spekter.

Studien har metodiske begrensninger som påvirker generaliserbarheten. Bruk av flere printere og filament fra ulike ruller introduserer ukontrollert produksjonsvariasjon. Romtemperaturen på  $\sim 7$  °C, i sterk kontrast til ISO 291-standardens  $23 \pm 2$  °C, har sannsynligvis forhøyet absolutte kompresjonsstyrker og gjør direkte sammenligning med annen forskning vanskelig. Ikke-tilfeldige testrekkefølge (stigende infill-prosent) innebærer en potensiell orden-effekt. Stempeltipping i  $\sim 10$ -15 % av testene kan ha bidratt til spredning i dataene. Det smale infill-intervallet (5-25 %) begrenser muligheten til å vurdere atferd ved høyere materialtetthet, der ikke-lineær respons kan opptre. Videre arbeid bør benytte standardiserte betingelser (ISO 291; ASTM D695), et bredere infill-spekter (f.eks. 5%-75 %), randomisert testrekkefølge, ett printeroppsett og én filamentrulle per serie, systematisk registrering av bruddmodus, og inkludere energiabsorpsjon som komplementært ytelsesmål.

Til tross for disse begrensningene gir de konsistente p-verdiene og de store effektstørrelsene støtte til at honeycomb gir høyere aksial kompresjonsstyrke enn gyroid fra og med 10 % infill under de benyttede betingelsene. Honeycomb fremstår som det mer hensiktsmessige valget når maksimal aksial bæreevne er prioritert. For applikasjoner der isotropisk styrke, energiabsorpsjon eller belastning i flere retninger er avgjørende, kan gyroid og andre TPMS-mønstre tilby fordeler som ikke fanges opp av denne studien.

## Kilder

- Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248–257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>
- Eryildiz, M. (2021). The effects of infill patterns on the mechanical properties of 3D printed PLA parts fabricated by FDM. *Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science*, 7(1–2), 1–8. <https://doi.org/10.23939/ujmeme2021.01-02.001>
- Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1997). *Cellular solids: Structure and properties* (2. utg.). Cambridge University Press.
- Lazaridou, T., Karalis, G., Tzetzis, D., & Petousis, M. (2025). Compressive performance of 3D-printed lightweight structures: Infill pattern optimization via Multiple-Criteria Decision Analysis method. *Results in Engineering*, 25, 103935. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.103935>
- Maskery, I., Aboulkhair, N. T., Aremu, A. O., Tuck, C. J., & Ashcroft, I. A. (2017). Compressive failure modes and energy absorption in additively manufactured double gyroid lattices. *Additive Manufacturing*, 16, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2017.>