



Norges miljø- og  
biovitenskapelige  
universitet

**Masteroppgave 2020 30 stp**  
Fakultet for realfag og teknologi

## **Utvikling av tørkebord for tørking av kakaobønner**

Development of drying table for drying cocoa beans

**Bjørn-Espen Hansen**  
Maskin-, prosess- og produktutvikling

# Utvikling av tørkebord for tørking av kakaobønner

av

**Bjørn-Espen Hansen**



Mastergradsoppgave – Maskin-, prosess- og produktutvikling

Fakultet for realfag og teknologi, NMBU

Våren 2020

## Forord

Dette prosjektet er en mastergradsoppgave skrevet ved Norges miljø- og biovitenskapelige universitet ved fakultet for realfag og teknologi. Gradsoppgaven er gjennomført som avsluttende del av det 5-årige masterstudiet maskin-, prosess- og produktutvikling. Oppgaven er gjennomført våren 2020 med et omfang på 30 studiepoeng.

Gjennom et samarbeid med SunErgy har prosjektet tatt for seg utviklingen av et tørkebord benyttet til tørking av kakaobønner og andre landbruksprodukter. Forutsetningene til tørkebordet var at det kunne bli bygget og benyttet i utviklingsland med kompetansen og ressursene tilgjengelig. Et mål med prosjektet var en forbedring i tørkemetode sammenlignet med dagens metode, for effektivisering av tørkeprosessen og økt utbytte for produsentene.

Prosjektet var både spennende og lærerikt, siden ulike fagområder ble involvert i utviklingsprosessen. Utviklingsprosessen kombinert med gjennomføringen av strømningsanalyser har gitt et stort læringsutbytte. Det har vært motiverende å skape et produkt, som kan bidra til en forbedret tørkemetode for kakaobønner, i samarbeid med et eksternt firma og jeg har tilegnet meg gode erfaringer gjennom arbeidet.

Jeg vil takke hovedveileder, førsteamanuensis Odd Ivar Lekang for god veiledning. Videre ønsker jeg å takke biveileder, universitetslektor Ola Sørby Omberg for all veiledning og hjelp gjennom prosjektet, samt å ha introdusert meg for SunErgy og oppgaven. Jeg vil også takke SunErgy for muligheten og Stein Skjørshammer, Jevgeni Gorjanski og Mike Fohba for et godt samarbeid.

Ås, 15.05.2020

---

Bjørn-Espen Hansen



## Sammendrag

I Kamerun er det 600 000 kakaoprodusenter og 5 000 000 mennesker som lever direkte eller indirekte av økonomien fra kakaoindustrien. Tørking er en viktig prosess i kakaoproduksjonen. Dagens tørkemetode, en kombinasjon av tørking i sollys og vedfyring, gir kakaobønner med variabel kvalitet som har resultert i en 20% reduksjon av produsentenes potensielle inntekter.

Et samarbeid mellom Norges miljø- og biovitenskapelige universitet og SunErgy har som mål å utvikle en tørker til bruk på kakaobønner og andre landbruksprodukter. Samarbeidet har resultert i en bygget prototype og mastergradsarbeidet er basert på videreutvikling av prototypen. Hovedmålet er å utvikle en tørker, som bidrar til en forbedret tørkemetode, samtidig som tørkeren er bygget ved bruk av lokal kompetanse og ressurser i Kamerun.

En utredning av tilgjengelig kompetanse og ressurser definerte viktige forutsetninger for utviklingen av en tørker, og gjennom en utviklingsprosess ble løsningen et tørkebord med varmluft fra varmluftsvifter som tørkemetode. For tørkebordet er standardkomponenter benyttet, som har resultert i at bygging av tørkebordet på verkstedet i Kamerun er oppnåelig.

Tørkebordet er bestående av en rammekonstruksjon, en perforert plate for plassering av kakaobønnene som skal tørkes og en karm for å hindre at kakaobønnene faller av tørkebordet. Den perforerte platen er produsert i aluminiumslegeringen 5052-H34 og resterende komponenter i aluminiumslegeringen 6082-T6. FEM-analyser er utført for kontrollering av konstruksjonen mot flyt og knekking. Rammekonstruksjonen og perforert plate har en sikkerhet mot flyt på henholdsvis 4,7 og 3,3. For at knekking skulle inntreffe var nødvendig faktor multiplisert med lasten 118,14.

Tørkebordet med varmluftsvifter skal benyttes i et tørkehus for tørking av kakaobønnene. Varmlufttørking, med en optimal temperatur på 60 °C, har et potensiale i reduksjon av tørketiden fra 4-5 døgn ved dagens metode til 10-15 timer. En strømningsanalyse er dermed gjennomført for å undersøke om optimal tørketemperatur var oppnåelig i tørkehuset. Resultatet fra strømningsanalysen var en temperaturvariasjon fra 47,7 °C til 89,1 °C på flaten kakaobønnene er plassert på, med en gjennomsnittstemperatur på 66,5 °C på flaten.

For videre arbeid er fokuset på optimalisering av konstruksjonen til tørkebordet. Det er også nødvendig å optimalisere tørkeprosessen gjennom flere strømningsanalyser for reduksjon av temperaturvariasjonen. I tillegg er det viktig å ta hensyn til påvirkningen av varmeoverføringen fra luften til kakaobønnene og endret luftfuktighet. Videre bør tørkebordet bli bygget, slik at fysiske tester kan bli utført for verifikasjon av tørketid og tørkeprosessen.



## Abstract

In Cameroon, there are 600 000 cocoa producers and 5 000 000 people living directly or indirectly from the cocoa industry. Drying is an important process in cocoa production. Today's drying method, a combination of drying in sunlight and wood burning, provides variable quality cocoa beans, which has resulted in a 20% reduction in the producers' potential income.

A collaboration between Norwegian University of Life Sciences and SunErgy aims to develop a dryer for use on cocoa beans and other agricultural products. The collaboration has resulted in a built prototype and the master's thesis is based on further development of the prototype. The main objective is to develop a dryer, which contributes to an improved drying method, simultaneously as the dryer is built using local expertise and resources in Cameroon.

An assessment of available expertise and resources defined important prerequisites for the development of a dryer, and during a development process the solution became a drying table with hot air from fan heaters as drying method. Standard components have been used for the drying table, which has made it possible to build the drying table at the workshop in Cameroon.

The drying table is comprised of a frame structure, a perforated plate for the placement of cocoa beans to be dried and a frame to prevent the cocoa beans from falling off the drying table. The perforated plate is manufactured in the aluminum alloy 5052-H34 and the remaining components in the aluminum alloy 6082-T6. FEM-analysis were performed to control of the structure against yield and buckling. The frame structure and perforated plate have a safety against yield of 4,7 and 3,3 respectively. For buckling to occur, the required factor multiplied by the load was 118,14.

The drying table with fan heaters is going to be used in a drying house for drying the cocoa beans. Hot air drying, with an optimum temperature of 60 °C, has the potential to reduce the drying time from 4-5 days by the current method, to 10-15 hours. A flow analysis was carried out to check whether the optimal drying temperature was achievable in the drying house. The result of the flow analysis was a temperature variation from 47,7 °C to 89,1 °C on the surface the cocoa beans are placed, with an average temperature of 66,5 °C on the surface.

For further work, the focus is on optimizing the design of the drying table. It is also necessary to optimize the drying process through several flow analyzes to reduce the temperature variation. In addition, it is important to consider the influence of the heat transfer from the hot air to the cocoa beans and the changed humidity. Furthermore, the drying table should be built so that physical tests can be performed to verify the drying time and the drying process.





## Innholdsfortegnelse

Forord.....	i
Sammendrag.....	iii
Abstract.....	v
<b>1. Innledning .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Oppdragsgiver .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Bakgrunn.....</b>	<b>1</b>
<b>1.3. Tidligere arbeid .....</b>	<b>2</b>
<b>1.4. Oppdragsbeskrivelse .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5. Tilgjengelig kompetanse og ressurser.....</b>	<b>4</b>
<b>1.6. Solkraftverket i Matouke.....</b>	<b>6</b>
<b>1.7. Problemstilling.....</b>	<b>6</b>
<b>1.8. Prosjekt målsettinger .....</b>	<b>6</b>
<b>1.8.1. Hovedmål .....</b>	<b>7</b>
<b>1.8.2. Delmål.....</b>	<b>7</b>
<b>1.9. Begrensninger .....</b>	<b>7</b>
<b>2. Metodebeskrivelse .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1. Terminologi og begreper.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.1. Koordinatsystem.....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2. Begreper og definisjoner .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.3. Symboler og enheter .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.4. Formler.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Metodebruk og løsningsverktøy .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.1. Utviklingsmetodikk .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2.2. Løsningsverktøy.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.3. CFD- analyse.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2.4. FEM-analyse .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Litteraturstudie .....</b>	<b>15</b>
<b>2.4. Kvalitetssikring.....</b>	<b>15</b>
<b>3. Teoriutredning.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1. Varmeoverføring .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1. Konduksjon.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.2. Konveksjon.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.3. Stråling .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2. Solenergi.....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.1. Solfanger.....</b>	<b>17</b>

3.2.2.	Solceller .....	18
3.2.3.	Termisk energi .....	18
3.3.	Tørking .....	19
3.3.1.	Fuktighet .....	19
3.3.2.	Tørkehastighet .....	20
3.4.	Kakao .....	21
3.4.1.	Kakaotreet .....	22
3.4.2.	Bearbeiding av frukten .....	23
3.4.3.	Fermentering av kakaobønnene .....	23
3.4.4.	Tørking av kakaobønnene .....	24
4.	Teknologiutredning .....	25
4.1.	Åpen soltørking .....	26
4.2.	Direkte soltørking .....	27
4.3.	Indirekte soltørker .....	28
4.4.	Hybrid tørker .....	28
4.5.	Vedfyring .....	29
4.6.	Varmluftsvifte .....	30
4.7.	Varmepumpe .....	30
5.	Produktspesifisering .....	32
5.1.	Produktmålsetting .....	32
5.2.	Rangering av viktige produktegenskaper .....	32
5.3.	Grovspekifikasjoner for produkttypen .....	33
6.	Konseptutvikling .....	34
6.1.	Seleksjon av tørkemetode .....	34
6.2.	Første konsept – videreutvikling av prototype .....	35
6.2.1.	Funksjonsanalyse for produktet .....	35
6.2.2.	Funksjonsalternativer med skisser .....	35
6.2.3.	Tilbakemeldinger .....	39
6.3.	Andre konsept - tørkehylle .....	39
6.3.1.	Spesifikasjoner .....	39
6.3.2.	Alternativ generert .....	39
6.3.3.	Tilbakemeldinger .....	39
6.4.	Tredje konsept - tørkebord .....	40
6.4.1.	Spesifikasjoner .....	40
6.4.2.	Alternativ generert .....	40
6.4.3.	Tilbakemeldinger .....	41

6.5.	Endelig konsept.....	41
7.	Materialvalg og dimensjonering .....	42
7.1.	Materialvalg.....	42
7.1.1.	Definering av egenskaper.....	42
7.1.2.	Grovseleksjon av materiale .....	42
7.1.3.	Spesifikk vurdering av legering .....	45
7.2.	Utforming tverrsnitt.....	46
7.2.1.	Ulike utforminger .....	46
7.2.2.	Valgt utforming .....	47
7.3.	Grunnlagsberegninger .....	47
7.3.1.	Opplagerkrefter.....	47
7.3.2.	Dimensjonering av rammeelementene.....	49
7.3.3.	Knekking.....	51
7.3.4.	Nedbøyning og spenninger i perforert plate .....	55
8.	Konseptdesign og produktarkitektur .....	57
8.1.	Sammenstilling.....	57
8.2.	Design av hovedelementer .....	58
9.	Robusthet og strømningsanalyse.....	60
9.1.	Strukturanalyse med FEM .....	60
9.1.1.	Rammekonstruksjon .....	60
9.1.2.	Perforert plate.....	63
9.1.3.	Tørkebord .....	65
9.2.	Strømningsanalyse med CFD .....	67
9.2.1.	Oppsett .....	68
9.2.2.	Resultater .....	70
10.	Fremstilling av tørkebordet.....	74
10.1.	Produksjonsmetoder .....	74
11.	Markedspresentasjon.....	76
11.1.	Renderte framstillinger.....	76
11.2.	Tekniske beskrivelser .....	77
12.	Diskusjon.....	80
12.1.	Konseptutvikling og forbedringspotensialer.....	80
12.2.	Designrevisjon.....	82
12.3.	Strømningsanalyse.....	82
13.	Konklusjon.....	84
13.1.	Resultater og anbefalinger.....	84

13.2.	Videre arbeid .....	85
14.	Referanser .....	86
15.	Vedlegg .....	91

## 1. Innledning

I dette kapitlet er det redegjort for bakgrunnen til prosjektet. Videre er det utredet om forutsetningen til prosjektet gjennom tidligere arbeid, oppdragsbeskrivelse og ressursene i Kamerun. Avslutningsvis er problemstillinger, hovedmål, delmål og begrensninger for oppgaven presentert.

### 1.1. Oppdragsgiver

SunErgy AS er et norsk selskap dedikert til å gi lokalsamfunn i voksende markeder solenergi uten nettilkobling, gjennom solkraftverk sendt fra Norden, koblet direkte til husene på eget strømmnett (SunErgy, 2019). Kraftverkene er eid og driftet av datterselskapet SunErgy Cameroon Ltd. (SunErgy, 2019).

Visjonen til SunErgy AS er å gi mennesker muligheten til å unnsnippe fattigdom og oppleve en lysere framtid (SunErgy, 2019). Dette har gitt tilgang til omverdenen i form av TV, internett, mobiltelefoner og en rekke nye forretningsmuligheter (SunErgy, 2019).

### 1.2. Bakgrunn

Kamerun er verdens femte største produsent av kakaobønner, med en produksjon i 2014 på 270 000 tonn (SNL, 2018). Det er tilnærmet 600 000 kakaoprodusenter og totalt en befolkning på 5 000 000 som mennesker lever direkte eller indirekte på økonomien fra kakaoindustrien (Omberg, 2020).

En viktig prosess innen bearbeiding av kakaobønnene er tørking. Tørking er brukt for konservering av matvarer, fôrstoffer og industrivarer og sørger for lengre holdbarhet (Ore & Nesse, 2017). Det er ulike metoder kakaobønner er tørket på, der den vanligste metoden i Kamerun er en kombinasjon av tørking i direkte sollys og vedfyring, en prosess som har tatt tilnærmet 4-5 døgn (Nicolas et al., 2019).

Det er flere ulemper knyttet til dagens tørkemetode foruten lang tørketid. Ved bruk av vedfyring er kakaobønnene utsatt for røyk, medført i uønsket smak (Gutiérrez, 2017). I tillegg er kakaobønnene tørket på temperaturer opp mot 80 °C (Nicolas et al., 2019). Kombinasjonen av røyk og tørking på høye temperaturer gir variabel kvalitet på kakaobønnene, som har resultert i en 20% reduksjon av produsentenes potensielle inntekter (Omberg, 2020).

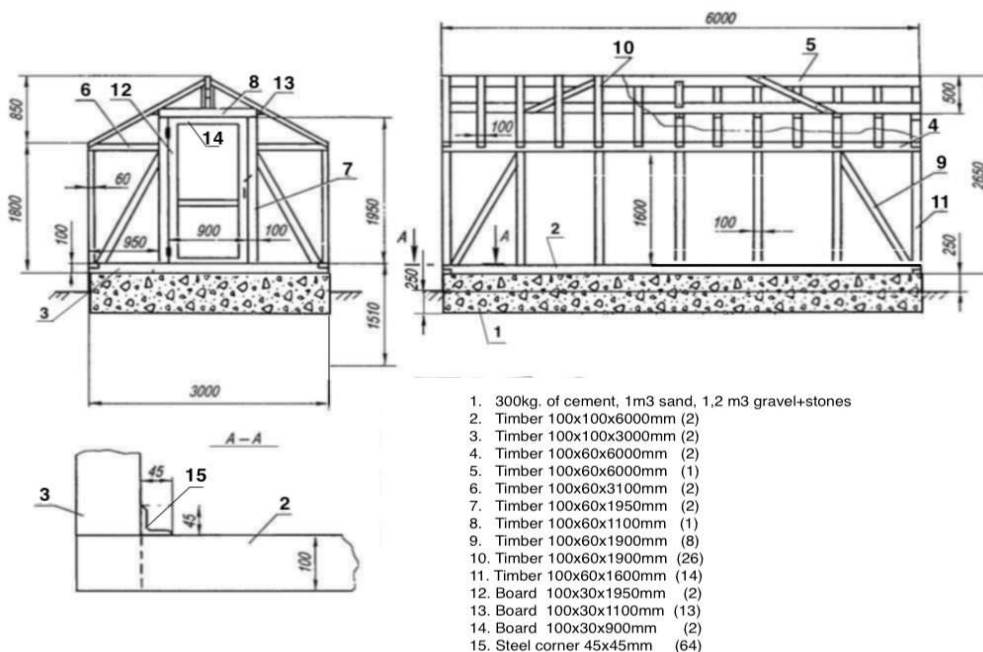
Gjennom et samarbeid mellom Norges miljø- og biovitenskapelige universitet (NMBU) og SunErgy (heretter omtalt prosjekteier), var målsettingen å utvikle en lav-kost tørkeenhet for

tørking av kakaobønner, i lengre perioder hvor sollys uteble. Gjennom ytterligere verdiskapning av strømproduksjonen fra solenergi kan tørkere driftet av overskuddsstrøm bli brukt i kakaoproduksjonen. Tørkeren skal gi bøndene økt kontroll over tørkeprosessen og et bedre sluttprodukt. I tillegg bidrar tørkeren til en reduksjon av karbonavtrykket til kakaoproduksjonen i form av redusert avskoging og forurensning fra brenning av biomasse (Richter et al., 2013).

Ved bygging av tørkere i Kamerun er behovet for transport av komponenter fra Norden redusert. Redusert transport av komponenter har også påvirket karbonavtrykket positivt og gir økt sysselsetting ved det lokale verkstedet.

### 1.3. Tidligere arbeid

Det er tidligere laget et designgrunnlag for tørking av kakaobønner. Tørkeren er tiltenkt benyttet i et dedikert tørkehus (Figur 1.1). Hensikten var økt kontroll over prosessen for sluttbrukeren, samtidig sørger bygget for en romtemperatur høyere enn om tørkingen foregikk utendørs (Omberg, 2020).



Figur 1.1: Tørkehuset (mål i mm) tørkeren er tiltenkt plassert i.

For utvikling av konseptet var en rekke designkrav og prioriteringer definert sammen med prosjekteier. Konseptforslaget var bestående av en stiv ramme og et hyllesystem av perforerte plater for gunstig luftsirkulasjon (Figur 1.2). Gjennom hyllesystemet er utnyttelsesgraden av volumet til tørkeren høyest, fordelt på to kammer (Omberg, 2020).



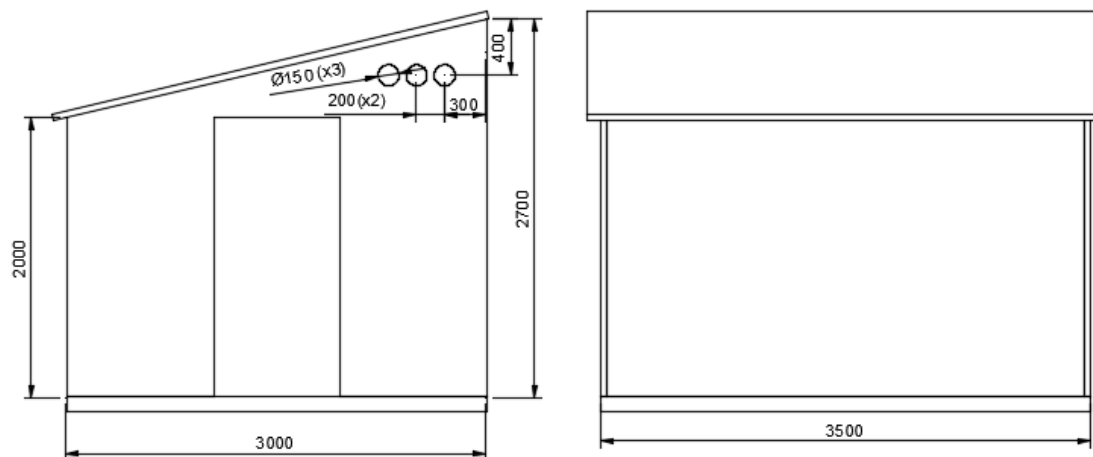
Figur 1.2: Render av tørkekonsept for prototype.

Ut fra konseptet generert har en prototype blitt bygget og ytelsestester utført. Tørkeren var driftet av en 3 300 W varmluftsvifte, hvor måleprober og en datalogg var brukt for å undersøke tørketid og temperaturforskjellene i kammeret (Omberg, 2020). Tørketiden var bestemt til 9-14 timer, med en kapasitet på 100 kg. I tillegg var målt gjennomsnittlig temperaturforskjell nærmest viften og utløpet tilnærmet 7 °C, hvor høyeste gjennomsnittstemperatur var 62,44 °C (Omberg, 2020).

## 1.4. Oppdragsbeskrivelse

Oppdraget er basert på videreutvikling av prototypen. Bygging av tørkere skal foregå i Kamerun og tørkere skal være driftet av overskuddsstrøm fra solkraftverk. Målet med var en forbedring av prototypen til en mer robust versjon, med en tørketid for 300 kg kakaobønner på 10-15 timer.

Tørkeren skal blir plassert i et tørkehus av en annen utførelse, enn tidligere definert (Figur 1.3). I tørkehuset skal det være en passasje i midten, med en tørker plassert på hver side av døren. Dette har utnyttet tørkehuset maksimalt med tanke på tilgjengelig plass og muligheten for å utføre operasjoner i tørkehuset.



Figur 1.3 Tørkehuset (mål i mm). Avstanden mellom ventileringshullene er lik, ventilering på begge kortveggene.

## 1.5. Tilgjengelig kompetanse og ressurser

Tilgjengelig kompetanse og ressurser var utslagsgivende for bygging av tørkebordet i Kamerun. Undertegnede fikk tilsendt en utstyrliste fra verkstedet (vedlegg 1), informasjon om arbeidernes kompetanse og bilder av verkstedet. Bildene er gjengitt med tillatelse fra prosjekteier. Utfra utstyrlisten er det sammenfattet hvilke operasjoner mulig å utføre på hvilke materialer (Tabell 1.1).

Tabell 1.1: Kartlegging av arbeidsoperasjoner utfra tilgjengelig utstyr.

Operasjoner	Tilgjengelig utstyr	Materiale
Kapping.	Båndsager, stikksag og baufil.	Tre, metaller.
Boring.	Søylebormaskin og drill.	Tre, metaller.
Knekking.	Plateknekker.	Metaller.
Bøying.	Rørbøyer.	Metaller.
Pressing.	Presse.	Metaller.
Sveising.	Sveiseapparat med tilhørende utstyr.	Metaller.
Skrudde forbindelser.	Skrutrekker og fastnøkkelsett.	Tre, metaller.
Overflatebehandling.	Sprøytepipistol, vinkelsliper og filer.	Tre, metaller.
Måling.	Skyvelære, stållinjal, målebånd og vaterpass.	Alle typer.

Fra tabell 1.1 er det tydelig at verkstedet har gode ressurser gjennom et bredt utvalg av ulike verktøy og maskiner. På verkstedet er også sikkerhet i fokus, ved at arbeiderne har tilstrekkelig med verneutstyr (Figur 1.4).



Figur 1.4: To arbeidere på verkstedet, iført verneutstyr.



Gjennom operasjoner som kapping, bøyning, knekking, sveising og overflatebehandling har de blant annet produsert integrerte møbler, hvor treverk og metall er kombinert (Figur 1.5). Dette produktet i form av en krakk er et godt eksempel på hva som er oppnåelig på verkstedet, med involvering av ulike verktøy og operasjoner. En sveiseoperasjon utført på krakken illustrerte også arbeidsforholdene (Figur 1.6).



Figur 1.5: Integrert møbel, en krakk, produsert på verkstedet.



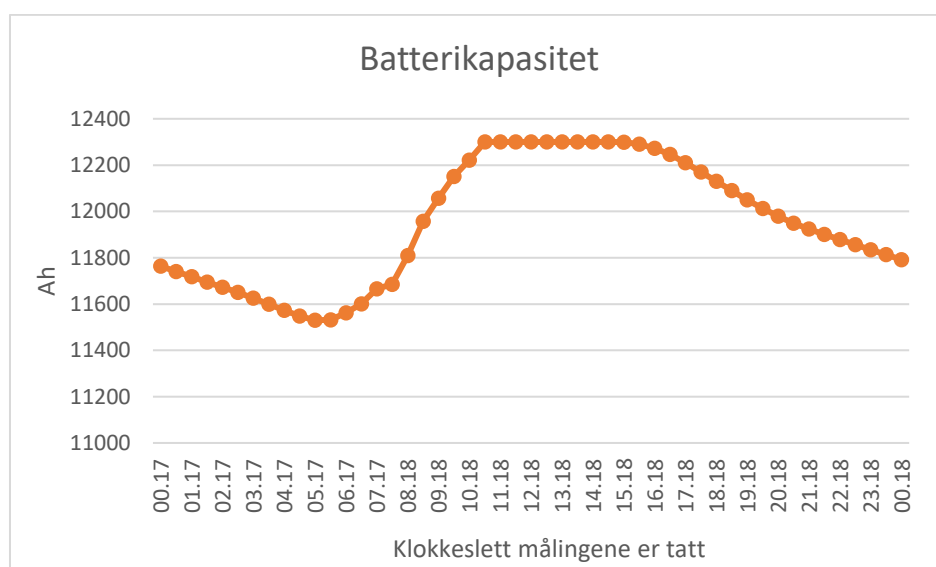
Figur 1.6: Sveising av setet til krakk

Arbeiderne på verkstedet er sveisere med over 10 års erfaring, hvor 2 har minimum en utdanning fra videregående skole (Fohba, 2020a). Hovedpersonen på verkstedet, Mike Fohba, har en bred bakgrunn i form av ulike utdannelse fra universiteter i USA (Nordic - African Business Summit, 2020). Utfra kompetansen til arbeiderne og tilgjengelig verktøy kunne de bearbeide materialer som blant annet aluminium, rustfritt stål, titan og støpestål (Fohba, 2020a). Materialene er tilgjengelig og solgt i Douala, og verkstedet er ikke begrenset for hva de kan produsere gjennom det brede utvalget av verktøy (Fohba, 2020a).

## 1.6. Solkraftverket i Matouke

Solkraftverkene prosjekteier har bygget er solcellepaneler tilkoblet batterier. Slike anlegg skal drifte tørkerne med overskuddsstrøm fra produksjonen. Produksjonen av strøm vurdert opp mot forbruket var nødvendig for verifisering av om overskuddsstrøm var tilgjengelig.

Det er tatt utgangspunkt i landsbyen Matouke, hvor prosjekteier har et solkraftverk i drift. En datalogg over strømproduksjonen ble tilsendt undertegnede, og et utdrag fra dataloggen er vedlagt (vedlegg 2). Batterikapasitet målt i amperetimer (Ah) til anlegget gjennom 2. februar 2020 er plottet for vurdering av produksjon versus forbruk (Figur 1.7).



Figur 1.7: Batterikapasitet i Matouke over 24 timer, med målinger hver halv time. Målingen 00.18 er tatt 3. februar

Ut fra målt batterikapasitet var høyeste verdi 12 300 Ah, mens laveste verdi gjennom døgnet var tilnærmet 11 500 Ah. Dette tilsier et overskudd av strøm fra produksjonen for nåværende daglig forbruk, og drift av tørkere er oppnåelig.

## 1.7. Problemstilling

Problemstillingene formulert for prosjektet er:

- 1) Hvordan forbedre tørkemetoden, sammenlignet med dagens tørkemetode, for tørking av kakaobønner?
- 2) Hvordan utvikle en robust tørker som kan bli bygget i Kamerun?

## 1.8. Prosjektmålsettinger

Ut fra problemstillingene er det definert hovedmål og delmål for enklere kartlegging av hva som skal bli gjennomført i prosjektet.

### 1.8.1. Hovedmål

Hovedmålet for prosjektet er:

Utvikle en tørker med kapasitet på 300 kg kakaobønner bygget i Kamerun ved bruk av lokale ressurser og materialer. Tørkeren skal videre bidra til en forbedret tørkeprosess, for økt utbytte av kakaoproduksjonen.

### 1.8.2. Delmål

For å nå hovedmålet er det definert følgende delmål:

- Utført litteraturstudie på kakaoproduksjon, varmeoverføring, solenergi og tørking.
- Utrede om ulike tørkemetoder benyttet på kakaobønner.
- Generering av konsept etter forutsetninger fra tilgjengelig kompetanse og ressurser, i tillegg til informasjon gitt av prosjekteier.
- Utført nødvendige grunnlagsberegninger og designet tørkeren.
- Utført FEM-analyser for verifikasjon av håndberegninger og en strukturanalyse.
- Utført en strømningsanalyse for kartlegging av temperaturfordelingen i tørkehuset.

## 1.9. Begrensninger

Mastergradsprosjektet har en estimert tidsramme på 900 timer. På grunn av begrenset tid er det satt noen begrensninger i oppgaven for et helhetlig resultat av problemstillingene. Følgende begrensninger er dermed satt:

- Solcelleanlegg nødvendig for drift av tørker er ikke dimensjonert.
- Kvaliteten til kakaobønnene er definert som mengde vann fjernet.
- Forenklete styrkeberegninger er kun utført på utvalgte komponenter.
- Sveisene til sammenføyning av tørkeren er ikke dimensjonert.
- Beregninger for tørkeprosessen ved tørking av kakaobønner er ikke utført.
- Kostnadsanalyse av tørkeren er ikke utført.
- Livsløpsanalyse av tørkeren er ikke utført.
- Strømningsanalysen tar ikke for seg optimalisering av luftstrømningen i tørkehuset. Hensikten er kun en enkel analyse for kartlegging av temperaturfordelingen og strømningsbildet i tørkehuset.

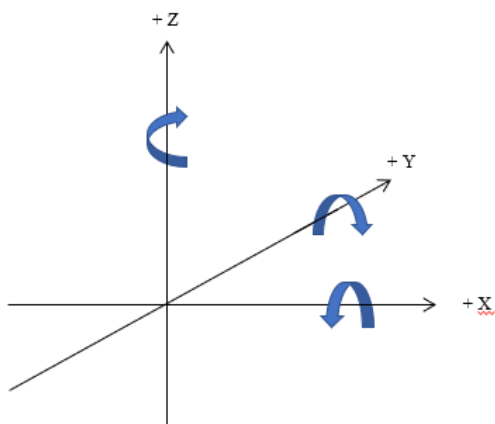
## 2. Metodebeskrivelse

I dette kapitlet er det gjennomgått terminologi og metoder benyttet i oppgaven. Videre er sentrale løsningsverktøy benyttet i utarbeidelse av tørkeren presentert. Hvordan rapporten er kvalitetssikret er presentert avslutningsvis.

### 2.1. Terminologi og begreper

Hensikten med delkapitlet er muligheten til å slå opp forklaringen av et symbol, begrep, definisjon eller formel om det er noe tvil hos leseren.

#### 2.1.1. Koordinatsystem



Figur 2.1: Koordinatsystem med definerte positive retninger og rotasjoner

#### 2.1.2. Begreper og definisjoner

Begreper og forkortelser benyttet i oppgaven er listet opp med forklaringer (Tabell 2.1).

Tabell 2.1: Begreper med forklaring

Begrep	Forklaring
IPD	Integrert produktutvikling.
CAD	Computer Aided Design.
CFD	Computational Fluid Dynamics.
FEM	Finite Element Method.
Fermentering	Reaksjon hvor sukker er omdannet til alkohol, syrer og karbondioksid ved hjelp av mikroorganismer.
Biomasse	Brensel stammet fra trær og planter, gjødsel, skogsavfall og brenntorv.
Masseoverføring	Kjemisk enhetsoperasjon der en eller flere komponenter blir overført fra en fase til en annen.

Tabell 2.1 forts.: Begreper med forklaring

Begrep	Forklaring
Diffusjon	Bevegelse av molekyler eller ioner fra et sted med høy konsentrasjon til annet sted med lav konsentrasjon.
Diffusjonsrate	Hastigheten til molekyllbevegelsen ved diffusjon.
Absolutt nullpunkt	Temperaturen er 0 K (Kelvin) = - 273,15 °C.
Fotoemisjon	Elektroner er sendt ut fra et stoff når det blir belyst.
Parabolspeil	Parabolantenne som har samlet sollyset til en konsentrert stråle.
Soltårn	Speil har fokusert solstråler opp til en kollektor i toppen av et tårn.
Polyfenoler	Kjemisk substans i planter.
Relativ fuktighet	Mål på mengden vanndamp i luften. Prosentvist forhold mellom luftens absolutte fuktighet og den fuktigheten som må til for å oppnå metning ved gitt temperatur.
Absolutt fuktighet	Mengden vanndamp det er i luften. Oppgitt i gram vanndamp per kubikkmeter luft.
Drivhuseffekten	Kortbølget stråling fra solen er sluppet inn i et rom, mens langbølget stråling reflektert fra legemer har ikke sluppet ut av et rom. Dette har medført i økt temperatur i rommet.
Laminær	Bevegelse i væsker eller gasser som er slik at de enkelte partiklene følger parallelle linjer uten virvler.
Turbulent	Uregelmessige og tilsynelatende tilfeldige variasjoner i væsker og gassers bevegelse.
Tørkegrad	Produktet som skal bli tørket.

### 2.1.3. Symboler og enheter

I delkapitlet er de ulike symbolene benyttet i oppgaven beskrevet (Tabell 2.2).

Tabell 2.2: Symboler med enheter

Symbol	Beskrivelse	Enhet
l	Lengde	mm
b	Bredde	mm
q	Jevnt fordelt last	N/mm

Tabell 2.2 forts.: Symboler med enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
$p$	Jevnt fordelt trykk	$\text{N}/\text{mm}^2$
$M_A$	Moment i punkt A	$\text{Nmm}$
$l_1$	Lengde spenn 1	$\text{mm}$
$M_B$	Moment i punkt B	$\text{Nmm}$
$l_2$	Lengde spenn 2	$\text{mm}$
$M_C$	Moment i punkt C	$\text{Nmm}$
$\sigma$	Spenning	$\text{MPa}$
$n_f$	Sikkerhetsfaktor mot flyt	-
$A$	Areal	$\text{mm}^2$
$\sigma_{\text{till}}$	Tillatt spenning	$\text{MPa}$
$W$	Motstandsmoment	$\text{mm}^3$
$I$	Annet arealmoment	$\text{mm}^4$
$F$	Kraft	$\text{N}$
$F_k$	Knekklast	$\text{N}$
$F_{k,\text{till}}$	Tillatt knekkraft	$\text{N}$
$M_b$	Bøyemoment	$\text{Nmm}$
$M_{b,\text{maks}}$	Maks opptredende bøyemoment	$\text{Nmm}$
$Q$	Totalt jevnt fordelt belastning	$\text{N}$
$i$	Treghetsradie	$\text{mm}$
$\lambda$	Slankhetsforhold	-
$\sigma_f$	Flytegrense	$\text{MPa}$
$l_k$	Knekk lengde	$\text{mm}$
$n_k$	Sikkerhetsfaktor mot knekking	-
$\sigma_b$	Bøyepening	$\text{MPa}$
$t$	Tykkelse	$\text{mm}$
$f$	Nedbøyning	$\text{mm}$
$E$	E-modul	$\text{MPa}$
$E'$	Korrigert E-modul	$\text{MPa}$
$\mu$	Poissons tall	-

### 2.1.4. Formler

De ulike formlene benyttet i oppgaven er beskrevet og indeksert (Tabell 2.3).

