

RAPPORT BACHELOROPPGAVEN

Tittel (Både på norsk og engelsk kreves)

Norsk: Optimalisering av kjøleblokk for elektrisk Formula Student-bil

Engelsk: Optimization of Cooling Block for an Electric Formula Student Car

Prosjektnr

MTP-K-2024-03

Forfatter(e)

William Gundersen

Thomas Haakestad Thoresen

Oppdragsgiver(e) eksternt

Revolve NTNU

Veileder(e) internt

Knut Sørby

Rapporten er ÅPEN/LUKKET (stryk ut det som ikke gjelder)

ÅPEN

Dato levert

21.mai 2024

Kort sammendrag: Formålet med denne oppgaven er å optimalisere kjøleblokken til Revolve NTNU, som kjøler inverteren. Målet er å redusere vekten og tilpasse kjøleeffekten. Frese- og 3D-printing ble utforsket, og vi endte opp med et ferdigstilt freseutkast. Resultatet er en kjøleblokk som veier 572 gram mindre enn fjorårets modell.

Abstract: The purpose of this project is to optimize the cooling block for Revolve NTNU, which cools the inverter. The goal is to reduce weight and adjust the cooling efficiency. Milling and 3D printing were explored, and we ended up with a milling prototype. The result is a cooling block that weighs 572 grams less than last year's model.

Stikkord:

- Optimalisering
- Strømning
- Varmeoverføring
- Simuleringer
- Produksjonsmetoder

Keywords:

- Optimization
- Flow
- Heat Transfer
- Simulation
- Production Methods

Oppgavetekst

Hvert år designer Revolve NTNU en ny elektrisk racerbil for å konkurrere i studentkonkurransen Formula Student. For å hevde seg i toppen av denne konkurransen kreves en lett og pålitelig bil. Dette betyr at vekt må kuttes i alle systemer uten at det går utover kvaliteten. I 2023 holdt inverteren kun 75% av maksimal temperatur. Dette la grunnlag for å optimalisere dette systemet. Problemstillingen til oppgaven er:

- Hvordan kan kjøleblokkens vekt optimaliseres uten at det går på bekostning av systemets kjøleevne og vanntrykk?

Forord

Denne oppgaven er utført av William Gundersen og Thomas Haakestad Thoresen, begge studerer bachelor i maskiningeniør ved NTNU. Oppgaven går ut på å optimalisere inverterkjøleblokken til Revolve NTNU.

Vi ønsker å rette en stor takk til vår veileider Knut Sørby, som har veiledet oss gjennom bachelorperioden. I tillegg ønsker vi å takke alle medlemmer av Revolve NTNU som har bidratt med sin unike kompetanse, samt stilt med utstyr, dataprogrammer og kontorplass. Enkelte medlemmer fortjener en ekstra stor takk. Takk til Njål Runderheim og William Moriggi for et fint samarbeid om inverteren. Tusen takk til Joakim Saugen for å hjelpe oss med å forklare prosessen og teorien. Vi er også svært takknemlig for innspill på design og Abaqus simulering fra Tobias Tvette. Til slutt, tusen takk til Petter Bakkelund og Anders Iwe for hjelp med simuleringer i ColdStream og Star CCM+.

Vi ønsker hele Revolve NTNU lykke til videre med utviklingen av bilen og konkurransene gjennom sommeren 2024.

W. Gundersen

William Gundersen

Thomas H. Thoresen

Thomas Haakestad Thoresen

Sammendrag

Formålet med denne oppgaven er å optimalisere kjøleblokken til Revolve NTNU, som sørger for kjøling av inverteren til deres elektriske racerbil. Vårt fokus vil være å finne muligheter for å redusere vekten, samt optimalisere kjøleevnen til kjøleblokken. Revolve NTNU har alltid et ønske om å gjøre bilen lettere, og de så en mulighet til å forbedre kjøleblokken.

For å løse oppgaven har vi benyttet en systematisk metode som inkluderer utvikling av enkle utkast, evaluering og valg av de beste løsningene, simulering av sammenslåtte design, og deretter en detaljert utforming av designet.

Fresing og 3D-printing ble undersøkt som produksjonsmetode for kjøleblokken. Et utkast ble laget for hvert av produksjonsmetodene, hvor det ble ferdigstilt et freseutkast. Det 3D-printede utkastet ble laget for fremtidig videreutvikling, hvor bærekraft er i fokus. Det ble også undersøkt ulike indre design til kjøleblokken, og vi endte opp med en enkelt svingkonfigurasjon. Freseutkastet får diamant-finner for å øke overflatearealet og den turbulente strømmingen, mens 3D-utkastet ser på muligheter for indre 3D-strukturer. De fremlagte løsningene og simuleringene diskuteres fortløpende i oppgaveteksten for å detaljere designet. Simuleringene utforsker styrken, varmeoverføringsevnen og strømmingen i delen.

Resultatene fra oppgaven er en kjøleblokk som veier 572 gram mindre enn fjorårets kjøleblokk. Den systematiske metoden begynte med utviklingen av enkle utkast, til detaljert design og simuleringer ved bruk av elementmetoden. Tilnærmingen har vist seg å være en effektiv måte å utarbeide forbedring av kjøleblokken.

Abstract

The main goal of this thesis is to optimize the cooling block for Revolve NTNU, which cools the car's inverter. This involves reducing weight and enhancing the cooling capacity of the electrical component. Revolve NTNU always aims to make the car lighter and identified an opportunity to reduce the weight of the cooling block.

A systematic approach was employed to address this task, which included developing initial drafts, evaluating and selecting the best solutions, simulating combined designs, and then creating a detailed design.

Milling and 3D printing were explored as manufacturing methods for the cooling block. A draft was created for each of the manufacturing methods, with the group ending up with a finalized milling design. A 3D-printed draft was made for further development, with a focus on sustainability. Different internal designs for the drafts were also explored, both ending with a single-turn configuration. The milling draft features diamond structure to increase surface area and turbulent flow, while the 3D-printed draft explores possibilities for internal 3D geometry. The proposed solutions are discussed and simulated in various programs throughout the thesis to detail the design. The simulations explore the strength, heat transfer capability, and flow within the part.

The results of this thesis include a cooling block that is 572 grams lighter than last year's model and has adjusted cooling efficiency. The systematic method used, from the development of initial drafts to detailed design and simulation, has proven effective in implementing these improvements.

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	iv
Abstract	v
1 Bakgrunn	1
1.1 Bærekraftsmål	2
2 Teori	3
2.1 Mekanikk	3
2.2 Elementmetoden	5
2.3 Fluidmekanikk	7
2.4 Termodynamikk	10
3 Produksjonsmetode	14
3.1 3D-printing	14
3.2 Fresing	14
3.3 Fordeler og ulemper	15
3.4 Bærekraftig produksjon	17
3.5 Design for produksjon	18
4 Design	21
4.1 Innovasjon og digitalisering	21
4.2 Designrammer	22
4.3 Material	23
4.4 Designutkast	24
4.5 Indre design	27
4.6 Sammenslåing av utkastene	29
4.7 Konklusjon av grunndesign	31
5 Detaljering og analyse av designløsningen	33
5.1 Indre design	37
5.2 Videreutvikling	40
6 Maskinering og sammenstilling	45
6.1 Endringer på kjøleblokken for maskinering.	45
6.2 Vanntetning	46

7	Prosesser og beregninger	50
7.1	Simulering	50
7.2	Den mekaniske prosessen	52
7.3	Strømningsprosessen	55
7.4	Den termiske prosessen	60
7.5	Sammenligning av simulering og teoretiske utregninger	68
8	Konklusjon og fremtidig arbeid	72
	Vedlegg	76
A	Vektutvikling	76
A.1	Vektutvikling	76
B	FEA	77
B.1	Abaqus material	77
B.2	Kontakt	79
C	ColdStream	83
C.1	Coldsream oppsett	83
C.2	ColdStream Resultater	88
D	Maskintegninger	90
D.1	Maskintegninger	90
E	Administrativt	91
E.1	Administrativt	91
 Figurer		
1.1	Inverter temperaturer fra konkurranser i 2023.	1
1.2	Oversikt over FNs bærekraftsmål [2].	2
2.1	Illustrasjon av nedbøyning.	3
2.2	Illustrasjon av torsjon.	4
2.3	3D elementer [5].	6
2.4	Laminær strømning [6].	7
2.5	Turbulent strømning [6].	7
2.6	Moody-diagram.	10
2.7	Den andre loven i termodynamikk [8].	11
3.1	Bilde av 3D-printing [9].	14
3.2	Bilde av fresing [10].	14

3.3	Bilde av en del før og etter ettermaskinering[13].	15
3.4	Design og materialforbruk i AP og SP [12].	16
3.5	FNs bærekraftsmål nummer 12 - Ansvarlig forbruk og produksjon [16].	17
3.6	Figur av designprinsipper i 3D-rinting[17].	18
3.7	Utdrag av en fresefil til en form med 3D flate fra Revolve NTNU. .	19
3.8	Visualisering av problematiske nedsenkninger og løsning ved fresing [18].	20
4.1	Iterativ prosess[19].	21
4.2	Bilde av casing med grensebetingelser.	22
4.3	Kjøleblokk utkast 1.	25
4.4	Kjøleblokk utkast 2.	26
4.5	Kjøleblokk utkast 3.	27
4.6	Indre design - seks svinger.	28
4.7	Trykktap - seks svinger.	28
4.8	Indre design - tre svinger.	28
4.9	Trykktap - tre svinger.	28
4.10	Indre design - en sving.	29
4.11	Trykktap - en sving.	29
4.12	Sammenslått design basert på designutkastene.	29
4.13	Løsningen av indre design.	30
4.14	Trykktap på ulike svingkonfigurasjoner fra StarCCM+.	32
5.1	Spenningsanalyse av grunnform i Abaqus.	33
5.2	Deformasjonsanalyse av grunnform i Abaqus.	34
5.3	Bunnpartiet til kjøleblokken.	34
5.4	Lokket til kjøleblokken.	34
5.5	Nærbilde vannkanal	35
5.6	Nærbilde av boltinnfesting til lokket.	35
5.7	CSTATUS simulering fra Abaqus for å utforske kontaktoverflaten .	36
5.8	Spenningsanalyse av innfestningsbolt	36
5.9	Optimalisert innfestingsrammen.	37
5.10	Jordingspunkt til kretskortene.	37
5.11	Nærbilde av diamant geometri.	38
5.12	Utdypende lokk.	39
5.13	Utdypende bunnparti.	39
5.14	Ferdig sammenstilling av utdypende design.	40
5.15	Forskjellige TPMS-strukturer: (a) Diamant, (b) Fisher-Koch, (c) Gyroid, (d) I-WP, (e) Neovius, (f) Primitive [27].	41
5.16	Schwarz indre design.	41

5.17 Gyroid indre design.	41
5.18 Konsept for 3D-printet design.	42
5.19 Konsept for 3D-printet design ovenfra.	42
5.20 Vektutvikling av ulike kjøleblokk design.	43
6.1 Optimalisert ramme.	46
6.2 Oppdatert ramme for fresing.	46
6.3 Opptatert indre design for fresing.	46
6.4 O - ring.	47
6.5 Tetningsstoff.	47
6.6 Nærbilde av pakningsspor.	47
6.7 Ferdig sammenstilling av freseutkast.	48
6.8 Vektutvikling av ulike kjøleblokker med maskinerende utkast.	49
7.1 Spenningsanalyse av utdypende design.	50
7.2 Star CCM+ - Laminær strømning i starten.	51
7.3 Visualisering av nedbøyningen med vinkel ϕ og distanse w	52
7.4 Visualisering av krefter som fører til torsjon.	54
7.5 Moody diagram med f -verdi.	56
7.6 Følsomhetsanalyse av trykktap med variablene f og K	58
7.7 Illustrasjon av «No-slip condition» [34].	59
7.8 Konduksjonsprofil.	61
7.9 Konveksjonsprofil.	63
7.10 Illustrasjon av plassering til T_S og T_∞	64
7.11 Illustrasjon av termisk motstand i kjølesystemet.	65
7.12 Følsomhetsanalyse av varmeoverføringskoeffisienten h	67
7.13 Oversikt over den termiske prosessen.	67
7.14 Temperatur resultater fra ColdStream simulering.	69
7.15 Temperatur resultater fra ColdStream simulering.	70
7.16 Trykktap fra ColdStream-simuleringene.	71
7.17 Nærbilde av mesh på Star CCM+ simuleringene.	71

Tabeller

3.1 Fordeler og ulemper med fresing og 3D-printing.	17
4.1 Valgmatrise for metaller.	24
4.2 Masseforskjell i 10x11.25 og 8x11.25.	30
4.3 ColdStream simuleringer av indre geometri.	31

Forkortelser

AP Additiv produksjon. 14, 15

CAD Computer-aided design. 14, 51

CNC Computer Numerical Control. 14, 16

FEA Finite Element Analysis. 5, 33, 68

FEM Finite Element Method. 5, 33

FLD Fritt legme diragram. 52

FS Formula Student. 1, 51

MTP Maskinteknikk og Produksjon. 48

Nu Nusselt nummer. 9, 62, 63

Pr Prandtl nummer. 8, 62, 63

Re Reynolds nummer. 8, 56, 59, 62

SLM Selektiv lasersmelting. 14, 18

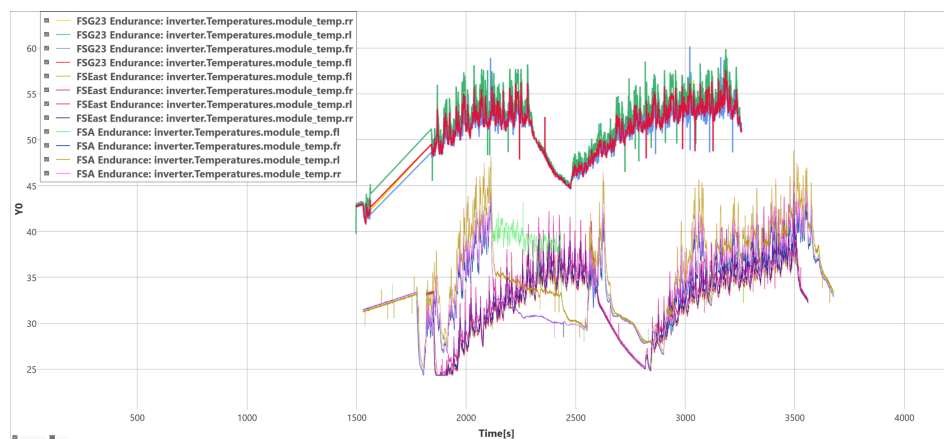
SP Subtraktiv produksjon. 14, 16

TPMS Triply Periodic Minimal Surfaces. 40

1 Bakgrunn

Formula Student (FS) er verdens største ingeniørkonkurranse for studenter, hvor konkurransen er bygd opp av arrangementer i 24 land. Det finnes omtrent 680 registrerte FS-lag spredd over hele verden [1]. Målet med konkurransen er å produsere den beste racer bilen. Konkurransen går ut på å samle flest poeng over dynamiske og statiske konkurranser. Poeng samles ved å fullføre øvelser på minst mulig tid (dynamiske øvelser) og presentere arbeidet som ligger bak utviklingen av bilen (statiske øvelser). Denne konkurranseformen gjør det mulig å prestere, selv uten den raskeste bilen. God dokumentasjon av løsninger og designvalg, i tillegg til faglig begrunnelse, gir grunnlag for poeng.

Inverteren (vekselretter) er en kritisk del som konverter likestrøm til vekselstrøm, hvor den både kan variere frekvens og amplitude. Vekselstrømmen brukes for å styre rotasjonshastigheten til motorene, hvor det oppstår energitap under omgjøringen. Det er ønskelig å styre temperaturen ved hjelp av kjøling. Temperaturstyringen av kretskortene i inverteren er viktig for å redusere slitasje og holde dem innenfor optimal arbeidstemperatur. Ved høy temperatur vil komponentene på kretskortene bli skadet, og for en FS bil kan dette bety at bilen stopper. Det er dermed kritisk å opprettholde en temperatur med en god sikkerhetsmargin til maksimal temperatur. Fjorårets kjøleblokk hadde god kjøleevne, som er vist i figur 1.1.



Figur 1.1: Inverter temperaturer fra konkurranser i 2023.

Denne grafen viser maksimal temperatur i ulike konkurranser, hvor hver linje representerer et kretskort i inverteren over i tre forskjellige konkurranser. Som vist i figuren oversteg temperaturen aldri 60°C. Dette er ikke optimalt siden det kun er 75% av maksimal driftstemperatur på 80°C. Kjøleegenskapene har ført til betydelig vekt på totalt 841.24 gram, da inkludert alle komponenter som innfesting,

samt vann. I 2023 besluttet Revolve å designe en ny inverter, noe som krevde en designendring av kjøleblokken. Ønsket om design endring dannet grunnlaget for oppgaven. En vektreduksjon og gode kjøleegenskaper vil påvirke de dynamiske øvelsene, og en godt dokumentert kjøleblokk med gode faglige løsninger vil bidra til å samle poeng på de statiske øvelser.

1.1 Bærekraftsmål



Figur 1.2: Oversikt over FNs bærekraftsmål [2].

Gjennom prosjektet integreres FNs bærekraftsmål for å vise hvordan ny teknologi og innovasjon kan bidra positivt til en bærekraftig utvikling. FNs bærekraftsmål er en felles arbeidsplan for å oppnå en bedre og mer bærekraftig fremtid for alle. Disse målene adresserer de globale utfordringene vi står overfor, inkludert fattigdom, ulikhet, klimaendringer, miljøødeleggelse, fred og rettferdighet [2]. Vårt arbeid treffes av følgende bærekraftsmål:

- Mål 9: Industri, innovasjon og infrastruktur:
- Mål 12: Ansvarlig forbruk og produksjon

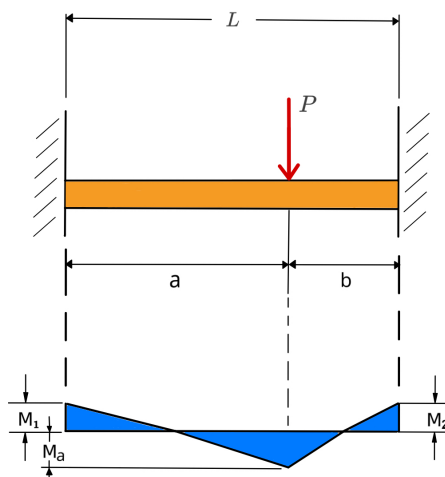
Gruppen har valgt å fremheve FNs bærekraftsmål nummer 9 og 12 i denne oppgaven, hvilke går dypere inn på industri og produksjon, med fokus på delmål 9.4 effektiv bruk av ressurser, 12.2 bærekraftig forvaltning av naturressurser og 12.5 redusere avfallsmengden. Disse delmålene integreres i oppgaven for å utforske mulighetene for å gjøre produktet mer bærekraftig.

2 Teori

2.1 Mekanikk

2.1.1 Nedbøyning

Nedbøyning oppstår når en bjelke eller et annet legeme påføres en kraft, og fører til at den deformeres. Det finnes ulike formeler for ulike nedbøyningssituasjoner. Formelen for nedbøyning er hentet fra formelheftet [3]. Figuren under viser nedbøyningssituasjonen:



Figur 2.1: Illustrasjon av nedbøyning.

$$w_x = \frac{P \cdot b^2 \cdot x^2}{6 \cdot E \cdot I \cdot L^3} \cdot (3 \cdot a \cdot L - 3 \cdot a \cdot x - b \cdot x) \quad (1)$$

hvor:

w_x : Nedbøyning i punktet x (mm)

P : Punktlast (N)

L : Lengde av bjelken (mm)

a : Lengde fra ende til last (mm)

b : Lengde fra motsatt ende til last (mm)

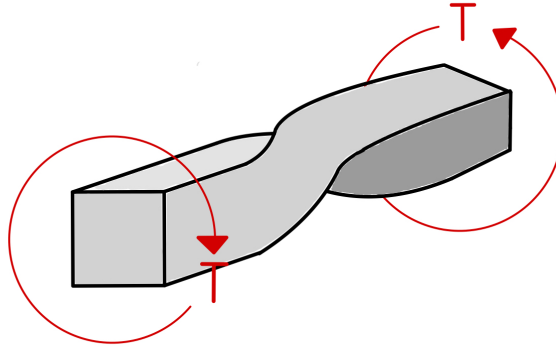
x : Lengde fra a -ende til valgfritt punkt ($x < a$) (mm)

E : Elastisitetsmodul (MPa)

I : Tverrsnittets andre arealmoment (mm^4)

2.1.2 Torsjon

Torsjon er en mekanisk påkjenning som oppstår når en aksel eller et annet legeme blir utsatt for et dreiemoment som forsøker å vri det. Figur 2.2 viser torsjon ved rektangulært tversnitt. Formeler for torsjon avhenger av hvilke tversnitt man har.



