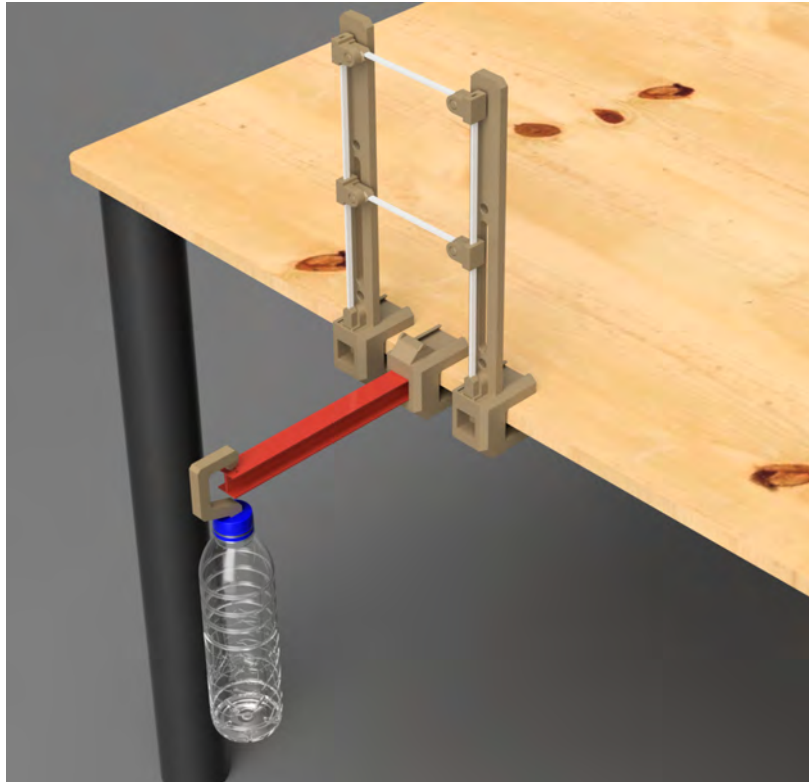




CHALMERS



Utvärdering av 3D-skrivning som framtagningsmetod för utbildningsmaterial

Med fokus på hållfasthetslära

Kandidatarbete vid institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Joel Ansgar, Axel Hansson, Hampus Hartman Hernstig,
David Michelsen, Axel Ovuka Andersson, Rune Streymoy

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg 2025

www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2025

Utvärdering av 3D-skrivning som framtagningsmetod för utbildningsmaterial

Med fokus på hållfasthetslära

Joel Ansgar, Axel Hansson, Hampus Hartman Hernstig,
David Michelsen, Axel Ovuka Andersson, Rune Streymoy



CHALMERS

Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg 2025

Utvärdering av 3D-skrivning som framtagningssmetod för utbildningsmaterial
Med fokus på hållfasthetslära
Joel Ansgar, Axel Hansson, Hampus Hartman Hernstig, David Michelsen, Axel Ovuka Andersson, Rune Streymoy

© Joel Ansgar, Axel Hansson, Hampus Hartman Hernstig, David Michelsen, Axel Ovuka Andersson, Rune Streymoy, 2025.

Handledare: Jim Brouzoulis, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Examinator: Petri Piiroinen, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2025
Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslagsbild: Bilden illustrerar samtliga modeller för detta kandidatarbete.

Skriven i L^AT_EX
Göteborg 2025

Utvärdering av 3D-skrivning som framtagningssmetod för utbildningsmaterial
Med fokus på hållfasthetslära
Joel Ansgar, Axel Hansson, Hampus Hartman Hernstig, David Michelsen, Axel Ovuka Andersson, Rune Streymoy
Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola

Sammanfattning

Projektet har undersökt möjligheten att nyttja 3D-skrivning för att tillverka undervisningsmaterial, specifikt för undervisning inom kurser i hållfasthetslära. De fysiska fenomenen som behandlats är knäckning, balkböjning och balkvridning. Fokus har varit på att konstatera om det är möjligt att producera undervisningsmaterial och om det bidrar positivt till undervisningen. Genom rapid prototyping med CAD går det att konstatera att det är möjligt att utveckla undervisningsmaterial med 3D-skrivning. Efterföljande utvärderingar med testpersoner indikerar att modellerna bidrar positivt men inga kvantitativa slutsatser kan dras.

Nyckelord: 3D-skrivning, hållfasthet, pedagogik, utbildningsmaterial, CAD, instabilitetsfenomen, balkböjning, filament.

Abstract

The project has analyzed the possibility of using 3D printing as a tool to create educational models, specifically for use in university courses in strength of materials. The physical phenomena that have been addressed are buckling, beam bending, and beam torsion. The focus has been to confirm whether or not it is possible to create educational materials using 3D printing, as well as whether they actually contribute positively to the understanding of the subjects. Through the use of rapid prototyping with CAD it can be confirmed that it is possible to develop educational models using 3D printing. The follow-up evaluation using test subjects indicates that the models contribute positively to the learning experience, however, no quantitative conclusions can be drawn.

Förord

Rapporten är resultatet av ett kandidatarbete som genomförts åt institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper vid Chalmers tekniska högskola under vårterminen 2025. Projektgruppen vill tacka institutionen för ett kul och lärorikt ämne, Jim Brouzoulis för många bra idéer och diskussioner under handledningspass och eXPerimentverkstaden som bistått med lokaler och 3D-skrivare under projektets gång.

Författarna*, Göteborg, Maj 2025

* Joel Ansgar, Axel Hansson, Hampus Hartman Hernstig, David Michelsen, Axel Ovuka Andersson, Rune Streymoy

Användning av artificiell intelligens

Användning av generativ artificiell intelligens har under projektets gång begränsats till att underlätta och förbättra rapportens grammatik, meningsbyggnad och struktur. Den har använts som en sökmotor för att få hjälp och felsöka bland annat kod till LaTeX, Python och MATLAB, samt som stöd i CAD-program. För att säkerställa att rapportens innehåll faktiskt kommer från projektgruppen, frångås generering av långa textstycken.

Akronymer & beteckningar

Nedan följer en lista med förkortningar som används genom rapporten:

CAD	Computer-aided design
PETG	Polyetentereftalat med glykol
PLA	Polylaktid
TPU	Termoplastisk polyuretan
PET	Polyetentereftalat

Innehåll

Akronymer	xiii
Figurer	xvii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte & mål	2
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Etiska aspekter	2
2 Teori	4
2.1 Pedagogik	4
2.2 Instabilitetsfenomen	5
2.3 Bøjstyvhet	5
2.4 Vridstyvhet	5
2.5 Filament	6
2.6 CDIO	6
3 Metod	7
3.1 Verktyg och krav	7
3.1.1 Mjukvara	7
3.1.2 Hårdvara	7
3.1.3 Inställningar vid utskrift	7
3.1.4 Kravspecifikation	8
3.2 Idégenerering	8
3.2.1 Uppdelning av delsystem	8
3.2.2 Lösningsgenerering	9
3.2.3 PUGH-matris	9
3.3 Rapid prototyping och utvärdering	9
3.4 Framtagning av instabilitetsmodell	10
3.5 Framtagning av balkdeformationsmodell	14
3.6 Studentintryck av modeller	19
3.7 Tillgänglighet	20
4 Resultat	21
4.1 Slutlig iteration	21
4.1.1 Slutlig modell för instabilitetsfenomen	21

4.1.2	Slutlig modell för deformation av balk	27
4.2	Utvärdering av färdiga modeller	32
4.3	Instruktioner	35
4.4	Studentintryck	36
4.5	Materialförbrukning	37
5	Diskussion	39
5.1	Begränsningar vid framtagandet av färdiga modeller	39
5.2	Filament vid utskrift	42
5.3	3D-skrivning som verktyg för utbildningsmaterial	42
5.4	Digital tillgänglighet och användarvänlighet	43
5.5	Möjligheter till vidareutveckling	43
6	Slutsats	45
A	Idegenerering	I
A.1	Kravspecifikation för projektet	I
A.2	Delsystemlösningar	II
A.3	Delsystemkatalog för projektet	III
A.4	Förenklad PUGH-matris	IV
B	Instruktioner	V
B.1	Instruktioner för utböjning	V
B.2	Instruktioner för böjstyvhet	VI
B.3	Instruktioner för euler fall	VII
B.4	Instruktioner för euler system	VIII
C	3D-skrivning inställningar	IX
C.1	Slicer inställningar	IX
C.2	Filamentparametrar (PLA)	X
C.3	Filamentparametrar (PTEG)	X
C.4	Filamentparametrar (TPU)	XI

Figurer

3.1	Slanka balkar i PLA & PETG.	11
3.2	Ledade balkar i PLA & PETG.	11
3.3	3D-skrivna fjädrar i PLA och PETG.	12
3.4	Tidig iteration av modellen med treledad balk.	12
3.5	Jämviktsläge med två leder.	12
3.6	Första iterationen av riggen.	13
3.7	Sista iterationen av riggen.	13
3.8	Utböjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och- livtjocklek 2 mm i PLA.	15
3.9	Utböjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och- livtjocklek 2 mm i TPU.	15
3.10	Utböjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och- livtjocklek 2 mm i TPU.	15
3.11	Utböjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och- livtjocklek 1.5 mm i TPU.	15
3.12	Prototyp för glidmekanism.	16
3.13	Implementering av fritt upplagt stöd.	16
3.14	Stödadapter för att integrera rektangulär balk.	17
3.15	Första iterationen av bordsfästet.	17
3.16	Test för skruv och gängor med olika toleranser.	18
3.17	Dimensionsjustering av fästen i bordsfästet. Nya mått t.v, äldre mått t.h.	18
3.18	Första iterationen av vridverkyget för visualisering.	19
3.19	Slutgiltigt vridverkyg, med skåror för kraftpåläggning.	19
4.1	Komplett kit för modell av instabilitetsfenomen bestående av samtliga 3D-skrivna komponenter, infästningar samt mekaniska delar.	22
4.2	Knäckstavar i två olika längder, till vänster 5×2×240 mm och till höger 5×2×120 mm.	23
4.3	Glidblock konstruerat för att möjliggöra linjär rörelse i syfte att illu- strera instabilitetsfenomen.	23
4.4	Balkfästen i två olika orienteringar. Används för att illustrera varie- rande typer av inspänningar av knäckstaven.	24
4.5	Basen för instabilitetsfenomen.	24
4.6	Hörnled för att möjliggöra uppbyggnad av plana ramar.	25
4.7	Spänne för att leda en balk på mitten.	25

4.8	Ett kortare basfäste som möjliggör infästning med två bordsfästen vid uppbyggnad av plana ramar.	26
4.9	Två ledade balkar för visualisering av fjäderledad knäckning.	26
4.10	Gummibandsfäste med låshatt för fjäderledade balkar.	27
4.11	Komplett kit för modell av balkdeformation bestående av samtliga 3D-skrivna komponenter och infästningar.	28
4.12	Bordsfäste 1 med en skåra för både basen och ett rullstöd.	29
4.13	Bordsfäste 2 med ett fast stöd för balkar och en skåra för basen.	29
4.14	Rullstöd för att möjliggöra glidledat stöd vid undersökning av fritt upplagda balkar.	29
4.15	M16 skruv för att få ett klämförband mellan bordsfäste och bordskiva på ett skrivbord.	30
4.16	C-balk, I-balk, balk med kvadratisk tvärsnitt, balk med rektangulärt tvärsnitt och en T-balk.	30
4.17	Krok med gängor för en PET-flaska att användas för punktlast.	31
4.18	Momentvred för att lägga på ett vridande moment på de olika balkarna.	31
4.19	Adapter för att få en infästning för balken med rektangulärt tvärsnitt i bordsfästet.	32
4.20	Eulerfall 1	32
4.21	Eulerfall 2	32
4.22	Eulerfall 3	32
4.23	Eulerfall 4	32
4.24	Eulerfall 5	32
4.25	Knäckning av en plan ram med hjälp av modellen.	33
4.26	Knäckning av fjäderledad balk.	33
4.27	Utböjning för en fritt upplagd balk med ett rektangulärt tvärsnitt.	34
4.28	Utböjning för en fritt upplagd balk med kvadratisk tvärsnitt.	34
4.29	Utböjningen för en fritt upplagd T-balk.	34
4.30	Utböjningen för en fritt upplagd C-balk.	34
4.31	Utböjningen för en fritt upplagd I-balk.	34
4.32	Utböjning vid excentrisk last hos balk med rektangulärt tvärsnitt.	35
4.33	Utböjning vid excentrisk last hos balk med kvadratisk tvärsnitt.	35
4.34	Utböjning vid excentrisk last hos balk med T-tvärsnitt.	35
4.35	Utböjning vid excentrisk last hos balk med C-tvärsnitt.	35
4.36	Utböjning vid excentrisk last hos balk med I-tvärsnitt.	35
4.37	Ritad deformation innan testpersonen fick tillgång till modellen.	36
4.38	Ritad deformation efter testpersonen fick tillgång till modellen.	37
4.39	Deformation för första balkmodellen i Ansys.	37
4.40	Deformation för andra balkmodellen i Ansys.	37
5.1	Ena änden av knäckbasen har lyft från byggplattan, vilket medfört att även de nästkommande lagren blivit felaktiga.	40
5.2	Liten kant i hål och på axlar som motverkar en fri rotation.	41
A.1	Kravspecifikation för projektet	I
A.2	Delsystemslösningar	II

A.3	Delsystemkatalog för projektet	III
A.4	Förenklad PUGH-matris för de olika områdena	IV
B.1	Första utkast Instruktioner för utböjning	V
B.2	Instruktioner för böjstyvhet	VI
B.3	Instruktioner för euler fall 1 till 5 samt knäckningsfenomen	VII
B.4	Instruktioner för knäckning av plana ramar	VIII
C.1	Fyllningsmönster och densitetsparametrar i PrusaSlicer för Prusa i3 MK3S	IX
C.2	Utskriftshastighet och rörelseinställningar i PrusaSlicer för Prusa i3 MK3S	IX
C.3	Utskriftsinställningar för PLA i PrusaSlicer (se a och b)	X
C.4	Utskriftsinställningar för PETG i PrusaSlicer (se a och b)	X
C.5	Utskriftsinställningar för TPU i PrusaSlicer (se a och b)	XI

1

Inledning

Hållfasthetslära är grundläggande inom flera ingenjörsutbildningar, där förståelse för hur krafter påverkar konstruktioner är centralt. Undervisningen ges främst i form av föreläsningar, inlämnings- och räkneuppgifter och visuella inslag med fysiska modeller är mindre vanliga. Utvecklingen av metoder för additiv tillverkning har dock medfört möjligheten att på ett kostnadseffektivt och snabbt sätt utveckla och tillverka modeller till ett förhållandevis lågt pris.

Det här projektet undersöker hur och om 3D-skrivning kan användas för att utveckla undervisningsmaterial för mekanik och hållfasthetslära. Fokus ligger på att skapa modeller som visualiserar viktiga tekniska begrepp, särskilt instabilitetsfenomen och balkdeformation. Projektet syftar även till att utvärdera om dessa modeller bidrar till att öka studenternas förståelse och engagemang inom ämnet.

Detta avsnitt beskriver projektets bakgrund, de syften och mål som önskas uppnås samt de avgränsningar som definierats. Dessutom behandlas etiska aspekter relaterade till arbetet.

1.1 Bakgrund

Hållfasthetslära behandlar hur krafter påverkar kroppar och strukturer i både statiska och dynamiska tillstånd. Dessa områden utgör en grundläggande del av många ingenjörsutbildningar och är centrala för att förstå och dimensionera tekniska system.

Flera studier visar att undervisning som inkluderar visuell och taktill inläring kan förbättra studenters förståelse, särskilt inom tekniska ämnesområden där begreppen ofta är svåra att greppa enbart genom matematiska formler eller tvådimensionella bilder [1]. Genom att använda fysiska modeller, till exempel för att illustrera böjning, knäckning eller spänningsfördelning, ges studenterna möjlighet att uppleva och interagera med de fenomen som diskuteras, vilket stödjer visuell inläring [2].

Den tekniska utvecklingen inom 3D-skrivning har tillgängliggjort nya möjligheter för att på ett kostnadseffektivt och flexibelt sätt ta fram undervisningsmodeller. Genom att använda 3D-skrivare kan lärare och studenter snabbt utveckla, tillverka och anpassa modeller för specifika undervisningsmoment, vilket både ökar tillgängligheten och främjar ett mer aktivt lärande [2].

1.2 Syfte & mål

Med detta som bakgrund är syftet med projektet att undersöka om det är möjligt att, med hjälp av 3D-skrivning, skapa undervisningsmaterial inom ingenjörsutbildningar med fokus på hållfasthetslära. Målet är att uppnå detta genom att skapa mer lättillgängliga modeller som möjliggör visualisering av koncept inom hållfasthetslära. Lättillgängligheten syftar till att det ska vara användarvänligt att distribuera filerna med 3D-modeller.

Utöver detta syftar projektet även till att undersöka huruvida de skapade 3D-modellerna är till hjälp för studenter samt om de bidrar till en fördjupad förståelse inom ämnesområdet.

1.3 Avgränsningar

materialvalet i detta arbete avgränsas huvudsakligen till de två mest förekommande filamenten inom 3D-skrivning, polylaktid (PLA) och polyetentereftalat med glykol (PETG). Dessa material har valts ut med hänsyn till deras tillgänglighet, användarvänlighet samt kostnads- och resurseffektivitet. Vidare begränsas arbetet av de praktiska dimensionerna på tillgängliga 3D-skrivare, vilket innebär att de experimentella modellerna skalas ned för att möjliggöra utskrift med en större andel skrivare på marknaden. Detta bidrar även till minskad materialåtgång och därmed en mer hållbar produktionsprocess.

Projektet fokuserar uteslutande på ämnesområdet hållfasthetslära, med särskild inriktning på instabilitetsfenomen och balkdeformation. Avgränsningen är att utveckla pedagogiskt undervisningsmaterial som kan användas i inledande kurser i hållfasthetslära på universitets- och högskolenivå. Inom detta ramverk läggs fokus på att visuellt illustrera teorin bakom instabilitetsfenomen som knäckning, samt deformation av balkar med varierande tvärsnitt och randvillkor.