Tabell 2.3: Formler

Beskrivelse	Formel	Indeks
Formel for jevnt fordelt last	$q = \frac{m \cdot g}{l}$	7.1
Tremomentmetoden	$M_A \cdot l_1 + 2 \cdot M_B \cdot (l_1 + l_2) + M_C \cdot l_2$ $= - \sum \frac{6 \cdot A_1 \cdot \bar{a}_1}{l_1} - \sum \frac{6 \cdot A_2 \cdot \bar{b}_2}{l_2}$	7.2
Summen av moment i punkt B, venstre spenn	$\sum M_{BV} = 0:$	7.3
Summen av krefter i Z-retning	$\sum F_z = 0:$	7.4
Beregning av spenning utfra kraft	$\sigma = \frac{F}{A}$	7.5
Beregning av spenning utfra moment	$\sigma_b = \frac{M_b}{W}$	7.6
Tillatt spenning med sikkerhet mot flyt	$\sigma_{till} = \frac{\sigma_f}{n_f}$	7.7
Areal firkantrør	$A = B \cdot H - b \cdot h$	7.8
Motstandsmoment firkantrør	$W = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6 \cdot H}$	7.9
Annet arealmoment firkantrør	$I = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12}$	7.10
Forenklet interaksjonsformel	$\frac{F}{F_{k,till}} + \frac{1,6 \cdot M_b}{M_{b,maks}} \leq 1$	7.11
Kraft på hver søyle i portalramme	$F = \frac{q \cdot l}{2}$	7.12
Treghetsradie	$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$	7.13
Slankhetsforhold	$\lambda = \frac{l_k}{i}$	7.14

Tabell 2.3 forts.: Formler

Beskrivelse	Formel	Indeks
Knekk lengde	$l_k = \kappa \cdot l$	7.15
Inngangsverdi for diagram knekk lengde til rammer	$\rho = \eta \cdot \frac{b \cdot I_S}{l \cdot I_R}$	7.16
Gyldighetsområde til Euler	$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_p}}$	7.17
Proporsjonalitetsgrensen	$\sigma_p \approx 0,8 \cdot \sigma_f$	7.18
Knekklast etter Euler	$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2}$	7.19
Tillatt knekklast	$F_{k, \text{till}} = \frac{F_k}{n_k}$	7.20
Moment i punkt A for en portalramme	$M_A = \frac{Q \cdot l}{12 \cdot (k + 2)}$	7.21
Moment i punkt B for en portalramme	$M_B = \frac{Q \cdot l}{6 \cdot (k + 2)}$	7.22
Faktor for beregning av moment i portalramme	$k = \frac{I_l}{I_h} \cdot \frac{h}{l}$	7.23
Bøyemoment i plate, etter platestripemetoden	$M_b = \frac{q \cdot b^2}{8}$	7.24
Motstandsmoment i plate, etter platestripemetoden	$W_b = \frac{1 \cdot t^2}{6}$	7.25
Bøyespennning i plate med sikkerhet mot flyt etter platestripemetoden	$\sigma_b = \frac{\sigma_f}{n_f} = \frac{q \cdot b^2}{24} \cdot \frac{6}{1 \cdot t^2} = \frac{p \cdot b^2}{4 \cdot t^2}$	7.26
Minste platetykkelse utfra sikkerhet mot flyt	$t_{\min} \geq \sqrt{\frac{3 \cdot p \cdot b^2 \cdot n_f}{4 \cdot \sigma_f}}$	7.27
Nedbøyning i plate fast opplagret	$f = \frac{p \cdot b^4}{384 \cdot E' \cdot I}$	7.28
Korrigert E-modul	$E' = \frac{E}{1 - \mu^2}$	7.29
Nedbøyning i fast opplagt plate med korrigert E-modul	$f = \frac{p \cdot b^4 \cdot 12 \cdot (1 - \mu^2)}{384 \cdot E \cdot 1 \cdot t^3}$	7.30



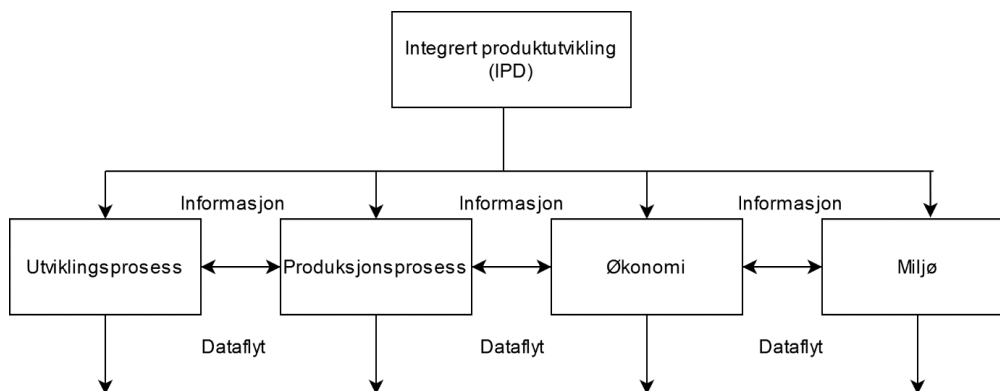
## 2.2. Metodebruk og løsningsverktøy

Ulike produktutviklingsmetoder er benyttet for å enklere systematisere, begrense og konsentrere arbeidet rundt hvert enkelt tema av gangen. De sentrale løsningsverktøyene for prosjektet er videre presentert.

### 2.2.1. Utviklingsmetodikk

#### Integrert produktutvikling

Integrert produktutvikling (IPD) beskriver når operasjoner er utført i riktig rekkefølge i et koordinert utviklingsløp, og ikke utelukket viktige elementer underveis (Magrab et al., 2009). Metoden er karakterisert som en huskeliste over viktige elementer ved organiseringen av produktutviklings- og produktrealiseringsprosjekter. Fokuset i IPD er ikke kun på utviklingen av et lønnsomt produkt, men også ivareta flere hensyn, gjennom inkludering av et større spekter av fagområder (Magrab et al., 2009). IPD er basert på fire elementer: utvikling, produksjon, økonomi og miljø. Data- og kommunikasjonsflyt mellom elementene er viktig (Figur 2.2).



Figur 2.2: Illustrasjon av IPD. Tegnet i draw.io

#### Pugh's metode

Pugh's metode danner grunnlaget for en mer effektiv og praktisk metodikk for utvikling og testing av nye ideer. Metoden er basert på generering av grove konseptløsninger med informasjonsinnhenting og systematisering av nøkkelegenskaper fra lignende løsninger, for så å utforme godt spesifiserte kriterier. Kriteriene er videre vektet etter hvor godt de oppfyller definerte egenskaper. Ved bruk av Pugh's metodikk har valgt konsept og delløsninger gitt best resultat ut fra markedsmessige og tekniske forutsetninger (Pugh, 1991).

I prosjektet er seleksjonsmatriser benyttet for vekting av løsningene gjennom tallverdiene 1 til 5, for henholdsvis lavest og høyest viktighet. Vektingen av løsningene resulterer i at alternativet med høyest poengsum er det mest hensiktsmessige alternativet å videreføre.

## SCAMPER

SCAMPER er et akronym og står for S- Substitute, C – Combine, A – Adapt, M – Modify, P – Put to another use, E – Eliminate og R – Reverse (Elmansy, 2015). Punktene beskriver hvordan det er mulig å utforske nye alternativer i en utviklingsprosess ved å ta en ny utviklingsvei, gjennom forenklinger av eksisterende løsninger eller i en kombinasjon (Bøe, 2019).

I prosjektet gjelder ikke metodikken kun ved utforming av produkter, men hver gang et valg er tatt. Dette innebar tekstoppbygging, hva som er skrevet i et avsnitt og hvordan arbeidet er utført.

### 2.2.2. Løsningsverktøy

De ulike digitale løsningsverktøyene benyttet i oppgaven er kort presentert (Tabell 2.4).

Tabell 2.4: Løsningsverktøyene benyttet

Verktøy	Anvendelse
Microsoft Word 2016	Utarbeidelse av rapporten.
Microsoft Excel 2016	Utarbeidelse av grafer.
Microsoft PowerPoint 2016	Utarbeidelse av presentasjon av oppgaven, samt til å lage enkle figurer.
Draw.io	Online programvare benyttet for å lage flytskjema.
SolidWorks 2019-2020	Programvare for 3D-modellering og simulering.

### 2.2.3. CFD- analyse

CFD er forkortelse for Computational Fluid Dynamics. Det er en analyse hvor numeriske metoder er benyttet på strømningsproblemer (væske- og gasstrømning), varmetransport og tilhørende fenomener (Kajishima & Taira, 2017).

Teknikken er veldig kraftig og spenner over et bredt spekter av industrielle og ikke-industrielle bruksområder. Ved CFD-programmer er det benyttet forskjellige løsningsmetoder for å løse et sett av ikke-lineære partielle differensiallikninger fra grunnleggende naturlover, hvor bevaring av masse, moment, energi og kjemiske stoffer er inkludert (Carlsson, 2003).

### 2.2.4. FEM-analyse

FEM-analyse er en forkortelse for Finite Element Method og på norsk kjent som elementmetoden. Metoden er en numerisk løsningsmetode innen en rekke problemstillinger matematisk beskrevet av partielle differensiallikninger eller integrallikninger (Bell, 2019).

FEM-analyse er en av de mest anerkjente metodene benyttet til beregning av spenninger og deformasjoner.

I FEM-programmer er metoden basert på inndeling av konstruksjoner i uendelig små elementer koblet sammen i knutepunkter (noder) og dannet et nett (mesh). Gjennom bruk av de numeriske metodene har programmet beregnet et resultat for alle de ulike elementene og samlet delresultatene i et større system av ligninger. Avslutningsvis har programmet benyttet sannsynlighetsberegninger fra variansberegningene for generering av en løsning med minimalisert feilberegning (Grue, 2018).

### **2.3. Litteraturstudie**

Litteraturstudiet er gjennomgang av tekstmateriell ansett relevant i forbindelse med problemstillingene ønsket løst. Etter gjennomført litteraturstudie er nødvendig kunnskap ervervet og grunnlaget for videre arbeidet dannet.

For oppgaven har litteraturstudiet omfattet fagbøker, faglitteratur, nettsteder og nettsøk. Gjennom Oria, Google Scholar og ScienceDirect er flere vitenskapelige artikler og bøker funnet og benyttet i utredningen av teori og teknologi relatert til tørking av kakaobønner. I beregningsarbeidet er kompendier fra fag ved NMBU benyttet.

### **2.4. Kvalitetssikring**

Arbeidet er utformet som et utviklingsoppdrag. Dette innebar rapportering og utvikling av et fysisk produkt, hvor ulike tilhørende analyser er utført. Kvalitetssikring av rapporten er oppnådd gjennom løpende revisjoner av undertegnede og veiledere.

Kvalitetssikring av konstruksjonen er basert på håndberegninger verifisert opp mot FEM-analyser og kontrollert opp mot sikkerhet for flyt og knekking. For ønsket utforming på tørkeren har dialog med prosjekteier vært essensiell. Prosjekteiers representanter er Jevgeni Gorjanski, Stein Skjørshammer og Mike Fohba, som har tillatt undertegnede å omtale dem i rapporten i forbindelse med prosjektarbeidet.

## 3. Teoriutredning

Hensikten til teoriutredningen er å gi en innføring i relevant teori for videre arbeid i utviklingsprosessen. Dette innebar grunnleggende teori om varmeoverføring, solenergi og tørking. Kakao og prosessering av kakaobønner er presentert avslutningsvis.

### 3.1. Varmeoverføring

Energi opptrer i ulike former, hvor varme er energiformen overført fra et system til et annet som et resultat av temperaturforskjeller (Çengel et al., 2015). Termodynamikk beskriver sammenhengen mellom energi, varme og arbeid (Pedersen, 2018c) og er benyttet for å avgjøre varmeoverføringen i et system (Çengel et al., 2015).

Varme er overført gjennom en eller flere av de tre grunnleggende metodene: konduksjon, konveksjon og stråling (Çengel et al., 2015; Geankoplis, 2003).

#### 3.1.1. Konduksjon

Konduksjon, også kjent som varmeledning, er bevegelsesenergi overført på grunn av interaksjon mellom energirike og energifattige partikler i et stoff (Çengel et al., 2015). Faste stoffer, væsker og gasser har overført varme i form av konduksjon (Geankoplis, 2003). I væsker og gasser er konduksjon et resultat av kollisjoner og diffusjon mellom molekylerne gjennom tilfeldigheter i bevegelsene. I faste stoffer har konduksjon oppstått fra kombinasjonen av vibrasjoner fra molekylerne i gitterstrukturen til materialet og energitransport fra frie elektroner (Çengel et al., 2015).

#### 3.1.2. Konveksjon

Konveksjon er energi overført fra ett sted til et annet ved hjelp av en strøm av væske eller gass (Pedersen, 2018b). Varmeoverføringen er komplisert på grunn av den kombinerte effekten fra væskebevegelse og konduksjon (Çengel et al., 2015). Varme er først tatt opp i fluidet gjennom konduksjon, og videre gir væskebevegelsen økt rate av konduksjon internt i fluidet og en hurtigere varmeoverføring (Çengel et al., 2015). Konveksjon har som følge av dette en større varmeoverføring enn konduksjon.

Konveksjon er delt inn i to typer, naturlig og tvungen (Çengel et al., 2015).

Naturlig konveksjon er fluidbevegelse fra oppdriftskrefter (Raju, 2011). Oppdriftskreftene er introdusert gjennom tetthetsforskjeller fra temperaturforskjeller i fluidet. Naturlig konveksjon medfører generelt lave hastigheter på fluidet og laminære betingelser (Raju, 2011).

Tvungen konveksjon er påtvunget fluidbevegelse fra for eksempel en pumpe, en vifte eller vinden. Ved tvungen konveksjon er også oppdriftskrefter tilstede, men effekten lav (McCabe et al., 2005). Påtvungen konveksjon har høyere hastighet, resultert i økt turbulens og høyere varmeoverføring (Raju, 2011).

### 3.1.3. Stråling

Stråling er energi utsendt av materie i form av elektromagnetiske bølger, fotoner, fra endringen i elektronkonfigurasjonene i atomet eller molekylene (Çengel et al., 2015). Innen varmeoverføring er termisk stråling av interesse, stråling emittert fra legemer på grunn av overflatetemperatur over absolutt nullpunkt (Holtebekk, 2019).

Sammenlignet med konduksjon og konveksjon, er ikke stråling påkrevd nærvær av et mellomliggende medium og er dermed oppnåelig i vakuum (Von Böckh & Wetzel, 2012). Stråling som overfører varme har en bølgelengde mellom 0,8 mikrometer og 400 mikrometer og er referert som infrarød stråling (Von Böckh & Wetzel, 2012).

## 3.2. Solenergi

Solenergi er lys- og varmestråler fra sola. Strålingen er dels reflektert fra og dels absorbert i atmosfæren (Hofstad, 2019). Mengden solenergi truffet jorda i løpet av ett år, er om lag 15 000 ganger større enn hele verdens årlige energiforbruk (Hofstad, 2019). Den enkleste måten solstrålingen er utnyttet, er gjennom oppvarming i form av passiv eller aktiv solvarme.

Passiv solvarme er gjennom utforming av byggkonstruksjoner og innretninger optimalt for innstråling til oppvarming (Hofstad, 2019). I motsetning er aktiv solvarme bruk av egne innretninger og varmen blir transportert dit den er utnyttet (Duffie & Beckman, 2013). Innretninger benyttet ved aktiv solvarme er solfangere og varmelagre (Rosvold, 2018).

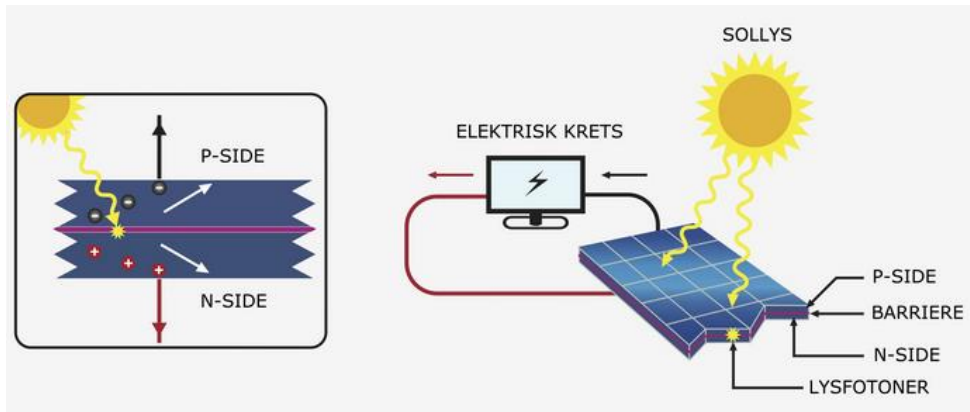
Solenergi er også fanget og omformet til nyttbar varmeenergi, kjemisk bundet energi eller til elektrisk energi. Dette er utført ved bruk av fotoelektrisk effekt (solceller) eller indirekte i et varmekraftverk basert på solvarme (Hofstad, 2019).

### 3.2.1. Solfanger

En solfanger er bygget opp av et ytre gjennomsiktig lokk, av for eksempel glass, kombinert med en absorbatoren (Rosvold, 2019b). Absorbatoren er svart for å absorbere høyest mulig stråling og sikre maksimal oppvarming. Fra absorbatoren er stråling sendt ut igjen med lengre bølgelengde enn den innkommende, og drivhuseffekten sørger for at strålingen er værende i anretningen (Rosvold, 2019b).

### 3.2.2. Solceller

Solceller er bygget opp av lysfølsomme halvlederdioder hvor lys blir omdannet til elektrisk strøm (Rosvold, 2019a). Produksjonen av strøm er basert på fotoemisjon (Tiwari et al., 2016). Inntruffet stråling har separert de positive og negative ladningene i det absorberende materialet, og med en ekstern krets tilkoblet vil ladningene produsere strøm (Figur 3.1) (Twidell & Weir, 2015).

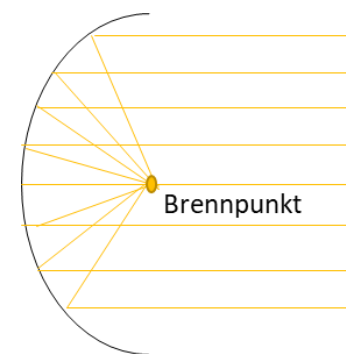


Figur 3.1: Virkemåte solceller (Mjønerud, 2019).

Solcellesystemer er utført i størrelsesordener fra brøkdeler av en watt (W) til kraftverk med en effekt på flere megawatt (MW) (Rosvold, 2019a). For frittstående systemer er det alltid påkrevd et energilag, hvor batterier er mest utbredt (Rosvold, 2019a). Fordelene med solcellesystemer er at elektrisitet kan bli gitt der det ikke er noe tilkobling til et eksisterende strømmnett og at elektrisiteten kan bli ført tilbake på nettet.

### 3.2.3. Termisk energi

Termisk solenergi er basert på termodynamikk og dens lover, ulikt solceller som er basert på elektrodynamikk og faststoffysikk (Smets et al., 2016). I et termisk varmekraftverk er termisk energi omdannet til elektrisk energi ved at en dampturbin har utnyttet varmen fra solenergien gjennom oppvarming av væske. Oppvarmingen av væske forgår ved bruk av enten justerbare parabolspeil (Figur 3.2) eller soltårn (Hofstad, 2019).



Figur 3.2: Virkemåte parabolspeil

### 3.3. Tørking

Tørking er en prosess hvor vann eller annen flyktig væske er fjernet fra fast stoff (Ore & Nesse, 2017). Betydningen av tørking er reduksjon i fuktighetsinnholdet fra en startverdi til en akseptabel sluttverdi (Geankoplis, 2003). Tørking er kanskje den eldste og mest brukte metoden i kjemisk, farmasøytisk, papir, mineral, tekstil, mat og landbruksindustri (Delgado & Lima, 2016). Det er ulike måter faste stoffer er tørket på, hvor hovedinndelingen er (McCabe et al., 2005);

1. Tørkere hvor faste partikler er i direkte kontakt med varm gass, ofte luft.
2. Tørkere hvor varmen er overført til faste partikler gjennom et eksternt medium som er oppvarmet av et fluid.
3. Tørkere hvor varme er overført gjennom dielektrisk-, strålings- eller mikrobølgeenergi.

Tørkeprosesser er utført satsvis eller kontinuerlig (Geankoplis, 2003; McCabe et al., 2005) hvor varmeoverføring og masseoverføring foregår (Delgado & Lima, 2016; Rosenthal et al., 2018). Masseoverføringsmekanismene i tørkeprosessen er basert på diffusjonsraten til fuktigheten i tørkegodset eller til fordampningsraten til fuktigheten på overflaten til tørkegodset (Rosenthal et al., 2018). Varmeoverføringsmetodene definert i kapittel 3.1. er sentrale for overføring av energi fra en varmekilde til tørkegodset.

#### 3.3.1. Fuktighet

Fuktighet er definert som antall kg vanndamp per kg tørr luft og er avhengig av partialtrykket til vanndampen i luften og det totale trykket (Geankoplis, 2003). Når vanndampen er i likevekt med flytende vann, ved gitte betingelser av temperatur og trykk, er luften mettet (Geankoplis, 2003; McCabe et al., 2005).

Luften benyttet til tørking har en viss andel fuktighet og relativ fuktighet (McCabe et al., 2005). Det ferdigtørkede produktet kan derfor aldri ha et fuktighetsinnhold lavere enn fuktighetsinnholdet til luften, og er referert som fuktighetsinnholdet ved likevekt (EMC) (McCabe et al., 2005). På bakgrunn av EMC er det ulike klassifiseringer av fuktighet.

#### Fri fuktighet

Fri fuktighet er fuktighetsinnholdet over EMC (Geankoplis, 2003). Dette er fuktighet i hulrom og kapillærer løst bundet til legemet (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019) og er dermed enkelt fjernet ved tørking.

### Bundet fuktighet

Fuktighet fysisk eller kjemisk bundet til mikrostrukturen er bundet fuktighet (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019; Geankoplis, 2003). Bundet fuktighet er fuktighetsinnholdet lavere enn EMC til det faste stoffet ved 100% relativ fuktighet (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019; McCabe et al., 2005).

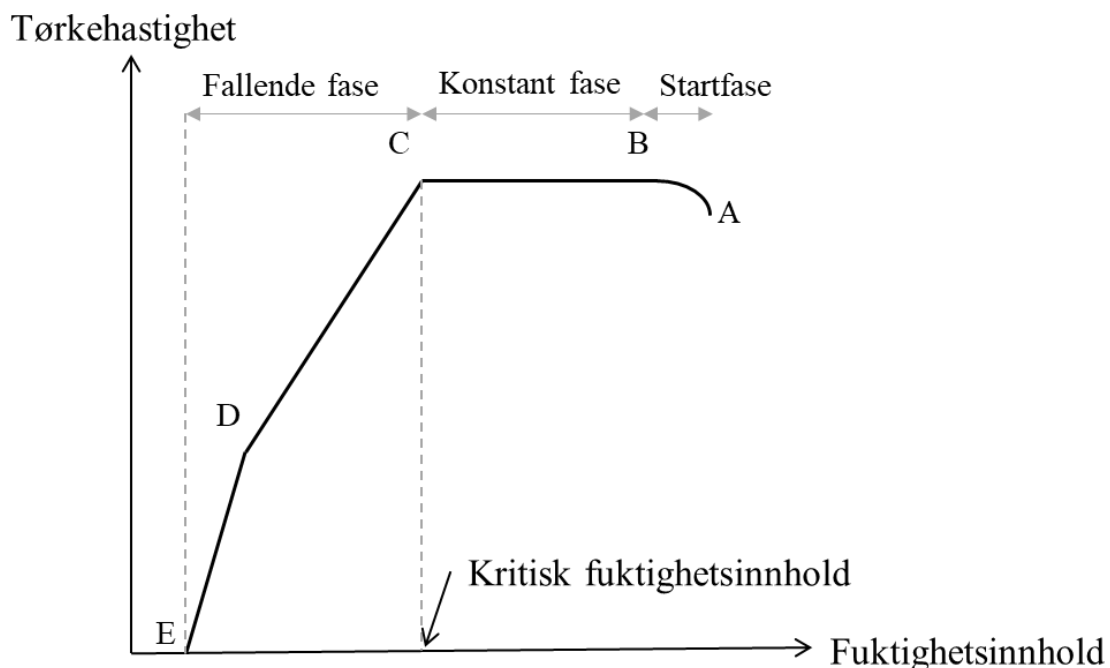
### Ubundet fuktighet

Fuktighetsinnholdet høyere enn EMC til det faste stoffet ved 100% relativ fuktighet er ubundet fuktighet (Geankoplis, 2003; McCabe et al., 2005). Ubundet fuktighet er fuktigheten av det totale fuktighetsinnholdet fjernet enkelt (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).

### 3.3.2. Tørkehastighet

Massen av vann fjernet per tidsenhet per masseenhet av tørt stoff er definert som tørkehastighet (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019; Guda et al., 2017). Tørkehastigheten er en viktig parameter for produksjonskapasiteten til tørkere og for tørkeprosessen (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).

Ved å plote fuktighetsinnholdet mot tørkehastigheten er tørkehastighetskurven generert (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019; Smith, 2011). Fra tørkehastighetskurven er de ulike stegene i en tørkeprosess presentert (Figur 3.3).



Figur 3.3: Tørkehastighetskurve (tilpasset fra (Hagen et al., 2019))



I starten av tørkeperioden har temperaturen til tørkegodset økt, fuktighet er frigjort og porer åpnet opp (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019). Startfasen er kort og er oftest utelatt ved beregning av tørketid (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).

Etterfulgt av startfasen er fuktigheten fjernet i en konstant hastighet (punkt B til C, Figur 3.3). Fjerning av fuktighet foregår så lenge masseoverføring fra kjernen og til overflaten er tilstede (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019; Parikh, 2014).

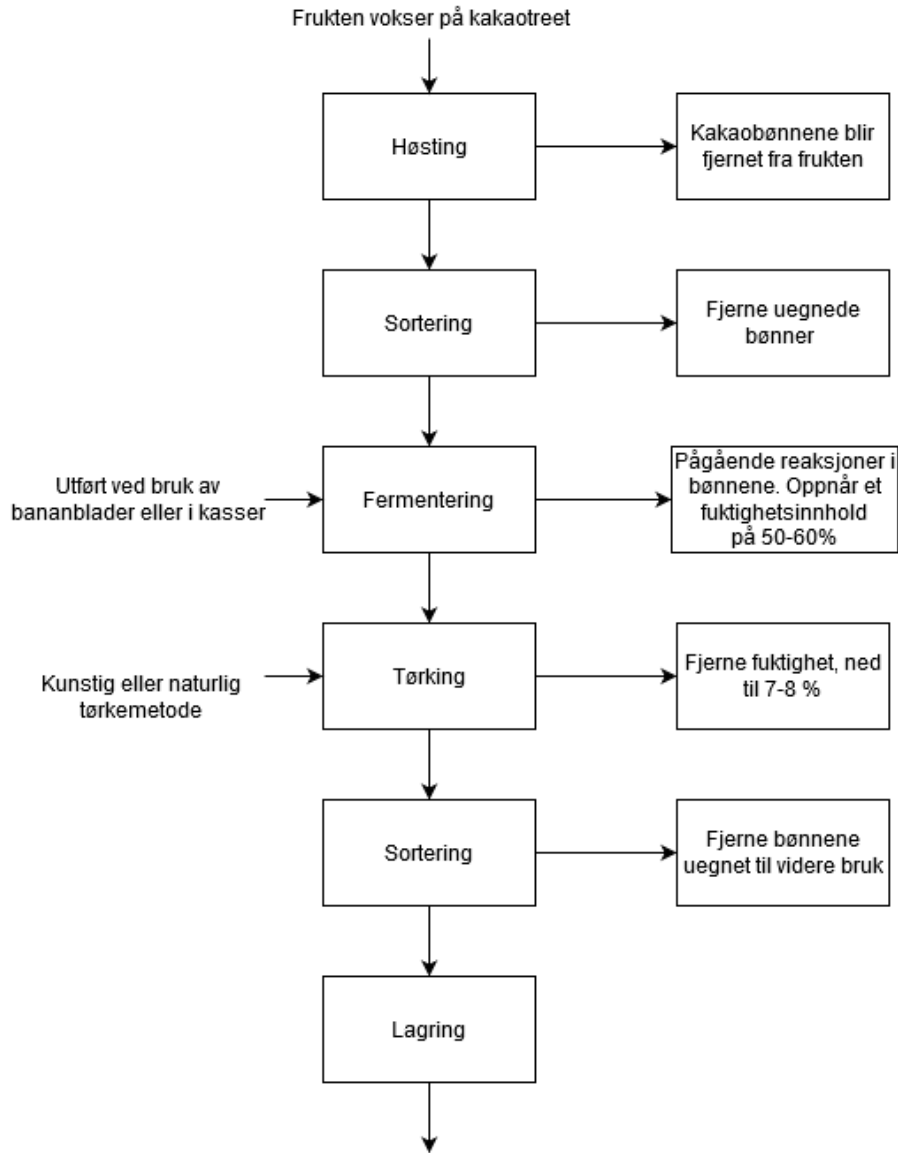
Hastigheten er redusert i takt med fuktighetsinnholdet når kritisk fuktighetsinnhold er nådd (punkt C, Figur 3.3). Den fallende fasen er den lengste fasen i en tørkeprosess, hvor intern diffusjon av fuktighet er begrensende faktor (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019; Smith, 2011). Overflaten har begynt å tørke ut og er dermed ikke lenger kapabel til å tilføre tilstrekkelig med fuktighet til luften rundt stoffet (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).

Den siste fasen (punkt D til E, Figur 3.3) er kjennetegnet ved at overflaten er helt tørr, og vanngradientsnittet har beveget seg inn i materialet. Fordampning av vannet avhenger nå av diffusjon av fuktigheten gjennom materialet og gikk stadig tregere. Dette medførte en økning i tilført varme for fordampning av vannet. I denne fasen er tørkehastigheten påvirket av arten og strukturen av materialet (Smith, 2011). Tørkeprosessen er gjennomført når EMC er nådd (punkt E, Figur 3.3).

Case hardening – tørkeskorpe – er et fenomen viktig å ta hensyn til under den konstante fasen. Tørkeskorpe opptrer som følge av at fuktighet er fjernet fra overflaten i en høyere takt enn diffusjonen fra kjernen. Resultatet av dette var en hard skorpe på overflaten, og bevegelse av fuktighet fra kjernen er hindret (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).

### **3.4. Kakao**

Kakao er brukt i produksjonen av sjokolade, drikke, kosmetikk, medisiner og toalettsaker (Musa, 2012). Videre er kakao er assosiert med ulike helsefordeler spesielt på grunn av innholdet av polyfenoler (Hii et al., 2009b). Før bruk i produkter er kakaobønnene bearbeidet igjennom ulike prosesser (Figur 3.4) og etter bearbeidingen er målet at kakaobønne har oppnådd tilstrekkelig kvalitet for videre bruk.

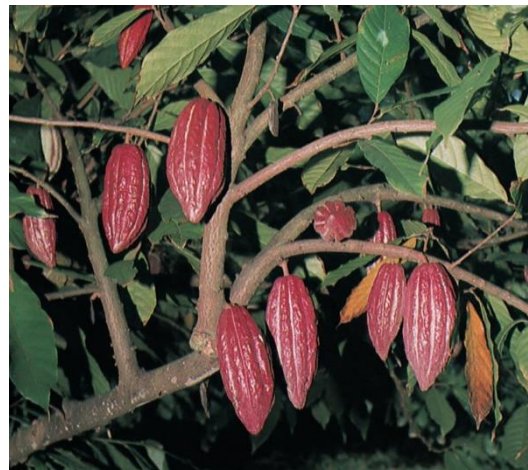


Figur 3.4: Prosesskjema for bearbeidingen av kakaobønnene

### 3.4.1. Kakaotreet

Kakao er et tre i kattostfamilien som vokser vilt i Sør-Amerika (SNL, 2018). Kakaotreet er inntil 15 m høyt og har store, blanke, helrandede blader. Små blomster vokser direkte utfra stammen eller grenene, uten at det sitter blad under dem (Figur 3.5) (SNL, 2018).

Frukten, en gulrød kapsel, inntil 30 cm lang inneholder mellom 20 og 60 frø (Universitetet i Oslo, 2019). Frøene i frukten er kakaobønnene, som er av interesse for videre bearbeiding.



Figur 3.5: Kakaotreet med frukten (SNL, 2018)

### 3.4.2. Bearbeiding av frukten

Frukten er høstet og bearbeidet maks 5 dager senere for å hente ut kakaobønnene (Figur 3.6) (Nicolas et al., 2019). Oftest er frukten fraktet til området fermentering og tørking foregår før kakaobønnene er tatt ut (Nicolas et al., 2019). For å unngå skade på kakaobønnene under bearbeiding er verktøy laget av kalebass (en plante i samme familie som gresskar) benyttet (Omberg, 2020)



Figur 3.6: Bearbeiding av frukten, for tilgang til kakaobønnene (SNL, 2018).

### 3.4.3. Fermentering av kakaobønnene

Gjennom fermentering av kakaobønner er grunnlaget for smak og sammensetningen til sjokolade og andre kakaobaserte produkter dannet (De Vuyst & Weckx, 2016). Fermentering er også viktig for å sikre embryoets død, unngå spiring og endring av bønnen (Gutiérrez, 2017). Fermenteringen foregår gjennom to ulike prosesser (Nicolas et al., 2019). I første prosess er fruktkjøttet som omkranset kakaobønningen omdannet til væske (De Vuyst & Weckx, 2016). Omdanningen til væske er en anaerob prosess hvor glukosen og rester av planteslim er omdannet til etanol (De Vuyst & Weckx, 2016; Nicolas et al., 2019). Gjennom den andre prosessen er det alkoholholdige fruktkjøttet omdannet til eddik, en aerob prosess hvor etanol blir til eddiksyre (Nicolas et al., 2019).

Fermenteringen er utført satsvis, og i Kamerun er kakaobønnene lagt i kasser (Figur 3.7) eller pakket inn i bananblader ved fermentering (Figur 3.8). Kakaobønnene er plassert på en tynn hvit film, av naturlig gjær, og dekt av blader uavhengig av metode (Nicolas et al., 2019).



Figur 3.7: Fermentering i kasser (Nicolas et al., 2019)

Fermenteringsprosessen foregår i 5 til 7 dager, hvor de hver andre dag er bearbeidet for å oppnå en så lik prosess i hele haugen som mulig (Nicolas et al., 2019). Gjennom fermenteringen har temperaturen steget fra omgivende temperatur og opp til 50-55 °C (Hii et al., 2009b; Oke & Omotayo, 2012) og fuktighetsinnholdet i kakaobønnene blitt omtrent 60 vekt% (Guehi et al., 2010).



Figur 3.8: Fermentering i bananblader (Nicolas et al., 2019)

Etter fermenteringsprosessen er kakaobønnene bestående av to lag: et ytterlag, testa, og en indre kjerne, cotyledon. Testa-skallet virker beskyttende mot insekter og dyr under lagring. Testa-skallet har også et høyt fuktighetsinnhold fra restene av degenerasjon av fruktmasse på overflaten (Hii et al., 2012).

#### 3.4.4. Tørking av kakaobønnene

Tørking er en kontinuasjon av oksideringsstadiet ved fermentering og en viktig del i reduksjon av den snerpende smaken, bitterheten og syrligheten i kakaobønnene (Dina et al., 2015; Hashim et al., 1999). Gjennom tørkeprosessen er den karakteristiske fargen og sjokoladesmaken fremkommet som følge av en proteinreaksjon etter enzymatisk oksidering av polyfenoler (Herman et al., 2018).

