

Cato Håvik  
Oda Siggerud  
Kristoffer Almlie

# Parametrisk design av lagringsenheter

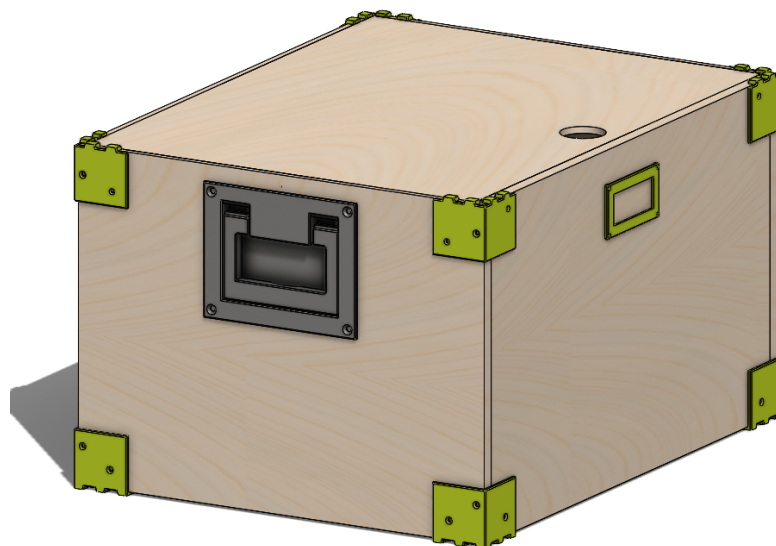
Bacheloroppgave om parametrisk design

Bacheloroppgave i ingeniørfag - maskin

Veileder: Tor Erik Nicolaisen

Medveileder: Kari Oline Øverseth

Mai 2022





Cato Håvik  
Oda Siggerud  
Kristoffer Almli

# **Parametrisk design av lagringsenheter**

Bacheloroppgave om parametrisk design

Bacheloroppgave i ingeniørfag - maskin  
Veileder: Tor Erik Nicolaisen  
Medveileder: Kari Oline Øverseth  
Mai 2022

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



Kunnskap for en bedre verden





Oppgavens tittel:	Dato: 19.05.22		
Parametrisk design av lagringsenheter	Antall sider: 90		
	Masteroppgave:		Bacheloroppgave: x
Navn: Kristoffer Almli, Cato Håvik og Oda Siggerud			
Veileder: Tor Erik Nicolaisen			
Eventuelle eksterne faglige kontakter/ veiledere: Kari Oline Øverseth			

**Sammendrag:**

Oppgaven har satt søkelys på å lage en god lagringsløsning for alt fra smådeler opptil 800x1200mm med bruk av parametrisk design. Bakgrunnen for valget av dette temaet skyldes IVB sin forespørsel om å utarbeide en bedre lagringsløsning enn dets eksisterende pallereoler på laben i NTNU Gjøvik, som er utilgjengelig og lite systematisert. Hovedfokus har vært å implementere parametere inn i designprosessen. Dette skal gi sluttbrukeren muligheten til å taste inn ønskede dimensjoner, og deretter ved et tastetrykk få en ferdig modell i SolidWorks, i dette tilfellet en kasse. Det skal også følge med tegninger og kuttfiler som samsvarer med valgte dimensjoner og andre ønskede parametere. I tillegg viser oppgaven produksjonsmetodene som trengs for å produsere sluttproduktet.

**Stikkord:**

Parametrisk design
Oppbevaring



(sign.)

# Forord

Kjære leser, denne bacheloroppgaven er skrevet av Kristoffer, Oda og Cato. Dette er den avsluttende oppgaven på vårt fireårige studium i perioden 2018-2022, hvor vi har lært om ingeniørvitenskap, industrielt design, produksjonsmetoder, styrke-beregninger, ledelse og mye mer. Bærekraft, nyskapning og problemløsning er blant flere nøkkelord som har vært sentrale gjennom studiet.

Vi ønsker å rette en stor takk til oppdragsgiver, Tor Erik Nicolaisen fra NTNU Gjøvik, for tilliten og innspill gjennom oppdragsperioden. Vi ønsker også å rette en takk til veileder Kari Oline Øverseth for god veiledning innenfor design.

God lesning!

# Abstract

This thesis has been focusing on creating a good storage solution through parametric design. The reason for choosing this theme is because of IVB's request for making a better storage solution than the existing pallet-storage system at NTNU Gjøvik, which has reduced access and no systemization.

The focus has been on implementing parameters into our design-process. This will give the end-user the possibility to input preferred dimensions, and with the press of a button get a finished model in SolidWorks, in this case a box, with drawings and cut files according to the input-dimensions and eventually other wanted parameters. In addition, this thesis covers the production processes needed to make the end-product.

# Definisjoner av begreper og forkortelser

Begrep		Definisjon
Norsk	Engelsk	
<b>Additiv tilvirkning</b>	Additive manufacturing (AM)	Teknikker som bygger objekter i fast materiale med utgangspunkt i en tredimensjonal digital modell
<b>Adhesjon</b>	Layer adhesion	Sammenbindingen mellom lagene i en additiv tilvirket komponent
<b>Byggeplate</b>	Build plate	Plate som 3D-modellen blir bygget på i AM
<b>Dataassistert konstruksjon (DAK)</b>	Computer Aided Design (CAD)	Samlebetegnelse for dataprogrammer som brukes til 2D- og 3D-design
<b>Filament</b>	Filament	Plasttråd som brukes i FFF
<b>Fortetning-/sprosent</b>	Infill-/percentage	Mengden materiale inne i en additiv tilvirket komponent, er forskjellig typer mønstre
<b>Hygroskopisk</b>	Hygroscopic	Trekker til seg fuktighet fra omgivelsene
<b>IVB</b>	IVB	Institutt for vareproduksjon og byggteknikk
<b>Kutt-filer</b>	Cut files	Filer med riktig formatering og innhold til å kunne brukes i f.eks. en laserkutter
<b>Skalltjukkelse</b>	Shell thickness	Antall lag med skall på en FFF-modell
<b>Smeltet filamentfremstilling</b>	Fused filament fabrication (FFF)	Teknikk for additiv tilvirkning med termoplast
<b>Stykkliste</b>	Bill of materials (BOM)	Liste over alle delene som inngår i et produkt

# Innholdsfortegnelse

Forord .....	iii
Abstract .....	iv
Definisjoner av begreper og forkortelser .....	v
Innholdsfortegnelse .....	vi
Tabelliste .....	xiv
1 Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn .....	1
1.2 Problemstilling.....	1
1.3 Mål.....	1
1.3.1 Effektmål .....	1
1.3.2 Resultatmål.....	2
1.4 Avgrensing.....	2
2 Teori .....	3
2.1 SolidWorks .....	3
2.1.1 Part .....	3
2.1.2 Assembly.....	4
2.1.3 Drawing.....	5
2.1.4 Simulation .....	5
2.1.5 Composer .....	6

2.2	Sirkulær økonomi .....	6
2.2.1	Sirkulær tilførsel.....	6
2.2.2	Forlengt levetid.....	7
2.2.3	Ressursgjenvinning (berging) .....	7
2.2.4	Materialgjenvinning .....	8
2.2.5	Energigjenvinning .....	9
2.3	Additiv tilvirkning .....	9
2.3.1	Materialer .....	10
2.3.2	PLA .....	10
2.3.3	ABS .....	11
2.3.4	PETG.....	11
2.3.5	Nylon.....	11
2.3.6	Kompositter.....	11
2.3.7	PrusaSlicer.....	12
2.4	CNC-fresing.....	12
2.5	Laserkutting .....	14
2.5.1	CO2 laser.....	15
2.6	Andre programvarer .....	16
2.6.1	Excel/Visual Basic for Applications (VBA) .....	17
2.6.2	Deepnest.io .....	17
2.6.3	Inkscape.....	17

2.7	Re-distributed manufacturing (RdM) .....	17
2.8	Prototyping .....	18
2.9	Parametrisk Design.....	18
3	Metode.....	19
3.1	Produktutviklingsprosessen .....	19
3.2	Planlegging .....	19
3.3	Konseptutvikling .....	20
3.3.1	Identifisere brukerbehov .....	20
3.3.2	Lage en kravspesifikasjon for produktet .....	20
3.3.3	Lage konsepter for produktet .....	20
3.3.4	Velge et eller flere konsepter å gå videre med i utviklingsprosessen .....	21
3.4	Designrealisering .....	22
3.4.1	Datastyrt analyse .....	22
3.4.2	Materialvalg .....	22
3.4.3	Dataassistert konstruksjon (DAK) .....	22
3.4.4	Monteringsanvisning.....	23
3.5	Testing og raffinering .....	24
3.5.1	Prototyping .....	24
4	Utviklingsprosessen .....	25
4.1	Planlegging .....	25
4.2	Konseptutvikling .....	25

4.2.1	Identifisere brukerbehov .....	25
4.2.2	Kravspesifikasjon .....	26
4.2.3	Konseptgenerering .....	28
4.2.4	Konseptutvalgelse .....	34
4.3	Designrealisering .....	36
4.3.1	Design av kasse i SolidWorks .....	36
4.3.2	Statisk analyse .....	41
4.3.3	Materialvalg .....	43
4.3.4	Parametrisering i SW .....	46
4.3.5	Alternativt fingerskjøt-design .....	51
4.4	Prototyping .....	53
4.4.1	Prototyping og testing av håndtak .....	53
4.4.2	Prototype med 6 mm plater .....	57
4.4.3	Prototype med 12 mm plater .....	58
4.4.4	Skala modell med MDF .....	59
5	Resultat.....	60
5.1	Ferdig modell med regneark.....	60
5.2	Prototyper .....	61
5.2.1	Prototype med 6 mm plater .....	61
5.2.2	Prototype med 12 mm plater .....	62
5.2.3	Skala modell i MDF .....	63



5.2.4	Uforventede funn.....	63
6	Diskusjon og analyse.....	65
6.1	Valg av hjørnebeskyttere .....	66
6.2	Drøfting design kasse .....	66
6.3	Materialvalg med tanke på RdM .....	68
6.4	Materialvalg med tanke på sirkulær økonomi .....	69
7	Konklusjon .....	70
	Litteraturliste .....	71
	Vedlegg .....	76

# Figurliste

Figur 1: Eksempel på ekstrudering av part-fil i SolidWorks Assembly .....	4
Figur 2: Assembly-fil med ligningssett.....	4
Figur 3: Eksempel på tegning i SolidWorks .....	5
Figur 4: Syklus for et plantebasert og biologisk nedbrytbart produkt i en sirkulær økonomisk modell.....	7
Figur 5: Skjematisk representasjon av FFF. (8).....	9
Figur 6: a) medfres (20) b) motfres (21) .....	13
Figur 7: Munnstykke laser (23).....	15
Figur 8: CO2 laser .....	16
Figur 9: Tankekart brukt til konseptgenerering.....	28
Figur 10, Konsept A, boks .....	29
Figur 11, Konsept B, boks.....	30
Figur 12, Konsept C, boks.....	30
Figur 13, Konsept D, boks .....	31
Figur 14: Konsept 5, en tapp som holder boksen på plass og lokket skyves inn og ut.....	32
Figur 15: Konsept 7, 3 tapper som holder boksen på plass og lokk som kan løftes av.....	32
Figur 16: Konsept 9, to tapper som holder boksen på plass og lokk som ligger opp på endeveggene og kan løftes av.....	32
Figur 17: Konsept 10, 4 tapper som holder boksen på plass, innfelt lokk som løftes ut.....	33
Figur 18: Konsept 12, krenelering inspirert utforming med innfelt lokk.....	33

Figur 19: Versjon 1 - håndtak .....	34
Figur 20: Cut-extrude av fresespor.....	37
Figur 21: Assembly med komponenter .....	38
Figur 22: Standardmål i palle .....	39
Figur 23: Første- og tredje vinkelprojeksjon.....	40
Figur 24: Statisk studie av bunnplate i SolidWorks Simulation .....	41
Figur 25: Statiske analyse av 400x300x6mm plate.....	43
Figur 26: Høy spenning i skarp kant .....	43
Figur 27, Equations meny .....	47
Figur 28: Ferdig ligningssett til parametrisering av boksen.....	48
Figur 29,; Brukervennlighet regneark .....	49
Figur 30: Ferdig regneark for bruker inndata.....	50
Figur 31: Excel-ark med vektorsett.....	51
Figur 32: Modellering av fingre .....	52
Figur 33: Kasse med fingerskjøter .....	53
Figur 34: Oppbygningen til en FFF modell .....	54
Figur 35: a) Test 2 etter brudd, b) Test 3 og holder etter brud c) CAD-modell av håndtaket .	56
Figur 36: Versjon 3 av håndtak med ny vinkel .....	57
Figur 37: Prototype av 6 mm boks .....	58
Figur 38: Skalamodeller stablet 2 og 3 i høyden.....	59
Figur 39: Fra input i Excel-arket til ferdig modell.....	60

Figur 40: Lasttesting med vann av boks med 6mm plater .....	61
Figur 41: a) Last-test 30kg b) Håndtak etter brudd.....	62
Figur 42: Tverrsnitt av en del av versjon 3 håndtaket.....	63
Figur 43: Kryssfiner i laserkutter .....	64

# Tabelliste

Tabell 1: Kravspesifikasjonen til oppbevaringsløsningen .....	26
Tabell 2: Kravspesifikasjon til håndtak og hjørnebeskyttere .....	27
Tabell 3: Sammenligning av oppbevaringskonsepter .....	34
Tabell 4: Sammenligning av hjørnebeskyttere .....	35
Tabell 5: Testing av versjon 2 håndtak. ....	55
Tabell 6: Testing av håndtak versjon 3 .....	55
Tabell 7: Oppnådde egenskaper .....	65

# 1 Innledning

## 1.1 Bakgrunn

Ledere og brukere av IVB labene ved NTNU Gjøvik har et ønske om et oppbevaringssystem som enkelt kan tilpasses brukerne sitt behov. Det finnes mange standardiserte oppbevaringsløsninger på markedet. Et parametrisert system kan produsere produkter som bedre dekker det brukeren trenger. Løsningen fører til mindre unødvendig bruk av material, samtidig som den kan gi en mer optimalisert plassbruk i lagerreolene på IVB-laben. Dette er ressurseffektivt og en mer bærekraftig løsning.

Siden NTNU Gjøvik er oppdragsgiver og produktet i utgangspunktet skal brukes på IVB og ID-laben, er prosjektet hovedsakelig rettet mot en løsning som kan brukes der. Det betyr ikke at systemet ikke kan være ett nyttig produkt for andre brukere også. Derfor er det forsøkt å tilrettelegge for at prosjektet enkelt kan videreutvikles og brukes av andre.

## 1.2 Problemstilling

«Hvordan kan man parametrisere en lagringsløsning som gir ferdige arbeidstegninger og kuttfiler?»

## 1.3 Mål

### 1.3.1 Effektmål

Effektmålet for dette prosjektet er å lage ett oppbevaringssystem som ved hjelp av parametrisk design som gir brukeren oppbevaringsbokser på ønsket mål, innenfor en gitt standard. Løsningen kan produseres lokalt og med få nødvendige verktøy.

Løsningen er skalerbar og kan videreføres til større produksjonsskala med bruk av mer avanserte maskiner og utstyr.

### **1.3.2 Resultatmål**

Resultatmålet for oppgaven er å presentere en oppbevaringsløsning for IVB/ID-lab, som vil gjøre oppbevaring av deler og utstyr enklere og mer brukervennlig enn dagens løsning. Fullskala prototype og skalerte modeller skal produseres lokalt og fremvises ved enden av prosjektet.

## **1.4 Avgrensing**

Denne typen prosjekt kan bli veldig store. Det er derfor nødvendig med noen avgrensinger.

I det parametriske designet er det i utgangspunktet mulig å legge inn uendelige valg og størrelser. Det er derfor gjort avgrensinger både på størrelser og tilbehør.

Siden laserkutteren på NTNU Gjøvik ikke kan kutte tykkere plater enn 6mm med kryssfiner, ble det en naturlig avgrensing for de minste boksene. Siden dette trolig ikke er sterkt nok til å tåle kravspesifikasjonen på 50 kilo, blir de største boksene produsert med 12mm plater. Da blir kravet dekket, samtidig som man unngår at de minste kassene blir unødvendig dyre og tunge. Som øvre grense for dimensjonene til boksene er det valgt halvpallestørrelse, 600x800mm. Hvis man trenger større bokser enn dette, kan man like godt bruke hele pallen. Det var naturlig å ta utgangspunkt i paller, siden det er pallereoler som er hoved lagringssystemet ved labene i dag.

Et mål i oppgaven er at meste av tilbehøret til kassen skal kunne bli produsert med additiv tilvirking. Å lage fungerende deler er tidkrevende og kan involvere en del testing for å få et godt nok resultat. Additiv tilvirking har også veldig mange forskjellige parametere man kan endres på for å påvirke egenskapene i komponentene som blir produsert. Vi kommer derfor til å holde oss til spesifikasjonene gitt at filamentprodusentene og ikke eksperimenter med for eksempel temperatur eller vifteturttall i denne oppgaven.

Til slutt gjør den begrensa tida vi har det umulige å se på slitasje overtid eller teste repetitive belastinger som å løfte og sette fra seg en kasse.

## 2 Teori

I teorikapittelet beskriver vi verktøyene som har blitt brukt til oppgaven, og teorier oppgaven bygger på for å analysere valgene som har blitt tatt. Først er det en innføring i modelleringsprogrammet SolidWorks, etterfulgt av et overblikk om sirkulærøkonomi. Deretter skal vi gjennomgå hva parametrisert design er, hva metoden innebærer, og hvilke muligheter designet gir. I avsnittet om additiv tilvirkning dekkes både hva det er og hvilke materialer som kan brukes. Til slutt er det en kort forklaring av andre programmer som har gjort det mulig å gjøre dette prosjektet.

### 2.1 SolidWorks

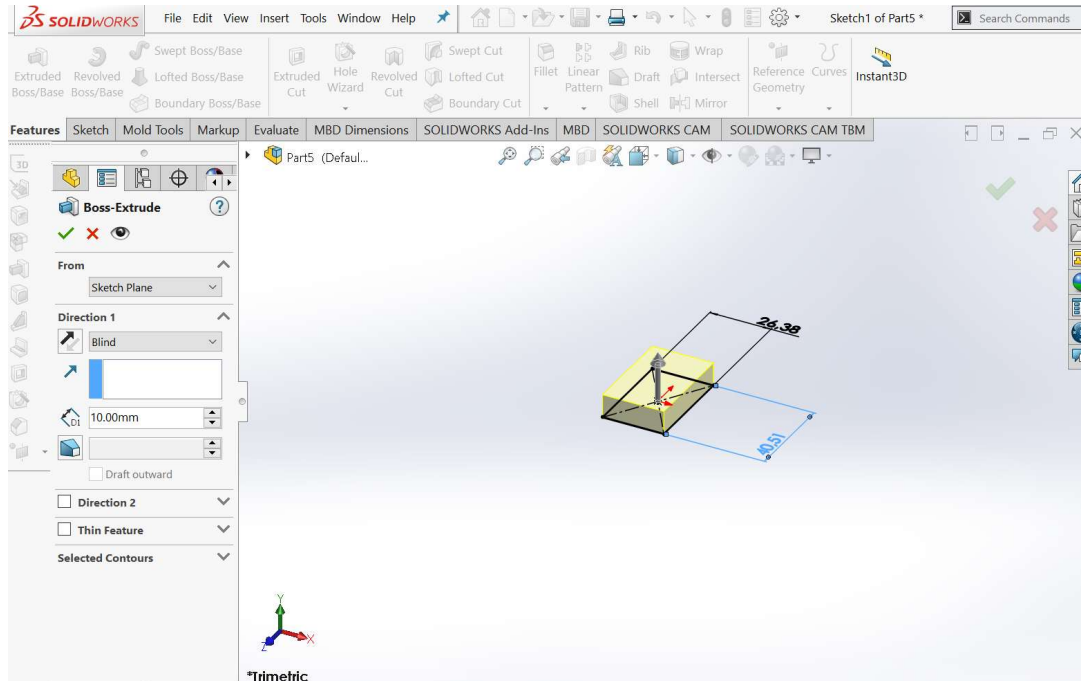
SolidWorks er et data-assistert design program (CAD/CAE) laget av Dassault systemès (1). Det brukes av ingeniører og designere verden over for modellering og analyser av komponenter, og er sammenlignbart med andre kjente programmer som AutoCAD, Inventor, Abaqus etc. SolidWorks er programmet som har blitt mest brukt gjennom utdanningen, og vil dermed bli primært brukt til å modellere og parametrisere kassen i oppgaven. For at leseren skal få en god forståelse av hvordan oppgaven er løst, er det nødvendig med en grunnleggende gjennomgang av hvordan SolidWorks er oppbygget. Merk at SolidWorks har hovedspråk på engelsk, så det vil forekomme en del engelske begrep.

Ved modellering med SolidWorks deles det gjerne opp i 3 underliggende kategorier; part, assembly og drawing.

#### 2.1.1 Part

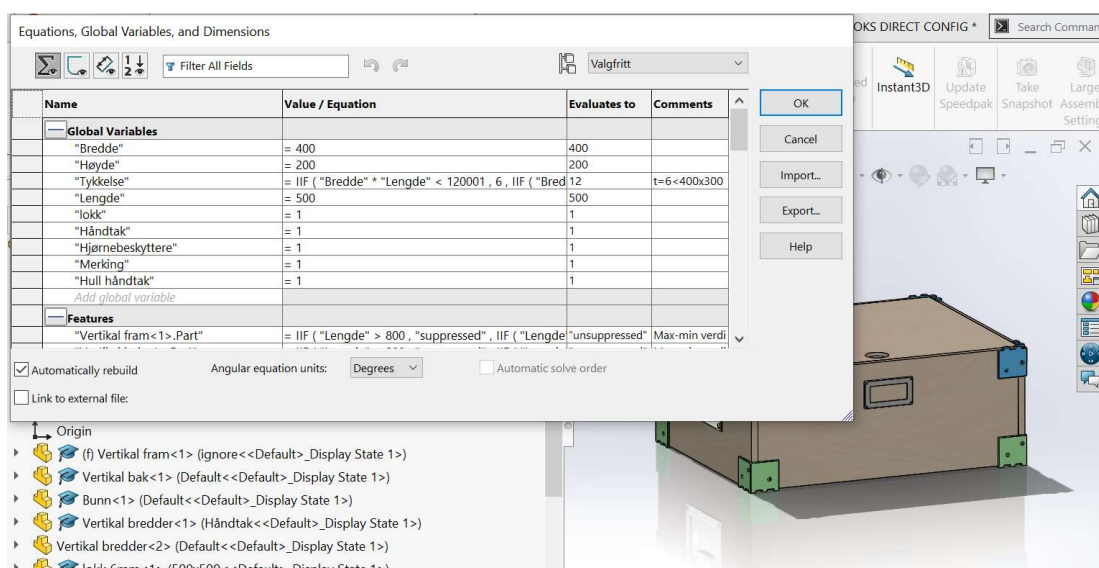
Her modelleres hver enkelt komponent i sin egen fil, hvor man starter med å lage en grunntegning i ett plan, før man så bruker en av mange såkalte features til å lage en solid modell fra grunntegningen. Her kan man blant annet ekstrudere som vist i figur 1, kutte, runde hjørner, lage lineære mønstre, etc. I tillegg kan man kjøre statiske analyser for å beregne hvor mye komponenten vil tåle, og om den lever opp til kravene som er satt.