Materialtekniska beräkningar har exkluderats från projektet. Tidigare forskning visar att materialegenskaper hos 3D-skrivna objekt påverkas av ett flertal parametrar som utskriftstemperatur, hastighet, lagrens orientering och munstyckets diameter [3]. Detta medför att identiska parametrar på olika 3D-skrivare inte garanterar ekvivalenta materialegenskaper på utskriven modell.

1.4 Etiska aspekter

Tillgängligheten till 3D-skrivare och tillhörande programvara är en central aspekt i projektet. Enligt företaget Prusa har över 400 000 3D-skrivare tillverkats och distri-

buerats till 160 länder världen över [4], vilket indikerar global spridning av tekniken.

För att öka produktens tillgänglighet och tillgänglighet utformas designen för att kunna skrivas ut på olika typer av 3D-skrivare. Samtidigt prioriteras arbete med öppna filformat och licenser (Public Domain, CC0) för att främja vidareutveckling och tillgänglighet.

Ur ett hållbarhetsperspektiv innebär användning av 3D-skrivning vissa miljömässiga fördelar. Eftersom produktionen sker på plats reduceras behovet av transport, vilket i sin tur minskar koldioxidutsläpp [5].

Ett centralt fokus i utvecklingsarbetet är att minska materialåtgången genom att optimera konstruktionen utifrån både funktion och hållbarhet. Genom att öka modellens livslängd minskas antalet utskrifter. Denna aspekt är särskilt viktig i utbildningssammanhang, där modeller ofta behöver skrivas ut i flera exemplar.

Det är viktigt att beakta de potentiella hälsoriskerna som kan vara förknippade med 3D-skrivning. I miljöer där 3D-skrivare används kan vissa filament avge både partiklar och gaser och vid höga koncentrationer kan dessa vara skadliga för hälsan. Enligt en studie publicerad i *Journal of Toxicology and Environmental Health* bedöms riskerna för allvarliga hälsoeffekter som låga, men det påpekas att forskningen inom detta område fortfarande är begränsad och att långsiktiga effekter inte är fullt utredda [6].

2

Teori

I detta avsnitt beskrivs den teori som är central genom arbetet. I huvudsak redogörs för vital teori om de fysikaliska egenskaper och fenomen som behandlas, men även teori om varför fysiska undervisningsmedel är av intresse. Vidare beskrivs specifikationer och attribut hos de filament som har nyttjats samt det ramverk projektet följt.

2.1 Pedagogik

Hållfasthetslära är centralt inom en mängd ingenjörsutbildningar men kan upplevas som kognitivt utmanande, särskilt i början av studierna. En stor del av innehållet bygger på abstrakta och matematiska modeller av fysiska fenomen som knäckning, böjning och deformation av balkar. Dessa koncept är svåra att greppa utan en välutvecklad rumslig föreställningsförmåga och förståelse för strukturellt beteende [1].

För att underlätta inläringen har visuella och taktila undervisningsmetoder vunnit ökad uppmärksamhet. En taktil undervisningsmetod är inläring baserad på känslor och beröring, ofta med fysiska material eller modeller. Särskilt användningen av fysiska 3D-modeller har visat sig vara ett effektivt verktyg för att konkretisera abstrakta begrepp och skapa förutsättningar för aktivt och konstruktivistiskt lärande [1], [2]. Genom att möjliggöra direkt interaktion med strukturer som att kunna hålla i, vrida på och observera, skapas en djupare förståelse för hur exempelvis lastfördelning, böjning och knäckning uppstår och påverkar olika typer av konstruktioner.

Forskning inom området betonar att 3D-modeller är särskilt värdefulla för studenter med visuell eller kinestetisk lärostil. Fysiska modeller som kan cirkulera i klassrummet och hanteras av studenter visar sig ha en positiv inverkan på studenternas engagemang, förståelse och långsiktiga kunskapsbildning [2].

Detta arbete utgår från denna pedagogiska ansats och syftar till att ta fram 3D-skrivna undervisningsmodeller för centrala begrepp inom hållfasthetslära. Fokus ligger på instabilitetsfenomen och deformation av balkar. Dessa valda områden är ofta svåra att tillämpa praktiskt för studenter eftersom de innebär en kombination av matematisk förståelse, rumslig visualisering och insikt i strukturella samband. Genom att konkretisera dessa begrepp i form av fysiska modeller ges studenterna möjlighet att observera och utforska hur olika randvillkor påverkar knäckningsbeteende, eller hur förändringar i tvärsnittsgeometri påverkar tröghetsmoment samt balkens böj-

styvhet.

I en studie där liknande modeller användes inom maskinkonstruktionskurser, rapporterade 88% av studenterna att de fysiska modellerna hjälpte dem att bättre förstå kursens centrala tekniska koncept [2]. Resultaten indikerar att 3D-modeller inte enbart stärker förståelsen av enskilda begrepp, utan också bidrar till utvecklingen av så kallad metavisuell kompetens. Detta inkluderar förmågan att tolka, värdera och tillämpa tekniska visualiseringar kritiskt och korrekt [1]. Denna kompetens är av stor betydelse i ingenjörsyrket, där visuella och symboliska representationer av verkligheten är centrala arbetsredskap.

2.2 Instabilitetsfenomen

Instabilitet är ett centralt begrepp inom hållfasthetslära och konstruktionsanalys, särskilt när det gäller slanka strukturer som utsätts för tryckkrafter. Ett klassiskt exempel på ett instabilitetsfenomen är Eulers knäckfall, som beskriver hur en lång, slank balk eller pelare deformeras vid en viss kritisk belastning. Denna kritiska last, även kallad knäcklast, beror på flera faktorer, däribland materialets egenskaper, geometrin på elementet samt hur det är upplagt eller inspänt i sina ändar. Beroende på hur balken är inspänd förändras både böjningsmönstret och den kraft som krävs för instabilitet. Denna princip är viktig inom hållfasthetslära och används för att dimensionera konstruktioner.

2.3 Böjstyvhet

Böjstyvhet beskriver motstånd mot böjning under belastning hos ett material eller en konstruktion. Det beror på materialets elasticitetsmodul och tvärsnittets yttröghetsmoment. Yttröghetsmoment beskriver en geometrisk egenskap hos en yta som påverkar dess motstånd mot böjning. Böjstyvhet är en central parameter inom hållfasthetslära för att säkerställa att konstruktioner upprätthåller sin form och funktion under böjning.

2.4 Vridstyvhet

Vridstyvhet beskriver ett objekts förmåga att motstå vridning när det utsätts för ett vridmoment eller excentrisk last. Vid vridning av balkar med icke-cirkulära tvärsnitt till exempel T- eller I-profiler uppstår ofta en komplex deformation som kallas buckling, där tvärsnitten inte längre förblir plana. Dessutom kan höga vridmoment i tunna väggar leda till lokala bucklingfenomen, vilket ytterligare påverkar balkens bärförmåga.

2.5 Filament

PLA och PETG är två polymera material som är vanligt förekommande i form av filament för 3D-utskrift. Materialen har särskilda egenskaper som gör att de lämpas olika väl för olika ändamål. PETG har bättre hållfasthet än PLA men framställs från olja och är ej bionedbrytbart, däremot går det att återvinna. PLA är istället en förnybar resurs som är helt bionedbrytbar och framställs av stärkelse från diverse naturliga råvaror. Dock är den något skörare än PETG och inte lika värmebeständig. [7]

TPU är också ett polymert material likt PLA och PETG men dess egenskaper skiljer sig avsevärt. Till skillnad från PLA och PETG är det elastiskt även vid lägre temperaturer och klarar upprepade böjningar utan att spricka. TPU tillverkas av fossila råvaror och är ej bionedbrytbart men kan i vissa fall återvinnas. Dess unika egenskaper gör det särskilt lämpligt för tillämpningar där flexibilitet är viktigare än hållfasthet.

2.6 CDIO

Den metod som används i projektet är CDIO, ett ramverk som tillämpas globalt inom ingenjörsutbildningar. CDIO står för Conceive → Design → Implement → Operate [8]. Conceive innebär idégenerering och konceptframtagning. Design syftar till att utveckla detaljerade 3D-modeller i CAD-program. Implement avser tillverkningsprocessen genom 3D-skrivning. Operate fokuserar på modellernas praktiska tillämpning inom universitetsundervisning och utbildningssammanhang.

3

Metod

Detta kapitel beskriver de metoder som använts för att utveckla och utvärdera projektets slutprodukt. Arbetet har följt en iterativ process med fokus på kravställning, idégenerering, utvärdering och prototyputveckling.

3.1 Verktyg och krav

Arbetet har genomförts med följande verktyg och utifrån definierade krav på funktion, tydlighet och användbarhet.

3.1.1 Mjukvara

Autodesk Fusion är den CAD-mjukvara som nyttjats i arbetet. Fusion har enkel användarvänlighet och smidig projektdelning. Vidare nyttjar Fusion molnlagring för filhantering, vilket minimerar risken för förlorad data och gör att flera individer samtidigt kan arbeta i ett projekt och göra ändringar, utan att behöva skicka filer mellan användare. Autodesk som är företaget bakom Fusion erbjuder studentlicenser som kan förnyas årligen, tillgängliga för alla berättigade studenter [9].

Vid framtagandet av den fysiska produkten krävs ett slicerprogram som översätter 3D-modellen till ett format som kan tolkas av 3D-skrivaren. I detta arbete användes PrusaSlicer, vilket möjliggör konvertering av STL-filer från CAD-mjukvaran till G-kod. För att beräkna och visualisera den verkliga knäckningen för olika ramar och balkar används beräknings- och simuleringsprogrammet Ansys.

3.1.2 Hårdvara

Kompatibilitet med flera typer av skrivare är önskvärt för att fler personer ska kunna nyttja modellerna. Under arbetets gång har i huvudsak skrivare av modellerna Prusa i3 MK3S och Prusa MK4 nyttjats. Båda skrivarna rymmer utskrifter med en storlek på 250 mm x 210 mm x 210 mm (bredd x djup x höjd), vilket kan anses vara en relativt genomsnittlig storlek för icke-kommersiella 3D-skrivare.

3.1.3 Inställningar vid utskrift

De vanligaste inställningarna vid utskrift var 15% ifyllnad och användning av inställningen *brim*. För vissa delar, såsom bordsfästena, se figur 3.17, krävdes även supports. Inställningar för ifyllnad och utskriftshastighet återfinns i bilaga C.1 och C.2.

Inställningarna i PrusaSlicer varierade beroende på materialval. För PLA, PETG och TPU utgör den största skillnaden den maximala volymetriska flödes hastigheten, som uppgår till 15,8 respektive 1,2 mm²/s. Övriga materialparametrar specificeras i bilagorna C.3 till C.5.

3.1.4 Kravspecifikation

För att se till att projektet uppfyller praktiska och funktionella behov skapades en kravspecifikation. En tydlig kravspecifikation med mätbara krav är väsentlig för att leda utvecklingen i rätt riktning, säkerställa att lösningen uppfyller förväntningarna samt vid utvärdering av slutprodukten. Kraven delades in i två kategorier: krav (K), som måste uppfyllas för att projektet ska anses vara lyckat och önskemål (Ö), som var eftersträvansvärda men inte kritiska. Kraven har identifierats utifrån två huvudsakliga källor. Dessa var projektbeställarens krav, som angav specifika behov och förväntningar, samt extern informationsinsamling, där faktorer som pedagogiska principer och tekniska begränsningar har beaktats.

Ett exempel på ett krav (K) är att den slutliga modellen ska kunna skrivas ut på en skrivbädd med volymstorleken 250x210x210 mm. Exempel på önskemål (Ö) är att slutprodukten ska bestå av hundra procent 3D-utskrivna delar. För den fulla kravspecifikationen se bilaga A.1.

3.2 Idégenerering

Inom ramen för projektet specificerades inget specifikt utbildningsexempel, vilket gav breda möjligheter för tillämpning. Diskussion av potentiella fenomen inom hållfasthetslära utfördes där ett flertal identifierades. Dessa var sprickpropagering, instabilitet, balkdeformation, ramverk, spänningskoncentreringar och materialprov. Utifrån dessa valdes instabilitet och balkdeformation med specificering inom knäckning och balkböjning. Valet av dessa områden ansågs godtyckligt på grund av deras relevans inom ämnet och deras initiala tillämpningspotential. Ett flertal skisser på potentiella modeller skapades för de två fenomenen som en grund för vidareutveckling.

3.2.1 Uppdelning av delsystem

För att skapa en flexibel och pedagogiskt användbar modell baserad på de valda fenomenen, knäckning och balkböjning, identifierades fem centrala delsystem utifrån tidigare skapade skisser. Dessa valdes ut eftersom de återkom i flera av de lösningsidéer som utvecklades under idégenereringen och utgjorde gemensamma byggblock oavsett inriktning. Varje delsystem har en tydlig funktion kopplad till modellens övergripande syfte. De fem delsystemen blev följande:

- **Balkar:** Dessa utgör föremålet som utsätts för belastning, antingen genom böjning eller knäckning.

- **Rigg:** Modellens ryggrad där resterande delar fästs.
- **Fästen:** Den anordning som låter balkar fästas i riggen.
- **Kraftpåläggning:** Det delsystem som ser till att olika krafter i både magnitud och riktning kan tillföras till modellen.
- **Visualisering:** Hur olika deformationer och knäckningar visualiseras och mäts i modellen

Dessa delsystem är gemensamma för projektets båda inriktningar och utgjorde grunden för den efterföljande lösningsgenereringen.

3.2.2 Lösningsgenerering

Lösningsgenereringen genomfördes utifrån delsystemen med hjälp av en brainstormingsession. Under sessionen dokumenterades olika idéer. Liknande förslag sorterades bort för att få enkla och tydliga alternativ för varje delsystem, se bilaga A.2. För delsystemet balkar gjordes ingen idégenerering eftersom det inte fanns behov av att ta fram nya sätt att utforma eller tillverka balkarna. De återstående idéerna kombinerades till 20 kompletta system. Detta antal valdes för att skapa många olika modeller att arbeta vidare med och öka chansen att hitta ett fungerande helhetskoncept. Se bilaga A.3 för delsystemkatalogen i sin helhet.

3.2.3 PUGH-matris

För att jämföra de olika modellerna med varandra utvärderades dessa mot en referensmodell i en PUGH-matris. Detta för att få fram den bästa lösningen utifrån några av de krav och önskemål som ställts på den färdiga modellen i kravspecifikationen. För instabilitetsfenomen jämfördes modellerna utifrån kriterierna *100% 3D-skrivna delar*, *Avläsa resultat ner till 1 mm*, *Distributionsmöjligheter* och *Få separata delar*. *Distributionsmöjligheter* innebär möjligheten att smidigt skicka modeller mellan olika parter. *Få separata delar* är antalet olika delar som behövs i varje modell. Skillnaden för balkdeformationsmodellen var att *Avläsa resultat ner till 1 mm* har bytts ut mot *Skalbarhet*. Detta för att få in en viktning hur enkelt det är att skala upp och ner modellen för att se deformationen i tvärsnitten. De resulterande mest optimala lösningarna var modell 16 för instabilitet och modell 19 för balkdeformation, se bilaga A.4.

3.3 Rapid prototyping och utvärdering

Primära versioner av de valda delsystemeskoncepten ur PUGH-matrisen modellerades i CAD. Fysiska prototyper skrevs sedan ut med hjälp av 3D-skrivare och utvärderades utifrån prestanda och design. Vid varje därefter genomförd utskrift av modellerna identifierades brister och förbättringsområden. Dessa uppdaterade versioner skrevs sedan ut och testades på nytt. I linje med CIDO har denna iterativa cykel av *design* → *utskrift* → *test* → *optimering* upprepats tills fullgod funktion åstadkommits för båda modellerna.

3.4 Framtagning av instabilitetsmodell

De parametrar som utvärderades för instabilitetsmodellen var hur väl delsystemen passade ihop med varandra, hur väl modellen stämde överens med det förväntade resultatet för de olika knäckfallen och hur enkelt det var att ändra mellan olika knäckfall.

Balkar

Inledningsvis designades balkarna för att finna en tjocklek som väl lämpades för visualisering av Eulers fem knäckfall. Efter flertalet försök med både PLA och PETG nåddes slutsatsen att två millimeter var en bra tjocklek för att balken skulle ha en tillräckligt stor elastisk deformation. Den valda tjockleken medförde även att valet av ovanstående filament inte hade någon nämnvärd betydelse för de hållfasta egenskaperna. Balkarna designades på ett sätt där bredden var avsevärt mycket större än tjockleken, detta för att säkerställa att knäckning endast skedde i ett plan. Balkarna designades även i en kortare version där längden halverades för att möjliggöra uppbyggnaden av balksystem.

De två färdigdesignade balkarna är de två till höger i figur 3.1. För att få till en fästpunkt i varje ände av balkarna designades ett balkfäste som möjliggjorde både ledad och fast inspänning. Utöver de fem ordinarie knäckfallen och balksystem fanns även idéer kring att illustrera knäckning av en fjäderledad balk. Två olika varianter utformades inledningsvis. En med två balkar och en med tre balkar, grunddesignen för dessa fungerade bra men de behövde skalas upp för att balkarna inte skulle deformera plastiskt vid pålagd last. I figur 3.2 ses alla de olika iterationerna för de ledade balkarna.