Figur 2.2: Illustrasjon av torsjon.

Ved torsjon oppstår det en vridningsvinkel. Formelen for vridningsvinkel er følgende:

$$\Phi = \frac{Mx \cdot L}{G \cdot W} \quad (2)$$

Φ : Vridningsvinkel (Rad)

Mx : Dreiemoment (N/mm)

L : Lengde mellom to gitte punkt (mm)

G : Skjærmodul til materialet (MPa)

W : Tverrsnittsmodul (mm³)

Tversnittsmodulen W , til et objekt er et mål på dets evne til å motstå bøyning. Modulen er basert på profilen til objektet, og er en avgjørende faktor for utregninger om bøyning. Formelen for tversnittsmodul er:

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

W_x : Tverrsnittsmodull (mm^3)

H : Høyde (mm)

h : Indre høyde (mm)

B : Bredde (mm)

b : indre bredde (mm)

Skjærspenningsmodulen G , for isotropsike materialer er ikke selvstendige og er avhengige av Elastisitetsmodulen og kan løses ved hjelp av denne formelen.

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (4)$$

E : Elastisitetsmodul (MPa)

ν : Possion tallet

2.2 Elementmetoden

Elementmetoden eller Finite Element Method (FEM) er en numerisk metode som bryter ned objektet inn i flere små enkle elementer, bestående av trekanter eller firkanter. Finite Element Analysis (FEA) er bruken av FEM i praksis. Disse elementene beveger informasjon mellom hverandre ut ifra hvordan krefter og innfesting er bestemt. FEA resultatene er troverdige dersom simuleringen er satt opp med troverdige verdier tilnærmet virkeligheten [4].

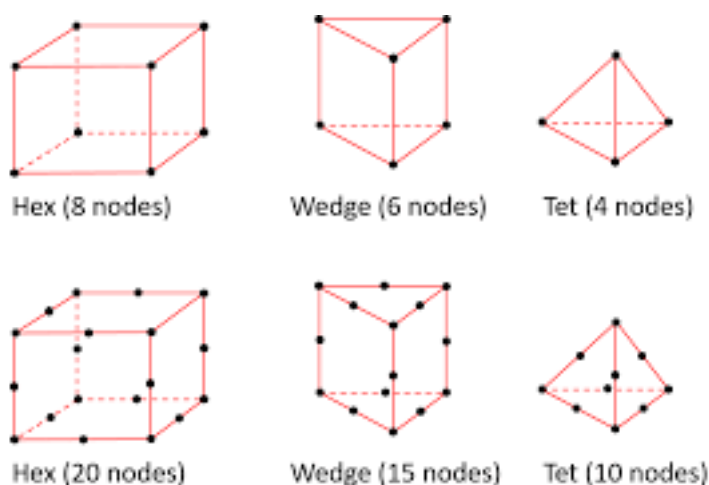
2.2.1 Mesh

FEA modellen blir delt inn i elementer når den blir tilført et mesh. Meshets sin utforming og størrelse er essensielt for å få tilnærmet "virkelige" resultater. Store og få elementer gir unøyaktige svar, og små elementer kan kreve for mye prosessorkraft

fra datamaskinen. For et mesh er det ønskelig å finne konvergeringspunktet til modellen. Konvergeringspunktet er der resultatene stabiliserer seg og det ikke lenger er hensiktsmessig med et mindre og finere mesh [4].

2.2.2 Elementer

Mesh er bygd opp av elementer. Disse elementene forekommer som trekanter, firkanter eller en kombinasjon av disse og kan fremstilles i både 3D og 2D. Denne oppgaven skal ta for seg 3D elementer. 3D elementer oppstår i 6 forskjellige typer og de ulike elementtypene har ulikt antall noder. Figur 2.3 viser første og andre ordens elementer, hvor de tre øverste er første orden.



Figur 2.3: 3D elementer [5].

En node er der elementet får inn informasjon og gir videre informasjon til andre noder. Det betyr at jo flere som mottar informasjonen, desto mer nøyaktige blir simuleringene. Dette medfører igjen til tynge jobber for datamaskinen og simuleringene vil ta lengre tid. Hex elementer har i første orden åtte noder, et i hvert hjørne av elementet, sammenlignet med tet-element som har fire noder, og mottar derfor mindre informasjon enn Hex elementer. Hex-elementer er dermed mer presise enn tet-elementer, men ulempen til hex-elementene er at de er vanskelige å meshe på kompleks geometri. Dette kommer av at det vanskelig å opprettholde strukturen til rektanglene over kompleks geometri. Dette fører til at kompliserte figurer ofte bruker et tet mesh. Andre ordens elementer har noder i alle hjørner og en mellom hjørnene, som igjen fører til mange flere noder og mer nøyaktige simuleringer som vist i figur 2.3.

Krefter i en enkelt node kan vises med denne formelen. Alle variablene består av matriser som blir større jo flere frihetsgrader som er inkludert i modellen. Matrisen under er et eksempel på hvordan det kan se ut.

$$\{f\} = \{k\}\{u\} \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} f_{x1} \\ f_{y1} \\ f_{x2} \\ f_{y2} \\ f_{x3} \\ f_{y3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{x1x1} & k_{x1y1} & k_{x1x2} & k_{x1y2} & k_{x1x3} & k_{x1y3} \\ k_{y1x1} & k_{y1y1} & k_{y1x2} & k_{y1y2} & k_{y1x3} & k_{y1y3} \\ k_{x2x1} & k_{x2y1} & k_{x2x2} & k_{x2y2} & k_{x2x3} & k_{x2y3} \\ k_{y2x1} & k_{y2y1} & k_{y2x2} & k_{y2y2} & k_{y2x3} & k_{y2y3} \\ k_{x3x1} & k_{x3y1} & k_{x3x2} & k_{x3y2} & k_{x3x3} & k_{x3y3} \\ k_{y3x1} & k_{y3y1} & k_{y3x2} & k_{y3y2} & k_{y3x3} & k_{y3y3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{x1} \\ u_{y1} \\ u_{x2} \\ u_{y2} \\ u_{x3} \\ u_{y3} \end{bmatrix}$$

hvor:

$\{f\}$: matrisse for krefter i noden

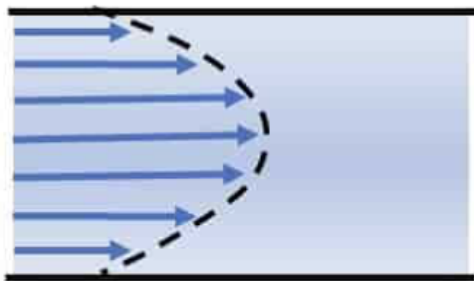
$\{k\}$: matrisse for elementstivhet

$\{u\}$: matrisse for node forflytning

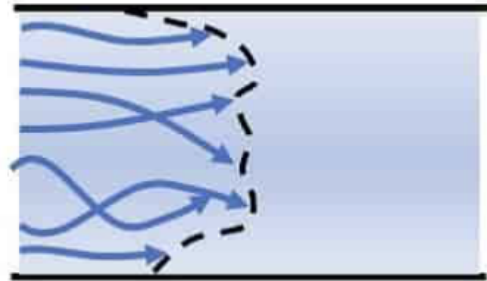
2.3 Fluidmekanikk

2.3.1 Fluidstrømning gjennom kjøleblokken

Fluid strømning har stor påvirkning på trykket og kjøleeffekten. En fluidstrømning kan defineres som to ulike strømminger, hvor disse er laminær- og turbulent strømning. I en laminær strømning vil fluiden strømme i en rett bane, mens i en turbulent strømning vil strømmen gå i tilfeldige retninger. De forskjellige strømmingene er illustrert i figurene nedenfor [6].



Figur 2.4: Laminær strømning [6].



Figur 2.5: Turbulent strømning [6].

2.3.2 Reynolds nummer

Reynolds nummer (Re) er en dimensjonsløs paramter som bestemmer om strømmingen er laminært eller turbulent. Hvis Re nummeret er under 2000, så er strømmingen laminær, og hvis strømmingen er over 4000 så har man en turbulent strømming [7]. For intervallet mellom 2000 og 4000 er det litt usikkert hvilken strømming man har. Formelen for Re er:

$$\text{Re} = \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \quad (6)$$

hvor:

Re : Reynolds nummer (dimensjonsløs)

ρ : Fluidets densitet (kg/m^3)

u : Fluidets hastighet (m/s)

D : Rørets diameter (m)

μ : Fluidets dynamiske viskositet (Pa·s eller $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$)

2.3.3 Prandtl-nummeret

Prandtl nummer (Pr) er en dimensjonsløs størrelse som brukes i fluidmekanikk og varmeoverføring for å karakterisere forholdet mellom kinematiske viskositeten og termisk diffusivitet. Formlen for Pr kan omskrives til:

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu c_p}{k} \quad (7)$$

hvor:

ν : Kinematisk viskositet

α : Termisk diffusivitet

μ : Dynamisk viskositet

c_p : Spesifikk varmekapasitet ved konstant trykk

k : Termisk konduktivitet av fluidet

2.3.4 Nusselt nummer

Nusselt nummer (Nu) er en dimensjonsløs parameter som beskriver forholdet mellom konvektiv til konduktiv varmføring i et fluid. Det finnes ulike formler for ulike situasjoner for å finne Nusselt nummer. Formelene gruppen har brukt er for Nu er:

$$\text{Nu} = \frac{h \cdot L}{k} \quad (8)$$

$$\text{Nu} = 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.3} \quad (9)$$

hvor:

Nu : Nusselt nummer (dimensjonsløs)

h : Konvektiv varmeoverføringskoeffisient (W/m²·K)

L : Karakteristisk lengde (m)

k : Termisk konduktivitet av fluidet (W/m·K)

Re : Reynolds nummer (dimensjonsløs)

Pr : Prandtl nummer (dimensjonsløs)

2.3.5 Trykktap

Vannet som strømmer gjennom et rør vil oppleve motstand på veien. Dette kan være motstand vannet møter når det treffer kanter som fører til trykkfall. Trykkfallet på rør strømminger kan regnes med Darcy-Weisbach friksjonfaktor, hvor formelen er:

$$\Delta P = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (10)$$

ΔP : Trykktapet (Pa)

f : Darcy friksjonsfaktor (dimensjonsløs)

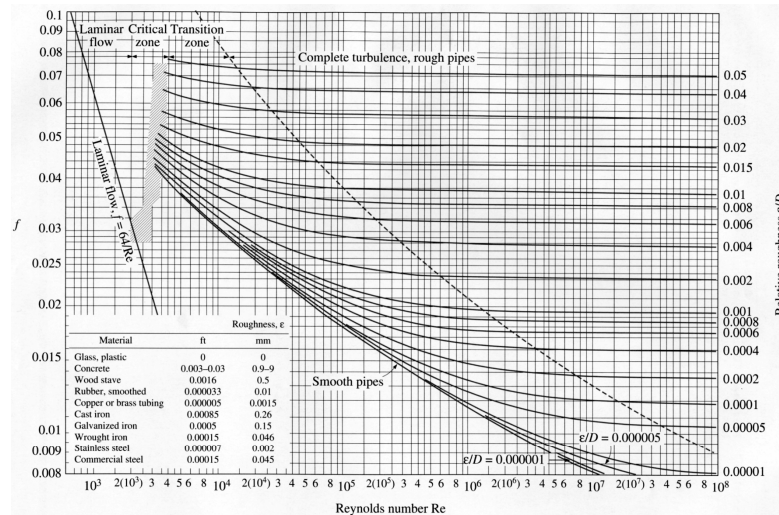
L : Rørets lengde (m)

D : Rørets diameter (m)

ρ : Fluidets densitet (kg/m³)

v : Fluidets hastighet (m/s)

Darcy-Weisbach friksjonfaktor finner man ved å bruke Moody-diagrammet. Moody-diagrammet er et grafisk verktøy som viser sammenhengen mellom Reynolds-tallet, rørveggenes relative ruhet, og friksjonsfaktoren. Diagrammet er vist under:



Figur 2.6: Moody-diagram.

Det er også mulig å beregne hvor mye trykktap som stammer fra enkeltmotstander, som svinger. Formelen man bruker for å beregne tapet i svingene er:

$$h_m = \frac{\Delta p_m}{\rho \cdot g} = \zeta \cdot \frac{U^2}{2 \cdot g} \quad (11)$$

h_m : Energi tap i høyde (m)

Δp_m : Trykkfall over motstanden (Pa)

ρ : Fluidets densitet (kg/m^3)

g : Tyngdeakselerasjon (m/s^2)

ζ : Tapkoeffisient (dimensjonsløs)

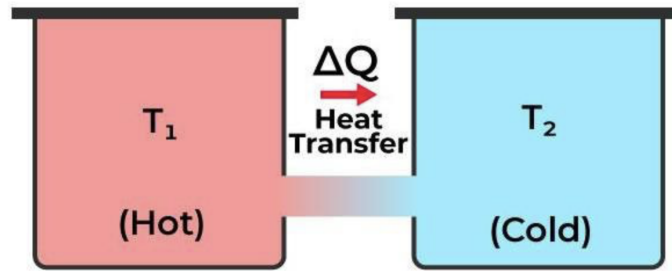
U : Fluidets hastighet (m/s)

2.4 Termodynamikk

Termodynamikk består av en rekke ulike prosesser. I denne oppgaven vil det benyttes en isokor prosess, som er en prosess hvor det skjer endring i temperatur og trykk, mens volumet forblir konstant.

2.4.1 Andre lov i termodynamikk

Den andre loven i termodynamikk sier at varme ikke overføres naturlig fra et kaldere sted til et varmere sted.



Figur 2.7: Den andre loven i termodynamikk [8].

2.4.2 Varmekapasitet

Varmekapasitet er mengden varmeenergi som kreves for å øke temperaturen i et annet stoff. Formelen for varmekapasitet er:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (12)$$

hvor:

- \dot{Q} : varmestrømmen (W)
- \dot{m} : massestrømningsraten (kg/s)
- c_p : Spesifikk varmekapasitet
- ΔT : Endring i fluidets temperatur (K)

2.4.3 Termisk Konduksjon

Konduksjon er varmeledning gjennom et materiale, uten at materialet beveger seg eller det skjer noe overføring av masse. Varmeenergien fra de høyere energi partiklene kolliderer med de lavere energi partiklene. Den termiske energien beveger seg gjennom materialet, men atomene og molekylene i materialet beveger seg ikke vesentlig, men kun vibrerer. Formelen for konduksjon er:

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (13)$$

hvor:

\dot{Q} : Varmestrømmen (W)

k : Konduktiviteten til materialet (W/(m·K))

A : Tversnitt areal gjennom hvilket varmen skal ledes (m²)

$\frac{dT}{dx}$: Temperaturgradienten langs lengden x (K/m)

Ved termisk konduksjon vil varmen møte på motstand, og denne motstanden kan defineres ved formelen:

$$R_{\text{Konduksjon}} = \frac{L}{k \cdot A} \quad (14)$$

2.4.4 Konveksjon

Konveksjon er varmeoverføring mellom en overflate og væske eller gass, hvor fluiden bærer med seg varmen. Formelen for konveksjon er:

$$\dot{Q} = hA \cdot (T_s - T_\infty) \quad (15)$$

hvor:

\dot{Q} : Varmeoverføringsraten (W)

h : Varmeoverføringskoeffisienten (W/m²)

A : Overflatearealet (m²)

T_s : Temperaturen til overflaten (K)

T_∞ : Temperaturen til fluiden langt unna overflaten (K)

Ved termisk konveksjon vil varmen møte på motstand, og denne motstanden kan defineres ved formelen:

$$R_{\text{Konveksjon}} = \frac{1}{h \cdot A} \quad (16)$$

2.4.5 Stråling

Termisk stråling er energien som et legeme sender ut som følge av sin temperatur. Formelen for å stråling er:

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_{\text{surr}}^4) \quad (17)$$

hvor:

\dot{Q} : Varmestørm (W/m^2)

ϵ : Emissivitet (dimensjonsløs)

σ : Stefan-Boltzmann konstanten ($\text{W}/\text{m}^2\text{K}^4$)

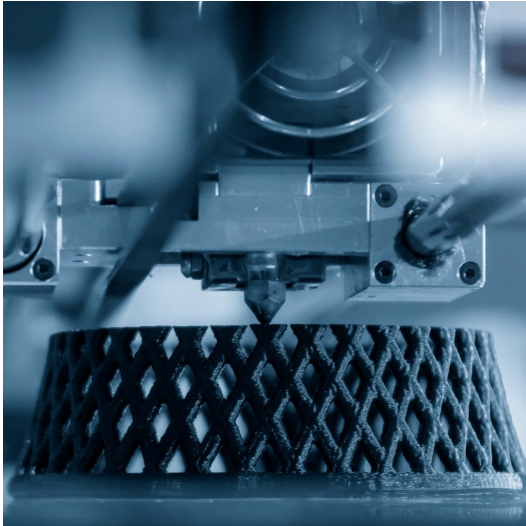
A : Arealoverflate (m^2)

T_s : Overflate temperatur (K)

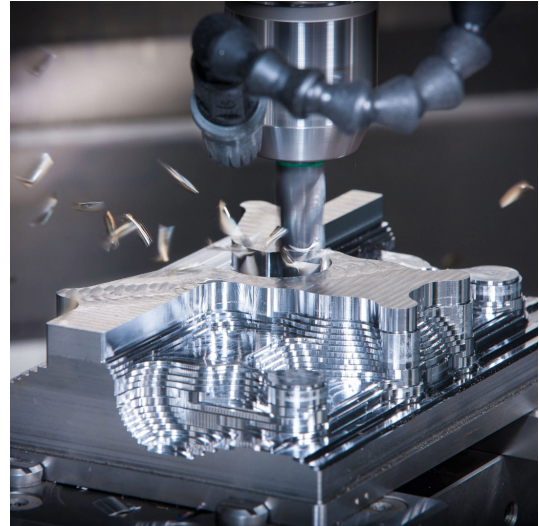
T_{surr} : Overflate temperatur (K)

3 Produksjonsmetode

Produksjon av kjøleblokken kan gjøres på forskjellige måter, hvor metodene gruppen har sett på er 3D-printing og fresing. Disse to produksjonsmetodene er vist på figur 3.1 og figur 3.2, og vi skal se nærmere på disse to.



Figur 3.1: Bilde av 3D-printing [9].



Figur 3.2: Bilde av fresing [10].

3.1 3D-printing

3D-printing, eller Additiv produksjon (AP) er en produksjonsmetode som har vokst de siste årene, og blir i økende grad brukt i industrien. Denne metoden virker ved at man først lager en 3D - modell i et Computer-aided design (CAD) program. Dette kan gjøres med forskjellige CAD programmer. Under prosessen er det en metode som heter Selektiv lasersmelting (SLM). Denne metoden legger et fint metallpulver som grunnmateriale, jevnt fordelt over byggeplattformen. I tillegg er det en høyenergi laserstråle som smelter pulverpartiklene slik at de fusjonerer sammen og danner et solid lag [11].