Tørkingen er utført enten naturlig eller kunstig (Mattia et al., 2013). Naturlig tørking har utnyttet solstrålene direkte, mens kunstig tørking er basert på anvendelse av solenergi og andre energiformer (Bjånes, 2019) for påtvunget luftsirkulasjon for tørking av kakaobønnene (Gunathilake et al., 2018).

Uavhengig av metode bør fuktighetsinnholdet etter tørking være redusert til 7-8 vekt% (Gutiérrez, 2017). For hurtig tørking har tørket det ytre laget (testa), mens det indre fortsatt er fuktig, medført en surhet i kakaobønnene og redusert verdi (Gutiérrez, 2017).

## 4. Teknologiutredning

I dette kapitlet er tørkemetoder utprøvd på kakaobønner presentert (Tabell 4.1). Metodene er adskilt mellom naturlig og kunstig tørking som definert i kapittel 3.4.4. og virkemåten til de ulike metodene er videre beskrevet.

Tabell 4.1: Oversikt og kort beskrivelse av tørkemetoder benyttet eller utprøvd ved tørking av kakaobønner

Type	Tørkemethode	Beskrivelse
Naturlig	Åpen soltørking	Kakaobønnene er spredd ut på områder, eksponert for solstråling direkte og vendt om for uniform tørking (International Cocoa Organization, 2000).
	Direkte soltørking	Solstrålene har varmet opp kakaobønnene og luften i et tørkekammer (Kumar et al., 2016). Kakaobønnene er i direkte kontakt med solstrålingen.
	Indirekte soltørking	Oppvarmet luft fra en solfanger er ført videre til et tørkekammer kakaobønnene er plassert i (Kumar et al., 2016). Kakaobønnene er skjermet for solstrålingen.
Naturlig og/eller kunstig	Hybrid tørking	Direkte og indirekte tørkeprinsipp utnyttet (Sadeghi et al., 2012). Metoden har også kombinert kunstige og naturlige tørkemetoder (Hii et al., 2019).
Kunstig	Vedfyring	Fyring med ved under en plattform kakaobønnene er plassert på. En ukontrollert prosess med tanke på temperatur, som har resultert i varierende kvalitet.
	Varmepumpe	Varmepumpesystem benyttet til generering av en varm luftstrøm til tørking av kakaobønner i et tørkekammer (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).
	Varmluftsvifte	Varmluftsvifte benyttet for oppvarming av luft benyttet til tørking av kakaobønner i et tørkekammer (Houhou et al., 2017).

Tørkesystemer basert på solenergi er en fornybar og miljøvennlig teknologi (Fudholi et al., 2015). Soltørking er den beste metoden fra et energibesparende synspunkt som har spart både energi og tid, og forbedret produktkvalitet (Kumar et al., 2016). Kakaobønner med god smak og lavt syreinnhold er et resultat av milde tørkeforhold ved soltørking (Hii et al., 2013).

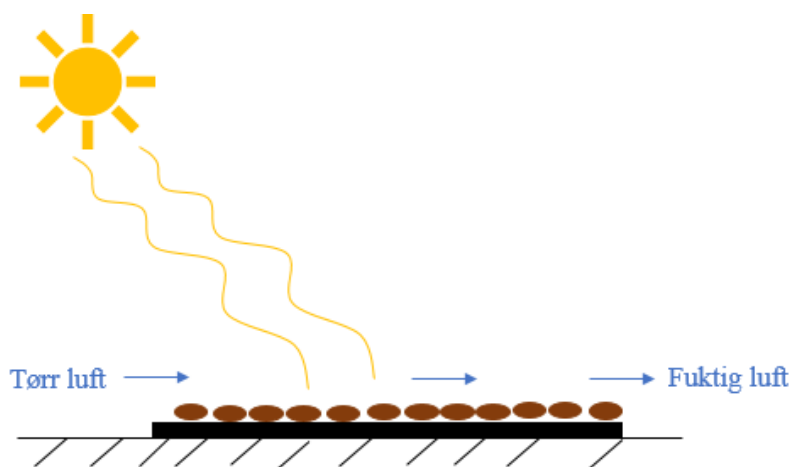
Fuktigheten har på sin side blitt fjernet hurtigere ved kunstig tørking, som har resultert i redusert tørketid og en økt popularitet, spesielt hos større produsenter (Hashim et al., 1999). I tillegg har de tørkede bønnene oppnådd en mer homogen kvalitet ved kunstig tørking (Herman et al., 2018).

Kunstig tørking med temperaturer over 60 °C er påvist at utvikler dårlig smak, høyt syreinnhold og mindre oksidering av polyfenoler sammenlignet med soltørkede kakaobønner, hvor utgangspunktet var det samme (Dina et al., 2015; Guehi et al., 2010; Hii et al., 2009a; Hii et al., 2011). Hii et al. (2009a) underbygde dette gjennom utførte forsøk på tørking av kakaobønner i en varmluftsovn på 60, 70 og 80 °C. Kvaliteten var målt gjennom pH og kutt test for å se fargen. Resultatet var at kakaobønnene tørket på 60 °C hadde best kvalitet (Hii et al., 2009a).

#### 4.1. Åpen soltørking

Ved åpen soltørking er kakaobønnene spreidd ut på matter, brett eller betonggulv ute i solen (International Cocoa Organization, 2000). Bønnene er vendt om for å sikre uniform tørkeprosess og tildekt ved regn (Gunathilake et al., 2018; International Cocoa Organization, 2000). Ved tilstrekkelig solskinn og lite regn, har tørkingen av bønnene tatt omtrent en uke, men regnvær gir økt tørketid (International Cocoa Organization, 2000).

Gjennom åpen soltørking har noe av solstrålingen blitt reflektert fra overflaten til kakaobønnene, mens resterende er absorbert i kakaobønnene (Sharma et al., 2009). Solstrålinger er konvertert til termisk energi, som har resultert i økt temperaturen i kakaobønnene. Et resultat av temperaturøkningen er fordampning av fuktighet, som videre er tatt opp i luften (Figur 4.1).



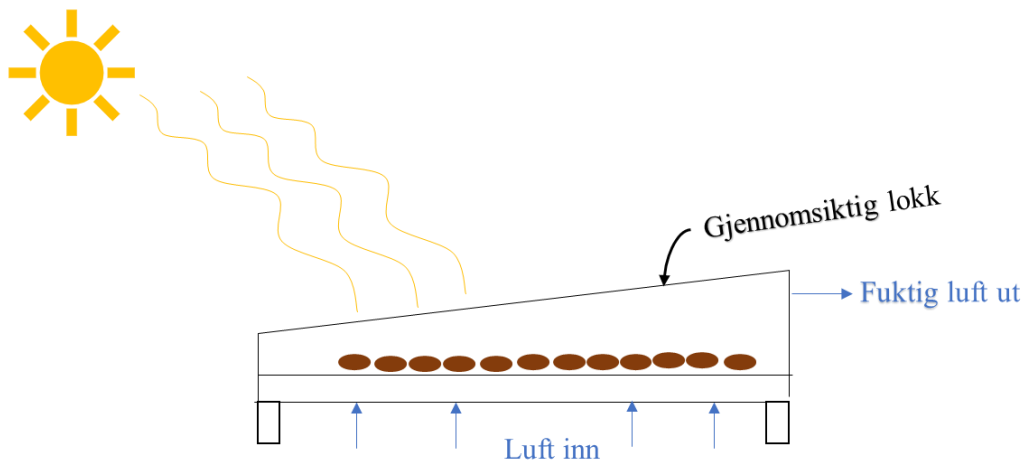
Figur 4.1: Åpen soltørking. Kakaobønnene plassert på brett ute i solen.

Varierende vær, produktsvinn og krav til arbeidskraft er ulemper ved åpen soltørking (Rodriguez-Campos et al., 2012). Lang tørketid har resultert i flaskehalser ved produksjonen av kakaobønner, ført til redusert produktivitet og forsinket leveringstid (Orbegoso et al., 2017). Det er også krav om store områder for åpen soltørking (Fudholi et al., 2015).

## 4.2. Direkte soltørking

Direkte soltørking benytter et tørkekammer dekket av et gjennomsiktig lokk av plast eller glass med hull for ventilering av luften, som er kalt en kabinetttørker (Kumar et al., 2016). Tørkeprinsippet er tilsvarende åpen soltørking, hvor strålingen har blitt dels reflektert og dels absorbert (Kumar et al., 2016; Sadeghi et al., 2012; Sharma et al., 2009).

Strålingen reflektert fra kakaobønnene er av en høyere bølgelengde og blitt værende i kammeret som følge av drivhuseffekten. Strålingen sørger for en høyere temperatur i kammeret og lavere konvektive tap til omgivelsene (Sharma et al., 2009). Luften entrer kammeret på undersiden, blitt oppvarmet og har tatt til seg fuktighet fra kakaobønnene, før den fuktige luften er videre ført ut gjennom ventilering i toppen (Figur 4.2).



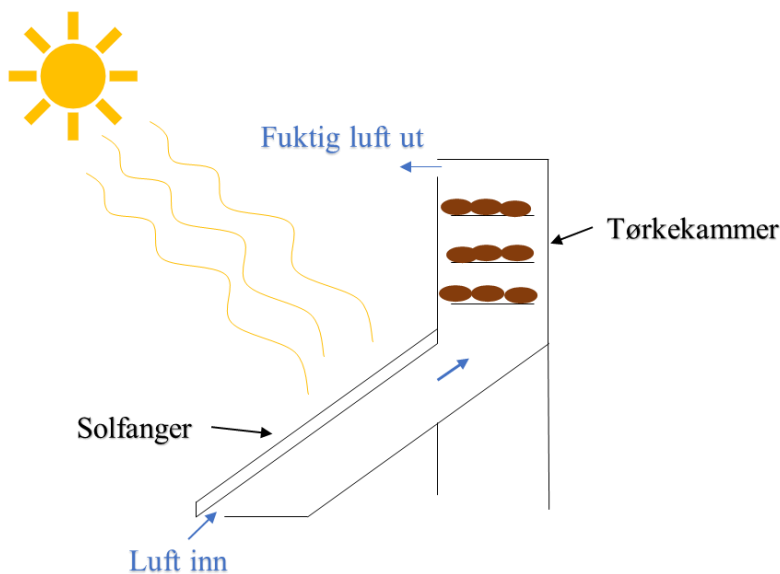
Figur 4.2: Virkemåten til en direkte soltørker i form av tørkekabinett. Basert på figur fra Sadeghi et al. (2012)

En annen utforming av direkte soltørking er tildekking av et større rammeverk med vegger og tak utført i for eksempel plast. En slik løsning er tilsvarende et drivhus (Barrientos et al., 2019; Gutiérrez, 2017). Ventilering i konstruksjonen har tillatt luftstrøm inn og ut og har sirkulert enten naturlig, påtvungen av bevegelse fra en ekstern kilde, eller en kombinasjon av begge (Kumar et al., 2016).

### 4.3. Indirekte soltørker

Hovedprinsippet til indirekte soltørking er tørking av kakaobønnene uten å være i kontakt med solstrålene (Sadeghi et al., 2012). En indirekte tørker er bygget opp av en separat solfanger og et tørkekammer (Kumar et al., 2016). Risikoen for misfarging og sprekke dannelse på overflaten er dermed redusert (Sadeghi et al., 2012; Sharma et al., 2009) og er velegnet for tørking av lyssensitive produkter (Richter et al., 2013).

Solfangeren varmer luften som er videre ført inn i tørkekammeret, hvor kakaobønnene er plassert på brett (Figur 4.3). Fuktigheten i kakaobønnene er trukket ut med luften gjennom egen ventilering (Hii et al., 2019; Richter et al., 2013; Sharma et al., 2009). Dina et al. (2015) gjennomførte et forsøk på tørking av kakaobønner med en indirekte tørker, hvor resultatet var en tørketid på 41 timer.



Figur 4.3: Virkemåten til en indirekte soltørker

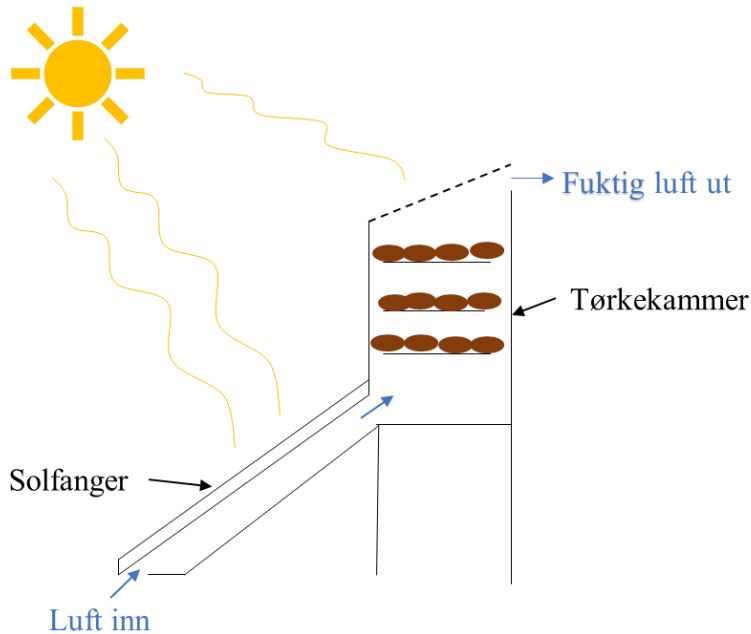
Varmeoverføringen mellom luften og kakaobønnene er konveksjon og tørkeprosessen er styrt av fuktighetsforskjellen mellom den varme luften og luften nær kakaobønnene. Dette resulterer i en bedre kontroll over tørkeprosessen og kakaobønnene har oppnådd god kvalitet (Sadeghi et al., 2012). Generelt er det kommet fram til at indirekte tørkere er mer effektive enn direkte, selv om størrelsen er noe større (Sadeghi et al., 2012; Sharma et al., 2009).

### 4.4. Hybrid tørker

I en hybrid soltørker er kakaobønnene tørket gjennom direkte absorpsjon av solinnstråling og indirekte gjennom forvarmet luft fra en solfanger (Figur 4.4) (Sadeghi et al., 2012). Et annet



alternativ til en hybrid tørker er kombinasjonen av soltørking og en konvensjonell oppvarmingskilde driftet av elektrisitet eller biomasse (Hii et al., 2019; Kumar et al., 2016).



Figur 4.4: Hybrid tørker hvor direkte og indirekte soltørking er benyttet

## 4.5. Vedfyring

Den enkleste formen for kunstig tørking er gjennom vedfyring under en plattform kakaobønnene er lagt på (Figur 4.5) (Beckett et al., 2017). Plattformen er varmet opp og gjennom konduksjon er kakaobønnene tørket. For uniform tørking er det viktig å vende om på kakaobønnene med jevne mellomrom.

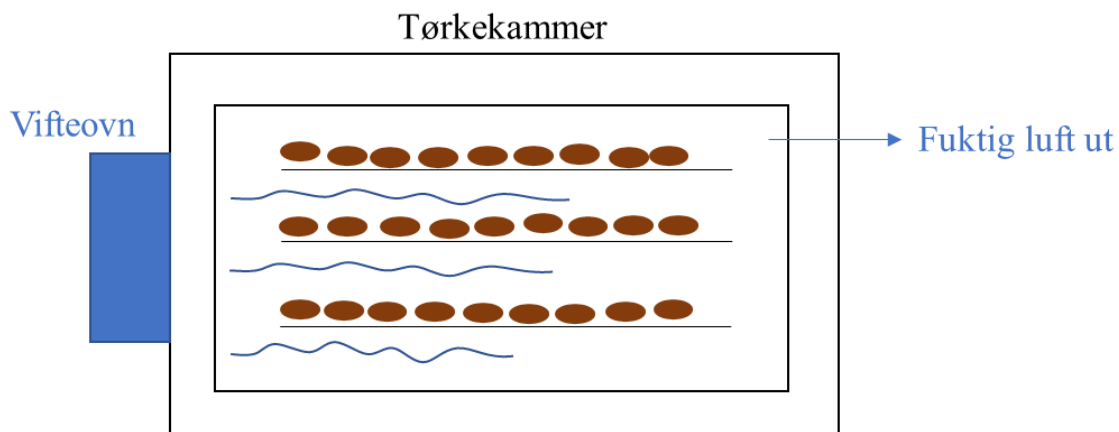


Figur 4.5: Vedfyring under en plattform kakaobønnene er plassert på for tørking (Omberg, 2020).

Som nevnt i kapittel 1.2. er problemet med vedfyring at kakaobønnene er utsatt for røyk og tørket på høye temperaturer. Røyk gir en uønsket smak og gjort kakaobønnene uegnet til videre bruk. Tørking på for høye temperaturer har medført i en viss risiko av for hurtig tørking, siden brukeren har liten kontroll over tørkeprosessen (Gutiérrez, 2017).

#### 4.6. Varmluftsvifte

Ved bruk av varmluftsvifte er tørkeren bygget opp av et tørkekammer med en vifte og et varmeelement (vifteovn) (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019). Den oppvarmede luften varmer opp kakaobønnene og fuktigheten diffunderer til luften, som er transportert ut gjennom ventilering (Figur 4.6).



Figur 4.6: Virkemåte for tørking av kakaobønner med varmluftsvifte (vifteovn) og tørkekammer.

Bruken av varmluftsvifte med et tørkekammer har resultert i en økonomisk tørker ved drift. Tørkeren er av en enkel konstruksjon, fleksibel ved bruk, enkel å holde oppsyn med, og dermed godt egnet for lav skala og satsvis tørking (Anandharamakrishnan & Ishwarya, 2019).

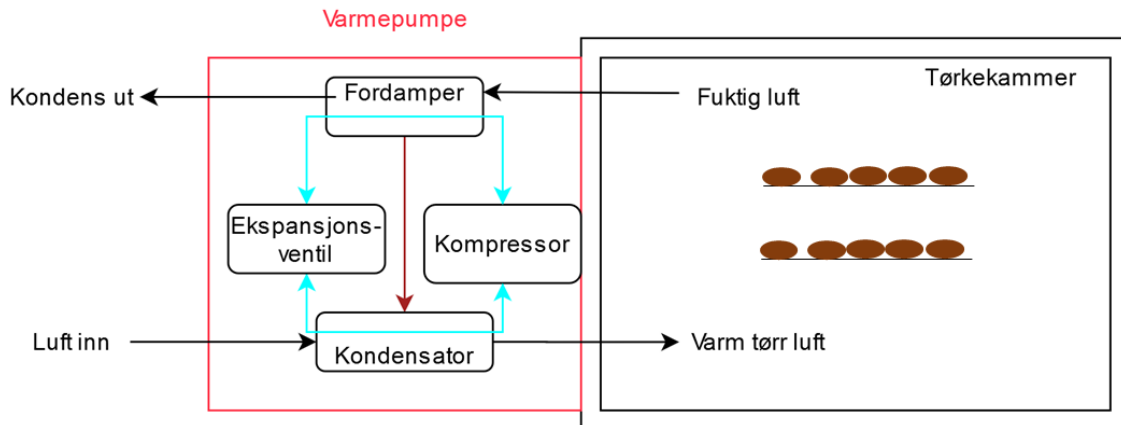
Hii et al. (2011) gjennomførte et forsøk med varmluftsvifte med en lufttemperatur på 55,9 °C som resulterte i en tørketid på 26 timer. For prototypen har tørketiden blitt bestemt til 9-14 timer gjennom tidligere tester.

#### 4.7. Varmepumpe

Tørking ved bruk av varmepumpe er basert på en kjølesyklus og varmeveksler hvor luften har passert gjennom en kondensator og fordamer. Varmepumpen har operert i en lukket syklus, uten noen utveksling mellom luften i systemet og omgivelsene (Hii et al., 2012).

Varmepumpen har utnyttet varmen fra den fuktige luften i tørkekammeret og til å oppnå en høy temperatur på den tørre luften sendt inn i tørkekammeret (Houhou et al., 2017). Luften har

sirkulert mellom fordamer, kompressor, kondensator og ekspansjonsventilen, hvor den har tatt til seg og gitt fra seg varme (Figur 4.7).



Figur 4.7: Virkemåte for tørking av kakaobønner med varmepumpe til generering av en varm luftstrøm

Hii et al. (2011) gjennomførte forsøk på tørking av kakaobønner med varmepumpe, med konstant, stegvis stigende og stegvis synkende temperaturer. Fra forsøkene var tørketiden 52 timer og 72 timer ved tørking på henholdsvis 40,4 og 28,6 °C konstant temperatur. Ved stegvis stigende temperatur på 30,7, 43,6 og 56,9 °C med tørketid på henholdsvis 24 timer, 24 timer og 2 timer, resulterte i en tørketid på 50 timer. For stegvis synkende temperatur ble bønnene tørket på 54,9 og 43,9 °C, med tørketid på henholdsvis 6 timer og 28 timer, og prosessen tok 34 timer (Hii et al., 2011).

## 5. Produktspesifisering

I dette kapitlet er målsettingen med produktet definert og produktegenskaper rangert etter viktighet. Dette retter fokus på aspektene ved produktet det er nødvendig å prioritere for et best mulig sluttprodukt. Grovspesifikasjoner er også fastlagt for genering av konseptet.

### 5.1. Produktmålsetting

Produktmålet er økt produktivitet og forbedret tørkeprosess gjennom redusert forbedret tørkemetode og redusert tørketid per syklus sammenlignet med dagens metoder. Videre er det viktig med en enkel, brukervennlig og robust konstruksjon det er mulig å få bygget på verkstedet i Kamerun.

Delmålet er at brukeren har anvendt tørkeren uten problemer. Tørkeren skal videre bidra til økt kontroll over tørkeprosessen, og en mer homogen kvalitet på kakaobønnene.

### 5.2. Rangering av viktige produktegenskaper

Omberg (2020) utarbeidet sammen med prosjekteier en rekke designkriterier med tilhørende prioriteringer for prototypen. Videreutviklingen av konseptet har benyttet kriteriene tidligere definert som et utgangspunkt, hvor også egne vurderinger er tatt, slik at endelig definerte produktegenskaper også fokuserte på forutsetningene til verkstedet (Tabell 5.1).

Rangering av produktegenskapene foregår med bruk av Pughs metode som definert i kapittel 2.2.1.. Produktegenskapene er vektet utfra en helhetlig vurdering av produktmålsettingene.

Tabell 5.1: Vekting av produktegenskaper.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
Kapasitet	Tørking av 300 kg per syklus.	5	Svært viktig med tilsvarende kapasitet som dagens metode.
Tørketid	Tiden tørkeprosessen tok.	5	Svært viktig at tørkeren har kortere tørketid enn dagens metode.
Robusthet	Tørkeren har taklet røff behandling under drift.	5	Viktig at komponenter er tilstrekkelig dimensjonert for ulike belastninger.
Kostnader	Kostnader knyttet til materialer og bygging.	3	Viktig med bruk av komponenter som gir en kostnadseffektiv løsning.

Tabell 5.1 forts.: Vekting av produkttegenskaper.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
Kompleksitet	Antall enkeltdeler og sammensetninger	5	Utformingen av enkeltdeler sikrer en enkel sammenstilling.
Brukervennlighet	Enkel i anvendelse.	4	Viktig med en enkel virkemåte for enkel drift av tørkeren.
Materialvalg	Bruk av materialer tilgjengelige i Kamerun	5	Svært viktig med bruk av tilgjengelig materialer. Redusert behov for frakt av komponenter.
Energieffektivitet	Lavest kWh per kg tørket produkt	4	Viktig at tørkeprosessen er blitt utført med lavest mengde kWh.

### 5.3. Grovspesifikasjoner for produkttypen

Med bakgrunn i plassering av tørkeren i tørkehuset som definert i kapittel 1.4., og informasjon gitt av prosjekteier er metriske grovspesifikasjoner satt (Tabell 5.2). Etter erfaringer fra prototypen skal perforerte plater bli benyttet på hyllene. Perforerte plater har ført til optimal luftsirkulasjon, med økt strømningsmuligheter gjennom kakaobønnene og økt varmeoverføringsareal.

I tillegg er uttrekkbare hyller vraket, da prosjekteier mente løsning har for mange bevegelige deler, som gikk på bekostning av robusthet. For rammekonstruksjonen er det valgt å videreføre utformingen til prototypen vist i Figur 1.3.

Tabell 5.2: Metriske grovspesifikasjoner til tørkeren

Metrisk grovspesifisering	
Spesifikasjon	Optimale mål
Totalhøyde	1000 mm
Høyde (tørkesone)	900 mm
Bredde	1100 mm
Lengde	3000 mm

## 6. Konseptutvikling

I dette kapitlet er arbeidet i de ulike stegene i utviklingsprosessen omtalt. Prosjekteier har vært delaktig gjennom tilbakemeldinger på arbeidet utført i alle stegene, slikt at utformingen av tørkeren er utført etter prosjekteiers ønsker.

### 6.1. Seleksjon av tørkemetode

For valg av tørkemetode er fokuset på redusert tørketid sammenlignet med dagens metode, i tillegg til forbedret tørkeprosess. Utfra tørkemetodene presentert i kapittel 4., er varmpumpe og varmluftsvifte vurdert, siden de naturlige metodene er assosiert med lengre tørketid.

Alternativene er satt opp i en seleksjonsmatrise (Tabell 6.1), hvor tørkemetoden er vurdert opp mot de definerte produkttegenskapene med vektingen presentert i kapittel 5.2.. De ulike produkttegenskapene er poengvurdert etter en skala på (-1), (0) og (1). Betydningen av poengene er definert som følger:

-1: Dårlig tilfredsstillelse av kriteriet.

0: Middels tilfredsstillelse av kriteriet.

1: God tilfredsstillelse av kriteriet.

Tabell 6.1: Seleksjonsmatrise valg av hovedkonsept

Kriterier	Hovedkonsepter		
	Vekting	Varmepumpe	Varmluftsvifte
Kapasitet	5	0	0
Tørketid	5	1	1
Robusthet	5	1	1
Kostnader	3	-1	0
Kompleksitet	5	-1	0
Brukervennlighet	4	0	1
Materialvalg	5	0	0
Energieffektivitet	4	1	0
Sum		6	14

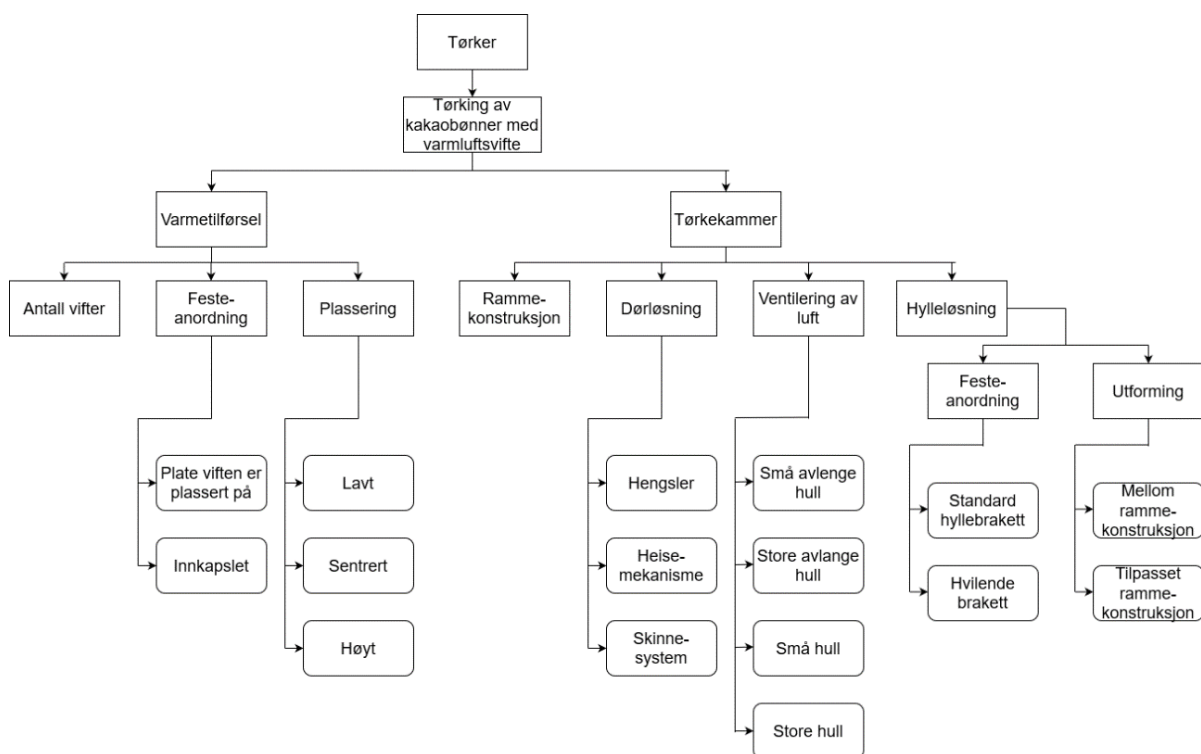
Alternativet med varmluftsvifte kom best ut. Varmluftsvifte er en metode enkel i drift og konstruksjon sammenlignet med varmpumpe, og derav velegnet for dette prosjektet.

## 6.2. Første konsept – videreutvikling av prototype

Etter valgt tørkemethode er det utført en funksjonsanalyse av tørkeren og funksjonsalternativer er generert, som prosjekteier har gitt tilbakemeldinger på.

### 6.2.1. Funksjonsanalyse for produktet

Hensikten til funksjonsanalysen er kartlegging av produktets hovedkomponenter, som videre er splittet opp i underkomponenter og funksjonsalternativer (Figur 6.1). Funksjonsalternativene er drøftet opp mot hverandre for å oppnå en optimal løsning.



Figur 6.1: Funksjonsanalyse for tørkeren med varmluftsvifte som tørkemethode.

### 6.2.2. Funksjonsalternativer med skisser

Til hver underkomponent er det generert ulike funksjonsalternativer. Alternativene er beskrevet og illustrert med skisser. Avslutningsvis for hvert alternativ er fordeler og ulemper beskrevet.

#### Dørløsning

For tilgang til produktet er det flere alternativer for dørmekanisme. De ulike alternativene er illustrert (Tabell 6.2) og fordeler og ulemper for løsningene beskrevet (Tabell 6.3).

Tabell 6.2: Funksjonsalternativer dørmekanisme

Alternativ A	Alternativ B	Alternativ C
Hengslet løsning. Rotasjonsbevegelse på dør.	Egen mekanisme for heising av døren vertikalt.	Dør plassert i skinneløsning for vertikal bevegelse.

Tabell 6.3: Fordeler og ulemper ved funksjonsalternativene for dørmekanisme

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A	Enkel mekanisme.	Krever tilstrekkelig med plass for at døren skal bli åpnet.
B	Lite plasskrevende.	Påkrevd egen mekanisme for åpning av døren, mest tidkrevende å få til.
C	Minst plasskrevende. Kan dra hele døren ut, for maksimal tilgang i kammeret.	Mulig risiko at det ikke blir tett i skinnen døren er plassert i, eller at døren setter seg fast i skinnen ved åpning eller lukking.

## Hylleløsning

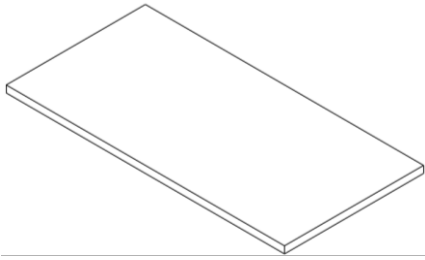
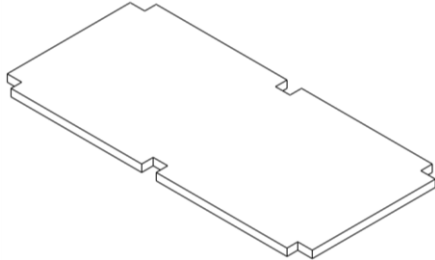
Utformingen av hyllene og innfestningsmekanisme på hyllene er undersøkt. Hyllene skal være utført i perforerte plater som er hyllevare.

## Utforming

Platene er forenklet ved at perforering ikke er tegnet, siden utformingen av hyllene i systemet var i fokus (Tabell 6.4). Fordeler og ulemper ved alternativene er videre beskrevet (Figur 6.5).



Tabell 6.4: Funksjonsalternativer hylleløsning

Alternativ A	Alternativ B
	
Hylle plassert mellom rammekonstruksjonen.	Hylle har utfylt rammekonstruksjonen ved tilhørende spor for rammekonstruksjonen.


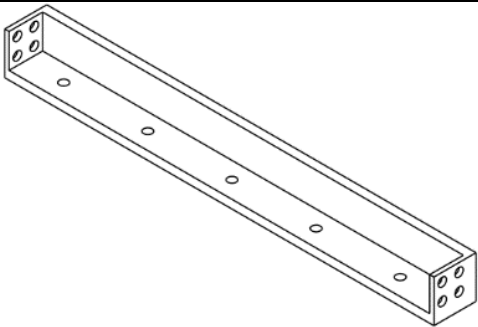
Tabell 6.5: Fordeler og ulemper ved funksjonsalternativer for hylleløsning

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A	Enkel løsning. Standard plate.	Ikke full utnyttelse av kammeret
B	Maksimal utnyttelse av kammeret	Mer tidkrevende å få utført.

## Festeanordning

To alternativer på festemekanismer til hylleløsningen er vurdert (Tabell 6.6), hvor fordeler og ulemper er beskrevet avslutningsvis (Tabell 6.7).

Tabell 6.6: Funksjonsalternativer for festeanordning hylleløsning

Alternativ A	Alternativ B
	
Standard hyllebrakett (Misumi, 2020).	Brakett for montering over hele bredden i kammeret

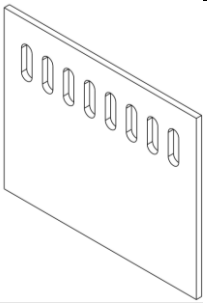
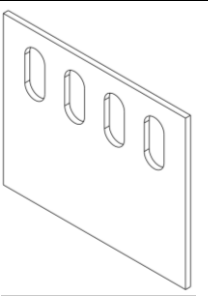
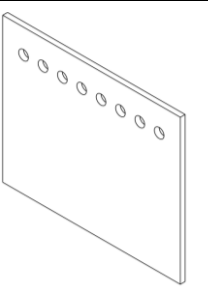
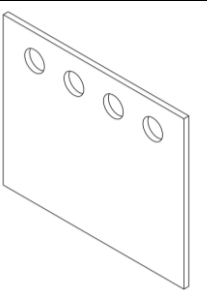
Tabell 6.7: Fordeler og ulemper ved funksjonsalternativer for festeordning hylleløsning.

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A	Enkel løsning som er hyllevarer.	Punktvis opplagring av hyllene, resultert i spenningskonsentrasjoner.
B	Større anleggsflate for opplagring i endene.	Mer tidkrevende å produsere. Risiko for redusert luftstrømning ved høy bakkant.

## Ventilering av luft

Luften tar opp fuktighet gjennom tørkeprosessen og sirkulasjon er nødvendig. Sirkulasjon av luften foregår gjennom ventilering, hvor er enkle alternativer på utforming er laget (Tabell 6.8). Fordeler og ulemper ved alternativene er så presentert (Tabell 6.9).

Tabell 6.8: Funksjonsalternativer for ventilering av luften i tørkekammeret

Alternativ A	Alternativ B	Alternativ C	Alternativ D
			
Små avlange hull	Store avlange hull	Små sirkulære hull	Store sirkulære hull

Tabell 6.9: Fordeler og ulemper ved funksjonsalternativer for ventilering

Alternativ	Fordeler	Ulemper
A	Høyest mulighet for regulering av luften.	Mest tidkrevende løsningen å få produsert.
B	Høy mulighet for regulering av luften.	Tidkrevende løsning å få produsert Lavere muligheter for regulering av luften sammenlignet med A.
C	Enkel produksjon. Gode muligheter for å regulere luften.	Mer tidkrevende å få produsert sammenlignet med alternativ D.
D	Enkleste løsningen å få produsert.	Få reguleringsmuligheter.