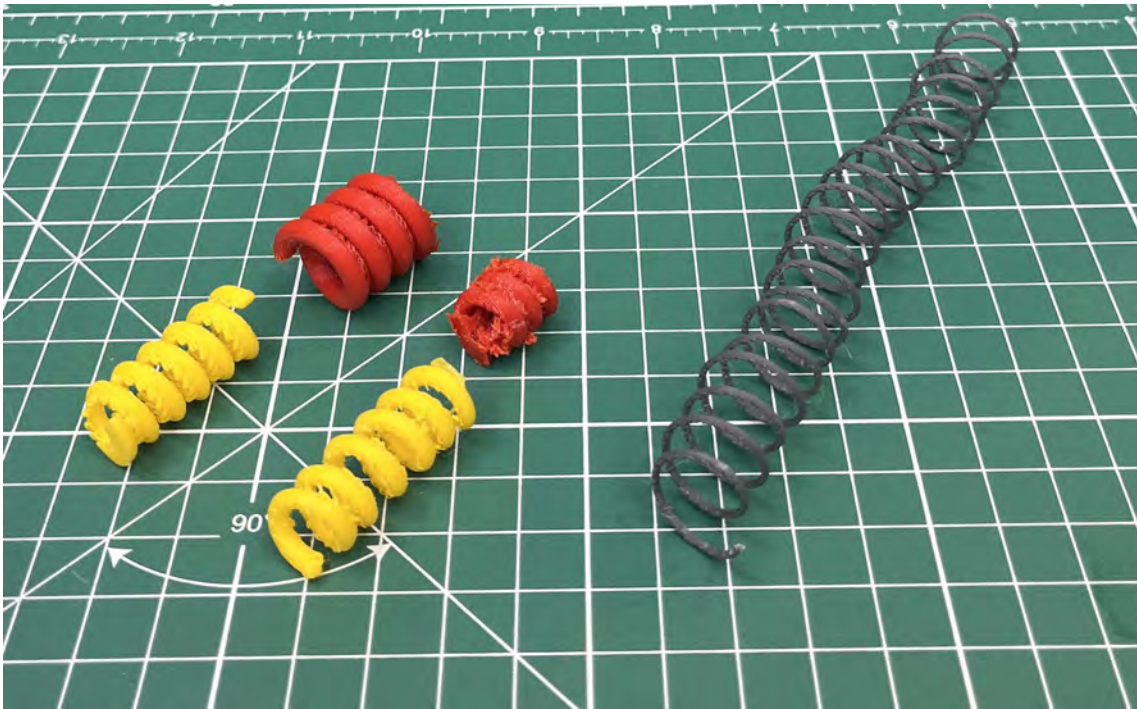
Figur 3.1: Slanka balkar i PLA & PETG.



Figur 3.2: Ledade balkar i PLA & PETG.

En första modell för tre ledade balkar skrevs ut och testades vilket ses i figur 3.4. Denna modell nedprioriterades vidare under projektets gång för att lägga tid på mer centrala delar, till exempel hur dragkraften skulle implementeras i modellen med två ledade balkar och hur modellen med plana ramar skulle designas.

För att få till dragkraften som verkar i motsatt riktning mot knäckriktningen behövdes någon form av återfjädring. Initialt påbörjades försök med att 3D-skriva fjädrar. Efter ett antal olika utskrifter som visas i figur 3.3 valdes denna metod bort. Den fjäder som eftersöktes var inte möjlig att 3D-skriva då utskriften ofta misslyckades och för de fjädrar som blev klara var antingen fjäderstyvheten för hög eller låg. Vid undersökning efter andra lösningar provades en fjäder till en kulspetspenna som både var för kort och deformerades plastiskt när den utsattes för last. För att få till den önskade draglasten valdes ett gummiband. Detta fungerade godtyckligt för modellen.



Figur 3.3: 3D-skrivna fjädrar i PLA och PETG.

Det krävdes en anordning att fästa gummibandet och flera olika iterationer testades. Slutresultatet blev ett gummibandspänne som fördes in från ena hållet av basen och en låsningshatt som monteras från andra hållet. Detta möjliggjorde att staven gled med gummibandet längs basen vilket kan ses i figur 3.5.



Figur 3.4: Tidig iteration av modellen med treledad balk.

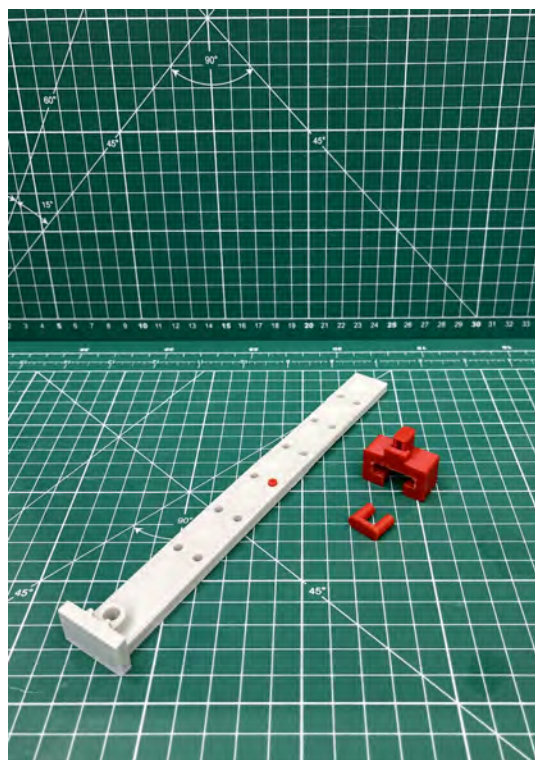


Figur 3.5: Jämviktsläge med två leder.

Riggen

Riggen för instabilitetsmodellen utformades från början som en längre skena med ett block som kunde glida längs skenan likt en monorail. En monorail syftar på en linjär styrskena där blocket kan glida fram och tillbaka med låg friktion. Den fungerar som en enkelspårig mekanisk lösning som styr blockets rörelse längs en förutbestämd bana. I botten på basskenan och glidblocket satt ett hål där balkfästena monterades. Grundidén fungerade väl i de tidiga iterationerna men toleranser och storleken i allmänhet behövde förbättras. Hålen var alldeles för små och storleken på hela basen var för liten.

Därefter fanns en idé om att implementera en låsning mitt på knäckstaven för att kombinera två knäckfall på varandra. För att implementera detta gjordes två rader med hål längs basen och en liten låsningsbrygga som fästes i hålen, se figur 3.6, tänkt att låsa förskjutning i sidled av stavens mittpunkt. Detta resulterade dock i att balken gled igenom, då låsmekanismen var fast på en förutbestämd höjd. För att åtgärda detta gjordes ett spår mitt i basen i figur 3.7, med en ny del som fördes igenom hålet och som två halvlånga balkar kunde fästas i. Med denna metod var systemets mittpunkt alltid låst till translation rakt upp eller ner, därmed kunde två knäckfall visualiseras ovanpå varandra. Däremot var det svårt att få mittenfästet att hållas rakt. Därav implementerades samma låsningshatt som för de fjäderledade balkarna.



Figur 3.6: Första iterationen av riggen. **Figur 3.7:** Sista iterationen av riggen.

För att konstruera plana ramar krävdes ytterligare delar. En väldigt kort variant av basen utformades, som till stor del var identisk med den fullstora riggen. Utöver den-

na del designades även två små komponenter som sammanfogade den korta basens funktionalitet med möjligheten att föra in en balk. Den ena hade ett genomgående hål och den andra ett hål på vardera sida med ett definierat djup. Vid försök att nyttja delen med genomgående hål gick det snabbt att konstatera att den inte fungerade som förväntat eftersom friktionen mellan balk och vägg i hålet blev för låg, varpå den delen utslöts. Den andra fungerade relativt väl vid första iterationen, där endast mindre korrigeringar av toleranser var nödvändiga.

Fästen

För att minimera antal komponenter togs beslutet att implementera fästena från balkböjningsexperimenten med knäckfallsexperimenten. För att genomföra detta infogades en skåra på vardera sida av basen och dess kortare variant. Dessa möjliggör att baserna kan monteras på samma infästningssystem som balkböjning. Detta fungerade som förväntat vid första iterationen, toleranserna ökades dock iterativt för att säkerställa god passform vid alla utskrifter.

Kraftpåläggning

Enligt modell 16 ur PUGH-matrisen nyttjas handkraft som kraftpåläggningsmetod och ingen komponent behövde därav tillverkas. Behovet att säkerställa att kraften alltid angrep systemet från samma riktning var däremot av stor vikt. Detta gick att säkerställa med hjälp av det tidigare nämnda glidblocket.

Visualisering

Delsystemet visualisering syftade ursprungligen till att skapa en lösning för att mäta modellens utböjning. Denna funktion valdes däremot att nedprioriteras och fokus lades istället på jämförelse mellan fall samt taktilitet.

3.5 Framtagning av balkdeformationsmodell

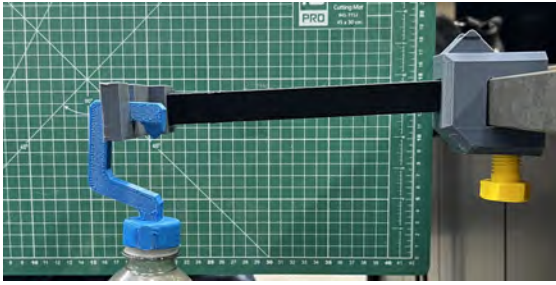
För balktvärsnitten fokuserade utvärderingen främst på utformningen av de olika balkarna, särskilt vid infästningen i fästansordningen. Varje balk behövde kunna fästas på ett likvärdigt sätt oavsett tvärsnitt. Det var också viktigt att säkerställa att varje balk fick rätt utböjning när den väl var monterad.

Balkar

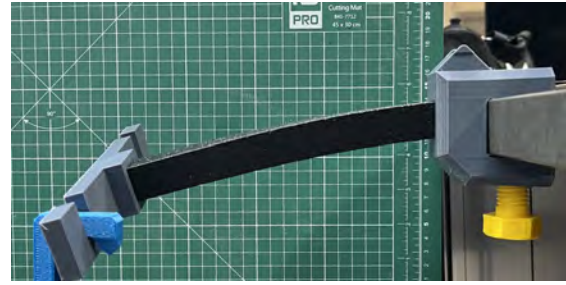
Det första steget i arbetet var att bestämma vilka tvärsnittsformer som skulle inkluderas i projektet. Inledningsvis valdes vanligt förekommande tvärsnittstyper, såsom I-balk, kvadratisk och rektangulärt tvärsnitt. I ett senare skede av projektet bredades urvalet till att även omfatta C och T-profiler, i syfte att möjliggöra en mer omfattande analys av skillnader i utböjning och vridstyvhet mellan olika tvärsnittsformer.

En viktig aspekt var att deformationer i form av utböjning och vridning skulle kunna observeras. Inledningsvis tillverkades balkarna i PLA men det visade sig att materialets höga styvhet försvårade möjligheten att uppnå synliga deformationer vid belastning, se figur 3.8. För att möjliggöra tydligare och mer visuell utböjning

valdes därför TPU, ett mjukare och mer flexibelt material, se figur 3.9.



Figur 3.8: Utbøjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och livtjocklek 2 mm i PLA.



Figur 3.9: Utbøjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och livtjocklek 2 mm i TPU.

Även efter skiftet till TPU minskades livets tjocklek för att få en så stor visuell utbøjning som möjligt. Liv- och flänstjockleken reducerades från 2,0 mm till 1,5 mm, vilket resulterade i en tydligare deformation vid belastning. Effekten av denna justering kan ses i figur 3.10 respektive figur 3.11.



Figur 3.10: Utbøjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och livtjocklek 2 mm i TPU.



Figur 3.11: Utbøjning med kvadratisk tvärsnitt, fläns och livtjocklek 1.5 mm i TPU.

Vid tillverkningen av balktvärsnitten valdes att alla modeller ska skrivas ut vertikalt, det vill säga ståendes från printbädden. Detta tillvägagångssätt ökade utskriftstiden men möjliggjorde utskrift utan behov av stödmaterial. Samtliga balktvärsnitt tillverkades på detta sätt för att säkerställa jämförbara egenskaper mellan modellerna, trots att C, T och rektangulära profiler hade kunnat skrivas ut liggande.

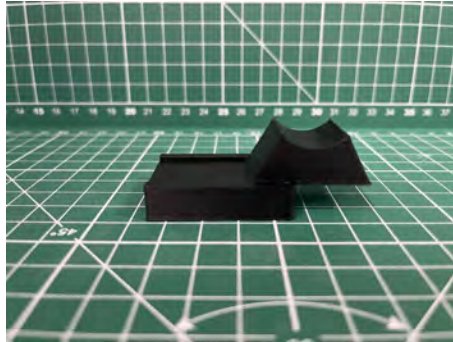
En tidig observation vid utskrift av den homogena rektangulära balken var att standardinställningen för infill (15%) resulterade i en betydligt lägre täthet jämfört med övriga balkar. Detta blev tydligt vid vägning, där balkar med små livdimensioner (kvadratisk, I, T och C-profiler) vägde cirka 25 g, medan den rektangulära balken endast vägde 15 g. För att korrigera detta ökades infill-inställningen till 80%, vilket resulterade i en vikt på 23 g. Den justerade balken möjliggjorde därmed en mer rättvis jämförelse mellan de olika tvärsnitten.

Riggen

Riggen utvecklades på sådant sätt att både fast inspänning samt fri upplägning

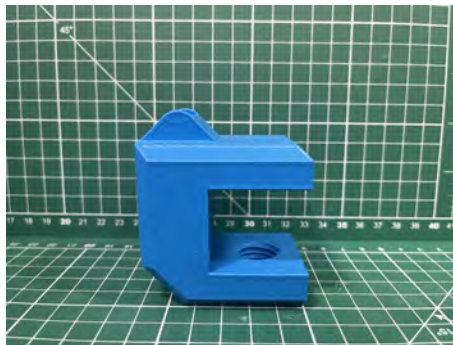
gjordes möjlig för balkarna. Den skulle vara tillräckligt styv med hög hållfasthet så att den inte skulle spricka vid användning och vara användarvänlig.

Tidiga koncept inkluderade triangulära klossar, avsedda att representera glidstöd respektive fritt upplagda stöd. För att efterlikna glidstöd utvecklades en enkel glidmekanism som integrerades i konstruktionen. Funktionaliteten utvärderades genom tester i mindre skala, se figur 3.12. Glidstödet gav väldigt bra resultat och bibehölls under fortsatt iterering.



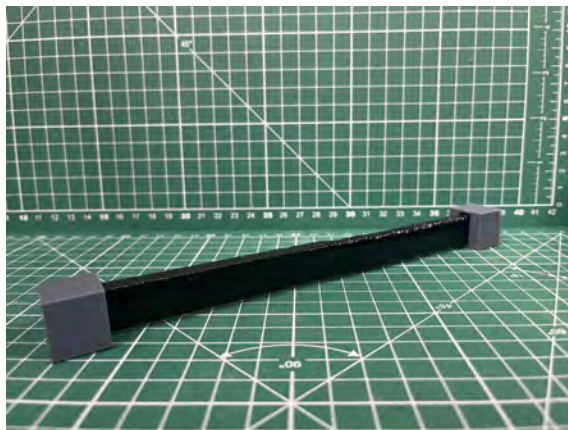
Figur 3.12: Prototyp för glidmekanism.

För det fritt upplagda stödet övervägdes initialt huruvida det skulle utformas som en separat komponent. För att minska antalet separata delar och öka användarvänligheten beslutades det att stödet skulle integreras direkt i bordsfästet, se figur 3.13.



Figur 3.13: Implementering av fritt upplagt stöd.

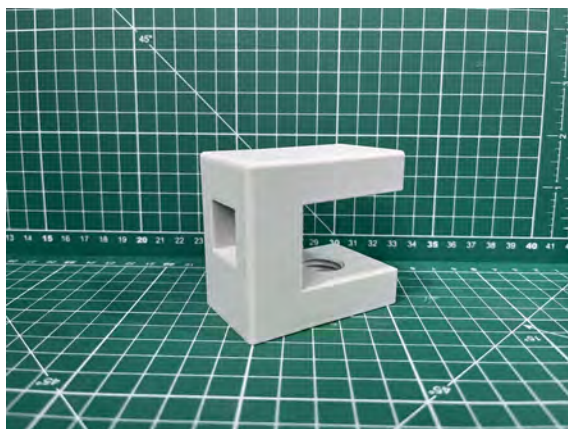
För att uppnå fast inspänning integreras ett hål i bordsfästet där balkarna kunde placeras och fixeras. Lösningen utvärderades löpande och hålets dimensioner justerades vid flera tillfällen för att uppnå bästa möjliga passform. För att möjliggöra användning av den rektangulära balken i riggen togs två stödordningar fram, se figur 3.14. Vilket gjorde det möjligt att både fixera balken med fast inspänning och placera den som fritt upplagd.



Figur 3.14: Stödadapter för att integrera rektangulär balk.

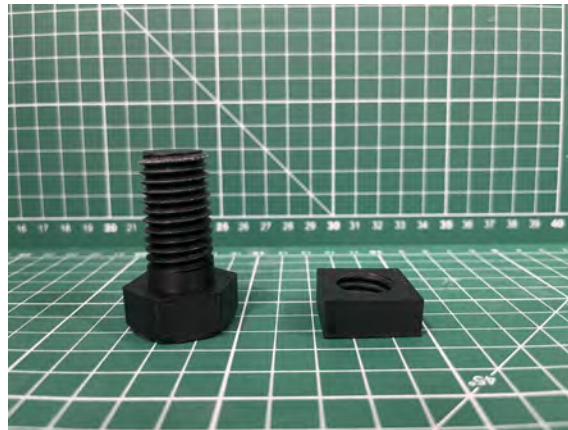
Fästen

Fästanordningen designades runt möjligheten att klämma fast det på ett bord. Lösningen inspirerades av en tving och en första iteration skapades, se figur 3.15.



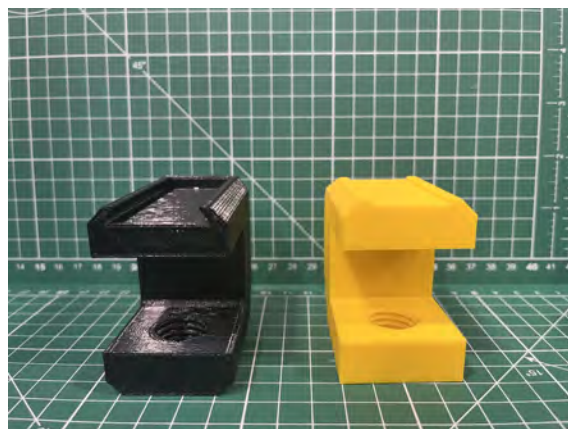
Figur 3.15: Första iterationen av bordsfästet.

För att klämma fast fästet i en bordskiva användes 3D-skrivna skruvar. Skruvarna följde ISO-standardern M16. Den första iterationen av den 3D-skrivna skruven visade sig ha för låg tolerans, vilket försvårade monteringen. För att justera passformen utfördes testutskriften med varierande toleranser i gängorna, se figur 3.16. Genom att minska hålets dimension med 0,1 mm både uppåt och nedåt förbättrades skruvens passform.



