



SPISS

Naturfaglige artikler av
elever i videregående
opplæring

Effekten av diagonale støttebjelker på bæreevnen til SLA 3D-printede strukturer

Forfatter: Haavard Heber, Ullern videregående skole

SLA 3D-printing er et relativt nytt felt med begrenset dokumentasjon om materialegenskaper. Diagonale støttebjelker kan forbedre bæreevne ved å fordele krefter og øke stabilitet. Studien undersøker hvordan vinkling på slike bjelker påvirker bæreevne under trykk- og strekkbelastning. Hypotesen var at økt vinkel gir høyere toleranse mot trykk, men påvirker ikke strekk vesentlig. Strukturer med bjelker i ulike vinkler ble testet. Trykktestene viste at støtter økte bæreevne, men uten entydig optimal vinkel. Strekktestene viste små, ikke-signifikante forskjeller. ANOVA og Tukey-test indikerte at strukturer uten støtter skilte seg fra de med 0°, 30° og 60° støtter. Resultatene påvirkes av menneskelige feil, og videre forskning anbefales.

Introduksjon

Gjennom historien har støttebjelker vært et effektivt middel for å forbedre en bygnings bæreevne, særlig under påvirkning av vertikale krefter. De fungerer ved å omdirigere og fordele kreftene som virker på strukturen, noe som øker både stabilitet og styrke. Når en bygning utsettes for tunge belastninger ovenfra, som egenvekten til bygningen og varierende faktorer som snøfall, kan dette skape både vertikale og horisontale bevegelser. For å motvirke slike bevegelser brukes ofte diagonale støttebjelker, som danner trekantede rammer innenfor konstruksjonen. Denne utformingen gir økt rigiditet og bidrar til en mer stabil bygning (Pradeep, 2022).

I tillegg til å forbedre bæreevnen bidrar diagonale støttebjelker til en jevnere fordeling av belastninger over strukturen. Dette reduserer risikoen for lokale svikt og materialtretthet, noe som er spesielt viktig i områder med høy seismisk aktivitet. Bygninger i slike områder må være i stand til å tåle dynamiske krefter fra jordskjelv. Det finnes omfattende regelverk og forskning på hvordan man best oppnår stabilitet. For eksempel anbefaler amerikanske myndigheter at skråstøtter har en vinkel mellom 30° og 60° (US Department of Homeland Security, 2024, s.102). Disse prinsippene er grundig undersøkt i forbindelse med tradisjonelle byggematerialer som tre og stål.

Når man oppdager et nytt materiale, må man teste dets egenskaper før man tar det i bruk. Kommersiell 3D-printing eksploderte på 2010-tallet. For første gang var det mulig å produsere høypresisjonsobjekter på kort tid, men teknologien har stort sett blitt bruk til prototyping og hobbyer. For å kunne ekspandere bruksområdet, så må styrken til de 3D printede strukturene testes. 3D-printere blir som regel delt inn i tre typer. Den første typen som ble kommersielt tilgjengelig, er FDM-printere. FDM, eller Fused Deposition Modelling, fungerer ved å smelte en plasttråd og presse den ut gjennom en dyse (Skeie, 2022). Den neste

er SLA-printere. SLA, eller Stereolithography, fungerer ved at en UV-skjerm lyser bilder inn i en beholder med resin som stivner når det utsettes for UV-lys (Skeie, 2022). Den siste typen er SLS-printere, som ennå ikke har blitt kommersielt tilgjengelige. SLS, eller Selective Laser Sintering, fungerer ved å bruke varme og trykk til å sintre et pulver (Skeie, 2022).

Blant studiene som har undersøkt styrken til 3D-printede strukturer, fokuserer de fleste på FDM-printing (Djokikj, 2024). Dette betyr at man fremdeles ikke kjenner grensene for hva SLA-printede strukturer tåler, eller hvilke strukturelle design som kan brukes for å forbedre styrken. Denne studien vil undersøke hvorvidt støttebjelker med forskjellige vinkler påvirker bæreevnen til SLA 3D-printede objekter for både trykk- og strekkrefter, med hypotesen: En økning av vinklingen av diagonale støttebjelker fører til en økt toleranse mot trykk krefter, men ikke at det ikke har en signifikant påvirkning på toleransen mot strekk krefter. Uansett resultat vil studien forhåpentligvis øke kunnskapen om styrkene og svakhetene til SLA-resin tåler og gjøre det lettere for folk å vurdere om SLA-printing er det beste for deres formål.