Figur 1: Eksempel på ekstrudering av part-fil i SolidWorks Assembly

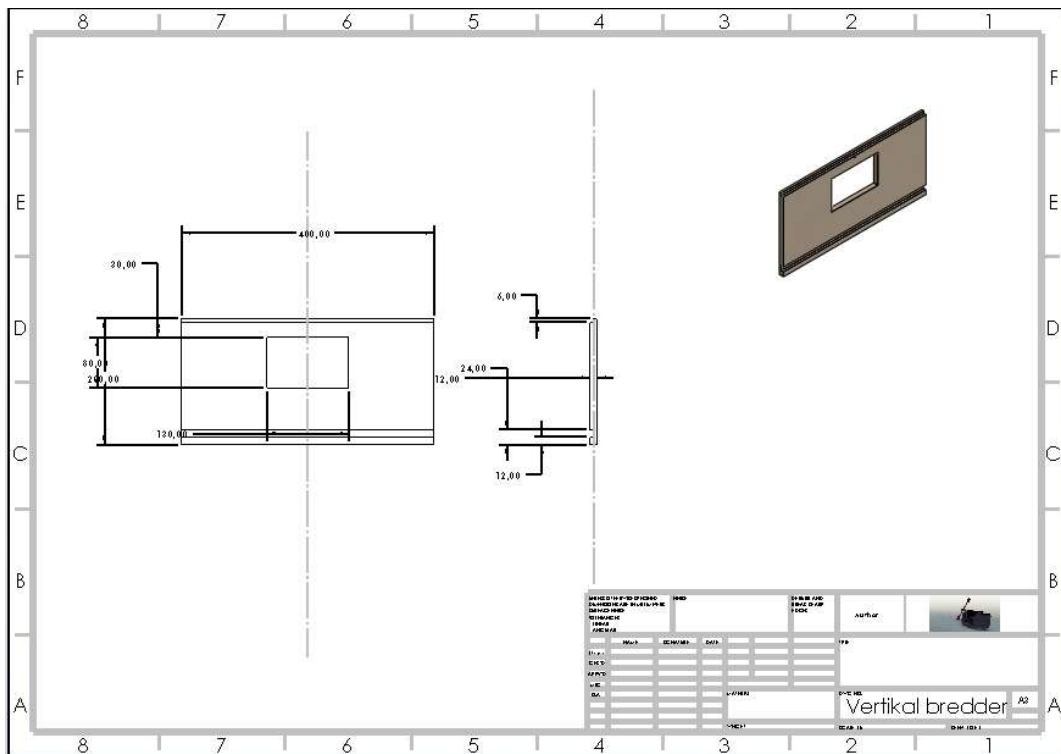
Her settes de individuelle part-filene sammen til en assembly-fil. I likhet med partfilene så er det flere valgmuligheter for hvordan komponentene kan settes sammen, også kalt mates i SolidWorks. Man kan fikse de i forhold til hverandre, eller man kan gi komponentene frihet til å bevege seg i en gitt retning, kalt mechanical mates. Et viktig verktøy i assembly-filen som vil bli hyppig brukt er equations. Her kan man definere globale variabler som senere kan brukes til å parametrisere dimensjoner i hver part-fil, som vist i figur 2 nedenfor.



Figur 2: Assembly-fil med ligningssett

## 2.1.2 Drawing

Når alle komponenter er designet og assembly er komplett, kan man lage tegninger av disse som kan brukes til produksjon. Eksempel på dette er illustrert i figur 3 nedenfor. Filene kan eksporteres til DXF-format som senere kan brukes som kutt-filer til en laserkutter.



Figur 3: Eksempel på tegning i SolidWorks

## 2.1.3 Simulation

Simulation er et analyseverktøy i SolidWorks som kan brukes til å beregne spenninger og deformasjoner hos en eller flere komponenter samtidig. Man kan analysere designet etter termisk analyse, knekking, drop-test, statisk last eller utmatting. I denne oppgaven er statisk analyse anvendt. Metoden definerer fikserte punkter til komponenten, og påfører en definert last som vil plote deformasjoner og spenninger.

## 2.1.4 Composer

Composer er et programtillegg i SolidWorks som gjør det mulig å jobbe direkte ut fra 3D CAD data til å lage fotorealistiske bilder, animasjoner og illustrasjoner. På denne måten kan man raskt og enkelt lage grafisk materiale i 2D eller 3D, for å forklare og presentere produktet på en god måte. Siden dette gjøres i ett programvaretillegg som kjøres utenom SolidWorks er det heller ingen fare for å ødelegge tegninger eller koblinger i modellen.

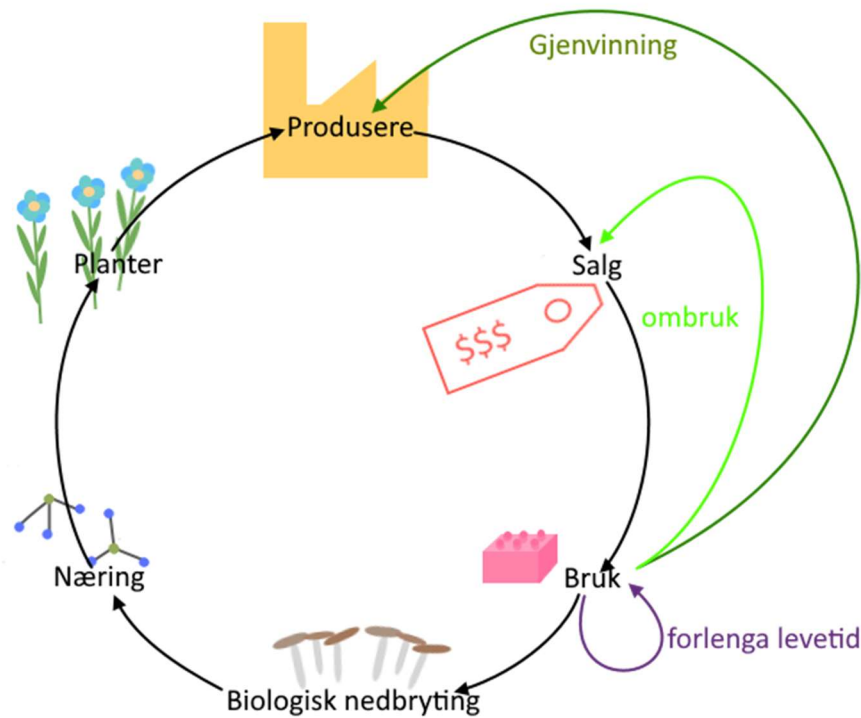
## 2.2 Sirkulær økonomi

Ressurseffektivitet og bærekraftig produksjoner er et viktig element å ta hensyn til i produktutvikling. I dette avsnittet vil vi derfor gi leseren et lite innblikk i sirkulær økonomi. Sirkulær økonomi er et økonomisk system som sikter på å fjerne avfall og bruke ressurser kontinuerlig (2). Dette er i motsetning til den lineære modellen som er i bruk i dag, også kalt "ta-lage-kaste"-modellen. Denne modellen er karakteristisk for sin ødselhet og har alvorlige konsekvenser som klimaendringer, tap av biomangfold, jorderosjon, luft- og vannforurensing, osv. (2, s. 19).

Det er flere forskjellige definisjoner av sirkulær økonomi, men prinsippene og sluttmålet er det samme. Grunnprinsippene inkluderer å designe ut avfall, beholde ressurser sin høyeste verdi lengst mulig og å bruke mest mulig fornybare energikilder. Fra-vugge-til-vugge er et system som tar inspirasjon fra naturen til å lage et lukket system, der resultatet av en prosess kan gjenbrukes en annen. (3)

### 2.2.1 Sirkulær tilførsel

Sirkulær tilførsel (input) betyr å bruke fornybare, biobaserte eller resirkulerte energikilder, vann eller materialer (2, s. 27). Det er en vesentlig del av å lage et produkt i et lukket system. Resirkulerte materialer eller deler fra det samme produkt brukes i produksjonen av nye produkter.



Figur 4: Syklus for et plantebasert og biologisk nedbrytbart produkt i en sirkulær økonomisk modell

## 2.2.2 Forlengt levetid

Reparasjon, renovert og om-produksjon (4) for å forlenge produktets levetid. Figur 4 viser hvordan forlengt levetid til et bruk kan være en del av bruksfasen til en enkelt bruker og ombruk i form av at gir eller selger produktet videre når man ikke trenger det lenger.

Produsenter av elektronisk utstyr er de som oftest forlenger levetiden til produktene sine. Klesprodusenten Patagonia som har livstidsgaranti for å reparasjon av produktene sine er eksempel på en annen bransje som også forlenger levetiden til sine egne produkter.

## 2.2.3 Ressursgjenvinning (berging)

Når alle muligheter til å forlenge et produkt sin levetid er brukt opp, er det viktige å berge verdifulle materialer og ressurser (restverdi) som kan bli brukt i andre ting gjennom material- og energigjenvinning. (2)

Å designe for sirkulær økonomien innebærer å ta høyde for material- og energigjenvinning i designprosessen. Når man velger materialer, må man ta hensyn til hvor de kommer fra og

hvordan de produseres. Produktet må designes av god kvalitet slik at det varer lenger. Dette inkluderer muligheten til å reparere det. Når produktet er “oppbrukt” er det viktig å optimalisere bruk av deler fra kasserte produkter til ny produkter.

## 2.2.4 Materialgjenvinning

Materialgjenvinning er å gjenvinne avfall så materialene kan brukes som råvare i produksjon av nye produkter (5). Denne typen gjenvinning reduserer behovet for å utvinne nye naturressurser. Materialgjenvinning av plast kan deles opp i to grupper, termomekanisk- og kjemiskgjenvinning. (6)

Termomekanisk gjenvinning er mye brukt for gjenvinning av termoplast. Der smeltes platen ned til pellets som er den vanlige formen før det er brukt i produksjon. Med tanke på FFF (Fused Filament Fabrication) blir granulat omformet til filament som igjen kan bli brukt i 3D-printer. Ikke alle typer termoplast tåler den prosessen like godt og kan degradere over tid til det ikke lenger egnet seg til det samme formålet lenger. (6)

Kjemisk gjenvinning er en annen måte å gjenvinne termoplast på. Da bruker man kjemikalier til å bryte ned polymerkjedene som platen består ned til sine bestanddeler. Det man sitter igjen med da kan brukes til å lage ny plast. (6)

Noen plasttyper er biologisk nedbrytbare som betyr at når det ikke lenger er mulig å gjenvinne platen til ny plast kan den komposteres og for eksempel brukes til gjødsel av nye avlinger til bioplast.

Andre formere for material gjenvinning er når man lager nye materialer med lavere og dårligere fysiske, mekaniske eller kjemiske egenskaper enn det originale materialet. Med termomekanisk gjenvinning av plastflasker lagd av PET har ofte det gjenvunnet materialet lavere viskositet, som gjør det uegnet til å lage nye plastflasker. (6) Hvis det er tilfellet, kan man kan for eksempel lage fiber til klesproduksjon.

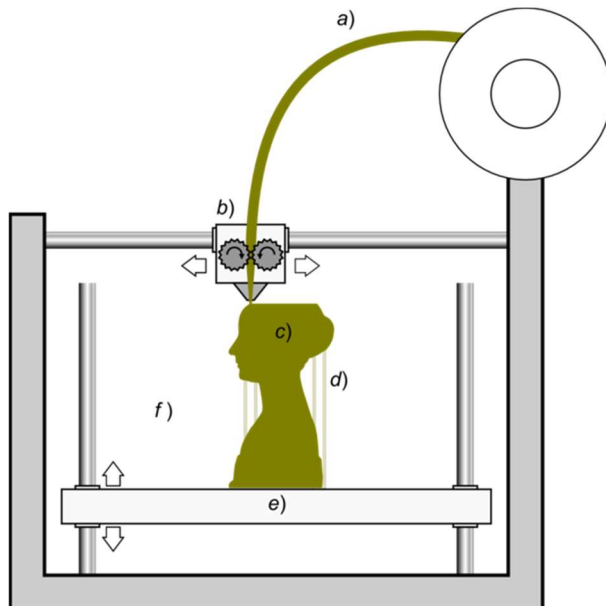
## 2.2.5 Energigjenvinning

Når det ikke er mulig å lage nye materialer, er energigjenvinning en måte å bruke varmen fra forbrenning av avfall til produksjon av nyttbar varme (fjernvarme) eller elektrisitet (7).

## 2.3 Additiv tilvirkning

Additiv tilvirkning (AM) er en moderne måte å lage produkter på og er bedre kjent på daglig tale som 3D-printing. Opprinnelig ble AM brukt til å lage prototyper, men etter hvert som teknologien har forbedret seg har bruksområdene ekspandert.

Produksjonsmetoden går ut på å gradvis legge til nye lag med material til man har et ferdig produkt. Det er mange forskjellige måter prosessen kan foregå på. I denne oppgaven benyttes «Fused Filament Fabrication» (FFF), bedre kjent under varemerket «FDM» som står for «Fused Deposition Modeling». FFF er en av de enkleste, rimeligste og mest utbredte formene for additiv tilvirkning.



Figur 5: Skjematisk representasjon av FFF. (8)

Teknikken brukt i FFF er at plastfilament (Figur 5a) mates gjennom et bevegelig oppvarmet hode (Figur 5b) som smelter og ekstruderer og plasserer det lagvis i ønsket form (Figur 5c) på en byggeplate. En plattform (Figur 5e) som senkes etter at hvert lag er lagt. FFF bruker ekstra

støttestrukturer (Figur 5d) for å kunne lage modeller med overheng. (8). Det er også mulig å heve hode for hvert lag i stedet for å senke plattformen. AM er godt egnet til å lage unike produkter uten å for eksempel lage nye støpeformer som i tradisjonelle produksjonsmetoder. Proteser er en produktkategori som har god nytte av AM sin tilpasningsdyktighet for spesialtilpassing til individuelle kunder.

### **2.3.1 Materialer**

FFF (Fused Filament Fabrication) bruker filament laget av termoplast, som er en undergruppe av polymerer definert av at den smelter når den varmes opp, og blir solid igjen etter avkjøling (9). Det gjør at termoplast kan varmes opp og formes med additiv tilvirkning. Termoplasten som brukes til FFF er veldig variert med tanke på utseende, mekaniske egenskaper, hvor lett det er å jobbe med og hvilken miljøpåvirkning den har. Produsentene av filamentet har egne variasjoner av de forskjellige termoplasttypene med forskjeller i for eksempel kvalitet, mekaniske egenskaper og farge.

### **2.3.2 PLA**

Den mest vanlige termoplasten brukt i FFF er «Polymelkesyre» forkortet «PLA» fra engelsk «Polylactic Acid». PLA er en bioplast laget av stivelse, ofte fra korn eller sukker, som er lett å bruke. Det er også komposterbart med industrielle teknikker. De mekaniske egenskapene til PLA er ikke de beste. Materialet er ganske sprøtt, men flere produsenter har variasjoner av PLA, ofte kalt PLA+. Dette materialet er mindre sprøtt og er mer egnet for langvarig bruk.

PLA+ er ikke et entydig produkt, men en produktkategori der de forskjellige produsentene bruker tilsetningsstoffer i PLA for å endre de mekaniske egenskapene. Hva de forskjellige produsentene bruker som tilsetningsstoffer er varierende og er som regel proprietær informasjon. Dette gjør at det ikke er mulig å gjøre generelle antagelser om de mekaniske egenskapene til PLA+ fra de forskjellige produsentene. PLA+ er like enkelt å bruke som vanlig PLA, men det varierer om PLA+ er biologisk nedbrytbart på grunn av de forskjellige tilsetningsstoffene som blir brukt.

### **2.3.3 ABS**

ABS er en forkortelse for Akrylnitril-butadien-styren og er en petroleumsbasert polymer som ikke er biologisk nedbrytbar. ABS er vanskeligere å printe med enn PLA siden det har en tendens til å krympe og deformeres når det avkjøles (10). Et godt ventilasjonssystem er også anbefalt siden ABS skaper avgasser mellom 210°C og 250°C, som kan skape fysisk ubehag for de fleste brukere (11).

Slitestyrken til ABS er bedre enn PLA, men flere produsenter påstår at deres variant av PLA+ måler seg med ABS.

### **2.3.4 PETG**

PETG (Polyetylentereftalatglykol) er en variasjon av PET som er for eksempel mye brukt i brusflasker. Plasttypen anses som en mellomting av PLA og ABS med hensyn til mekaniske egenskaper og hvor lett den er å bruke. PETG er mer hygroskopisk (trekker til seg fuktighet fra luften) enn PLA og ABS. Derfor må man passe bedre på når man skal oppbevare det tørt. PETG er ikke nedbrytbart, men er godt egnet for kjemisk resirkulering (12).

### **2.3.5 Nylon**

Nylon har høy strekkfasthet, slitestyrke og fleksibilitet. Men det er dyrt, vanskeligere å printe med enn PLA og veldig hygroskopisk (13). Resirkulering av nylon er vanskelig, derfor er det per dags dato få aktører som gjør dette (14).

Nylon har en tendens til å krympe og vri seg når temperaturen endres og modellen avkjøles. Det anbefales å bruke et “enclosure”, ofte et skap lagd av plexiglass, for å holde temperaturen jevn (15).

### **2.3.6 Kompositter**

Kompositter har også begynt å bli utbredt blant filamenter for FFF. Karbon- og tre-fibre (16) er vanlige fyllstoff å bruke i filamenter for FFF.

Tre-fibre i PLA forringer de mekaniske egenskapene til PLA og gjør i tillegg plasten vanskeligere å resirkulere på et senere tidspunkt.



Karbonfiber som forsterker filament, kan man få med forskjellige typer termoplast som matrise. Komposittfilamenter har forbedret mekaniske egenskaper sammenlignet med vanlige filamenter, men disse koster mer. Komposittfilamenter sliter mer på dysen på 3D-printeren. Det er ofte anbefalt eller nødvendig med en forsterket dyse i stål fremfor messing (standard). Kompositter består av to forskjellige material som er blandet sammen, derfor er det vanskeligere å resirkulere dem. Siden karbonfiber ikke er biologisk nedbrytbart, må den skilles fra PLA for å kunne kompostere PLA-matrisen i en kompositt.

### **2.3.7 PrusaSlicer**

PrusaSlicer er Prusa Research sin egen utviklet “slicer” basert på et åpen-kildekode prosjekt kalt Slic3r. Prusa Research er en produsent av 3D-printer og tilbehør basert i Tsjekkia. En slicer deler opp STL eller 3MF-filer generert fra 3D-modeller i horisontale lag, og gjør det om til instruksjoner som 3D-printeren da kan følge for å reprodusere modellen. PrusaSlicer kommer med ferdige profiler som passer til 3D-printerne de selv produserer. STL-filer (17) beskriver bare overflategeometrien til et objekt, mens 3MF-filer har også informasjon om farge, materialer, støttestrukturer og mer som ikke kan være med i en STL-fil. En slicer kontrollerer hvor høye og brede stripene med ekstrudert plast er, hvor mange hele lag det er i toppen og bunnen av modellen, hvor mange lag veggene er lagd av, hvor stor prosentandel av den hulle innsiden som skal fylles med plast, temperaturen og hastigheten som printeren skal bruke. En slicer kan i tillegg lage støttestrukturer for geometrier som er umulig å 3D-printe, som bratte overheng og lignende. En støttestruktur gir printeren noe å printe på i stedet for å printe ut i løse lufta.

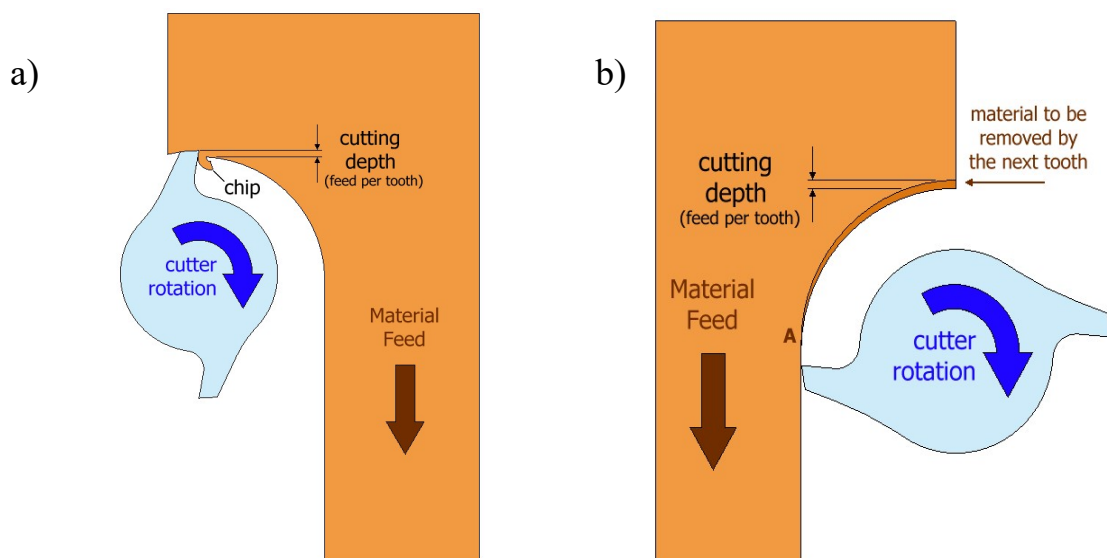
## **2.4 CNC-fresing**

Mens en 3D-printer lager former ved å bygge lag på lag, så opererer en fres ved å bruke et roterende verktøy til å ta vekk materiale. Forskjellen på CNC (Computer numeric control) og manuell fresing, er at ved CNC så bruker vi forhåndsdefinerte datafiler som bestemmer hvilke operasjoner som skal utføres. Norge var blant de første til å ta i bruk CNC til maskineringsprosesser (18). Dette gir redusert risiko for avvik med tanke på menneskelige feil.

For manuelle fresemaskiner er det normalt med 1-3 aksers frihet, mens for CNC så finnes det opptil 12 akser (19) For å gi et innblikk i fordelene som kommer med dette, så kan man med 5 akser maskinere baksiden uten å spenne opp arbeidsstykket på nytt. En ulempe er at ved flere frihetsakser så vil filene bli mer kompliserte, maskinen blir dyrere og det vil kreve bedre brukeropplæring.

Faktorer som må tas i betraktning ved maskinbearbeiding er skjærehastighet, sponareal, kuttdybde, sponekvivalent, hovedskjærkraft, effektbehov og profildybde (18). Disse faktorene bestemmer blant annet hvordan nøyaktigheten på overflaten blir, og hvordan varmen fordeles. Vi vil ha mest mulig av varmen i sponet, da dette får energien vekk fra skjærsonen og forhindrer herding av emnet som bearbeides (18). Måten dette oppnås er å ha størst mulig spon, altså dype kutt. Hvis dette ikke oppnås, og varmen fordeles inn i emnet, så vil man få avvik på dimensjonene når emnet kjøles ned og dermed krymper. Det vil også som nevnt tidligere bli mye hardere, noe som sliter verktøyet mer.

En annen ting som bestemmer resultatet på arbeidsstykket, er hvilken vei fresen går i forhold til rotasjonen. Dette defineres som motfres, hvor rotasjonen er med fartsretningen til verktøyet, og medfres, hvor rotasjonen er mot fartsretningen til verktøyet (18). Dette er illustrert i figur 6 nedenfor. Motfres var vanligere før i tiden da maskinene hadde mindre solide chassiss. Medfres brukes mest i dag grunnet utviklingen av stivere maskiner, noe som neglisjerer verktøydefleksjon.



Figur 6: a) medfres (20) b) motfres (21)

Enda en ting som må følges opp ved maskinering er bruk av riktig verktøy til riktig material. Dette skyldes at geometrien og materialegenskapene til verktøyet vil variere. Ved dreining kommer også eggvinkel og sponvinkel inn i bildet, hvor førstnevnte bestemmer styrken til verktøyet, mens en stor sponvinkel gir bedre skjærforhold.

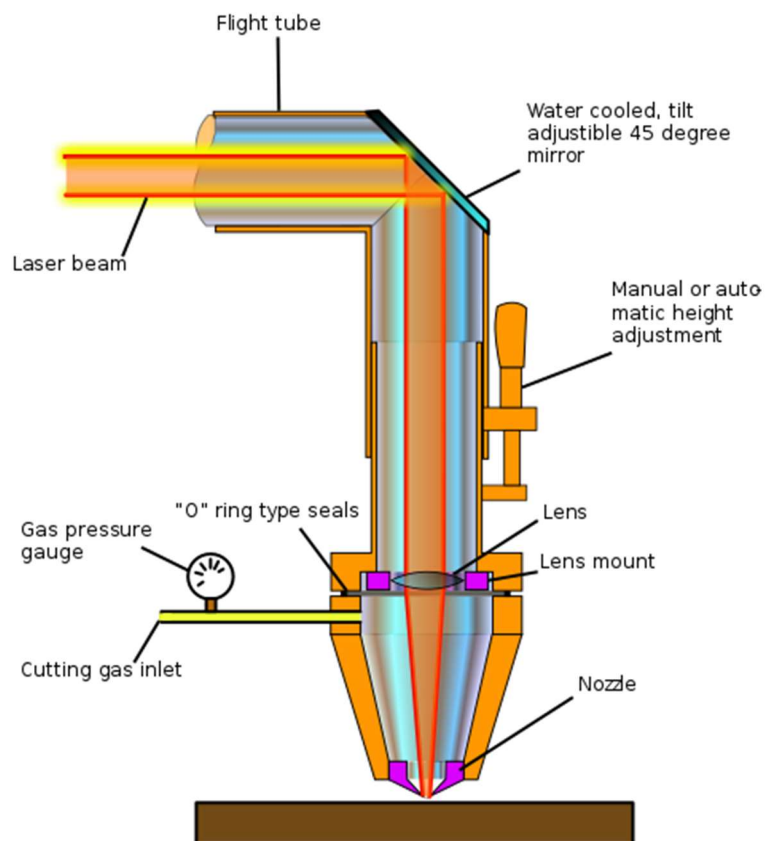
Ved CNC-fresing er det viktig at denne type operasjoner foregår i et lukket miljø med tanke på HMS, da vi har bevegelige deler som ikke tar hensyn til om en finger kommer i veien. De fleste nye CNC-maskiner har nå bokser som omslutter hele eller deler av maskinen. Flere av disse har også installert avsug for å ta opp farlige avgasser. Dette gjelder for eksempel ved fresing av kryssfiner, hvor støvet kan være kreftfremkallende ved gjentakende inhalering.