Figur 3.16: Test för skruv och gängor med olika toleranser.

Måtten ökades på glidfunktionen på bordsfästet. Detta gjordes, som tidigare nämnts, för att knäckfallsbasen skulle kunna användas med samma fästen. I figur 3.17 representerar den svarta klossen de nya dimensionerna och den gula de tidigare måtten.

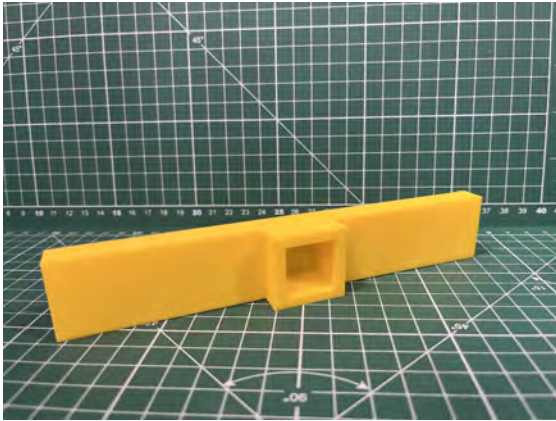


Figur 3.17: Dimensionsjustering av fästet i bordsfästet. Nya mått t.v, äldre mått t.h.

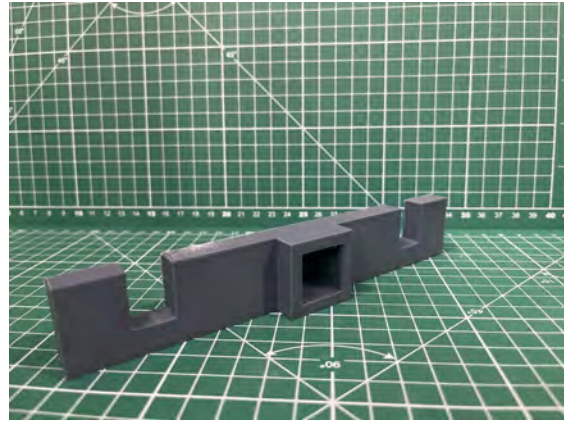
Kraftpåläggning

Metoden för kraftpåverkan behövde vara enkel och baserad på lättillgänglig utrustning. Som lastbärare valdes en PET-flaska, dessa är lättillgängliga och enkla att hantera. En krok konstruerades för att koppla petflaskans vikt till balken.

Vridstyvhet identifierades också som en relevant parameter för balkdeformation. Genom manuell vridning kunde en tydlig känsla erhållas för vilka tvärsnitt som var mest vridstyva. För att tydligare demonstrera detta tillverkades ett första verktyg, illustrerat i figur 3.18. Efter denna iteration uppstod behovet av att även kunna applicera kraft på handtaget. Handtaget modifierades därför med skårar, vilket möjliggjorde kraftpåläggning med kroken, se figur 3.19.



Figur 3.18: Första iterationen av vrid-
verktyget för visualisering.



Figur 3.19: Slutgiltigt vridverktyg, med
skåror för kraftpåläggning.

Visualisering

Efter överväganden beslutades att genomföra en kvalitativ analys av utböjningen i stället för en kvantitativ. Därav beslutades att ha liknande parametrar mellan fall för att de enkelt skulle gå att jämföra.

3.6 Studentintryck av modeller

En kvalitativ utvärdering av de slutgiltiga modellerna genomfördes med hjälp av den tilltänkta målgruppen för projektet. Två olika förutbestämda test och instruktioner gavs till testpersonerna för de två inriktningarna. Tio förstaårsstudenter från civilingenjörsprogrammet inom maskinteknik respektive samhällsbyggnadsprogrammet valdes ut. Detta är elever som läser sina första kurser i hållfasthetslära. Inga andra faktorer påverkade urvalet. Syftet med de båda utvärderingarna var att undersöka om de fysiska modellerna hjälpte förståelsen för studenter som läser introduktionskurser inom hållfasthetslära.

För modellen med deformation av balkar gick utvärderingen ut på att avgöra vilket balktvärsnitt som stod emot vridning och kraftbelastning bäst. Fem balkar med olika tvärsnitt placerades framför testpersonen. De uppmanades sedan att perceptuellt rangordna balkarna från störst till minst deformation. Sedan spändes var och en av balkarna fast i bordsfästet och testpersonen lade manuellt på ett moment i den fria änden av balken. Detta gjordes för alla balkar innan testpersonen fick åter rangordna balkarna.

För att utvärdera instabilitetsmodellen fick testpersonen ett papper där två olika plana rammar var uppritade, samt en pålagd kraft. Testpersonen ritade in hur denne trodde att deformationen skulle se ut. Därefter fick testpersonen möjligheten att bygga ihop de uppritade ramarna fysiskt med hjälp av de utskrivna modellerna. Kraften applicerades enligt anvisningarna och den verkliga knäckningen i modellen observerades. Testpersonen fick på nytt rita deformationen av ramen på ett papper för att sedan jämföra de två resultaten.

3.7 Tillgänglighet

Enligt kravspecifikationen ska de framtagna 3D-modellerna vara enkla att distribuera till allmänheten. För att verifiera detta krav genomfördes ett praktiskt test där modellerna exporterades i standardformatet STL (.stl), vilket är kompatibelt med de flesta 3D-skrivare och slicerprogram. Därefter skickades modellerna till två externa testpersoner. Båda testpersonerna använde sina egna 3D-skrivare och tillhörande mjukvara för att förbereda och skriva ut modellerna utan ytterligare instruktioner.

4

Resultat

Detta kapitel behandlar alla de resultat som uppnåtts under projektets gång. Alla slutgiltiga komponenter, kravuppfyllnad och målgruppens intryck presenteras.

4.1 Slutlig iteration

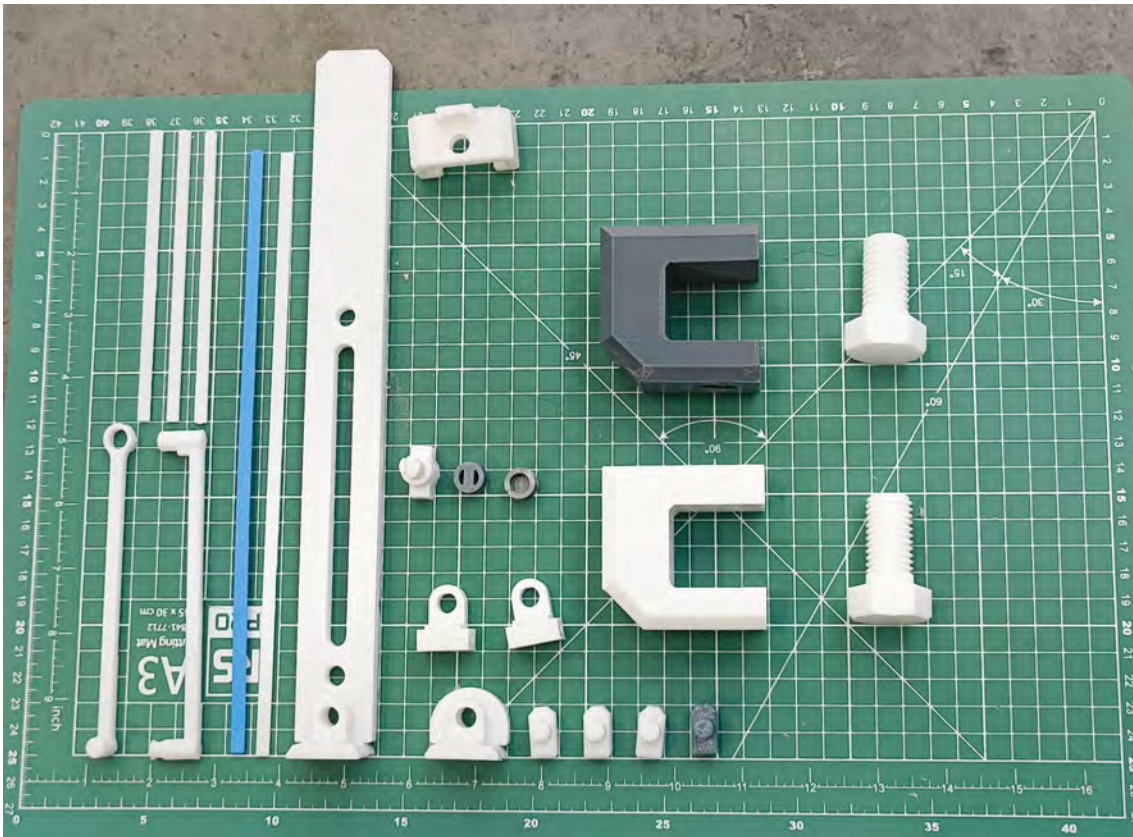
Resultatet av projektet blev två 3D-skrivna modellsatser. Den första modellen visualiserar instabilitetsfenomenet inom hållfasthetslära genom de fem klassiska Eulerfallen, knäckning av plana ramar och knäckning av fjäderledade balkar. Den andra modellen visar fenomenen balkböjning och balkvridning samt hur olika balktvärsnitt påverkas av både punktlaster och vridande moment. Båda modellerna använder samma bordsfäste som kan ses i figur 4.12. Detta för att simplificera och minimera antalet komponenter.

Resultatet från PUGH-matrisen i bilaga A.4 visade att modell 16 var en lämplig modell att jobba vidare med för instabilitetsfenomenen. För balkdeformationen visade sig modell 19 vara lämplig. Detta resultat kom från att modell 1 agerade referens och alla resterande modeller jämfördes mot denna. Både modell 16 och modell 19 stack ut i jämförelsen på ett positivt sätt och valdes ut för att jobba vidare med.

4.1.1 Slutlig modell för instabilitetsfenomen

Utifrån delsystemen i modell 16 designades tio olika modeller som tillsammans kan påvisa de fem knäckfallen, knäckning av fjäderledade balkar och knäckning av plana ramar. I figur 4.1 visas alla ingående komponenter. Hela modellen skrivs ut med filamentet PLA. Detta gör att alla delar till modellen kan skrivas ut samtidigt i samma 3D-skrivare.

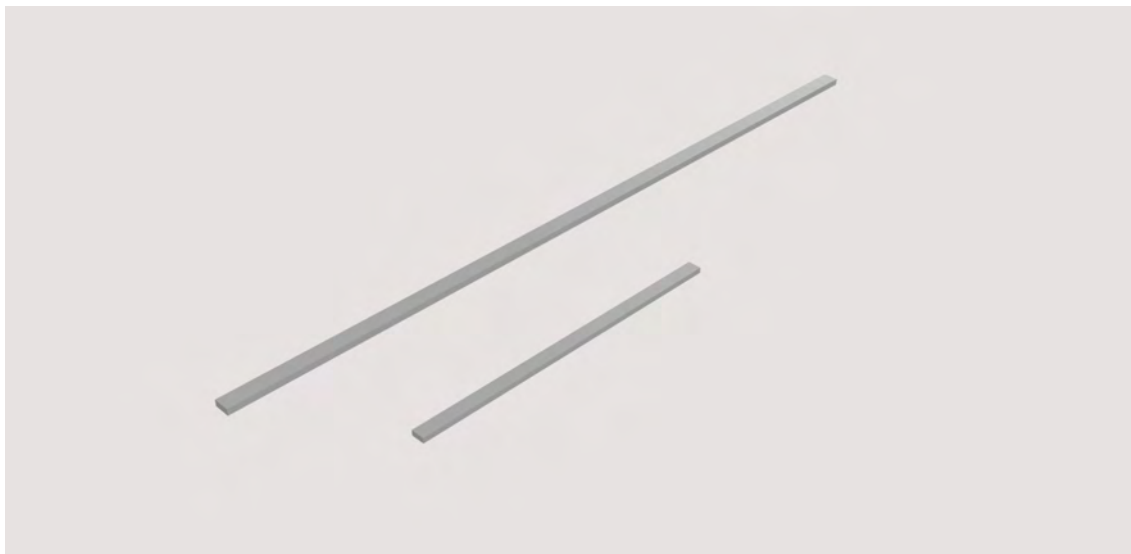
4. Resultat



Figur 4.1: Komplet kit för modell av instabilitetsfenomen bestående av samtliga 3D-skrivna komponenter, infästningar samt mekaniska delar.

Knäckstav

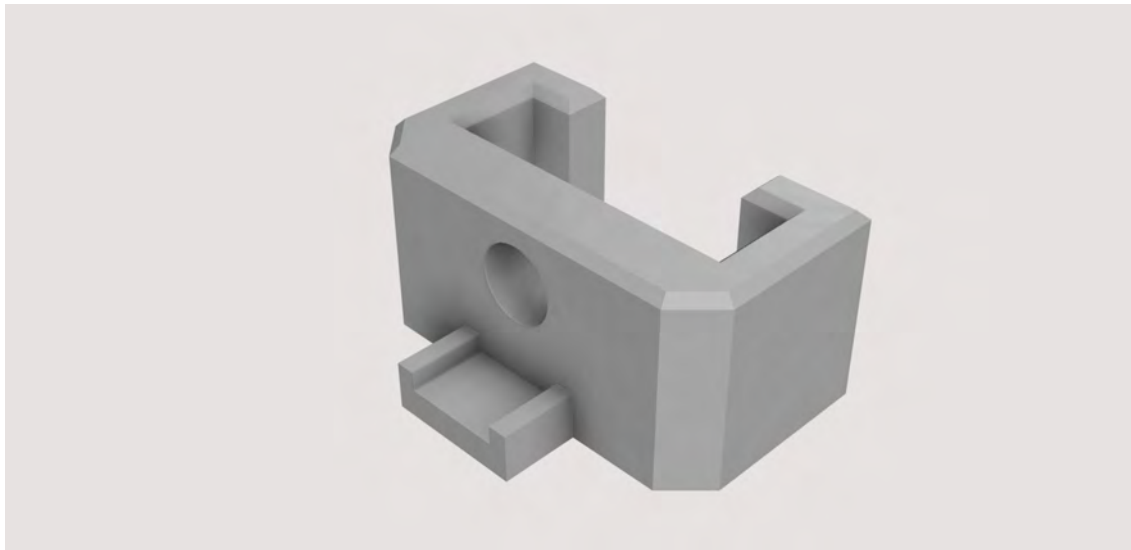
Knäckstaven i figur 4.2 är ett tunt rätblock och är den del av modellen som visar deformationen. Den lite längre knäckstaven till vänster används primärt vid analys av de fem Eulerfallen var för sig, medan den högra används för att bygga plana ramar. Den långa knäckstaven har dimensionerna 5x2x240 mm och den korta har dimensionerna 5x2x120 mm.



Figur 4.2: Knäckstavar i två olika längder, till vänster $5 \times 2 \times 240$ mm och till höger $5 \times 2 \times 120$ mm.

Glidblock

Glidblocket som ses i figur 4.3 träs på basen och är den övre fästpunkten för knäckstaven. Hålet i blocket används för att montera ett balkfäste i fast inspänt eller glidledat läge. Flänsarna på baksidan av blocket begränsar dess rörelse till ett led.



Figur 4.3: Glidblock konstruerat för att möjliggöra linjär rörelse i syfte att illustrera instabilitetsfenomenen.

Balkfästen

Balkfästena möjliggör att knäckstaven kan fästas i glidblocket och basen. Samma balkfäste kan antingen vara fast inspänt eller glidledat beroende på hur dessa orienteras vid montering. Till höger i figur 4.4 ses ett fäste som är orienterat för att vara glidledat. Den fasade delen av fästet kan rotera fritt. Till vänster i samma figur ses

ett fast inspänt fäste. Den rektangulära formen låser all form av rotation och fästet blir fast inspänt.



Figur 4.4: Balkfästen i två olika orienteringar. Används för att illustrera varierande typer av inspänningar av knäckstaven.

Bas

Basen ses i figur 4.5 och består av en fot med en parallelltrapets som tvärsnitt. Detta för att kunna montera basen i skenan på toppen av bordsfästet i figur 4.12. På foten sitter även ett hål för att montera ett balkfäste. I ryggen av basen finns det två hål och ett spår. Hålen är till för att kunna fästa basen på en vägg. Spåret är till för att kunna leda knäckstaven på flera ställen för en mer komplex knäckning.



Figur 4.5: Basen för instabilitetsfenomenen.

Hörnled

Hörnleden i figur 4.6 används för att bygga ihop plana ramar där både vertikala

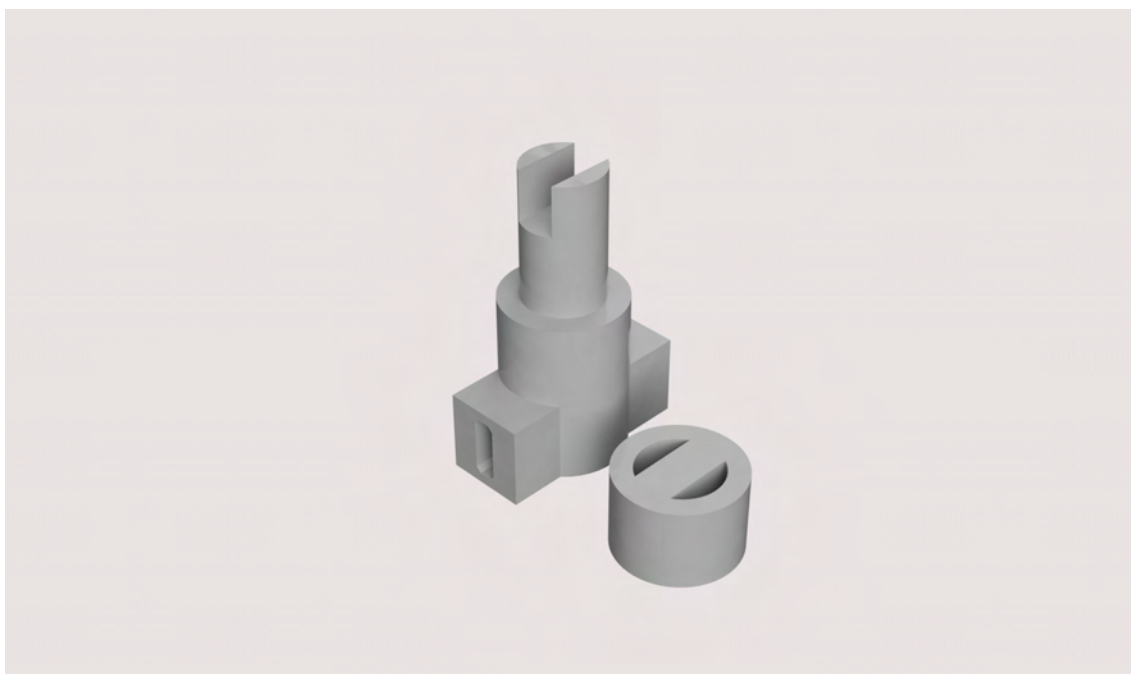
och horisontella balkar ingår i samma modell. Hörnleden har också ett hål för ett balkfäste som möjliggör både ledade och fast inspända tvärbalkar.