### 6.2.3. Tilbakemeldinger

Undertegnede oversendte funksjonsalternativene til prosjekteier for tilbakemeldinger. Tilbakemeldingene resulterte i at konseptet med en lukket beholder ble forkastet til fordel for et enklere konsept. Det nye konseptet er basert på en åpen løsning, for enklere tilgang til kakaobønnene med uendret tørkemetode (Gorjanski, 2020).

## 6.3. Andre konsept - tørkehylle

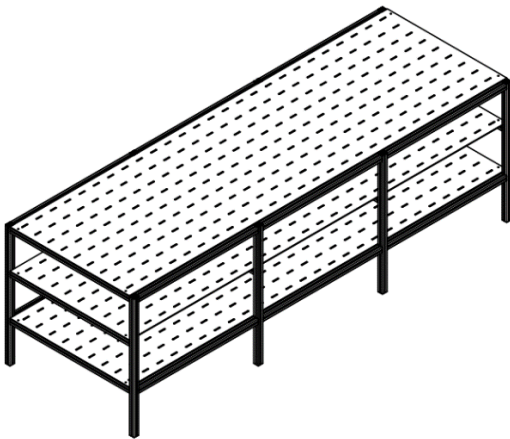
Prosjekteier ga enkle spesifikasjoner til utformingen av den åpne hylleløsningen. Utformingen bygget videre på elementer fra det første konseptet. Detaljer var ment bestemt på et senere tidspunkt gjennom et møte med prosjekteier (Gorjanski, 2020).

### 6.3.1. Spesifikasjoner

De metriske spesifikasjonene definert i kapittel 5.3. var fortsatt gjeldende. Utformingen er av tilsvarende rammekonstruksjon og enkleste hylleutforming fra første konsept.

### 6.3.2. Alternativ generert

Hylleløsning bestod av tre høyder og en rammekonstruksjon med økt fokus på robusthet i form av flere søyler på rammekonstruksjonen (Figur 6.2).



Figur 6.2: Alternativet til tørkehylle.

### 6.3.3. Tilbakemeldinger

For tilbakemeldinger avholdt undertegnede et møte med Stein Skjærhammer og Mike Fohba, hvor Mike deltok over Skype. En gjennomgang av konseptalternativet og ytterligere detaljer for videre arbeid ble bestemt.

I stedet for flere plan, skulle det være kun et plan til kakaobønnene. Flere plan gjorde operasjoner på bønnene i de mellomliggende planene vanskelig å utføre. Videre skulle det være

en karm rundt platen kakaobønnene er lagt på, til hensikt å holde kakaobønnene på tørkeren (Skjørshammer & Fohba, 2020).

## 6.4. Tredje konsept - tørkebord

Ut fra spesifikasjoner gitt av prosjekteier er et tørkebord skissert. Undertegnede oversendte skissen av tørkebordet til prosjekteier for tilbakemeldinger.

### 6.4.1. Spesifikasjoner

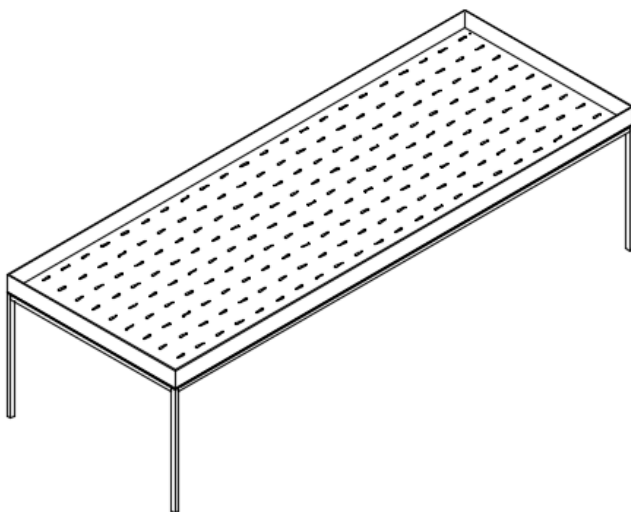
Mike ga de metriske spesifikasjoner for tørkebordet (Tabell 6.10). De nye spesifikasjonene ble gjeldende for det videre arbeidet, og grovspekifikasjonene definert i kapittel 5.3 utgikk.

Tabell 6.10: Metriske spesifikasjoner til tørkebordet.

Metrisk spesifisering	
Spesifikasjon	Mål
Høyde til plate tørkegodts er plassert på	700 mm
Bredde	1100 mm
Lengde	3000 mm
Høyde på karm	100 mm

### 6.4.2. Alternativ generert

Tørkebordet har søyler på hvert hjørne med en ramme rundt for å sikre en stødig og robust konstruksjon (Figur 6.3).



Figur 6.3: Alternativet til tørkebord

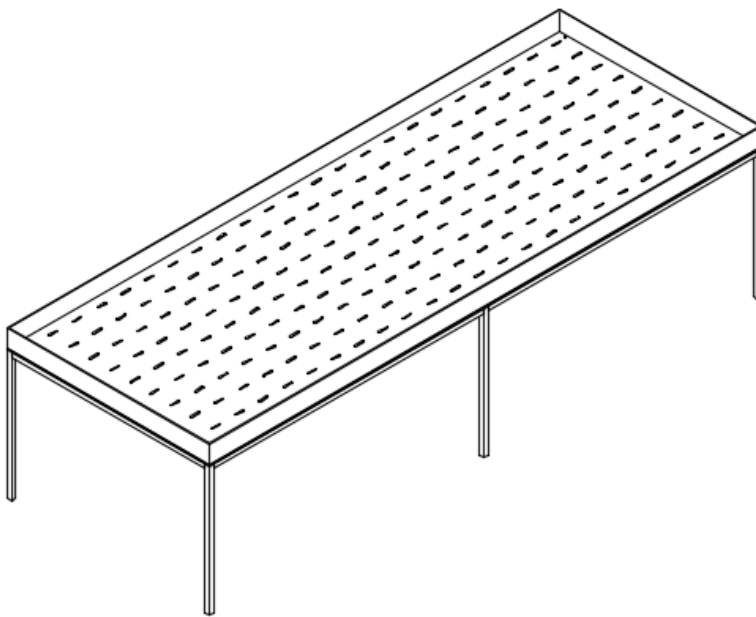
### 6.4.3. Tilbakemeldinger

Alternativet til et tørkebord ble oversendt prosjekteier. Mike vurderte tørkebordet, og var fornøyd med hovedtrekkene i utformingen. Det han imidlertid ønsket var et tredje ben, for økt stabilitet under bruk (Fohba, 2020b).

## 6.5. Endelig konsept

Gjennom utviklingsprosessen beskrevet i tidligere delkapitler, med god dialog med prosjekteier har konseptet endret seg fra et lukket tørkekammer, til en tørkehylle, til å bli et tørkebord med karm.

Tørkebordet er bygget opp av en rammekonstruksjon, en perforert plate hvor kakaobønnene er plassert og en karm for å holde kakaobønnene på tørkebordet (Figur 6.4). Konseptet har stort fokus på robusthet, enkel konstruksjonen og brukervennlighet.



Figur 6.4: Endelig utforming av valgt konsept - tørkebord

## 7. Materialvalg og dimensjonering

I dette kapitlet er materialvalg og drøftinger relatert til design av tørkebordet utført med tanke på forutsetningene til verkstedet og produkttegenskapene definert i kapittel 5.2.. Videre er dimensjonering av utvalgte komponenter i tørkebordet utført. For dimensjoneringen ble også relevant teori utredet.

### 7.1. Materialvalg

For videreutvikling av konseptet har en vurdering av aktuelle materialer vært nødvendig, siden materialer har ulike mekaniske og termiske egenskaper. I tillegg har materialene ulike egenskaper når det gjelder fremstilling av råemner, formbarhet og sammenføyning. Etter gjennomgang av egenskaper til aktuelle materialer, er hovedmateriale for bruk på tørkebordet valgt.

#### 7.1.1. Definerings av egenskaper

Per tørkesyklus skal 300 kg kakaobønner bli tørket, og et krav til materialstyrke er satt. Den ytre belastningen på 300 kg har også dannet grunnlaget for dimensjoneringen utført på et senere tidspunkt.

Gjennom tørkeprosessen har fuktighet blitt fjernet, som har resultert i et fuktig klima inne i tørkehuset. Krav om korrosjonsbestandighet er dermed nødvendig. Optimal temperatur for tørking av kakaobønnene er 60 °C, og materialene må dermed takle høye driftstemperaturer uten at egenskapene til materialet er endret.

Kompleksitet er sentralt for utformingen og alle hovedelementene er valgt utført i samme materiale. Ved bruk av kun et materiale er muligheten for galvanisk korrosjon redusert. Galvanisk korrosjon har forekommet når to ulike metaller er koblet sammen eller ulike legeringer av samme metall er i kontakt med hverandre (SNL, 2019). Galvanisk korrosjon er i hovedsak at korrosjon og oksygenreduksjon har foregått på ulike steder (SNL, 2019).

#### 7.1.2. Grovseleksjon av materiale

Utfra forutsetningene ved verkstedet og de definerte egenskapene over er egnede konstruksjonsmaterialer undersøkt. Mekaniske egenskaper (Tabell 7.1), samt noen termiske egenskaper og generelle egenskaper (Tabell 7.2) til de ulike materialene er vurdert.

Tabell 7.1: Mekaniske egenskaper til de aktuelle konstruksjonsmaterialene (Ashby, 2011; Ashby, 2013)

Material	E-modul [GPa]	Flytegrense [MPa]	Strekkfasthet [MPa]	Tetthet [kg/m <sup>3</sup> ]
Konstruksjonsstål*	200-215	250-395	345-580	7800-7900
Aluminiumslegeringer	68-82	30-500	58-550	2500-2900
Titanlegeringer	90-120	250-1245	300-1625	4400-4800
Rustfritt stål	189-210	170-1000	480-2240	7600-8100

\* Verdier for «low carbon steel» er benyttet.

Tabell 7.2: Termiske og generelle egenskaper til de aktuelle konstruksjonsmaterialene (Ashby, 2011; Ashby, 2013)

Material	Termisk konduktivitet [W/m·K]	Termisk ekspansjon [10 <sup>-6</sup> /°C]	Korrosjons- bestandighet	Pris (\$/kg)
Konstruksjonsstål*	49-54	11,5-13	Dårlig	0,63-0,7
Aluminiumslegeringer	76-235	21-24	God	1,5-1,7
Titanlegeringer	5-12	7,9-11	God	67-74
Rustfritt stål	11-19	13-20	God	6,5-7,2

\* Verdier for «low carbon steel» er benyttet.

Videre er det undersøkt egenskaper knyttet til formbarhet og sammenføyning:

### Konstruksjonsstål:

Konstruksjonsstål er en fellesbetegnelse for sveisbare legeringer av jern og karbon samt andre grunnstoffer (Norsk Stålforbund, u.å.). Dermed er konstruksjonsstål utbredt i konstruksjoner helt eller delvis sammenføyert ved bruk av sveising. I tillegg er konstruksjonsstål lett formbart og har gode maskineringsegenskaper.

### Aluminium:

Sveising av tynne elementer er ofte utfordrende på grunn av lavt smeltepunkt til aluminium. I tillegg er det et begrenset antall legeringer som er sveisbare, men til gjengjeld er egenskapene gode. Flere av aluminiumslegeringene har gode bearbeidingssegenskaper og lar seg enkelt forme

gjennom teknikker som for eksempel trekking, ekstrudering, valsing og trykking (Pedersen, 2018a).

### Titan:

Formbarhet og bearbeiding av titan er dårligere sammenlignet med stål. Fremstilling av titan er en kostbar og kompleks prosess (Johansen, 2012). Ulegert titan har veldig god sveisbarhet, men også legeringer av titan kan bli sveiset, oftest i glødet eller i dels utherdet tilstand (Johansen, 2012)

### Rustfritt stål:

Rustfritt stål er et stål levert med krom, som leder varme dårligere, og dermed opplevd vanskelig å bearbeide (Schuchardt Maskin, 2019). Det er ulike typer rustfritt stål; ferritisk, martensittisk og austinitisk-ferritisk. Av disse tre typene har ferritisk og martensittisk henholdsvis god og relativt god bearbeidingsevne, mens sistnevnte er vanskelig å bearbeide (Johansen, 2008; Schuchardt Maskin, 2019).

For valg av materiale er en seleksjonsmatrise benyttet for vurdering av de ulike egenskapene (Tabell 7.3). Poengskalaen er tilsvarende som for valg av tørkemetode i kapittel 6.1. med (-1), (0) og (1).

Tabell 7.3: Seleksjonsmatrise for valg av materiale

Egenskaper	Materiale			
	Konstruksjonsstål	Aluminiumslegeringer	Titanlegeringer	Rustfritt stål
Styrke	0	-1	1	1
Vekt	-1	1	0	-1
Korrosjonsbestandighet	-1	0	1	1
Pris	1	1	-1	0
Konduktivitet	0	1	-1	-1
Sum	-1	2	0	0

Aluminium kom best ut og er valgt som hovedmateriale. Det er flere fordeler ved aluminium som vekt, korrosjonsbestandighet og de termiske egenskapene. Aluminium er også materialet med nest lavest pris, gunstig for en kostnadseffektiv løsning. Ulempen til aluminium var noe lavere styrke sammenlignet med de andre alternativene.



### 7.1.3. Spesifikk vurdering av legering

Aluminium er utført i mange ulike legeringer, hvor en kostnadseffektiv løsning er i fokus. For en enkel og kostnadseffektiv løsning er det undersøkt hvilke legeringer standardkomponentene plater og profiler er utført i, og leverandører av de ulike komponentene (Tabell 7.4).

Tabell 7.4: Legeringer av hovedkomponentene til tørkebordet (Astrup, 2020c; Norsk stål, 2020; Tibnor, 2019)

Komponent	Standard	Legering	Herdetilstand	Leverandør
Perforert plate	EN AW	5052	H34*	Norsk Stål, Astrup
Perforert plate	EN AW	5754	H12/H22/H111*	Norsk Stål, Astrup
Profil	EN AW	6060	T6	Tibnor, Norsk Stål, Astrup
Profil	EN AW	6082	T6	Tibnor, Norsk Stål, Astrup
Plate	EN AW	1050A	H14/H24	Norsk Stål, Astrup, Tibnor
Plate	EN AW	1200	H14/H24	Norsk Stål
Plate	EN AW	5052	H24/H34/H22/H32/H111**	Norsk Stål, Astrup
Plate	EN AW	5754	H24/H34/ H22/H32/H111**	Norsk Stål, Astrup, Tibnor
Plate	EN AW	6082	T6	Norsk Stål, Astrup, Tibnor

\*Astrup oppga herdetilstand

\*\*Norsk Stål oppga i tillegg herdetilstanden H111

For videre valg er legeringene i 1000-serien ekskludert, for å benytte legeringer nært hverandre med tanke på redusert mulighet av galvanisk korrosjon. Det er undersøkt flytegrense og strekkfasthet til de aktuelle legeringene av de ulike komponentene (Tabell 7.5).

Tabell 7.5: Mekaniske egenskaper aktuelle aluminiumslegeringer (Astrup, 2012)

Standard	Legering	Herdetilstand	Flytegrense [MPa]	Strekfasthet [MPa]	Komponent
EN AW	5052	H22/H32	130	210	Plate
		H24/H34	150	230	Perforert plate, plate
		H111	65	170	Plate
EN AW	5754	H22/H32	130	220	Perforert plate, plate
		H24/H34	160	240	Plate
		H111	80	190	Plate
EN AW	6060	T6	150	190	Profiler
EN AW	6082	T6	250	290	Profiler, plate

For perforert plate er aluminiumslegeringen 5052-H34 valgt, og aluminiumslegeringen 6082-T6 er valgt på resterende komponenter. Valget av aluminiumslegeringer er tatt utfra høyeste flytegrense og strekkfasthet til de ulike komponentene definert i Tabell 7.5.

## 7.2. Utforming tverrsnitt

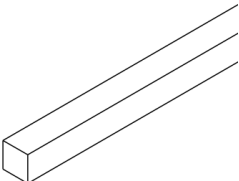
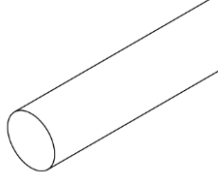
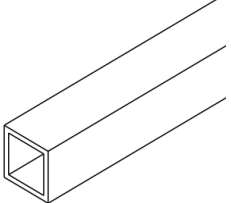
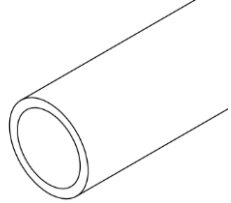
Utformingen av tverrsnittet har innvirkning på designet av tørkebordet og var dels avhengig av materialet valgt. Aluminium har ulike produksjonsmetoder, resultert i mange mulige tverrsnittsutførelser. Karm og perforert plate er valgt utført i plater med samme tykkelse, og utformingen til komponentene på rammekonstruksjonen er av interesse for videre drøfting.

### 7.2.1. Ulike utførelser

Lasten har medført trykk og bøyning på rammekonstruksjonen, og en viss risiko for knekking av søylene. Bjelkeelementene til rammekonstruksjonen er påkjent trykk i overkant og strekk i underkant av tverrsnittet. Påkjenningene på komponentene er viktig å ta hensyn til ved valg av tverrsnitt i form av høyeste mulig areal, annet arealmoment og motstandsmoment.

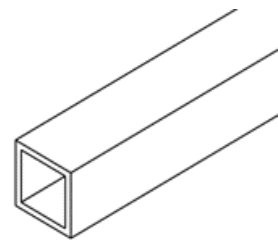
For en enkel og kostnadseffektiv løsning er standardkomponenter undersøkt. Standard profilutførelser som firkantbolt og rund bolt, rør og firkantør er alternativene undersøkt (Tabell 7.6). Standardkomponenter sikrer en enkel konstruksjon og utførelsene er hyllebare hos Norsk stål, Astrup og Tibnor (Astrup, 2020c; Norsk stål, 2020; Tibnor, 2019).

Tabell 7.6: De ulike tverrsnitts utformingene til rammekonstruksjon.

Firkantbolt	Rund bolt	Firkantrør	Rør
			

### 7.2.2. Valgt utforming

De hule profilene er mer effektive per vektenhet enn de solide profilene, da materialet er plassert der påkjenningene er størst (Magnussen, 2018). Firkantrøret ga også stor anleggsflate ved sammenføyning sammenlignet med runde profiler, uten behov for bearbeiding. Valgt tverrsnittsutfoming er dermed firkantrør (Figur 7.1). Det er antatt at standardkomponentene er tilgjengelig også i Kamerun, siden de er hyllevare hos flere norske distributører.



Figur 7.1: Valgt tverrsnitt; firkantrør

## 7.3. Grunnlagsberegninger

Etter valgt materialtype og tverrsnittsutfoming kunne beregninger på konstruksjonen utfra definert ytre belastning bli utført. Beregninger på opplagerkrefter og dimensjonering av rammekonstruksjonen og perforert plate er utført. Rammekonstruksjonen er også kontrollert mot knekking.

### 7.3.1. Opplagerkrefter

Tørkegodset på 300 kg kakaobønner danner grunnlaget for dimensjonering. Massen med tørkegodset er omgjort til en jevnt fordelt last ved bruk av formelen:

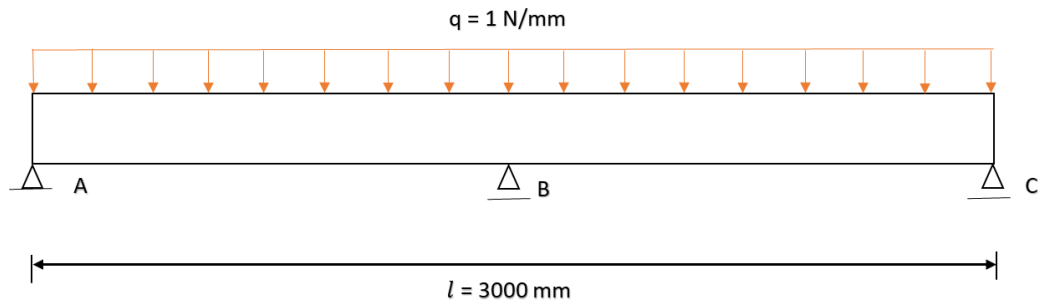
$$q = \frac{m \cdot g}{l} \quad (7.1)$$

Hvor  $m$  er massen til tørkegodset,  $g$  er tyngdeakselerasjonen og  $l$  er total lengde på tørkeren.

$$q = \frac{300 \cdot 9,81}{3000} = 0,981 \frac{N}{mm}$$

Videre i beregningene er det forenklet til at den den jevnt fordelte lasten er 1 N/mm, tilsvarende en punktlast på 3000 N.

For beregning av opplagerkreftene i søylene til rammekonstruksjonen er systemet forenklet slik at tremomentmetoden kunne bli benyttet (Figur 7.2). Tremomentmetoden er en dimensjoneringssteknikk for fastlegging av opplagerkrefter og momenter av statisk ubestemte bjelker (Terjesen, 2019a).



Figur 7.2: Forenklet tørkebord med jevnt fordelt last (tørkegods) og tre opplagringer

På generell basis er tremomentlikningen uttrykt på følgende måte (Terjesen, 2019a):

$$M_A \cdot l_1 + 2 \cdot M_B \cdot (l_1 + l_2) + M_C \cdot l_2 = - \sum \frac{6 \cdot A_1 \cdot \bar{a}_1}{l_1} - \sum \frac{6 \cdot A_2 \cdot \bar{b}_2}{l_2} \quad (7.2)$$

For tørkebordet var det ingen moment i punkt A og C, og med lastsituasjon 3 gjeldende for hver side av punkt B (vedlegg 3) er:

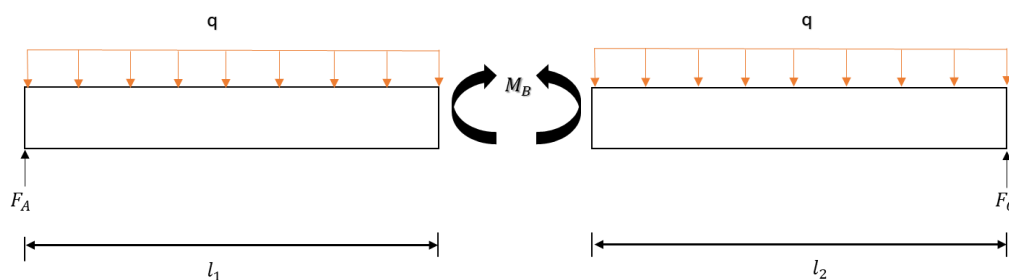
$$2 \cdot M_B \cdot (l_1 + l_2) = - \frac{q \cdot l_1^3}{4} - \frac{q \cdot l_2^3}{4}$$

$$2 \cdot M_B \cdot (1\,500 + 1\,500) = - \frac{1 \cdot 1\,500^3}{4} - \frac{1 \cdot 1\,500^3}{4}$$

$$6\,000 \cdot M_B = -1\,687\,500\,000$$

$$M_B = -281\,250 \text{ Nmm}$$

Opplagerkreftene er funnet ved å sette opp en momentlikning om punktet B for hvert bjelkespenn (Figur 7.3):



Figur 7.3: De ulike bjelkespennene på hver sin side av momentet i punkt B.

Spenn 1 (venstre side av momentet i B):

$$\sum M_{BV} = 0: \quad (7.3)$$

$$M_B + F_A \cdot l_1 - q \cdot l_1 \cdot \frac{l_1}{2} = 0$$

$$\rightarrow F_A = \frac{q \cdot \frac{l_1^2}{2} - M_B}{l_1} = \frac{1 \cdot \frac{1\,500^2}{2} - 281\,250}{1\,500}$$

$$F_A = 562,5 \text{ N}$$

Den jevnt fordelte lasten virker likt over hele platen, og på grunn av symmetri er:

$$F_C = F_A = 562,5 \text{ N}$$

For hele bjelken gjelder kraftbalansen:

$$\uparrow \sum F_z = 0: \quad (7.4)$$

$$F_A + F_B + F_C - q \cdot l = 0$$

$$F_B = q \cdot l - F_A - F_C$$

$$F_B = 1 \cdot 3\,000 - 562,5 - 562,5$$

$$F_B = 1\,875 \text{ N}$$

Rammekonstruksjonen består av totalt 6 søyler, og opplagerkraften per søyler er:

$$F_A = F_C = \frac{562,5}{2} = \mathbf{281,25 \text{ N}}$$

$$F_B = \frac{1875}{2} = \mathbf{937,5 \text{ N}}$$

### 7.3.2. Dimensjonering av rammeelementene

Dimensjonering av elementene i rammekonstruksjonen er forenklet ved å se på opplagerkraften og momentet beregnet i punkt B i kapittel 7.3.1.. Konstruksjonen er videre forenklet ved at alle komponenter skal være utført i samme dimensjon for tverrsnittet.

Spenning opptredende fra opplagerkraften er definert som:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (7.5)$$

Spenningen opptrædende fra bøyemomentet er definert som:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W} \quad (7.6)$$

Materialeegenskaper for legeringen 6082-T6 er hentet fra tabell 7.5. Det er valgt å ha en sikkerhet mot flyt  $n_f = 2$ , som gir tillat spenning:

$$\sigma_{till} = \frac{\sigma_f}{n_f} \quad (7.7)$$

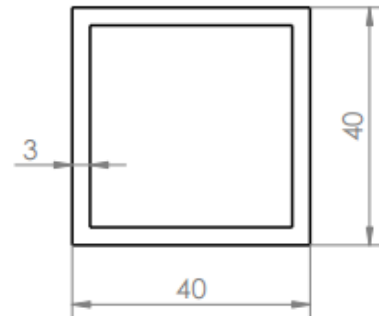
$$\sigma_{till} = \frac{250}{2} = 125 \text{ MPa}$$

Nødvendig areal og motstandsmoment er beregnet ved å snu om formel (7.5) og (7.6), med tillat spenning definert fra formel (7.7) satt inn:

$$A = \frac{937,5}{125} = 7,48 \approx 7,5 \text{ mm}^2$$

$$W = \frac{281\,250}{125} = 2\,250 \text{ mm}^3$$

Nødvendig areal og motstandsmoment på rammekonstruksjonen var henholdsvis  $7,5 \text{ mm}^2$  og  $2\,250 \text{ mm}^3$ . For tverrsnittet er det undersøkt minste standard firkantprofil tilgjengelig fra leverandør (Astrup, 2020b). Minste firkantprofil er utført i dimensjonene presentert (Figur 7.4). Areal, motstandsmoment og annet arealmoment er beregnet for å kontrollere at profilen har tilstrekkelige dimensjoner:



Figur 7.4: Dimensjoner til valgt tverrsnitt

$$A = B \cdot H - b \cdot h \quad (7.8)$$

$$A = 40 \cdot 40 - (34 \cdot 34) = 444 \text{ mm}^2$$

$$W = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{6 \cdot H} \quad (7.9)$$

$$W = \frac{40 \cdot 40^3 - 34 \cdot 34^3}{6 \cdot 40} = 5\,098,6 \text{ mm}^3$$

$$I = \frac{B \cdot H^3 - b \cdot h^3}{12} \quad (7.10)$$

$$I = \frac{40 \cdot 40^3 - 34 \cdot 34^3}{12} = 101\,972 \text{ mm}^4$$

Arealet og motstandsmomentet til profilet presentert i Figur 7.4 er høyere enn de nødvendig beregnede verdiene og er dermed valgt som dimensjon på tverrsnittet til komponentene.

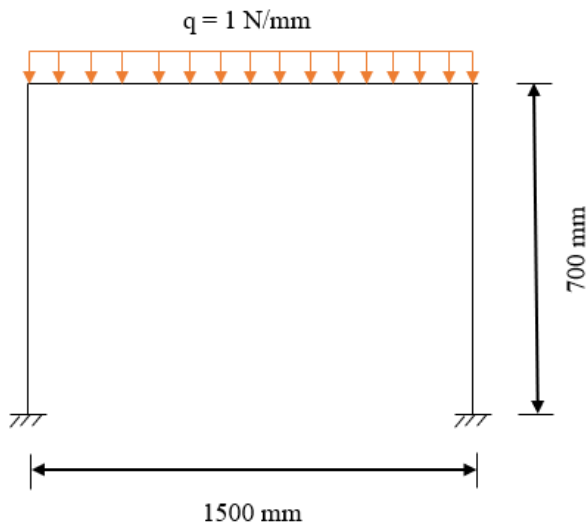
For videre beregninger er også materialegenskaper til aluminium nødvendige (Tabell 7.7).

Tabell 7.7: Generelle materialegenskaper til aluminium (Callister & Rethwisch, 2015).

Materialegenskap	Verdi	Enhet
E-modul	70 000	MPa
Poissons tall	0,33	-

### 7.3.3. Knekking

For knekkeberegningen er det benyttet metode 1: Forenklet interaksjonsformel (Terjesen, 2019b). Metoden har blitt prøvd mot Eurokode 3 og havnet på konservativ side med en interaksjonskoeffisient satt til 1,6 (Terjesen, 2019b). Prinsippet går ut på kartlegging av trykkraft og største moment søylen er utsatt for, hvor verdiene er satt inn i en interaksjonsformel med en sikkerhet mot knekking lik 3 (Terjesen, 2019b). For knekkeberegningen er rammekonstruksjonen forenklet ved å se på halve langsiden som en portalramme (Figur 7.5).



Figur 7.5: Forenklet del av rammekonstruksjon

Forenklet interaksjonsformel er definert som (Terjesen, 2019b):

$$\frac{F}{F_{k,till}} + \frac{1,6 \cdot M_b}{M_{b,maks}} \leq 1 \quad (7.11)$$

Der  $F$  er knekklasten på søylen,  $F_{k,till}$  er tillatt knekkraft etter Euler eller Tetmajer med sikkerhetsfaktor mot knekking,  $M_b$  er det største bøyemomentet på søylen og  $M_{b,maks}$  er det største momentet søylen tålte før flyting opptrådte i de ytterste fiberne etter elastisitetsteorien. Faktoren 1,6 har ivaretatt interaksjonen mellom trykkraft og moment (Terjesen, 2019b). Kraften per søyle er definert som:

$$F = \frac{q \cdot l}{2} \quad (7.12)$$

$$F = \frac{1 \cdot 1500}{2} = 750 \text{ N}$$

Treghetsradien ( $i$ ) for et tverrsnitt er definert som kvadratrota av tverrsnittets annet arealmoment ( $I$ ) dividert med tverrsnittsarealet ( $A$ ):

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (7.13)$$

$$i = \sqrt{\frac{101\,972}{444}} = 15,1548 \approx 15,15$$

Slankhetsforholdet ( $\lambda$ ) for en trykkstav er definert som stavens knekk lengde ( $l_k$ ) dividert med stavens minste treghetsradius:

$$\lambda = \frac{l_k}{i} \quad (7.14)$$

Knekk lengden til søylen er definert ved:

$$l_k = \kappa \cdot l \quad (7.15)$$

Verdien  $\kappa$  er funnet ved bruk av diagram for å finne knekk lengder (vedlegg 4). For å finne korrekt knekk lengde er en inngangsverdi,  $\rho$ , nødvendig å beregne:

$$\rho = \eta \cdot \frac{b \cdot I_s}{l \cdot I_R} \quad (7.16)$$

Hvor  $b$  er bjelkens lengde,  $l$  er søylens lengde,  $I_s$  og  $I_R$  er annet arealmoment til henholdsvis søyle og bjelke.

Verdien for  $\eta$  er lest av fra korrekt situasjon (knekk lengdekurve d) i diagrammet (vedlegg 4):

$$\eta = 0,5$$

Beregner inngangsverdien med formel (7.16), annet arealmoment er likt for bjelke og søyle:



$$\rho = 0,5 \cdot \frac{1500}{700} = 1,0714 \approx 1,07$$

Avlesning av  $\kappa$  i diagram for rammen og bruk av formel (7.15) ga knekk lengden:

$$\kappa \approx 1,3$$

$$l_k = 1,3 \cdot 700 = 910 \text{ mm}$$

Ved bruk av formel (7.14) er  $\lambda$  beregnet:

$$\lambda = \frac{910}{15,15} = 60,066 \approx 60,07$$

Tillatt knekklast er beregnet etter Euler eller Tetmajer og er bestemt av verdien til  $\lambda$ . Gyldighetsområdet til Euler er:

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_p}} \quad (7.17)$$

For å finne gyldighetsområdet til Euler er det nødvendig å beregne proporsjonalitetsgrensen:

$$\sigma_p \approx 0,8 \cdot \sigma_f \quad (7.18)$$

Flytegrensen for aluminiumslegeringen 6082-T6 er hentet fra tabell 7.5 og proporsjonalitetsgrensen er beregnet med formel (7.18):

$$\sigma_p = 0,8 \cdot 250 = 200 \text{ MPa}$$

Gyldighetsområdet til Euler er videre beregnet med formel (7.18) og sammenlignet med beregnet verdi fra formel (7.14) for vurdering av hvilken metode knekklasten er beregnet etter:

$$\lambda \geq \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot 70\,000}{200}}$$

$$\lambda \geq 58,774 \approx 58,8 \rightarrow \text{Euler er gjeldende}$$

Etter Euler er knekkraften definert som:

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{l_k^2} \quad (7.19)$$

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot 70\,000 \cdot 101\,972}{910^2} = 85\,073,82 \text{ N}$$

Tillatt knekkraft er knekkraften dividert med sikkerhet mot knekking:

$$F_{k,till} = \frac{F_k}{n_k} \quad (7.20)$$

$$F_{k,till} = \frac{85\,073,82}{3} = 28\,357,94 \text{ N}$$

Beregner det største momentet når de ytterste fiberne i profilet har nådd flytegrensen utfra formel (7.6):

$$\sigma_{b,maks} = \sigma_f = \frac{M_{b,maks}}{W}$$

$$M_{b,maks} = \sigma_f \cdot W = 250 \cdot 5098,6 = 1\,274\,650 \text{ Nmm}$$

Største opptredende moment i rammen er beregnet utfra formler for statisk ubestemt ramme (vedlegg 5) (Terjesen, 2019a).

$$M_A = \frac{Q \cdot l}{12 \cdot (k + 2)} \quad (7.21)$$

$$M_B = \frac{Q \cdot l}{6 \cdot (k + 2)} \quad (7.22)$$

Hvor k er definert som:

$$k = \frac{I_l}{I_h} \cdot \frac{h}{l} \quad (7.23)$$

Annet arealmoment for bjelke og søyle er som nevnt like og ved bruk av formel (7.24) ble:

$$k = \frac{h}{l} = \frac{700}{1500} = \frac{7}{15}$$

Momentene er dermed beregnet ved bruk av henholdsvis formel (7.22) og (7.23):

$$M_A = \frac{1 \cdot 1500 \cdot 1500}{12 \cdot \left(\frac{7}{15} + 2\right)} = 76\,013,51 \text{ Nmm}$$

$$M_B = \frac{1 \cdot 1500 \cdot 1500}{6 \cdot \left(\frac{7}{15} + 2\right)} = 152\,027,03 \text{ Nmm}$$

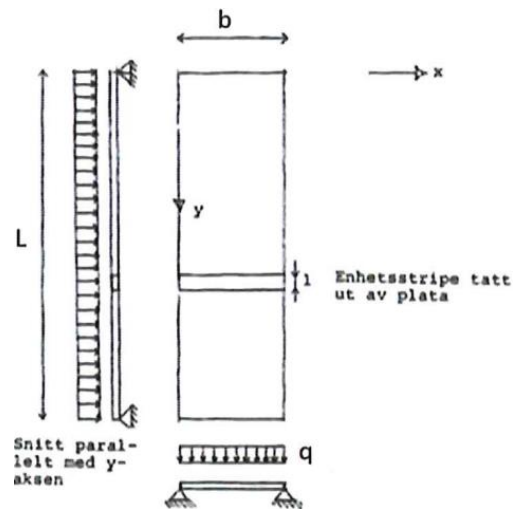
Interaksjonsformelen (7.11) ga verdien:

$$\frac{750}{28\,357,94} + \frac{1,6 \cdot 152\,027,03}{1\,274\,650} \approx \mathbf{0,22}$$

Det er dermed ingen fare for knekking under gitte betingelser etter metode 1.