## 2.5 Laserkutting

Laserkutting er også en CNC-prosess, der vi bruker en konsentrert lysstråle med høy energi på et lite område (18). Energien i lysstrålen absorberes i materialet og konverteres til varme, som stil slutt smelter og fordampes. En dekk-gass brukes så til å blåse vekk smeltebadet fra resten av materialet. Hvordan dette foregår er illustrert i figur 7 nedenfor. Dette gir et veldig nøyaktig kutt med minimal bearbeiding av kuttflaten, samt at vi får lite materialavsett sammenlignet med spon fra fresing. Det er også en veldig effektiv prosess, da den ved materialer med liten tetthet kan kutte mye fortere enn ved fresing.

Selve lysbuen er monokromatisk og koherent. Monokromatisk vil si at all lysstråling har samme frekvens (22). For synlige bølgelengder betyr dette at lysstrålen har en farge i motsetning til vanlig lys. Koherent vil si at bølgelengden til lysstrålen er synkronisert slik at man oppnår resonans.

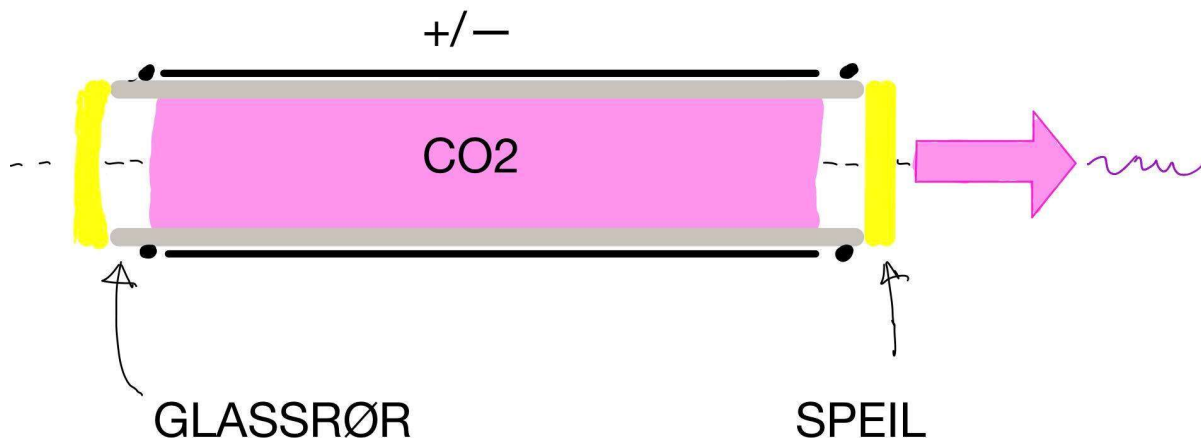
De fleste laserkuttere foregår todimensjonalt, hvor vi må stille inn z-aksen til korrekt høyde i forhold til materialet. Dette krever at materialet har en jevn og homogen overflate, da store høydeforskjeller vil gi dårligere kuttflate og evt. sette laseren ut av fokus. Det finnes flere typer laserkuttere, hvor de kategoriseres ut ifra hva kilden til den optiske forsterkningen er. Dette kan være solid materie, væske, gass og plasma (22). Blant de mest brukte er Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminum garnet) lasere og CO<sub>2</sub> lasere ved bruk av gass. Her vil vi se nærmere på CO<sub>2</sub> lasere, da det er denne typen som anvendes på verkstedet til IVB.



Figur 7: Munnstykke laser (23)

### 2.5.1 CO2 laser

En CO2 laser produserer lysstråler i et lukket glassrør fylt med CO2. Måten dette skjer på er ved å sende høyspent likestrøm gjennom glassrøret, som reagerer med gasspartiklene slik at de ioniseres (24). Dette betyr at atomene i gassen tar opp energi og gir ifra seg denne i form av lyskvanter, det vil si elektromagnetisk stråling. Det oppstår så stående lysbølger mellom to speil (resonans), og 5% av energien slippes ut gjennom det ene speilet som en laserstråle (18). Dette er illustrert i figur 8 nedenfor. Denne lysstrålen blir såpass konsentrert at den gir høy nok energi til å kutte materialer, for stål opptil 60 mm. CO2 laser er den typen laserkutter IVB har, Epilog Laser Fusion M2 32/40.



*Figur 8: CO2 laser*

CO2 laser fungerer også på porøse og organiske materialer, grunnet dets lange bølgelengde, er kost effektiv og gir liten mekanisk belastning sammenlignet med fresing. Man kan også sveise i samme operasjonen. Det gir derimot noe grovere kuttflate i metaller, og er veldig dyrt sammenlignet med fresing. Materialer som kan brukes er blant annet stål, rustfritt, trevirke, papir, tekstiler, plast og keramikk (24).

HMS er også en viktig faktor her, hvor høy varme gir farlige avgasser på lik linje med fresing. Ved kutting av trevirke vil man også få sot-dannelse som setter seg langs kuttlinja, dette kan forebygges ved å legge maskeringstape langs kanten. Øyevern er også viktig å ta for seg ved laserkutting. Ved fresing hvor man måtte beskytte seg mot å få spon i øynene, så må man beskytte seg mot selve lysstrålen ved laserkutting, da dette kan sammenlignes med å se rett på en lysbue under sveising. Av samme grunn så kan man heller ikke kutte glass, da lysstrålen vil bli reflektert tilbake, noe som kan skade personell eller ødelegge linsa. Dette kan derimot løses ved å «matte» overflaten til arbeidsstykket.

CNC fresing er langt billigere enn laserkutting, opp til 1/10. Laserkutteren på Gjøvik for eksempel, kostet ca. 370 000 kr og tar opptil 800x500 plater med 6 mm tykkelse.

## 2.6 Andre programvarer

### **2.6.1 Excel/Visual Basic for Applications (VBA)**

Excel er et regneark program som kan utføre beregninger. SolidWorks kan importere parametere fra Excel filer for å endre på modeller basert på bruker innputt. Man kan skrive makroer som fungerer som egne små programmer i Excel. Visual Basic for Applications (VBA) er programmeringsspråket som blir brukt til dette. Makroer gjør det mulig å skrive til og fra Excel-filer, i tillegg til å lage helt nye filer. Excel er et program som veldig mange kjenner og har tilgang til. Brukeren/kunden kan dermed lett legge inn sine behov og enkelt få produkter konkret tilpasset sine behov.

### **2.6.2 Deepnest.io**

Deepnest er en gratis programvare med åpen kildekode program skrevet av Jack Qiao. For å redusere material- og tidsforbruk, plasserer programmet automatisk deler på et angitt overflateareal på best mulig måte. Programmet kan lese filtypene DXF, SVG, og Corel CDR og skrive ut i DXF og SVG. Det finnes lignende profesjonelle programvarer som kan gjøre de samme eller mer komplekse operasjoner. Alle tar DXF-filer, men ingen aksepterer SVG-filer. De andre programvarene er dyrere.

### **2.6.3 Inkscape**

Inkscape er et gratis program med åpen-kildekode som kan behandle vektorgrafikk og det standardiserte filformatet SVG. Vektorgrafikk bruker et todimensjonalt koordinatsystem for å tegne et bilde i motsetning til rastergrafikk som bruker piksler. Koordinatene i vektorfilene samsvarer da med koordinatene laserkutteren bruker til å vite hvor den skal kutte.

## **2.7 Re-distributed manufacturing (RdM)**

Re-distributed manufacturing, eller RdM, er et konsept som går ut på å re-lokalisere sentraliserte masseproduksjonslinjer til mindre lokale og adaptive verksted. Disse verkstedene skal da kunne produsere produkter med nye digitaliserte produksjonsprosesser, basert på etterspørsel og tilgang til lokale råvarer (25). Dette minimerer bruken av langtransport av

råmaterialer og ferdige produkter, som står for ¼ av verdens utslipp av fossile brennstoffer. Man reduserer også lagerbeholdningen da produktet kan produseres av eksisterende rest-materialer basert på lokal etterspørsel. Produktet kan også produseres på spesifikke mål i stedet for å forholde seg til standardiserte mål fra sentrale produksjonslinjer.

## 2.8 Prototyping

Prototyping er en prosess der man gjør ideen om til et håndfast produkt. Ved å bruke prototyper kan man få testet og avdekket eventuelle feil eller mangler ved produktet som ellers kanskje ikke hadde blitt avdekket gjennom design og utviklingsprosessen. Prototyping kan på denne måten brukes som et verktøy for å bekrefte dagens design, eller for å teste nye design.

Om prototypene skal testes av ekte brukere blir det veldig viktig at prototypen ser og kjennes så bra ut at det kunne være det ferdige produktet. For å få ekte tilbakemeldinger vil det nemlig være vesentlig at testpersonene ikke er klar over at det de tester er en prototype. Blir de gjort oppmerksom på at det er en prototype vil de mest sannsynlig komme med proaktive forslag istedenfor genuine reaksjoner på produktet (26).

## 2.9 Parametrisk Design

Parametrisk design er en designmetode der egenskaper blir bestemt ut ifra en algoritmisk prosess basert på parametere i motsetning til å bli bestemt direkte. Det er parametere og forhåndsbestemte regler som bestemmer hva design-resultatet blir (27). Når man endrer parameter skjer det relaterte endringer i resten av designet ut ifra de reglene som er satt.

# 3 Metode

Forrige kapittel la et teorigrunnlag som skal brukes videre i produktutviklingsprosessen som blir beskrevet i kapittel 4. Dette kapitlet gir en innføring i hvordan en produktutviklingsprosess kan gjennomføres.

## 3.1 Produktutviklingsprosessen

En produktutviklingsprosess er faste steg som en virksomhet bruker for å komme på, designe og kommersialisere et produkt (28). I en bedrift er det mange forskjellige elementer som skal være med for å lansere et nytt produkt. Eksempler på dette er markedsføring, design, produksjon og forskning. Ikke alle de er relevante i denne oppgaven, derfor kommer vi bare til å gå nærmere inn på design- og produksjonselementet. Selve produktutviklingsprosessen består av 6 steg: planlegging, konseptutvikling, overordna design, detalj design, testing og raffinering, og produksjonsopptrapping. Noen deler av testfasen og produksjonsopptrappingsfasen er utenfor hva vi får gått inn på i denne oppgaven. Noen av fordelene med en vel definert prosess er kvalitetssikring av produktet, koordinering av utviklingsteamet og planlegging av milepæler for alle fasene.

## 3.2 Planlegging

I planleggingsfasen legger man grunnlaget for resten produktutviklingsprosessen. Et budsjett blir lagt, ressurser blir fordelt og det blir lagt en tidsplan for prosessen. Det blir også etablert hvilke begrensninger man har med tanke på for eksempel produksjon. Planleggingen sier også noe om hvilke produkter som skal utvikles. I større bedrifter kan flere produkter være en del av planleggingsfasen så bedriften kan ha en helhetlig plan for hele foretaket (28). Etter planleggingsfasen går man videre med konseptutvikling.



## **3.3 Konseptutvikling**

Konseptutviklingsprosessen går ut på å identifisere hvilke behov brukerne har og så oversette det til et teknisk og strukturert format med en kravspesifikasjon. Ut fra dette lages man forskjellige konsepter før man til slutt har velger ut et endelig konsept. I løpet av prosessen kan man blant annet sammenligne allerede eksisterende produkter på markedet.

Konseptutvikling kan deles opp i 4 forskjellige aktiviteter som blir beskrevet videre i dette kapitlet.

### **3.3.1 Identifisere brukerbehov**

Som nevnt i introduksjonen til kapittel 3.3 er målet for denne aktiviteten å finne ut hva behovene til brukerne er. Behovene til brukerne bør vektlegges etter hvor viktig de forskjellige behovene er. Behov som ikke finnes i eksisterende produkter bør spesielt prioriteres (28).

### **3.3.2 Lage en kravspesifikasjon for produktet**

Kravspesifikasjon skal være en nøyaktig beskrivelse av egenskapene et produkt må ha. Spesifikasjonen er basert på informasjonen man har hentet inn om behovene til brukerne, og gjort om til en tabell der hver spesifikasjon, der det er mulig, har en målemetode og tilhørende ideelle verdier. Kravspesifikasjon oppdateres etter at konsept har blitt valgt for at det skal stemme overens med begrensningene det utvalgte konseptet har.

### **3.3.3 Lage konsepter for produktet**

Formålet med dette steget er å komme opp med idéer, som skaper flere forskjellige konsepter som kan møte behovet til brukerne. Noen metoder som kan brukes i dette steget er idédugnader og å lage tankekart.

### **3.3.3.1 Idedugnad**

I dedugnader er en metode for å lage ideer raskt og effektivt fortrinnsvis i en gruppe sammenheng (29). Overraskende og innovative ideer er ofte resultatet av en vellykket idedugnad. To av reglene til en idedugnad er at alle ideer er innafør, og desto flere ideer man har, desto bedre.

### **3.3.3.2 Tankekart**

Tankekart er et nettverk av relaterte konsepter, men hvilke som helst ideer kan knyttes sammen når man lager tankekart (30). Målet med et tankekart er å lage kreative assosiasjoner mellom forskjellige ideer. Tankekart begynner med å ha et bilde eller tema i midten av en tavle, eller et dataprogram som er egna til oppgaven. Nye ideer sprer seg ut over fra midten koblet sammen med streker. Fri-tenking og spontanitet er viktig prinsipper når man lager tankekart.

Ideene som kommer fra denne typen metoder brukes da til å genere mere konkrete konsepter som kan være i form av en skisse og en kort beskrivelse (28).

### **3.3.4 Velge et eller flere konsepter å gå videre med i utviklingsprosessen**

Når man velger ut konsepter for å teste videre blir konseptene generert i avsnitt 3.3.3 analysert for å finne de mest lovende produktene. I løpet av prosessen er det vanlig å komme med ytterligere konsepter underveis, ofte kombinasjoner av allerede eksisterende konsepter. Utvelgelsen av konsepter er mer formell enn de som ble brukt for å generere ideene (31). En måte å velge ut konsepter på er å sammenligne de med kravspesifikasjon, som ble definert i avsnitt 3.3.2. Da får man muligheten til å velge ut de(t) konseptene/t som møter kravspesifikasjonen best. Hvis det er umulig å velge ut ifra kravspesifikasjonen, så går det an å vektlegge noen spesifikasjoner som viktigere enn andre for å kunne differensiere konseptene (31). Når et konsept er valgt fortsetter man til neste steg i utviklingsprosessen.

## **3.4 Designrealisering**

Denne delen av prosessen går ut på å realisere konseptet som har blitt valgt ut. Et design kan ofte bestå av flere underprosjekter med forskjellige tidsrammer som koordineres før man har et ferdig og komplett realisert design (31). Designrealisering kan involvere steg som konstruksjonsberegninger, materialvalg, og dataassistert konstruksjon. I vårt tilfelle er selve parametriseringen av produktet, ved hjelp av et CAD-programvare, en viktig del av det ferdige designet.

### **3.4.1 Datastyrt analyse**

Dataassistert analyse kan gjøre beregninger på hvordan forskjellige krefter kan påvirke en komponent. Det gjør det mulig å få en pekepinn på for eksempel hvor mye vekt en bjelke tåler. Når man gjør analyser er det viktig å være tydelig på hva det er man prøver å finne ut, antagelser man har gjort og ha en tydelig konklusjon. Analyseverktøyet kan være en del av et CAD-program som i SolidWorks, eller et frittstående program som Abaqus.

### **3.4.2 Materialvalg**

Materialene man bruker er også essensielt for et fullstendig realisert design. Hvilke materialer man bruker bestemmer mye av hvordan det ferdige produktet kommer til å fungere. Valg av materialer burde gjøres ut ifra kravspesifikasjon man kom fram til i avsnitt 3.3.2., og andre faktorer som bærekraft og tilgjengelighet for et materiale.

### **3.4.3 Dataassistert konstruksjon (DAK)**

Å tegne eller modellere et design er kanskje den viktigste delen når man skal realisere et design. Moderne CAD-programmer gjør det enklere å designe et produkt og lage de tilhørende tekniske tegningene. CAD gjør det også mulig å parametrisere et design med automatiske oppdateringer. Når man designer i et CAD-program er det viktig å huske å ta høyde for hvordan produktet eventuelt skal produseres (31). Parametrisering må også gjøres

her, da er det viktig at man designer modellen på en sånn måte at de riktige endringene skjer når man endrer på en parameter.

Når designrealiseringen er fullført skal tegninger eller CAD-filer for alle elementene som skal produseres være klare. Spesifikasjoner for deler som blir kjøpt inn, og planer for produksjon og montering av produktet også være klart (28).

### **3.4.4 Monteringsanvisning**

En studie utført på Stanford University har kommet frem til at det å designe en god monteringsanvisning avhenger i hovedsak av to faktorer: God planlegging og en god presentasjon av stegene som skal utføres. Siden ett sett med deler ofte kan settes sammen på mange forskjellige måter, blir det viktig å planlegge godt i forhold til hva som vil gi en forståelsesfull og effektiv monteringsanvisning. Samtidig blir det viktig at presentasjonen av stegene inneholder gode bilder og forklaringer, men ikke for mye informasjon.

Samme studie påpeker at mennesker tenker på montering som et hierarki av deler. Et hierarki på to nivåer, viktige deler, mindre viktige deler og festemiddel er vanlig for de fleste hjemme-prosjekter og møbler. Der det er mulig foretrekker folk at deler fra samme gruppe tilføres produktet samtidig, eller i sekvens en etter en (32).

Monteringsanvisningen skal gi brukeren et best mulig utgangspunkt for å sette sammen produktet uten å gjøre feil. For å oppnå dette blir monteringen av boksene oppdelt i sekvensielle steg. Dette vil optimalisere informasjonen som kommer i hvert steg, både med tanke på orientering av bilder, og antall nye deler som innført per steg. De fleste objekter har sin naturlige orientering eller foretrukken synsvinkel (33). Denne orienteringen maksimerer hvor mye viktig informasjon som er synlig, noe som igjen minimerer feilplassering og styrker gjenkjenning. Dette blir svært viktig siden alle nye deler tilført i hvert steg må være synlig. Brukeren må kunne se delen for å montere den. Deler bør heller ikke tilføres monteringsanvisningen før de kan festes. Generelt, hvis en del skal festes til produktet med festemiddel, bør den legges til i tegningene etter en eller flere av delene den skal festes til, allerede er på plass og festet (32).

## 3.5 Testing og raffinering

Denne fasen tar for seg byggingen og testingen av flere forskjellige prototyper av produktet. Svarene prototypene gir, gjør det mulig å gå lenger tilbake i prosessen for å raffinere designet til man har et resultat man er fornøyd med.

### 3.5.1 Prototyping

Tidlige prototyper er vanligvis laget av deler med de samme egenskapene i det endelige produktet, men kan være fremstilt med en annen metode enn den som er tenkt å bruke til slutt. Senere prototyper er laget med de riktige produksjonsmetodene, montering av produktet derimot kan være forskjellige fra den endelige tenkte metoden.

Prototyper kan brukes til fire forskjellige ting gjennom en produktutviklingsprosess (28): læring, kommunisering, integrering og milepæler. Her skal vi gå nærmere inn på hvordan prototyper kan brukes til læring.

En type spørsmål prototyper kan svare på er «Kommer det til å fungere?» Denne typen spørsmål fungerer da som læringsverktøy som gjør det mulig å utforske de reelle egenskapene til produktet. Både fysiske produkter og dataprogrammer kan testes som prototyper. Når man bruker prototyper, definerer man hva formålet og hva man ønsker å oppnå med prototypen er. Ut ifra det kan man bestemme hvor lik prototypen må være med det helhetlige designet. Se for deg at man designer en bil og er interessert i hva bruddfastheten til frontruta er, da trenger man ikke å prototype hele bilen for å gjøre tester.

Neste kapittel kommer til å ta i bruk metodene som er beskrevet, til å forsøke å lage en oppbevaringsløsning som oppfyller problemstilling fra kapittel 1.

## 4 Utviklingsprosessen

Dette kapitlet kommer til å gå i detalj på hvordan produktutviklingsprosessen beskrevet i forrige kapittel ble brukt i arbeidet vi gjorde for denne bacheloroppgaven. Teorien beskrevet i kapittel 2 blir også anvendt i prosessen til å begrunne avgjørelser som blir tatt underveis.

Målet med produktutviklingsprosessen beskrevet i dette kapitlet er som nevnt i avsnitt 1.3 å:

... lage ett oppbevaringssystem som ved hjelp av parametrisk design kan gi brukeren oppbevaringsbokser på nøyaktig de mål de måtte ønske, innenfor en gitt standard. Løsningen skal kunne produseres lokalt og med få nødvendige verktøy. Det tilrettelegges også for at løsningen kan videreføres til større produksjonsskala med bruk av mer avanserte maskiner og utstyr.

### 4.1 Planlegging

Planleggingsfasen beskrevet i 3.2 foregikk hovedsakelig i forprosjektet som ble skrevet før arbeidet på selve bacheloroppgaven ble startet. Prosjektplanen som ble skrevet i forprosjektet er lagt med som et vedlegg og inneholder elementer som budsjett, prosjektrammer og en tidsplan for prosessen. I forprosjektet ble det også etablert at produksjonsprosessene skal være enkle og adaptive.

### 4.2 Konseptutvikling

#### 4.2.1 Identifisere brukerbehov

Det steget man må gjøre før man designer et produkt er å identifisere hva behovene til brukere er. Behovene i vårt tilfelle kan delvis utledes av oppgaveteksten til bacheloroppgaven som er lagt ved som et vedlegg til rapporten. Bacheloroppgaven til Kristina Eraker Ødegård (34) som omhandler samme temaet, inneholder brukerintervjuer som ga oss ytterligere informasjon om brukerbehov. Vi har også vært i dialog med veilederen som er sjef for labben. Vi har dermed underveis i prosjektet hatt mulighet for å sjekke at vi har forstått brukerbehovet rett.

## 4.2.2 Kravspesifikasjon

Etter at brukernes behov har blitt identifisert «oversettes» de til en kravspesifikasjon som beskrevet i avsnitt 3.3.2. I Tabell 1 er kravspesifikasjonen som ble utledet til hele oppbevaringsløsningen. Punkt 15 og 17 i tabellen setter forutsetninger om produksjonsprosessene som er tilgjengelig for oss. Maskinene egnet for å ha en standardisert produksjonsprosess, som er tilgjengelig for vår bruk ved IVB-fakultet, er en laserkutter og 3D-printere. Vi antar også at bruker har tilgang til en fres, drill, skruer, to dimensjoner kryssfiner, og to typer filament til 3D-printer.

Tabell 1: Kravspesifikasjonen til oppbevaringsløsningen

	Egenskap	Nødvendig	Ønskelig
1	<b>Funksjon:</b>		
2		Løfte opptil 50 kg	x
3		Innfelt håndtak	x
4		Hjørnebeskytter	
5		Kunne stables	x
6		Reparerbar	x
7		Identifiseres med farger/merking	
8	<b>Parametrisering:</b>		
9		Inndata, dimensjoner på boks	x
10		Inndata, velge tilbehør	
11		Utdata, BOM og kuttfiler	x
12		Enkelt for bruker	
13	<b>Produksjon:</b>		
14		Standardisert monteringsprosess	x
15		Standardisert produksjonsprosesser med lavt investeringsnivå	x
16		Få produksjonsprosesser	
17		Mulig å lage ved IVB	x
18		Ingen etterbehandling av deler	
19		Lett å montere	x
20	<b>Materiale:</b>		
21		Rimelig pris	x

22		Økologisk gunstig	x	
23		God materialutnyttelse	x	
24		Få forskjellige typer	x	

Ut ifra Kravspesifikasjonen til oppbevaringsløsningen har vi valgt å lage en ekstra kravspesifikasjon spesifisert til håndtak og hjørnebeskyttere.