Figur 4.6: Hörnled för att möjliggöra uppbyggnad av plana ramar.

Spänne

Spännen används för att leda en balk på fler ställen än bara i ändarna. Spännena skjuts in i spåret i basen. Den runda modellen längst till höger i figur 4.7 är en låshatt för att låsa fast spännet i spåret.

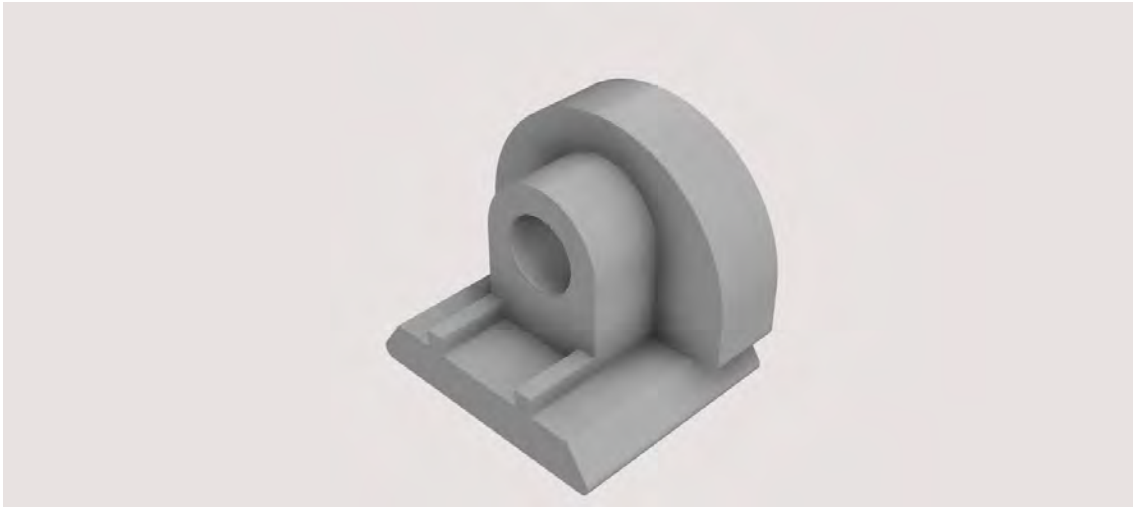


Figur 4.7: Spänne för att leda en balk på mitten.

Basfäste

Basfästet i figur 4.8 har samma design som foten till basen i figur 4.5. Den fästs i

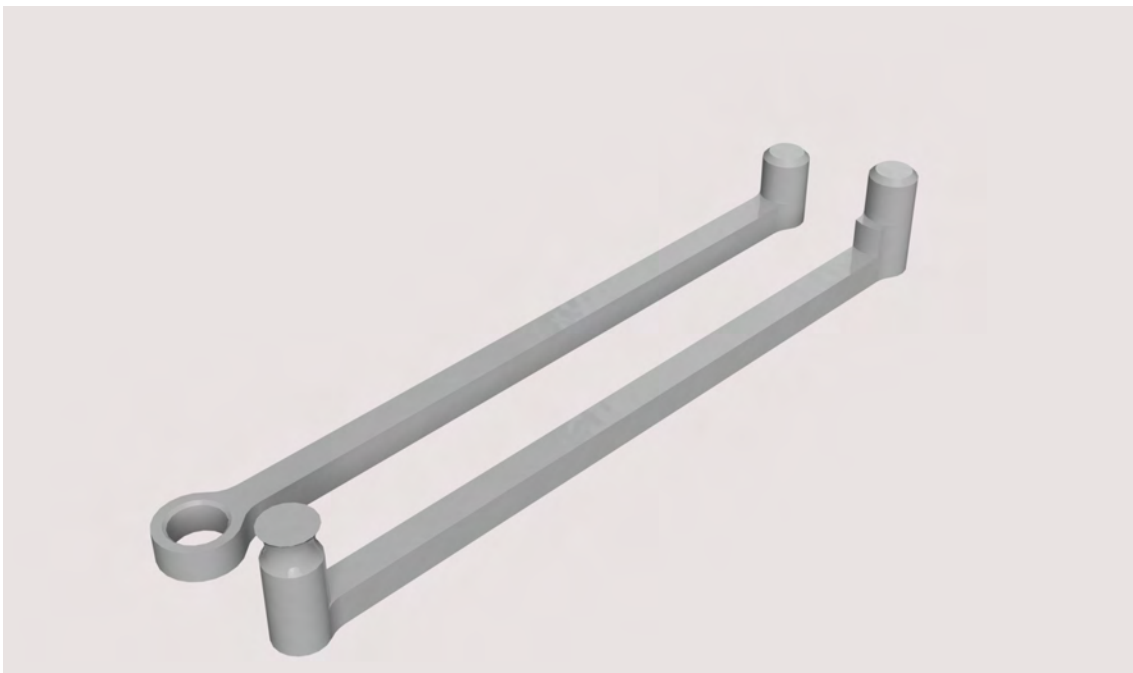
bordsfästet i figur 4.12 likt basen och fungerar som ett bottenfäste för plana ramar där ryggen i basen inte behövs.



Figur 4.8: Ett kortare basfäste som möjliggör infästning med två bordsfästen vid uppbyggnad av plana ramar.

Fjäderledade balkar

I figur 4.9 ses två balkar som används vid analys av fjäderledade balkar. Utsticket med ett rundat spår skjuts in i hålet på den andra balken. Detta för att få en lång ledad balk. Utsticken utan spår agerar fästpunkter till basen och glidblocket. Tillsammans med dessa balkar behövs även ett gummiband som träs på utsticket med det rundade spåret.



Figur 4.9: Två ledade balkar för visualisering av fjäderledad knäckning.

Gummibandsfäste

Gummibandsfästet till vänster i figur 4.10 nyttjas tillsammans med de båda fjäderledade balkarna. Fästet förs in i spåret på framsidan av basen och låses genom att nyttja samma låshatt som används för spännet i figur 4.7. På fästet finns ett rundat spår som blir den andra fästpunkten för gummibandet.

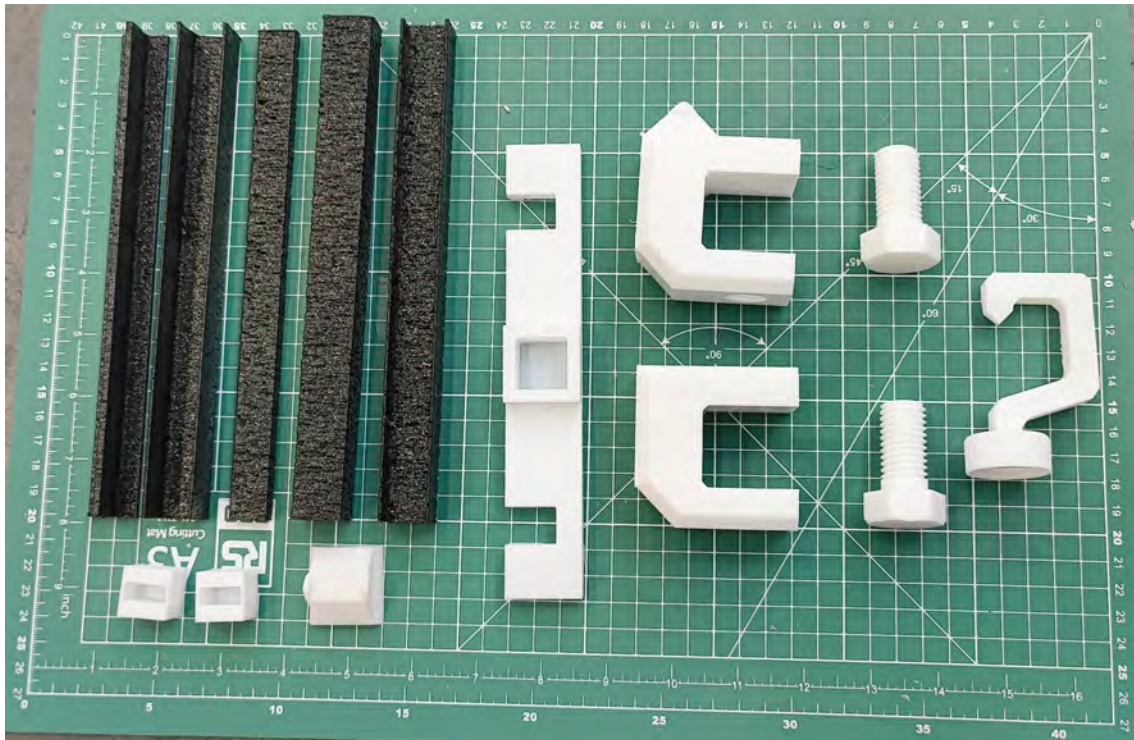


Figur 4.10: Gummibandsfäste med låshatt för fjäderledade balkar.

4.1.2 Slutlig modell för deformation av balk

Modellen som illustrerar utböjning och vridning av balkar baseras på modell 19 och består av de komponenter som visas i figur 4.11. Balkarna är 3D-utskrivna i TPU, medan övriga delar är utskrivna i PLA. Tillsammans möjliggör dessa komponenter en visuell demonstration av de olika deformationstyperna.

4. Resultat



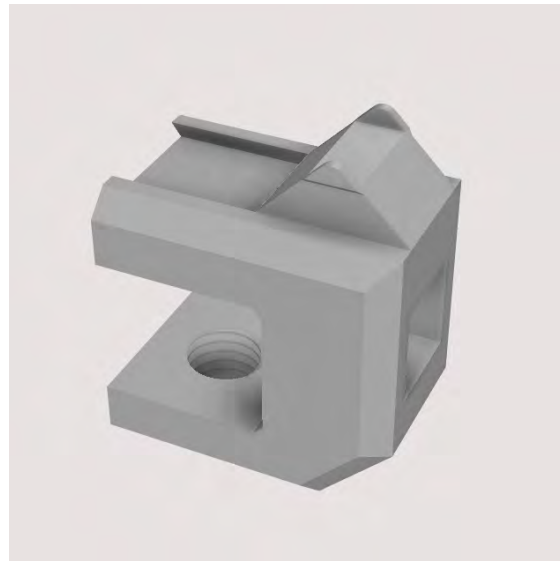
Figur 4.11: Komplet kit för modell av balkdeformation bestående av samtliga 3D-skrivna komponenter och infästningar.

Bordsfäste

Bordsfästet är uppdelat i två snarlika delar. Båda fästena har en inspänningsdel där balkar fixeras för att demonstrera fast inspänning, en klämma som fästs vid en plan ytas ytterkant (t.ex. ett bord) och en M16-gänga för att skruva fast klämman mot ytan (friktionsfäste). Skillnaden mellan delarna är den övre skenan. Bordsfäste 1 i figur 4.12 har ett spår för att montera ett rullstöd och Bordsfäste 2 i figur 4.13 har ett integrerat ledat stöd.



Figur 4.12: Bordsfäste 1 med en skåra för både basen och ett rullstöd.



Figur 4.13: Bordsfäste 2 med ett fast stöd för balkar och en skåra för basen.

Rullstöd

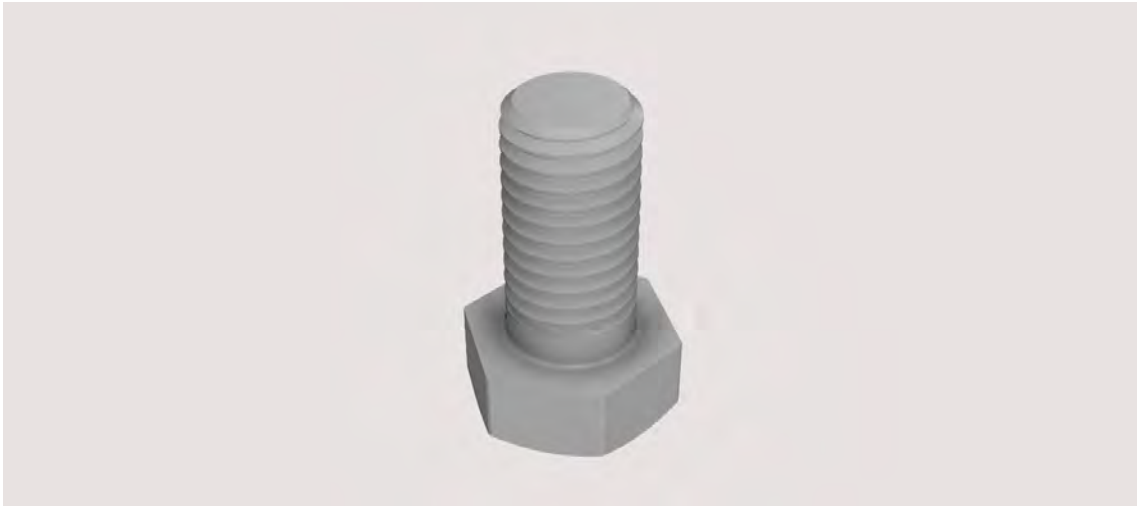
Rullstödet i figur 4.14 är utformat på samma sätt som det ledade stödet på Bordsfäste 2. Skillnaden är den nedre delen av stödet. Den är där utformad för att kunna röra sig horisontellt längs med spåret på Bordsfäste 1.



Figur 4.14: Rullstöd för att möjliggöra glidledat stöd vid undersökning av fritt upplagda balkar.

Skruv

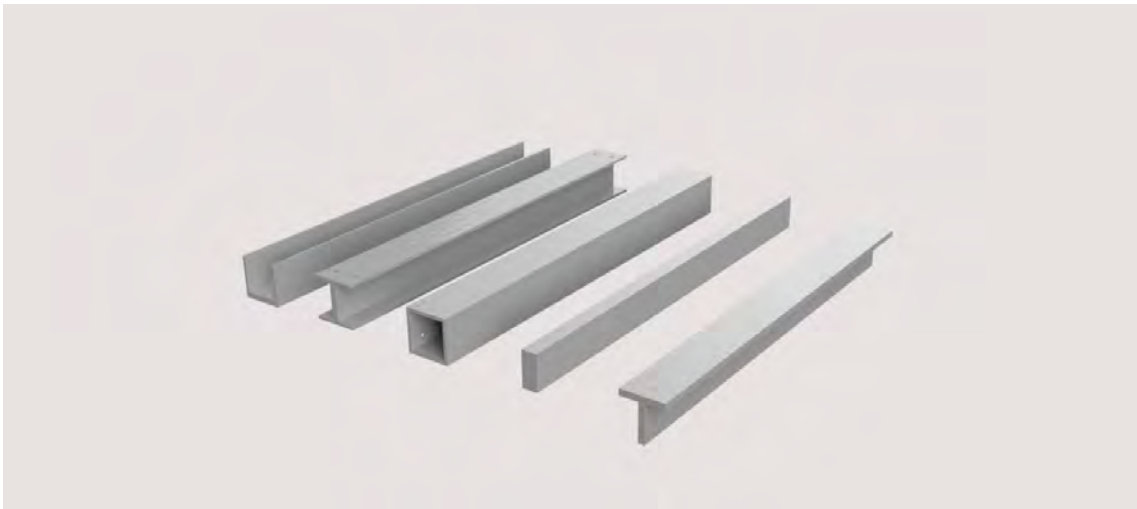
Modellerad M16-skruv enligt ISO-standard, se figur 4.15, används för att förankra bordsfästet i bordet.



Figur 4.15: M16 skruv för att få ett klämförband mellan bordsfäste och bordskiva på ett skrivbord.

Balkar

Fem olika balkar med identisk tvärsnittsarea visas i figur 4.16. Dessa används för att uppvisa utböjning för de båda randvillkoren. De används även till att visualisera böjstyvhet och vridning. Alla balkar är modellerade för att få plats i den fasta inspänningen och momentvredet.



Figur 4.16: C-balk, I-balk, balk med kvadratisk tvärsnitt, balk med rektangulärt tvärsnitt och en T-balk.

Krok

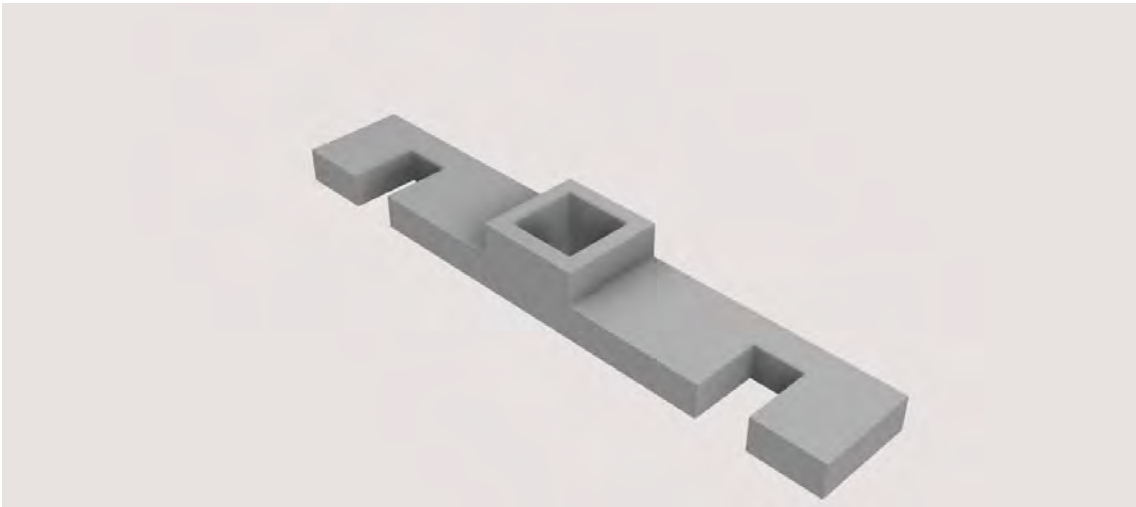
Kroken i figur 4.17 används för att montera en PET-flaska som lastbärare och möjliggöra visualisering av både utböjning och vridning av balkarna. Kroken är fäst på en kork hämtad från hemsidan Printables skapad av designer 3D-Academy [10]. Modellen har använts enligt creative commons (4.0 international license).