### 7.3.4. Nedbøyning og spenninger i perforert plate

For platen er nedbøyningen antatt størst mellom opplagringene (søylene til rammekonstruksjonen). På grunn av symmetri er nedbøyningen lik på hvert spenn, og beregningene er forenklet ved å kun se på det ene spennet av tørkebordet. Beregning av spenning og nedbøyning i platen er utført med platestripemetoden. Platestripemetoden er basert på å ta ut en platestripe med bredde på 1 mm mellom langsidene, og se på stripen som en bjelke (Figur 7.6) (Terjesen, 2019b).



Figur 7.6: Enhetsstripe fra fritt opplagret plate

#### Spenning i plate

Formlene benyttet er hentet ut fra formelhefte for fast opplagret bjelke (Terjesen, 2019a). Det er undersøkt minst nødvendige platetykkelse, før platetykkelse er valgt og spenning opprettede i platen er beregnet. Spenningen opprettede er definert fra formel (7.6):

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

Hvor bøyemomentet og motstandsmomentet er definert som:

$$M_b = \frac{q \cdot b^2}{24} \quad (7.24)$$

$$W_b = \frac{1 \cdot t^2}{6} \quad (7.25)$$

Høyeste tillate spenning opprettede i plata er satt utfra sikkerhet mot flyt tilsvarende som for rammekonstruksjonen. Dette ga:

$$\sigma_b = \frac{\sigma_f}{n_f} = \frac{q \cdot b^2}{24} \cdot \frac{6}{1 \cdot t^2} = \frac{p \cdot b^2}{4 \cdot t^2} \quad (7.26)$$

Hvor p er jevnt fordelt trykk på platen, definert som:

$$p = \frac{q}{b} = \frac{1}{1100} \approx 0,001 \frac{N}{mm^2}$$

Ved å løse formel (7.27) med hensyn på tykkelsen (t), var minste nødvendige tykkelse:

$$t_{min} \geq \sqrt{\frac{1 \cdot p \cdot b^2 \cdot n_f}{4 \cdot \sigma_f}} \quad (7.27)$$

Hvor flytespenning fra tabell 7.5 og sikkerhet mot flyt definert i kapittel 7.4.2. benyttet, ble minste platetykkelse ved bruk av formel (7.28):

$$t_{min} \geq \sqrt{\frac{0,001 \cdot 1100^2 \cdot 2}{4 \cdot 150}}$$

$$t_{min} \geq \mathbf{2,01 \text{ mm}}$$

Platetykkelse er valgt til 5 mm, en tykkelse Astrup leverte (Astrup, 2020a). Spenningen opp tredende i platen var ved bruk av formel (7.27):

$$\sigma_b = \frac{1 \cdot 0,001}{4} \cdot \left(\frac{1100}{5}\right)^2 = \mathbf{12,1 \text{ MPa}}$$

$\sigma_f = 150 \text{ MPa} > \sigma_b$ , som tilsa at det ikke var noen fare for flyt.

### Nedbøyning

Ved beregning av nedbøyning ble formel for korrekt lastsituasjon funnet (Terjesen, 2019a):

$$f = \frac{p \cdot b^4}{384 \cdot E \cdot I} \quad (7.28)$$

Korrigert E-modul ( $E'$ ) er benyttet for å ta hensyn til forhindret tverrkontraksjon (Terjesen, 2019b):

$$E' = \frac{E}{1 - \mu^2} \quad (7.29)$$

Dette ga formel for nedbøyning:

$$f = \frac{p \cdot b^4 \cdot 12 \cdot (1 - \mu^2)}{384 \cdot E \cdot b \cdot t^3} \quad (7.30)$$

Ved innsetting av verdier i formel (7.31) er nedbøyningen i platen:

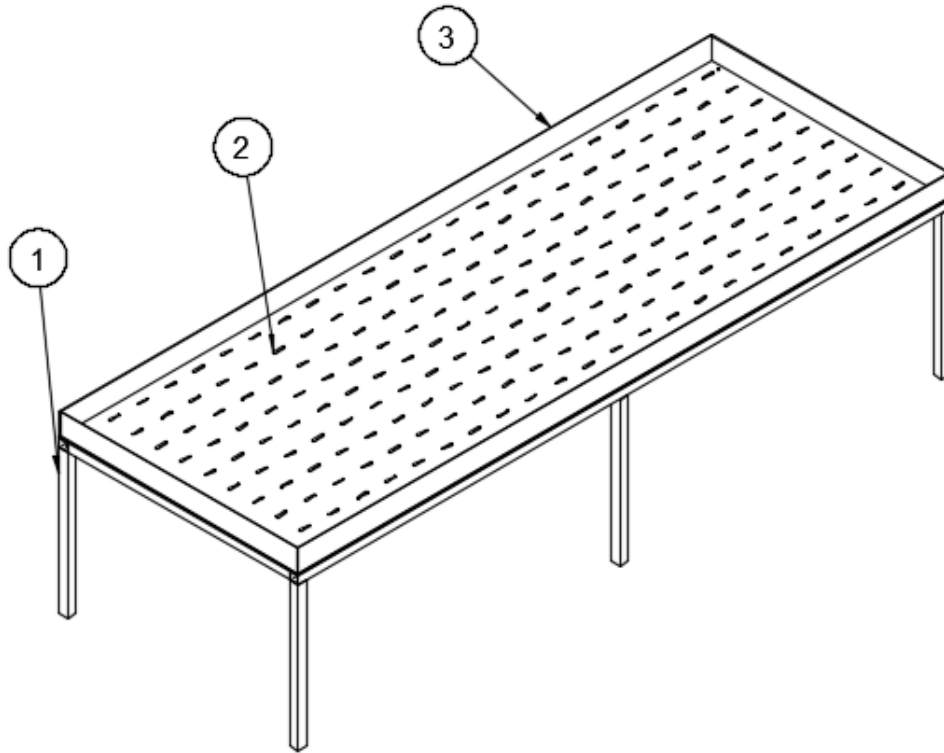
$$f = \frac{0,001 \cdot 1100^4 \cdot 12 \cdot (1 - 0,33^2)}{384 \cdot 70\,000 \cdot 1 \cdot 5^3}$$

$$f = 4,659 \approx \mathbf{4,66 \text{ mm}}$$

## 8. Konseptdesign og produktarkitektur

I dette kapitlet er en sammenstilling av tørkebordet og hovedelementene i tørkebordet presentert utfra valgt konseptutforming og tverrsnittutforming.

### 8.1. Sammenstilling



Figur 8.1: Sammenstillings-tegning av tørkebordet

Tabell 8.1: Hovedkomponenter i sammenstilling med nummerering

Nr.	Hovedkomponent
1	Rammekonstruksjon
2	Perforert plate
3	Karm

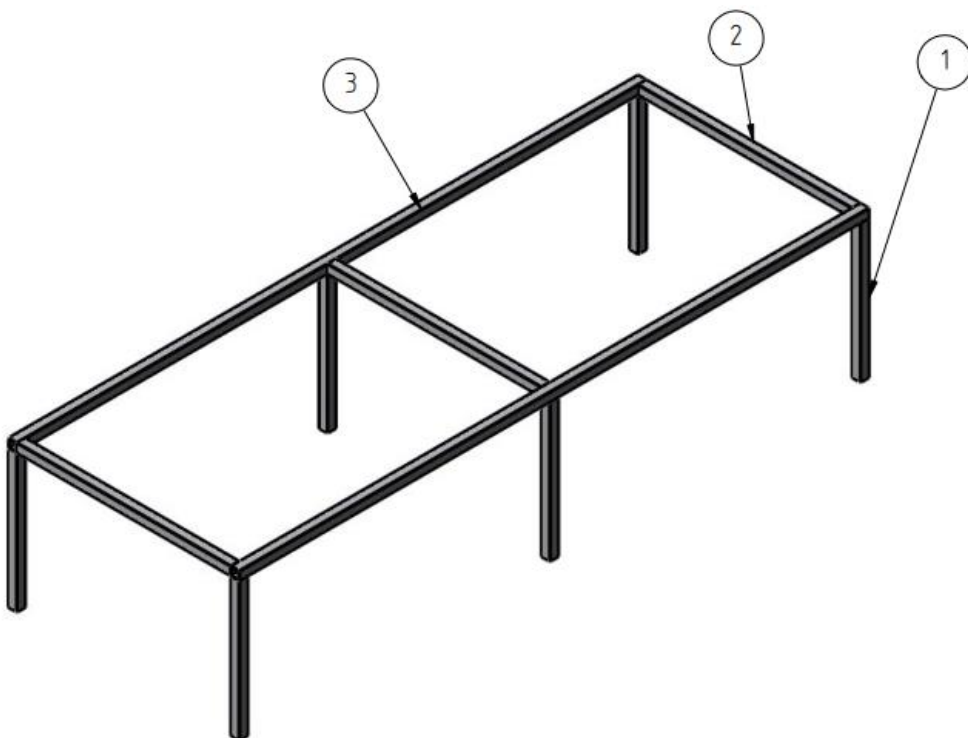


Figur 8.2: Render av tørkebordet

## 8.2. Design av hovedelementer

Hovedelementene i tørkebordet er de tre komponentene tørkebordet består av og presentert i tabell 8.1. Designet til hovedelementene er videre presentert.

### Rammekonstruksjon

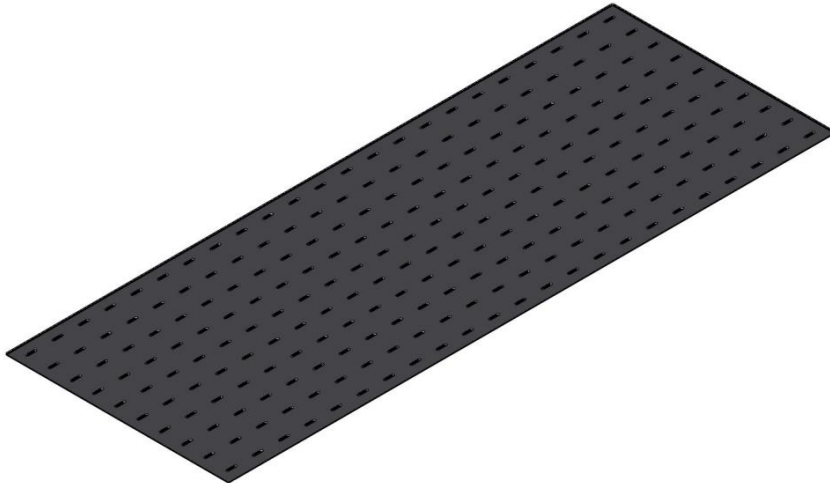


Figur 8.3: Rammekonstruksjon for tørkebordet

Tabell 8.2: Komponentene i rammekonstruksjon, nummerert og med antall komponenter påkrevd

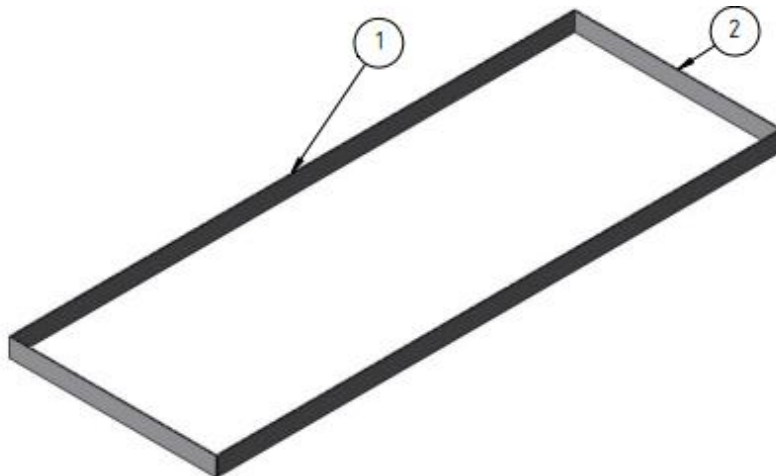
Nr.	Komponent	Antall komponenter
1	Søyle	6
2	Bredde bjelke	3
3	Lengde bjelke	2

### Perforert plate



Figur 8.4: Perforert plate hvor tørkegodset har blitt plassert.

### Karm



Figur 8.5: Karm rundt perforert plate, med funksjon å holde tørkegodset på tørkeren.

Tabell 8.3: Komponentene i karmen, nummerert og med antall komponenter påkrevd

Nr.	Komponent	Antall komponenter
1	Lengde plate	2
2	Bredde plate	2

## 9. Robusthet og strømningsanalyse

I dette kapitlet er det utført FEM-analyser for verifisering av håndberegninger utført i kapittel 7.3., og avdekking av eventuelle konstruksjonsmessige svakheter. Videre er en strømningsanalyse av tørkehuset utført for å undersøke temperaturfordelingen ved ønsket oppsett, og om optimal tørketemperatur definert i kapittel 4. er oppnåelig.

### 9.1. Strukturanalyse med FEM

Målet er å analysere komponentene med hensyn på jevnførende spenning (von mises), deformasjon og knekking (kun rammekonstruksjon) utfra ytre belastning. Resultatene fra analysen er sammenlignet med håndberegningene fra kapittel 7.3.. Det er forventet at spenningene fra analysene er høyere enn håndberegningene hvor forenklede tverrsnitt er benyttet og kjerver ikke er tatt høyde for. Kjerver bidrar til økt lokale spenningskonsentrasjoner.

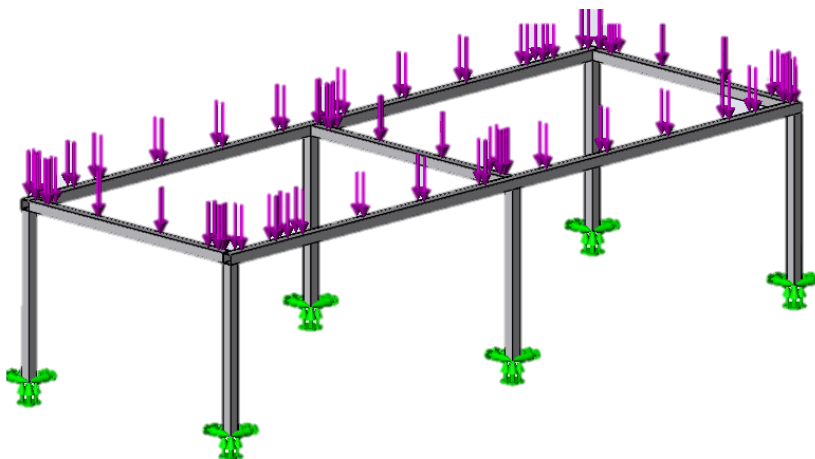
Spenningene beregnet for hånd er overflatespenninger, og gjennom FEM-analysene er et mer detaljert spenningsbilde presentert, for økt forståelse av påvirkningen til ytre belastning.

#### 9.1.1. Rammekonstruksjon

For verifikasjon av beregningene utført på rammekonstruksjonen i kapittel 7.3.2. og 7.3.3. er det utført en statisk analyse og en analyse for knekking.

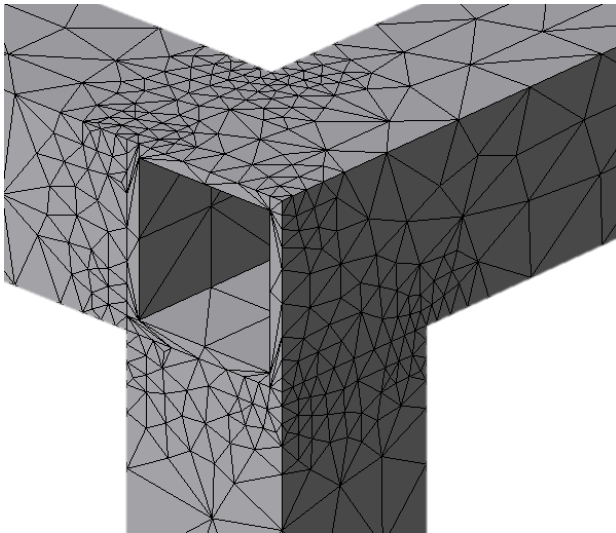
##### Opplagring, laster og mesh

Rammekonstruksjonen er fast opplagret i bunn av alle søylene (Figur 9.1). Opplagringen har medført låsing mot bevegelse og rotasjon i alle frihetsgrader. I realiteten betyr fast opplagring at rammekonstruksjonen ikke har noen mulighet til forflytning. Elementstørrelse på meshet ble satt til 20 mm (Figur 9.2).



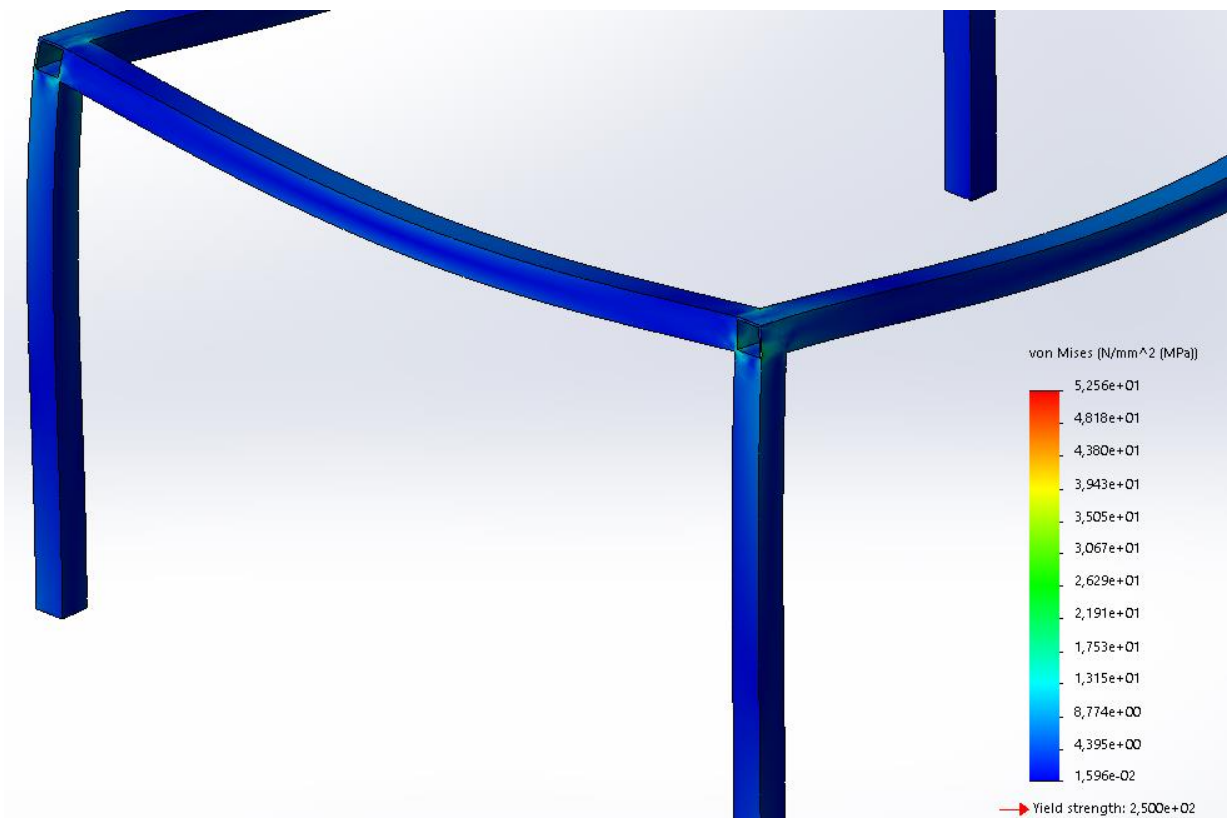
Figur 9.1: Fast opplagring er vist med grønne piler. Påført 3 000 N som ytre belastning, vist med lilla piler.





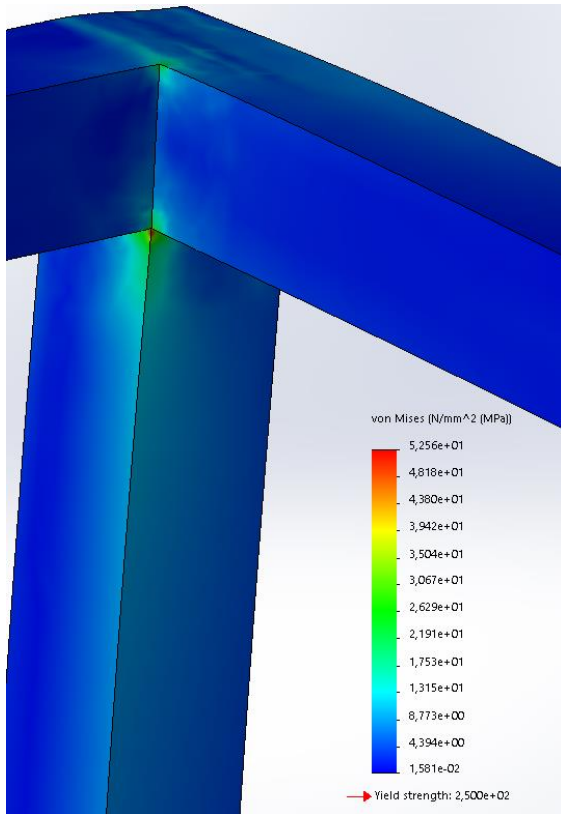
Figur 9.2: Mesh utført med elementstørrelse 20 mm. Ved overganger ble det automatisk generert i mindre dimensjoner for et mer nøyaktig resultat.

### Jevnførende spenning



Figur 9.3: Jevnførende spenning, hvor maks spenning er 52,56 MPa.

Høyeste jevnførende spenning er 52,56 MPa (Figur 9.3). Flytegrensen til materialet er 250 MPa, som resulterer i en sikkerhet mot flyt på tilnærmet 4,7. Høyeste spenning er opptrdende som følge av en spenningskonsentrasjon hvor komponentene er sammenføyet (Figur 9.4).



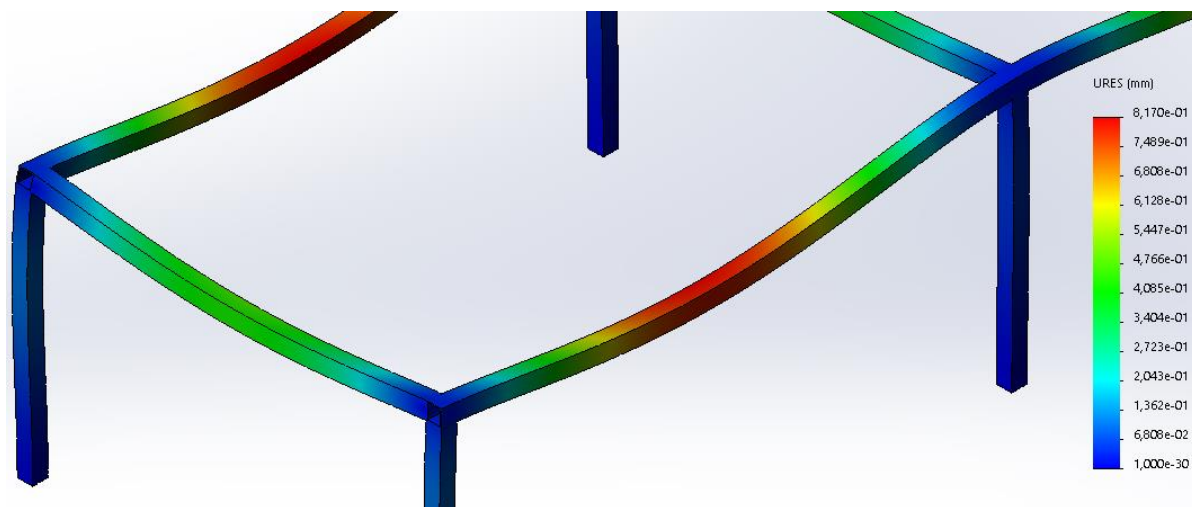
Figur 9.4: Spenningskonsentrasjon har resultert i maks spenning på 52,56 MPa.

For et bedre inntrykk av den jevnførende spenningen, er den undersøkt på overflaten til søylen (Figur 9.5). Gjennomsnittlig spenning var tilnærmet 4,34 MPa, betydelig lavere enn høyeste jevnførende spenning. Dette illustrer godt virkningen av en kjerv.

	Value	
Sum	9,587e+03	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Avg	4,336e+00	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Max	5,256e+01	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Min	3,183e-02	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
RMS	6,007e+00	N/mm <sup>2</sup> (MPa)

Figur 9.5: Tabell-sammendrag for overflatespenninger på søylen.

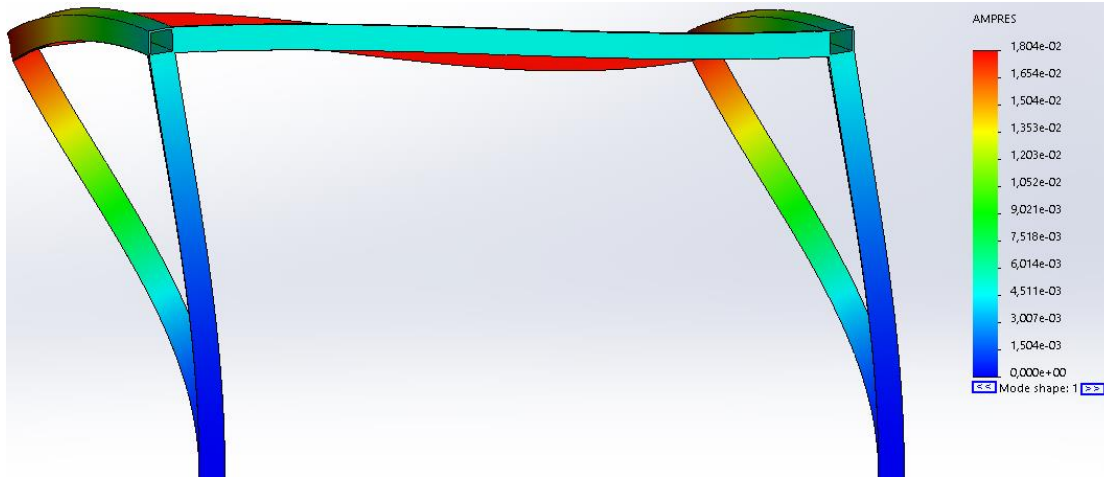
### Nedbøyning



Figur 9.6: Nedbøyning av rammekonstruksjon. Maks nedbøyning var 0,817 mm.

Maks nedbøyning på rammen er tilnærmet 0,82 mm (Figur 9.6). Det er ikke utført noen håndberegninger for sammenligning av resultatet.

### Knekking



Figur 9.7: Resultat av knekkanalyse. Lasten er multiplisert med en faktor på 118,14 for at knekking skulle oppstå.

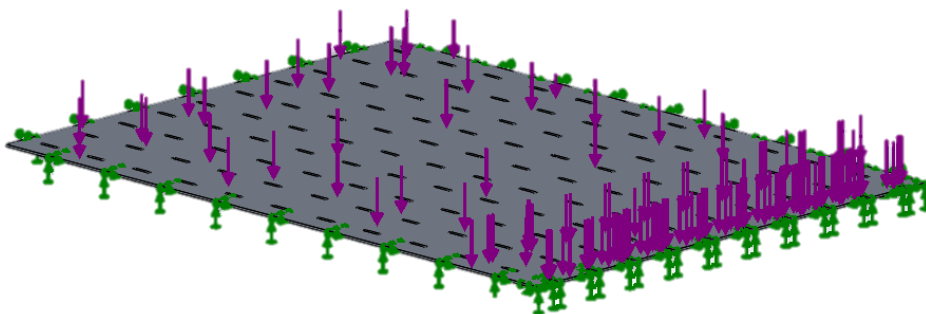
For at knekking skulle oppstå var nødvendig faktor multiplisert med lasten 118,14 (Figur 9.7). Håndberegningen ga en interaksjonsverdi tilnærmet 0,22.

### 9.1.2. Perforert plate

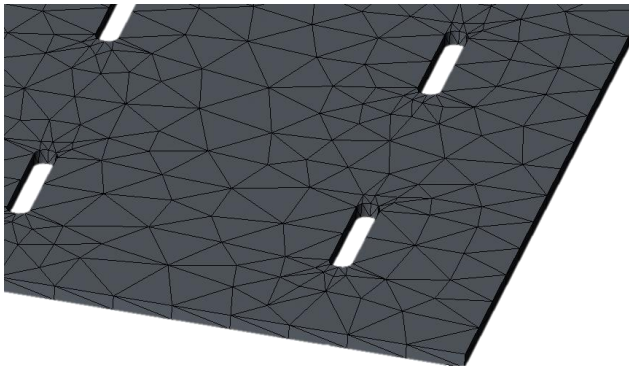
For verifikasjon av nedbøyning og spenningene beregnet i kapittel 7.3.4. er en statisk analyse utført. Ettersom platen er symmetrisk er halve modellen benyttet, som resulterte i redusert tidsbruk for analysen og muligheten for bruk av et finere mesh.

#### Opplagring, laster og mesh

Platen er modellert med opplagring rundt hele, tilsvarende om platen var festet til rammekonstruksjonen (Figur 9.8). Platen er påsatt fast opplagring, med låsing av bevegelse og rotasjon om alle frihetsgrader. For korrekt analyse er ytre belastning halvert til 1 500 N, fordelt på overflaten til platen. Elementstørrelse på meshet ble satt til 20 mm (Figur 9.9).

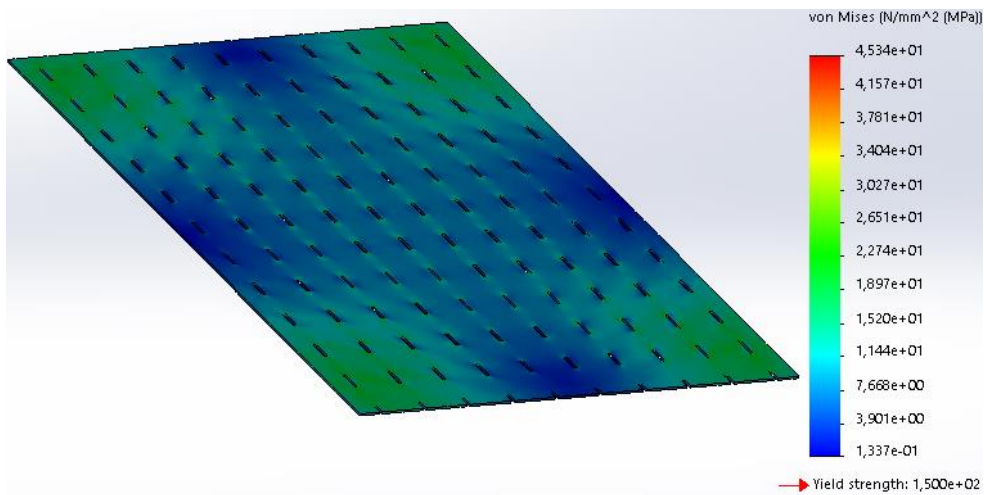


Figur 9.8: Fast opplagring av platen, vist med grønne piler. Påført 1 500 N som ytre belastning, vist med lilla piler.

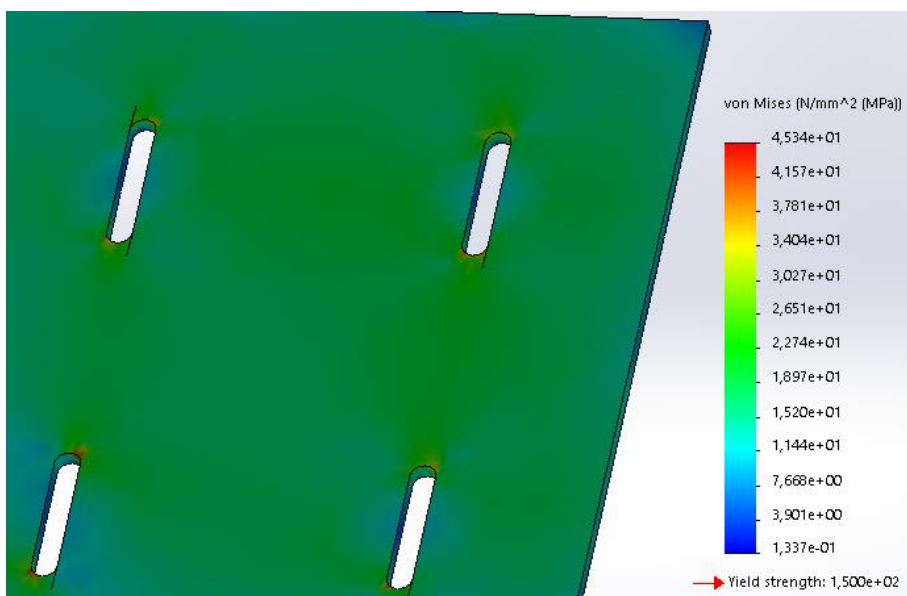


Figur 9.9: Mesh til platen. Elementstørrelse satt til 20 mm. Rundt perforering i platen ble det automatisk generert finere elementer for et mer nøyaktig resultat.

### Jevnførende spenning



Figur 9.10: Jevnførende spenning i platen. Høyeste spenning var 45,34 MPa.



Figur 9.11: Maks spenning som følge av spenningskonsentrasjon ved perforering nederst til venstre på platen.

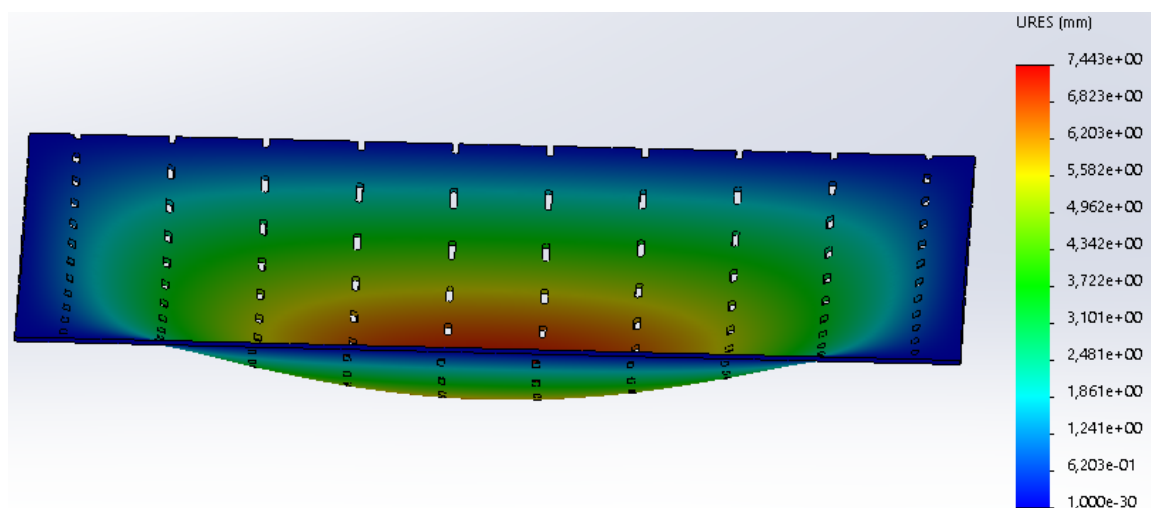
Største jevnførende spenning i platen var 45,34 MPa (Figur 9.10), som følge av en spenningskonsentrasjon (Figur 9.11). For et bedre og mer helhetlig inntrykk av opptredende spenning, ble spenningene på overflaten til platen undersøkt (Figur 9.12). Dette ga en gjennomsnittverdi på 10,97 MPa. Sammenlignet med håndberegningene på 12,1 MPa, er høyeste spenning tilnærmet 33 MPa høyere, mens gjennomsnittspenningen er tilnærmet 1 MPa lavere.