3.2 Fresing

Fresing er en av mange Subtraktiv produksjon (SP)-metoder som gradvis fjerner materiale fra en solid blokk for å forme et produkt. Fresing er en metode som er godt utbredt i industrien, på grunn av sin brukervennlighet og kostnadseffektivitet per enhet [12]. Fresing er foretrukket for hardere materialer som metaller og legeringer, hvor presisjon og styrke er viktig. Moderne fresemaskiner, som Computer Numerical Control (CNC) maskiner tilbyr høy presisjon og gjentakbarhet, som er avgjørende for kvalitetssikring i produksjoner i stor skala. Fresemaskiner har ulike

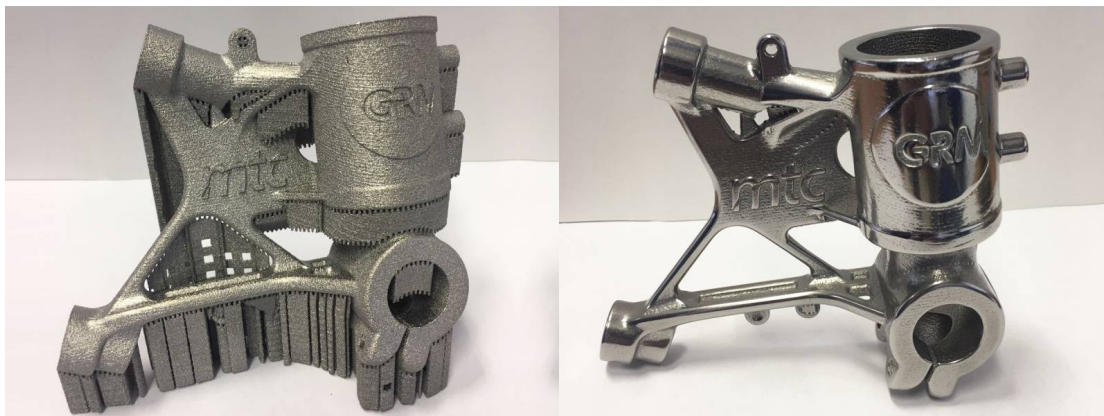
antall frihetsgrader, og det mest normale er i området rundt 3-5 akser. Jo flere akser desto mer komplisert geometri klarer maskinen å produsere ved hjelp av de ekstra frihetsgradene.

3.3 Fordeler og ulemper

Det er fordeler og ulemper med begge produksjonsmetodene, og det kan være nyttig å måle disse opp mot hverandre.

Nevnt tidligere, så er 3D-printing en AP-metode, noe som betyr at 3D-printing har en mye mer materialeffektiv tilnærming. Dette skyldes at 3D-printing bygger objekter lag for lag, og dermed bruker akkurat nok materiale til å skape det ønskede produktet, med mindre unødvendig avfall. I tillegg gjør denne produksjonsmetoden det mulig å lage komplekse geometrier. På grunn av en prosess som bygger lag for lag med materialet, kan 3D-printing skape detaljerte og avanserte strukturer som ofte er umulige å fremstille med tradisjonelle produksjonsmetoder. Dette inkluderer uvanlig formede komponenter, indre strukturer, og sammenkoblede deler, noe som gir produsentene frihet.

En ulempe med 3D-printing er at deler ofte må ettermaskineres. 3D-printing etterlater seg støttestruktur og grove overflater. Deler som har viktige kontaktoverflater eller overflødig støttestruktur trenger ettermaskinering for å fjerne ekstra materiale, eller gjøre flatene plane. Dette krever mer tid og arbeid per enhet. Figur 3.3 viser til en del som er 3D-printet og ettermaskinert. Det er store visuelle forskjeller som at støtte er fjernet og ruheten er lavere.

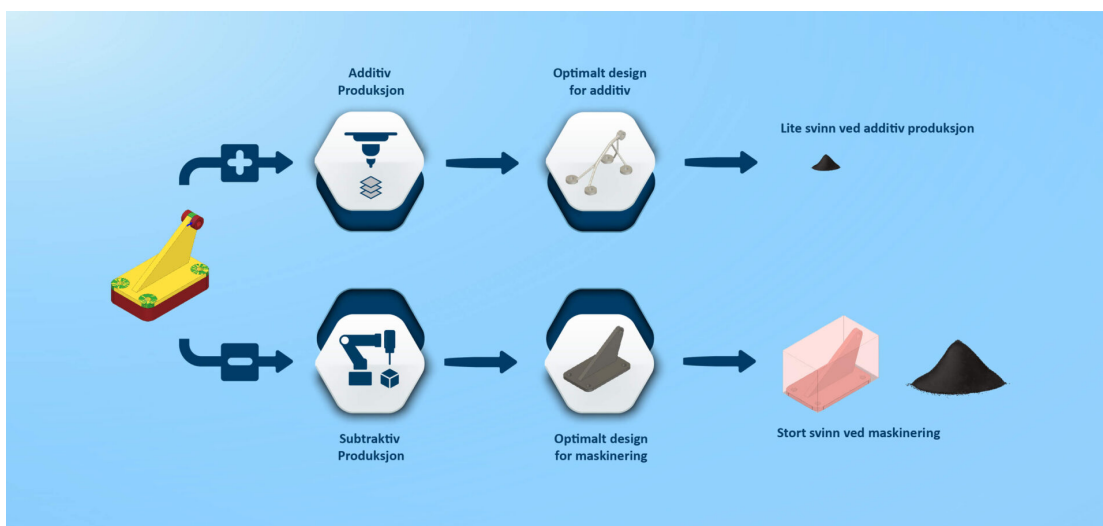


Figur 3.3: Bilde av en del før og etter ettermaskinering[13].

Noen av fordelene med fresing er høy presisjon og overflatekvalitet. Fresing er en gammel produksjonsmetode som har tatt nytte av den nye teknologien de siste

årene. Dette har medført i høy presisjon og det er vanlig at dagens CNC-freser klarer en jobb med toleranser mellom 0.01-0.03mm og i tillegg gi høy overflate kvalitet[14].

Det er svært få begrensninger i hvilke materialer som kan fresas. Et stort utvalg av materialer fører til at det kan utføres et bredere spekter av prosjekter og gjør fresing veldig fleksibelt. I tillegg til å være fleksibelt er det svært produktivt og kan løse oppgaver effektivt med et godt resultat. Det er også normalt å kombinere fresing med andre produksjonsmetoder som vannkutting, 3D-printing og dreining. Til tross for god fleksibilitet på bruksområdet, er fresing begrenset når det gjelder å lage komplekse geometrier. Maskinens tilgang til visse områder på delen kan være begrenset, noe som gjør det vanskelig eller umulig å skape komplekse geometrier.



Figur 3.4: Design og materialforbruk i AP og SP [12].

Hvis vi ser på fresing, så er det en SP metode som fjerner materiale fra en solid blokk. Figur 3.4 visualiserer at det kommer mer materialsvinn fra SP.metode. Mengden svinn varierer selvfølgelig fra del til del, men det er ikke uvanlig at det fjernes 80 % av materialet [15]. Tabell 3.1 viser fordelene og ulempene på en oversiktlig måte.

Metode	Fordeler
Fresing	Høy presisjon og fine overflater, robuste og slitesterke deler, bredt utvalg av bearbeidbare materialer, egnet for store produksjonsvolum.
3D-Printing	Muliggjør komplekse geometrier, rask prototyping, minimalt materialeavfall, tilpasningsdyktig for små serier eller individuelle deler [12].
Metode	Ulemper
Fresing	Begrenset til geometrier som kan oppnås med verktøyet, høyere materialeavfall, tidkrevende for produksjon av komplekse deler.
3D-Printing	Ofte dyrere per enhet for store volum, kan ha lavere mekanisk styrke sammenlignet med tradisjonelle metoder, begrenset utvalg av materialer [12].

Tabell 3.1: Fordeler og ulemper med fresing og 3D-printing.

3.4 Bærekraftig produksjon



Figur 3.5: FNs bærekraftsmål nummer 12 - Ansvarlig forbruk og produksjon [16].

FNs bærekraftsmål nummer 12 innebærer å gjøre mer med mindre ressurser, redusere avfall og sikre en mer effektiv ressursbruk gjennom hele verdikjeden. Den er delt opp i flere delmål, som dekker ulike aspekter av bærekraftig forbruk og produksjon [16].

De ulike delmålene under ansvarlig forbruk og produksjon, har gruppen fokusert på delmål 12.2 og 12.5. FNs bærekraftsmål 12.2 går ut på bærekraftig forvaltning og effektiv bruk av naturressurser innen 2030 [16]. 3D-printing gjør det mulig å redusere materialsvinn betydelig, som vil være effektiv bruk av ressurser. Delmål 12.5 går ut på å redusere avfallsmengden gjennom materialgjenvinning, resirkulering og ombruk. Materialvalg spiller derfor en stor rolle i den bærekraftige prosessen, hvor man ønsker å bruke materialer som kan gjenbrukes.

3.5 Design for produksjon

Ulike typer produksjon krever ulike tankegang ved design. Fresing og 3D-printing er to forskjellige produksjonsmetoder som krever ulike designløsninger for å oppnå ønskelig resultat. Delkapittelet under tar for seg disse produksjonsmetodene og begrensingene deres, samtidig som det går gjennom huskereglene ved design.

3.5.1 Design for 3D-printing

Innenfor 3D-printing er det generelt få huskereglene og de kan variere i forhold til materiale som benyttes. Her vil det kun være hensiktsmessig å se på huskereglene for printing ved hjelp av SLM, siden det er en av de mulige produksjonsmetodene for kjøleblokken. En viktig huskeregel er 3D-printing med overheng. Det er ikke mulig å printe overheng uten støtte. Det vil si at alle vegger som ikke er 90 grader på overflaten trenger støtte [17]. Å fjerne denne støtten kan kreve ettermaskinering og burde plasseres med omhu.

En annen detalj er broer (uten støtte), hvilke kan være en nyttig detalj i et design. For kjøleblokken kan det være det siste laget for å dekke til kjølekanalen. Løse horisontale broer har en maks lengde på 2mm [17].

DESIGN RULES FOR 3D PRINTING 3D HUBS

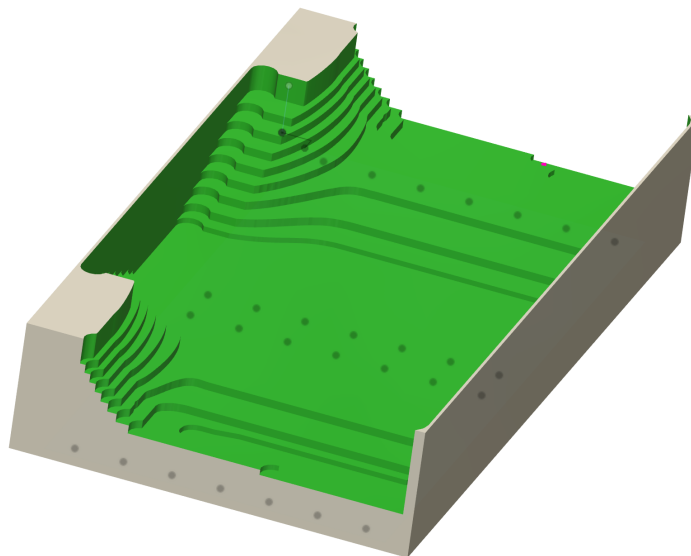
	Supported Walls	Unsupported Walls	Support & Overhangs	Embossed & Engroved Details	Horizontal Bridges	Holes	Connecting / Moving Parts	Escape Holes	Minimum Features	Pin Diameter	Tolerance
	Walls that are connected to the rest of the part on at least two sides.	Unsupported walls are connected to the rest of the part on less than two sides.	The maximum angle a wall can be printed is without requiring support.	Features on the model that are used as recessed below the model surface.	The span is the distance you print without the need for support.	The minimum diameter of features that cannot be printed is a hole.	The recommended clearance between two moving or connecting parts.	The minimum diameter of escape holes to allow for removal of build material.	The recommended minimum size of a feature to ensure it will not fail to print.	The minimum diameter a pin can be printed at.	The expected tolerance (dimensional accuracy) of a specific technology.
Fused Deposition Modeling	0.8 mm	0.8 mm	45°	0.6 mm wide & 0.2 mm high	10 mm	Ø2 mm	0.5 mm		2 mm	3 mm	±0.5% (lower limit ±0.5 mm)
Stereolithography	0.5 mm	1 mm	support always required	0.4 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.5 mm	4 mm	0.2 mm	0.5 mm	±0.5% (lower limit ±0.15 mm)
Selective Laser Sintering	0.7 mm			1 mm wide & high		Ø1.5 mm	0.3 mm for mating parts & 0.1 mm for connections	5 mm	0.8 mm	0.8 mm	±0.3% (lower limit ±0.3 mm)
Material Jetting	1 mm	1 mm	support always required	0.5 mm wide & high		Ø0.5 mm	0.2 mm		0.5 mm	0.5 mm	±0.1 mm
Binder Jetting	2 mm	3 mm		0.5 mm wide & high		Ø1.5 mm		5 mm	2 mm	2 mm	±0.2 mm for metal & ±0.3 mm for sand
Direct Metal Laser Sintering	0.4 mm	0.5 mm	support always required	0.1 mm wide & high	2 mm	Ø1.5 mm		5 mm	0.6 mm	1 mm	±0.1 mm

Figur 3.6: Figur av designprinsipper i 3D-rinting[17].

3.5.2 Design for fresing

Design for fresing krever at det alltid vurderes hvordan delen kan freses. Er dette hjørnet for skarpt? Når fresestykket denne detaljen? Hvordan skal dette oppspennet løses? For denne oppgaven er det kun snakk om 3-akse fres, etter som høyere akse fres ikke er tilgjengelig.

Fresemaskiner er gode på nøyaktig produksjon og små toleranser som nevnt i tidligere delkapittel 3.2. Fresemaskinene er derimot ikke gode på 3D flater, med andre ord, overflater som ikke er plane. Det er ikke umulig å frese flater som ikke er helt plane, men det er vanskelig og tar mye tid. Slike flater må først freses ned slik at den ytre geometrien ser ut som en “trapp” vist i figur 3.7. Etter det første steget må man benytte en kulefres for å frese langs overflaten.

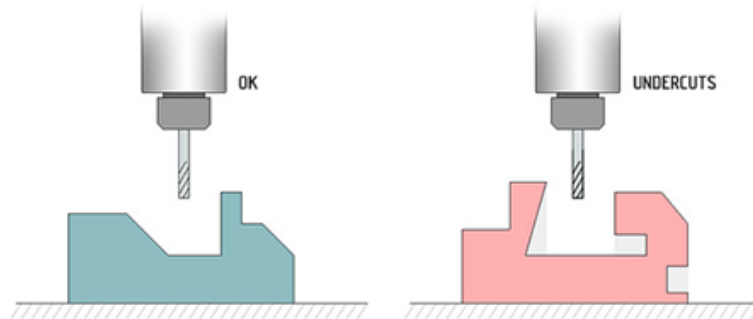


Figur 3.7: Utdrag av en fresefil til en form med 3D flate fra Revolve NTNU.

En vanlig type fresestykke som brukes under fresing er en flat endefres. Denne typen fresestykke er svært universal og kan brukes til de fleste oppgaver. Imidlertid har den også sine begrensninger, for eksempel kan den ikke lage skarpe indre hjørner. Hjørnene må derfor avrundes til minst halvparten av diameteren til fresestykket. Ytre hjørner er derimot mulig siden fresestykket følger konturen til delen. Runde kanter (ikke hjørner) er også vanskelig å lage og bør unngås i designet.

Ved design av deler og detaljer må man huske på dybden. Et fresestykke med $\text{\O}4\text{mm}$ vil være kortere enn et stykke med $\text{\O}10\text{mm}$. Man kan dermed ikke lage et spor som er 20mm dypt og 4mm bredt, men det er mulig å lage et spor som er 20mm dypt og 10mm bredt. Disse problemene dukker fort opp hvis man ønsker små avrundinger på hjørner ved litt dypere geometri. Eller ved 3D overflater når det er bratte detaljer kan man oppleve at spindelen kolliderer med delen på grunn av dette.

Under fresing er det ikke mulig å lage vinkler under 90 grader i nedsenkninger med en 3-akse fres. I slike indre vinkler vil ingen fresestykker komme til. Det er mulig å lage spor ved hjelp av en T-spor fres, men dette begrenser seg til rette rektangulære spor. Dette er illustrert i figur 3.8.



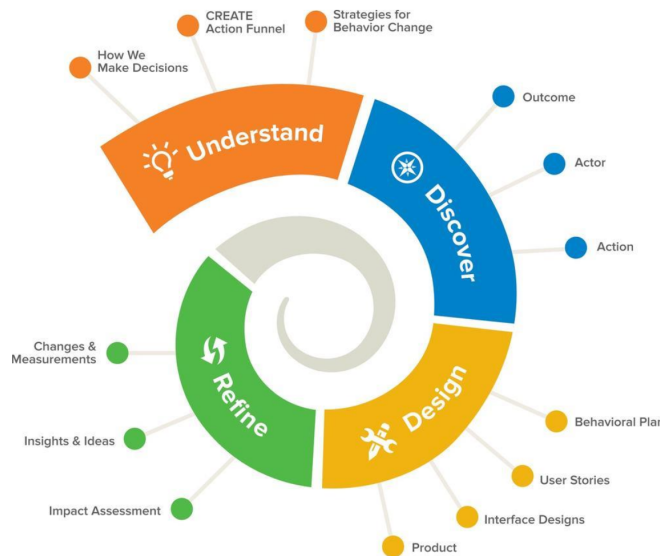
Figur 3.8: Visualisering av problematiske nedsenkninger og løsning ved fresing [18].

4 Design

Dette kapittelet tar for seg utformingen av kjøleblokken, der ulike designutkast blir utført, de beste løsningene blir identifisert, og deretter blir et mer detaljert design av kjøleblokken utviklet. Ettersom gruppen har sett på produksjonsmetodene som ble diskutert i kapittel 3, så er det laget et kjøleblokk utkast for fresing, og 3D-printing.

4.1 Innovasjon og digitalisering

Vi har fulgt en iterativ prosess som fokuserer på kontinuerlig forbedring og optimalisering av kjøleblokkdesignet. I en designprosess er det viktig å forstå hva man skal designe, hva man må ta hensyn til under utformingen av produktet, og kunden som skal ta i bruk produktet. Innovasjon er sentralt ved dette for å bringe nye ideer og løsninger til designet. En iterativ tilnærming tillater fleksibilitet og gir mulighet for å gjøre justeringer basert på tilbakemeldinger og evalueringer. Denne metoden bidrar til å sikre at det endelige produktet er så effektivt og funksjonelt som mulig. En iterativ prosess er visualisert på figur 4.1.



Figur 4.1: Iterativ prosess[19].

Digitale verktøy har blitt tatt i bruk gjennom oppgaven som har forenklet design prosessen. De digitale designprogrammene som er benyttet er SolidWorks,

Abaqus, Star CCM+ og ColdStream. Hvert av disse programmene har sin særegne styrke som har blitt tatt i bruk. I tillegg er kodespråket Python brukt for utregninger og visualisere grafer.

4.2 Designrammer

Designrammer var en viktig del da designet av kjøleblokken skulle utføres. Kjøleblokken er koblet opp til vannsystemet som strømmer rundt bilen, hvor kjøleblokken er innfestet i inverter casingen. Casingen er formet som en firkantet boks, se figur 4.2 under av inverter casingen. Casingen er 280mm lang, og Revolve har lagt tilrette for to innfestingspunkter som kjøleblokken må møte. Dette betyr at lengden på kjøleblokken ikke kan overstige 280mm, da den må passe inn i designrammen. Området som det kreves at kjøleblokken designes innenfor er visualisert i bilde som lilla soner. Sonene er definert for å få frem hvor festepunktene er, samt området der kretskortene ligger, men det er også viktig å få frem at disse sonene henger sammen, men er delt for visualiseringen sin skyld.



Figur 4.2: Bilde av casing med grensebetingelser.

Hovedoppgaven til kjøleblokken er å kjøle ned invertereren. Dette betyr designet må forholde seg til kretskortene. Kretskortene har en kontaktoverflate som består av et rektangulært design, med et areal på 3066.8mm^2 eller 0.0030668m^2 . Totalt er fire kretskort plassert på kjøleblokken i en sandwichkonfigurasjon, med to over og to under. Gjennom et samarbeidet med elektrisk avdeling i Revolve, er det utarbeidet en ny plan for hvordan jordingen til sytemet skal løses. Årets løsning av jording til kretskortene skal være gjennom kjøleblokken, hvilket innebærer til-

rettelegging for det nye designet. Dette skal gjøres med jordingskabler mellom kjøleblokken og inverter casingen.

Kjøleblokken har full designfrihet innenfor grensebetingelsene som gir muligheter til ulike løsninger. De viktigste parameterne gruppen har vurdert innen design er vekt, varmeoverføring og vannstrømningen. Utkastene som er vist i delkapittel 4.4 tar for seg det ytre designet til kjøleblokken, hvor det blir sett på ulike alternativer. Delkapittel 4.5 ser på ulike indre design til kjøleblokken, hvor det blir fokusert på antall svinger og trykktap.