Metode

For å teste effekten til støttebjelker ble 3D-printede strukturer med støtter på forskjellige vinkler utsatt for to tester: en trykktest og en strekktest. Strukturene ble designet i blender (Blender 4.3.2). Vinklene 0°, 30°, 45°, 60° ble valgt siden de gir en variert spredning av mulige vinkler på støttebjelkene. Gradene startet med at 0° var horisontalt og deretter økte vinklene oppover.

Strukturene ble printet på en Elegoo Mars 5 Ultra-printer (Elegoo) ved bruk av Elegoo Standard Grey Resin (Polyalkemi).

Modellene ble klargjort og støttet i Chitubox Basic (v2.3.1). Modellene ble rotert 30° langs x-aksen i programmet for å redusere risikoen for feil under printing før printstøttene ble lagt til. Printstøttene (supports) ble generert ved hjelp av Chitubox' automatiske støttefunksjon. Deretter ble tre eksemplarer av hver modell skrevet ut (Vedlegg 6 «Ingen støtter.ctb», «Vedlegg 7 0°.ctb», «Vedlegg 8 30°.ctb», «Vedlegg 9 45°.ctb», «Vedlegg 10 60°.ctb»).

Etter printing ble strukturene rensed for overskuddsresin ved hjelp av en Elegoo Mercury Plus V2.0 Washing & Curing Station og isopropanol (Blåtind). Vaskesyklusen varte i 4 minutter for å sikre fullstendig fjerning av resinen. Deretter ble strukturene lagt i et vannbad oppvarmet til 40–50 °C. Når printene var oppvarmet, ble printstøttene fjernet. Til slutt ble strukturene herdet i UV-modus i vaskestasjonen i 5 minutter.

For å teste strukturenes evne til å motstå trykkrefter ble en struktur plassert på et flatt og stabilt underlag. Deretter ble vekstskiver lagt på strukturen og stablet oppå hverandre. Vektene ble ikke fjernet etter at de først var plassert, for å minimere risikoen for dreiekrefter (figur 1). Sekvensen av vektpåføring var som følger:

1. To 10 kg vekter (én om gangen)
2. Én 5 kg vekt
3. To 3 kg vekter
4. To 2 kg vekter
5. Én 1,25 kg vekt
6. Opptil seks 1 kg vekter

Sekvensen ble holdt konstant for å prøve å holde en konstant vekt distribusjoner gjennom alle testene. Dersom strukturen ikke kollapset etter disse vektene, ble ytterligere vekter lagt på inntil sammenbrudd oppstod.

I strekktesten ble strukturene festet til en stang, og en pose festet til undersiden av strukturen for å holde vektene. Testen startet med en belastning på 3 kg, siden alle strukturene tålte dette nivået. Deretter ble vekten gradvis økt med 1 kg og 2 kg vekter inntil strukturen feilet.