	Value	
Sum	2,756e+05	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Avg	1,097e+01	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Max	4,534e+01	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
Min	1,913e-01	N/mm <sup>2</sup> (MPa)
RMS	1,223e+01	N/mm <sup>2</sup> (MPa)

Figur 9.12: Tabell-sammendrag for overflatespenninger på søylen.

Ut fra største jevnførende spenning på 45,34 MPa, og en flytegrense på 150 MPa, tilsier det en sikkerhetsfaktor mot flyt på 3,3.

## Nedbøyning



Figur 9.13: Nedbøyning i perforert plate. Maks nedbøyning tilnærmet 7,44 mm.

Gjennom analysen var nedbøyningen i platen beregnet til 7,44 mm (Figur 9.13), ved håndberegning var nedbøyningen beregnet til 4,66 mm, en forskjell på 2,78 mm.

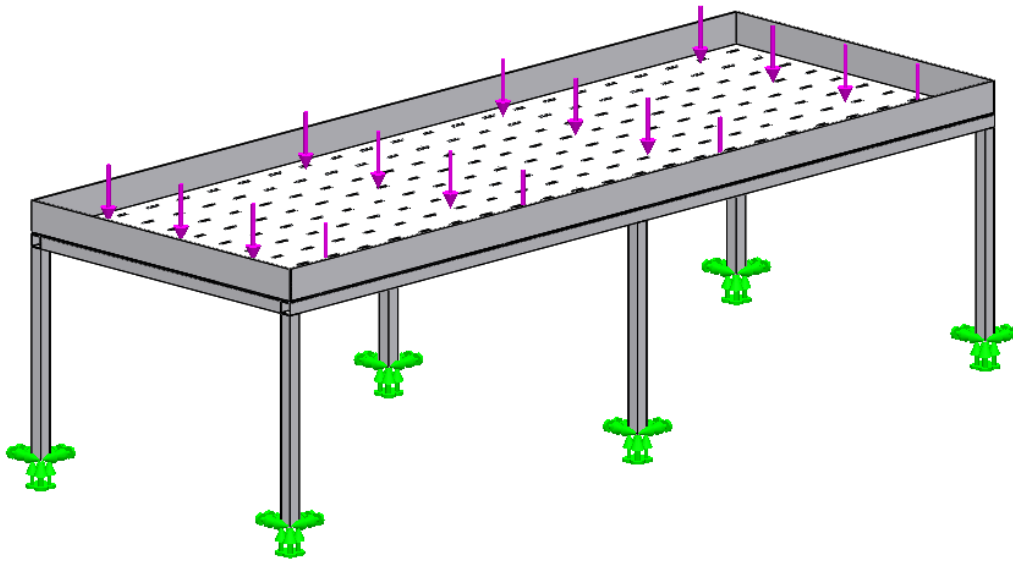
### 9.1.3. Tørkebord

Avslutningsvis ble det utført en statisk analyse av tørkebordet for kontroll av nedbøyning og spenninger i konstruksjonen montert sammen. En analyse av tørkebordet gir et mer komplett spenningsbilde presentert, da komponentene montert sammen bidro til en stivere konstruksjon.

#### Opplagring, krefter og mesh

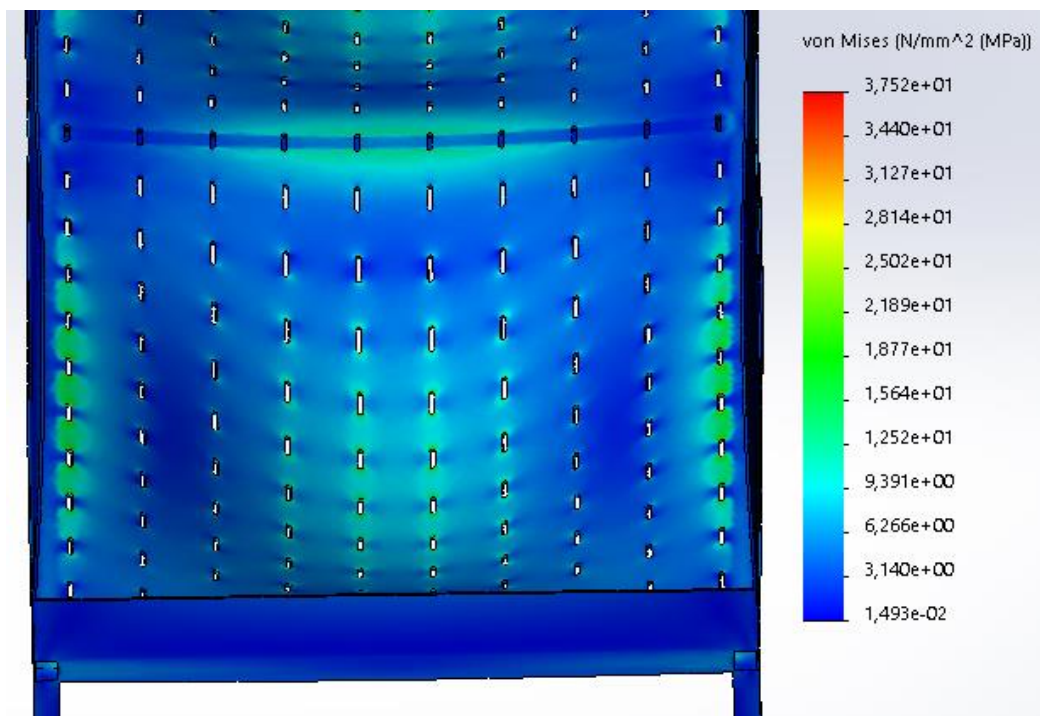
Tørkebordet er fast opplagret i bunn på søylene til rammekonstruksjonen (Figur 9.14). Det ble automatisk generert kontaktpunkter mellom elementene tørkebordet besto av, med samme

virkemåte som fast opplagring. Ytre belastning på 3 000 N er påført overflate til perforert plate. Det er benyttet en elementstørrelse på 20 mm for mesh av tørkebordet.



Figur 9.14: Opplagring vist med grønne piler, ytre belastning på 3 000 N, vist med lilla piler.

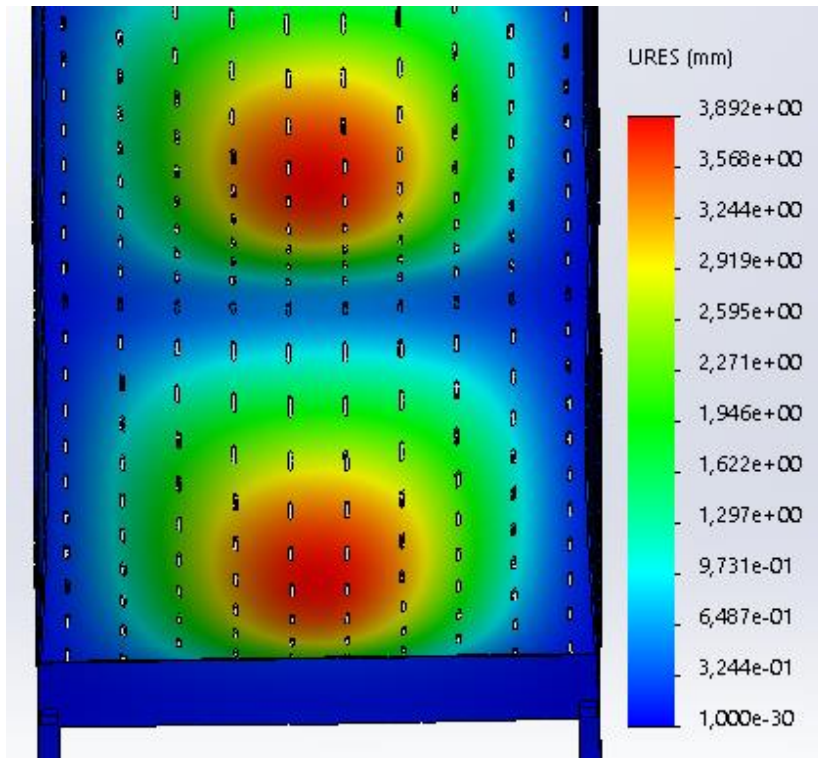
### Jevnførende spenning



Figur 9.15: Jevnførende spenning oppredende. Maks spenning ble 37,52 MPa. Deformasjonskala på 50.

Høyeste jevnførende spenning var 37,52 MPa (Figur 9.15). Spenningene er i hovedsak oppredende i den perforerte platen og overgangene mellom elementer på rammekonstruksjonen.

## Nedbøyning



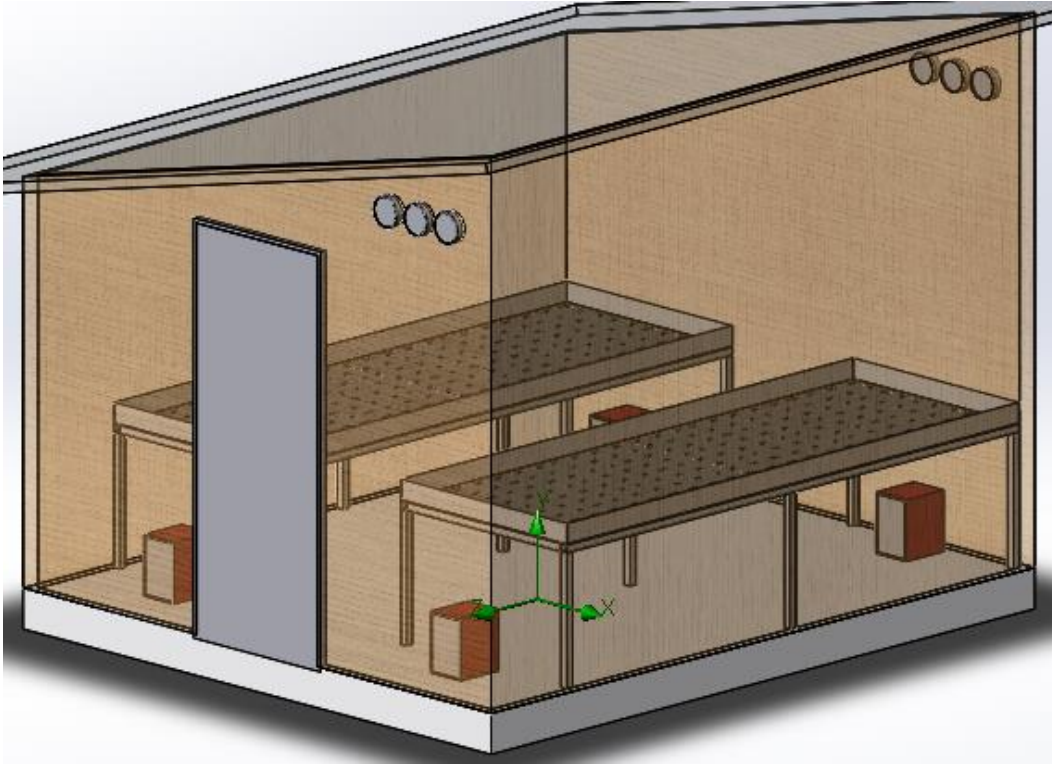
Figur 9.16: Nedbøyning av tørkebordet. Maks nedbøyning var tilnærmet 3,89 mm. Deformasjonskala på 50.

Gjennom analyse av tørkebordet var nedbøyningen 3,89 mm. Nedbøyningen er opptredende i den perforerte platen, mens rammekonstruksjonen og karmen er lite utsatt for nedbøyning (Figur 9.16).

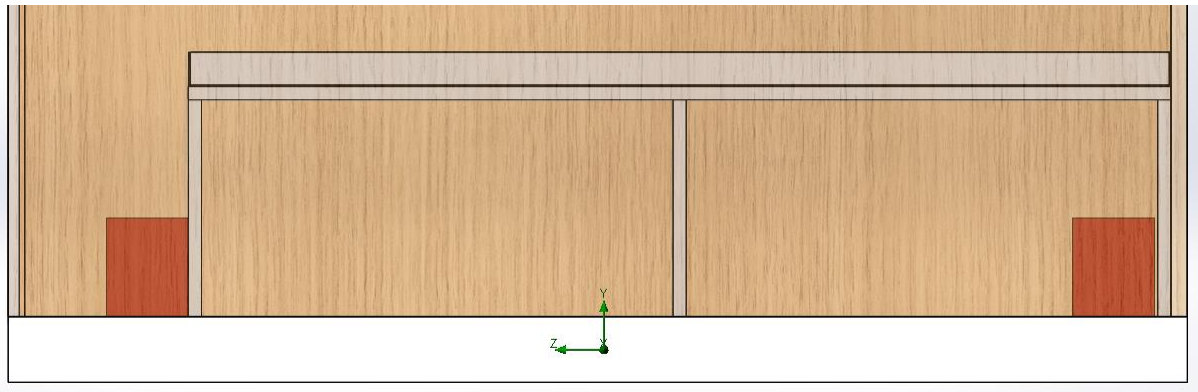
## 9.2. Strømningsanalyse med CFD

Det er utført en strømningsanalyse av tørkehuset i SolidWorks sitt eget verktøy *Flow Simulation*. I analysen er 2 tørkebord og 4 varmluftsvifter innsatt i tørkehuset som har 6 ventileringshull (Figur 9.17). Antallet vifter og ventileringshull er basert på prosjekteiers ønske og tenkt var nødvendig for å oppå tilstrekkelig temperatur. Tørkehuset er designet etter Figur 1.3, med et tørkebord på hver side av døren. Viftene er plassert midt på hver kortside av tørkebordene. Bakre vifte er plassert 50 mm fra veggen, mens fremre vifte er på lik linje med enden av tørkebordet (Figur 9.18).

For økt visualisering av oppsettet og resultatene, er vegger og tak gjort gjennomsiktige.



Figur 9.17: Oppsettet i tørkehuset med to tørkebord og fire vifter.



Figur 9.18: Vifter og tørkebord sett fra siden. Bakre vifte plassert 50 mm fra veggen og de fremre er parallelle med tørkebordet.

Formålet med analysen er å kartlegge temperaturutviklingen inne i tørkehuset, for å undersøke om optimal tørketemperatur er oppnådd. Optimal tørketemperatur ved tørking av kakaobønner er 60 °C som definert i kapittel 4. Gjennom analysen er strømningsbildet også undersøkt.

### 9.2.1. Oppsett

Det er utført en intern analyse med varmeledning i faste stoffer og gravitasjonskraft i -Y retning. Veggene til tørkehuset er utført i treverk og varmeledning i veggene er av den grunn tatt med i analysen. Betingelsene for generering av analysen er oppsummert (Tabell 9.1).



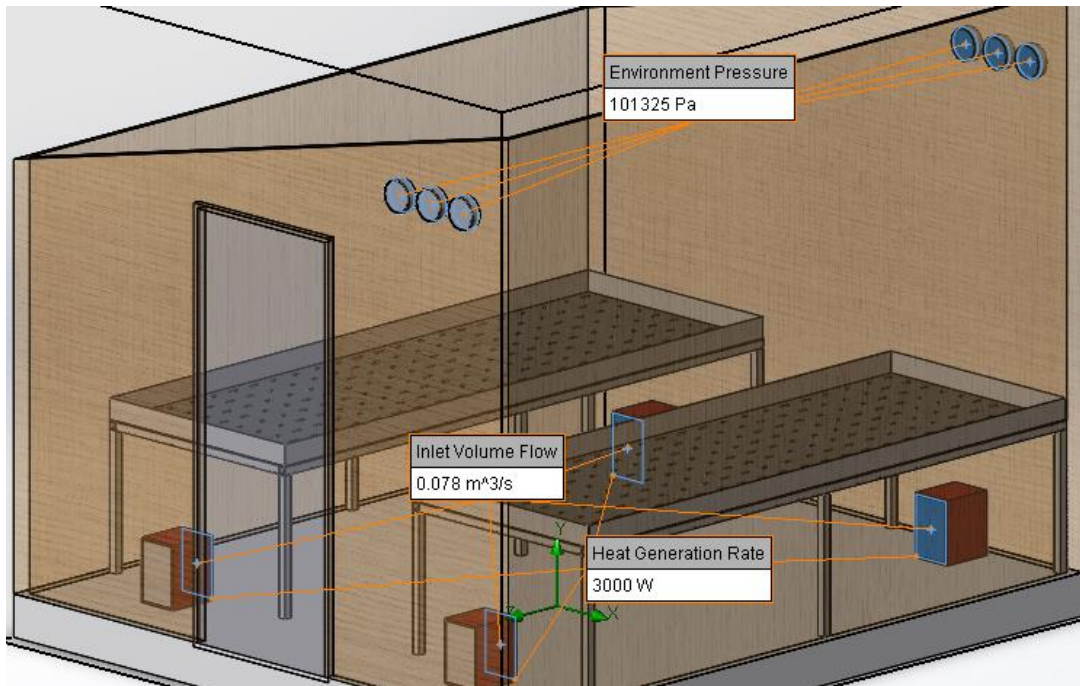
Tabell 9.1: Oppsummering av betingelser satt inn i «Wizard» for strømningsanalysen.

Data	Verdi	Beskrivelse
Type analyse	Intern	-
Varmeledning i fast stoff	På	Varmeledning i fast stoff tatt hensyn til.
Gravity	På	Gravitasjonskraft påsatt i -Y retning
Fluid	Luft (gass)	-
Strømningstype	Laminær og turbulent	Både laminær og turbulent strømning er vurdert.
Varmeutveksling	På	Varmeledning i veggene
Koeffisient varmetveksling	0,1	W/(m <sup>2</sup> K). Hentet fra The Engineering ToolBox (2003)
Temperatur ekstern fluid	20	°C, definert som 293,15 K i analysen
Trykk	101,325	kPa
Temperatur	20	°C, definert som 293,15 K i analysen

Videre er det definert ulike betingelsene påsatt modellen (Tabell 9.2). Viftene er forenklet til en varmekilde, kombinert med en volumstrøm (Figur 9.19), etter data hentet fra viftemodell (Elektroimpotøren.no, 2020). For analysen er det definert et «global goal» for tørkehuset og «surface goal» på flaten kakaobønnene er plassert på, med minimum, gjennomsnittlig og maksimal temperatur.

Tabell 9.2: Oppsummering av betingelse satt i analysen

Betingelse	Verdi	Beskrivelse
Varmekilde	3 000 W	«Heat sources» lagt inn for virkning av varmluftsvifte som «volume source»
Volumstrøm	0,078	m <sup>3</sup> /s
Mål	«Global goal» for tørkehuset og «surface goal» på perforert plate for temperatur.	Kontrollere temperatur på gitte flater og i tørkehuset. Løsning er oppnådd når verdiene konvergerer.
Mesh	5	Hvor nøyaktig målingene er. 7 er maks verdi.
Trykk	101,325	kPa
Temperatur	20	°C, definert som 293,15 K i analysen



Figur 9.19: Påsatte betingelser. Atmosfærisk trykk på ventilering, varmekilde og volumstrøm definert på fremsiden av viftene.

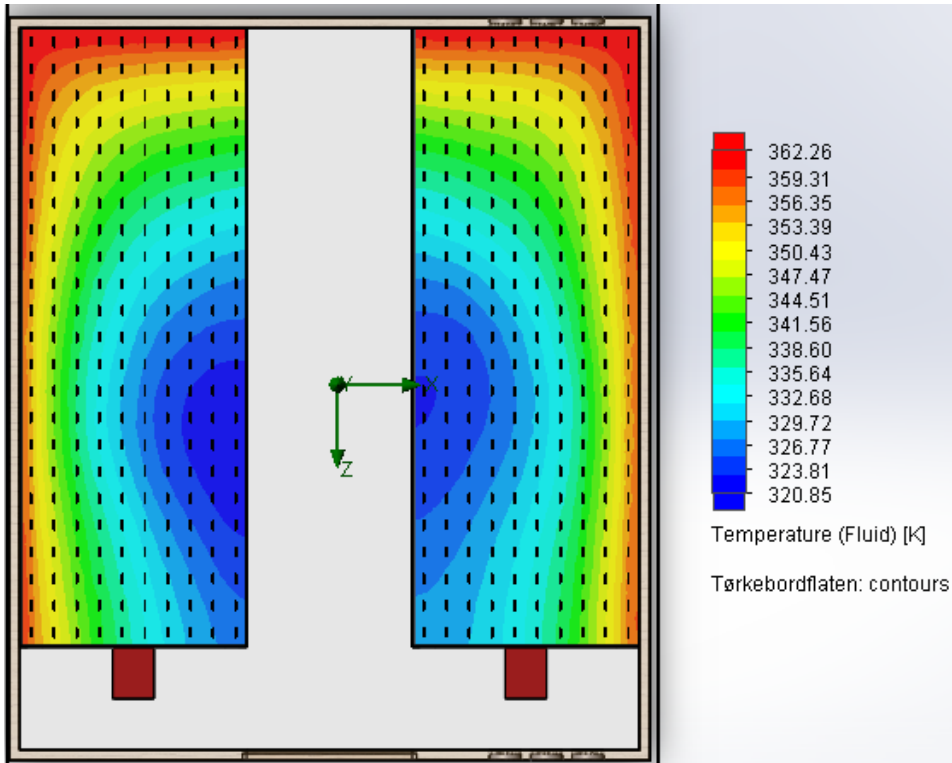
### 9.2.2. Resultater

Resultatene fra de definerte målene er hentet ut (Tabell 9.3). Videre er *Cut Plot*, *Surface Plot* og *Flow Trajectories* i tørkehuset hentet ut, for visualisering av temperaturfordelingen og strømningsbildet. I de ulike figurene er det satt en temperaturskala utfra den definerte overflaten, for bedre visualisering av temperaturene opptredende på definert flate.

Tabell 9.3: Definerte mål med resultater etter analysen. Data hentet ut fra SolidWorks.

Mål	Temperatur [K]	Temperatur [°C]
Tørkehus - Laveste temperatur	293,2	20,0
Tørkehus - Gjennomsnittstemperatur	317,4	44,2
Tørkehus - Høyeste temperatur	424,6	151,4
Tørkebord - Laveste temperatur	320,9	47,7
Tørkebord - Gjennomsnittstemperatur	339,7	66,5
Tørkebord - Høyeste temperatur	362,3	89,1

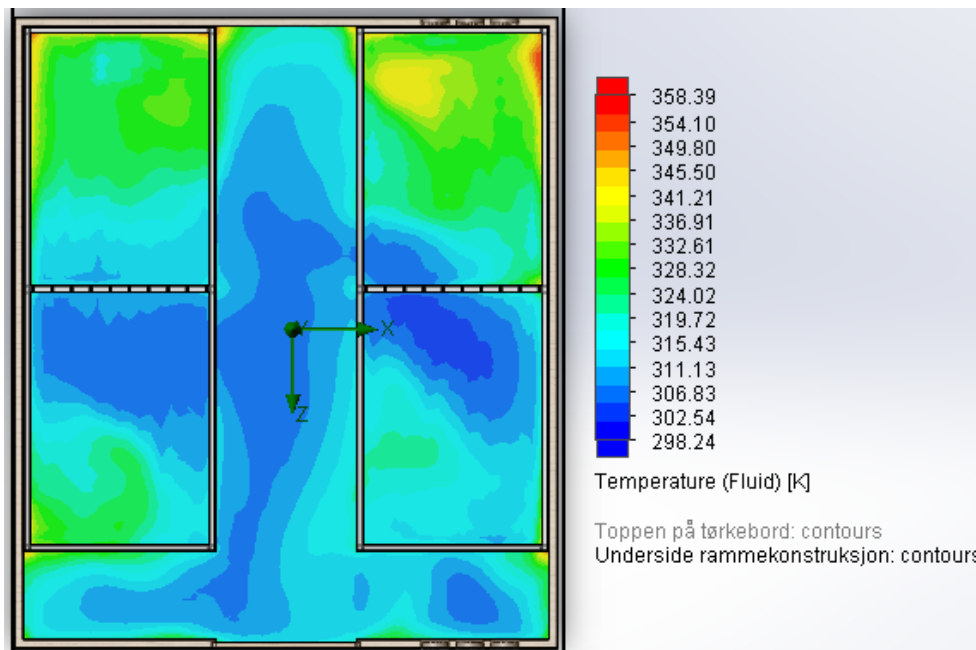
For tørkehuset var laveste, høyeste og gjennomsnittlig temperatur henholdsvis 20,0 °C, 151,4 °C og 44,2 °C. For flaten kakaobønnene er plassert på var laveste, høyeste og gjennomsnittlig 47,7 °C, 89,1 °C og 66,5 °C. For bedre visualisering av temperaturfordelingen på tørkebordet er det tatt et *Surface Plot* på flaten tørkegodset er plassert (Figur 9.20).



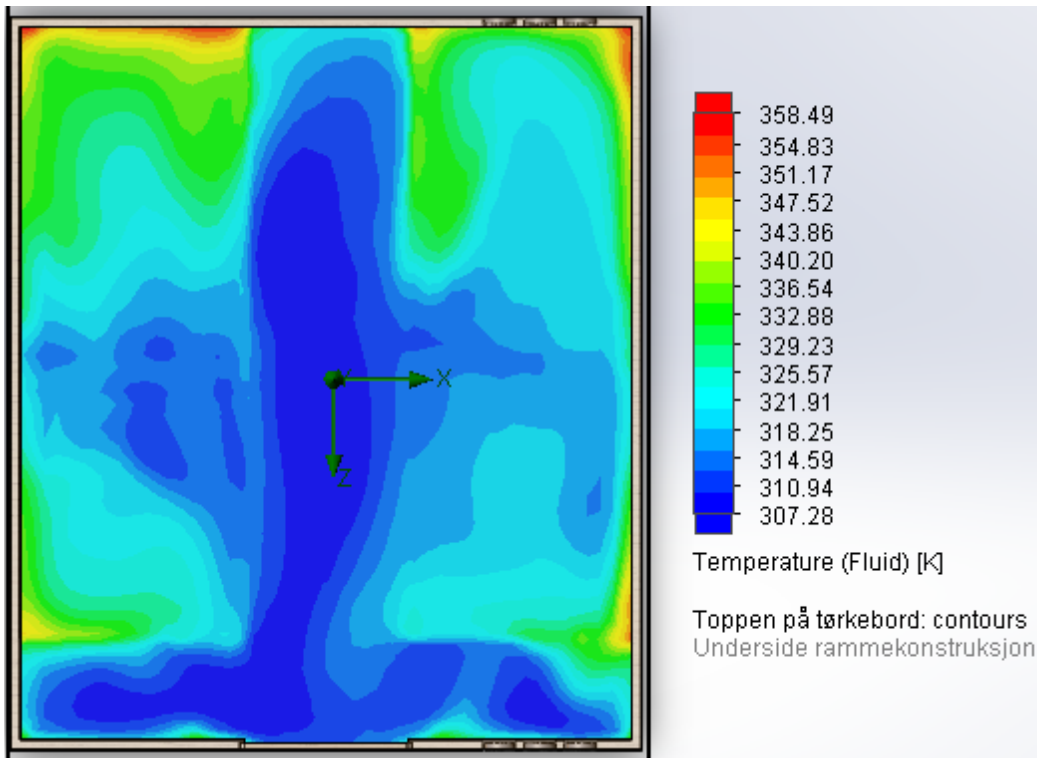
Figur 9.20: Temperaturprofil på tørkebordflaten der tørkegods er plassert. Sett ovenfra.

Fra plottet er det vist at store deler av tørkebordflaten har temperatur mellom laveste og den gjennomsnittlige temperatur, fra Tabell 9.3, på 47,7 og 66,5 °C. De høyeste temperaturene, opp mot 89,1 °C, er langs veggene og plasseringen til de bakre viftene (Figur 9.20).

Videre er et *Cut Plot* på undersiden av rammekonstruksjonen (Figur 9.21) og et *Cut Plot* på toppen av karmen (Figur 9.22) hentet ut.



Figur 9.21: Temperaturprofil på undersiden av rammekonstruksjonen, 660 mm over gulvnivå.



Figur 9.22: Temperaturprofil på toppen av karmen, 805 mm over gulvnivå

Fra temperaturlprofilene på undersiden av rammekonstruksjonen og toppen av karmen er temperaturen på luften som har strømmet over og gjennom kakaobønnene tilnærmet mellom 41,8 °C (315 K) og 66,8 °C (340 K). I midtgangen og foran dørene er temperaturene helt nede i 25,0 °C (298,2 K).

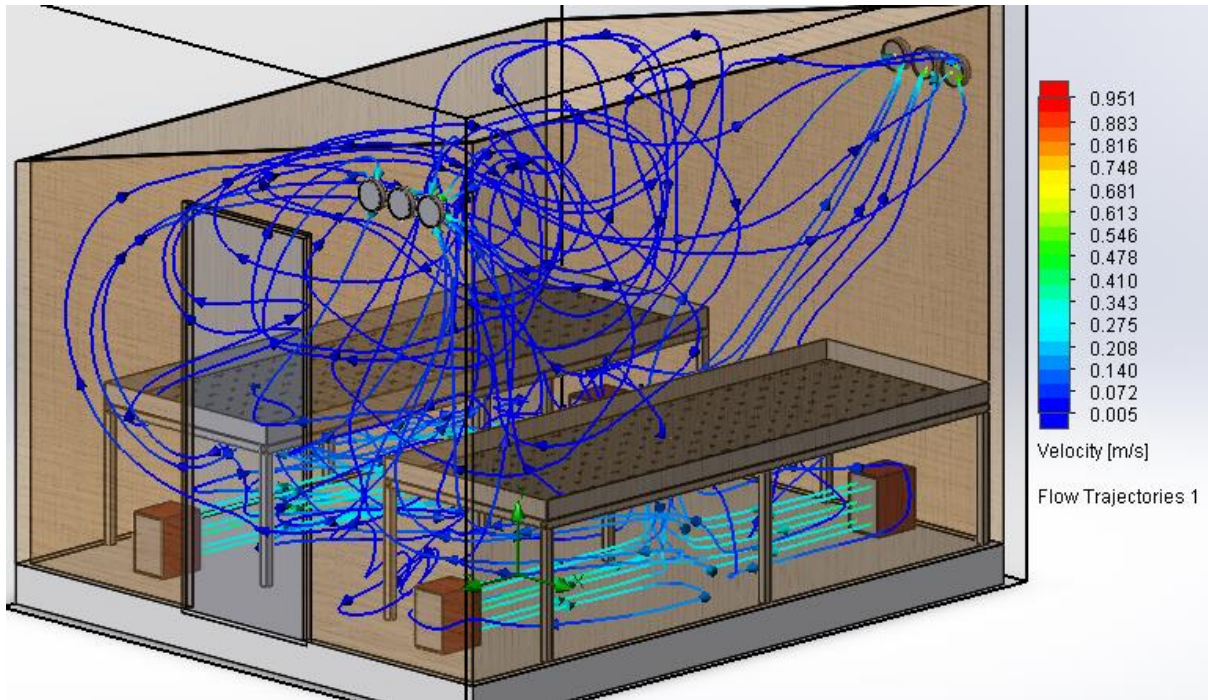
Det ble også undersøkt overflatetemperaturen til de forenklede viftene (Figur 9.23). Hensikten var å undersøke om forenklingen av viftene hadde noen innvirkning på de opptredende temperaturene i tørkehuset.



Figur 9.23: Temperaturprofil overflate på viftene

Som vist gjennom Figur 9.23 er den høyeste temperaturen i tørkehuset på overflaten til viftene, som er temperaturen til komponentene og ikke lufttemperatur.

I tillegg til temperaturfordelingen har strømningsbildet blitt undersøkt (Figur 9.24). Hensikten er å se hvordan luften fordelt seg i tørkehuset, og hvilke hastigheter den opprettholdt.



Figur 9.24: Strømningsbildet i tørkehuset. Isoview

Hastigheten til luften er opp mot 1 m/s ut av viftene og ved ventileringene. I store deler av tørkehuset er hastigheten nede i 0,1-0,2 m/s. Strømningene er avbøyd når luftstrømmene fra de to viftene plassert ovenfor hverandre møtes tilnærmet midt på tørkbordet. Utfra linjene i Figur 9.24 er luftstrømningen tettest opptredende under tørkbordene, ved døren og på vei ut av ventileringen.


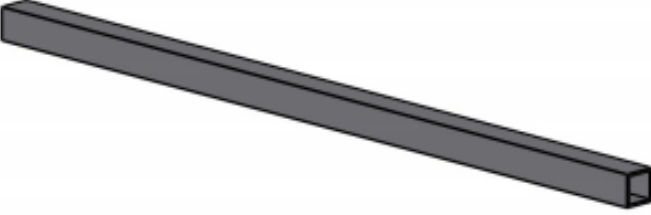

## 10. Fremstilling av tørkebordet

Hensikten med kapitlet er en gjennomgang av produksjonsmetoder på enkeltkomponentene tørkebordet består av. Målet er at produksjonen av komponentene kan foregå på verkstedet i Kamerun.

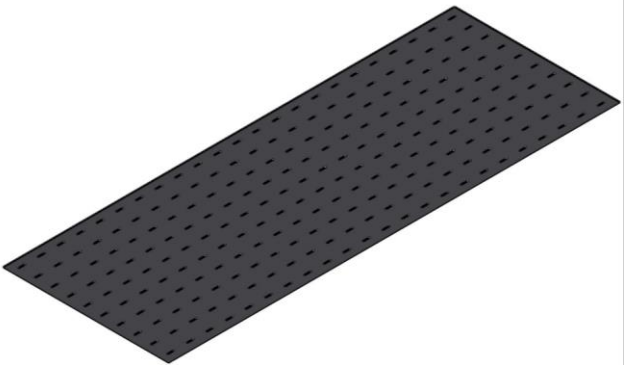
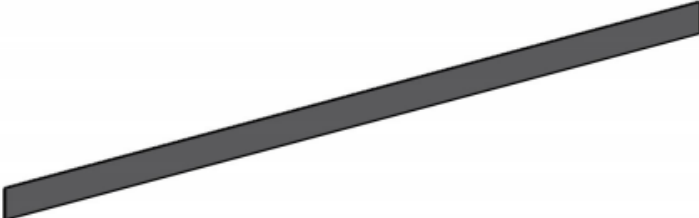
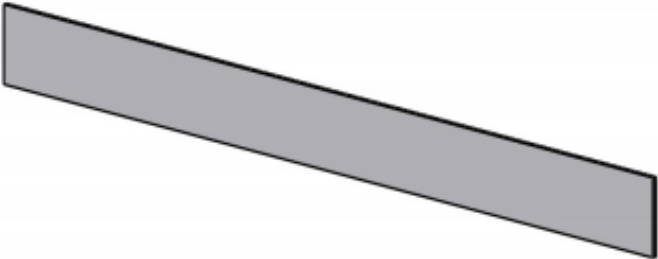
### 10.1. Produksjonsmetoder

Produksjonsmetodene for de ulike komponentene er presentert (Tabell 10.1). Gjennom bruk av standardkomponenter er det påkrevd få operasjoner før sammenstilling til et tørkebord, for økt sannsynlighet for bygging av tørkebordet på verkstedet i Kamerun.