4.3 Material

Materialet er en viktig faktor for å optimalisere kjøleblokken. Tabell 4.1 tar for seg fire legeringer vi har analysert og sammenligner dem mot egenskaper som er vurdert som viktige for kjøleblokken. Ønskende egenskaper er:

- Lav massetetthet for lavest mulig vekt
- Høy stivhet for å unngå deformasjon under bruk
- Høy flytegrense for å kunne redusere det totale volumet av materialet
- Høyest mulig termisk konduksjon for å føre varme effektivt fra varmekilden til vannet
- Lav spesifikk varmekapasitet for å effektivt øke temperaturforskjellen mellom kjøleblokken og vannet

Tabell 4.1 viser at aluminium ikke har samme stivhet som titan- og stållegeringer, men har lavere massetetthet og bedre termodynamisk konduksjon. Termisk konduksjon har stor betydning for varmeledningen til materialene. Blant aluminiumslegeringene har 6082-T6 38.4% bedre konduktivitet enn 7075-T6. 7075-T6 har derimot bedre mekaniske egenskapene enn 6082-T6 i denne matrisen, men fremstår med svakere termiske egenskaper. Vekten som kjøleblokken skal bære er ikke stor nok til at flytegrense på 503 MPa er nødvendig. Dette bevises av simuleringresultatene i kapittel 5. Basert på overnevnte vurderinger ble aluminiumslegeringen 6082-T6 valgt som materialet til kjøleblokken.

Material	Alu 7075-T6 [20]	Alu 6082-T6 [21] [22]	Titan grad 5 [23] [24]	304 rustfritt stål[25]
Tetthet (g/cm ³)	2.81	2.70	4.43	8.0
Youngs modul (GPa)	71.7	70	113.8	193
Flytgrense (MPa)	503	250	830	215
Termisk Konduksjon (W/m·K)	130	180	6.7	16.2
Spesifikk Varmekapasitet (J/(kg · K))	930	890	526.3	500

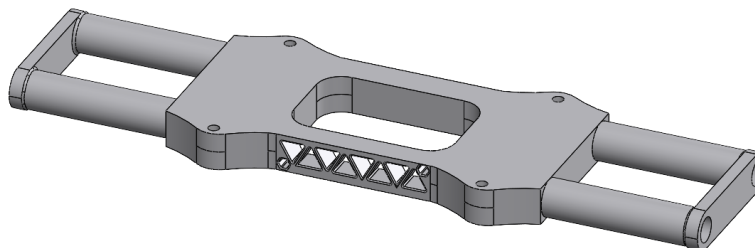
Tabell 4.1: Valgmatrise for metaller.

I tillegg til å være et materiale med gode termiske egenskaper, er aluminium godt egnet for resirkulering. Aluminium blir kalt for et permanent materiale, fordi det er uendelig resirkulerbart og beholder sine egenskaper uansett hvor mange ganger det blir resirkulert. Videre, så er aluminium idealt for resirkulering fordi det bruker 95% mindre energi, enn når det produseres for første gang [26]. Dette gjør aluminium til et materiale velegnet for den sirkulære økonomien. Resirkulering, og gjenbruk er sentralt i FNs delmål 9.4 og 12.5, og ved å bruke resirkulert aluminium, bidrar vi direkte til disse målet, og reduserer vår miljøpåvirkning.

4.4 Designutkast

I delkapittelene 4.4.1 - 4.4.3 blir tre ulike design gjennomgått, hvor det ble designet for å utforske forskjellige muligheter for utformingen av kjøleblokken. Neste steg er å identifisere de beste konseptene fra hvert designutkast, som blir vist frem i delkapittel 4.6. Videre, vil vi se på indre design, og bestemme overordnet hvordan det indre designet kommer til å se ut. Etter det overordnet indre design er bestemt, vil det bli gjort videreutvikling av designet.

4.4.1 Designutkast 1

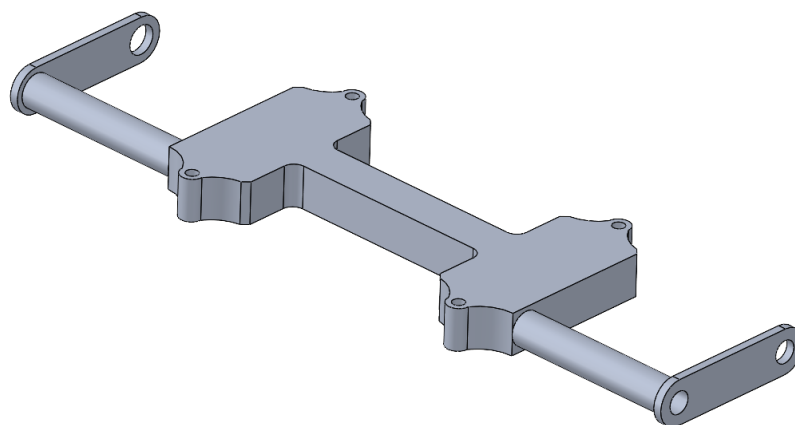


Figur 4.3: Kjøleblokk utkast 1.

Designutkast 1 er utviklet med fokus på strukturell styrke, termisk effektivitet, og potensiell kompatibilitet med 3D-printing. I utformingen er det integrert to rør på hver side, der kontaktflatene for kretskortene er sammensatt ved hjelp av et materiale som fungerer som et koblingspunkt mellom begge sider. På den ene siden fungerer røret som en vannvei, mens “røret” den andre siden er konstruert med et fagverk som bidrar til både støtte og stabilitet.

Fagverket er ment som en ekstra detalj som bidrar til god stabilitet, og materialeffektivt. Uten fagverkene vil det oppstå torsjon / vridning på kontaktflatene, men denne burde være minimal. Små fagverk er en detalj som er vanskelig å frese, noe som gjør den utilgjengelig hvis ikke gruppen får mulighet til å 3D-printe.

4.4.2 Designutkast 2



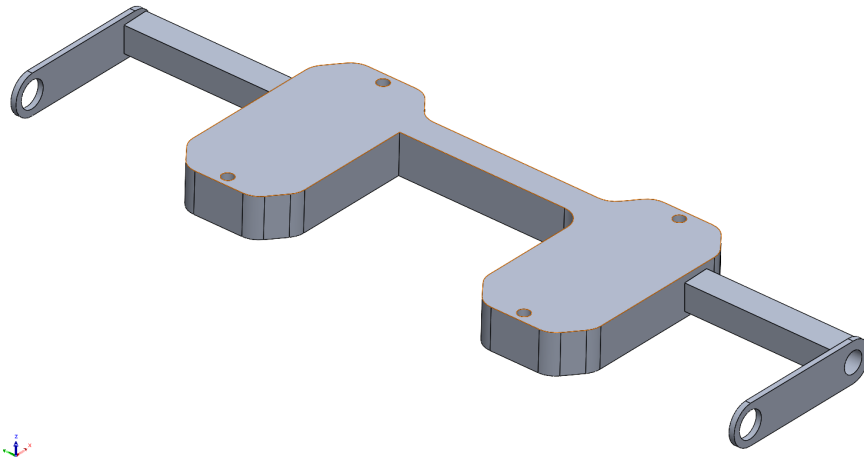
Figur 4.4: Kjøleblokk utkast 2.

Utkast 2 tar for seg et minimalt design med kun et rør i hver ende, og med kontaktoverflater som er designet for å være like store som kretskortene. Dette er gjort med hensyn til å spare vekt. Vannkanalen mellom kretskortene ble lagt på midten av blokkene for å utforske ulike løsninger. Det ble problematisk å tilrettelegge for en logisk indre geometri som dekker hele kontaktflaten, som igjen fremstille en indre geometri med mange unødvendige svinger.

I motsetning til designutkast 1, har dette utkastet kun 3 rør, sammenlignet med utkast 1 sine 6. Antall rør er redusert på dette utkastet for å spare vekt. Et rør veier omtrent 30 gram, og designet gir da en vektbesparelse på ca. 90 gram sammenlignet med utkast 1.

Den sirkulære formen er også mer materialeeffektiv enn en kvadratisk løsning. Formen legger til rette for en enkel innfesting til inverter casingen via gjengene i nippelen inn i røret. En ulempe med runde rør er at de kan være kompliserte å frese.

4.4.3 Designutkast 3



Figur 4.5: Kjøleblokk utkast 3.

Designutkast 3 som er vist på figur 4.5 er utviklet med intensjonen om at det skal freses, som forklarer dens enkle utforming. Runde kanter på oversiden og undersiden vil være vanskelig å frese og er derfor unngått her. Et annet designelement på utkast 3, som gjør den enklere å frese er firkantet rør mellom vannkanalen til kretskortene. I likhet med designutkast 2, har dette utkastet tre rør.

Bolthullene for innfestingen til kretskortene har mer volum rundt seg. Dette er designet med hensyn til det indre designet for kjøleblokken, slik at det er mer plass til vannkanalen for det indre designet.

4.5 Indre design

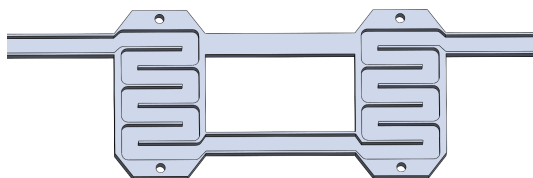
En stor del av designfasen er hvordan man velger å utfører et indre designet i kjøleblokken. Det indre designet er med på å påvirke trykktapet, kjøleevnen, og vekt på kjøleblokken. I dette delkapittelet blir det undersøkt ulike indre design, hvor hovedfokuset er antall svinger på det indre designet. Målet er å se på ulikheter i trykktap og varmeoverføring, og ut i fra dette velge løsningen som gir lavt trykktap, men også kan tilføre tilstrekkelig med kjøling.

Hensikten med å undersøke det indre designet er å få en god forståelse for ulike løsningsalternativer og kunne ta en beslutning basert på data. Alle simuleringene er utført med de samme grensebetingelsene, slik at simuleringene kun tar hensyn for trykktap på grunn av svinger i vannbanen og ikke forskjeller i volum. Standarden er satt til et tverrsnitt på (8×10) mm og en massestrøm på $0.07 \frac{kg^3}{s}$ i alle

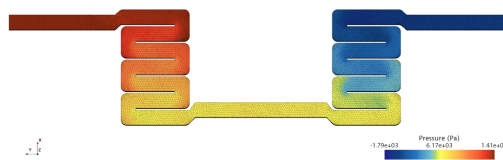
designene. Det er viktig å merke seg at det ytre designet ikke har innvikring på indre designets simuleringer ettersom at det kan endre seg fra figur til figur.

4.5.1 Seks - svingerkonfigurasjon

På figur 4.6 kan man se hvordan en løsning bestående av en seks-svingerkonfigurasjon ser ut. Dette designet har stor kjøleevne på grunn av distansen vannet må bevege seg og et større totalt kontaktareal med kjøleblokken, men på bekostning av trykktap. Figur 4.7 ser man en trykktapet på dette designet og hvordan trykket faller etter hver sving visualisert ved hjelp av endring i farger. Her kan man se et betydelig trykktap på omtrent 14000 Pa (0.14 bar) representert i figur 4.14.



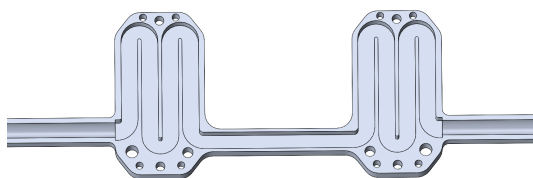
Figur 4.6: Indre design - seks svinger.



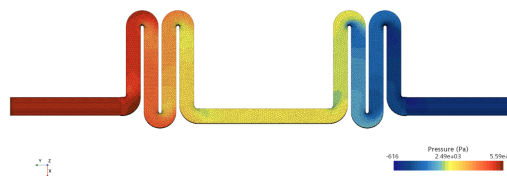
Figur 4.7: Trykktap - seks svinger.

4.5.2 Tre - svingerkonfigurasjon

Tre-svinger er et design som ble vurdert som endelige indre kjøleblokk design. Dette indre designet dekker et stort overflateareal vist i figur 4.8 og er veldig arealeffektivt i forhold til antall svinger. Dette medfører en god og jevn kjøleevne med et lavere trykktap på 5400 Pa (0.054 bar).



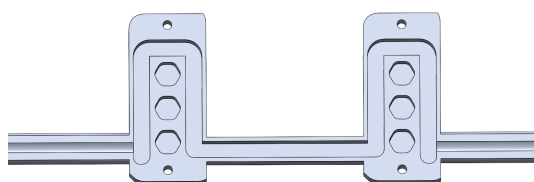
Figur 4.8: Indre design - tre svinger.



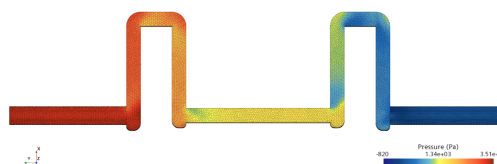
Figur 4.9: Trykktap - tre svinger.

4.5.3 En - svingkonfigurasjon

Det siste indre designutkastet er et enkelt en-sving design, hvor det går kun en sving i kjøleblokken (se figur 4.10). Dette viste seg å være det beste designet i forhold til trykktap med omtrent 3200 Pa (0.032 bar). Det kommer av redusert mengde svinger og kortere kanaldistanse som igjen fører til mindre friksjonstap. Det var derimot usikkerhet rundt kjøleevnen til blokken. I motsetning til de andre utkastene har en-sving potensialet til å utvide kjølekanalen for å kunne legge en indre geometri i vannkanalen. Økt tverrsnitt i vannkanalen vil være en fordel for å øke kontaktoverflaten i vanngangen.



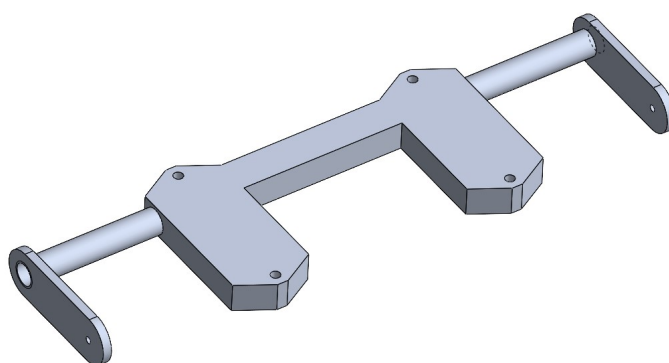
Figur 4.10: Indre design - en sving.



Figur 4.11: Trykktap - en sving.

4.6 Sammenslåing av utkastene

Kjøleblokken som er vist på figur 4.12 er sammenslåing av de løsningene fra utkastene som gruppen vurderer er best. Det sammenslåtte utkastet er dominert av ideene fra designutkast 3. Designløsningene gruppen likte og valgte å gå med videre er tre rørdesign, midtgangen for vannkanalen plassert på siden, og mer material-effektivitet med runde rør. Dette sammenslåtte utkastet er enkelt å modifisere til et freseutkast og 3D - printet utkast.



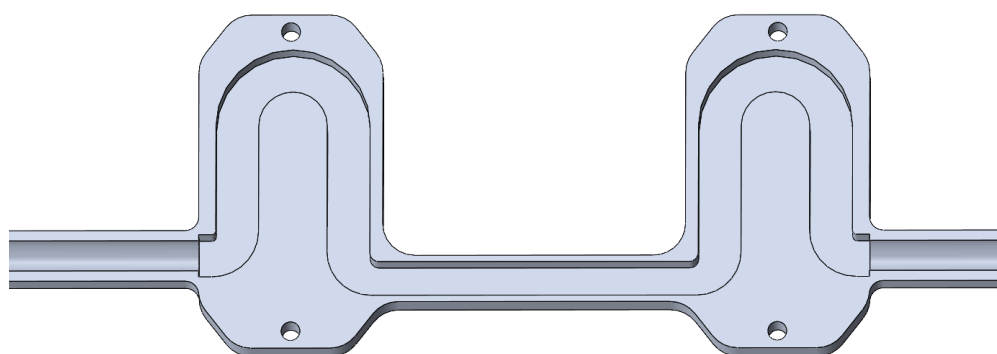
Figur 4.12: Sammenslått design basert på designutkastene.

Basert på simuleringer vist i tabell 4.3 utført i ColdStream hadde en-sving løsning tilstrekkelig med varmeoverføring mellom vann og varmekildene. Siden en-sving tilførte tilstrekkelig med kjøling, ble det ikke utført ColdStream simuleringer på tre-svinger og seks-svinger. Ulike tverrsnitt i kjølekanalen ble testet for å se forskjeller i trykktap gjennom ColdStream og vekt i SolidWork.

	En-sving, 10x11.25	En-sving 8x11.25
Kjøleblokk	151.63g	158.24g
Vann	47.48g	42.89g
Totalt vekt	199.11g	201.23g

Tabell 4.2: Masseforskjell i 10x11.25 og 8x11.25.

Den indre vannkanalen endte med en-svingkonfigurasjonen, med en diameter på (10x11.25)mm (se figur 4.13). Med grunnlag i trykktap forskjellene fremstilt i tabell 4.3 var det riktig valg ettersom at vektforskjellen var ubetydelig. Simuleringene på denne størrelsen viser derimot en signifikant reduksjon i trykktapet sammenlignet med 4.5.3, som har et diameter på 8mm. I denne tabellen er de første seks iterasjonene satt til 140 watt, mens de to siste iterasjonene er satt til 400 watt. Denne endringen ble gjort på grunn av ny informasjon og ønsket om en høyere sikkerhetsmargin.



Figur 4.13: Løsningen av indre design.

Simulering -og iterasjonsnummer	Trykktap (Pa)	Maks temperatur varmekilde (°C)	Gjennomsnittlig temperatur varmekilde (°C)	Maks temperatur vann (°C)	Gjennomsnittlig temperatur vannuttak (°C)
10x11.25, 1 Sving, 03-51	1272.98	60.8	60.8	59.14	54.57
10x11.25, 1 Sving, 03-23	1284.1	60.78	60.78	59.12	54.47
10x11.25, 1 Sving 04-18	1283.15	60.81	60.81	59.15	54.47
8x11.25, 1 Sving, 02-90	1869.29	57.24	57.24	55.4	50.47
8x11.25, 1 Sving, 02-42	1902.96	56.98	56.98	55.17	50.47
10x11.25, Høyere Watt, 02-33	1278.98	73.4	73.4	68.66	55.35
10x11.25, Høyere Watt, 02-85	1112	73.4	73.4	68.66	55.35

Tabell 4.3: ColdStream simuleringer av indre geometri.

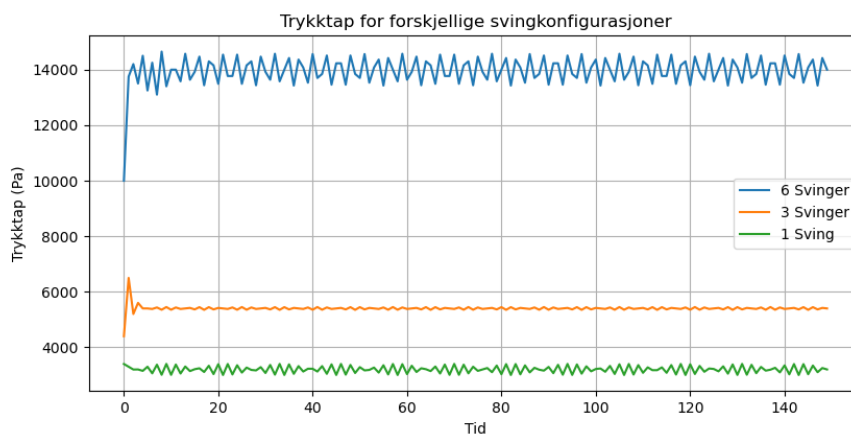
4.7 Konklusjon av grunndesign

Gruppen har valgt å gå videre med et tre rørdesign fra utkast 2 og 3, hvor det kun er et rør på hver side av kontaktflatene, samt et bindeledd mellom kontaktflatene på siden som blir vannkanalen. Om denne kanalen blir sirkulær eller rektangulær er et spørsmål om produksjonsmetode. Et sirkulært rør er ikke umulig, men unødvendig komplisert å frese. En 3D-printet del vil dermed ha et sirkulært rør, mens en frest del vil ha rektangulært rør. En tre- rørs løsning er valgt for å spare vekt, hvor totalt tre rør utgjør 90 gram. Revolve NTNU er konstant i søken etter å redusere bilens vekt, og enhver mulighet til å oppnå dette blir utnyttet til det fulleste. En ulempe som kan oppstå med dette design valget er torsjon / vridning på kjøleblokken. På grunn av det er kjøleblokken som holder casingen som veier rundt 4kg, vil det oppstå spenninger og nedbøyning på kjøleblokken. Simuleringer på tre rørdesign er nødvendig for å finne ut hvor mye spenning og nedbøyning som oppstår.