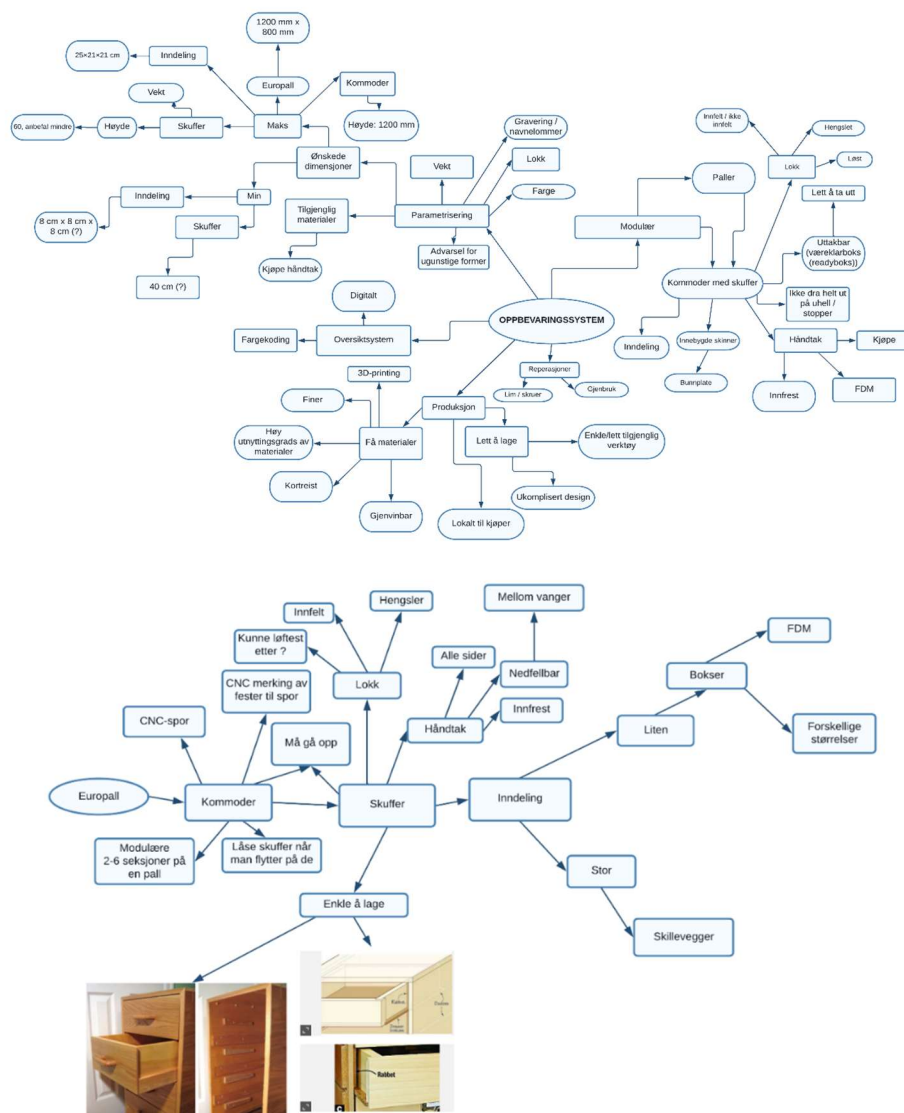
Tabell 2: Kravspesifikasjon til håndtak og hjørnebeskyttere

		Egenskap	Nødvendig	Ønskelig
25	<i>Begge deler</i>			
26	Funksjon:			
27		Ta opp minst mulig plass, $\leq 3\text{mm}$		x
28		Utbyttbar		x
29	Produksjon:			
30		Produseres med FFF	x	
31		Minimalt med støttestrukturer		x
32		Ingen etterbehandling		x
33		Enkel å montere		x
34	Materiale:			
35		Billig	x	
36		Resirkulerbar	x	
37		Ingen spesiell oppbevaring		x
38		Enkelt å bruke		x
39	<i>Håndtak</i>			
40		Løfte 50 kg	x	
41		Innfelt	x	
42		Ikke vond å bære, ergonomisk		x
43	<i>Hjørner</i>			
44		Filament med godt utvalg av farger		x
45		Stabil stabling	x	
46		Hjelp med montering		x
47		Beskytte hjørner	x	
48		Kompatibelt med lokk	x	



## 4.2.3 Konseptgenerering

Når kravspesifikasjonen var fullført var neste steg å komme opp med forskjellige konsepter som kan oppfylle kravspesifikasjonen. For å produsere ideer til å basere konseptene våre på, brukte vi metoden for tankekart beskrevet i avsnitt 3.3.3.2. Tankekartene som ble lagd i prosessen er vist i figur 9 nedenfor.



Figur 9: Tankekart brukt til konseptgenerering

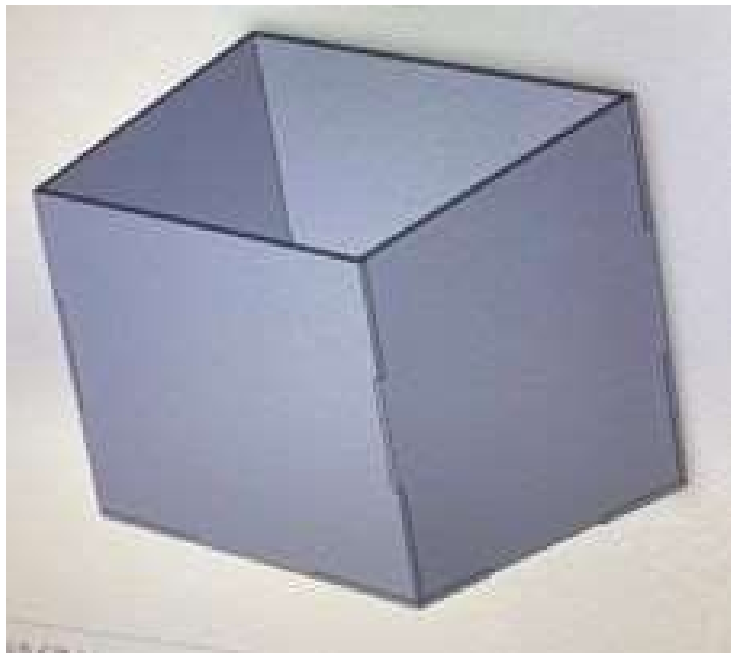
For hjørnebeskytterne gjorde vi ytterligere undersøkelser av hva som brukes på eksisterende bokser og kasser for å stable mer stabilt. De fleste eksisterende løsninger var av sprøytstøpt

plast og bunnen hadde et mindre areal enn toppen av boksen. Lokket på kassa kunne da ha en kant som holdt boksen stablet opp på plass. Andre oppbevaringsløsninger uten lokk har deler som går i hverandre og forhindrer forskyvning.

De første fire konseptene tar bare for seg selve oppbevaringsløsningen uten forslag for hjørnebeskytter og håndtak. Så er det fem utvalgte konsepter til hjørnebeskytter og til slutt et konsept til håndtak.

#### **4.2.3.1 Konsept A - boks**

Dette konseptet baserer seg på at platene kan felles inn i hverandre, der det blir kuttet ut et hakk som tilstøtende plate passer inni. Med tanke på forbindelsesmetoder så kan sideveggene enten limes eller skrues sammen. Bunnen derimot bør skrues, da lim ikke vil holde noe spesielt høy last med dette designet. I utgangspunktet så trengs bare en produksjonsmetode for å produsere kassen, men styrkemessig så er ikke dette et gunstig design, da skruerforbindelsene må ta alle lastkreftene.

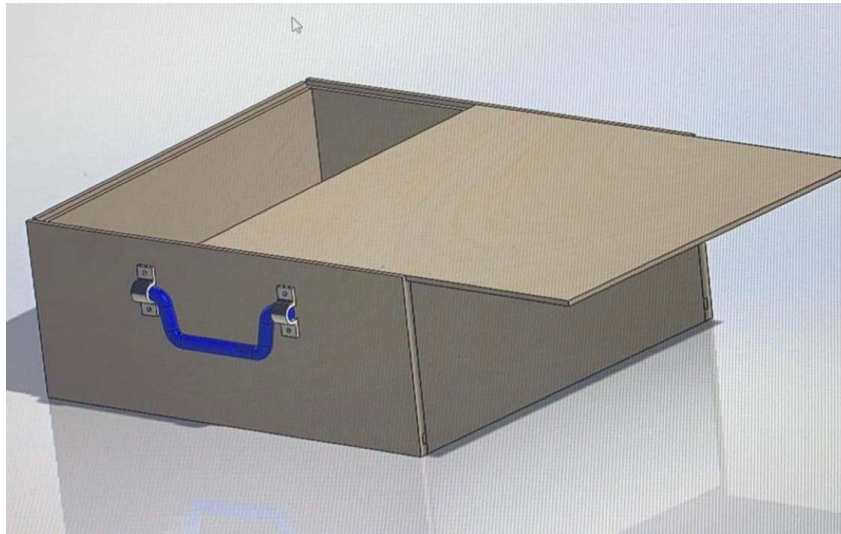


*Figur 10, Konsept A, boks*

#### **4.2.3.2 Konsept B - boks**

I konsept B er faktoren styrke blitt prioritert. Løsningen her er å frese ut et spor i alle sideveggene som bunnen kan plasseres i, sideveggene får en slett flate som skal skrues

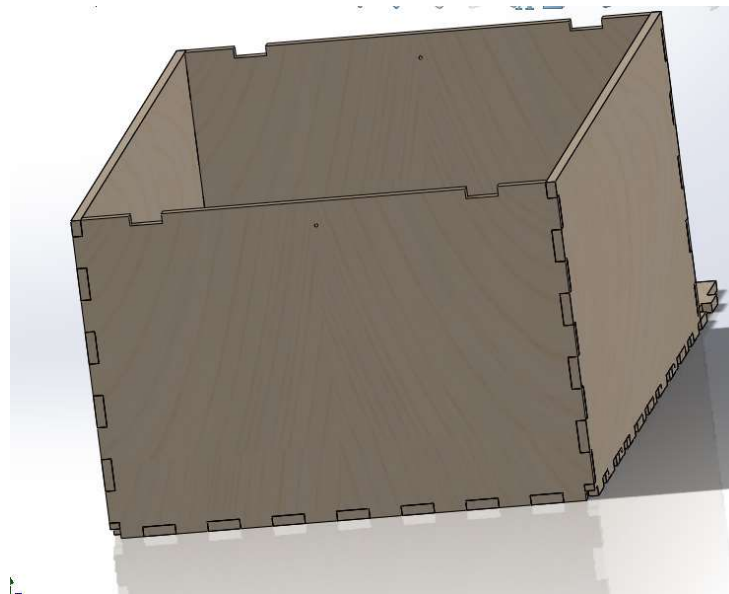
sammen. Fordelen her er at komponentene blir utbyttbare og får god lastbæring i bunnen, men det vil kreve en ekstra produksjonsmetode.



*Figur 11, Konsept B, boks*

#### **4.2.3.3 Konsept C - boks**

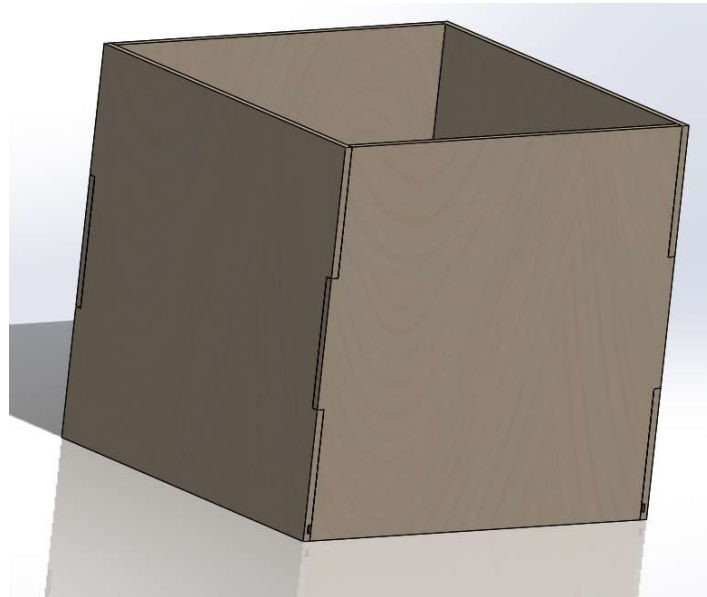
Dette designet baserer seg på å bruke fingerskjøter, en tradisjonell sammenføyningsmetode for trevirke. Hvis man sammenligner dette med design A så kan man si at de er like, bortsett fra at design A har bare en stor finger på hver side. Montering av denne typen sammenføring er best med lim.



*Figur 12, Konsept C, boks*

#### 4.2.3.4 Konsept D - boks

Konsept D er en kombinasjon av store fingerskjøter på sideveggene og et frest spor i sideveggene til bunnen. Da kan bunnen solid festes med skruer mens sideveggene kan limes sammen med mange kontaktflater, som gir sterk sammenføyning. Dette gir derimot to forskjellige sammenføyningsmetoder og to produksjonsmetoder.



*Figur 13, Konsept D, boks*

#### 4.2.3.5 Konsept 5 – hjørnebeskytter

Konsept 5 vist i Figur 14, er beregnet på en boks der lokket kan skyves inn og ut. Hjørnebeskytteren til oversiden av boksen bidrar da til å holde lokket på plass. Den nedre hjørnebeskytteren har en oppbygning som gjør det mulig å skru den rett inn i en innfelt bunnplate. Konseptet har bare en liten tapp som skal hjelpe til med stabling.

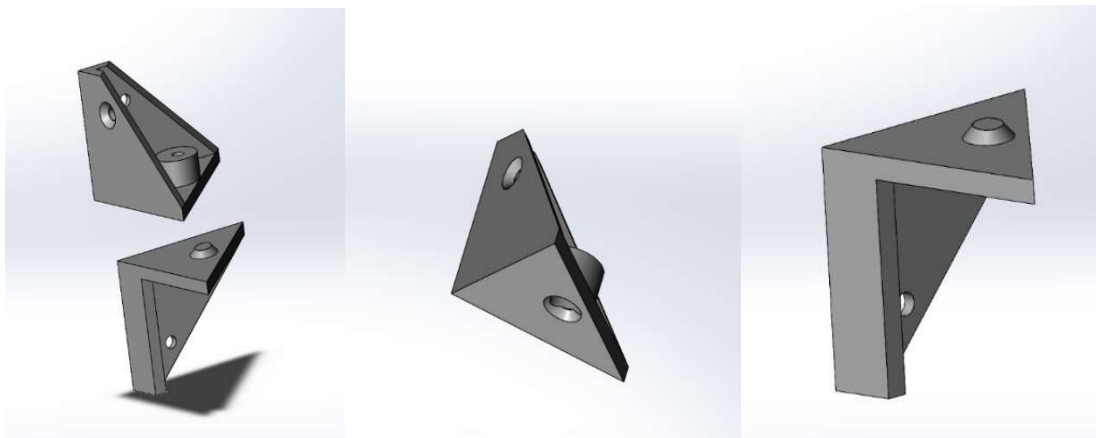
#### 4.2.3.6 Konsept 7 - hjørnebeskytter

Konsept 7 vist i Figur 15, dekker bare en side på boksen og passer med lokk som ligger kant i kant med to motstående sider. Lokket kan da ha hengsler på en side og vippes opp.

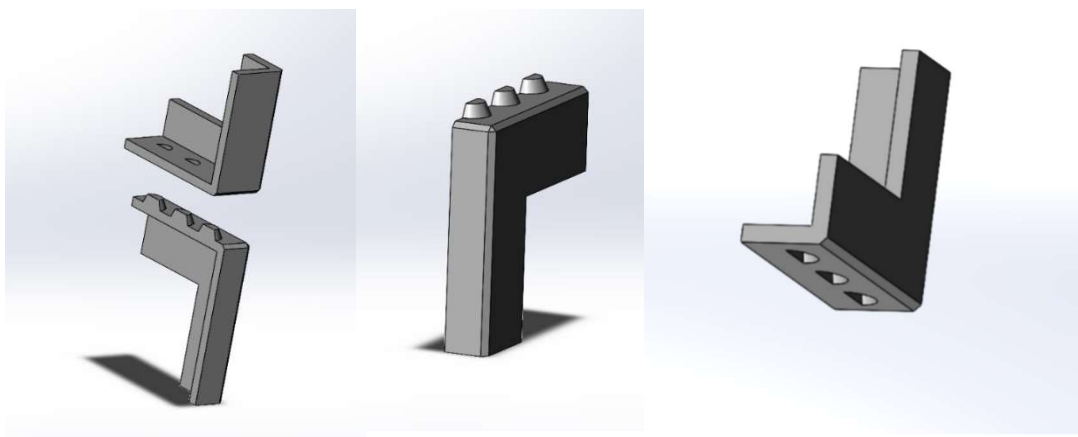
#### 4.2.3.7 Konsept 9 - hjørnebeskytter

Konsept 9 passer til samme type boks som konsept 7, men dekker begge sidene av hjørnene. Da er det bedre plass til skruehull for montering av hjørnene. Det nedre hjørnet kan også

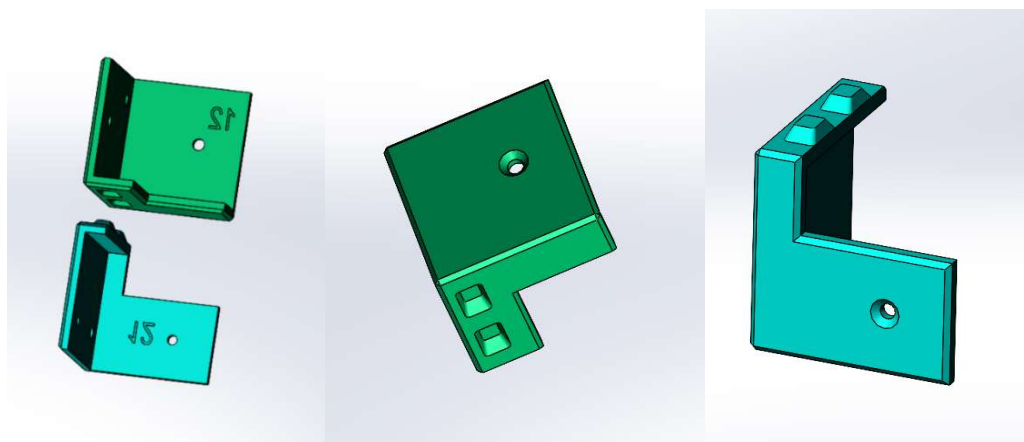
enkelt modifiseres til å få samme form for holder som i konsept 10. Konsept 9 passer best med konsept B.



Figur 14: Konsept 5, en tapp som holder boksen på plass og lokket skyves inn og ut



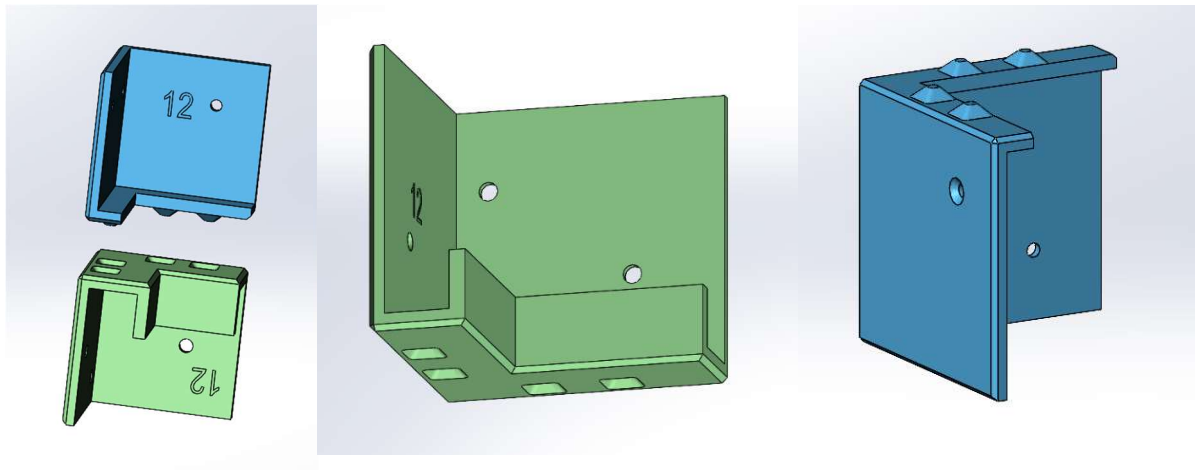
Figur 15: Konsept 7, 3 tapper som holder boksen på plass og lokk som kan løftes av



Figur 16: Konsept 9, to tapper som holder boksen på plass og lokk som ligger opp på endeveggene og kan løftes av

#### 4.2.3.8 Konsept 10 - hjørnebeskytter

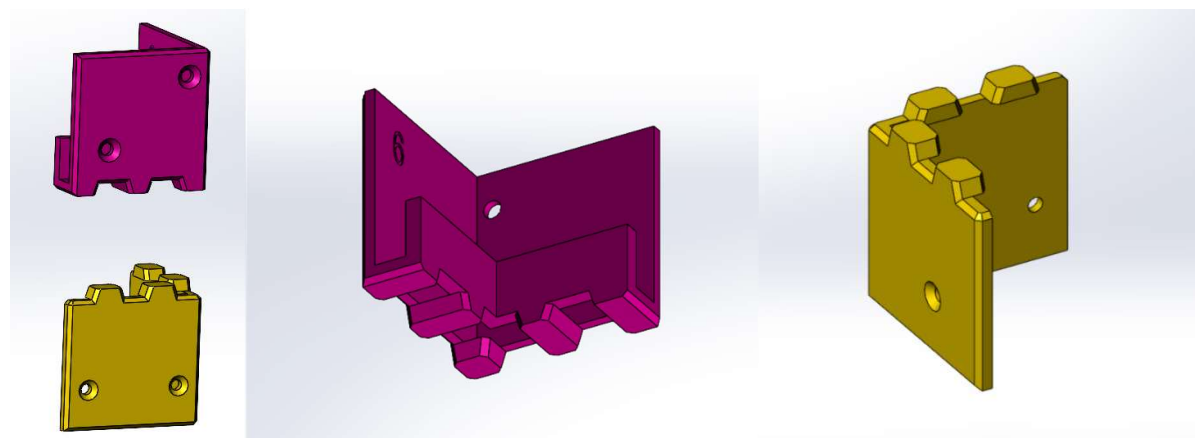
Konsept 10 er en slags holder inkludert i hjørnebeskytteren, som holder platene i riktig vinkel under montering av konsept B og D. Konsept 10 og 12 passer til en boks der det er frest inn et spor i toppen av boksen sånn at ett lokk kan ligge inn i. Det gjør det mulig å dekke til begge sidene av hjørnene.



Figur 17: Konsept 10, 4 tapper som holder boksen på plass, innfelt lokk som løftes ut

#### 4.2.3.9 Konsept 12 - hjørnebeskytter

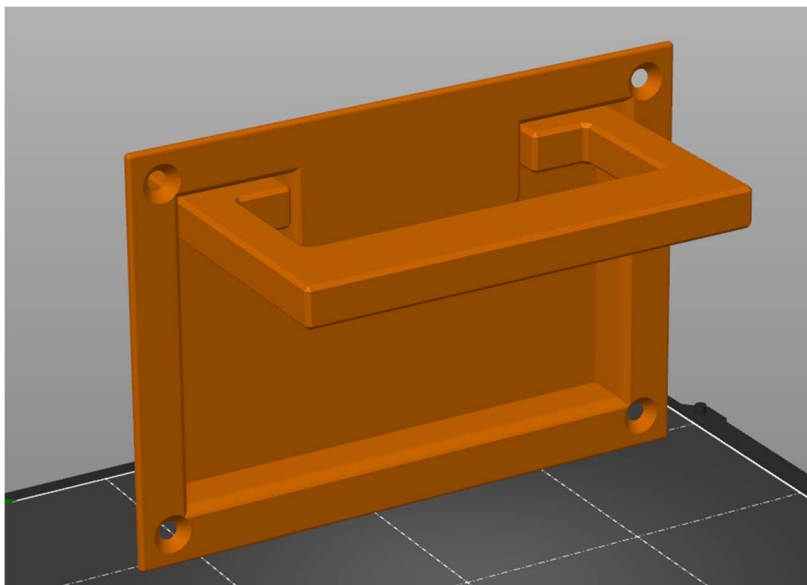
Konsept 12 er inspirert av kreneleringen på festningsmurer. Endekantene blir ikke fullstendig dekt av hjørnebeskytterne, men det nedfelte designet bruker mindre materialer enn hvis kreneleringen skulle hatt et lag med plast under og det legger til mindre ekstra høyde på kassene enn de andre konseptene.