Tabell 10.1: Beskrivelse av bearbeidingsmetode på de ulike komponentene i tørkebordet

Komponent	Produksjonsmetode
<p>Søyle til rammekonstruksjon</p> 	<p>Material: EN AW 6082-T6 Emne: Firkantprofil</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bli kappet på korrekt lengde</li> </ul>
<p>Bredde bjelke til rammekonstruksjon</p> 	<p>Material: EN AW 6082-T6 Emne: Firkantprofil</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bli kappet på korrekt lengde</li> </ul>
<p>Lengde bjelke til rammekonstruksjon</p> 	<p>Material: EN AW 6082-T6 Emne: Firkantprofil</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Bli kappet på korrekt lengde</li> </ul>

Tabell 10.2 forts.: Beskrivelse av bearbeidingsmetode på de ulike komponentene i tørkebordet

Komponent	Produksjonsmetode
<p>Perforeert plate</p> 	<p>Material: EN AW 5052-H34</p> <p>Emne: Perforeert plate</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Kjøpt på mål, ingen tilvirkning påkrevd</li> </ul>
<p>Lengde plate til karm</p> 	<p>Material: EN AW 6082-T6</p> <p>Emne: Plate</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bli knekt til riktig lengde og høyde</li> </ul>
<p>Bredde plate til karm</p> 	<p>Material: EN AW 6082-T6</p> <p>Emne: Plate</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bli knekt til riktig lengde og høyde</li> </ul>

## 11. Markedspresentasjon

I dette kapitlet er det utarbeidet en markedspresentasjon av tørkebordet.

Markedspresentasjonen har til hensikt å illustrere tørkebordet, samt hvordan de ulike komponentene er montert gjennom enkle beskrivelser.

### 11.1. Renderte framstillinger

Det er fremstilt renderte bilder av tørkebordet for visualisering av produktet (Figur 11.1) og (Figur 11.2).



Figur 11.1: Tørkebordet



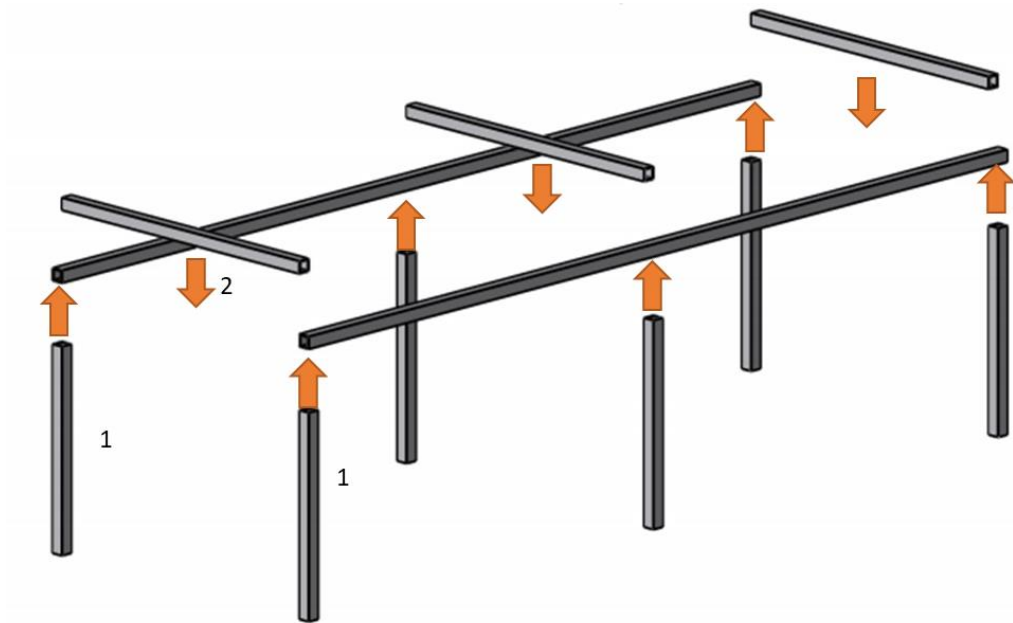
Figur 11.2: Tørkebordet sammenstilt på verkstedet i Kamerun



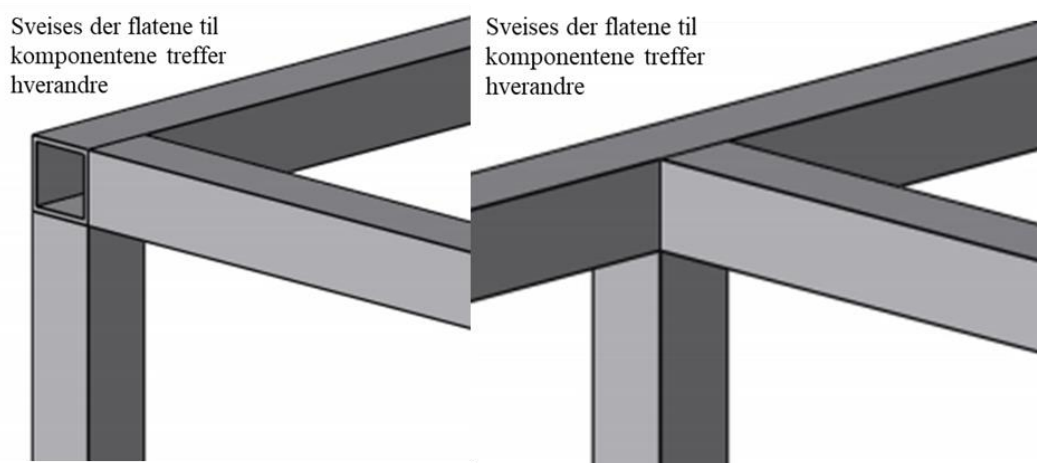
## 11.2. Tekniske beskrivelser

### Rammekonstruksjon

Monteringsanvisning av de ulike komponentene i rammekonstruksjonen er presentert (Figur 11.3). Videre er det beskrevet hvor komponentene er sammenføyd (Figur 11.4) og avslutningsvis er en ferdigmontert rammekonstruksjon fremstilt (Figur 11.5).



Figur 11.3: Hvordan rammekonstruksjonen er sammenstilt. Først (1) er søylene sveist på lengde bjelkene. Neste steg (2) er at bredde bjelkene er plassert mellom hver lengde bjelke og sveist i hver sin ende.



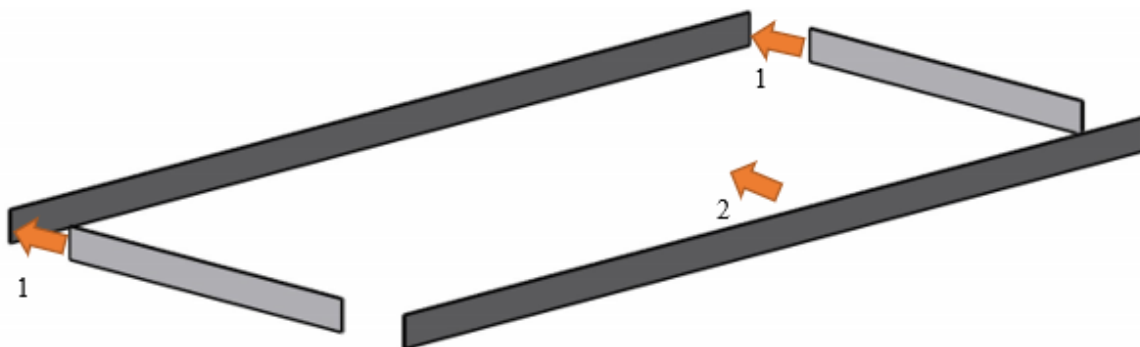
Figur 11.4: Komponentene er sveist som vist for å sikre robust konstruksjon. Til høyre vist hvor søyle er fastsveist i bjelkene. Til venstre vist hvor bjelkene er sveist ved midterste søyle.



Figur 11.5: Sammenstilt rammekonstruksjon

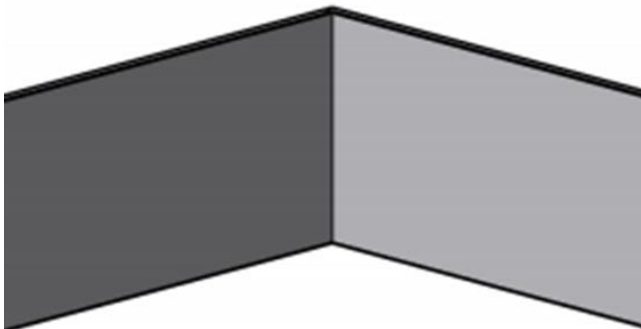
### Karm

Monteringsanvisning av de ulike komponentene i karmen er presentert (Figur 11.6). Videre er det beskrevet hvor komponentene er sammenføyd (Figur 11.7) og avslutningsvis er en ferdigmontert karm fremstilt (Figur 11.8)

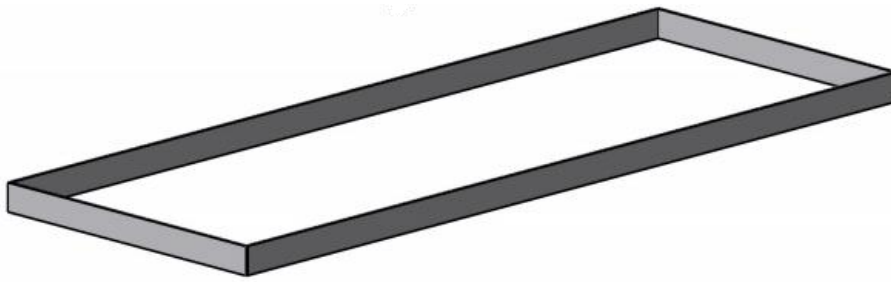


Figur 11.6: Hvordan karmen er sammenstilt. Først (1) er bredde platene sveist til den ene lengde platen. Videre (2) er å sveise den andre lengde platen til bredde platene.

Sveises sammen i hjørnene, der komponentene treffer



Figur 11.7: Hvordan komponentene i karmen er sveist sammen.



Figur 11.8: Sammenstilt karm

## Tørkebord

Monteringsanvisning av de ulike hovedelementene i tørkebordet er presentert (Figur 11.9), hvor det avslutningsvis er fremstilt et ferdigmontert tørkebord (Figur 11.10).



Figur 11.9: Hvordan tørkebordet er sammenstilt. Først (1) er perforert plate sveist på rammekonstruksjonen, rundt hele. Videre (2) er karmen sveist ned i den perforerte platen.



Figur 11.10: Sammenstilt tørkebord

## 12. Diskusjon

Diskusjonen har til hensikt å reflektere de ulike delene av prosjektarbeidet, for å belyse forbedringspotensialer ved arbeidet og resultatene oppnådd.

### 12.1. Konseptutvikling og forbedringspotensialer

Hensikten med prosjektet var å utvikle en tørker som kan bli bygget i Kamerun ved bruk av lokale ressurser og materialer. Tørkeren skal også bidra til en forbedret tørkeprosess.

#### Utredning

Den tilgjengelige kompetansen og ressursene på verkstedet tilsier at bygging av tørkere i Kamerun er oppnåelig. Et bredt utvalg utstyr, bred kompetanse og tidligere produkter bygget har gitt gode forutsetninger for bygging av tørkere. Forutsetningene preget også videre valg for konseptet, for å sikre at bygging i Kamerun er gjennomførbart.

Informasjonen gitt om solkraftverket tilsier at overskuddsstrøm er tilgjengelig, til drift av tørkere. Det er forutsatt at forholdet mellom produksjon og forbruk presentert over et døgn er gjeldende for resten av året.

Det ble brukt god tid på utredningen av teori om varmeoverføring, solenergi, tørking av kakaobønner og om de ulike tørkemethodene utprøvd på kakaobønner. Til gjengjeld ga utredningen økt forståelse for hva som er nødvendig i en effektiv tørkeprosess for kakaobønner. Ved å knytte varmeoverføring opp mot tørking er konveksjon den mest hensiktsmessige metoden for tørking av kakaobønner. Konveksjon har høy varmeoverføringsrate, fordelaktig for effektivisering av tørkeprosessen. Tørking av kakaobønner med utnyttelse av konveksjonsprinsippet er godt dokumentert gjennom både naturlige og kunstige tørkemethoder.

#### Utvikling

Dagens tørkemethoder har en tørketid på 4-5 dager. For effektivisering av tørkeprosessen var de kunstige tørkemethodene, varmlufttørking med varmpumpe og varmluftsvifte aktuelle, siden de naturlige metodene har en lengre tørketid. En viktig forutsetning med tørkeren var en enkel og brukervennlig virkemåte. Varmluftsvifte er et enklere system, sammenlignet med varmpumpe, gjennom færre komponenter og lavere risiko for feil bruk eller ødeleggelser. Varmepumpe på sin side har høyere muligheter for varmegjenvinning. Utfra en helhetlig vurdering ble varmlufttørking med varmluftsvifte valgt tørkemethoder, og ønsket tørketid på 10-15 timer er oppnåelig utfra tidligere tester utført med prototypen.

Det ble generert tre ulike konsepter gjennom utviklingsprosessen, som følge av endringer i prosjekteiers ønskede utforming. Det var lagt ned mye arbeid i generering av funksjonsanalyse og funksjonsalternativer til det første konseptet. Store deler av arbeidet nedlagt i genereringen av funksjonsanalysen og funksjonsalternativer hadde ingen nytteverdi for den endelige utformingen, som resulterte i en mer tidkrevende utviklingsprosess enn nødvendig.

I utviklingsprosessen var dialogen med prosjekteier essensiell og viktigheten av IPD kom raskt til syne, spesielt kommunikasjonsflyt, en viktig erfaring fra prosjektet.

Endelig konsept ble et tørkebord, med kakaobønner på et plan, sammenlignet med utgangspunktet, et lukket kammer med kakaobønner på flere plan. Basert på optimalisering av tørkeprosessen er tilgjengelig volum i tørkehuset lavere utnyttet med et plan sammenlignet med flere plan kakaobønnene er plassert på.

### **Konstruksjon**

Valg av materiale og bruk av standardkomponenter var basert på forutsetningene til verkstedet. Ved å benytte standardkomponenter er få operasjoner nødvendig i produksjonen av tørkebordet, som økte sannsynligheten for at verkstedet hadde egnet verktøy. Det ble dermed brukt en del tid på å finne standardkomponenter distribuert av flere produsenter.

I defineringen av flytegrenser og strekkfastheter til de ulike aluminiumslegeringene vurdert for tørkebordet, ble dataene hentet fra en materialkatalog datert fra 2012. Det er derfor usikkerhet knyttet til gyldigheten av de benyttede verdiene.

Det ble valgt å utrede om teorien til de valgte beregningsmetodene parallelt som beregningene ble utført og ikke tatt med i teoriutredningen. Valget om å ha teorien til beregningsmetodene sammen med beregningene resulterte i at generell teori om fasthetslære ble ekskludert og teori gjeldende de benyttede metodene kom i fokus, som også resulterte i en besparing av tid.

For dimensjonering av tørkebordet er flere forenklinger utført, som er viktig å ta hensyn til ved gjennomgang av resultatene. For håndberegningene på perforert plate er tverrsnittet forenklet ved at perforering i platen er utelatt. Forenklingen av tverrsnittet resulterer i en stivere konstruksjon og en lavere deformasjon, som stemmer overens med resultatet fra FEM-analysen av perforert plate, hvor nedbøyning ble 2,78 mm større enn håndberegningen.

Dimensjonering har tatt utgangspunkt i 300 kg kakaobønner som ytre belastning, men det skal også bli tørket andre landbruksprodukter med tørkebordet. Det er usikkerhet knyttet til antall kg av andre produkter som kan bli tørket på tørkebordet. Gjennom FEM-analysene er

sikkerheten mot flyt for rammekonstruksjonen og perforert plate henholdsvis 4,7 og 3,3. Ved knekking var nødvendig faktor multiplisert med lasten 118,14. Sikkerheten fra analysene tilsier at tørkebordet er tilstrekkelig dimensjonert selv om vekten av produkter passerer 300 kg.

### **Ferdigstilling**

Et mål med tørkebordet er at det kan bli bygget i Kamerun. Gjennom bruk av standardkomponentene plater og firkantrør, er det kun påkrevd kapping og knekking før komponentene kan sveises sammen. Kapping, knekking og sveising er operasjoner verkstedet i Kamerun har tilgjengelige ressurser til, og bygging av tørkebordet er dermed gjennomførbart.

## **12.2. Designrevisjon**

Tørkebordet er bygget opp av standardkomponenter, hvor minste tilgjengelig dimensjon for de valgte tverrsnittene er benyttet, som har resultert i en høy sikkerhet mot flyt og knekking. Den høye sikkerheten mot flyt og knekking tilsier at konstruksjonen er overdimensjonert og det er et potensiale for å optimalisere konstruksjonen. Optimalisering bør bli undersøkt gjennom FEM-analyser, hvor optimaliseringen ikke må gå på bekostning av bruken av standardkomponenter som enkelt lar seg oppdrive lokalt i Kamerun.

## **12.3. Strømningsanalyse**

Hensikten med strømningsanalysen var å undersøke om optimal tørketemperatur var oppnåelig. På grunn av begrenset tid ble strømningsanalysene forenklet, som er viktig å ta hensyn til ved gjennomgang av resultatene. Varmluftsviftene er forenklet med en varmekilde og luftstrøm på satt samme flate på viften, men i realiteten består varmluftsvifter av en vifte som genererer luftstrømmer som har passert over varmeelementet. Fra analysen var høyeste temperatur i tørkehuset 151,4 °C, opptredende på overflaten til viftene. Temperaturen var overflatetemperaturen til komponenten, som har sammenheng med forenklingen. Ved at varmeelementet og luftstrømmen er på satt på samme flate er det høyere konduksjon i viften, og varmen er i lavere grad tatt opp i luften, sammenlignet med en realistisk varmluftsvifte.

På flaten tørkegodset er plassert, varierte temperaturen hovedsakelig mellom 47,7 og 66,5 °C, med forhøyede temperaturer på flaten opp mot 89,1 °C nært viftene og veggene på huset. Optimal tørketemperaturen er 60 °C og med fire vifter, hver på 3 000 W, er temperaturvariasjonene for høye til at optimal tørking er mulig å oppnå. Det bør dermed bli undersøkt hvordan temperaturvariasjonene og den maksimale temperaturen på flaten tørkegodset er plassert på kan bli redusert for å oppnå optimal tørketemperatur.

I løpet av en tørkeprosess har kakaobønnene blitt varmet opp og luften har tatt til seg fuktighet, som ikke er tatt hensyn til i strømningsanalysen. Både varmeoverføringen fra luften til kakaobønnene og fuktighet tatt opp i luften må bli undersøkt nærmere, for en mer realistisk strømningsanalyse og en bedre kartlegging av temperaturfordelingen.

## 13. Konklusjon

Gjennom prosjektarbeidet er det utredet, utviklet og designet et tørkebord som kan bli bygget i Kamerun og driftet av overskuddsstrøm fra prosjekteiers solkraftverk. Tørkebordet er tiltenkt for bruk i et tørkehus med varmluftsvifter, for tørking av kakaobønner med varmluft, som har resultert i en forbedret tørkemetode sammenlignet med dagens tørkemetode. Tørking ved bruk av varmluft vil sikre en mer homogen kvalitet på kakaobønnene og redusert tørketid.

Tørkebordet er designet i SolidWorks, hvor et enkelt og brukervennlig design var i fokus, uten å gå på bekostning av styrken til konstruksjonen. Komponentene tørkebordet består av er standardkomponenter, hvor kun enkle operasjoner er påkrevd før sammenstilling til ferdig produkt. Standardkomponenter sikrer en enkel og kostnadseffektiv løsning og bygging på det lokale verksted i Kamerun.

### 13.1. Resultater og anbefalinger

#### Resultater:

Tørkebordet er basert på standardkomponenter og består av en rammekonstruksjon, en perforert plate for plassering av kakaobønnene som skal tørkes og en karm for å hindre at kakaobønnene faller av tørkebordet. Rammekonstruksjon og karm er utført i aluminiumslegeringen 6082-T6, mens den perforerte platen i aluminiumslegeringen 5052-H34. De ytre dimensjonene til tørkebordet er 3 000 mm, 1 100 mm og 805 mm for henholdsvis lengde, bredde og høyde. Kakaobønnene er plassert på den perforerte platen, 705 mm opp fra bakkenivå, hvor en 100 mm høy karm holder kakaobønnene på plass på tørkebordet. Tørkebordet har en totalvekt på 69,9 kg.

Tørkebordet er bygget opp av enkelt tilgjengelig standardkomponenter, og er dermed overdimensjonert, hvor FEM-analysene viser en sikkerhet mot flyt på 4,7 og 3,3 for henholdsvis rammekonstruksjon og perforert plate utfra ytre belastning på 300 kg kakaobønner. For at knekking skulle oppstå er lasten multiplisert med en faktor på 118,14.

Gjennom en strømningsanalyse av tørkehuset med 2 tørkebord og 4 varmluftsvifter er temperaturfordelingen i tørkehuset undersøkt. De opptredende temperaturene på flaten tørkegodset er plassert på er i hovedsak høyere enn optimal tørketemperatur på 60 °C og temperaturvariasjonen på flaten er fra 47,7 °C til 89,1 °C, med en gjennomsnittstemperatur på 66,5 °C.



### Anbefalinger:

- Gjennom bruk av varmluft til tørking oppnår kakaobønner en mer homogen kvalitet.
- Varmluftsvifte er en velegnet tørkemethode for forbedring av tørkeprosessen, som i tillegg er en enkel og brukervennlig metode.
- Bruk av standardkomponenter muliggjør bygging av tørkebordet på verkstedet i Kamerun gjennom lokal tilgang på komponentene, og tilgjengelig kompetanse og ressurser.
- Firkantprofiler ga størst anleggsflate for sammenføyning, og er utfra dette den mest hensiktsmessige profilutformingen til komponentene i rammekonstruksjonen.

## 13.2. Videre arbeid

Gjennom prosjektarbeidet er det utført en teoretisk utredelse av et konsept på en tørker, med analyser av systemet. Videre arbeid bør fokusere på:

- For sammenføyning av komponentene i tørkebordet er det nødvendig å dimensjonere sveisene utfra opptredende belastning.
- Utføre en optimalisering av konstruksjonen, uten at det går på bekostning av bruken av standardkomponenter enkelt tilgjengelig lokalt i Kamerun.
- Utføre strømningsanalyser for optimalisering av tørkeprosessen gjennom reduksjon av temperaturvariasjonene på flaten tørkegodset er plassert på.
- For strømningsanalysene er det også nødvendig å ta hensyn til påvirkning av tørkeprosessen ved tørking av kakaobønner, for en mer realistisk temperaturprofil. Tørkeprosessen påvirker luftstrømningen i form av varmeoverføring til kakaobønnene og opptak av fuktighet fra kakaobønnene.
- Utføre kostnadsanalyse for kartlegging av kostnader knyttet til produksjon av tørkebordet.
- Bygge tørkebordet for testing og verifisering av tørketid og tørkeprosessen.

## 14. Referanser

- Anandharamakrishnan, C. & Ishwarya, S. P. (2019). *Essentials and applications of food engineering*. Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design*. 4. utg. Oxford: Elsevier Science and Technology Ltd.
- Ashby, M. F. (2013). *Materials and the Environment: Eco-Informed Material Choice*. 2. utg. Waltham, Mass.: Butterworth-Heinemann.
- Astrup. (2012). *Tekniske data/standarder*. Metallkatalogen.
- Astrup. (2020a). *Alu perforert/strekkmetall*. Tilgjengelig fra: <https://kundeportal.astrup.no/aluminium/alu-perforert-strekkmetall> (lest 10.04.2020).
- Astrup. (2020b). *Alu rør kvadratisk*. Tilgjengelig fra: <https://kundeportal.astrup.no/aluminium/alu-r%C3%B8r-kvadratisk> (lest 01.04.2020).
- Astrup. (2020c). *Aluminium*. Tilgjengelig fra: <https://astrup.no/Materialer-Produkter/Materialer/Aluminium> (lest 31.03.2020).
- Barrientos, L. D. P., Oquendo, J. D. T., Garzón, M. A. G. & Álvarez, O. L. M. (2019). Effect of the solar drying process on the sensory and chemical quality of cocoa (*Theobroma cacao* L.) cultivated in Antioquia, Colombia. *Food research international*, 115: 259-267.
- Beckett, S. T., Fowler, M. & Ziegler, G. R. (red.). (2017). *Beckett's industrial chocolate manufacture and use*. 5. utg. Chichester, West Sussex: Wiley Blackwell.
- Bell, K. (2019). Elementmetoden. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/elementmetoden> (lest 31.03.2020).
- Bjånes, E. E. (2019). *Forbedring av tørkeprosessen til kakaobønner fra Sørvest-Kamerun ved bruk av solenergi*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet.
- Bøe, J. K. (2019). *6. Problemløsning og hjelpemidler*. Forelesningspresentasjon TIP300. Ås: NMBU.
- Callister, W. D. & Rethwisch, D. G. (2015). *Materials science and engineering*. 9. utg. Hoboken, N.J: Wiley.
- Carlsson, J. (2003). *Computational strategies in flame-spread modelling involving wooden surfaces*: Tech. Rep., Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Sweden.
- Çengel, Y. A., Ghajar, A. J. & Kanoğlu, M. (2015). *Heat and mass transfer: fundamentals and applications*. 5. utg. New York: McGraw-Hill Education.
- De Vuyst, L. & Weckx, S. (2016). The cocoa bean fermentation process: from ecosystem analysis to starter culture development. *Journal of Applied Microbiology*, 121 (1): 5-17.
- Delgado, J. M. P. Q. & Lima, A. G. B. d. (2016). *Drying and Energy Technologies* Cham: Springer.
- Dina, S. F., Ambarita, H., Napitupulu, F. H. & Kawai, H. (2015). Study on effectiveness of continuous solar dryer integrated with desiccant thermal storage for drying cocoa beans. *Case Studies in Thermal Engineering*, 5: 32-40.
- Duffie, J. A. & Beckman, W. A. (2013). *Solar Engineering of Thermal Process* 4. utg. Hoboken, N.J: Wiley.
- Elektroimportøren.no. (2020). *Varmevifte Tiger P31 3kW 1-fas 230V IP44 FRICO*. Tilgjengelig fra: <https://www.elektroimportoren.no/varmefifte-tiger-p31-3kw-1-fas-230v-ip44-frico/4930266/Product.html> (lest 20.04.2020).
- Elmasy, R. (2015). *A Guide to the SCAMPER Technique for Creative Thinking*. Tilgjengelig fra: <https://www.designorate.com/a-guide-to-the-scamper-technique-for-creative-thinking/> (lest 28.01.2020).
- Fohba, M. (2020a). *Questions Solar Dryer* (e-post til Bjørn-Espen Hansen 01.05.2020).
- Fohba, M. (2020b). *Solar dryer* (e-post til Bjørn-Espen Hansen 12.03.2020).
- Fudholi, A., Sopian, K., Bakhtyar, B., Gabbasa, M., Othman, M. Y. & Ruslan, M. H. (2015). Review of solar drying systems with air based solar collectors in Malaysia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51: 1191-1204.

- Geankoplis, C. J. (2003). *Transport processes and separation process principles (includes unit operations)*. 4. utg. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall.
- Gorjanski, J. (2020). *Konseptgenerering saltøker* (e-post til Bjørn-Espen Hansen 26.02.2020).
- Grue, M. (2018). *Utvikling av fresemekanisme til dreiebenk*. Masteroppgave. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmloi/handle/11250/2560688> (lest 01.04.2020).
- Guda, P., Gadhe, S. & Jakkula, S. (2017). Drying of Cocoa Beans by Using Different Techniques. *International Journal of Agriculture Innovations and Research*, 5 (5): 859-865.
- Guehi, T. S., Zahouli, I. B., Ban-Koffi, L., Fae, M. A. & Nemlin, J. G. (2010). Performance of different drying methods and their effects on the chemical quality attributes of raw cocoa material. *International journal of food science & technology*, 45 (8): 1564-1571.
- Gunathilake, D., Senanayaka, D. P., Adiletta, G. & Senadeera, W. (2018). Drying of Agricultural Crops. I: *Advances in Agricultural Machinery and Technologies*, s. 331-365. Boca Raton: CRC Press.
- Gutiérrez, T. J. (2017). State-of-the-Art Chocolate Manufacture: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 16 (6): 1313-1344.
- Hagen, A., Finnseth, C. & Simen, S. (2019). *Tørking av sukkerterte (Saccharina latissima)* Trondheim: Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet. Tilgjengelig fra: <https://ntnuopen.ntnu.no/ntnu-xmloi/bitstream/handle/11250/2613548/no.ntnu%3ainspera%3a2332952.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (lest 20.01.2020).
- Hashim, P., Selamat, J., Muhammad, K. & Ali, A. (1999). Effect of drying time, bean depth and temperature on free amino acid, peptide-N, sugar and pyrazine concentrations of Malaysian cocoa beans. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 79 (7): 987-994.
- Herman, C., Spreutels, L., Turomzsa, N., Konagano, E. M. & Haut, B. (2018). Convective drying of fermented Amazonian cocoa beans (*Theobroma cacao* var. Forasteiro). Experiments and mathematical modeling. *Food and bioproducts processing*, 108: 81-94.
- Hii, C. L., Law, C. L. & Cloke, M. (2009a). Modeling using a new thin layer drying model and product quality of cocoa. *Journal of food engineering*, 90 (2): 191-198.
- Hii, C. L., Law, C. L., Cloke, M. & Suzannah, S. (2009b). Thin layer drying kinetics of cocoa and dried product quality. *Biosystems engineering*, 102 (2): 153-161.
- Hii, C. L., Law, C. L., Cloke, M. & Sharif, S. (2011). Improving Malaysian cocoa quality through the use of dehumidified air under mild drying conditions. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 91 (2): 239-246.
- Hii, C. L., Law, C. L. & Suzannah, S. (2012). Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying. *Journal of Food Engineering*, 108 (2): 276-282.
- Hii, C. L., Law, C. L. & Law, M. C. (2013). Simulation of heat and mass transfer of cocoa beans under stepwise drying conditions in a heat pump dryer. *Applied Thermal Engineering*, 54 (1): 264-271.
- Hii, C. L., Ong, S. P., Chiang, C. L. & Menon, A. S. (2019). *A review of quality characteristics of solar dried food crop producst*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing.
- Hofstad, K. (2019). Solenergi. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/solenergi> (lest 05.01.2020).
- Holtebekk, T. (2019). Infrarød stråling. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/infrar%C3%B8d\\_str%C3%A5ling](https://snl.no/infrar%C3%B8d_str%C3%A5ling) (lest 27.01.2020).
- Houhou, H., Yuan, W. & Wang, G. (2017). *Simulation of Solar Heat Pump Dryer Directly Driven by Photovoltaic Panels*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science: IOP Publishing.
- International Cocoa Organization. (2000). *Drying cocoa beans*. International Cocoa Organization. Tilgjengelig fra: <https://www.icco.org/faq/59-fermentation-a-drying/110-drying-cocoa-beans.html> (lest 18.01.2020).
- Johansen, H. (2008). *Korrosjonsbestandige stål*. Tilgjengelig fra: <http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/korrosjonsb>

- [bestandige%20stal/Materiallaere-korrosjonsbestandige%20stal-kompendium.pdf](#) (lest 28.03.2020).
- Johansen, H. (2012). *Titan*. Tilgjengelig fra: [http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Skriftserien/ML\\_Titan\\_2012\\_nr.7.pdf](http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Skriftserien/ML_Titan_2012_nr.7.pdf) (lest 28.03.2020).
- Kajishima, T. & Taira, K. (2017). *Computational fluid dynamics*. Cham: Springer.
- Kumar, M., Sansaniwal, S. K. & Khatak, P. (2016). Progress in solar dryers for drying various commodities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55: 346-360.
- Magnussen, T. A. M. (2018). *Dolphin Sky: Chassisløsning for person- og varetransport-drone*. Master. Ås: Norges miljø- og biovitenskapelige universitet Tilgjengelig fra: <https://nmbu.brage.unit.no/nmbu-xmlui/handle/11250/2566452> (lest 31.03.2020).
- Magrab, E. B., Gupta, S. K., McCluskey, F. P. & Sandborn, P. (2009). *Integrated product and process design and development: the product realization process*. 2. utg. New York: CRC Press.
- Mattia, C. D., Marntuscelli, M., Sacchetti, G., Scheirlinck, I., Beheydt, B., Matrocola, D. & Pittia, P. (2013). Effect of Fermentation and Drying on Procyanidins, Antiradical Activity and Reducing Properties of Cocoa Beans. *Food Bioprocess Technol*, 6: 3420-3432.
- McCabe, W. L., Harriott, P. & Smith, J. C. (2005). *Unit operations of chemical engineering*. 7. utg. McGraw-Hill chemical engineering series. Boston: McGraw-Hill.
- Misumi. (2020). *Shelf Bracket (Stainless Steel)*: Misumi. Tilgjengelig fra: <https://uk.misumi-ec.com/vona2/detail/221005501309/> (lest 13.02.2020).
- Mjønerud, I. (2019). *Alt du bør vite om solceller og solenergi*. Tilgjengelig fra: <https://strøm.no/solceller-og-solenergi> (lest 28.04.2020).
- Musa, N. A. (2012). Drying Characteristics of Cocoa Beans Using an Artificial Dryer. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 7 (2): 194-197.
- Nicolas, G., Serge, K., Marcel, E., Alexis, K. & Belkacem, Z. (2019). Practice of Drying Cocoa in Humid Tropical Zone: Case of Southern Cameroon. *Journal of Engineering Research and Application*, 9 (7): 50-56.
- Nordic - African Business Summit. (2020). *Mr. Mike Fohba*. Tilgjengelig fra: <https://summit.norwegianafrican.no/previous-speakers/mike-fohba> (lest 01.05.2020).
- Norsk stål. (2020). *Aluminium*. Tilgjengelig fra: <https://www.norskstaal.no/produkter/aluminium?Kategori=%5BAluminium%5D> (lest 31.03.2020).
- Norsk Stålforbund. (u.å.). *Stålsorter*. Tilgjengelig fra: <https://www.stalforbund.no/om-stal/stalsorter> (lest 27.03.2020).
- Oke, D. O. & Omotayo, K. F. (2012). Effect of forced-air artificial intermittent drying on cocoa beans in South-Western Nigeria. *Journal of Cereals and Oil seeds*, 3 (1): 1-5.
- Omberg, O. S. (2020). *Utvikling av soltørker for sørge for mer effektiv og bærekraftig prosessering av kakao*. Prosjektrapport - Agrisolar. Tilgjengelig fra: [https://eduumb-my.sharepoint.com/personal/ola\\_omberg\\_nmbu\\_no/\\_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7B1E7BFE9B-2ACD-452E-A2F4-CA21912642E4%7D&file=Prosjektrapport%20-%20agrisolar.docx&action=default&mobileredirect=true&CT=1582710914272&OR=ItemsView](https://eduumb-my.sharepoint.com/personal/ola_omberg_nmbu_no/_layouts/15/Doc.aspx?sourcedoc=%7B1E7BFE9B-2ACD-452E-A2F4-CA21912642E4%7D&file=Prosjektrapport%20-%20agrisolar.docx&action=default&mobileredirect=true&CT=1582710914272&OR=ItemsView) (lest 25.01.2020).
- Orbegoso, E. M., Saavedra, R., Marcelo, D. & La Madrid, R. (2017). Numerical characterisation of one-step and three-step solar air heating collectors used for cocoa bean solar drying. *Journal of environmental management*, 203: 1080-1094.
- Ore, S. & Nesse, N. (2017). Tørking - teknikk. I: b. 2020. *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/t%C3%B8rking\\_-\\_teknikk](https://snl.no/t%C3%B8rking_-_teknikk) (lest 09.01.2020).
- Parikh, D. M. (2014). *Solids Drying: Basics and Applications*. Chemical Engineering Essentials for the CPI professional. Tilgjengelig fra: <https://www.chemengonline.com/solids-drying-basics-and-applications/?printmode=1> (lest 17.01.2020).
- Pedersen, B. (2018a). Aluminium. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/aluminium> (lest 25.03.2020).