Geometrien rundt kontaktoverflaten til kretskortene blir holdt stor og enkel som utkast 1 og 3. Dette er for å sikre en fullstendig kontaktoverflate mellom kretskortene og god plass til indre geometri. Vannkanalen som er bindeleddet mellom kontaktflatene er plassert til siden av kjøleblokkene. I henhold til det som er beskrevet i designutkast 3, så er dette for å optimalisere det indre designet til kjøleblokken.

Gruppen har i tillegg simulert på de ulike indre designene som ble vist i delkapittel 4.5 til kjøleblokken ved hjelp Star CCM og ColdStream. Å simulere på ulike indre design med forskjellige svinger kan man se på hvilken betydning antall svinger har for trykktap på vannet. Figur 4.14 presenterer en sammenstilling over de forskjellige designutkastene gruppen har utviklet, med tilhørende trykktap for hvert utkast. Disse grafene indikerer at antall svinger spiller en kritisk rolle for størrelsen

på trykktapet i vannstrømmen. For eksempel viser utkastet med seks svinger et trykktap på omtrent 14 000 Pa, mens utkastet med tre svinger har et trykktap på rundt 5400 Pa, og utkastet med en enkelt sving viser et trykktap på cirka 3200 Pa. Disse funnene bekrefter at et design med færre svinger er mer gunstig for effektiviteten til vannstrømningen.



Figur 4.14: Trykktap på ulike svingkonfigurasjoner fra StarCCM+.

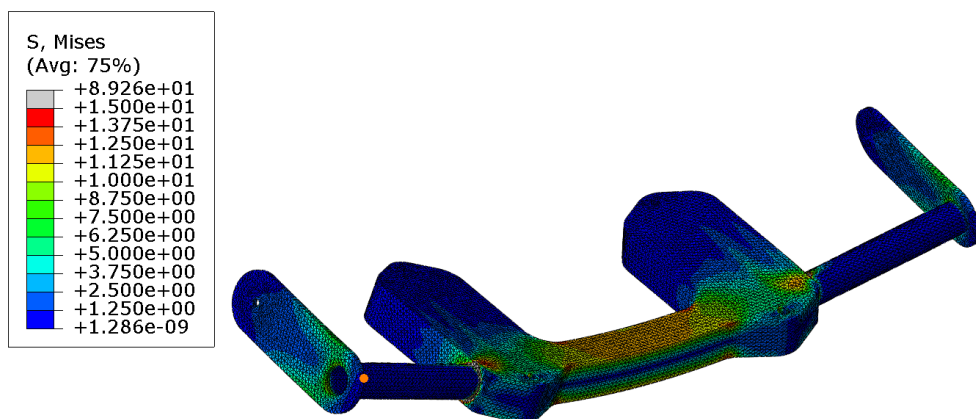
I tillegg til å analysere trykktapet, har det også blitt simulert på den termiske kjølekapasiteten til de ulike svingkonfigurasjonene på det indre designet. Her kom gruppen fram til at en sving har god nok kjøleevne til å kjøle ned kretskortene, og er derfor en enkelt valg for gruppen. Siden en - svingkonfigurasjonen hadde bra nok kjøleevne, ble ikke de øvrige sving konfigurasjonene testet for kjøleevne.

5 Detaljering og analyse av designløsningen

I dette kapittelet har gruppen optimalisert kjøleblokken med tanke på vekt, produksjon og et indre design som er optimalisert for kjøling. Her utnytter gruppen FEM og FEA for å analysere utvikling av grunnformen, for potensielle forbedringer. 3D-printing viste seg å være utilgjengelig, så gruppen har derfor valgt å fokusere på et detaljert utkast med tanke på fresing.

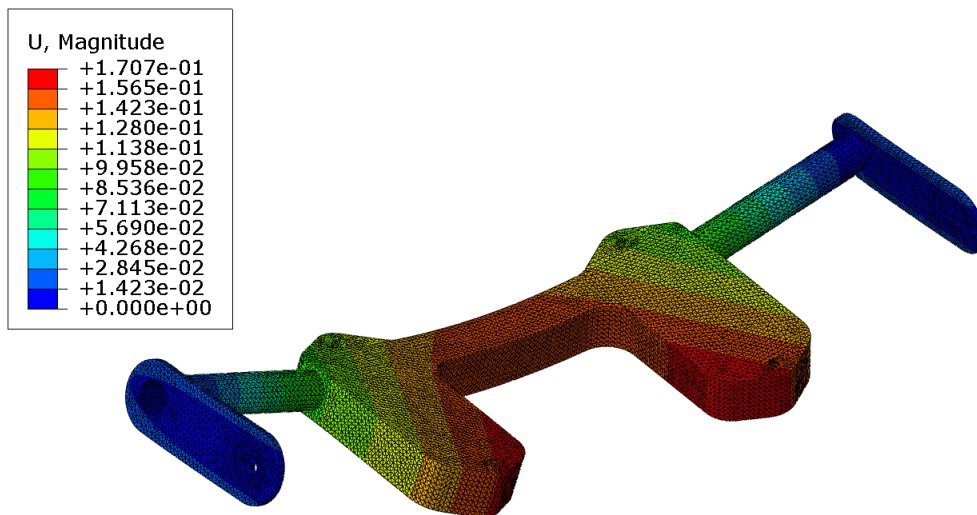
Det har blitt gjort flere beregninger på Abaqus, hvor det er sjekket nedbøyning og spenning på kjøleblokken. I starten av simuleringsfasen ble det sammenslåtte utkastet simulert på. Dette ga gruppen innsikt i hvor spenninger og nedbøyning av kjøleblokken var høyest. Resultatene fra simuleringene viste områder på kjøleblokken som ikke var rammet av spenninger. Dette gir muligheter for optimalisering av kjøleblokken, med tanke på vekt. Alle simuleringene ble satt og relativt likt hvor målet var å finne konvergeringspunktet til modellene. Konvergering oppstår ved å kjøre samme simulering med finere og finere mesh som ble nevnt i teorikapitlet 2.2.1. Simuleringene er satt opp med kraften 4kg, og med en sikkerhetsmargin på 3g fordelt over kontaktflatene. Sikkerhetsmarginen på 3g kommer fra potensielle akselerasjonssituasjoner som kan påvirke bilen.

Figur 5.1 viser spenninger i det sammensatte designet som gir grunnlag for videreutvikling av delen. Her ser man områder på kjøleblokken som ikke er særlig utsatt for spenninger, hvor man kan fjerne materiale for å spare vekt. Den største spenningen på kjøleblokken har en verdi på 89.2 MPa, hvor en sikkerhetsmargin på 3g er inkludert. Dette er godt innenfor flytegrensen, som er på 250 MPa.



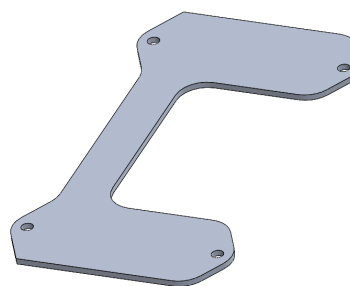
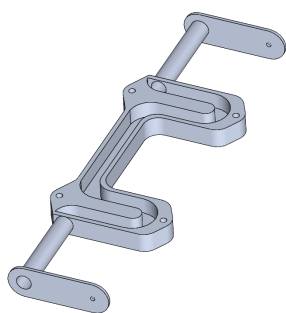
Figur 5.1: Spenningsanalyse av grunnform i Abaqus.

I tillegg viser Abaqus simuleringen liten deformasjon på kjøleblokken. Den største deformasjonen som oppstår i kjøleblokken er plassert helt på tuppen, og har en størrelse på 0.17mm. Dette betyr at kjøleblokken ikke er for tynn til å være funksjonell.



Figur 5.2: Deformasjonsanalyse av grunnform i Abaqus.

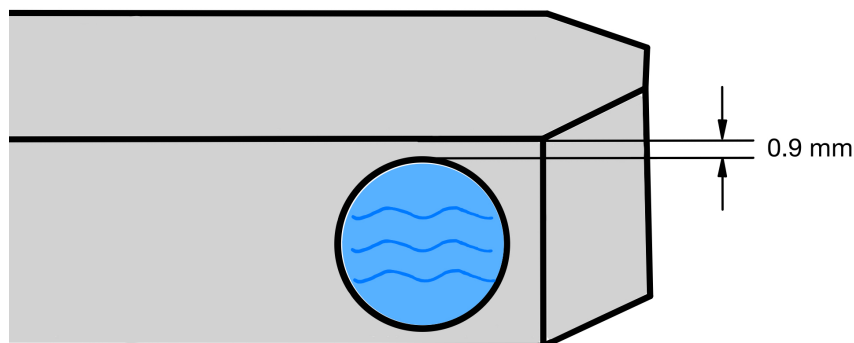
Etter at fresing ble bestemt som produksjonmetode måtte designet bli annerledes. En av de største forandringene fra det sammensatte designet er at kjøleblokken er spiltet i to deler, et bunnparti og et lokk (se figur 5.3 og 5.4). Dette er nødvendig for fresing av vannkanal, og et indre design som diskutere senere. Et design med lokk krever også bolter til innfesting mellom lokk og bunnparti, i tillegg til en type vanntetning.



Figur 5.3: Bunnpartiet til kjøleblokken. **Figur 5.4:** Lokket til kjøleblokken.

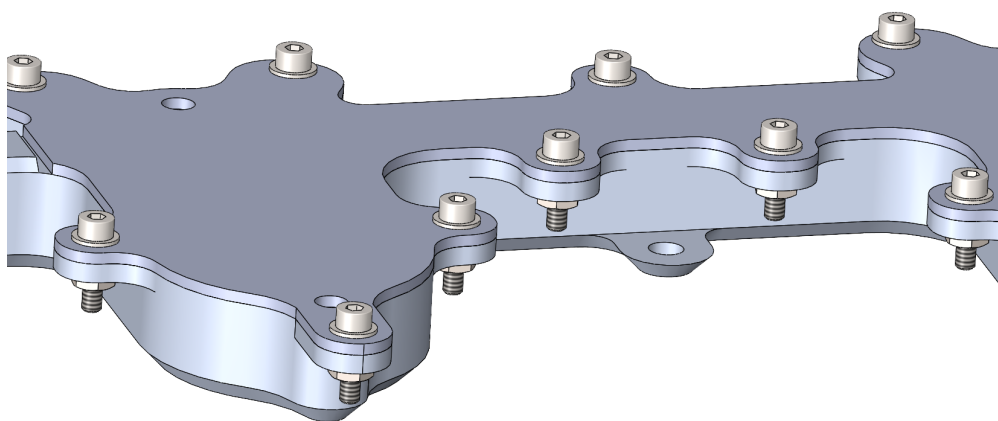
Et av de større problemene med et todelt design er tykkelsen på lokket. Med en tykkelse på 1.5mm vil dette bli en del som mulig må vannskjæres eller laserkuttet. Tykkelsen er et resultat av gjennomslaget inn til vannkanalen vist i figur 5.5 dersom lokket blir over 2mm tykk. Et så tynt lokk vil ha lite stivhet og vil bli

deformert av boltkreftene. Abaqus simuleringene av dette gir derimot et lovende svar med relativt lite deformasjon i lokket, som kan tettes med tetningsstoff.



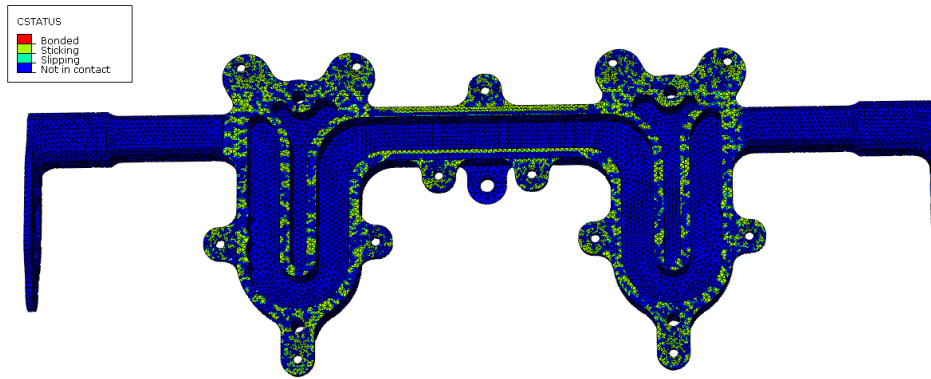
Figur 5.5: Nærbilde vannkanal

En komponent som er kritisk for sikring av kjøleblokken er bolter. Kjøleblokken sitt lokk er festet til bunnpartiet med bolter og muttere. Tilsammen er det 13 bolter av M2.5, og samlet veier dem omtrent 20 gram. Disse boltene festes i ører som er lagt til for å hindre kollisjon med kretskortene. I prosessen har gruppen simulert på Abaqus hvorvidt disse boltene er sterke nok, og om de holder kjøleblokken vanntett. Nærbilde av boltinnfestingen er vist på figuren under:



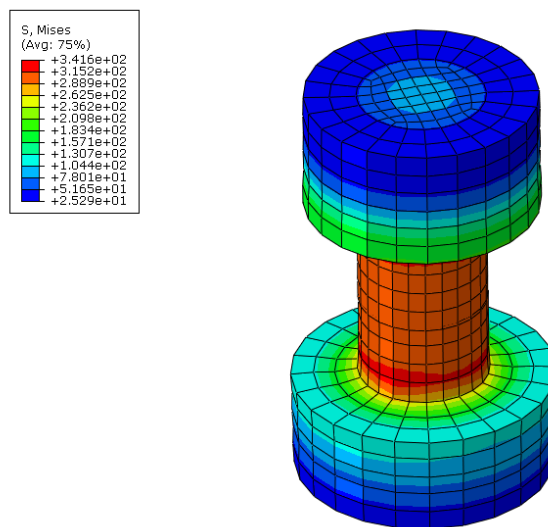
Figur 5.6: Nærbilde av boltinnfesting til lokket.

Kontakt mellom overflatene ble simulert på ved en CSTAUS-analyse vist i figur 5.7. Denne analysen undersøker kontakten mellom delene, og undersøkelsen vil gi indikasjon om det er nok kontakt for å gjøre delen vanntatt. For å minimere sannsynligheten for vannlekkasje, er det viktig å ha så stor kontaktoverflate som mulig.



Figur 5.7: CSTATUS simulering fra Abaqus for å utforske kontaktoverflaten

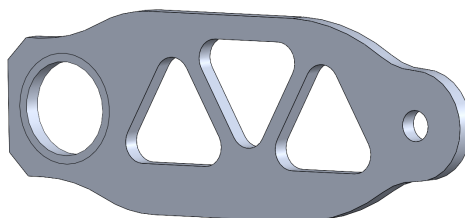
Simuleringen ser også på spenningene i boltene som brukes for å feste lokket. Boltene er av typen M2.5 og har egenskapene til en 8.8 bolt av stål. 8.8 betyr at bolten har en bruddgrense på 800MPa og vil begynne å flyte på 80% av dette, som tilsvarer 640MPa. Bolten er simulert med en forspenningskraft på 1500N. Figur 5.8 viser resultater fra simuleringen og at boltene er godt innenfor flytegrensen. Figuren viser en maksimal spenning i bolten på 341 MPa.



Figur 5.8: Spenningsanalyse av innfestningsbolt

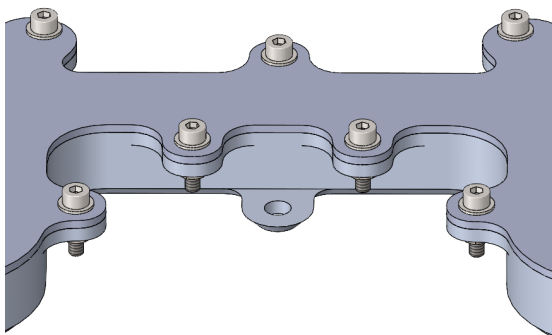
Innfestingsrammen kan man se på simuleringene på i 5.1 ikke pådrar seg store spenninger, disse ligger i underkant av 10 MPa. Kreftene som oppstår i innfestingsrammen er så små at de er neglisjerbare. Hovedoppgaven til innfestingsrammen er å absorbere potensiell rotasjon om innfestingsnippelen i vannkanalen. Rotasjonen oppstår fra momentet grunnet den usymmetriske formen. Her er det mulig å fjerne materiale for å spare vekt. Løsningen som ble foreslått var et "mini-fagverk" på innfestingsrammen. Ulike designforslag på innfestingsrammen ble gjort, men vi

kom frem til fagverk er en solid løsning. Dette er fordi fagverk er en strukturell løsning som består av stenger forbundet i noder, designet for å minimere vekt samtidig som det opprettholder styrke og stabilitet (se figur 5.9). Materialet rundt innfestingspunktene ble fjernet fordi det hadde ingen funksjon, og den totale forskjellen på innfestingsrammen før og etter vekt optimaliseringen er 5 gram.



Figur 5.9: Optimalisert innfestingsrammen.

En annen viktig funksjon til kjøleblokken er å være et jordingspunkt for elektronikken i inverteren. Det ble diskutert med den elektriske avdelingen om hvor disse burde plasseres. Det ble konkludert med at det er behov for tre punkter: et er i midten og et på hver ende. Innfestingsrammene fungerer dermed som jordingspunkt i tillegg. Punktet i midten av blokken er vist i figur 5.10.



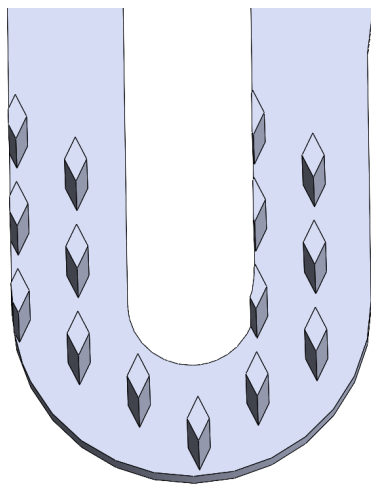
Figur 5.10: Jordingspunkt til kretskortene.

5.1 Indre design

Hovedoppgaven til kjøleblokken er å kjøle ned kretskortene, og vi skal se nærmere på at indre design er med å påvirker dette. Som nevnt i delkapittel 4.7 så har gruppen valgt en sving som indre design. Etter å ha valgt antall svinger, er det blitt undersøkt mer detaljert hvordan det indre designet av kjøleblokken skal være.

5.1.1 Finner

Gruppen har brukt ColdStream, som har kommet med ulike designforslag. Under oppsettet til en simulering på ColdStream defineres mål, begrensninger og start parametere. Disse faktorer innebærer maksimalt trykktap, maksimal temperatur på kretskortene og vannet, inngangs- og utgangspunkter for vannet, typen produksjonsmaskin som er tilgjengelig, samt designrammene for programmet. Disse designrammene gir programmet frihet til å utforme den indre banen for optimalisering av det indre designet. Se vedlegg C.1 for parameterne som er satt for utvalgt geometri. Tilsammen er det utført 60 simuleringer under bachelorperioden, hvor ColdStream lager rundt 100 ulike indre design på kjøleblokken per simulering. Dette har gitt mange designforslag, men det har ikke vært mulig å velge alle utkastene fra ColdStream. ColdStream sine utkast kan inkludere geometrier som er for små for maskinene som gruppen har tilgang på. Etter å ha vært i kontakt med veileder ble det kommunisert at tykkelsen måtte være minimum 2mm for innvendig geometri. Vi kom fram til ut fra disse parametrene at innvendig geometriske former som diamanter er optimalt for indre design. Denne diamanntgeometrien gir gode resultater, og har en størrelse som gjør dem mulig å produseres. Nærbilde av diamantene er vist under på figur 5.11.