Figur 18: Konsept 12, krenelering inspirert utforming med innfelt lokk

#### 4.2.3.10 Konsept håndtak

Konseptgenereringen for håndtak foregikk litt annerledes enn ellers da vi valgte å hente mere inspirasjon fra eksisterende design som passet kravspesifikasjonen i tabell 2, og heller tilpasse det til en additiv produksjonsprosess enn å gjenoppfinne hjulet. Som vi vil se mer detaljert i avsnitt 4.4.1, går håndtaket gjennom flere iterasjoner av tester og modifikasjoner i stedet. Inspirasjonen vi brukte for utforming er blant annet innfelte håndtak som er brukt på koffertene i musikkindustrien og lukehåndtak som er mye brukt på båter. I figur 19 viser den første iterasjonen av håndtaket.



Figur 19: Versjon 1 - håndtak

#### 4.2.4 Konseptutvelgelse

Konseptutvelgelse skjer ved å sammenligne alle konseptene med kriteriene gitt i kravspesifikasjonen. Hvert konsept blir vurdert til å enten være Ja (1 poeng), kanskje (0,5 poeng) eller nei (0 poeng) for de forskjellige egenskapene.

##### 4.2.4.1 Utvelgelse av boks

Tabell 3: Sammenligning av oppbevaringskonsepter

	Egenskap	Konsept A	Konsept B	Konsept C	Konsept D
1	Løfte opptil 50 kg	Kanskje	Ja	Kanskje	Ja

	Egenskap	Konsept A	Konsept B	Konsept C	Konsept D
2	Reparerbar	Kanskje	Ja	Nei	Kanskje
3	Standardisert monteringsprosess	Ja	Ja	Ja	Ja
4	Parametrisering	Ja	Ja	Kanskje	Ja
5	Standardisert produksjonsprosesser med lavt investeringsnivå	Ja	Ja	Ja	Ja
6	Få produksjonsprosesser	Ja	Kanskje	Ja	Kanskje
7	Mulig å lage ved IVB	Ja	Ja	Ja	Ja
8	Ingen etterbehandling av deler	Ja	Ja	Ja	Ja
9	Lett å montere	Kanskje	Ja	Nei	Kanskje
10	God materialutnyttelse	Kanskje	Ja	Kanskje	Kanskje
11	<b>Sum</b>	<b>8 poeng</b>	<b>9,5 poeng</b>	<b>7,5 poeng</b>	<b>8 poeng</b>

Det mest lovende konseptet ut ifra sammenligningen gjort i Tabell 3 er konsept B. Konsept B tror vi kommer til å gi det meste solide produktet, er enklest å reparere hvis noe skulle gå i stykker og designet er enkelt å parametrisere.

#### 4.2.4.2 Utvelgelse av hjørner

Tabell 4: Sammenligning av hjørnebeskyttere

	Egenskap	Konsept				
		5	7	9	10	12
1	Minimalt med støttestrukturer	Ja	Kanskje	Ja	Ja	Ja
2	Ingen etterbehandling	Ja	Kanskje	Ja	Ja	Kanskje
3	Stabil stabling	Nei	Kanskje	Kanskje	Ja	Ja
4	Hjelpe med montering	Nei	Nei	Ja	Ja	Ja
5	Beskytte hjørner	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
6	Kompatibelt med lokk	Kanskje	Ja	Ja	Ja	Ja
7	<b>Sum</b>	<b>3,5 poeng</b>	<b>3,5 poeng</b>	<b>5,5 poeng</b>	<b>6 poeng</b>	<b>5,5 poeng</b>



Tre av konseptene skilte seg ut med god overenskomst med kravspesifikasjonen. Vi ønsket ikke å gå videre i prosessen med 3 forskjellige konsepter. Avsnitt 3.3.4 beskriver hvordan man kan vektlegge noen egenskaper som viktigere enn andre. Kravspesifikasjon sier at punkt 3 om stabil stabling er viktigere enn ingen etterbehandling. Derfor valgte vi å ta med oss konsept 10 og 12 videre i prosessen. Valg av den best egnede hjørnebeskytteren skjer da i avsnitt 6.1 som drøfter resultatet av testingen med prototyper.

## **4.3 Designrealisering**

Dette er steget i prosessen når konseptet vi valgte ut i forrige steg blir gjort om til et produkt som kan bli realisert på ekte. I de neste avsnittene viser vi prosessen vi hadde for å gå fra et konsept til et nesten ferdig design.

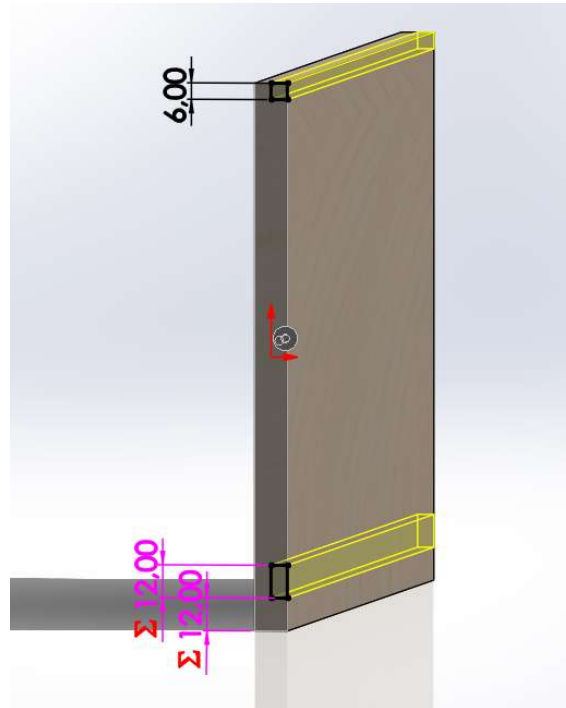
### **4.3.1 Design av kasse i SolidWorks**

En enkel kasse vil i prinsippet bestå av minimum fire sider, en bunn og et lokk. Dette utgjør 6 part-filer, men som nevnt tidligere under konseptutvelgelsen så kan sidene være like og dermed utgjøre en part-fil. Disse vil så settes sammen i assembly-filen som nevnt i kapittel 0 og parametriseres der. Det vil også bli lagt inn valgmuligheter som hjørnebeskyttere og håndtak.

#### **4.3.1.1 Lage komponenter**

Først og fremst så må hver enkelt-komponent modelleres før man kan gå videre med å lage et sammensatt produkt i assembly. Dette gjøres på følgende vis i SolidWorks.

Starter med å lage en grunntegning hvor vi definerer lengde og høyde på komponenten, bruker så kommandoen boss-extrude for å ekstrudere platen lik tykkelsen. Sørger alltid for å ekstrudere og tegne slik at komponenten alltid er i senter av aksene. Dette sparer oss mye ekstraarbeid ved senere endringer, og gjør part-filen mer ryddig. Deretter så tegner vi opp tverrsnitt for fresespor, som vi bruker kommandoen cut-extrude for å lage, som vist i figur 20 nedenfor.



Figur 20: Cut-extrude av fresespor

På noen av målsettingene så kan man merke seg at det står et rødt summasjonstegn foran dimensjonene. Dette indikerer at målsettingen er drevet av en parameter, i dette tilfellet tykkelsen av platen. Dette kommer vi tilbake til under kapitlet om parametriseringen.

For at komponenten skal få et realistisk utseende og rette egenskaper så må vi definere materialet, som konkludert tidligere skal det være plywood/kryssfiner med gitte egenskaper (35). Siden SolidWorks ikke har kryssfiner i materialista så må vi legge inn dette selv som et custom material.

Dette åpner også muligheten for å simulere statiske analyser, for dokumentasjon av hvor de største belastningene vil forekomme. Vi ser på det som mest naturlig at de største belastningene vil forekomme midt på bunnplate i form av bøyemoment, og i forbindelse mellom bunnplate og sidevegger i form av skjærkrefter. Sistnevnte har blitt ivaretatt ved å frese ut spor slik at skruene ikke bærer skjærkreftene, men bare aksiale krefter. Dette minimerer risikoen for brudd, spesielt ved tynne plater.

Alt i alt gir dette til slutt en ferdig komponent, i dette tilfellet baksiden av kassen, som kan brukes i assembly-filen senere. Lignende operasjoner gjøres for resterende sider, bunn og lokk. Dette gir totalt fem part-filer, hvorav to er identiske. Lignende operasjoner utføres også

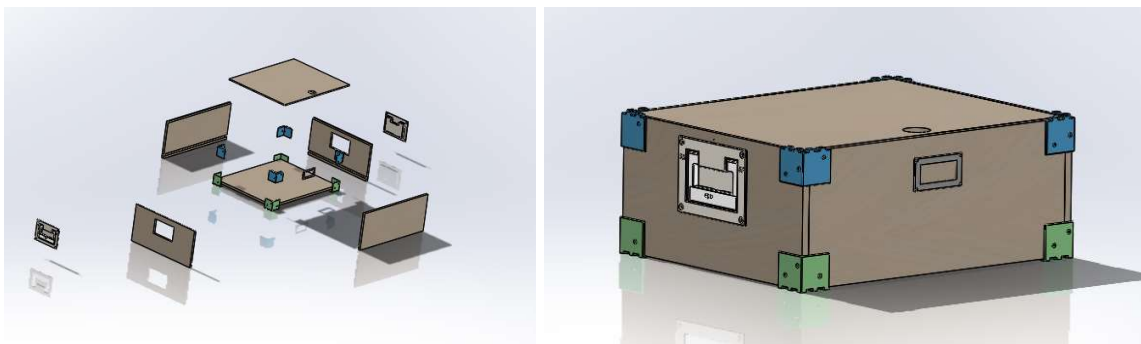
på ekstrautstyr som hjørnebeskyttere, merking og innfelte håndtak. Her trengs det noen ekstra operasjoner som å lage skruehull med kommandoen advanced holes. Siden Hjørnebeskyttere, merking og håndtak skal 3D-printes, kan brukeren selv bestemme fargen på disse med valg av filamentfarge. Her kan eksempelvis fargekoder brukes etter hver enkeltes smak.

Brukervennlighet og ergonomi blir også tatt hensyn til ved design av kassene. For at det skal bli enkelt å åpne lokket, blir det kuttet ut et hull på 40mm. Toleranse-avvik har også blitt tatt i betraktning, hvor hjørnebeskyttere blir laget med 0,1 mm overmål slik at de passer rundt platen. Det samme blir implementert på lokket, så man slipper at det kiler seg fast. Hull til håndtak blir designet slik at man får all fire fingere inni, samt at kanter bør rundes av under produksjon. Innfelte håndtak blir designet med rotasjonsstoppere slik at man ikke klemmer fingre mellom håndtak og kasse. Samt at hjørnebeskyttere blir modellert med skeive borger i øver- og nederkant som gir stabile stablingsmuligheter.

Hjørnebeskytterne blir laget i to størrelser, 35 og 52mm, en til hver av platetjukkelsene. Skruehull blir plassert slik at de kan samtidig fungere som skrueforbindelse til vegger. Nedre hjørner blir laget slik at de kan brukes til enkel montering av kassen. Det er to forskjellige design av hjørnebeskytterne, se Figur 17 og Figur 18, som kommer til å bli brukt under testing av prototypen. Hjørnebeskytterne kan 3D-printes, og vil være enkle å bytte ut ved skader.

#### 4.3.1.2 Lage Assembly

Når alle komponentene er laget, sammenstilles de i en assembly-fil. Dette utføres primært med kommandoen «mate». Først overføres komponentene inn i assembly-fila. Merk at den første komponenten vil alltid være fiksert.

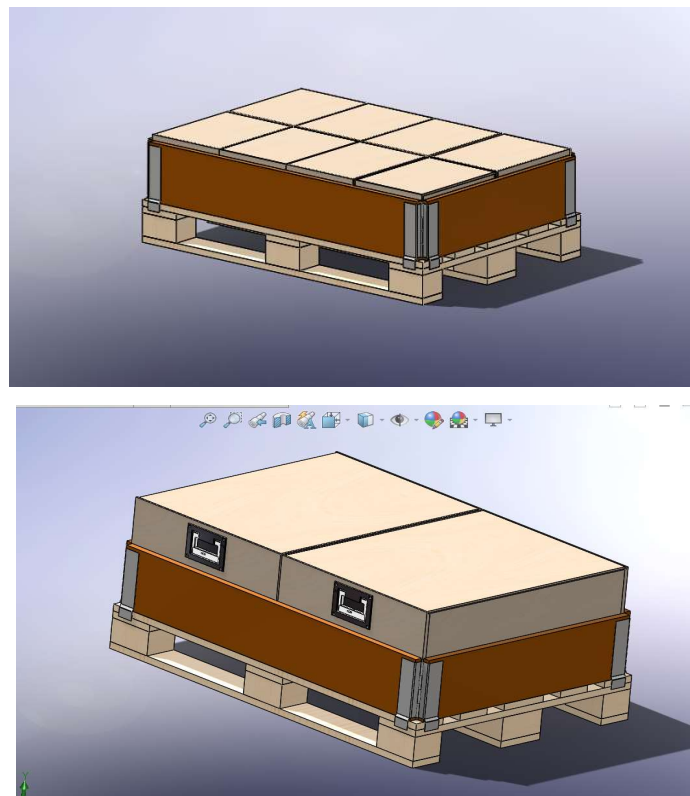


*Figur 21: Assembly med komponenter*

Deretter bruker vi kommandoen mate øverst i menyen for å skape relasjoner mellom komponentene. Her kan man lage alt ifra fikserte relasjoner, kalt coincident, til mekaniske relasjoner mellom eksempelvis tannhjul som roterer med hverandre. Her blir det i hovedsak bare brukt fikserte relasjoner, totalt 78 stk. for å sette sammen alle komponenter som vist i figur 21 ovenfor.

For å verifisere at komponentene er plassert rett og ikke overlapper hverandre, bruker vi verktøyet interference detection under verktøymenyen evaluate. Dette kan på et tidlig stadium avdekke eventuelle feil ved dimensjonering av komponentene. Merk at ved parametrisering av dimensjonene så kan verktøyet gi falske feilmeldinger, der alle kontaktflater av en ukjent grunn regnes som interferens. Dette er bare å ignorere.

Til slutt lages separate konfigurasjoner for standardmålene 2x1, 4x2 og 8x4 til europalle, der høyden vil være en valgfri variabel. Disse blir dimensjonert tilsvarende 750x575, 375x287 og 87x143. Det er tatt utgangspunkt i at de skal passe med relativt god klaring inni en pallekarm som måles til 1160x760. Vi har beregnet 1-2 mm klaring per kasse. Standardmålene er visualisert i figur 22 nedenfor.



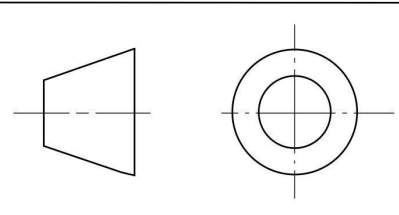
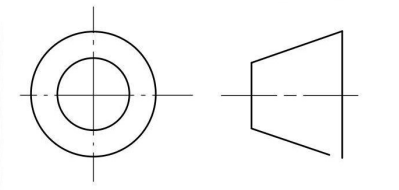
*Figur 22: Standardmål i palle*

### 4.3.1.3 Lage tegninger

Når alle komponenter er laget og sammensatt i assembly, lages det tegninger av disse. For tidsbesparelse brukes en forhåndsdefinert mal fra et tidligere emne.

Først tar vi hver komponent og genererer tegninger med nødvendige projeksjoner. Siden geometrien til mange av komponentene er såpass enkel, holder det med to projeksjoner, samt ISO-view, for å få en god forståelse av tegningen. Nødvendige målsettinger og senterlinjer for hull blir deretter merket opp. En god pekepinn på at tegningen er akseptabel, er at man klarer å lage komponenten selv med målene som er gitt. Tegning, part og assembly er direkte knyttet mot hverandre, slik at hvis vi i senere tid skulle endre dimensjonen på kassen i assembly, så vil målsettingene i hver tegning automatisk bli endret. Hvordan vi enkelt kan endre disse dimensjonene kommer vi tilbake til i neste kapittel. Det er verdt å nevne at skaleringen er satt som fiksert verdi lik 1:4. Dette betyr at hvis størrelsen på kassen overskrider maks-verdien, så vil ikke projeksjonene få plass i tegningen. Dette kan løses ved å definere maks størrelse på selve projeksjonene slik at skaleringen blir drevet av dette.

Merk at i SolidWorks så er tredje vinkelprojeksjon satt som standard, og dermed blitt brukt i alle tegninger i denne oppgaven. Generelt er det to måter å projisere en tre-dimensjonal modell til to-dimensjonale flater, første og tredje vinkelprojeksjon, symbolforklaringen til de to projeksjonene er i Figur 23. Første vinkelprojeksjon er mest brukt i Europa, men forbudt i USA (36).

Projeksjon.	Symbol
Første	
Tredje	

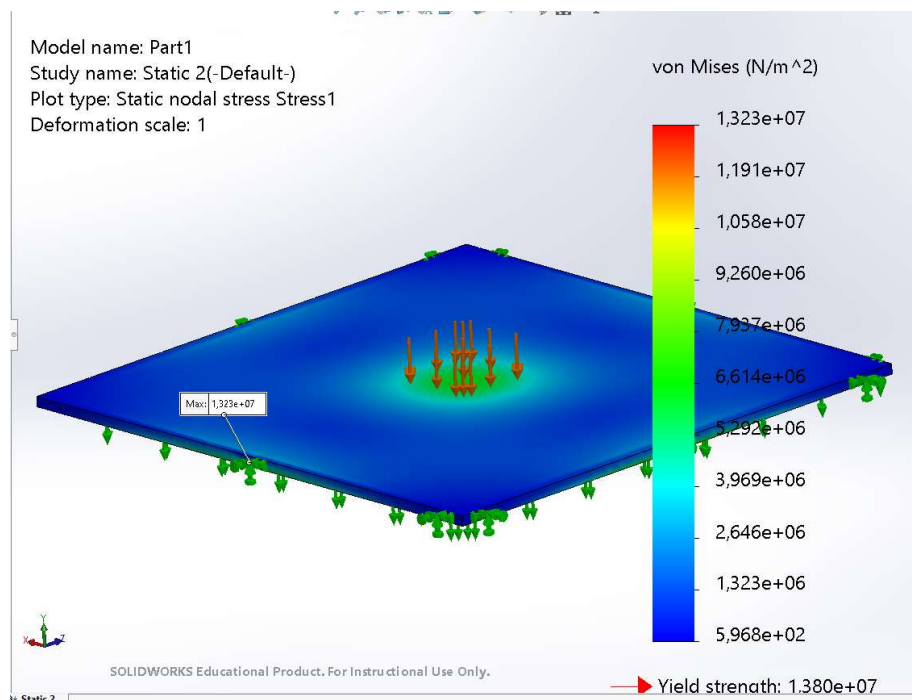
Figur 23: Første- og tredje vinkelprojeksjon

## 4.3.2 Statisk analyse

For å dokumentere at kassen tåler tilstrekkelig vekt kan det utføres statiske analyser av de komponentene vi mener vil være kritiske. Her vil kritiske punkt være håndtaksleddet til kassen, og bunnplata til kassen. Begge disse komponentene vil bli testet ved bygging av prototype. Her vil vi som en ekstra verifisering gjennomføre en statisk last-analyse av bunnplaten, og dets forbindelser mot resten av kassen.

### 4.3.2.1 Bunnplate prototype

For å teste bunnplaten, åpnes part-filen til bunnplate og starter verktøyet static-analysis. Forsikrer om at dimensjonene tilsvarer prototypen på 670x670x12. På forhånd så tegner vi 3 sirkler på hver side av bunnplata, med en diameter på ca. 3mm. Dette er områdene som får fiksert geometri i analysen, og vil simulere skrueforbindelsene. Deretter tegner vi en firkant på undersiden som vil simulere kanten på vertikale med 6mm anleggsflate. Dette må defineres som roller/slider, da den bare vil holde laster i z-retning. Neste steg er å definere lasten, som skal tilsvare en person på 740 Newton (75 kg). For å få til dette må vi først tegne opp et 100x100 kvadrat midt på plata, og deretter bruke verktøyet split-line til å separere området fra resten av plata.



Figur 24: Statisk studie av bunnplate i SolidWorks Simulation

Når materiale, last og fikserte områder er definert, så må det lages et såkalt mesh av flaten vi ønsker å analysere. Her er mulighetene endeløse da et finere mesh, altså flere områder med målepunkt, vil føre til et mer nøyaktig resultat. Her er det viktig å unngå skarpe kanter, da dette vil gi uendelig høye spenninger. På den andre side bør man heller ikke ha noe finere mesh enn nødvendig, da dette gir lang bearbeidingstid og tar opp mye dataminne. Å finne balansen mellom dette kan gjøres ved å starte med grov mesh, og jobbe seg oppover til man ser at resultatene begynner å konvergere. Dette gir til slutt en studie som er klar for å prøves ut, som vist i figur 24 over.

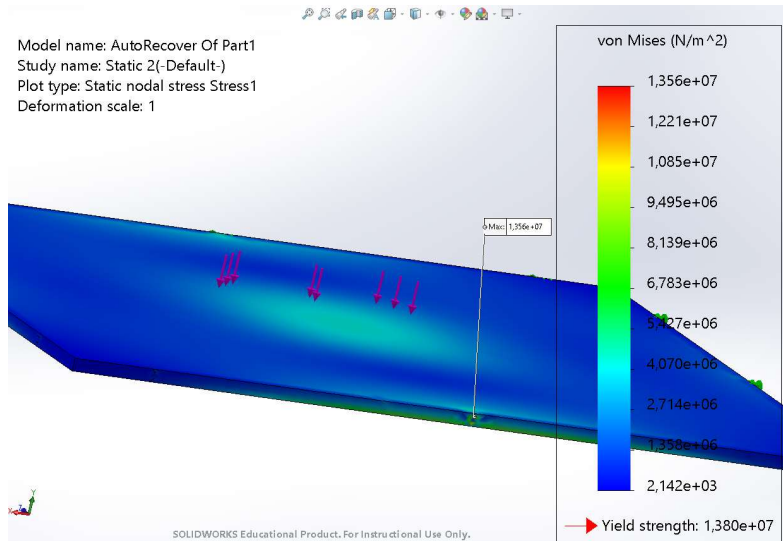
Som vist ovenfor vil den største belastningen forekomme rundt skrueforbindelsen, tilsvarende 95% av flytegrensen. Legg merke til at dette er randsonen mellom fiksert geometri og modellen, som ofte kan gi høyere verdier enn det som er realistisk. Midt på plata ligger vi godt innenfor flytegrensen, så vi skal i teorien ikke få noe brudd der. Det er verdt å nevne at SolidWorks ikke tar høyde for fiberretningen i trevirke, da treverk ikke er et uniformt materiale i styrke-sammenheng. Dette viser dermed at det er skrueforbindelsene vi skal være obs på ved testing av prototypen.

#### **4.3.2.2 Bunnplate 400x300**

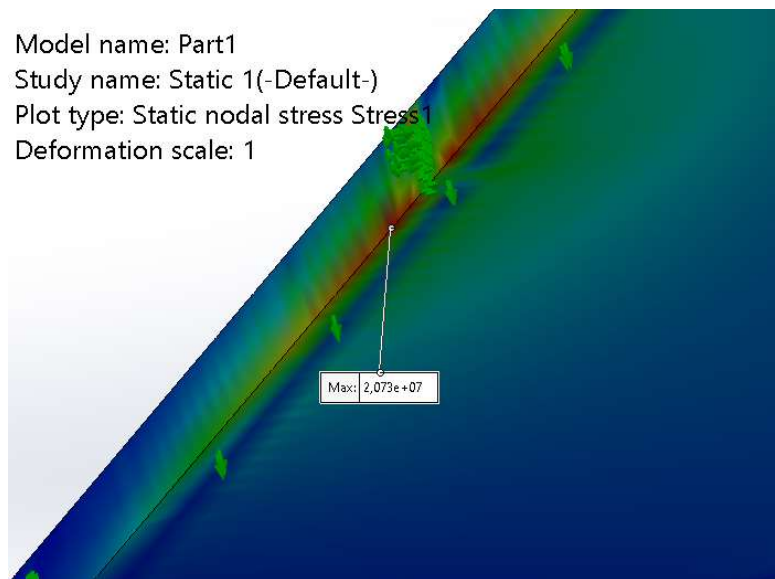
Det er bestemt at kassen skaleres opp fra 6mm til 12 mm ved størrelser over 400x300 for å sikre integriteten til kassen mot brudd. Dermed må det dokumenteres hvor stor belastning 400x300x6 kasse tåler.