Figur 4.17: Krok med gängor för en PET-flaska att användas för punktlast.

Momentvred

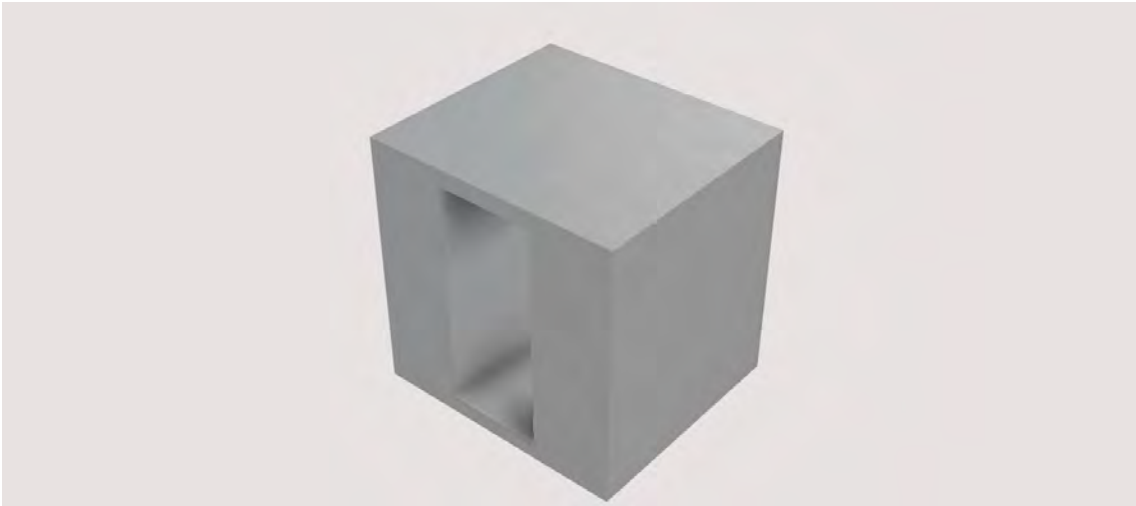
Momentvredet i figur 4.18, används för att visualisera vridning hos de olika tvärsnittsbalkarna. Den fästs över balkens ena ände och vrids antingen med handstyrka eller genom att hänga kroken i en av de två skårorna.



Figur 4.18: Momentvred för att lägga på ett vridande moment på de olika balkarna.

Adapter

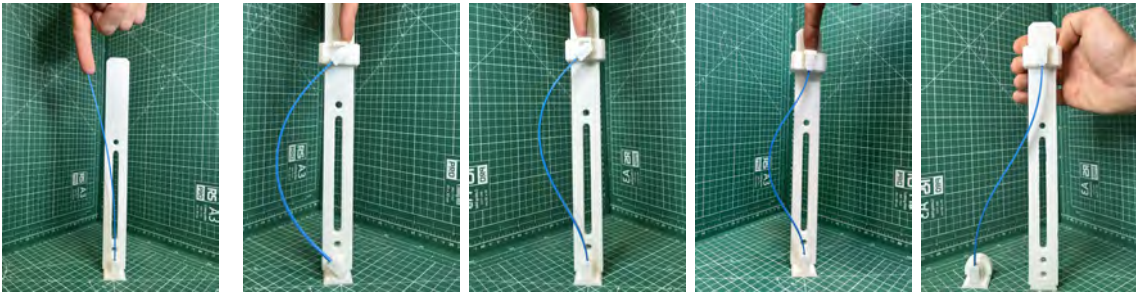
Adaptern i figur 4.19 möjliggör balken med rektangulärt tvärsnitt i figur 4.16 kan användas för fast inspänning i bordsfästet, samt tillsammans med momentvredet.



Figur 4.19: Adapter för att få en infästning för balken med rektangulärt tvärsnitt i bordsfästet.

4.2 Utvärdering av färdiga modeller

De färdiga modellerna för både instabilitet och balkdeformation visualiserar väl de koncept som planerats. Modellerna som påvisar instabilitet kan användas för att visa Eulers fem knäckfall vilket visas i figur 4.20 till figur 4.24.



Figur 4.20: Eulerfall 1 **Figur 4.21:** Eulerfall 2 **Figur 4.22:** Eulerfall 3 **Figur 4.23:** Eulerfall 4 **Figur 4.24:** Eulerfall 5

Modellen kan även byggas om för att visa knäckning av plana ramverk i figur 4.25 och knäckning för fjäderbelastade balkar i figur 4.26. Vid jämförelse med kraven från kravspecifikationen i bilaga A.1 uppfylls alla de krav som ställts på modellen. Samma modell kan användas för att visa två till tre olika experiment. Kravet om att 90% av modellen ska vara 3D-skriven uppfylls också eftersom det enbart behövs ett gummiband som utomstående del och alla delar är utskrivna i vanliga filament.



Figur 4.25: Knäckning av en plan ram med hjälp av modellen.



Figur 4.26: Knäckning av fjäderledad balk.

Modellerna för balkdeformationen visar hur olika tvärsnitt deformerar på olika sätt vid pålagd last. Figur 4.28 till figur 4.31 visar hur de olika tvärsnitten deformerar olika mycket vid samma pålagda last i mitten av varje balk. Detta kan göras för både fritt upplagda balkar och fast inspända i ena eller båda ändarna.



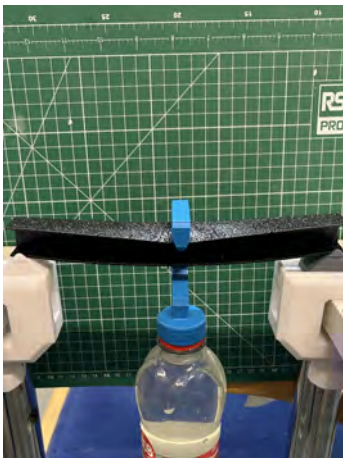
Figur 4.27: Utböjning för en fritt upplagd balk med ett rektangulärt tvärsnitt.



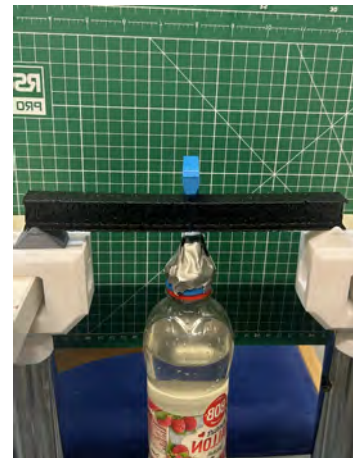
Figur 4.28: Utböjning för en fritt upplagd balk med kvadratisk tvärsnitt.



Figur 4.29: Utböjning för en fritt upplagd T-balk.



Figur 4.30: Utböjning för en fritt upplagd C-balk.



Figur 4.31: Utböjning för en fritt upplagd I-balk.

Balkarna kan användas med en fast inspänning för att jämföra deformationen vid en pålagd momentlast i balken. I figur 4.32 till figur 4.36 visas deformationen för alla balktvärsnitt när ena änden är fast inspänd, samt påverkad av en excentrisk last. Även denna modell uppfyller alla krav som ställs på modellen. Alla ingående delar är 3D-skrivna och det går att genomföra två till tre olika experiment med modellen. Alla fem balkar går att använda i samma infästning vilket var ett önskemål som därmed uppfylldes.



Figur 4.32: Utböjning vid excentrisk last hos balk med rektangulärt tvärsnitt.



Figur 4.33: Utböjning vid excentrisk last hos balk med kvadratisk tvärsnitt.



Figur 4.34: Utböjning vid excentrisk last hos balk med T-tvärsnitt.



Figur 4.35: Utböjning vid excentrisk last hos balk med C-tvärsnitt.



Figur 4.36: Utböjning vid excentrisk last hos balk med I-tvärsnitt.

4.3 Instruktioner

Instruktionerna beskriver i detalj hur experimenten ska genomföras samt vilka parametrar och resultat som ska utvärderas. De är utformade för att vara tydliga och lättförståeliga, vilket gör det möjligt för studenter att följa dem självständigt under handledning. Instruktionerna ryms på ett A4-papper och kan skrivas ut dubbelsidigt för att förenkla distributionen. För fullständiga instruktioner, se appendix bilaga B.1 till bilaga B.4

4.4 Studentintryck

Resultaten från de utvärderingar som genomfördes av studenterna i kapitel 3.4 – Utvärdering av produkten, visade att analysen av balkdeformation underlättades avsevärt. Studenterna hade betydligt lättare att avgöra vilken balk som var mest respektive minst lämplig för olika typer av laster. Innan studenterna fick tillgång till modellerna hade de ett snitt på en av fem balkar som var korrekt placerade. Efter att studenterna hade fått prova och jämföra de olika balkarna blev resultatet fyra av fem korrekt placerade balkar. Även hur lätta instruktionerna för hur modellerna skulle byggas var att förstå diskuterades med testpersonerna efter genomfört test.

För knäckningen av plana ramar blev resultatet att studenterna ritade en mer verklighetstrogen deformation efter att de hade haft tillgång till modellerna. Figur 4.37 visar hur en av testpersonerna trodde att balksystemen skulle knäckas innan denne fick tillgång till modellen. Efter att testpersonen fick använda modellen och på nytt rita knäckningen blev resultatet det i figur 4.38. Ett till resultat från utvärderingen av modellen var att testpersonerna hade problem med att bygga ihop de två olika balksystemen med de instruktioner som de fick i samband med testet.

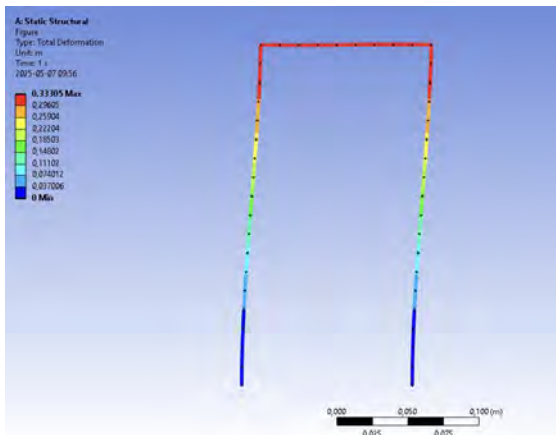


Figur 4.37: Ritad deformation innan testpersonen fick tillgång till modellen.

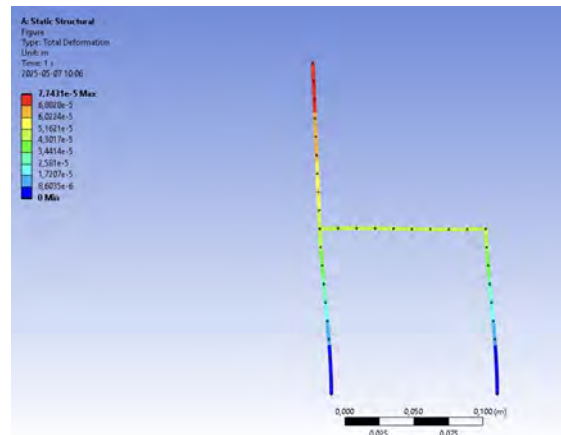


Figur 4.38: Ritad deformation efter testpersonen fick tillgång till modellen.

Efter att testpersonen ritat deformationen med modellen visades den verkliga deformationen som var uträknad i programmet Ansys. Deformationerna syns för de båda balkstrukturerna i figur 4.39 och figur 4.40. Vid jämförelse mellan den ritade och verkliga deformationen ses att testpersonerna ritade mer verklighetstroget när de hade tillgång till modellerna.



Figur 4.39: Deformation för första balkmodellen i Ansys.



Figur 4.40: Deformation för andra balkmodellen i Ansys.

4.5 Materialförbrukning

De slutliga modellerna skrevs ut med 15% ifyllnad med undantag för den rektangulära balken som skrevs ut med 80%, vilket resulterade i låg materialåtgång per

modell. Det förbrukades en betydande mängd plast under prototypfasen. För att minimera miljöpåverkan har PLA valts som huvudsakligt filament eftersom det är biologiskt nedbrytbart och framställt från förnyelsebara resurser [7]. Plaståtgången för slutliga modellerna med 15% ifyllnad blev 280 gram. Den totala mängden plast som förbrukats under projektets gång var 1072 gram.

5

Diskussion

I detta kapitel diskuteras de insikter och utmaningar som uppstod under projektet, med fokus på både tekniska och pedagogiska aspekter. Vidare behandlas möjliga förbättringsområden och förslag på framtida utveckling av projektet.

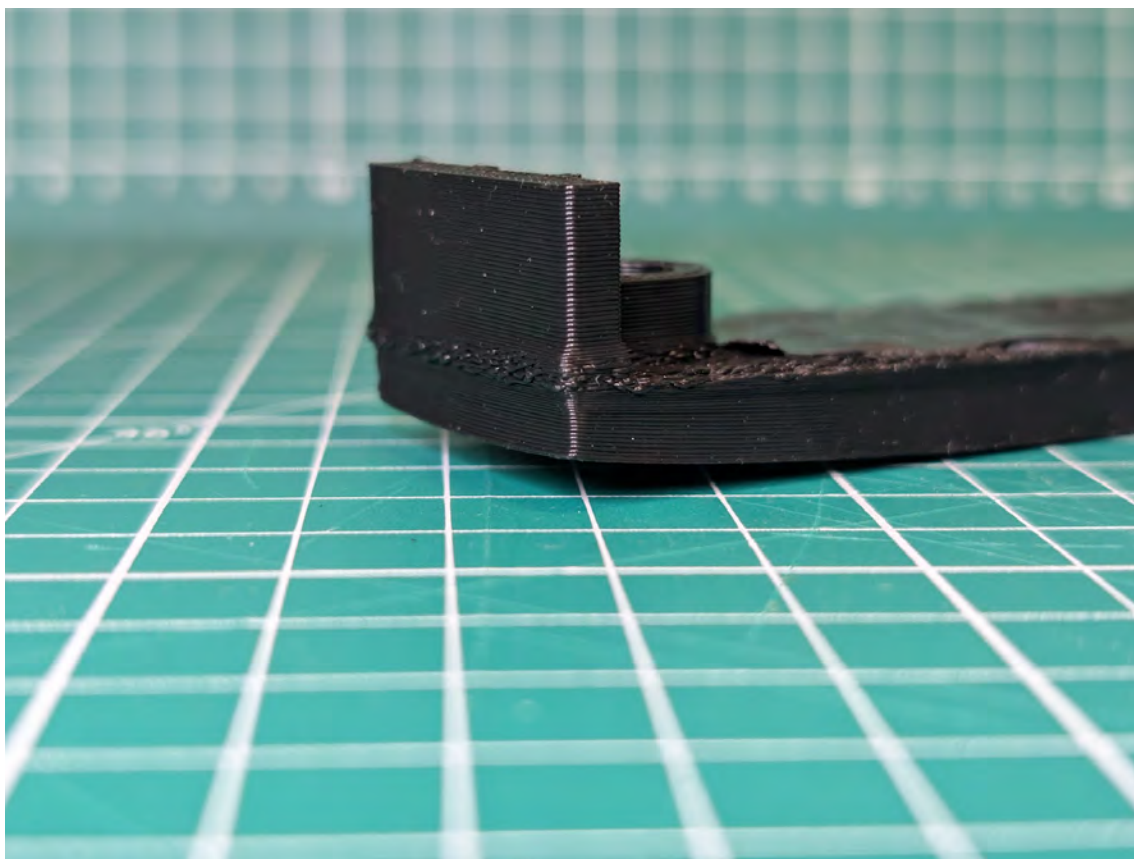
5.1 Begränsningar vid framtagandet av färdiga modeller

Ett återkommande praktiskt problem under projektet förekom i samband med 3D-utskrift. Ett flertal utskrifter misslyckades på grund av olika orsaker, modellen lossnade från byggplattan, materialet matades ojämnt, skrivhuvudet fastnade i tidigare lager. I vissa fall ledde det till att hela utskriften behövde avbrytas, vilket innebar både tidsförlust och materialspill. Detta påverkade projektets tidsplan och krävde att vi planerade in extra tid för felsökning och omstart av utskrifter. Problemen blev särskilt tydliga vid mer komplexa geometrier eller vid användning av support, där inställningarna i slicern behövde finjusteras. Denna typ av tekniskt strul illustrerar hur viktigt det är att ha god förståelse för 3D-skrivarens begränsningar och att förbereda sig på ett visst mått av trial-and-error, särskilt i projekt med många specialanpassade delar.

De 3D-skrivare som har använts genom projektets gång bygger alla lager från bottenplattan och upp. Detta var något som behövde beaktas vid design av alla olika delar. Önskvärt för alla delar var att undvika till exempel stora överhäng där material hänger fritt i luften. Detta för att det smälta filamentet behöver en yta att extruderas på. Detta var inte något som vi hade i åtanke vid de första designiterationerna. Problem med orientering och överhäng uppstod därför vid första iterationen. Efter att detta insågs implementerades detta till basen i instabilitetsmodellen. Den har en helt plan baksida för att 3D-skrivaren skulle kunna skriva ut modellen från botten och upp. För de modeller som detta inte gått att få till på har supports lagts till i slicern. Detta var något som vi försökte undvika i största möjliga mån eftersom supports måste tas bort när utskriften är färdig. Något som tar tid och ibland kräver externa verktyg som tänger och knivar. De enda delarna där supports används är till de båda bordsfästena och till kroken, detta för att det inte går att orientera dessa på skrivarbädden utan att få ett överhäng någonstans.