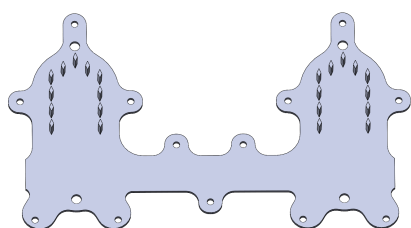


Figur 5.11: Nærbilde av diamannt geometri.

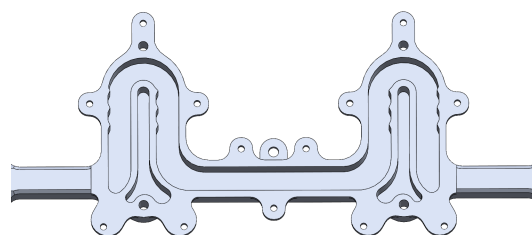
En annen faktor gruppen har sett på er dimensjonene på den indre svingen. Gruppen har testet ut ulike bredder på svingene i ColdStream, og bestemte seg for at en bredde på 10mm passet optimalt. En bredde på 10mm ga gode kjøleevner og etterlot et tomrom i midten av kjøleblokken. Dette tomrommet gjør det mulig å fjerne materiale, noe som gjør blokken lettere. Hvis gruppen ikke skulle optimalisere kjøleblokken med et tomrom i midten, ville gruppen valgt et indre design

som er bredere. Dette er fordi vann har lavere massetetthet enn aluminium, noe som betyr at kjøleblokken er lettere med større vannkanaler enn med aluminium på samme plass.

En ide som oppsto underveis i prosessen var at finnene skulle plasseres på lokket. Dette viste seg å være en hensiktsmessig tilnærming da det ville være utfordrende å frese vannkanalen med diamantene på grunn av den sin smalle bredde på 10mm, samtidig som lokkets tynne struktur kunne styrkes ved tillegget av finnene. Et problem som oppsto med denne ideen, var sammenslåingen av delene. Gruppen fant ut at finnene, som var plassert helt i kanten, ikke nødvendigvis ville passe perfekt og eventuelt kollidere med bunnpartiet. Løsningen på dette problemet var å omstrukturere plasseringen av finnene. Finnene som ikke var nær kantene, ble plassert på lokket, mens de som var langs kantene ble designet og produsert i bunnpartiet. Den endelige løsningen av det indre designet er visst på figur 5.12 og figur 5.13. Her observerer man at finnene langs kanten er integrert i bunnpartiet, i tillegg ser man tomrom som er i midten.

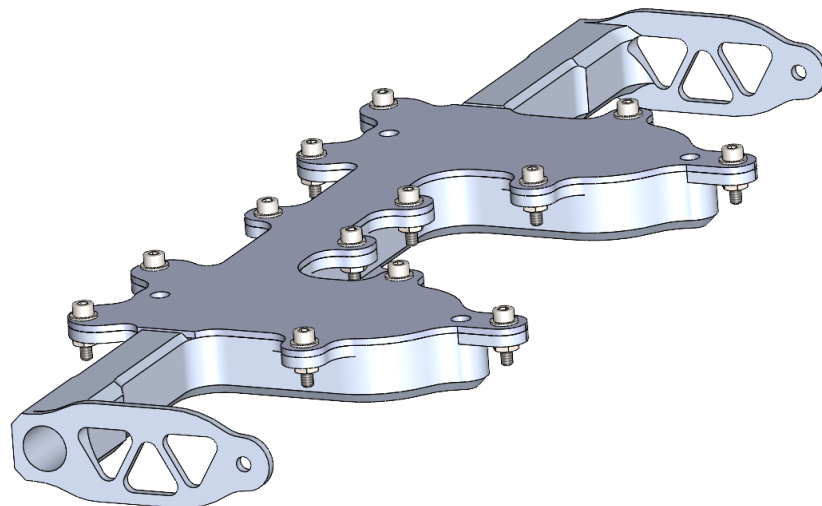


Figur 5.12: Utdypende lokk.



Figur 5.13: Utdypende bunnparti.

Gruppen sin ferdige kjøleblokk er vist på figur 6.3. Her kan man se en kjøleblokk som er betydelig forbedret for oppgaven, sammenlignet med sammenslåing av utkastene. Denne kjøleblokken har blitt optimalisert for oppgaven den skal utføre, noe som innebærer fjerning av materiale for sparing av vekt, og et indre design hvor finnene forbedrer kjøleevnen til kjøleblokken. Kjøleblokken er delt i to deler, slik at det blir mulig å frese delen, boltene som holder delene sammen og gjør den vanntett.



Figur 5.14: Ferdig sammenstilling av utdypende design.

5.2 Videreutvikling

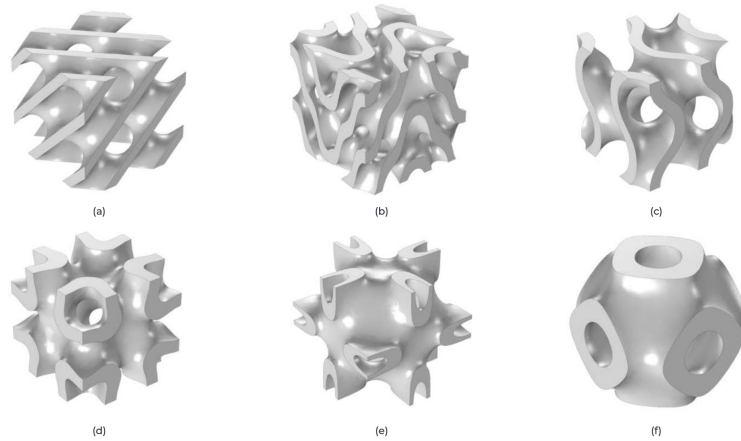
5.2.1 Fresing

Et forslag til videreutvikling hvis delen skal freses er å ha tykkere lokk. Dette legger til vekt på kjøleblokken, men kjøleblokkens lokk i år er veldig tynt. Kombinert med den lave E-modulen i aluminium blir dette lokket veldig mykt. Bare ved å øke tykkelsen litt vil gjøre store utslag, siden det andre arealmomentet i bøyetsituasjonen er basert på tykkelsen til lokket og ikke bredden.

5.2.2 3D - printing

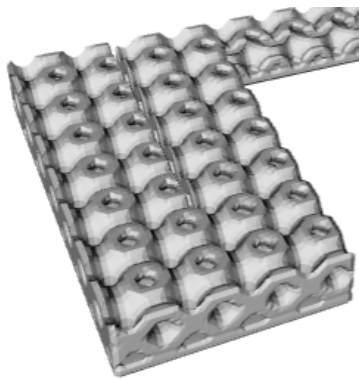
Gruppen fikk ikke mulighet til å 3D-printe grunnet mangel på tid og tilgjengelighet på 3D-printer. Det ble uansett laget konsept for 3D-print design, dette legger grunn for fremtidig videreutviklings potensial for kjøleblokken. Her er ikke funksjonalitet testet og det er heller ikke ment å gå videre til produksjon uten ytterligere utvikling på dette designet.

Det første gruppen ville gjort hvis gruppen hadde 3D-printer tilgjengelig ville vært å endre det indre designet. ColdStream tilbyr design etter produksjonsmetode, hvor 3D-printing også er tilgjengelig. Disse designene legger på masse, men de skal også være svært effektive i forhold til trykktap. Disse designene kalles for Triply Periodic Minimal Surfaces (TPMS), og er en struktur der flater som gjentas periodisk i i tre dimensjoner [27]. Figur 5.15 viser til ulike TPMS-strukturer.

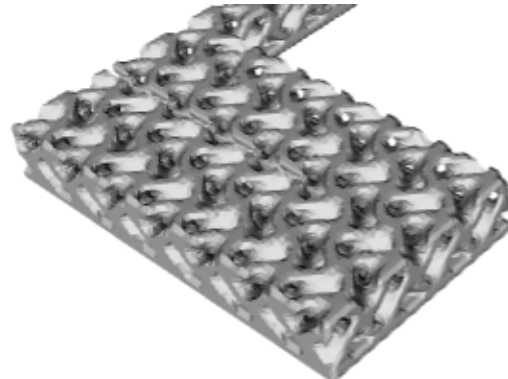


Figur 5.15: Forskjellige TPMS-strukturer: (a) Diamant, (b) Fisher–Koch, (c) Gyroid, (d) I-WP, (e) Neovius, (f) Primitive [27].

TPMS-strukturer øker overflatearealet, og dermed øker også kjøleeffekten til kjøleblokken. TPMS-struktrene som ColdStream har forslått som indre design til kjøleblokken er et Schwarz, og Gyroid design. Disse er visualisert i figur 5.16 og 5.17. Schwarz - designet består av runde kuler med hull på toppen og i sidene. Dette designet, tillater effektiv kjøling gjennom den betydelig økte overflatearealet. Det samme gjelder for Gyroid design. Gyroid-designet består av en kontinuerlig, sammenhengende overflate som ikke har noen rette linjer eller flater.



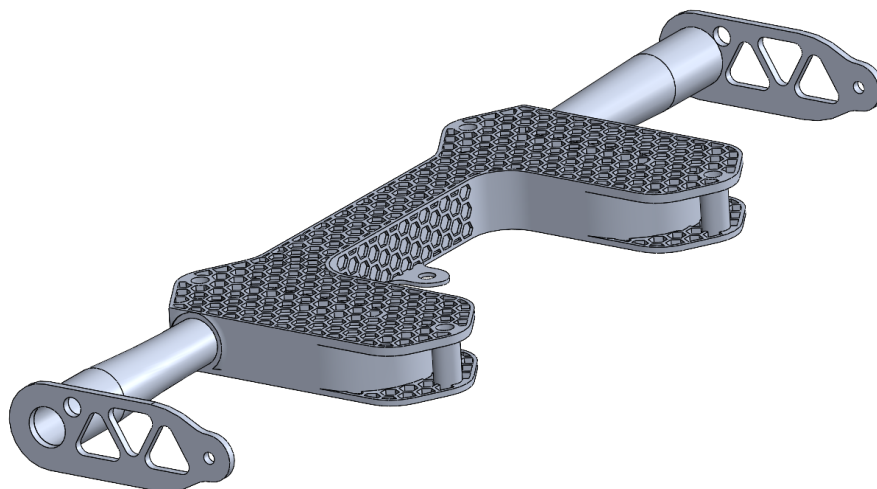
Figur 5.16: Schwarz indre design.



Figur 5.17: Gyroid indre design.

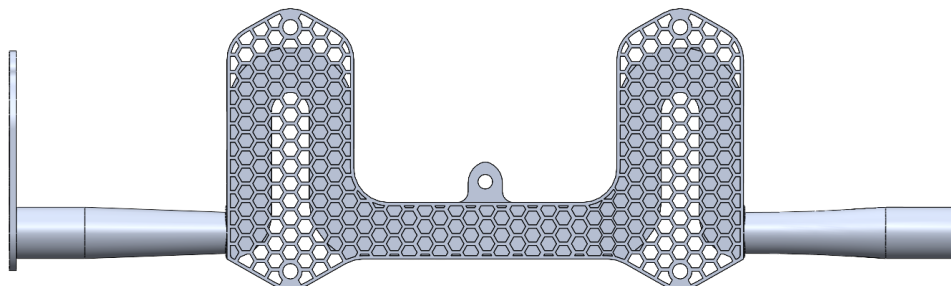
En annen stor fordel 3D-printing hadde gitt gruppen er mulighet for å produsere kompleks geometri på kjøleblokken. Med dette så menes komplekse geometrier som vil være vanskelig å produsere ved hjelp av tradisjonelle produksjonsmetoder. Figur 5.18 viser 3D-printet utkast for kjøleblokken, som har heksagon som en stor del av geometrien. Gruppen har valgt å bruke heksagon geometri fordi det fyller arealet effektivt, og derfor minimerer materialbruk og vekt [28]. Dette heksagon designet kan man se gjennom hele utkastet, hvor det er heksagon geometri på over- og undersiden av delen. I tillegg har det blitt plassert heksagon geometri på

midtpartiet av kjøleblokken. Dette er plassert på midten med samme begrunnelse som resten av kjøleblokken: for å spare vekt og materialet.



Figur 5.18: Konsept for 3D-printet design.

En annen ide som oppsto med heksagon design og 3D-printing var å fjerne materialet i midten av kjøleblokken. Materialet i midten av kjøleblokken sin funksjon var å gi styrke til kjøleblokka og lede varme fra kretskortene til vannet. Simuleringene utført på den ferdigstilte delen viste at kjøleblokken var greit innenfor både for styrken og kjølingen. Gruppen har derfor valgt å fjerne dette partiet. Flatene på bunn og toppen har derimot beholdt sitt materiale med heksagon geometrien. Dette partiet er beholdt med materiale for å få mer overflate areal som treffer kretskortene. Overhenget fra heksagon mønstret trenger kun å ekstruderes før denne geometrien kunne vært i nærheten av produserbar. Figur 5.19 viser 3D-utkastet ovenfra, hvor man kan se tydelig at alt materiale i tomrommet fjernet, og kun vannkanalen står igjen.

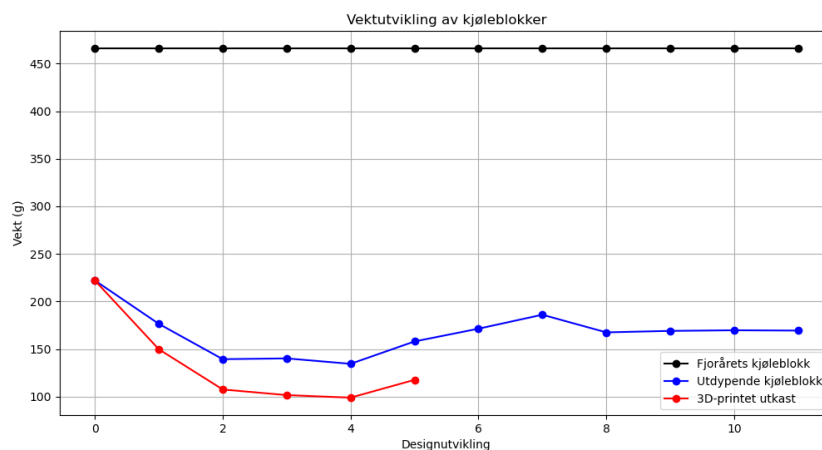


Figur 5.19: Konsept for 3D-printet design ovenfra.

Vanntetning var en av utfordringene med det utdypende designet. En stor fordel med å 3D-printe kjøleblokken er at delen blir automatisk vanntett, siden den blir produsert som en del. Dette betyr at boltene og ørene kan fjernes, og det blir derfor spart vekt.

Et annet element som er forskjellig fra det utdypende designet er inn- og utløpsrørerne på sidene. I stedet for å måtte lage firkantede inn- og utløpsrør, kan runde rør brukes på dette utkastet. Dette er for å fjerne det ekstra materialet fra hjørnene, men samtidig holde den nødvendige diameteren stabil. I tillegg er det lagt til plass for gjengene på dette utkastet, men rør diameteren går fra 15mm til 10mm etter at gjengedybden er nådd. Dette sparer vekt sammenlignet med inn- og utløpsrør til det utdypende designet.

Figur 5.20 viser utviklingen av vekt på de ulike kjøleblokkene gruppen har designet. Denne figuren visualiserer hvert tiltak som gruppen har gjort på designet, både utdypende design, 3D-printet utkast, pluss fjorårets kjøleblokk som referanse. Figuren viser at årets startutgangspunkt allerede er mye lettere enn fjorårets kjøleblokk. Fjorårets kjøleblokk var tyngre og over dimensjonert. Dette har gitt gruppen et godt utgangspunkt for å slå fjorårets kjøleblokk på vekt. Etter startutgangspunktet har gruppen redusert vekten med 51.81g.



Figur 5.20: Vektutvikling av ulike kjøleblokk design.

Vi ser på figuren at 3D - printet utkastet veier mindre enn utdypende design utkastet. Det er flere grunner til at 3D utkastet veier mindre. Den største grunnen til dette er at “tomrommet” reduserer vekten i mye større grad på 3D-utkastet, enn det utdypende designet. 3D utkastet har bare vannkanalen og vegger rundt kanalen. Resten av materiale er fjernet for å spare vekt.

En annen grunn til at 3D utkastet veier mindre er heksagon geometri utformingen. Som nevnt tidligere, heksagon design gir en materialeffektiv tilnærming til designet, og er en av fordelene man kan utnytte med 3D - printer.

Heksagon design og 3D-printing støtter FNs bærekraftsmål ved å fremme effektiv ressursbruk og redusere avfallsgenerering. Det er spesielt relevant for FNs bærekraftsmål 9.4: effektiv bruk av ressurser. Det dekker også delmål 12.2 som går ut på bærekraftig forvaltning av naturressurser. 3D-printing gjør det mulig å optimalisere materialbruken, redusere produksjonsavfall og skape mer bærekraftige produksjonsprosesser. Dette bidrar til å redusere miljøpåvirkningen og fremme en sirkulær økonomi der ressurser utnyttes mer effektivt og avfall minimeres.

6 Maskinering og sammenstilling

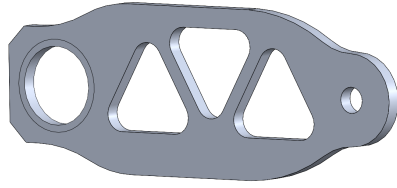
Det utdypende kjøleblokk design ble henvist til veilederen, hvor det ble konkludert med at kjøleblokken var for avansert, og ville blitt en større fresejobb enn tiltenkt. Hovedproblemet var oppspennet til delen. Det var ikke lagt godt nok til rette for oppspennet og det hadde vært behov for spesiallaget jigg. Dette hadde medført mye arbeid, i tillegg var det mye geometri som gjorde jobben vanskeligere å utføre. Dette betydde at gruppen måtte omstille seg, og re-designe kjøleblokken slik at den kunne maskineres med 3 oppspenn. Dette førte til et mindre detaljert utkast enn det utdypende designet.

6.1 Endringer på kjøleblokken for maskinering.

Gruppen utførte flere endringer på kjøleblokken, slik at det skulle være enklere å frese modellen. Den største feilen på det utdypende designet var innfesting til fresen. Det manglet gode kontaktflater til skruestikke. For å løse dette problemet ble det diskutert med veileder og kom frem til en løsning ved at veggtykkelsen på kjøleblokken skulle økes fra 3mm, til 4mm. Videre skulle ørene ekstruderes slik at de kan gjenges opp.

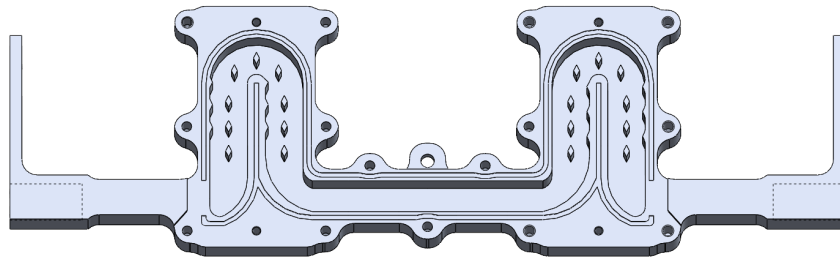
Rundt boltehullene lagde vi en halvsirkel, slik at boltene kan fest på en solid måte og kun trengte tre oppspenn. Et oppspenn på hver ende og et siste på overflaten for den indre vannkanalen.

En annen del som trengte større tykkelse var innfestingsrammen. Innfestingsrammen på det utdypende designet hadde en tykkelse på 2mm. Selve utformingene gjør at denne detaljen vil være ustødig og vibrere under fresing, og det ble derfor konkludert med at den må økes. Dermed økte tykkelsen på rammen fra 2mm til 4mm for å redusere vibrasjonen. Figur 6.1 og figur 6.2 viser den gamle og nye innfestingsrammen. Her ser man en tydelig forskjell, som medførte mindre detaljer for å gjøre jobben mindre komplisert.



Figur 6.1: Optimalisert ramme. **Figur 6.2:** Oppdatert ramme for fresing.