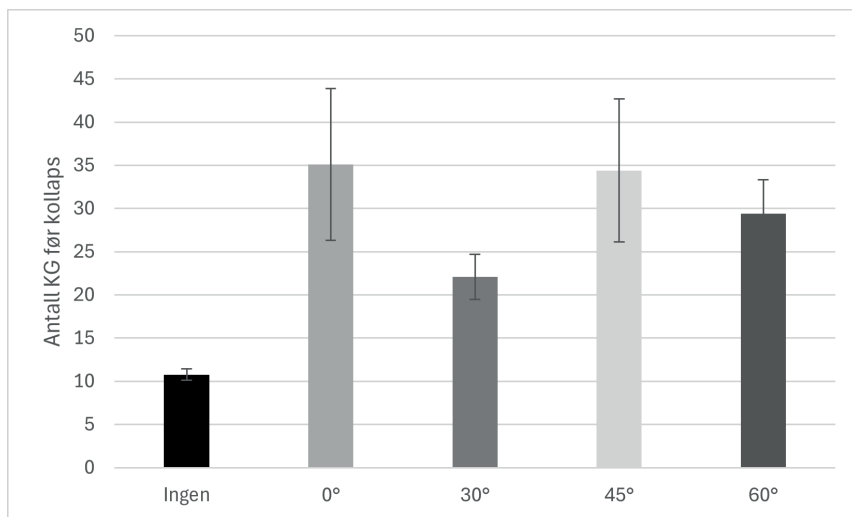


Figur 1: Visning av hvordan testene ble utført med en struktur uten støttebjelker som eksempel, (trykktest til venstre, strekktest til høyre)

Resultatene fra testene ble analysert ved hjelp av en ANOVA-test og en Tukey-test. Tukey testen ble valgt fordi den tar hensyn til flere datasett på en gang. Dette ble gjort ved hjelp av et Python-program (3.11), som først utførte en ANOVA-test, etterfulgt av en Tukey-test for parvise sammenligninger hvor signifikansnivået var satt til 0,05 (se Vedlegg 11: ANOVA_Tukey_Trekk.py og ANOVA_Tukey_Strekk.py).

Resultater

Trykktesten viste at strukturen uten støtter i gjennomsnitt tålte $10,8(\pm 0,7)$ kg, strukturen med horisontale støtter tålte $35,1(\pm 3,9)$ kg, strukturen med 30° støtter tålte $22,1(\pm 8,8)$ kg, strukturen med 45° støtter tålte $34,3(\pm 2,6)$ kg, og strukturen med 60° støtter tålte $29,4(\pm 8,3)$ kg (tabell 1). En ANOVA-test utført på dataene ga en p-verdi på 0,01, noe som indikerer minst én statistisk signifikant forskjell mellom hvor stor belastning de ulike strukturene tålte i trykktesten. Tukey's test viste imidlertid at det kun var statistisk signifikante forskjeller i tre av de ti sammenligningene. Disse forskjellene ble funnet mellom strukturen uten støtter og strukturene med 0° , 30° og 60° støtter. (tabell 2)



Figur 2: Gjennomsnittlig vektoleranse under trykk-testen med standardavvik.

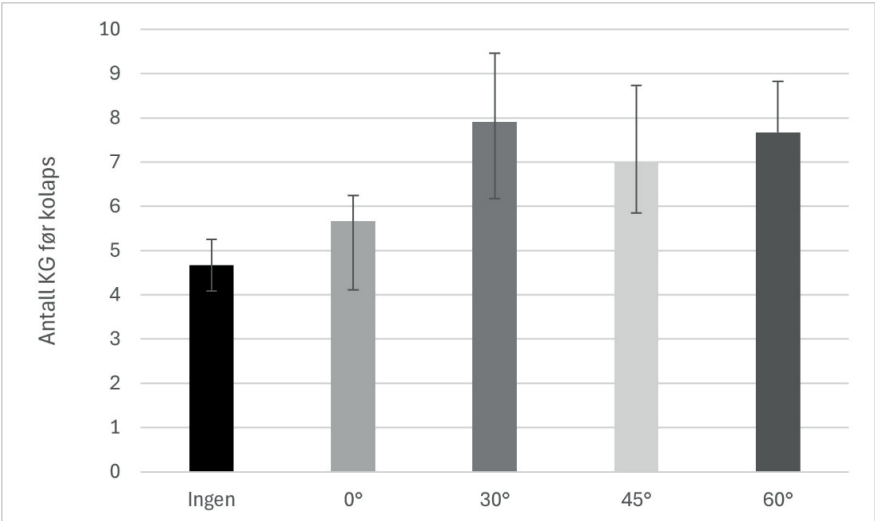
Tabell 1. Resultater av trykktest. Målt i kg Organisert etter vinkel til støttene.