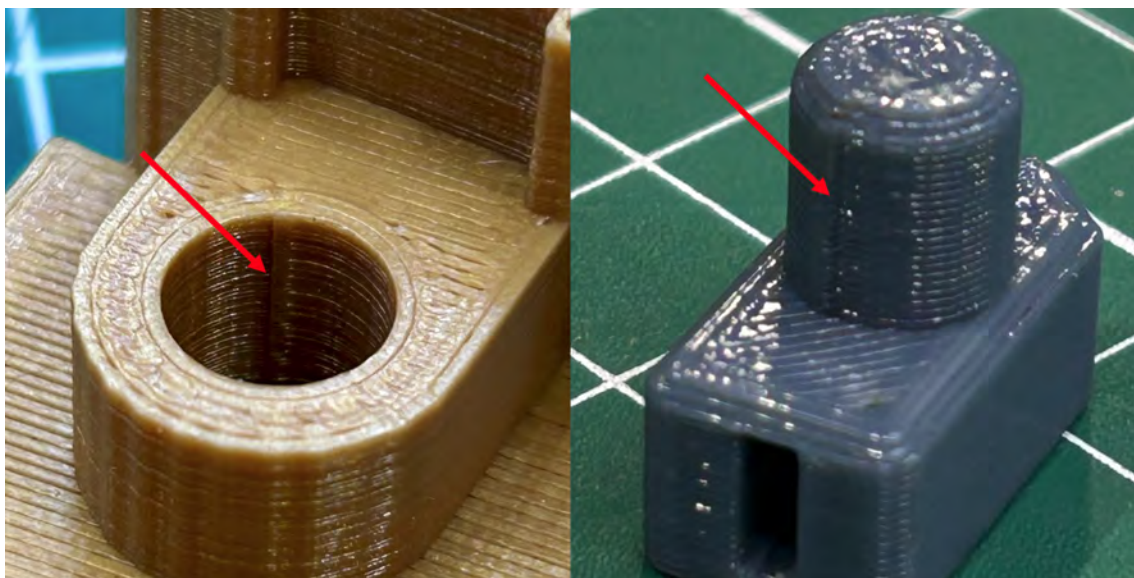
Ett annat problem som uppstod när vi började med att skriva ut delar var att vissa delar tenderade att delvis lyfta från byggplattan. Framst sker detta på stora

plana delar och medförde problem främst för knäckbasen och knäckstavarna. Ett fall av hur knäckbasen lyft från underlaget syns i figur 5.1. För att få bort detta nyttjades en inställning som benämns *brim*. Den fungerar genom att skriva ut ett tunt lager på en yta runt om delen som ska skrivas ut. Därav får delen större kontaktyta med bottenplattan och lyfter inte lika lätt. Detta kunde vi konstatera helt och hållet eliminerade problem med att delarna lyftes och gav plana och fina utskrifter. Nackdelen är dock att man efter utförd utskrift måste avlägsna denna *brim* från modellen med exempelvis en kniv och att det tar något längre tid att skriva ut.



Figur 5.1: Ena änden av knäckbasen har lyft från byggplattan, vilket medfört att även de nästkommande lagren blivit felaktiga.

När grundinställningar och första iterationerna av de olika delarna var färdiga uppstod det nya mindre komplikationer som var svåra att förutse, till exempel när hål och axlar skulle skrivas ut i 3D-skrivare med ett 0,6 millimeters munstycke. Då blev det en liten kant där 3D-skrivaren påbörjade varje nytt varv, vilket ses i figur 5.2. Detta ledde till att delarna inte roterade som det var tänkt vilket var ett problem för balkfästena och hålen i både basen och glidblocket. Detta visade sig bara vara ett problem med ett 0,6 millimeter munstycke. När samma del skrevs ut i en 3D-skrivare med ett munstycke på 0,4 millimeter försvann kanten. Detta visade sig vara relaterat till hur 3D-skrivaren läser av kod och inget som påverkades av hur modellen designades i CAD.



Figur 5.2: Liten kant i hål och på axlar som motverkar en fri rotation.

Vid utskrift av komponenter som skulle monteras med varandra, exempelvis bordsfästet i figur 4.12 och basen i figur 4.5, uppstod svårigheter med att uppnå tillräckligt bra passformer. Trots att modellerna designades med specifika mått kunde dimensionerna i den utskrivna delen avvika något beroende på materialets krympning vid stelning. Detta skapade en osäkerhet kring hurvida en otillräcklig passform berodde på felaktiga mått i CAD-modellen eller på avvikelser som uppstod under utskriftsprocessen. För att hantera detta etablerades toleranserna inte lika strikt som från början vilket gjorde att passformen blev bättre.

En annan inställning som visats ha en stor betydelse för resultaten på utskriften är skrivhastighet. Vid rapid prototyping-fasen prioriterades ofta snabba utskriften och därmed en högre hastighetsinställning, varpå det upptäcktes att detta ofta medförde betydligt sämre resultat än vid långsammare utskriften. Defekterna blev fler och utseendet blev sämre. Ibland hann inte skrivaren med att mata ut material och klumpar eller utstickande strängar kunde uppstå. Misslyckade utskriften blev också ett mer frekvent problem.

Användningen av TPU vid 3D-skrift visade sig vara mer krävande än initialt beräknat. Materialets höga flexibilitet orsakade återkommande problem vid matningen, där filamentet vid flera tillfällen böjde sig och fastnade i extrudern. Detta påverkade utskriftsresultatet negativt, särskilt vid tillverkningen av balkarna. Flera av dessa blev ojämna, med bristande ytjämnhet och viss geometrisk avvikelse. Trots upprepade justeringar av parametrar som utskriftshastighet, temperatur och återgång till utgångsläge kvarstod flera av problemen, vilket visar TPU:s höga känslighet för avvikelser i processinställningarna. Även häftningen mot byggplattan var otillräcklig i flera fall, vilket resulterade i att utskriften lossnade eller att det första lagret blev felplacerat. Sammanfattningsvis medförde användningen av TPU betydande svårigheter, både tekniskt och praktiskt, vilket bör beaktas vid val av material för komponenter där formstabilitet och ytjämnhet är av stor vikt.

5.2 Filament vid utskrift

Efter ett flertal olika försök med olika komponenter konstaterades att både PETG och PLA funktionellt fungerar lika bra för ändamålet. Båda filamenten har liknande utskrivningstid och inköpspris. Hållfastheten är inte av större vikt eftersom ingen av delarna som skrivs ut i PETG eller PLA utsätts för stora laster. Sammantaget innebär detta att PLA lämpar sig bättre än PETG i förhållande till arbetet på grund av dess lägre klimatavtryck. Under rapid prototyping-fasen skrevs många olika iterationer ut vilket resulterade i en förhållandevis stor mängd plast som kasseras, därav var det mer önskvärt att nyttja en polymer som är skonsam mot miljön.

Dessvärre fungerar varken PLA eller PETG för att tillverka de balkar som nyttjas vid tvärsnittsanalysen. De båda har visats alldeles för styva för att kunna visualisera balkböjning på den skala som önskas. Därför nyttjades istället TPU, en så kallad termoplastisk elastomer som till skillnad från både PLA och PETG är väldigt elastisk även vid låga temperaturer [11]. Nackdelarna med TPU är att inköspriset vanligen är mycket högre än för PLA eller PETG, samt att det har visats svårare att skriva ut och ger ofta defekta eller estetiskt bristfälliga utskrifter. Vidare är tidsåtgången för varje utskrift påtagligt högre och de komponenter som behöver tillverkas i TPU kräver en ny utskrift då användaren behöver skifta filament i skrivaren.

5.3 3D-skrivning som verktyg för utbildningsmaterial

Som nämnt tidigare så genomfördes en pilotutvärdering tillsammans med en grupp studenter, hälften från maskintekniska programmet och hälften från samhällsbyggnadsprogrammet. Modellerna användes i undervisningsmoment som komplement till föreläsningar och räkneövningar. Flertalet studenter uttryckte att möjligheten att interagera med modellerna, vrida och vända på dem och se dem i verkligheten gav ett tydligare engagemang än traditionella medel. Det indikerar att modellerna kan bidra till att öka studenters intresse och förståelse.

Eftersom utvärderingen genomfördes med en så pass liten grupp deltagare under en begränsad tidsperiod, finns det inte tillräckligt med underlag för att dra några vetenskapligt underbyggda slutsatser om modellernas direkta effekt på inlärningen. Även om det inte går att dra några definitiva slutsatser, har de tio studenter som testade modellerna visat ett ökat engagemang, vilket ligger i linje med tidigare forskning på området [2]. Deltagarnas enskilda upplevelser ger visserligen värdefulla indikationer, men påverkas också av andra faktorer såsom undervisningens utformning, undervisarens engagemang och tidigare kunskapsnivåer. För att avgöra om modellerna verkligen bidrar till ökad förståelse, förbättrad kunskapsnivå eller högre betygsresultat, krävs en mer omfattande studie. En sådan studie skulle kunna inkludera en större och mer diversifierad studentgrupp, längre tidsperiod och olika metoder (t.ex. intervjuer och enkäter). Detta i kombination med kvantitativa resultatmätningar såsom provresultat och självutvärderingar skulle utgöra en bättre

grund för att mäta modellernas verkliga effekter på inläringen.

5.4 Digital tillgänglighet och användarvänlighet

Distributionen av det digitala modellmaterialet visade sig vara mycket smidig. Genom användning av välkända plattformar som GitHub, Google Drive eller liknande tjänster kan filer i vanliga 3D-format (.stl, .f3d, .step) delas globalt utan några ekonomiska eller tekniska hinder. Denna öppenhet möjliggör ett brett användningsområde, inte bara inom den egna institutionen utan även för externa aktörer såsom andra universitet, skolor eller privatpersoner med intresse för teknikundervisning. En stor fördel är att modellerna har gjorts i Autodesk Fusion, där studenter med en kostnadsfri studentlicens kan öppna, modifiera och anpassa modellerna efter behov. Till exempel genom att ändra skala, formfaktorer eller kombinera olika komponenter.

5.5 Möjligheter till vidareutveckling

Projektet har identifierat flera aspekter som kan ligga till grund för vidare utveckling. Dessa innefattar både tekniska och pedagogiska dimensioner. Vid utformningen av modellen för Eulers knäckfall kunde en fullgod funktion uppnås med PLA, även om viss begränsning i hållbarhet observerades. Denna lösning bedöms dock som acceptabel med hänsyn till den låga materialåtgången och enkelheten i återutskrift.

För modellen av balktvärsnitt visade det sig att standardfilament, såsom PLA och PETG, var för styva för att möjliggöra en tydlig visuell demonstration av deformationer. Därför användes istället termoplastisk polyuretan (TPU), vars elastiska egenskaper visade sig väl lämpade för syftet [11]. Dock är TPU både dyrare och mer utmanande att skriva ut med, vilket innebär att framtida iterationer kan behöva utvärdera alternativa lösningar, exempelvis hybridmaterial eller skalade geometrier.

En alternativ lösning som kan ha möjliggjort användningen av PLA även för balkarna är att nyttja en 3D-skrivare utrustad med ett transportband. Vissa modeller har en skrivbädd som hela tiden matas runt två axlar, på så sätt kan man skriva ut komponenter med en näst intill obegränsad längd. En sådan skrivare skulle kunna skriva ut balkar som är flera gånger längre än de som nyttjas i arbetet idag, vilket i sin tur skulle kunna innebära att vridning och utböjning kan visualiseras med PLA.

Vidareutveckling krävs även för hur balkarna fästs i hörnleden, se figur 4.6. I det nuvarande utförandet uppstod situationer där balkarna gled ur sina fästen, särskilt vid simuleringar med system av flera sammanlänkade balkar, se bilaga B.4. Ytterligare förbättringspotential finns även i utformningen av adaptorn som kopplar samman den rektangulära balken med bordsfästet, se figur 4.19 och 4.12. Studentutvärderingarna visade att adaptorn kunde glida ur sin position, vilket därmed gjorde det svårt att jämföra balkarna. Vidare utveckling i detta område skulle beakta hur balkarna kan appliceras ännu bättre i bordsfesterna.

Ett medvetet metodval i kandidatarbete har varit att avstå från att inkludera hållfasthetsberäkningar för de 3D-skrivna komponenterna. Specifikt är elasticitetsmodulen svår att fastställa på ett entydigt och reproducerbart sätt, då den påverkas av ett flertal parametrar såsom orientering vid utskrift, ifyllnadsstruktur, lagertjocklek, materialval, temperatur på munstycket och skrivarinställningar. Om detta skulle överkommas inser vi dock hur möjligheten att sammankoppla beräkningar och fysiska modeller har stor pedagogisk potential. Att hitta en lösning på detta är därav av stort intresse vid eventuell vidareutveckling.

Arbetet som utförts har lett till ett antal fristående experiment. En förbättringsmöjlighet kan vara att utveckla dessa till en mer omfattande och strukturerad laboration. Möjligen skulle ett framtida projekt vara att nyttja de byggsatser som utvecklats i detta arbete för att utforma en fullständig laboration som en del i en kurs om mekanik eller hållfasthetslära, där experimenten kan komma att nyttjas som en del av examinationen.

Arbetet har varit avgränsat till knäckning, balkböjning och -vridning. Dessa är dock endast en liten del av ämnesområdet inom hållfasthetslära. 3D-skrivning kan dock nyttjas för att illustrera många fler fall och fenomen. Några exempel kan till exempel vara utmattning, plastisk och elastisk deformation, brott, samt sprickpropagering.

6

Slutsats

Efter slutfört projekt går det att konstatera att 3D-skrivning mycket väl fungerar som ett praktiskt verktyg för att tillverka byggsatser, som kan nyttjas för praktisk undervisning inom hållfasthetslära. Detta medför att det huvudsakliga syftet i projektet, att undersöka om tillverkningen av undervisningsmaterial med hjälp av 3D-skrivning är möjligt, har uppfyllts.

Målet om att alla filer och modeller ska kunna distribueras på ett enkelt sätt är uppfyllt. Detta genom att alla modeller är public domain enligt CC0. Externa aktörer kan ladda ner och göra ändringar i modellfilerna för att det ska passa deras behov. Filerna kan också rakt av läggas in i ett slicerprogram för 3D-utskrift utan några ändringar.

Det slutliga huvudsakliga målet i projektet kan inte anses vara uppfyllt. Målet var att undersöka om de skapade modellerna bidrar positivt till inläringen för de ovan specificerade ämnena. Den ringa urvalsgrupp som testade modellerna indikerade att de upplevde modellerna som ett verktyg med positiv inverkan på inläringen. Där emot var denna grupp för liten och därav kan inga vetenskapliga slutsatser dras.

Litteratur

- [1] J. K. Gilbert, "The role of visual representations in the learning and teaching of science: An introduction," *Asia-Pacific Forum on Science Learning and Teaching*, årg. 11, nr 1, s. 1–19, 2010.
- [2] E. J. Diehl, "Using 3D Printed Teaching Pass-Arounds for Mechanical Design Courses," 2021, [Online]. (Hämtad 2025-05-12).
- [3] R. Islam, S. Shahriar, L. Jiang, X. Peng och J. Park, "Effect of Process Parameters on Mechanical Properties of the 3D Printed Silk-PLA Specimens Fabricated via Fused Deposition Modeling," DOI: 10.1115/IMECE2024-144616.
- [4] P. Research. "Josef Prusa acquires US-based company Printed Solid, Inc." 2025. [Online].(hämtad: 2025-04-22). (), URL: [https://www.prusa3d.com/en/article/josef-prusa-acquires-us-based-company-printed-solid-inc-%5C_230651/..](https://www.prusa3d.com/en/article/josef-prusa-acquires-us-based-company-printed-solid-inc-%5C_230651/)
- [5] B. Garrett, "3D Printing: New Economic Paradigms and Strategic Shifts," *Global Policy*, årg. 5, nr 1, s. 70–75, 2014. DOI: 10.1111/1758-5899.12119.
- [6] F. L. Chan, C.-Y. Hon, S. M. Tarlo, N. Rajaram och R. H. and, "Emissions and health risks from the use of 3D printers in an occupational setting," *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, årg. 83, nr 7, s. 279–287, 2020. DOI: 10.1080/15287394.2020.1751758.
- [7] J. O'Loughlin, D. Doherty, B. Herward m. fl., "The Potential of Bio-Based Polylactic Acid (PLA) as an Alternative in Reusable Food Containers: A Review," *Sustainability (Switzerland)*, årg. 15, nr 21, 2023. DOI: 10.3390/su152115312.
- [8] CDIO Initiative. "12 CDIO Standards." 2025. [Online]. (hämtad: 2025-02-12). (2025), URL: <https://www.cdio.org/implementing-cdio/standards/12-cdio-standards#standard1>.
- [9] Autodesk. "Översikt: Education-avtal." [Online]. Hämtad: 2025-04-01. (), URL: <https://www.autodesk.com/se/support/account/education/students-educators/overview>.
- [10] 3D-Acadamy. "PET Bottle Cap." [online]. hämtad: 2025-05-13. (2022), URL: <https://www.printables.com/model/330952-pet-bottle-cap>.
- [11] A. Walder och D. Meltzer. "Thermoplastic polyurethanes: The other TPE." [online]. Hämtad: 2025-05-12. (2008), URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-52349115969&partnerID=40&md5=89569012c5e68cb81dfe40b6caa70d7a>.