En annen endring som ble gjort fra det utdypende designet var det indre designet. Det ble også konkludert med at "tomrommet" i midten av kjøleblokken var unødvendig for denne fresejobben. Løsningen på dette problemet var å øke bredden på kanalen for å gjøre skilleveggen tynnere. Endringen som ble utført etter dette var å gjøre vannkanalen bredere, og tomrommet mellom vannkanalen ble fjernet. Dette vil antageligvis medføre bedre varmeoverføring mellom lokket og bunnpartiet, men tilføre mer vekt til kjøleblokken i form av vann. Denne løsningen gjør det indre designet mindre komplisert å produsere. Den nye vannkanalen er 12.5mm bred, mens indre høyde på vannkanalen er den samme på 11.25mm.



Figur 6.3: Oppdatert indre design for fresing.

6.2 Vanntetning

Å holde kjøleblokken vanntett er en av utfordringene i et todelt design man må takle for å sikre at den elektroniske utstyret forblir trygt og funksjonelt under alle forhold. I første omgang ble det foreslått en O-ring (se figur 6.4) som metode for å tette kjøleblokken. O-ring er en type pakning som legges i et spor mellom lokket og kroppen. Når lokket skrues på legges det et trykk på O-ringen og den deformerer seg etter sporet og lokket som tetter delen.

O-ring ble ikke tatt i bruk, siden sporet som kreves hadde ikke plass. Rundt inn- og utløpskanalen var det for lite materiale og det kom en åpning inn til vannkanalen.

Valget falt derfor på tetningsstoff for å gjøre kjøleblokken vanntett. Tetningsstoff fungerer på en litt annen måte. Det er et elastisk stoff som påføres direkte på kontaktoverflaten mellom lokk og bunnparti, hvor det herder, og som gjør delen vanntett. Dette betyr at det nødvendigvis ikke er behov for spor overalt. Tetningsstoffet som gruppen har brukt heter Loctite quick Gasket (se figur 6.5).

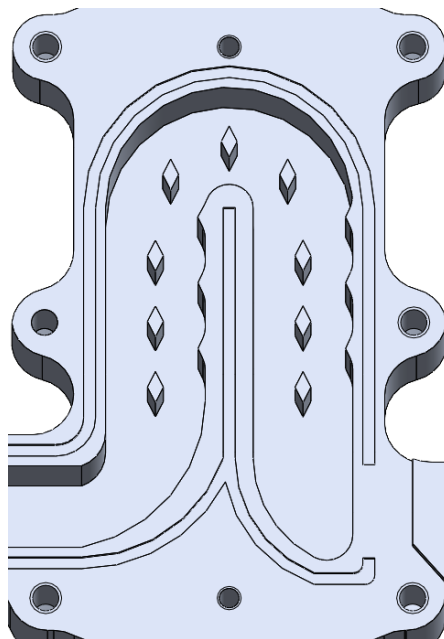


Figur 6.4: O - ring.



Figur 6.5: Tetningsstoff.

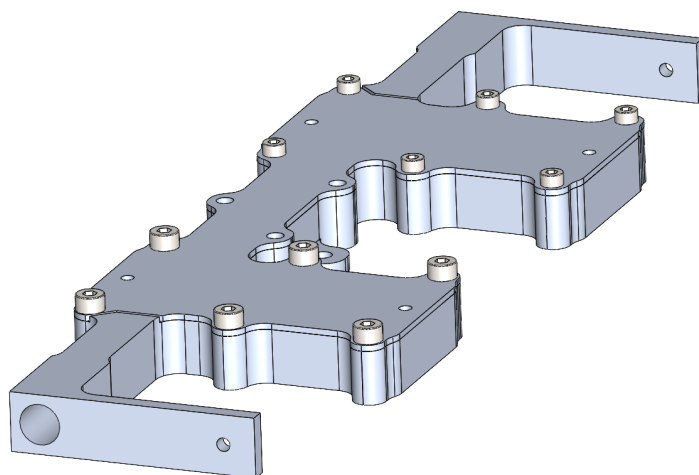
Det ble konkludert med veileder å legge til rette for et lite spor som skal sørge for at det tilføres tilstrekkelig med tetningsstoff, slik at det sikres god kontakt mellom bunnpartiet, lokk og tetningsstoffet. Rundt inn-og utløpskanalen var det for tynt til å ha spor, men kontaktoverflaten ble gjort større for å sikre et stort areal til tetningsstoffet. Hvordan kjøleblokkens bunnparti ser ut med spor er vist på figur 6.6.



Figur 6.6: Nærbilde av pakningsspor.

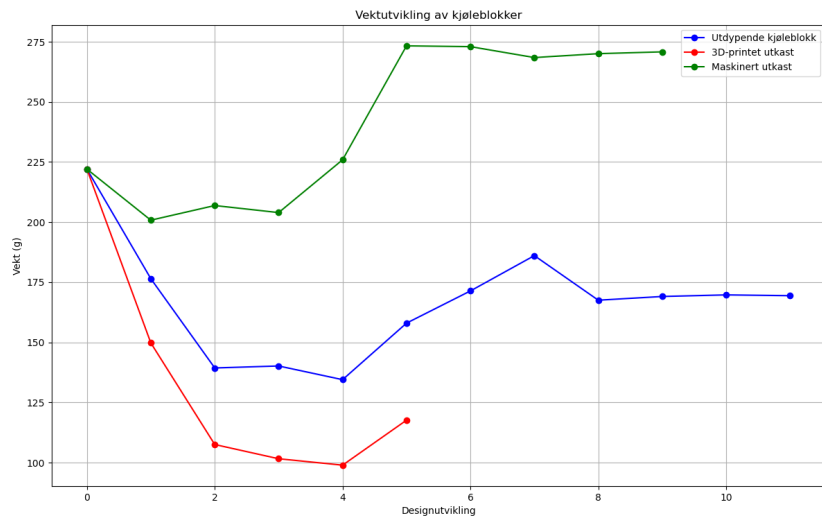
Det vil kreve riktig montering ved sammenstilling av delen. For å oppnå et godt resultat ved montering er det viktig å pusse kontaktoverflatene med en fint sandpapir. Dette er for å fjerne oksidlaget utenpå aluminiumen, øke kontaktflaten og løse opp forurensninger i aluminiumen. Dersom dette blir gjort sikrer man at tetningsstoffet og aluminiumen har kontakt. Pussingen utføres rett før tetningsstoffet legges på. Etter at delen er pusset og før tetningsstoffet legges må overflaten vaskes. Det er ønskelig å vaske med et løsemiddel som for eksempel acetone for å fjerne støv og fett som vil hindre kontakt mellom aluminium og tetningsstoffet. Etter at tetningsstoffet er påført, må det legges trykk på for å oppnå jevn fordeling og kontakt.

Figur 6.7 viser til en den endelige maskinerte kjøleblokken gruppen har designet. Denne kjøleblokken er en forenklet versjon av det utdypende designet, men den er maskinerbart. Det ble gjort store endringer på kjøleblokken for å få den innenfor kravene til å bli maskinert av institutt for Maskinteknikk og Produksjon (MTP), og få kjøleblokken klar for konkurranse.



Figur 6.7: Ferdig sammenstilling av freseutkast.

Figur 6.8 viser en vektsammenligning av alle kjøleblokkene. Se vedlegg A.1 for en mer detaljert oversikt over datapunktene. Den grønne linjen er det maskinerte utkastet som ender med en totalvekt på 268.9 gram. Dette en vekt som er høyere enn grunnformen gruppen designet tidlig i bachelorperioden. Det er ulike årsaker til at dette designet veier mer, noen av grunnene er bolter, frihull til boltene, og en enklere geometri slik at fresejobben skulle bli enklere. Den enklere geometrien inkluderer formen på kjøleblokkene, endring av indre geometri, og innfestingspunktene. Disse endringene har lagt til vekt på kjøleblokken. Selv om den endelige kjøleblokken til Revolve ikke ble like lett som vi hadde håpet, er den fortsatt med alle komponenter over en halv kilo lettere enn fjorårets kjøleblokk.



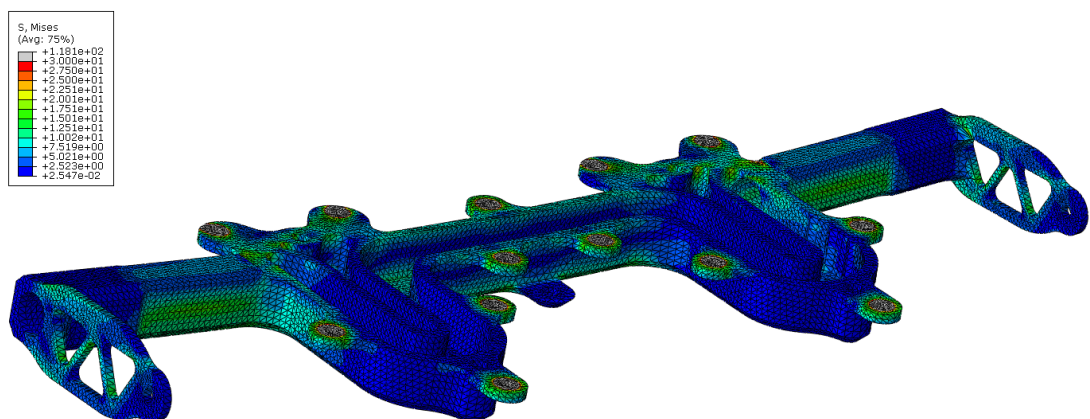
Figur 6.8: Vektutvikling av ulike kjøleblokker med maskinerende utkast.

7 Prosesser og beregninger

7.1 Simulering

Gruppen har utført simuleringer på forskjellige dataprogrammer for å optimalisere kjøleblokken. For utvikling av design, har gruppen hovedsakelig brukt SolidWorks. I SolidWorks har gruppen jobbet i Revolve PDM, som er en skybasert løsning hvor man har tilgang på fildatabasen til Revolve. Ettersom dette tillot oss å jobbe i koordinatsystemet hadde vi mulighet til å jobbe med høy presisjon og effektivitet. Denne digitale løsningen forenklet prosessen ved å gjøre det lettere å finne de nøyaktige designrammene for kjøleblokken. Dette skyldes at vi kan hente deler fra skyen som allerede er plassert i riktig koordinatsystem, slik at kjøleblokken passer nøyaktig inn i inverter casingen.

Etter at forslaget på ytre geometri for det utdypende designet var ferdig, satt gruppen opp simuleringer i Abaqus for å se på spenninger, nedbøyning og vann-tetthet. Simuleringen er satt opp med en total kraft 120N fordelt over 4 flater. Mer spesifikke detaljer om materialegenskaper, mesh og diverse resultater ligger i vedlegg B. Simuleringene har ulikt nivå av detaljer. Grunnform simuleringene er ikke like avansert som det utdypende designutkastet. Dette skyldes både detaljnivået som kreves fra simuleringen og viktigheten av sluttresultatet. Her er bolter, lokk og bunnparti involvert, dette krever definisjoner om kontakt mellom materialer og kontakt mellom overflater. Dette bidro til at simuleringene ble mer komplisert. Likevel kan man se at nedbøyning og spenninger i de ulike simuleringene korrelerer. Dette ser vi på figur 7.1 og grunnform figuren 5.1, hvor de har tilnærmet lik maksimal spenningsverdi på omtrent 80 MPa, med unntak av spenningen rundt bolthullene fra forspenningskreftene.



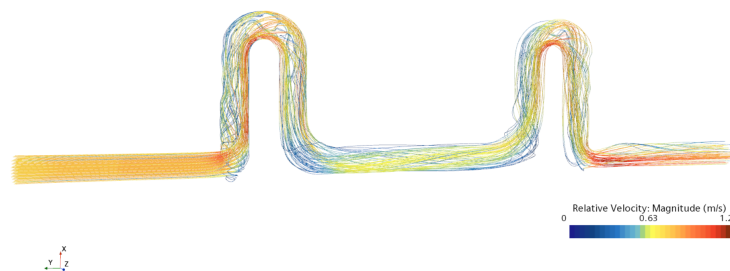
Figur 7.1: Spenningsanalyse av utdypende design.

SolidWorks og Abaqus ble brukt på ytre design, mens ColdStream og Star CCM+ ble brukt til indre design. ColdStream har forskjellige oppsett på simuleringene slik at den er mest mulig relevant for oppgaven. Oppsettet gruppen satt for ColdStream simuleringene er lagt til i vedlegg C.1. Det ble gjort antagelser i ColdStream for å kunne kjøre simuleringen optimalt. For eksempel ble aluminium valgt for kontaktoverflaten til kretskortene. Dette utgjør en feilkilde, ettersom kretskortene i virkeligheten består av et annet materiale som ikke var spesifisert i komponentens datablad. Dette går utover konduksjonsprosessen i ColdStream. En annen feilkilde fra simuleringene er at grunnmodellen ikke ble oppdatert konstant, men geometri forskjellen er liten. Det var stadig endringer på delen og oppdatere grunnmodellen i ColdStream tar lang tid. For å sette dette i perspektiv ble det gjort omlag 60 simuleringer i programmet.

For oppsett til Star CCM+-simuleringene fikk gruppen bistand av Revolve NTNU, og oppsett var som følger:

Først importeres en CAD-del fra SolidWorks som representerer væskevolumet som en parasolid inn i STAR CCM+. Deretter genereres et nettverk med mesh størrelser på 1mm inne i dette volumet, noe som resulterer i totalt 150 000 celler. Volumet tilordnes en region som modellerer vann. Simuleringen bruker den stabile $k-\omega$ SST-turbulensmodellen over 15 200 iterasjoner, tilsvarende 1 520 sekunder som er den estimerte tiden som brukes under en utholdenhetshendelse i FS.

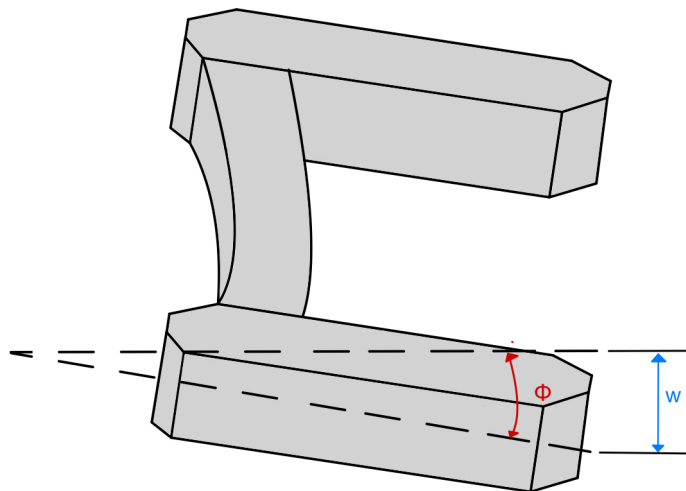
Hvis vi ser på Star CCM+ simuleringene så er strømmingen helt laminær i starten, før den kommer inn i første svingen. Før man starter en Star CCM+-simulering kan man sette opp om strømmingen i starten skal være laminær eller turbulent. Vedkommende fra Revolve NTNU som bisto i dette arbeidet gjorde ikke dette. Dette kan bety at trykket fra simuleringen burde ha vært noe høyere.



Figur 7.2: Star CCM+ - Laminær strømming i starten.

7.2 Den mekaniske prosessen

For å sikre nøyaktigheten av simuleringene utført i Abaqus, kan man beregne de mekaniske egenskapene til delen og sammenligne med de digitale resultatene. Ved beregning av nedbøyning vil det være kritisk å forenkle figuren og gjøre nødvendige antagelser. Antagelsene gruppen har gjort i forbindelse med utregningene vises i delkapittel 7.5. For å få et overordnet bilde over situasjonen starter prosessen med å tegne et Fritt legeme diragram (FLD). Et av de mer kritiske punktene til kjøleblokk er nedbøyning. Ved for stor nedbøyning vil det kunne medføre skade på de elektriske komponentene. Siden delen ikke er symmetrisk rundt innfesting vil det oppstå et dreiemoment om delen. Dette momentet vil skape en rotasjon som skaper ytterligere nedbøyning på materialet utenfor innfestingsaksen. Se figur 7.3 for visualisering av nedbøyningen.



Figur 7.3: Visualisering av nedbøyningen med vinkel ϕ og distanse w

Vridningene oppstår av kreftene som treffer utenfor innfestingsaksen. Det er krefter på begge sider av aksene, hvor kreftene som blir beregnet per kjøleside i 3g er $4kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 3 \cdot \frac{1}{2}$ som tilsvarer 58.86N fordelt over 86mm. Dette gir en fordelt last på 0.692 N/mm. Lengden er delt inn i to lengder, hvor L_2 er lengden fra innfestingsaksen til det ytteste punktet på kjøleblokk. L_1 er da den resterende lengden av L . For å finne momentet om innfestningsaksen, bruker man formelen:

$$\begin{aligned}
Mx &= M_2 - M_1 \\
&= \left(q \cdot L_2 \cdot \frac{L_2}{2}\right) - \left(q \cdot L_1 \cdot \frac{L_1}{2}\right) \\
&= \left(0.692 \frac{N}{mm} \cdot 65mm\right) \cdot \left(65mm \cdot \frac{1}{2}\right) - \left(0.692 \frac{N}{mm} \cdot 18mm\right) \cdot \left(18mm \cdot \frac{1}{2}\right) \\
&= 1349.75Nmm
\end{aligned}$$

For å finne vridningen må man først finne skjærmodulen til aluminium 6082-T6 og tverrsnittsmodulen til objektet. Ved å løse formel 4 får man:

$$\begin{aligned}
G &= \frac{70000MPa}{2 \cdot (1 + 0.33)} \\
&= 26315.79MPa
\end{aligned}$$

Tverrsnittsmodulen ble antatt til å være et hult rektangulært tverrsnitt. Her har gruppen gjort antagelse om at tverrsnittet er likt hele veien, men i realiteten varierer det. Formel 3 viser for tverrsnittsmodulen for hult rektangulært tverrsnitt:

$$\begin{aligned}
W_x &= \frac{(B \cdot H^3) - (b \cdot h^3)}{6 \cdot H} \\
&= \frac{(16.25mm \cdot 15mm^3) - (10.5mm \cdot 11.25mm^3)}{6 \cdot 15mm} \\
&= 443.26mm^3
\end{aligned}$$

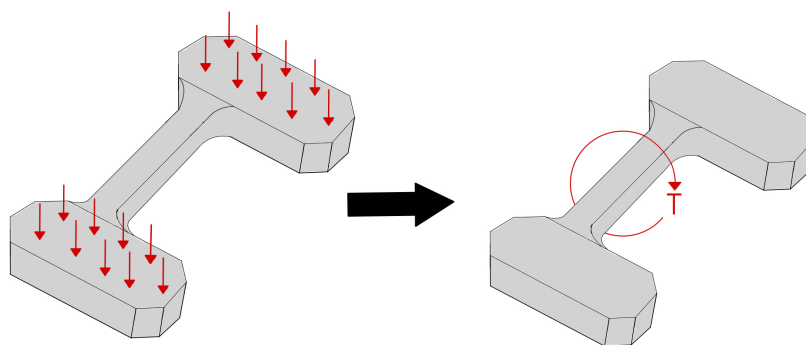
Vridningsnviklen kan da løses ved hjelp av formel 2:

$$\begin{aligned}
\Phi &= \frac{Mx \cdot L}{G \cdot W_x} \\
&= \frac{1349.75Nmm \cdot 82mm}{26315.79MPa \cdot 443.26mm^3} \\
&= 0.00949 = 0.54374^\circ
\end{aligned}$$

Nedbøyningen som et resultat av torsjonsbidraget kan nå løses ved hjelp av Pythagoras teoremet. Rotasjonen Φ blir vinklen mellom null nedbøyning (hosliggende katet) og hypotenusen. Hypotenusen er overflaten på kjøleblokken som går tangentielt gjennom punktet Φ . Lengden til hypotenusen er lik lengden fra innfestsaksen til det ytterste punktet på kjøleblokken (se figur 7.3). Nedbøyningen (w) er da lik den motstående kateten:

$$\begin{aligned} w &= \sin(0.00949) \cdot 70\text{mm} \\ &= 0.6643\text{mm} \end{aligned}$$

Dette tilsvarer at det ytterste punktet på kjøleblokken roteres ned med omtrent 0.65mm fra rotasjonen som oppstår av torsjonen. Figuren nedenfor viser visualiserer hvordan kreftene fører til torsjon:



Figur 7.4: Visualisering av krefter som fører til torsjon.