Bunnplate testes på samme vist tidligere, der dimensjonene endres til 6 mm 400x300. Sørger for at det brukes samme mesh-kvalitet som på forrige plate for å gi sammenlignbare verdier. Etter litt prøving og feiling så viser at en last tilsvarende 196 Newton (20 kg) er innafor, som vist i figur 25 under. Dette gir spenninger rett under flytegrensa ved randsonen til skrueforbindelsen. Dette gjelder når man bruker 3 skruer på hver side, så kassen kan selvfølgelig forsterkes med flere skruer, men vi mener 20 kg er tilstrekkelig. Ved beregning av spenningene så oppsto det derimot en komplikasjon, der hjørnet på plata fikk urealistisk høye spenninger, som vist i figur 26. Dette ble lagt fram i kapittel 4.3.2.1. Dette kan løses ved

å runde kanten med verktøyet fillet. Ved å øke tykkelsen til 12 mm så reduseres spenningene med 60%, og kassen kan da belastes mye høyere, over 50kg.



Figur 25: Statistiske analyse av 400x300x6mm plate



Figur 26: Høy spenning i skarp kant

### 4.3.3 Materialvalg

Materialvalg er gjort ut fra flere faktorer. Produktet skal være enkelt å produsere, involvere få materialer, være rimelig og kreve få verktøy. Bærekraft spiller en vesentlig rolle. Ut fra



bruksmiljø vil det være vesentlig at materialene som benyttes er slitesterke. Et produkt som har lenger holdbarhet vil ha mindre miljømessige innvirkninger over tid.

Ett av punktene i oppgaven er at produktet skal kunne produseres lokalt med relativt enkelt utstyr. Det vil være med å sette begrensninger for hvilke materialer som kan benyttes. Labene på NTNU Gjøvik har tilgang til laserkutter og 3D-printere. Det er derfor lagt fokus på å velge materialer som kan kuttes ut med laserkutteren samtidig som man kan bruke 3D-printer til å produsere håndtak og hjørnebeskyttere. Produktet vil derfor produseres av tre og plast. Skruer vil være en del av sammenføyningen, disse vil bli innkjøpt da det ikke vil være lønnsomt å produsere selv.

#### **4.3.3.1 Boks**

Laben på NTNU hadde både MDF og kryssfiner tilgjengelig som treplater til laserkutteren. MDF-plater blir produsert ved å kombinere myke trefibre, gjerne gjenvunnet tre, med voks og lim under høyt trykk og temperatur. Massene av dette brukes til å forme plater og paneler. Platene er både økonomisk gunstig og miljøvennlig, men egner seg dårlig til skruing. Siden MDF tar bort valget om å bruke skruer til sammenføyning, ble det naturlig å velge kryssfiner.

Kryssfiner blir produsert av tynne trefinerplater som limes lagvis sammen under høyt trykk, hovedsakelig med fibre i hver plate snudd 90 grader mot hverandre. Dette gir relativt formstabile plater, med gode egenskaper til å motstå sprekker. Platene er veldig sterke, gjerne sterkere enn heltre, samtidig som det er et økonomisk gunstig valg (37). Kryssfiner er et material som ikke kan brukes til å lage nye kryssfiner plater, men det kan kvernes ned og brukes i andre bygningsplater. I hovedsak går kryssfiner til energigjenvinning (38). Platene kan gjenbrukes om de har vært skrudd sammen og det ikke har blitt brukt lim. Da det skal produseres både store og små bokser ble det nødvendig å velge to forskjellige platetykkelser. Valget for de minste kassene falt på 6mm. Bakgrunnen for valget er at 6mm er den tykkeste kryssfineren laserkutteren ved NTNU Gjøvik kan kutte. Samtidig viser analyser at de største 6mm boksene vil tåle en vekt på 20kg, noe som er innenfor ønskede krav. På bokser som går over 300x400mm vil platetykkelsen øke til 12mm, på grunn av kravet om å tåle en vekt på 50 kg. Kravet om 50kg bunner ut i at arbeidstilsynet ikke anbefaler enkeltløft på mer enn 25kg (39). De største boksene bør derfor bæres av to personer om de er tungt lastet. En ulempe

derimot er at som følge av de bedre egenskapene kryssfiner har, så vil det koste mer enn MDF.

#### 4.3.3.2 Håndtak og hjørnebeskyttere

Det er mange forskjellige typer plast som kan brukes i FFF og vurderingskriteriene vi har brukt er forankret i sirkulær økonomiske prinsipper. Materialet bør derfor være lagd av fornybare ressurser og kunne gjenvinnes. I tillegg er pris, tilgjengelighet, fargevariasjon og mekaniske egenskaper viktige faktorer. For materialet til hjørnebeskytterne er det viktig med et godt utvalg av farger for å kunne fargekode boksene. Håndtaket derimot trenger ikke å ha et stort utvalg av farger, men bør heller ha bedre slitestyrke for å kunne ta gjentatte løft.

Når plasten skal være produsert av fornybare ressurser begrenses materialene man kan velge mellom. De fleste termoplaster brukt til FFF er laget av ikke-fornybare ressurser, unntatt PLA, som kan lages av for eksempel sukker. Det finnes filament laget av ikke-fornybar plast, som er laget kun med resirkulert plast (40), men det er enda ikke veldig utbredt. I tillegg er det manglende infrastruktur for å resirkulere plast.

Generisk PLA har en kilopris på ca. 260 kroner per kilo, stort utvalg av farger og muligheten for å komposteres i industriell kompost. Det er derimot ingen offisiell måte å gjenvinne materialet i Norge per dagsdato. Det meste av plasten brukt til FFF, er ikke en del av verdikjeden til resirkulering av plast i Norge, noe som gjør det vanskelig å gjenvinne avfall fra additiv produksjon. I Trondheim er det et prosjekt som ser på muligheten for materialgjenvinning av PLA(41).

Det gjøres mye forskning på nye materialer for FFF med fokus på gjenvinning, nedbryting og råvarene som benyttes. Den tsjekkiske produsenten "Fillamentum" har lansert filamentet NonOilen med forbedret mekaniske egenskaper sammenlignet med PLA. Det er mer egnet for langtidsbruk, komposterer forttere og kan resirkuleres flere ganger uten at materialet degraderes. Det er også mulig å sende materialet tilbake til Fillamentum for gjenvinning (42). Dessverre har NonOilen en kilos-pris på over 500 kr, inkludert moms, og kommer bare i en farge (43).

Andre produsenter er med i forskningssamarbeid der man ser på å bruke restprodukter fra industrien til å lage biopolymerer, som kan brukes i produksjon av filament for 3D-printing.

Det østeriske selskapet Extrudr ser på bruken av restprodukt fra soppdyrking. Også har vi det svenske selskapet add:north som er en del av et prosjekt, som undersøker muligheten for å bruke cellulose fra avfall i svensk skogindustri til å produsere PLA (44).

Add:north har et program kalt “RE-ADD ” der man kan returner avfall og tomme spoler til produsenten for så å blir omgjort til nytt filament (45).

Selv om PLA er biologisk nedbrytbart er det en stor fordel å kunne gjenbruke plasten flest mulig ganger før det komposteres. Ulempen med ordningen er at de bare aksepterer sine egne filamenter i retur.

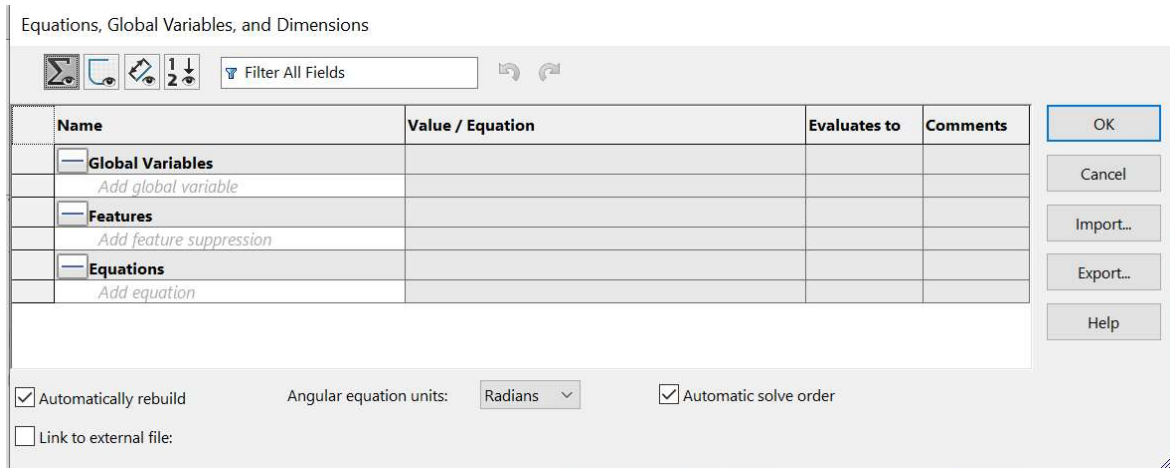
Av de mulige filamentene som ble undersøkt er det E-PLA og X-PLA fra add:north i Sverige som vi har valgt å bruke i den siste testingen av de additivt tilvirkede komponentene i designet. Filamentene møter problemstillingen godt siden de er «lokalt produsert», har en ordning for resirkulering, biologisk nedbrytbare, lagd av fornybare ressurser og lett tilgjengelig på markedet. E-PLA kommer i stort utvalg av farger, og de mekaniske egenskapene bør være bra nok som hjørnebeskytter. X-PLA har et mer begrenset utvalg av farger, men bruddfastheten og slitestyrken skal være bedre enn E-PLA.

#### **4.3.4 Parametrisering i SW**

Hvis man ønsker å endre noen av dimensjonene på kassen, eksempelvis lengde eller bredde, må man i utgangspunktet gå innpå hver part-fil og endre hver enkelt målsetting tilknyttet den parameteren. Ved mange komponenter og kompliserte geometrier kan dette være ekstremt tidskrevende, samt at man må ha tunga rett i munnen slik at man endrer rette målsettinger. Dette kan forenkles ved å parametrisere målsettingene opp imot en global variabel. Det finnes flere måter å parametrisere en modell i SolidWorks, hvor to av disse er verktøyene DriveWorksXpress og Equations. Sistnevnte vil bli brukt i denne oppgaven, men kort fortalt så går begge ut på å lage regler og ligninger.

##### **4.3.4.1 Sette opp globale variabler**

Under verktøymenyen i assembly-filen så finner man hjelpemiddelet Equations, som vist i figur 27. Dette kan brukes til å knytte alle nødvendige målsettinger mot en global variabel som vi senere kan parametrisere etter ønske.



Figur 27, Equations meny

Man starter med å sette opp ønskede variabler, i vårt tilfelle er det blant annet lengde, bredde og høyde, med ønskede verdier i kolonnen «values». Deretter plukker man ut målsettingene direkte fra assembly-filen som man ønsker å knytte mot variablene. Dette kan være alt ifra en lineær tilnærming, eks. bredde – 2 x tykkelse, til et if-statement. If-statements kan forklares ved følgende eksempel som er brukt; Hvis arealet av kassen er mindre enn 400x300, vil tykkelsen automatisk endres fra 12 mm til 6 mm. Dette skrives inn i verdikolonnen på følgende måte:

$$= \text{IIF} ( \text{"Bredde"} * \text{"Lengde"} < 120001 , 6 , \text{IIF} ( \text{"Bredde"} > 300 , 12 , \text{IIF} ( \text{"Lengde"} > 400 , 12 , 6 ) ) ) .$$

Dette tilsier at tykkelsen er parametrisert av lengden og bredden til kassen. Blir kassen for stor så skaleres tykkelsen for å tåle økt belastning. Dette kan ved en senere anledning brytes, slik at tykkelsen er en fri parameter. Dette krever derimot at enkelte ligninger må skrives om.

De globale variablene kan knyttes mot features i modellen. Med andre ord så kan man bestemme om/når enkelte geometrier til en komponent skal fjernes (suppressed) eller at en komponent skal fjernes helt. La oss si at man ønsker innfelte håndtak som en valgmulighet. Dette kan parametriseres ved å definere håndtak som en global variabel lik 1, og deretter sette opp if-statement for komponenten;

$$= \text{IIF} ( \text{"Høyde"} < 150 , \text{"suppressed"} , \text{IIF} ( \text{"Bredde"} < 225 , \text{"suppressed"} , \text{IIF} ( \text{"Hull håndtak"} = 2 , \text{"suppressed"} , \text{IIF} ( \text{"Håndtak"} = 0 , \text{"suppressed"} , \text{"unsuppressed"} ) ) ) )$$

Ligningen over forteller at hvis høyden eller bredden på kassen blir for liten, vil håndtaket bli for stort, og dermed suppressed. Hvis hull til håndtak ikke er ønsket, så trengs det heller ikke innfelt håndtak, dermed suppressed. Hvis ingen av gitte kriterier er oppfylt, og håndtak er ønsket, altså  $\neq 0$ , vil håndtaket komme fram i modellen.

Merk at ligningen starter fra venstre, slik at hvis første kriterie er oppfylt så blir resten av ligningen ignorert. Det er derfor viktig å sette opp ligninger på en konservativ måte for å unngå feilmeldinger i modellen. Det har vært problematisk å knytte en global variabel direkte mot en enkelt feature hos komponentene, i dette tilfellet hull til håndtak, siden programmet bare klarer å knytte variablene mot fysiske målsettinger og komponenter i sin helhet.

Løsningen på dette ble å lage et lite hull på sidene lik 1 mm, som vi igjen knyttet mot hullet til håndtaket. Derav, hvis hullet er 2 mm så blir hull til håndtak fjernet, og hvis hullet er 1 mm så består det.

Hjørnebeskyttere er også lagt inn som en valgmulighet. Disse er designet for stabling av kassene. Med tanke på materialbesparelse så endres dimensjonene på hjørnene fra 52 til 35 mm i takt med endring av tykkelsen på kassen.

Equations, Global Variables, and Dimensions

Name	Value / Equation	Evaluates to	Comments
<b>Global Variables</b>			
"Bredde"	= 400	400	
"Høyde"	= 200	200	
"Tykkelse"	= IIF ("Bredde" * "Lengde" < 120001, 6, IIF ("Bredde" > 300, 12, IIF ("Lengde" > 400, 12, 6)))	12	t=6<400x3
"Lengde"	= 500	500	
"Iokk"	= 1	1	
"Håndtak"	= 1	1	
"Hjørnebeskyttere"	= 1	1	
"Merkning"	= 1	1	
"Hull håndtak"	= 1	1	1 if ønsket.
Add global variable			
<b>Features</b>			
"Vertikal fram<1>.Part"	= IIF ("Lengde" > 800, "suppressed", IIF ("Lengde" < 100, "suppressed", IIF ("Bredde" > 600, "suppressed", "suppressed")))		Max-min ve
"Vertikal bak<1>.Part"	= IIF ("Lengde" > 800, "suppressed", IIF ("Lengde" < 100, "suppressed", IIF ("Bredde" > 600, "suppressed", "suppressed")))		Max-min ve
"Bunn<1>.Part"	= IIF ("Lengde" > 800, "suppressed", IIF ("Lengde" < 100, "suppressed", IIF ("Bredde" > 600, "suppressed", "suppressed")))		Max-min ve
"Vertikal bredder<1>.Part"	= IIF ("Lengde" > 800, "suppressed", IIF ("Lengde" < 100, "suppressed", IIF ("Bredde" > 600, "suppressed", "suppressed")))		Max-min ve
"Vertikal bredder<2>.Part"	= IIF ("Lengde" > 800, "suppressed", IIF ("Lengde" < 100, "suppressed", IIF ("Bredde" > 600, "suppressed", "suppressed")))		Max-min ve
"Iokk 6mm<1>.Part"	= IIF ("Iokk" = 0, "suppressed", IIF ("Lengde" > 800, "suppressed", IIF ("Lengde" < 100, "suppressed", "suppressed")))		Max-min ve
"innfeltmini.v2<1>.Assembly"	= IIF ("Høyde" < 150, "suppressed", IIF ("Bredde" < 225, "suppressed", IIF ("Hull håndtak" = 2, "suppressed", "suppressed")))		Kriterie hån
"innfeltmini.v2<2>.Assembly"	= IIF ("Høyde" < 150, "suppressed", IIF ("Bredde" < 225, "suppressed", IIF ("Hull håndtak" = 2, "suppressed", "suppressed")))		Kriterie Hår
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 6 35mm"	= IIF ("Tykkelse" = 12, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 12 52mm"	= IIF ("Tykkelse" = 6, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 12 52mm"	= IIF ("Tykkelse" = 6, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 12 52mm"	= IIF ("Tykkelse" = 6, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 12 52mm"	= IIF ("Tykkelse" = 6, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør
"helt hjørne skeiv borg 12 52mm"	= IIF ("Tykkelse" = 6, "suppressed", IIF ("Hjørnebeskyttere" = 1, "suppressed", "suppressed"))	"suppressed"	Kriterie hjør

Figur 28: Ferdig ligningssett til parametrisering av boksen

Totalt endte vi opp med å parametrisere ni variabler knyttet mot 53 ligninger, som vist i figur 28 ovenfor. Dette gir en modell med tegninger som automatisk endres ved input i variablene.

#### 4.3.4.2 Lage regneark

For en som ikke er vant til å bruke SolidWorks, vil det være vanskelig å endre de globale variablene inni modellen. En måte å forenkle prosessen på er å lage et Excel-ark med gitte variabler som brukeren ønsker å endre, som knyttes mot modellen via design table.

På øverste rad setter vi opp de globale variablene som vi ønsker å endre i SolidWorks. Deretter legges det inn rader for informasjon og input for standardmål og valgfri boks. En svakhet med dette er at hvis brukeren taster inn noe annet enn verdiene som er innenfor, vil det bli komplikasjoner når man åpner modellen. Regnearket må dermed sikres mot feilbruk. Lager derfor en tekstboks som gir beskjed hvis verdiene er ok, og varsler hvis de ikke er ok. Her kommer flittig bruk av farger inn i bildet. Grønt og rødt kan naturlig tolkes som bra og dårlig, mens gult brukes ofte får å utheve viktig tekst. Eksempel på dette er vist i figur 29 nedenfor, der bredde er markert utenfor definisjonsområdet.

Lengde	Bredde	Høyde	Lokk	innfelte Håndtak	Hjørnebeskyttere
500	50	400	1	1	1
Standard mål til pallekarm					
748	574	200	1	1	0
374	286	220	1	1	0
187	143	195	1	1	0
			L	OK	$100 \leq L \leq 800$
	Kriterier		B	3 utenfor grenser	$100 \leq B \leq 600$
			H	OK	$100 \leq H \leq 600$
			tykkelse	6 mm	{6,12}

Figur 29.: Brukervennlighet regneark

Regnearket inneholder også en makro, nærmere forklart neste avsnitt, som lager SVG kuttfiler til bruk med laser og en stykklister. Bruker kan selv velge navn på filene som lages, dimensjonen på plata som brukes i laserkutteren og distansen fra delen til kanten av plata. Hvis maskinen klarer å håndtere DXF-filer så kan dette hentes direkte fra SolidWorks.



om vektorsett til linjer i en SVG-fil. Vektorsettene regnes ut ifra dimensjonene gitt til SolidWorks-modellen. Arket kan modifisere ytterligere for å gravere merkinger for maskiner som støtter det. Makroen lager også et tekstdokument med en stykkliste for en boks.

Strekk_kut	Strekk_merking	Dimensjon som endrer platerjukkels				Tynn plate	Tjukkplate	SANN	SANN er tynn	SANN er stor kasse	<?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>							
0.025	0.2	Eredde	300			6	12				<!-- Generator: Adobe Illustrator 18.0.0, SVG Export Plug-In. SVG Version: 6.00 Build 0 -->							
		Lengde	400								<!DOCTYPE svg PUBLIC "-//W3C/DTD SVG 1.1/W3C" "http://www.w3.org/Graphics/SVG/1/DTD/svg11.dtd">							
		Høyde	160								<svg version="1.1" id="Lager_1" xmlns="http://www.w3.org/2000/svg" xmlns:xlink="http://www.w3.org/1999/xlink" x="0px" y="0px" width="300px" height="500px" viewBox="0 0 300 500">							
		Dimensjoner som endrer håndtak og merking																
		Eredde	150					SANN	Hull i siden									
		Lengde	150					USANN	Håndtak	800	500							
		Høyde	150							2.5								
<b>Høyde:</b>	<b>Bredde:</b>	<b>Lengde</b>	<b>Lokk:</b>	<b>Hjørner:</b>	<b>Håndtak:</b>	<b>Merking:</b>												
300	400	300	0	1	1	1												
Merking på denne siden						Håndtak på denne siden												
Kortsiden				Langsiden				Lokk				Bunn						
Kutt	Merking	Kutt	Merking	Kutt	Merking	Kutt	Merking	Kutt	Merking	Kutt	Merking	Kutt	Merking					
X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)	X (mm)	Y (mm)					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
282	0	101	36	294	Sirkel	0.5	73.5	0	0	288	0	0	0					
0	0	181	36	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
0	234	101	36	394	0	0.5	147	0	0	0	288	0	288					
0	234	101	76	0	294	0	0	0	0	0	288	0	288					
282	234	101	76	394	294	Sirkel	0.5	0	0	288	288	288	288					
282	0	181	76	394	0	3	220.5	0	0	288	0	288	0					
282	234	181	76	394	294	Sirkel	0.5	0	0	288	288	288	288					
		181	36			391	73.5											
		181	76	157	46		0											
				237	46	Sirkel	0.5	0	0									
						391	147											
				157	46		0.5											
				157	86	Sirkel	0.5											
						391	220.5											
		282	6		86													
				237	86													
		282	0															
		0	6	237	46		0	0										
		0	6	237	86		394	6										
		282	6				394	0										
		0	282				0	6										
		282	282				394	6										
		0	288				0	288										
		282	288				394	288										
							0	294										
							394	294										

Figur 31: Excel-ark med vektorsett

### 4.3.5 Alternativt fingerskjøt-design

Ett av flere design som ble vurdert var kasse med fingerskjøt-forbindelser. Her skal vi gjennomgå designfasen av dette, samt enkel parametrisering.

Generelt lages bunn sider og lokk på samme vis som nevnt i kapittel 4.3.1.1 og 4.3.1.2, men her må fingrene lages i en separat operasjon. Først ser vi på vertikalene, hvor vi plasserer første finger midt på platen på hver side ved å tegne opp en finger og ekstrudere denne. Mot tilstøtende plate må det naturlig være et utkapp (cut-extrude).

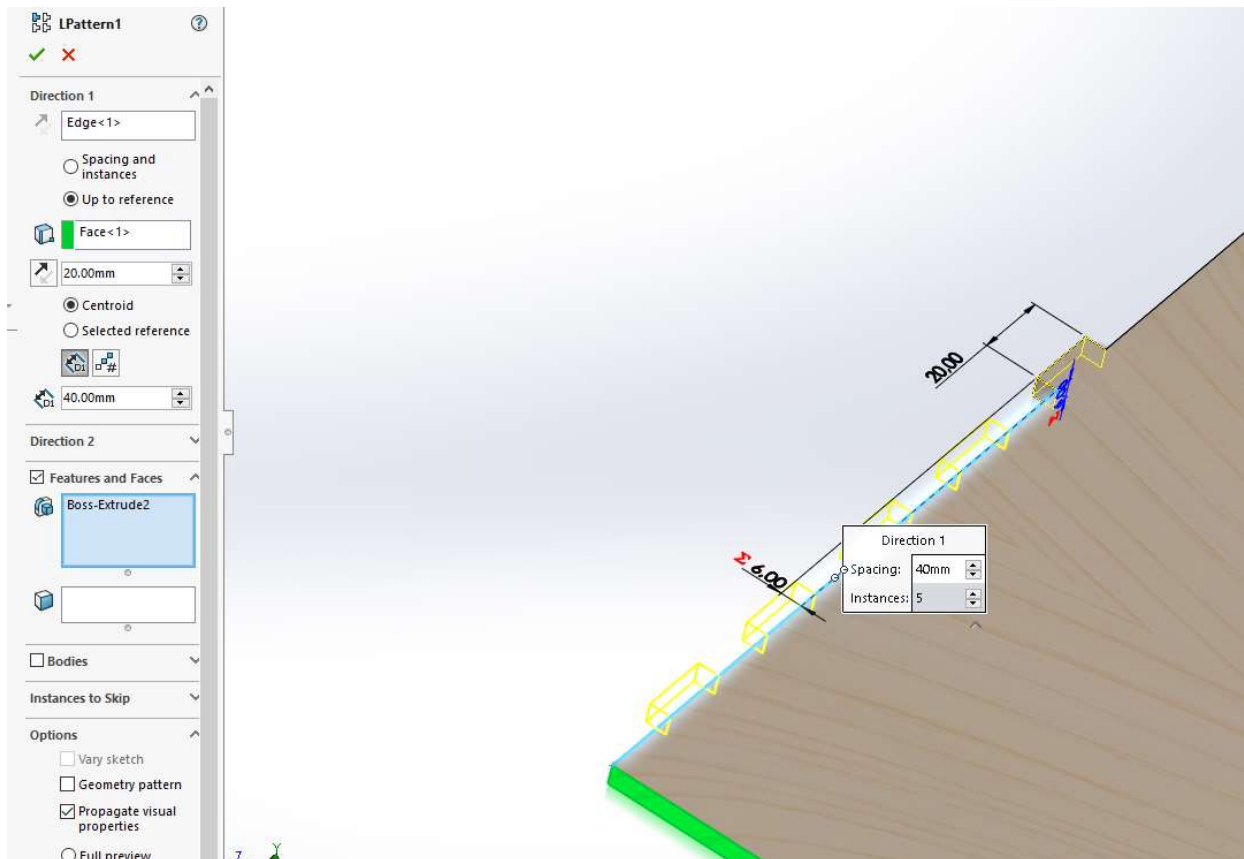
Fingrene tegnes 20 mm bred med 20 mm mellomrom. Disse verdiene vil holde seg konstant for alle størrelser på kassen. Deretter bruker vi kommandoen linear-pattern til å repetere denne operasjonen opp til enden av platen, som demonstrert i figur 32 under.