- Pedersen, B. (2018b). Konveksjon - fysikk. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/konveksjon\\_-\\_fysikk](https://snl.no/konveksjon_-_fysikk) (lest 08.01.2020).
- Pedersen, B. (2018c). Termodynamikk. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/termodynamikk> (lest 25.01.2020).
- Pugh, S. (1991). *Total design: integrated methods for successful product engineering*. 1. utg. Wokingham: Addison-Wesley.
- Raju, K. S. N. (2011). *Fluid Mechanics, Heat transfer, and Mass transfer: Chemical Engineering Practice*. 1. utg. Hoboken, N.J: Wiley & Sons.
- Richter, C., Lincot, D. & Gueymard, C. A. (2013). *Solar Energy*. 1. utg. New York: Springer.
- Rodriguez-Campos, J., Escalona-Buendía, H., Contreras-Ramos, S., Orozco-Avila, I., Jaramillo-Flores, E. & Lugo-Cervantes, E. (2012). Effect of fermentation time and drying temperature on volatile compounds in cocoa. *Food Chemistry*, 132 (1): 277-288.
- Rosenthal, A., Deliza, R., Welti-Chanes, J. & Barbosa-Cánovas, G. V. (2018). *Fruit Preservation: Novel and Conventional Technologies*. 1. utg. New York: Springer.
- Rosvold, K. A. (2018). Aktiv solvarme. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/aktiv\\_solvarme](https://snl.no/aktiv_solvarme) (lest 30.01.2020).
- Rosvold, K. A. (2019a). Solceller. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/solceller> (lest 13.01.2020).
- Rosvold, K. A. (2019b). Solfanger. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/solfanger> (lest 17.02.2020).
- Sadeghi, G., Taheri, O. & Mobadersani, F. (red.). (2012). *New technologies of solar drying systems for agricultural and marine products. The 1st Middle-East Drying Conference (MEDC2012) February 19-20, 2012*. The 1st Middle-East Drying Conference (MEDC2012). Mahshar, Iran.
- Schuchardt Maskin. (2019). *Bearbeiding av forskjellige materialer*. Tilgjengelig fra: <https://smaskin.no/artikler-guider/post/bearbeiding-av-forskjellige-materialer> (lest 26.03.2020).
- Sharma, A., Chen, C. R. & Lan, N. V. (2009). Solar-energy drying systems: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13 (6-7): 1185-1210.
- Skjørshammer, S. & Fohba, M. (2020). *Skypemøte med Mike Fohba, sammen med Stein Skjørshammer* (Skypemøte 05.03.2020).
- Smets, A. H., Jäger, K., Isabella, O., Swaaij, R. A. v. & Zeman, M. (2016). *Solar Energy The physics and engineering of photovoltaic conversion, technologies and systems*. 1. utg. Cambridge: UIT Cambridge.
- Smith, P. G. (2011). *Introduction to Food Process Engineering*. 2. utg. New York, NY: Springer US: Imprint: Springer.
- SNL. (2018). Kakao. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: <https://snl.no/kakao> (lest 05.01.2020).
- SNL. (2019). Galvanisk korrosjon. I: *Store norske leksikon*. Tilgjengelig fra: [https://snl.no/galvanisk\\_korrosjon](https://snl.no/galvanisk_korrosjon) (lest 27.03.2020).
- SunErgy. (2019). *The power to change lives: SunErgy*. Tilgjengelig fra: <https://sunergypower.org/> (lest 08.01.2020).
- Terjesen, G. (2019a). *Bøyetema 2*. Pensum TMP301. Ås: NMBU.
- Terjesen, G. (2019b). *Diverse bøyetema*. Pensum TMP301. Ås: NMBU.
- Terjesen, G. (2019a). *Formler og tabeller*. Formelsamling TMP301. Ås: NMBU.
- Terjesen, G. (2019b). *Globale knekkebergeninger uten standard*. Pensum TMP301. Ås: NMBU.
- The Engineering ToolBox. (2003). *Thermal Conductivity of selected Materials and Gases*. Tilgjengelig fra: [https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d\\_429.html](https://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-d_429.html) (lest 21.04.2020).
- Tibnor. (2019). *Aluminium* Tilgjengelig fra: [https://portal.tibnor.com/nb\\_NO/Aluminium/c/61?q=%3Arelevance%3Acategory%3A61\\_pl](https://portal.tibnor.com/nb_NO/Aluminium/c/61?q=%3Arelevance%3Acategory%3A61_pl) (lest 31.03.2020).
- Tiwari, G. N., Tiwari, A. & Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications*. 1. utg. Singapore: Springer.

Twidell, J. & Weir, T. (2015). *Renewable Energy Resources*. 3. utg. New York: Routledge.

Universitetet i Oslo. (2019). *Kakao*. Tilgjengelig fra:

<https://www.mn.uio.no/ibv/tjenester/kunnskap/plantefys/leksikon/k/kakao.html> (lest 05.01.2020).

Von Böckh, P. & Wetzel, T. (2012). *Heat Transfer: Basics and Practice*. 1. utg. Berlin: Springer.

## 15. Vedlegg

Vedlegg 1: Utstysrliste fra verkstedet i Kamerun

Vedlegg 2: Utdrag fra strømproduksjon Matouke

Vedlegg 3: Lastsituasjoner for tremomentmetoden

Vedlegg 4: Diagram for knekklemdde enkle rammer

Vedlegg 5: Formler for statisk ubestemte rammer

Vedlegg 6: Konstruksjonstegning sammenstilt tørkebord med globale mål

Vedlegg 7: Konstruksjonstegning sammenstilt rammekonstruksjon

Vedlegg 8: Konstruksjonstegning perforert plate

Vedlegg 9: Konstruksjonstegning sammenstilt karm

## Vedlegg 1: Utstyrliste fra verkstedet i Kamerun

Listen var tilsendt på engelsk, og er oversatt til norsk.

Engelsk	Norsk
Hand Grinder	Håndsliper
Sandpaper Machine	Sandpapirmaskin
Pillar Drilling Machine	Søylebormaskin
Bench Drilling Machine	Benkboremaskin
Hand Drilling Machine	Hånddrill
Hand Jig Saw	Håndholdt stikksag
Table Jig Saw	Bord stikksag
Electric knife	Elektrisk kniv
Air compressor	Luftkompressor
Eye letting Machine	Maljemaskin
Shear Machine	Skjæremaskin
Gillotine Machine	Plateknekker
G-clamp (Big/small)	Klemmer i ulike størrelser
Mould Grip	Gripetang
Horizontal Band Saw	Horisontal båndsg
Hacksaw	Baufil
Vertical Band Saw	Vertikal båndsg
Spray Gun	Sprøytetipistol
Philips Screw Driver Set	Philips skrutrekker sett
Center Punch	Kjørner
Scriber	Skribent
Mallet Hammer	Gummiklubbe
Pin Bolt Hammer	Type hammer
Sewing Machine	Symaskin
Spanner set	Fastnøkkelse
Plier Combination	Kombinasjonstang
Drill bit set	Borsett
Mig Welding Machine	Mig sveiseapparat
Arc Welding Machine	Elektrode sveiseapparat

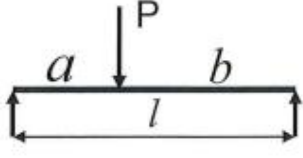
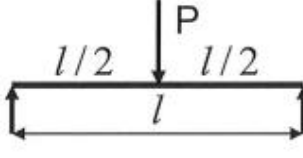
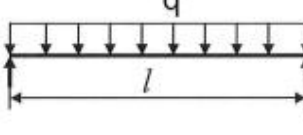
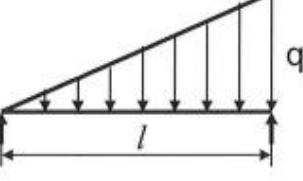


Welding Helmet	Sveisehjelm
Plasma Welding Machine	Plasmasveiseapparat
Flux Core Welding Machine	Trådmater sveiseapparat
Leather Gloves/Apron	Skinnhansker/forkle
Chipping Hammer	Meiselhammer
Wire Brush	Stålbørste
First Aid box	Førstehjelpsskrin
Steel Rule	Stållinjal
Measuring Tape	Målebånd
Vernier Calipers	Skyvelær
Try Square	Vinkellinjal
Dividers/Trammels	Passer
Hand File Set	Filsett
Angle File Set	Vinkelfilsett
Hydrolic Bending Machine	Hydraulisk bøyemaskin
Horizontal Band Saw	Horisontal båndsg
Slage Hammer	Slegge
12 Ton Pipe Benders	12 tonns rørbøyer
12 Ton Power Press	12 tonns presse
Spirit Level	Vaterpass
Colon Grinder	Vinkelsliper

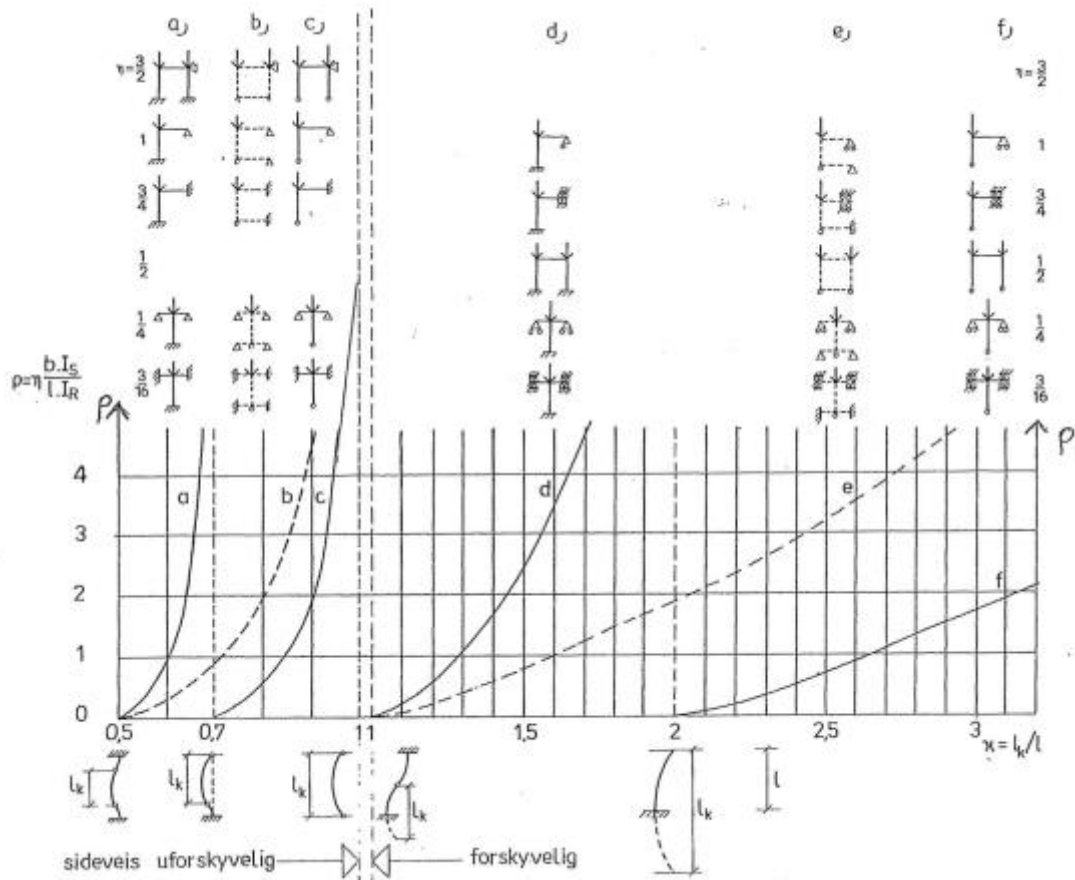
## Vedlegg 2: Utdrag fra strømproduksjon Matouke

#	Date	Time	BatteryVolta	BatteryCurre	LoadCurrent	Power	BatteryRemCa
			Volt DC	Amp	Amp	Watt	Ah
0	03.02.2020	00:18	50.56	-44	44	2224	11791
1	02.02.2020	23:48	50.63	-44	44	2227	11813
2	02.02.2020	23:18	50.71	-44	44	2231	11835
3	02.02.2020	22:48	50.78	-44	41	2234	11857
4	02.02.2020	22:18	50.78	-44	44	2234	11879
5	02.02.2020	21:48	50.86	-44	46	2441	11901
6	02.02.2020	21:18	50.94	-48	48	2445	11924
7	02.02.2020	20:48	50.94	-55	53	2703	11949
8	02.02.2020	20:18	50.94	-67	67	3412	11979
9	02.02.2020	19:48	51.01	-74	74	3774	12013
10	02.02.2020	19:18	51.09	-78	78	3985	12050
11	02.02.2020	18:48	51.16	-78	81	4143	12090
12	02.02.2020	18:18	51.24	-83	80	4156	12130
13	02.02.2020	17:48	51.39	-83	80	4111	12171
14	02.02.2020	17:18	51.47	-78	78	4014	12210
15	02.02.2020	16:48	51.77	-67	65	3359	12247
16	02.02.2020	16:18	52.00	-41	41	2132	12273
17	02.02.2020	15:48	52.23	-25	35	1828	12291
18	02.02.2020	15:18	52.76	-7	52	2743	12299
19	02.02.2020	14:48	54.58	8	76	4148	12300
20	02.02.2020	14:18	56.17	13	25	1348	12300
21	02.02.2020	13:48	56.17	13	57	3201	12300
22	02.02.2020	13:18	56.40	17	0	0	12300
23	02.02.2020	12:48	56.40	19	0	0	12300
24	02.02.2020	12:18	56.40	25	0	0	12300
25	02.02.2020	11:48	56.40	34	0	0	12300
26	02.02.2020	11:18	56.32	57	0	0	12300
27	02.02.2020	10:48	56.25	92	90	5231	12300
28	02.02.2020	10:18	56.25	143	105	5681	12221
29	02.02.2020	09:48	56.47	222	251	13911	12151
30	02.02.2020	09:18	55.87	254	192	10711	12057
31	02.02.2020	08:48	55.71	305	209	11587	11957
32	02.02.2020	08:18	55.41	351	173	9641	11809
33	02.02.2020	07:47	52.53	47	78	3992	11685
34	02.02.2020	07:17	53.06	89	88	4616	11666
35	02.02.2020	06:47	53.21	126	93	5054	11601
36	02.02.2020	06:17	52.53	66	81	4412	11562
37	02.02.2020	05:47	51.39	43	71	3597	11532
38	02.02.2020	05:17	50.10	-29	35	1753	11530
39	02.02.2020	04:47	50.03	-46	44	2201	11548
40	02.02.2020	04:17	50.03	-53	53	2651	11573
41	02.02.2020	03:47	50.03	-53	53	2651	11600
42	02.02.2020	03:17	50.10	-67	69	3251	11626
43	02.02.2020	02:47	50.18	-46	46	2207	11650
44	02.02.2020	02:17	50.25	-44	44	2211	11672
45	02.02.2020	01:47	50.33	-46	46	2214	11695
46	02.02.2020	01:17	50.40	-46	48	2415	11718
47	02.02.2020	00:47	50.40	-46	44	2419	11741
48	02.02.2020	00:17	50.48	-44	44	2322	11764

**Vedlegg 3: Lastsituasjoner for tremomentmetoden**

Nr.	Lasttilfelle	$\frac{6A\bar{a}}{l}$	$\frac{6A\bar{b}}{l}$
1		$\frac{Pa}{l}(l^2 - a^2)$	$\frac{Pb}{l}(l^2 - b^2)$
2		$\frac{3Pl^2}{8}$	$\frac{3Pl^2}{8}$
3		$\frac{ql^3}{4}$	$\frac{ql^3}{4}$
4		$\frac{8q_0l^3}{60}$	$\frac{7q_0l^3}{60}$

**Vedlegg 4: Diagram for knekk lengde enkle rammer**

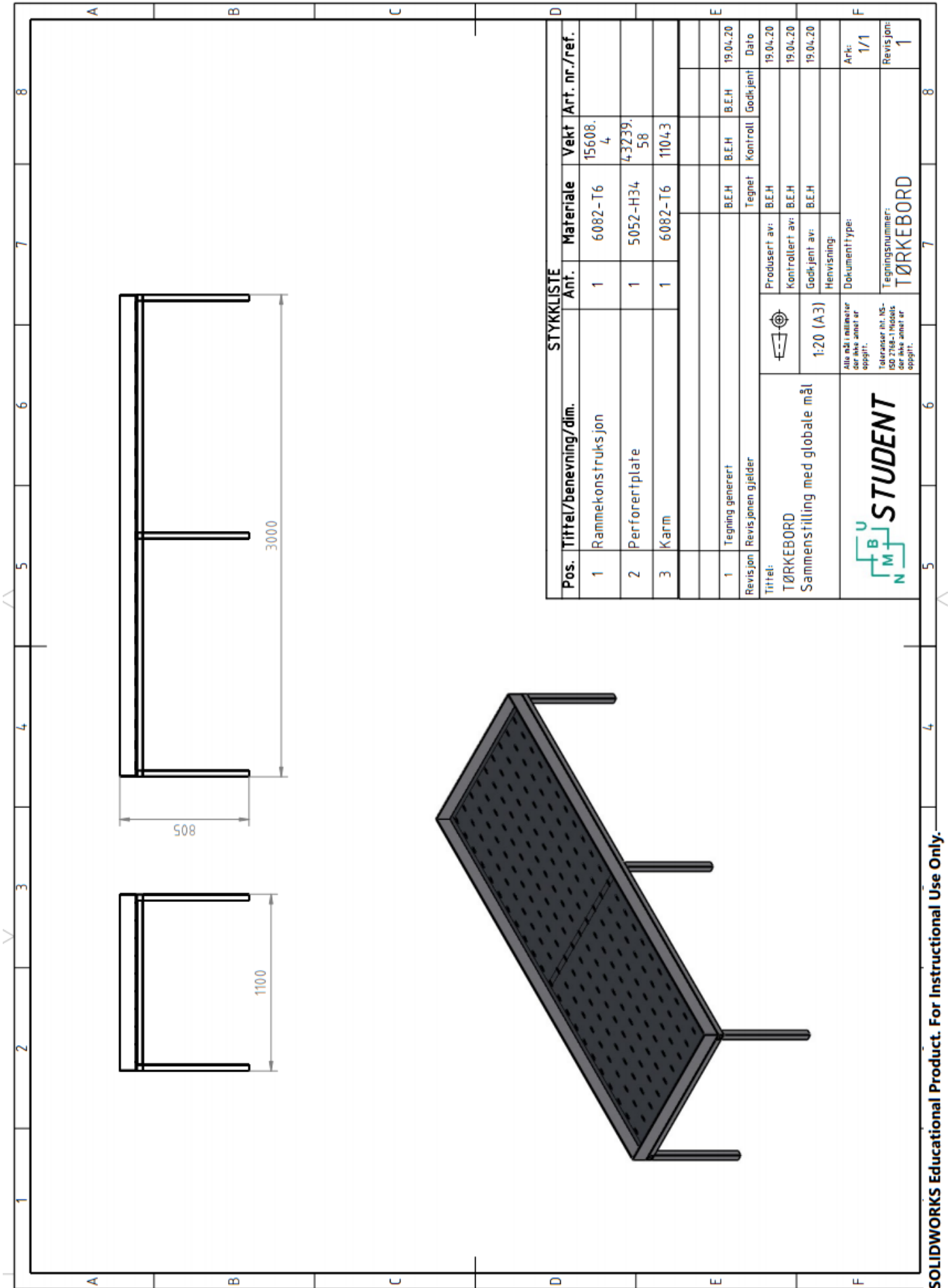


**Vedlegg 5: Formler for statisk ubestemte rammer**

Belastningsfall	A inspänd	A led	Belastningsfall		$k_A=k_B=k$
	$\frac{H}{F} = \frac{3}{8\gamma(k+2)}$ $\frac{M_A}{Fl} = \frac{1}{8(k+2)}$ $\frac{M_B}{Fl} = \frac{1}{4(k+2)}$	$\frac{3}{8\gamma(2k+3)}$ $0$ $\frac{3}{8(2k+3)}$		$\frac{M_A}{Fl} = \frac{1}{8} \cdot \frac{3+2k_B-k_A}{k_A k_B+2k_A+2k_B+3}$ $\frac{M_B}{Fl} = \frac{1}{8} \cdot \frac{3+2k_A-k_B}{k_A k_B+2k_A+2k_B+3}$	$\frac{1}{8(k+1)}$
	$\frac{H}{Q} = \frac{1}{4\gamma(k+2)}$ $\frac{M_A}{Ql} = \frac{1}{12(k+2)}$ $\frac{M_B}{Ql} = \frac{1}{6(k+2)}$	$\frac{1}{4\gamma(2k+3)}$ $0$ $\frac{1}{4(2k+3)}$		$\frac{M_A}{Ql} = \frac{1}{24} \cdot \frac{6+4k_B-3k_A}{k_A k_B+2k_A+2k_B+3}$ $\frac{M_B}{Ql} = \frac{1}{24} \cdot \frac{9+6k_A-2k_B}{k_A k_B+2k_A+2k_B+3}$	$\frac{6+k}{24(k+1)(k+3)}$ $\frac{9+4k}{24(k+1)(k+3)}$
	$\frac{H}{Q} = \frac{2k+5}{4(k+2)}$ $\frac{M_A}{Qh} = \frac{3+k}{12(k+2)}$ $\frac{M_B}{Qh} = \frac{k}{12(k+2)}$	$\frac{3}{4} \cdot \frac{k+2}{2k+3}$ $0$ $\frac{k}{4(2k+3)}$		$\frac{M_A}{Ql} = \frac{k_A}{12} \cdot \frac{3+k_B}{k_A k_B+2k_A+2k_B+3}$ $\frac{M_B}{Ql} = \frac{k_B}{12} \cdot \frac{3+k_A}{k_A k_B+2k_A+2k_B+3}$	$\frac{k}{12(k+1)}$

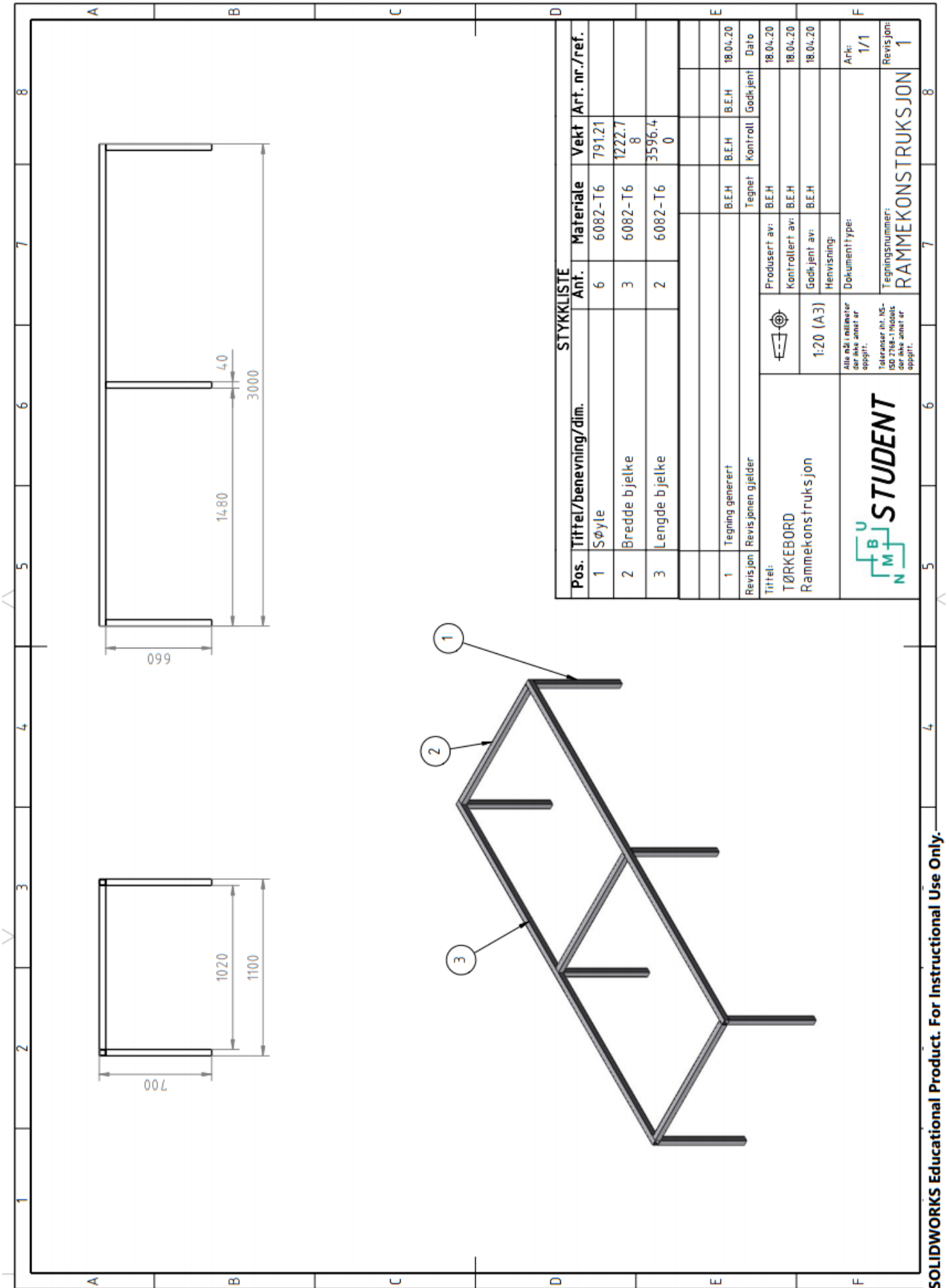
Momentdiagrammet schematisk framställt på strävornas dragsida.

Utvikling av tørkebord for tørking av kakaobønner



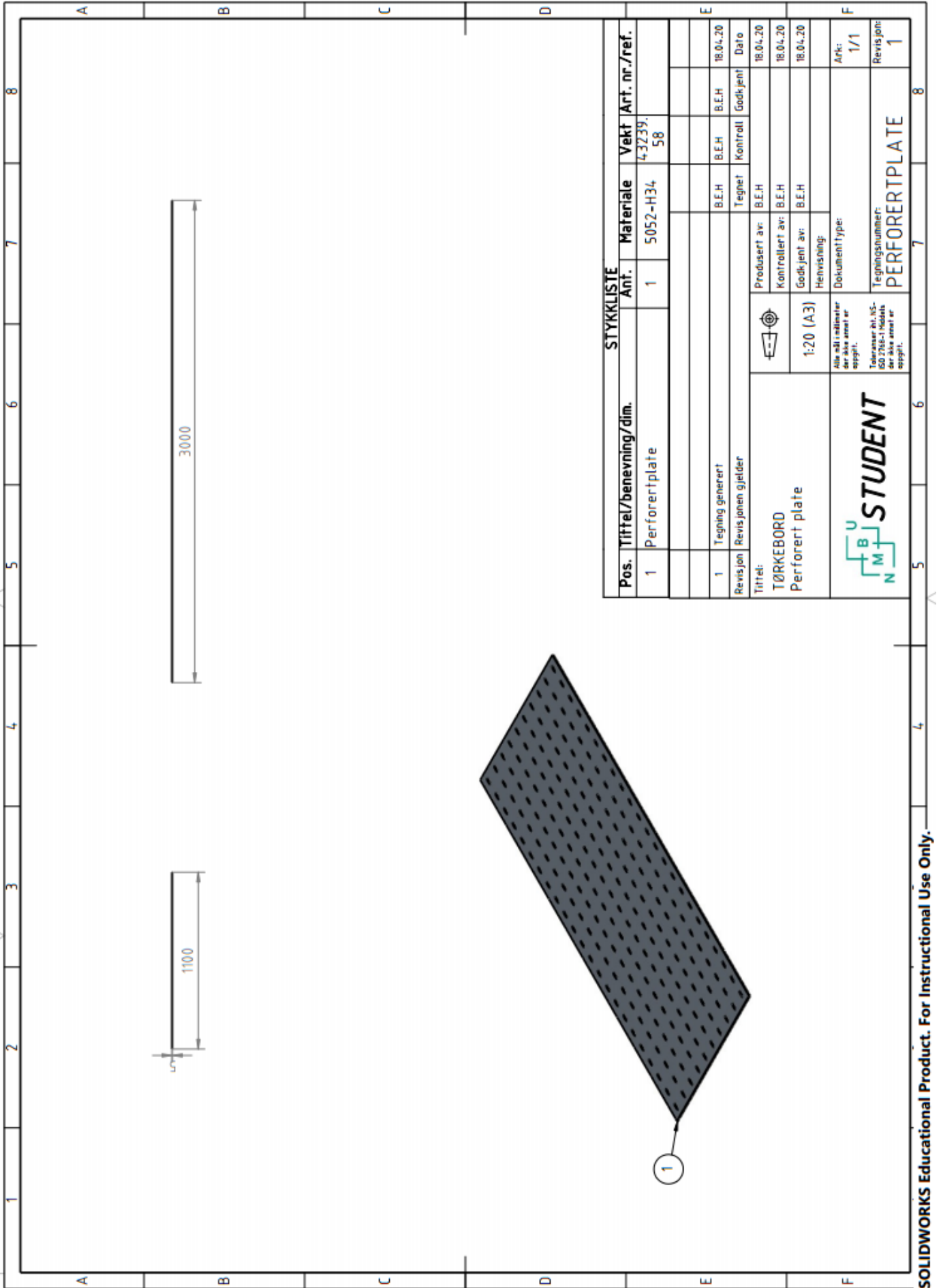
STYKKELISTE					
Pos.	Tittel/benevning/dim.	Ant.	Materiale	Vekt	Art. nr./ref.
1	Rammekonstruksjon	1	6082-T6	15608,4	
2	Perforertplate	1	5052-H34	43239,58	
3	Karm	1	6082-T6	1104,3	
1	Tegning generert		B.E.H	B.E.H	19.04.20
	Revisjon		B.E.H	B.E.H	19.04.20
	Revisjonen gjelder		Tegnet	Kontroll	Dato
			B.E.H	B.E.H	19.04.20
Tittel:		Produisert av:		19.04.20	
TØRKEBORD		B.E.H		19.04.20	
Sammenstilling med globale mål		Kontrollert av:		19.04.20	
		B.E.H		19.04.20	
		Godkjent av:		19.04.20	
		B.E.H		19.04.20	
		Henvising:		Arkt:	
		Dokumenttype:		1/1	
		Alle mål i millimeter der ikke annet er oppgitt.		Revisjon:	
		Toleranser iht. NS- 150 2764-1 Middele der ikke annet er oppgitt.		1	
		Tegningsnummer: <b>TØRKEBORD</b>			



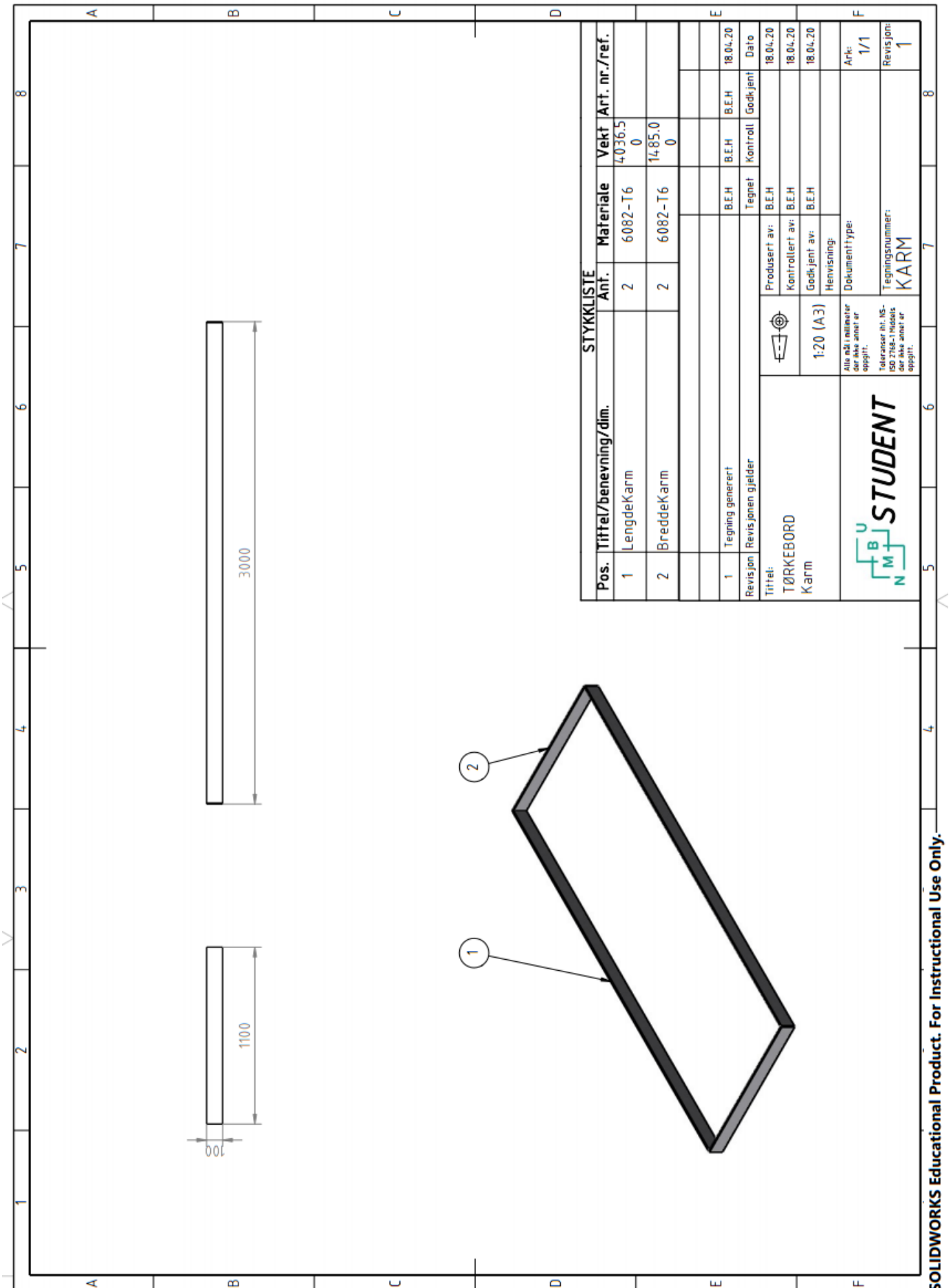


STYKKELISTE					
Pos.	Tittel/benevning/dim.	Ant.	Materiale	Vekt	Art. nr./ref.
1	Søyle	6	6082-T6	791,21	
2	Bredde bjelke	3	6082-T6	1222,78	
3	Lengde bjelke	2	6082-T6	3596,40	
1	Tegning generert		B.E.H	B.E.H	18.04.20
Revisjon	Revisjonen gjelder		Tegnet	Kontroll	Godkjent
			B.E.H	B.E.H	18.04.20
Tittel:		Produisert av:		Dato	
TØRKEBORD		B.E.H		18.04.20	
Rammekonstruksjon		Kontrollert av:		18.04.20	
		B.E.H		18.04.20	
		Hensvisning:			
		1:20 (A3)			
		Alle må i millimeter		Artik: 1/1	
		der ikke annet er		Revisjon:	
		oppgitt.		1	
		Toleranser iht. NS-		Tegningsnummer:	
		ISO 2768-1 Middele		RAMMEKONSTRUKSJON	
		der ikke annet er		8	
		oppgitt.			











**Norges miljø- og biovitenskapelige universitet**  
Noregs miljø- og biovitenskapelige universitet  
Norwegian University of Life Sciences

Postboks 5003  
NO-1432 Ås  
Norway