Struktur	Test 1	Test 2	Test 3	Gjennomsnitt	Standardavvik
Ingen	11,3	11	10	10,8	0,7
0°	32,3	31	25	35,1	3,9
30°	39	41,3	25	34,4	8,8
45°	21,3	20	25	22,1	2,6
60°	37,7	40,5	25	29,4	8,3

Tabell 2. P-verdier fra Tukey’s test utført på resultatene fra trykktest. * indikerer en statistisk signifikant verdi som ligger under signifikansnivået på 0,05

	Ingen støttebjelker	0°	30°	45°	60°
Ingen støttebjelker	x	0.02*	0.01*	0.19	0.01*
0°	0.02*	X	0.75	0.56	0.83
30°	0.01*	0.75	X	0.12	1
45°	0.19	0.56	0.12	X	0.14
60°	0.01*	0.83	1	0.14	X

Det var ingen signifikant forskjell mellom strekkstyrken til strukturene under strekktesten. I strekktesten tålte strukturen uten støtter i gjennomsnitt 4,7 (±0,6) kg, strukturen med horisontale støtter tålte 5,7 (±0,00) kg, strukturen med 30° støtter tålte 7,9 (±0,6) kg, strukturen med 45° støtter tålte 7 (±2) kg, og strukturen med 60° støtter tålte 7,67 (±1,2) kg (tabell 3). For å identifisere mulige statistisk signifikante forskjeller ble en ANOVA-test utført på dataene. Testen ga en p-verdi på 0,04, noe som indikerer en statistisk signifikant forskjell. Tukey’s testen viste at alle sammenligninger ga en p-verdi over 0,05, noe som innebærer at ingen spesifikke grupper skilte seg signifikant fra hverandre. (tabell 4).



Figur 3: Gjennomsnittlig vekttoleranse under strekk-testen med standardavvik.

Tabell 3. Resultater av strekktesten. Målt i KG. Organisert etter vinkel til støttene

Vinkel på støtter	Test 1	Test 2	Test 3	Gjennomsnitt	Standardavvik
Ingen	5	4	5	4,7	0,6
0°	6	5	6	5,7	0,6
30°	9,7	7	7	7,9	1,6
45°	9	6	6	7	1,7
60°	9	7	7	7,7	1,2

Tabell 4. P-verdier fra Tukey’s test utført på resultatene fra strekktest.

	Ingen	0°	30°	45°	60°
Ingen	X	0.85	0.05	0.21	0.08
0°	0.85	X	0.24	0.68	0.33
30°	0.05	0.24	X	0.88	1
45°	0.21	0.68	0.89	X	0.96
60°	0.08	0.32	1	0.96	X

Diskusjon

Denne studien undersøkte hvordan vinklingen på skråstøtter påvirker vekttoleransen til SLA-printede strukturer under både trykk- og strekkrefter. Trykktesten bestod av å legge et økende antall vekter på strukturene til de kollapset. Resultatene varierte betydelig mellom de forskjellige vinklingene, og i testene utført på samme struktur, og ANOVA-testen viste minst ett statistisk signifikant resultat med en p-verdi på 0,01. Den påfølgende Tukey’s range-test viste at det kun var en statistisk signifikant forskjell mellom strukturen uten støtter og strukturene med 0°, 30° og 60° støtter. Det lave antallet statistisk signifikante resultater, kombinert med den store variasjonen i p-verdiene (0,01 til 1) (tabell 2), indikerer at man ikke kan trekke en konklusjon om hvilken av vinklene som gir mest styrke mot trykkrefter.

Selv om man ikke kan trekke noen konklusjoner om hvilken vinkel som øker styrker mest, kan man likevel anta at skråstøtter forbedrer bæreevnen til strukturene. Denne mulige konklusjonen har støtte i litteraturen (US Department of Homeland Security, 2024, s.102) (Pradeep, 2022). Likevel, siden forsøket ikke gir grunnlag for en helhetlig konklusjon, er det uklart hvilken av støttevinklene som gir best bæreevne og derfor kan vi ikke styrke eller forkaste hypotesen vår om at større vinkler hjelper med bæreevne.