Denne metoden gjør det enkelt å parametrisere boksen, da fingrene vil genereres til endene



uavhengig av dimensjonene på kassen. Det er viktig at kommandoen mirror-pattern ikke brukes, da dette vil lettere gi feilmeldinger ved parametrisering av flatene.

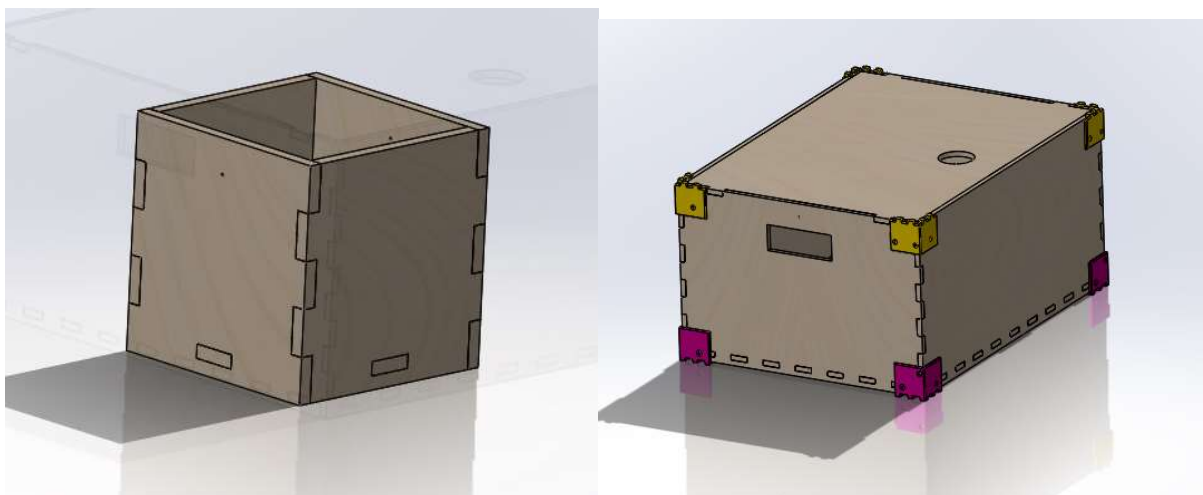
For forbindelsen mellom bunn og vegg blir det ekstrudert fingre rundt hele bunnplaten, som smettes inn i utskjæret hull i sideveggene.



Figur 32: Modellering av fingre

Neste steg vil være å sette komponentene sammen i assembly, og definere globale variabler med tilhørende ligningssett på tilsvarende måte som vist i kapittel 4.3.4.1. Etter litt prøving og feiling har vi kommet fram til at en dimensjon på under 100x100x100 vil være ugunstig.

Denne beslutningen er tatt med bakgrunn i at finger-bredden er konstant lik 20mm, og da den er plassert i senter så får man bare en finger på hver side, som vist i figur 33 nedenfor. Steget videre ville ha vært å parametrisere finger-bredden, slik at den endrer seg i takt med resten av dimensjonene. Ved å eventuelt bruke mindre hjørnebeskyttere kan minstemålet strekkes til 50x50x50 før feilmeldingene kommer.



*Figur 33: Kasse med fingerskjøter*

## 4.4 Prototyping

Det ble utført ført en del forskjellige former for prototyping i løpet av denne oppgaven. Målet med å lage prototyper er å vise at designet og produksjonsprosessene fungerer i praksis. Håndtaket ble testet ut separat fra resten av designet, til vi hadde et design vi trodde vil fungere. For designet av boksen med 6 mm plater ble det tidlig i prosessen laget en prototype for å verifisere at det tålte den nødvendige vekt belastningen, og at designet i sin helhet fungerer. Til slutt ble det laget en full skala modell med 12 mm plater, hjørner og håndtak, og tre 1:2 skala modeller for å teste ut produksjonsprosesser og stabling av flere bokser. Dette ble gjort på verkstedet til IVB på NTNU Gjøvik.

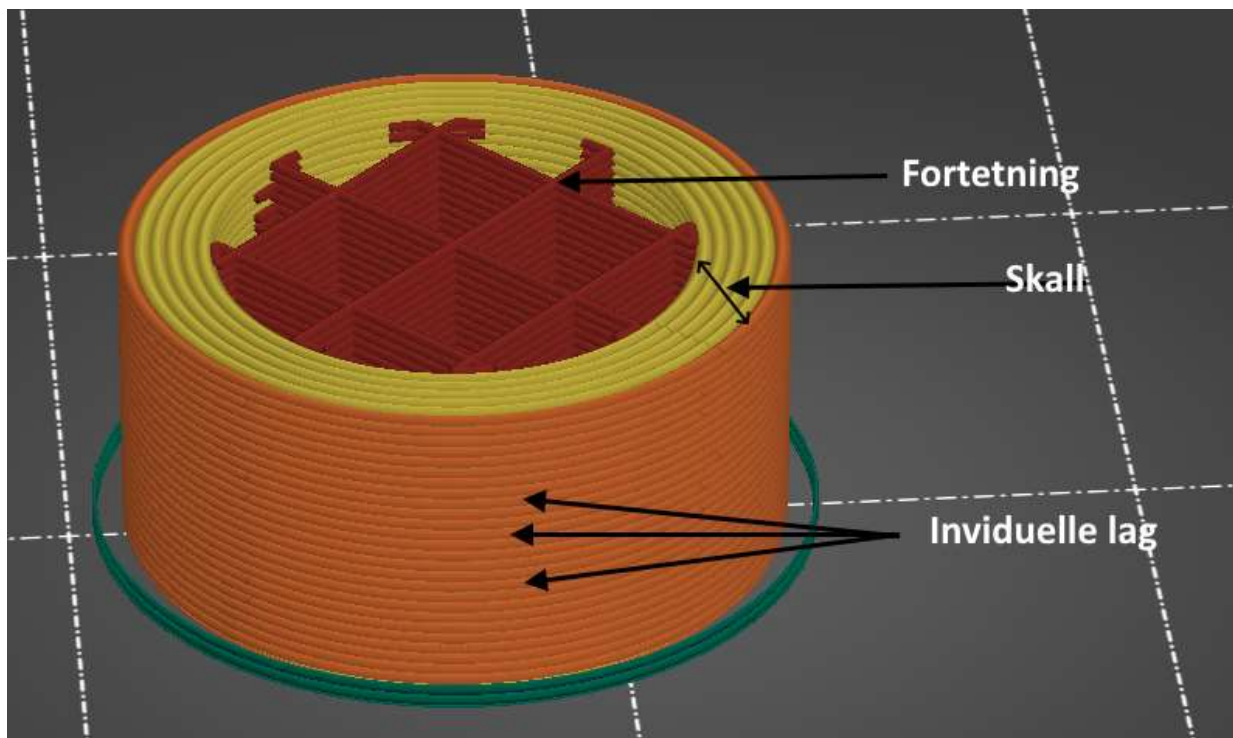
### 4.4.1 Prototyping og testing av håndtak

Prototypingen av håndtakene begynte med figur 19 fra avsnitt 4.2.3.10. Vi brukte en iterativ prosess i designet av håndtaket. Det vil si at vi testet håndtaket og gikk tilbake og gjorde endringer i modellen før håndtaket ble testet på nytt, til vi hadde et resultat som stemte overens med kravspesifikasjonen til håndtaket i Tabell 2.

Den første versjonen av håndtaket hadde litt rare dimensjoner som gjorde det uegnet for bruk. Versjon 2 utbedra disse manglene og kunne testes. Det ble testa tre håndtak med forskjellige parameterer brukt i PrusaSlicer. Håndtaket er satt sammen med 2 stk. 40 mm M5 bolter.

Håndtaket bli lagd på Prusa Original Mini+ med Polymaker PolyTerra med de generiske innstillingene til PLA i PrusaSlicer.

De tre mest grunnleggende elementene i en 3D-printa modell, illustrert i figur 34, er tjukkelsen på lagene den blir bygd opp av, hvor mye materiale det er inne i modellen (fortetningsprosenten) og tjukkelsen til skallet til modellen.



*Figur 34: Oppbygningen til en FFF modell*

Komposisjonen av disse tre elementene i håndtaket er essensielt for belastning det kan ta. Tjukkelsen på de lagene har lite påvirkning på slagfastheten til en del (47). Strekkfastheten til en komponent reduseres når lagene blir tynnere (48). Økt lagtjukkelse reduserer tiden det tar å produsere en del. Når fortetningsprosenten til en del øker, øker også slagfastheten. Strekkfasthet påvirkes mindre av fortetning, men tynnere skall forbedrer strekkfastheten (49). Høy fortetningsprosent og tynnere lag øker begge produksjonstiden til en komponent. Det er derfor ønskelig å ha lavest mulig fortetning og tynneste mulig lag for å redusere produksjonstid. Med versjon 2 av håndtaket ble det prøvd med 3 forskjellige sammensetninger av fortetningsprosent og skalltjukkelse.

Tabell 5: Testing av versjon 2 håndtak.

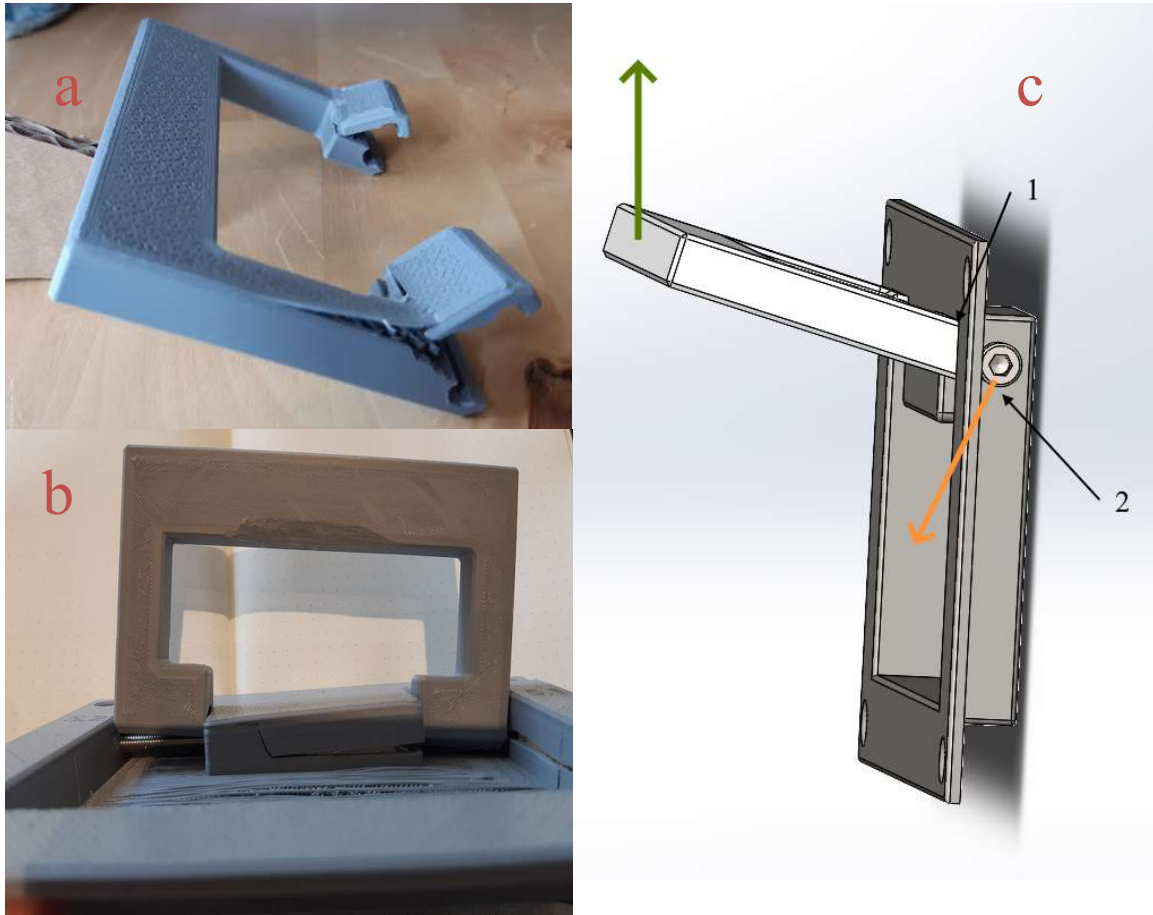
	Oppbygning	Maks vekt	Kommentarer
Test 1	Skalltjukkelse: 6	12 kg	Holdt en stund på 21 kg før brudd
	Fortetning: 15% rectilinear		
Test 2	Skalltjukkelse: 4	12 kg	Holdt en stund på 21kg før brudd
	Fortetning: 30% honeycomb		
Test 3	Skalltjukkelse: 5	21 kg	Holdt en stund på 30 kg før holderen og håndtaket sviktet rett etter hverandre
	Fortetning: 30% honeycomb		

Alle håndtakene ble splitta der bolten fester håndtaket og holderen som vist i figur 35a og b. Holderen feilet til slutt også på samme sted. På tegningen i Figur 35c ser man at når håndtaket er full utstrakt kommer det i kontakt med holderen ved punkt 1. Håndtaket blir da en slags vektstang med vippepunkt i punkt 1 og oversiden av håndtaket dytter på boltene til de horisontale lagene separeres fra hverandre i enten håndtak, holder eller begge deler. Det er adhesjonen mellom lagene som er den svakeste delen av en FFF produsert komponent (50), og det kreves derfor mindre krefter for å få brudd når belastningen er på tvers av lagene i delen.

En løsning til problemet kunne vært å gjøre alle delene mere massive så de tåler mer, men da øker både materialbruk og produksjonstid, noe som er ugunstig. Et annet alternativ er å redusere effektiviteten til vektstanga ved å øke vinkelen mellom håndtaket og holderen.

Tabell 6: Testing av håndtak versjon 3

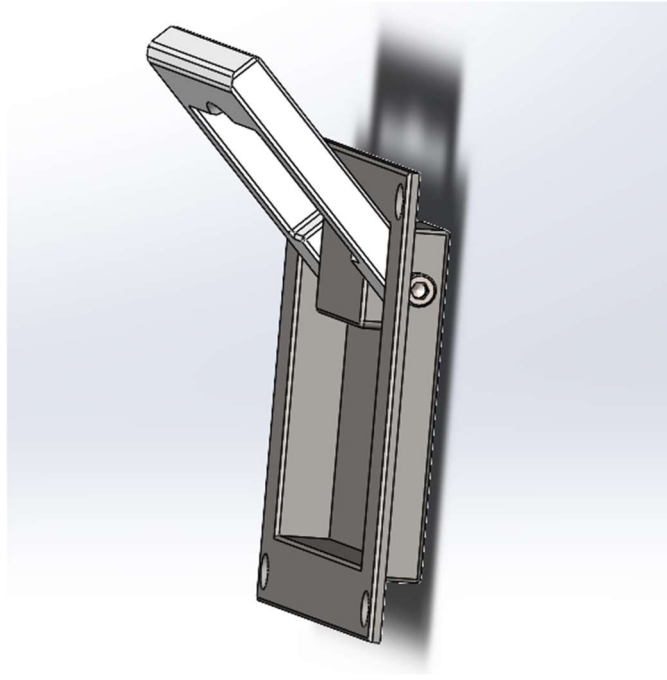
	Materiale	Oppbygning	Maks vekt	Kommentarer
Test 4	Polymaker PolyTerra	Skalltjukkelse: 6	57 kg	Greide ikke å løfte mer
		Fortetning: 40% honeycomb rundt hullet ellers 10% aligned rectilinear		



Figur 35: a) Test 2 etter brudd, b) Test 3 og holder etter brud c) CAD-modell av håndtaket

I versjon 3 av håndtaket, figur 36, er boltene plassert lenger ned i holderen for å endre vinkelen. Selve håndtaket er også litt lenger for å kunne gripe tak i, uten å komme inntil boksen. I testinga fant vi ut at håndtaket kan løfte mer enn kravspesifikasjon.

Oppbygningen av håndtaket fikk også noen små endringer fra versjon 2. Håndtaket i versjon 2 hadde alltid brudd ved boltene så vi økte fortetningsprosenten i det området, og reduserte den i resten av håndtaket. For skalltykkelsen ble den høyeste varianten fra versjon 2 beholdt. Skallet til de vertikale veggene på holderen økte også litt fra versjon 2. Nå som vi hadde en fungerende prototype, blir resten av testingen av håndtaket gjort sammen med det helhetlige designet av boksen.



*Figur 36: Versjon 3 av håndtak med ny vinkel*

#### **4.4.2 Prototype med 6 mm plater**

Første forsøk på å produsere en prototype ble gjort ved hjelp av svært enkelt utstyr:

- Sirkelsag, uten styring.
- Håndoverfres, uten styring.
- Batteridrill
- Meterstokk
- Blyant

Boksen ble produsert med 6 mm kryssfinerplater. Kryssfiner er som tidligere nevnt et relativt formstabilt materiale, men det vil påvirkes noe av fuktighet. Modellen ble bygget av 6 mm plater og det ble benyttet en 6,35 mm tykk fres. Dette ble gjort for å gi sporet et lite overmål.

Det å ikke ha en skikkelig sag viste seg også å ha litt konsekvenser. Siden det ikke var tilgang noen form for 'land' eller styring til sagen var det vanskelig å få platene på nøyaktig samme mål. Det gikk fortsatt helt fint å produsere, men det vil bli en langt høyere nøyaktighet når man får delene kuttet i laserkutter.





*Figur 37: Prototype av 6 mm boks*

Videre viste monteringen av boksen at man kunne få god hjelp av hjørnebeskytterne til å holde delene på plass når disse skulle settes sammen. Etter at boksen var satt sammen ble den utsatt for en last/stress test på 30 kg.

#### **4.4.3 Prototype med 12 mm plater**

Prototypen av 12 mm boksen ble produsert ved NTNU Gjøvik. Der var det tilgang på litt mer verktøy enn når 6 mm boksen ble produsert, men fortsatt ingenting mer enn helt enkle verktøy. Til å skjære ut platene ble det fortsatt brukt en sirkel sag, men med styreskinne denne gangen. Dette gjorde at størrelsen på veggene ble mye mer nøyaktig enn ved første forsøk på 6mm boksene. Til å frese ut sporene ble det brukt en bordfres med land, noe som gav et meget nøyaktig resultat i alle platene. Fresen som ble brukt var 16mm, noe som ga 4mm overmål. Hjørnebeskytteren ble benyttet under monteringen

For å teste kvalitetene på materialvalg og sammenføyningsmetode ble det utført flere tester. Boksen ble belastet med 30, 80 og 160 kg og deretter løftet. Under testen på 160 kg ble boksen bare løftet på en side med et håndtak.

#### 4.4.4 Skala modell med MDF

Vellykket parametrisering som produserer filer som kan brukes i en laserkutter er også viktig for oss å teste. Det ble gjort ved designverkstedet til Institutt for design (ID) på Gjøvik. Vi hadde noen utfordringer underveis som er nærmere beskrevet i avsnitt 5.2.4

For å lage modellen ble ønskede dimensjoner lagt inn i Excel-programmet som midlertidig hadde blitt modifisert til å produsere kutt-filer med halverte dimensjoner, og bunnen ble litt mindre siden vi ikke hadde muligheten til å frese MDF-platene. Delene til boksen var små nok til at flere kunne kuttes ut av samme plate. Alle delene ble lagt inn i programmet deepnest.io. I programmet kan man angi størrelsen på plata noen mm mindre enn den faktiske plata delen skal kuttes fra, og hvor mange eksemplarer man vil ha av vær del. For å lage en boks trenger man en bunn, to av hver side og et lokk hvis det er ønskelig. Når deepnest.io har plassert ut filene kan resultatet eksporteres som en SVG-fil. Filer som brukes til denne laserkutteren burde ha et lite mellomrom ut til kanten av plata. Derfor må resultatet fra deepnest.io overføres til fila Plate.svg, som også er laget av Excel-programmet, ved hjelp av programmet Inkscape. I Inkscape sørget vi for at marginene til kanten av plata og linjetjukkelsen stemte. I tillegg ble det sjekket at det ikke har dukket opp noe feil i fila som kan ødelegge kuttprosessen. Håndtak og hjørnebeskytterne ble skalert ned med 50% med bruk av skaleringsfunksjonaliteten i PrusaSlicer. Alle boksene ble limt sammen siden sammenføringsteknikken ikke relevant for prototypen. Håndtak og hjørner ble også limt på boksene. Etter montering ble stabling med de to typene hjørnebeskyttere testet ut.



*Figur 38: Skalamodeller stablet 2 og 3 i høyden*

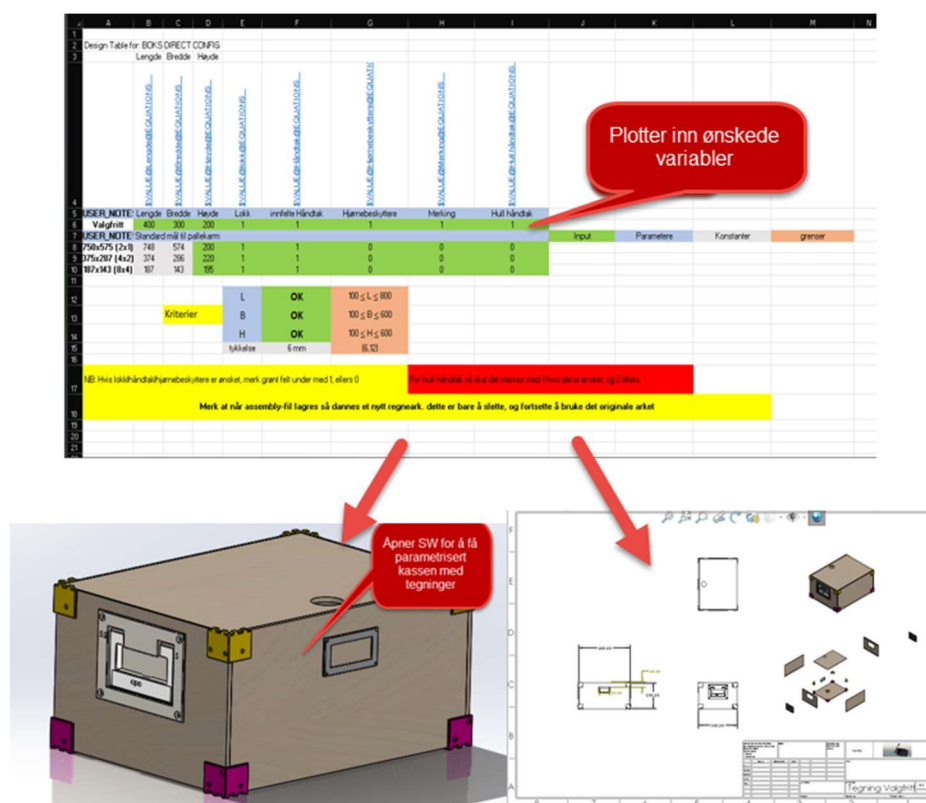


# 5 Resultat

I dette kapittelet skal vi legge fram resultatet fra utviklingsprosessen beskrevet i forrige kapittel. Vi kommer til å ta for oss det vi lærte fra prototypene vi lagde i avsnitt 4.4 og forklare nærmere hvordan den endelige Excel-fila fungerer.