A

Idegenerering

A.1 Kravspecifikation för projektet

Chalmers	Dokumenttyp	Kravspecifikation			
	Utvärdering av 3D-skrivning som framtagningmetod för utbildningsmaterial	Skapad: 2025-02-20 Modifierad:			
Kriterier	Målvärde	K/O	Vikt	Verifieringsmetod	Referens (kravställare)
Funktion(er)					
Påvisa Eulers 3 av knäckfall		K			
Påvisa balkdeformationer för olika tvärsnitt		K			
Gå att dela modeller med andra via internet <i>Public domain</i>		K			
1. Prestanda					
1.1 Genomföra flera experiment <i>Flera experiment ska kunna genomföras med samma rig</i>	2-3 experiment	K		Test av funktionsmodell	Projektbeställare
1.2 Avläsa resultat <i>Resultat ska kunna avläsas vid användning av</i>	Resultat ner till 1mm	Ö		Test av funktionsmodell	Produktplanering
1.3 Motstå kraft <i>Klara av punktlaster upp till 50 N</i>	50 N	Ö		Test av funktionsmodell	Produktplanering
1.4 Motstå kraft <i>Klara av punktlaster upp till 30 N</i>	30 N	K		Test av funktionsmodell	Produktplanering
2. Tillverkning					
2.1 Enbart 3D-skrivna delar	100% 3D-skrivna delar	Ö		Analys av tillverkningsmetod	Projektbeställare
2.2 Enbart 3D-skrivna delar	90% 3D-skrivna delar	K		Analys av tillverkningsmetod	Projektbeställare
2.3 Modellfilerna ska kunna distribueras till extern skrivare	100% av delarna ska skrivas i extern printer	K		Test av funktionsmodell	Projektbeställare
3. Storlek					
3.1 Maximal storlek på enskild del <i>Standardstorlek på printingbed för en Prusa MK3S-skrivare</i>	250x210x210 mm	K		Beräkning mha CAD-modell	Produktplanering
5. Flexibilitet					
4.1 Uppspänning <i>En uppspänning till alla balkar</i>	5 balkar i samma uppspänning	Ö		Beräkning mha CAD-modell	Produktplanering
6 Material					
9.1 Tillverkad av vanliga filament <i>PLA, PETG, TPU</i>		K		Analys	Projektbeställare
7 Underhåll					
15.1 Byte av enskild del	< 2 min	Ö		Test med funktionsmodell	Produktplanering

Bilaga A.1: Kravspecifikation för projektet

A.2 Delsystemslösningar

Fästen

- Block med slits
- Stomme (klack, lego)
- Spännen (lådlock, hårdvaror)
- Magnet
- Klips (bildelar)
- Spännband
- Snöre
- Sprint
- Hasp

Mätmetoder

- Krökning
- Dynamometrar
- Rutnät bakom
- Mätstickor
- Stav med Newton-skala (som visar utböjning)

Kraftpåläggning

- Böcker
- Dragband
- Vikter
- Vattenbehållare
- Handkraft
- Fjäder
- Sand
- Mjölkpaket

Stödstrukturer

- Fot med fäste
- Bottenplatta
- Ram med platta som möter vägg
- Exklusiv i plan, rapsors
- Stående ram
- Bottenfäste

Bilaga A.2: Delsystemslösningar

A.3 Delsystemkatalog för projektet

Delsystem	Modell 1	Modell 2	Modell 3	Modell 4	Modell 5
Balkar	Balk	Balk	Balk	Balk	Balk
Rig	Fot med fäste	Bottenplatta	Ram mot vägg	Stående ram	Bottenstöd
Fästen	Block med slits	Kabinhake	Kardborre	Magnet	Klips
Kraftpåläggning	Dragsnöre	Vattenbehållare	Handkraft	Fjäder	Mjölkpaket
Visulaisering	Dynamometer	Koordinatsystem	Mätsticka	Linjal	Newton-skala
	Modell 6	Modell 7	Modell 8	Modell 9	Modell 10
Balkar	Balk	Balk	Balk	Balk	Balk
Rig	Ram med platta	Fot med fäste	Bottenplatta	Ram mot vägg	Fot med fäste
Fästen	Sprint	Kabinhake	Kardborre	Sprint	Block med slits
Kraftpåläggning	Dragsnöre	Handkraft	Vikt	Vattenbehållare	Fjäder
Visulaisering	Mätarm	Mätarm	Koordinatsystem	Dynamometer	Linjal
	Modell 11	Modell 12	Modell 13	Modell 14	Modell 15
Balkar	Balk	Balk	Balk	Balk	Balk
Rig	Bottenplatta	Stående ram	Ram med platta	Bottenstöd	Ram mot vägg
Fästen	Magnet	Klämförband	Block med slits	Klips	Kardborre
Kraftpåläggning	Handkraft	Mjölkpaket	Dragsnöre	Vikt	Vattenbehållare
Visulaisering	Koordinatsystem	Mätarm	Mätsticka	Linjal	Newton-skala
	Modell 16	Modell 17	Modell 18	Modell 19	Modell 20
Balkar	Balk	Balk	Balk	Balk	Balk
Rig	Fot med fäste	Ram med platta	Stående ram	Fot med fäste	Bottenplatta
Fästen	Block med slits	Kabinhake	Magnet	Klämförband	Block med slits
Kraftpåläggning	Handkraft	Dragsnöre	Vattenbehållare	Vikt	Dragsnöre
Visulaisering	Mätarm	Dynamometer	Mätarm	Mätsticka	Dynamometer

Bilaga A.3: Delsystemkatalog för projektet

B

Instruktioner

B.1 Instruktioner för utböjning

Utrustning:

1x Bordsfäste med stöd
1x Bordsfäste med räls + Tillhörande stöd
1x Tvärsnitt I-balk
1x Tvärsnitt T-balk
1x Tvärsnitt C-balk
1x Tvärsnitt Kvadratisk balk + tillhörande block
1x Krok
1x PET-flaska med valfri mängd vatten

Montering:

Montering sker via bordsfäste som skruvas fast i änden på vardra bord mot varandra. Borden ska ha ca 20 cm mellan varandra. Därefter väljs valfritt tvärsnitt ut och monteras i fästet med hjälp av friktion. För fast inspänning placeras dom i hålet. För fritt upplagd läggs dom på toppen. PET-flaskan fylls med vatten och hängs upp på balken.

Fritt upplagd & fast inspänd balk - Utböjning

Syfte

Syftet med denna uppgift är att ge en praktisk vägledning för att visualisera och analysera utböjningen och vridning hos en fast och fritt upplagd balk med olika tvärsnitt. Genom att beakta balkens geometri och placering av last kan man skapa en förståelse för hur dessa faktorer påverkar balkens deformation under belastning.

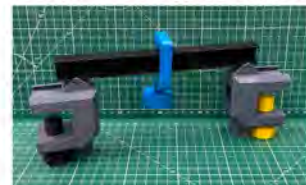
Uppgift

Uppgiften går ut på att variera lasten och dess placering på de olika tvärsnitten och utifrån detta kunna visualisera och dra slutsatser hur tvärsnitten agerar under belastning för utböjning.

- Skriv ner på ett papper i vilken ordning ni tror att de olika tvärsnitten kommer att ha störst utböjning för både:
 - centrisk (mittplacerad) last
 - excentrisk (förskjuten) last.(För både fritt upplagd och fast inspänd)
- Prova för samtliga tvärsnitt för båda lastfallen och randvillkoren och jämför med era förväntade resultat.
- Vad skiljde sig mellan förväntade resultat och de verkliga? Vilka slutsatser kan dras? Motivera utifrån det ni har lärt er i kursen



Figur hur fast inspänning monteras (För experiment fäst riggen i änden på bord)



Figur hur fritt upplagd monteras (För experiment fäst riggen i änden på bord)

Bilaga B.1: Första utkast Instruktioner för utböjning

B.2 Instruktioner för böjstyvhet

Utrustning:

- 1x Bordsfäste med triangel (a)
- 1x Tvärsnitt I-balk
- 1x Tvärsnitt T-balk
- 1x Tvärsnitt C-balk
- 1x Tvärsnitt Kvadratisk balk + tillhörande block
- 1x Ratt för att förenkla vridning
- 1x Krok
- 1x PET-flaska med valfri mängd vatten

Montering

Montering sker via bordsfäste som skruvas fast i änden på bordet. Därefter väljs valfritt tvärsnitt ut och monteras i fästet med hjälp av friktion. Sätt fast ratten på andra änden av balken enligt figur.

Fast inspänd balk - böjstyvhet

Syfte:

Syftet med denna uppgift är att ge en praktisk vägledning för att visualisera och analysera knäckfallet vridning hos en fast inspänd konsolbalk med olika tvärsnitt. Genom att beakta balkens geometri och placering av last kan man skapa en förståelse för hur dessa faktorer påverkar balkens vridning under excentrisk last.

Uppgift:

Uppgiften går ut på att vrida på tvärsnitten med hjälp av medföljande ratt och registrera vilken av tvärsnitten som kräver mest respektive minst kraft för att visa tecken på vridning. Vid tvärsnitt som är mycket lik i utböjning kan skärorna i ratten användas tillsammans med kroken + PET-flaska för att se skillnaden i vridning mellan balkar

- Skriv ner på ett papper i vilken ordning ni tror att de olika tvärsnitten har högst till lägst böjstyvhet (EI-värde). Tänk på att materialet och tvärsnittarea är detsamma – det är endast tvärsnittets form som varierar.
- Prova för samtliga tvärsnitt vilken som vrider lättast och jämför med era förväntade resultat.
- Vad skiljde sig mellan förväntade resultat och de verkliga? Vilka slutsatser kan dras? Uppstår det lokala bucklingar i tvärsnitten? Vilken påverkan har dessa på balken? Motivera utifrån det ni har lärt er i kursen



Figur hur experimentet monteras (För experiment fäst riggen i änden på bord)

Bilaga B.2: Instruktioner för böjstyvhet

B.3 Instruktioner för euler fall

Utrustning:

1x Lång Rigg
 1x Kort rigg
 1x Glidblock
 2 x Borsfästen
 2 x Skruvar
 1x Gummibandfäste
 1x Gummiband
 2x Balkfästen
 1x Tunn balk
 2x Balkar med plats för gummiband

Montering:

För att skilja på de olika fallen så monteras de på olika sätt. För att variera randvillkor i infästningarna så roteras balkfästet för att uppnå fast & ledad inspänning. För 5e fallet så monteras den enligt figur 5 och båda borsfästena används. För knäckningsfallet monteras de ledade balkarna enligt figur 6 och kräver ett gummiband för att visualisera knäckningen

Euler fall 1-5 + knäckningsfenomen

Syfte

Syftet med denna laboration är att demonstrera och visualisera hur mycket kraft som krävs för att böja ut balkar enligt Eulers knäckningsfall 1-5, samt med enkelledad balk. Genom observationer ska skillnaderna mellan de olika fallen tydliggöras, samt hur infästningsförhållanden påverkar knäckningslasten.

Uppgift

- Sätt upp euler fall 1 - 5 enligt formelsamling, en i taget
- Tryck ner glidstaven med lika mycket kraft för samtliga fall och se vilken som ger störst utböjning
- Visualisera knäckningsfallet enligt figur 6, vad innebär knäckningen? Vart blir det nya läget? Vad skulle hända om man hade en tvåledad balk?
- Diskutera vad de 5 euler-fallen har för betydelse, och vilket har högst knäcklast?



Figur 1: Fast inspänd båda ändar



Figur 2: Ledad inspänd båda ändar



Figur 3: Ledad inspänd



Figur 4: Fast inspänd



Figur 5: Euler fall 5



Figur 6: Montering för knäckningsfall

Bilaga B.3: Instruktioner för euler fall 1 till 5 samt knäckningsfenomen

B.4 Instruktioner för euler system

Utrustning:

- 2x Lång knäckstav
- 4x Kort knäckstav
- 2x bordsfästen
- 1x Lång basfäste
- 1x Kort basfäste
- 4x Balkfästen
- 2x Hörnled

Montering:

Montering sker enligt Figur 1 & 2 med hjälp av utrustningen angiven ovan. Går att bygga eget system av balkar med hjälp av medhavda delar

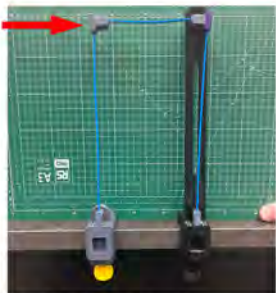
Knäckning av plana ramar

Syfte

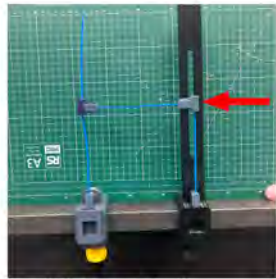
Syftet med denna laboration är att demonstrera och visualisera hur system av balkar integrerar med varandra och hur olika randvilkor påverkar systemet. Genom observationer ska skillnaderna mellan olika system tydliggöras, samt hur infästningsförhållanden påverkar systemets utböjningar.

Uppgift

- Montera ihop system av balkar, enligt figur 1 & 2
- Rita upp på papper hur ni tror att utböjningen hos systemet kommer se ut med de givna punktlasterna, lämna sedan bort pappret
- Utsätt systemet med punktlast enligt figur med hjälp av handen och konstatera hur balkarnas utböjning ser ut.
- Ta ett nytt papper och rita hur utböjningen ser ut enligt modellen, jämför med papper från punkt 2, vilka slutsatser kan dras?
- Vad är det som gör en struktur styv, och vad skulle man kunna göra för att få strukturen styvare, diskutera



Figur 1: System av balkar 1



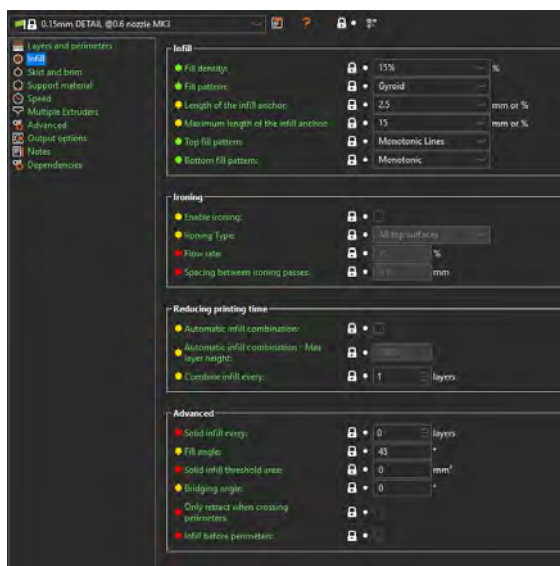
Figur 2: System av balkar 2

Bilaga B.4: Instruktioner för knäckning av plana ramar

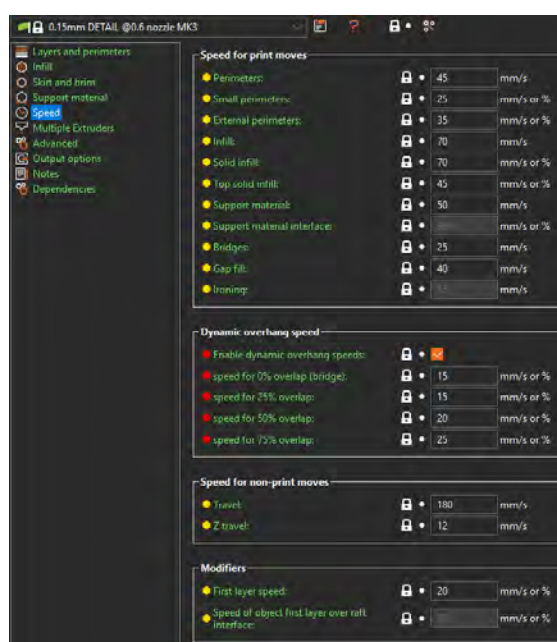
C

3D-skrivning inställningar

C.1 Slicer inställningar



Bilaga C.1: Fyllningsmönster och densitetsparametrar i PrusaSlicer för Prusa i3 MK3S

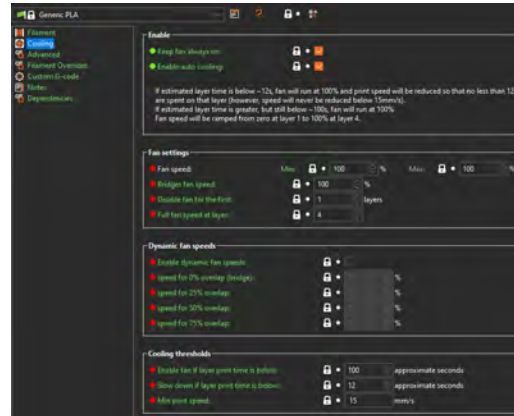


Bilaga C.2: Utskriftshastighet och rörelseinställningar i PrusaSlicer för Prusa i3 MK3S

C.2 Filamentparametrar (PLA)



(a) Filamentparametrar för PLA



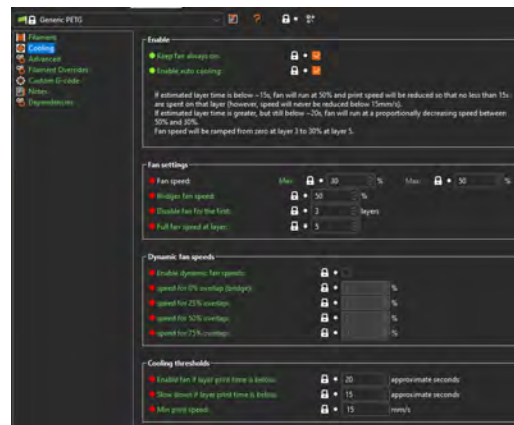
(b) Kylinställningar för PLA i PrusaSlicer

Bilaga C.3: Utskriftsinställningar för PLA i PrusaSlicer (se a och b)

C.3 Filamentparametrar (PETG)



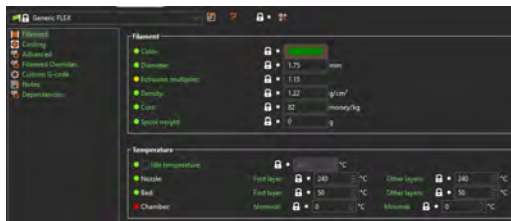
(a) Filamentinställning för PETG



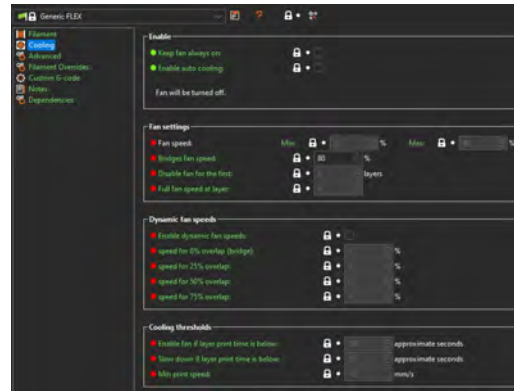
(b) Coolinginställning för PETG

Bilaga C.4: Utskriftsinställningar för PETG i PrusaSlicer (se a och b)

C.4 Filamentparametrar (TPU)



(a) Filamentinställning för TPU



(b) Coolinginställning för TPU

Bilaga C.5: Utskriftsinställningar för TPU i PrusaSlicer (se a och b)

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige

www.chalmers.se



CHALMERS