Strekktesten bestod av å feste et økende antall vekter under de hengende strukturene til de gikk fra hverandre. Resultatene fra strekktesten var langt mer konsistente enn de fra trykktesten, både innenfor samme struktur og mellom de ulike strukturene. ANOVA-testen viste minst én statistisk signifikant forskjell med en p-verdi på 0,04, men den mer justerende Tukey’s range-test viste ingen statistisk signifikante forskjeller mellom strukturene (tabell 4). Forskjellen på resultatene kommer nok av at ANOVA-testet er sensitiv for generell variabilitet, mens Tukey-testen justerer for multiple sammenligninger. De svært jevne målingene, kombinert med mangelen på signifikante resultater fra Tukey’s test, indikerer at diagonale støttebjelker ikke påvirker strukturenes evne til å motstå strekkrefter, noe som styrker strekk delen av hypotesen. Dette samsvarer med eksisterende kunnskap (se innledning), ettersom diagonale støttebjelker i arkitektur brukes for å øke bygningers styrke mot krefter ovenfra, og ingen av kildene brukt i artikkelen anbefaler dem som et tiltak for å forbedre motstand mot strekkrefter (US Department of Homeland Security, 2024, s.102) (Pradeep, 2022).

Testoppsettet kan ha hatt en negativ innvirkning på forsøkenes pålitelighet. Vektene ble plassert og balansert manuelt, noe som kan ha introdusert ukontrollerte variabler i testene. I trykktesten kan dette ha ført til en ujevn vektfordeling, som igjen kan ha forårsaket at strukturene kollapset tidligere enn de ellers ville gjort, noe som kan ha ført til den store variansen innad i gruppene. I strekktesten kan manuell plassering av vektene ha skapt rykk i belastningen, noe som kan ha resultert i ujevne krefter på strukturen, men den lille variansen mellom resultatene tyder på at det ikke spilte så stor rolle. For å forbedre metodikken i fremtidige studier ville det vært bedre å bruke en hydraulisk presse for trykktesten og en omvendt hydraulisk presse for strekktesten. Disse maskinene ville sikret presise målinger av kreftene, reproducerbare testforhold og en jevn vektfordeling. Den begrensede mengden eksisterende forskning, kombinert med det høye antallet statistisk ikke-signifikante resultater, gjør det vanskelig å trekke en konklusjon. Dette understreker behovet for videre forskning på temaet.

Kilder

- Pradeep, A., Thampi, A. R., Shrikant, Sam, H. S., & Joseph, L. (2022). Stability analysis of high-rise building and optimization of bracing configuration. *Materials Today: Proceedings*, 65(2), 1990–1995. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.324>
- US department of homeland security (2024. 08. 01) BIPS o8 - Field Guide for Building Stabilization and Shoring Techniques. <https://www.dhs.gov/xlibrary/assets/st/st-120108-final-shoring-guidebook.pdf>
- Skeie, B. R., & Hove, H. (2022. 20.11). 3D-printing med FDM-teknologi. *NDLA*. <https://ndla.no/nb/r/yrkesfaglig-fordypning-tp-tip-vg1/3d-printing-med-fdm-teknologi/e957130197>
- Skeie, B. R., & Hove, H. (2022. 03.10). 3D-printing med SLA-teknologi. *NDLA*. <https://ndla.no/nb/r/yrkesfaglig-fordypning-tp-tip-vg1/3d-printing-med-sla-teknologi/647bb05e78>
- Skeie, B. R., & Hove, H. (2022. 17.11). Materialer for 3D-printing. *NDLA*. <https://ndla.no/nb/r/yrkesfaglig-fordypning-tp-tip-vg1/materialer-for-3d-printing/6d00739edc>
- Djokikj, Jelena & Avramov, Nikola & Nestorovski, Blagoja & Hristova, Elena. (2024.07 .02). Compressive Strength of 3D Fabricated Parts: Experimental and Numerical Studies. *TEM Journal*. 260-265. 10.18421/TEM131-27. https://www.researchgate.net/publication/378519683_Compressive_Strength_of_3D_Fabricated_Parts_Experimental_and_Numerical_Studies