## 5.1 Ferdig modell med regneark

Som vist i kapittel 4.4 og 4.5 så har vi betydelig forenklet prosessen for å endre mål på kassen. Hvor vi tidligere måtte gå inn på hver enkelt komponent og endre mål manuelt, noe som krever en del kjennskap til SolidWorks, så kan vi heller legge inn ønskede mål og parametere inn i et regneark i Excel. Disse parameterne mates så inn i SolidWorks neste gang fila åpnes, som oppdaterer modell og tegninger automatisk, som vist i figur 39 nedenfor. Man får også ut vektorfiler og stykkliste fra samme regneark ved å trykke på lag .svg knappen.



Figur 39: Fra input i Excel-arket til ferdig modell

## 5.2 Prototyper

### 5.2.1 Prototype med 6 mm plater

Prototypen ble bygget av 6 mm plater og det ble benyttet en 6,35 mm tykk bred. Selv om dette egentlig skulle gitt sporet et lite overmål viste det seg at sporet ble noe trangt. Det anbefales dermed å skalere sporet opptil 7 mm. Videre viste monteringen av boksen at man kunne få god hjelp av hjørnebeskytterne til å holde delene på plass når disse skulle settes sammen.

Etter montering ble den fylt med vann for en liten vekt/stress test. Denne testen til 30kg viste ingen tegn til svakheter med sammenføyningsmetoden. Dette er høyere enn den maksimale lasten på 20 kg, som ble regnet ut fra den statiske analysen i kapittel 4.7.2. Men dette er igjen en jevnt fordelt trykklaster over hele kassen, hvor vi i analysen definerte 20 kg som en punktlaster midt på bunnplata.



*Figur 40: Lasttesting med vann av boks med 6mm plater*

## 5.2.2 Prototype med 12 mm plater

Det ble brukt et overmål på 4 mm på det freste sporet til bunnen. Overmålet var med å lette monteringen en god del, samtidig som det ikke har noen betydning for styrke og stabilitet i boksen. De innebygde holderne i de nedre hjørne bidro til å forenkle monteringsprosessen, og skruehullene var riktig plassert for sammenføyingen av sidene og bunnen.

Håndtaket ble produsert med X-PLA fra add:north med 6 skalltjukkelse, 40% honeycomb fortetning ved bolten og 10 % rectiliniar i resten av håndtaket. Et utsnitt av komposisjonen i håndtaket kan ses i Figur 42. Hjørnebeskytterne ble lagd i E-PLA fra add:north.

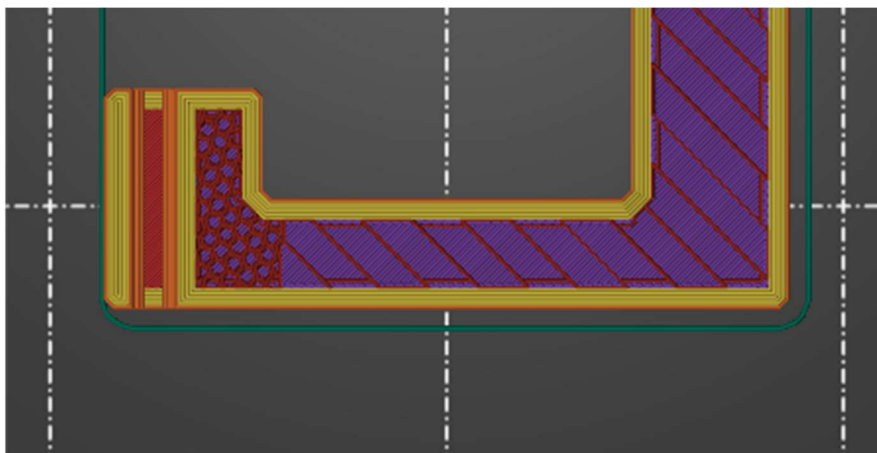
Under testingen av prototypen fant vi at med en last på 30 og 80 kg viste verken boksen eller håndtakene noen svakheter. Dette stemmer overens med den statiske analysen som ble utført i kapittel 4.3.2.1 for selve boksen, der lasten ble definert som 75 kg, som ga spenninger under flytegrensa. Når vi forsøkte å løfte 160 kg med ett håndtak viste boksen ingen svakheter, men håndtaket brakk før boksen lettet fra bakken (Figur 41b).



Figur 41: a) Last-test 30kg b) Håndtak etter brudd

Vi fikk også testet å produsere de forskjellige typene hjørnebeskyttere. For å få et vellykket resultat trengte ikke konsept 10 noen støttestrukturer, mens konsept 12 trengte noen små

støttestrukturer som var veldig enkle å fjerne. Konseptene tok tilnærma like lang tid å lage og brukte like mye filament.



*Figur 42: Tverrsnitt av en del av versjon 3 håndtaket*

### **5.2.3 Skala modell i MDF**

Skalamodellen ga oss god innsikt i fremgangsmåten når man bruker en laserkutter. Vi fikk testet interface mellom programmet og laserkutteren. I utgangspunktet så var det tiltenkt kryssfiner, men det oppsto en del komplikasjoner under gjennomføringa som vi skal omtale i neste avsnitt. Vi testa også hvor gode de to forskjellige versjonene av hjørnebeskytterne er til å stable. Konsept 12 ga en mer stabil struktur da vi prøvde å stable boksene.

### **5.2.4 Uforventede funn**

Å bygge prototypen skulle vise seg å bli mer komplisert enn antatt. For det første så hadde ikke alle materialene kommet til Gjøvik. Dette førte til at vi ikke fikk produsert en god prototype i 6mm tykkelse der. Av det materialet som var tilgjengelig så var platene veldig ujevne, noe som er uheldig for laserkutteren som må kalibreres i z-retning.

Kryssfiner med sin høye tetthet krever også mye energi til å kuttes med laserskjærer, dette fikk vi erfare ved at materialet tok fyr i laserkutteren, som vist i figur 43 nedenfor. Dette skyldes lav framføringshastighet, høyt energiforbruk og kuttlinjer som hadde blitt plassert for nærme hverandre. Dette kan forebygges ved å plassere kuttlinjer lengre fra hverandre, men

det gir igjen mer materialsvinn. Løsningen ble å bruke MDF som omtalt i forrige avsnitt, deretter så viste det seg at laseren heller kuttet parallelogram framfor rette firkanter.



*Figur 43: Kryssfiner i laserkutter*



## 6 Diskusjon og analyse

Som vist i tabell 7 så har vi oppnådd de fleste kravspesifikasjonene som ble satt i tabell 1. Det er noen punkter som vi ikke kom helt i mål med, eller som vi føler kunne vært gjort bedre.

Dette skal vi omtale i dette kapitlet.

Tabell 7: Oppnådde egenskaper

	Egenskap	Nødvendig	Ønskelig	Oppnådd	
49	<b>Funksjon:</b>				
50		Løfte opptil 50 kg	x	Ja	
51		Innfelt håndtak	x	Ja	
52		Hjørnebeskytter		x	Ja
53		Kunne stables	x	Ja	
54		Reparerbar	x	Ja	
55		Identifiseres med farger/merking		x	Delvis
56	<b>Parametrisering:</b>				
57		Inndata, dimensjoner på boks	x	Ja	
58		Inndata, velge tilbehør		x	Ja
59		Utdata, BOM og kuttfiler	x	Ja	
60		Enkelt for bruker		x	Delvis
61	<b>Produksjon:</b>				
62		Standardisert monteringsprosess	x	Ja	
63		Standardisert produksjonsprosesser med lavt investeringsnivå	x	Ja	
64		Få produksjonsprosesser		x	2
65		Mulig å lage ved IVB	x	Ja	
66		Ingen etterbehandling av deler		x	Ja
67		Lett å montere	x	Ja	
68	<b>Materiale:</b>				

69		Rimelig pris	x		Delvis
70		Økologisk gunstig	x		Delvis
71		God materialutnyttelse	x		Ja
72		Få forskjellige typer	x		Delvis

## 6.1 Valg av hjørnebeskyttere

Hjørnebeskytterne fungerte bra til å forenkle monteringen av kassa, og til å beskytte hjørnene fra ytre påkjenninger. Konsept 10 forbedret kassas stablebarhet sammenlignet med ingen hjørnebeskytter, men det var litt vanskelig å få tappene til å gå i hullene på første forsøk. Stabling med konsept 12 er veldig stabilt og utformingen hjalp til med å sette sammen boksene da de gled lett sammen hvis man bomma litt.

Kravspesifikasjonen til hjørnebeskytterne, gitt i Tabell 2, prioriterer egenskapen stabling over ingen støttestrukturer så vi valgte konsept 12 som det endelige designet for hjørnebeskytterne.

Det kom også fram i testinga at hjørnebeskyttere for kasser laget med 12 mm plater fungerer like bra i et mindre format. En mindre versjon til 12 mm plater ble derfor også produsert. Det endelige designet av hjørnebeskyttere er konsept 12 med tre størrelser:

- et sett med 38 mm små hjørner for 6 mm plater
- et sett med 38 mm små hjørner for 12 mm plater
- et sett med 53 mm store hjørner for 12 mm plater

## 6.2 Drøfting design kasse

Oppbevaringsenheten ble designet som en firkantet kasse tilpasset for lagring oppi paller på verkstedet til IVB. Standardmål ble tilpasset mot innvendige mål på pallekarmer, slik at brukeren slipper å regne det ut selv.

Hvis vi sammenligner valgt design med alternativ fingerskjøt-metode i kapittel 4.6, så kan det vise seg at sistnevnte også lever opp til kravene som har blitt satt. Argumenter for dette er

blant annet at bunnen har blitt tredd inn i hull i sideveggene, som gir den like god bæreegenskaper som hoved-designet. Dette var ett av argumentene som gjorde at vi gikk vekk fra fingerskjøter. Fingerskjøtmetoden kan også produseres med bare laserkutter, altså en produksjonsmetode, forutsett at tykkelsen er 6 mm. Hoved-designet kan derimot også produseres med en produksjonsmetode, men er da begrenset til bruk av CNC-fres. Begge vil selvfølgelig få 3D-printing som en ekstra produksjonsmetode for ekstrautstyr. Hvis avanserte CNC-verktøy ikke er tilgjengelig så vil produksjon av fingerskjøter bli mer komplisert og tidkrevende, med mindre man har en jigg tilgjengelig, framfor å kutte og frese rette flater.

Siden fingerskjøtene skal limes og ikke skrues sammen så kan mer porøse materialer brukes, eksempelvis MDF. Dette vil selvfølgelig gi mindre bæreegenskaper, men vil også gi bedre muligheter for å laserkattes da MDF er lettere å kutte gjennom. Derav så kreves det nye beregninger i SolidWorks for MDF. Merk at laserkutteren på IVB er begrenset til 6mm tykkelse. Skruer må også sørges for å være korte nok slik at man ikke får skarpe kanter på innsiden.

Ett punkt som vi mener har potensiale for forbedring, er å hel automatisere prosessen fra input til ferdige filer. Her kan for eksempel Python implementeres til å lage et script som automatisk åpner SolidWorks og printer ut ferdige tegninger i pdf-format. Man kan også sammenslå regnearkene til ett komplett ark som sammen med Python kan lage ferdige kuttfiler i SVG format med ferdig oppsett og plassering for maksimal materialutnyttelse. Dette er per dags dato en operasjon som må gjøres manuelt og er tidkrevende. En annen tilnærming kan være å lage DXF-filer i SolidWorks, men det må gjøres manuelt og er tidkrevende med mindre man har tilgang til dyr profesjonell programvare for å automatisere prosessen.

Oppsummert så kan fingerskjøt-metoden være en bedre løsning for IVB framfor den vi har valgt, da de har god tilgang til både kryssfiner og MDF, samt at de har en laserkutter som er fullt i stand til å kappe slik geometri. Dette designet er også blitt parametrisert i oppgaven via globale variabler, men det er ikke laget noe regneark som er knyttet mot modellen, eller en som gir ferdige kuttfiler. Denne modellen vil bli levert sammen med hoved-designet. Fremgangsmåten for å lage dette er nærmest identisk for hoved-designet, så det skal være enkelt å rekonstruere dette i en videre oppgave.



Identifisering med farger og merking er et ønske som vi har delvis løst ved å montere en skiltbeholder på framsiden. Merk at både skiltbeholder og hjørnebeskyttere skal 3D-printes. Her er tanken at brukeren selv kan velge farge på filamentet, og derav definere disse fargene på sin måte.

Noen funksjoner som kan videreutvikles er å innføre flere platetykkelser. Dette krever flere beregninger, noe som gjør omfanget av oppgaven større. Et annet alternativ kan være å definere tykkelsen som en fri parameter, der man heller får anbefalinger på hvilke størrelser kassen bør ha.

Det kan også nevnes at det finnes flere programmer enn SolidWorks som kan brukes til parametrisering. AutoCAD for eksempel er godt egnet til å sette opp parametere mot design, og er muligens mer videreutviklet når det kommer til å generere ferdige kuttfiler. Men vår kunnskap begrenser seg til SolidWorks, da dette er det eneste programmet vi har forholdt oss til gjennom utdanningen. Det finnes derimot et tilleggsprogram til SolidWorks som automatiserer kuttfilene for deg, men dette koster penger og faller utenfor vårt budsjett.

### **6.3 Materialvalg med tanke på RdM**

Korte undersøkelser på lokale bedrifter og bedrifter vi jobber hos, blant annet Aker Solutions, viser at tilgangen til finerplater er større enn MDF-plater, da kryssfiner har bedre bæreegenskaper og derav flere bruksområder. Dette var med på å påvirke materialvalget, da modellen til RdM baserer seg på at lokale bedrifter har tilgang til de rest-materialene som er tenkt å brukes.

På den andre siden så vil Kryssfiner være betydelig dyrere enn MDF, grunnet måten det blir produsert på i form av å limes lag på lag. Kryssfiner gir av samme grunn et større klima-avtrykk. Vi mener derimot at tilgjengelighet er viktigere enn klima-avtrykk, da å produsere et produkt med rest-materialer møter behovet i sirkulær økonomisk design for gjenbruk av materialer.

## 6.4 Materialvalg med tanke på sirkulær økonomi

I en sirkulær økonomi er gjenvinning og at ressurser er en del av et sirkulært løp viktig. Filamentet vi har brukt i prosjektet har en gjenvinningsordning som gjør det mulig å gjenvinne plasten til nytt filament til å lage nye deler. Filamentet er også lagd av fornybare ressurser, kan biologisk nedbrytes og brukes som kompost på nye planter, som kan brukes til produksjon av nytt filament. Dermed er plasten en del av et sirkulært system.

Kryssfiner er også lagd av en fornybar ressurs, og muligheten for materialgjenvinning er begrenset til å kvernes opp til bruk i bygningsplater av lavere verdi. Store overflater med kryssfiner kan muligens brukes til å lage mindre bokser. Den kan også energi gjenvinnes, noe som er en siste utvei i en sirkulær økonomi og er derfor ikke en ideell løsning.

## 7 Konklusjon

Problemstillingen i denne oppgaven var som følger: «Hvordan kan man parametrisere en lagringsløsning som gir ferdige arbeidstegninger og kuttfiler?». I utgangspunktet så har vi klart dette ved å lage en parametrisert modell i SolidWorks, hvor man ved å taste inn ønskede dimensjoner i et regneark gir oppdaterte tegninger og delvis komplette kuttfiler. Men det finnes alltid rom for forbedringer, noe som ble drøftet i forrige kapittel. Dette kan være enkle ting som å betale for et automatiseringsprogram som lager ferdige kuttfiler for deg, eller mer kompliserte tiltak som å re designe hele modellen eller bruke et annet program.

I bunn og grunn så har vi kommet med en brukbar løsning som lever opp til kravene som vi har satt gjennom prosjektet. Effektmålet er dermed oppnådd, hvor vi har brukt parametrisk design som en rød tråd gjennom hele oppgaven til å lage et oppbevaringssystem. Om resultatmålet blir oppnådd, vil avhenge om brukeren synes dette blir en mer brukervennlig oppbevaringsløsning enn den som brukes i dag. Dette finner vi ut av når prototypen blir presentert neste måned.

Vi er optimistiske på at dette er et bra konsept, men som nevnt tidligere så finnes det rom for forbedringer, derfor kan denne oppgaven også være et godt utgangspunkt å fortsette på i fremtiden.

# Litteraturliste

1. NTNU. Solidworks [Internett]. [hentet 25.04.2022]. Tilgjengelig fra: <https://i.ntnu.no/wiki/-/wiki/English/Solidworks>.
2. Liu L, Ramakrishna S. An introduction to circular economy. Gateway East, Singapore: Springer; 2021.
3. EPEA. Cradle to cradle [Internett]. [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://epea.com/en/about-us/cradle-to-cradle>.
4. ScienceDirect. Remanufacturing [Internett]. [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/remanufacturing>.
5. LOOP - Stiftelsen for Kildesortering og Gjenvinning. materialgjenvinning [Internett]. 2018 [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/materialgjenvinning>.
6. Rosa ADL. Polymer recycling Part I. I: NTNU, red. Plastics and composite manufacturing methods2021.
7. Rosvold KA, Hofstad K. energigjenvinning [Internett]. 2019 [oppdatert 30. august; hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/energigjenvinning>.
8. Scopigno R, Cignoni P, Pietroni N, Callieri M, Dellepiane M. Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage: A Survey. Computer graphics forum. 2017;36(1):6-21.
9. Grammatikos S. Materialteknologi II Lecture 3. I: NTNU, red. 2021.
10. All3DP. The Best 3D Printer Filament Types of 2022 [Internett]. 2021 [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://all3dp.com/1/3d-printer-filament-types-3d-printing-3d-filament/>.
11. whiteclouds. Toxicity of ABS Plastic in 3D Printing [Internett]. [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.whiteclouds.com/blog/toxicity-of-abs/>.

12. TWI. WHAT IS PETG? (EVERYTHING YOU NEED TO KNOW) [Internett]. [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-petg>.
13. Kondo H, Tan C. The Best Nylon Filaments in 2022 [Internett]. 2021 [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://all3dp.com/2/nylon-filament-pa-basics-best-brands/>.
14. Hazardouswasteexperts. Post-Consumer And Post-Industrial Nylon Recycling [Internett]. 2017 [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.hazardouswasteexperts.com/post-consumer-and-post-industrial-nylon-recycling>.
15. BCN3D. Your Extensive Guide to the Properties of 3D Printing FFF Filaments [Internett]. 2021 [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.bcn3d.com/guide-to-filament-properties/>.
16. Angelopoulos PM, Samouhos M, Taxiarchou M. Functional fillers in composite filaments for fused filament fabrication; a review. Materials Today: Proceedings. 2021;37:4031-43.
17. Wikipedia. STL (file format) [Internett]. 2022 [hentet 01.05.2022]. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/STL\\_\(file\\_format\)](https://en.wikipedia.org/wiki/STL_(file_format)).
18. Nicolaisen TE. Forelesningsnotater TEK 2111 Produksjonsmetoder. I: NTNU, red. 2022.
19. Jacobs P. 3-Axis to 12-Axis: CNC Milling Machine Capabilities Compared [Internett]. 2021 [hentet 15.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.fictiv.com/articles/3-axis-to-12-axis-cnc-milling-machine-capabilities-compared>.
20. Rocketmagnet. Climb Milling 01 [Illustrasjon]. 2007 Tilgjengelig fra: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Climb\\_Milling\\_01.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Climb_Milling_01.png)
21. Rocketmagnet. Conventional Milling 01 [Illustrasjon]. 2007 Tilgjengelig fra: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conventional\\_Milling\\_01.png](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Conventional_Milling_01.png)
22. MicroStep. Laser cutting /Technologies [Internett]. [hentet 15.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.microstep.eu/technologies/laser-cutting/>.

23. KDS4444. LaserCutter 2016 Lisens: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>; Tilgjengelig fra: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:LaserCutter.svg>
24. Laser H. How does a Laser Cutter work? [Internett]. [hentet 15.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://hpclaser.co.uk/how-does-a-laser-cutter-work/>.
25. Moreno M, Turner C, Tiwari A, Hutabarat W, Charnley F, Widjaja D, et al. Re-distributed Manufacturing to Achieve a Circular Economy: A Case Study Utilizing IDEF0 Modeling. *Procedia CIRP*. 2017;63:686-91.
26. ProductPlan. Rapid Prototyping [Internett]. [hentet 10.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.productplan.com/glossary/rapid-prototyping/>.
27. Wikipedia. Parametric design [Internett]. 2022 [hentet 12.05.2022]. Tilgjengelig fra: [https://en.wikipedia.org/wiki/Parametric\\_design](https://en.wikipedia.org/wiki/Parametric_design).
28. Ulrich KT, Eppinger SD, Yang MC. *Product design and development*. Seventh utg. New York: McGraw-Hill Education; 2020.
29. Rodgers P, Milton A. *Product design*. London: Laurence King Publ.; 2011.
30. Davies M. Concept mapping, mind mapping and argument mapping: what are the differences and do they matter? *Higher education*. 2011;62(3):279-301.
31. Ogrodnik P. *Medical device design : innovation from concept to market*: Academic Press; 2012.
32. Agrawala M, Phan D, Heiser J, Haymaker J, Klingner J, Hanrahan P, et al. Designing effective step-by-step assembly instructions. *ACM transactions on graphics*. 2003;22(3):828-37.
33. Blanz V, Tarr MJ, Bülthoff HH. What Object Attributes Determine Canonical Views? *Perception*. 1999;28(5):575-99.
34. Ødegård KE. *Organisering av utstyr på europall [Bacheloroppgave]*. NTNU Open: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet; 2021.

35. Rajput K. What Is Plywood | Uses of Plywood | Properties of Plywood | Characteristics of Plywood | Strength of Plywood [Internett]. [hentet 07.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://civiljungle.com/plywood-properties/>.
36. Piping Analysis. Difference between first angle and third angle projection | Piping Analysis [Video]. 2017 [hentet 07.05.2022]. Tilgjengelig fra: [https://www.youtube.com/watch?v=1\\_gzd-yQLuU](https://www.youtube.com/watch?v=1_gzd-yQLuU).
37. Wikipedia. Kryssfiner [Internett]. 2021 [hentet 07.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://no.wikipedia.org/wiki/Kryssfiner>.
38. Byggogbevar. Kryssfinér [Internett]. byggogbevar.no2019 [hentet 20.03.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.byggogbevar.no/enock/groenne-materialvalg/bygningsplater/kryssfiner>.
39. Arbeidstilsynet. Mauelt arbeid [Internett]. [hentet 14.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.arbeidstilsynet.no/tema/ergonomi/manuelt-arbeid/tungt-arbeid>.
40. Reflow. FAQ [Internett]. [hentet 23.04.2022]. Tilgjengelig fra: <https://reflowfilament.com/support/#faqs>.
41. Avfall Norge. Utoplast - resirkulering av PLA [Internett]. [hentet 23.04.2022]. Tilgjengelig fra: <https://avfallnorge.no/om-avfall-norge/avfallsforsk/materialgjenvinning-av-3d-plastavfall>.
42. Fillamentum. Nonoilen [Internett]. [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://fillamentum.com/collections/nonoilen-filament/>.
43. e3printable. 1,75mm NonOilen® 750g [Internett]. [hentet 07.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.e3printable.no/nettbutikk-norge/7-filament/1852-175mm-nonoilenreg-750g>.
44. add:north. CelluPLA [Internett]. [hentet 23.04.2022]. Tilgjengelig fra: <https://addnorth.se/rnd>.
45. add:north. RE-ADD [Internett]. [hentet 23.04.2022]. Tilgjengelig fra: [www.re-add.com](http://www.re-add.com).

46. Koehle M. Creating a Vector Graphics File From Data [Internett]. 2015 [hentet 28.03.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.instructables.com/Creating-a-Vector-File-from-Data/>.
47. Bardiya S, Jerald J, Satheeshkumar V. Effect of process parameters on the impact strength of fused filament fabricated (FFF) polylactic acid (PLA) parts. *Materials Today: Proceedings*. 2021;41:1103-6.
48. Yao T, Deng Z, Zhang K, Li S. A method to predict the ultimate tensile strength of 3D printing polylactic acid (PLA) materials with different printing orientations. *Composites Part B, Engineering*. 2019;163:393-402.
49. Tanveer MQ, Haleem A, Suhaib M. Effect of variable infill density on mechanical behaviour of 3-D printed PLA specimen: an experimental investigation. *SN Applied Sciences*. 2019;1(12).
50. Hudson B. How to design parts for FDM 3D printing [Internett]. [hentet 11.05.2022]. Tilgjengelig fra: <https://www.hubs.com/knowledge-base/how-design-parts-fdm-3d-printing/>.



# Vedlegg

1. Monteringsanvisning
2. SolidWorks-modeller med regneark
3. STL og #MF filer til 3D-printing