For å finne sammensatt deformasjon må nedbøyning fra torsjon summeres med nedbøyning fra kreftene over kjøleblokken ved hjelp av formel 1. Siden bjelken har identiske laster på hver sin side, summeres nedbøyningen for hver last sammen til en total nedbøyning. Punktet det løses for er midten av kjøleblokken på $x = 140\text{mm}$. Verdien som mangler for å løse formelen er andre arealmoment I_y , dette blir funnet ved hjelp av samme form og tall som tverrsnittsmoduleen.

$$\begin{aligned} I_y &= \frac{(B \cdot H^3) - (b \cdot h^3)}{12} \\ &= \frac{(15\text{mm} \cdot 16.25\text{mm}^3) - (11.25\text{mm} \cdot 10.5\text{mm} \cdot *3)}{12} \\ &= 4278.5\text{mm}^4 \end{aligned}$$

Utregningene for nedbøyning blir da:

$$\begin{aligned}w_x &= \frac{P \cdot b^2 \cdot x^2}{6 \cdot E \cdot I \cdot L^3} \cdot (3 \cdot a \cdot L - 3 \cdot a \cdot x - b \cdot x) \\&= \frac{58.9N \cdot 83mm^2 \cdot 140mm^2}{6 \cdot 70000MPa \cdot 4278.5mm^4 \cdot 280mm^3} \cdot (98700mm^2) \\&= 0.0143mm\end{aligned}$$

Den totale nedbøyningen blir:

$$\begin{aligned}w_x &= \text{Nedbøyning} + \text{Torsjonsbidrag} \\&= 2 \cdot 0.0143mm + 0.6643mm = 0.6929mm \\&= 0.6929mm\end{aligned}$$

En nedbøyning på omtrent 0.7mm blir ikke sett på som kritisk, men det er en betydelig nedbøyning. Utregningene for nedbøyningene er utført i 3g, dette er dermed i verst tenkelig situasjon hvor maksimal nedbøyning er 0.7mm. For kjøleblokka kan disse kreftene treffe både fra undersiden og oversiden avhengig av hvordan bilen beveger seg. Bevegelsesrommet for kjøleblokka på det ytterste er da 1.4mm, som er relativt stort.

7.3 Strømningsprosessen

Det essensielt å forstå strømningsprosessen, hvor varme overføringseffektiviteten i kjøleblokken i høy grad er bestemt av fluidstrømningen. Fluiden strømmer i kjøleblokken fra kjølingsystemet, og videre innover i kjøleblokken, og vil på veien oppleve trykktap i vannkanalen. Dette trykktapet stammer fra den indreoverflaten til kjøleblokken, hvor fluiden vil bli utsatt for friksjon. Friksjonen konverterer fluid hydraulisk energi til termisk energi [29]. Denne termiske energien øker temperaturen, og senker trykket til vannet. Det er mulig å beregne hvor mye trykktap friksjon forårsaker med formel 10:

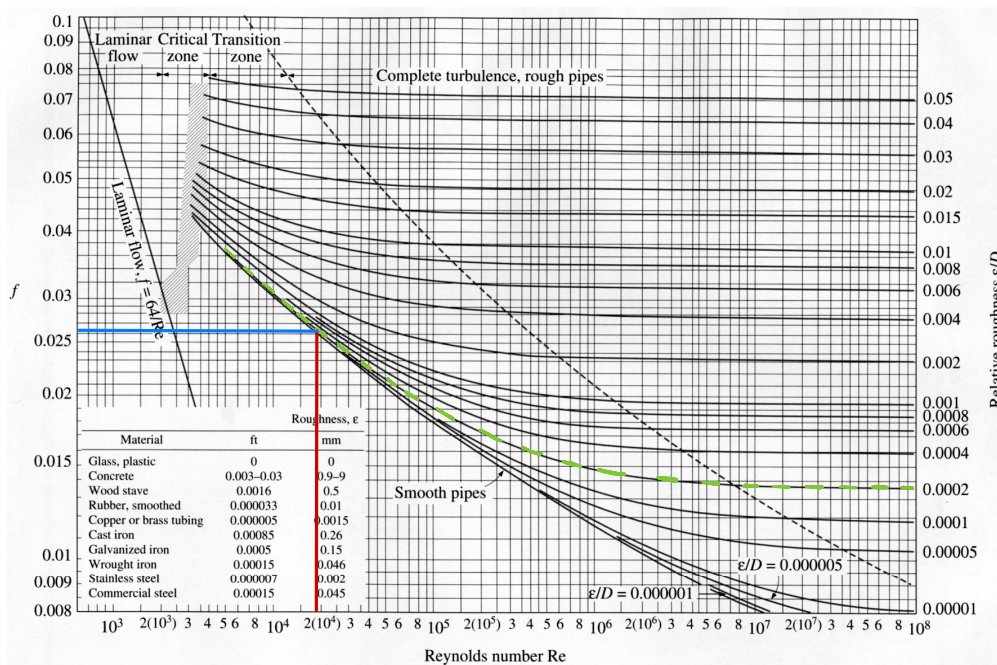
$$\begin{aligned}\Delta P_{\text{Friksjon}} &= f \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} \cdot \frac{L}{D} \\&= 0.026 \cdot 985kg/m^3 \cdot \frac{(0.905m/s)^2}{2} \cdot 43.2 \\&= 597.7Pa\end{aligned}$$

Gruppen har brukt 985 kg/m^3 som vannets tetthet, på grunn av temperaturen på vannet [30]. Dette kommer av at vannet i kjølekretsen blir oppvarmet av andre

systemer på bilen. Darcy friksjonsfaktor , f , ble funnet ved å bruke Reynolds nummer. Vi kan finne Re med formel 6:

$$\begin{aligned} \text{Re} &= \frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu} \\ &= \frac{985 \text{kg/m}^3 \cdot 0.9 \text{m/s} \cdot 0.01 \text{m}}{0.0005036 \text{Pa} \cdot \text{s}} \\ &= 17697.92 \end{aligned}$$

Den dynamiske viskositeten til vannet er en variabel som forandrer seg med temperaturen. For utregningene hentet vi den dynamiske viskositeten til vannet ved en temperatur på 55 °C [31]. Dette er den antatte temperaturen som kommer inn i kjøleblokken fra kjølesystemet. En annen variabel vi trenger for å finne Darcy friksjonsfaktor er den relative ruheten. Den grønne linjen på figur 7.5 viser den relative ruheten til overflaten, som er $\frac{\text{Ruheten til overflaten}}{\text{Diameter}}$. Her har gruppen antatt at ruheten til kjøleblokken har en generell ruhet som andre aluminiumsmetaller, som har en ruhet på rundt 0.002mm [32]. Etter at Re og relativ ruhet er funnet, så kan vi tegne opp linjer i Moody - diagram, hvor vi finner en friksjonsfaktor på 0.026:



Figur 7.5: Moody diagram med f -verdi.

Gjennom kjøleblokken beveger fluidet seg i seks svinger. Blant disse seks svingene, er to av dem 180°svinger, og resten av dem er 90°svinger. Når fluiden beveger seg gjennom svingene vil den støte på mer trykktap enn normalt. Figur 4.7, 4.9, 4.11

viser tydelig at trykktapet øker i svingene sammenlignet med resten av vannkanalen. Det er flere faktorer som sørger for at fluidet taper trykk når det beveger seg gjennom svinger. En sving gjør banen for fluidet lenger, og dermed øker det indre arealet til vannkanalen, og dermed igjen forårsaker mer trykktap på fluidet.

En annen årsak til at vannet har økende trykktap når det beveger seg gjennom svingen er at vannet kolliderer i veggen. Vannet har ingen indre styring, og vil dermed “kræsje” i veggen, før det endrer retning. Fluidet som strømmer har en masse, og har derfor et moment. Siden fluidets retning forandrer seg, må også momentet til fluidet forandre seg. Dette kommer fra Newtons første lov, som sier at et objekt forblir i ro eller i konstant bevegelse, hvis det ikke påvirkes av eksterne krefter. Når vi snakker om fluid i sving, så er det retningsforandringen som er den eksterne kraften. Fluidet bruker energi til å endre retning, det er den energien som forsvinner og reduserer trykket til strømmingen. Dette er fordi den kinetiske energien er bevart for å opprettholde en konstant massestrøm. Massestrømmen må være konstant siden samme mengde vann går inn og ut av kjøleblokken til en hver tid. Trykktapet kan bevises med energibevaring for viskøse strømminger.

$$\frac{p_1}{\rho g} + \alpha \cdot \frac{U_1^2}{2 \cdot g} + z_1 = \frac{p_2}{\rho g} + \alpha \cdot \frac{U_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + h_{tap}$$

h_{tap} i likningen er energitapet fra friksjon og svinger i kjøleblokken. Hastigheten i systemet antas å være bevart på grunn av det konstante volumet og høyden z er lik 0. Ved å løse likningen for vil man da stå igjen med:

$$p_1 = p_2 + h_{tap}$$

Gruppen har utført beregninger basert på teorien om hvor mye trykktap som svingene medfører. Trykktap i svinger avhenger av hvor brå svingen er. I kjøleblokken så har vi to svinger på 180° og fire svinger på 90°, hvor det er forskjellig tapkoeffisient. Svingene på 180° har tapkoeffisient på 0.2, mens svingene på 90° har en på

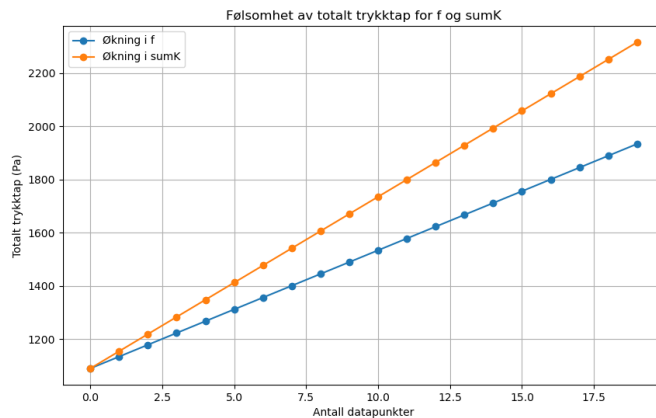
0.3 [33]. Her har gruppen brukt formelen 11, hvor $\sum K$ er variabelen ζ :

$$\begin{aligned}\Delta P_{Svinger} &= \rho \cdot \sum K \cdot \frac{U^2}{2} \\ &= 985 \text{ kg/m}^3 \cdot (4 \cdot 0.3 + 2 \cdot 0.2) \cdot \frac{(0.905 \text{ m/s})^2}{2} \\ &= 645.4 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Hvis vi legger sammen trykktapet som fluiden opplever på friksjon, sammen med trykktapet som kommer fra svingene får vi det totale trykktapet:

$$\begin{aligned}\Delta P_{Totalt} &= \Delta P_{Friksjon} + \Delta P_{Svinger} \\ &= \left(f \cdot \frac{L}{D} \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} \right) + \left(\rho \cdot \sum K \cdot \frac{U^2}{2} \right) \\ &= \left[f \cdot \frac{L}{D} + \sum K \right] \cdot \rho \cdot \frac{U^2}{2} \\ &= 444 \text{ Pa} + 645.4 \text{ Pa} \\ &= 1089.2 \text{ Pa}\end{aligned}$$

Hvis vi ser på regnestykket av det totale trykktapet, så er ρ og $\frac{U^2}{2}$ felles variabler. Dette gjør at vi kan se på følsomheten til de usikre variablene, og hvordan de vil påvirke trykktapet. Følsomhetenn til f og K er vist på figur 7.6:



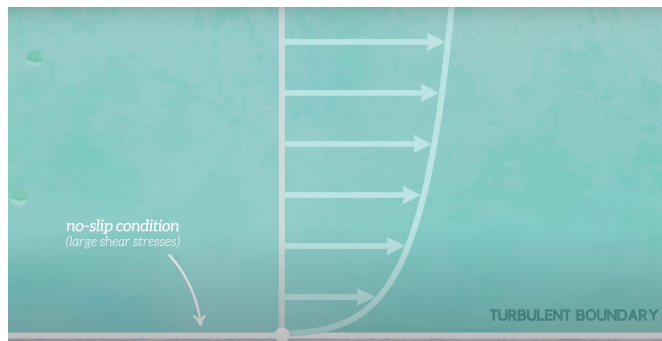
Figur 7.6: Følsomhetsanalyse av trykktap med variablene f og K .

Her ser man K er den mest følsomme variabelen. Under denne følsomhetsanalysen er det satt opp en Python kode for å gjøre utregningene og visualiseringen. Python-koden er konfigurert slik at både f og K økes med 10% for hvert data-

punkt. Resultatet fra analysen indikerer at en 10% økning i f fører til en økning i trykktapet på 4.08%, mens en tilsvarende økning i K resulterer i en økning i trykktapet på 5.92%. For prosesser der trykktapet er en kritisk faktor, bør endringer i K overvåkes nøye, da selv små variasjoner kan ha betydelige konsekvenser.

Turbulens er en annen faktor som påvirker trykktapet. Re på 17697.92 betyr at man har turbulent strømming, men likevel ikke konstant turbulent. Dette er fordi Re ikke er ekstremt høyt, og det kan oppstå laminær strømming. Hvis verdien for eksempel hadde vært på 100 000, så ville det vært veldig turbulent hele tiden.

Sett fra et annet perspektiv så er turbulent strømming bra for kjøleblokken. Laminær strømming har en tendens til å ha større hastighet i midten av røret, noe som medfører at vannet som er i yttersiden av røret vil holde seg lenger i samme posisjon. Denne posisjon kalles på engelsk "no-slip condition", som er en tilstand hvor fluiden står tilnærmet til helt stille ved kanten. Turbulent strømming har også denne effekten, hvor vannet helt i kanten står tilnærmet stille, men denne effekten er ikke like signifikant under turbulent strømming, som ved laminær strømming. Turbulent strømming fører derfor til en mer jevn temperaturfordeling over tverrsnittet av røret, som forbedrer varmeoverføringen.



Figur 7.7: Illustrasjon av «No-slip condition» [34].

Når vannet holder seg lenger i samme posisjon vil temperaturen i vannet øke i dette området. Dette er noe man ønsker å unngå, og turbulent strømming er derfor ønskelig for å fordele varmen mer jevnt og forbedre kjøleeffektiviteten. Finnene som vises i figur 5.11 er med å hjelpe strømmingen til å bli turbulent. De er strategisk plassert i vannets bane, hvor fluidet kolliderer mot diamantformasjonene. Dette kollisjonspunktet skaper forstyrrelser i vannkanalene.

7.4 Den termiske prosessen

I starten av den termiske prosessen vil det gå varme fra kretskortene til kjøleblokken. Når det går varme fra kontaktflater som ligger stille og inntil hverandre, heter prosessen konduksjon. I følge den elektrisk avdeling hos Revolve vil kretskortene gi fra seg en varmestrøm på omlag 400W. Her vil varmen spre seg utover hele kjøleblokken gjennom konduktiv spredning. I følge den andre loven i termodynamikk beveger varme seg alltid fra et område med høyere temperatur til et område med lavere temperatur. Under konduksjon skjer overføringen av varmeenergi på molekylært nivå gjennom kollisjoner mellom nabomolekyler eller -atomer.

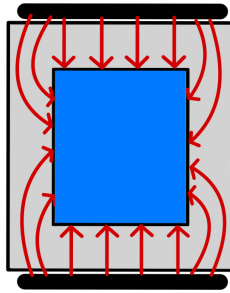
Hvor effektiv konduksjon er i kjøleblokken avhenger av konduksjonsmotstanden. Varmeoverføringsmotstanden i konduksjon er et mål på hvor vanskelig det er for varmeenergi å ledes gjennom et materiale. Hvordan varmeenergi ledes er avhengig av materialets tykkelse, konduksjons arealet og termiske ledningsevne. Vi kan bruke formel 14 for å regne konduksjonsmotstanden:

$$\begin{aligned} R_{Konduksjon} &= \frac{L}{k \cdot A} \\ &= \frac{0.00225m}{180W/m \cdot K \cdot 0.0030668m^2} \\ &= 0.00408K/W \end{aligned}$$

Dette er en lav konduksjonsmotstand, hvor en av grunne er lav veggtykkelse i kjøleblokken. Denne konduksjonsprosessen medfører at varmekilden må holde en temperatur på 1.6K over kjøleblokken før å kunne lede 400W. Dette finner vi med å gange varmestrømmen med konduksjonsmotstnaden. Her bruker vi formel 13, og setter den opp mot formel 14:

$$\begin{aligned} \dot{Q} &= -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{L} = \frac{\Delta T}{R_{Konduksjon}} \\ \Delta T &= \dot{Q} \cdot R_{Konduksjon} \\ &= 400W \cdot 0.00408K/W \\ &= 1.632K \end{aligned}$$

På bakgrunn av at aluminium har liten konduksjonsmostand, og leder varme godt, så antas det at kjøleblokken holder gjennomgående temperatur gjennom hele tvernsnittet. Konduksjonsprofilen til kjøleblokken er vist på figur 7.8. Her ser man at varmen kommer fra oversiden og undersiden fra kretskortene, men også at varmen kommer inn fra sidene som et resultat av god konduktivitet og lav motstand.



Figur 7.8: Konduksjonsprofil.

Det er naturlig at ikke all varmen fra kretskortene kommer inn til kjøleblokken via konduksjon. Generelt sett vil noe av varmen gå tapt til omgivelsene gjennom termisk stråling. Det er mulig å regne på hvor mye termisk stråling som går ut til omgivelsene fra kretskortene. Ved å bruke formel 17:

$$\begin{aligned}\dot{Q} &= \epsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_S^4 - T_{\text{surr}}^4) \\ &= 0.19 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \cdot 0.024624 \text{m}^2 \cdot (343 \text{K} - 323 \text{K})^4 \\ &= 0.78 \text{W}\end{aligned}$$

Emissivitet (ϵ) verdien for aluminium 6082 er på 0.19 [35]. A , er overflatearealet til kjøleblokken, mens T_S er overflatetemperaturen til kjøleblokken, og T_{surr} er temperaturen til omgivelsene. Ettersom det ikke er data om temperaturen til omgivelsene i casingen, har vi antatt en temperatur på 50°C .

Etter at varmen har nådd kjøleblokken, skal varmen overføres fra kjøleblokken til væsken. Denne prosessen kalles for en konveksjonsprosess. Det er viktig å ta hensyn til hvilket fluid som skal brukes når man velger et fluid for et kjølesystem. Gruppen hadde ingen påvirkning til å bestemme hvilket som skulle benyttes til kjøleblokken. Fluiden som blir brukt i kjølesystemet er vann, og vann har gode kjøleegenskaper. Systemet for denne prosessen er en isokor prosess, hvor temperatur og volumet på vannet er konstant, og da er massestrømmen også konstant. Vann har en spesifikk varme kapasitet på $4184 \text{ J}/(\text{K}\cdot\text{kg})$. Dette betyr at det tar at det krever 4184 Joule energi for å øke temperaturen til ett kilogram vann med én Kelvin.

For kjøleblokken betyr dette at varmeforskjellen mellom innløpstemperatur og utløpstemperatur kan beskrives ved hjelp av formel 12:

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$$

En av antagelsene gruppen har gjort for å kunne beregne den termiske prosessen er at all varmen overføres i en perfekt konduksjonsprosess. Dette betyr all varmen fra kretskortene overføres direkte til vannet, og det legges videre til grunn at kjøleblokken holder en uniform temperatur lik kretskortene. I tillegg er varmetapet til omgivelsene neglisjerbart, grunnet sin lave verdi. Med forutsetningen om at all varmen på 400W går rett til konveksjon får vi en temperaturforskjell på inn- og utløp temperatur på:

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\dot{Q}}{\dot{m} \cdot c_p} \\ &= \frac{400W}{0.07kg/s \cdot 4186J/(K \cdot kg)} \\ &= 1.37K \end{aligned}$$

Dette viser at det ikke er stor forskjell på inn- og utløpstemperatur. Selv om temperaturforskjellen mellom inn- og utløp er liten, spiller konveksjonsprosessen en avgjørende rolle i effektiv varmeoverføring fra kjøleblokken til væsken. Formelen for konveksjon er:

$$\dot{Q} = h \cdot A \cdot (T_S - T_\infty)$$

Hvor h er varmeoverføringskoeffisienten som beskriver effektiviteten av varmeoverføring mellom en aluminiumsoverflaten og vann gjennom konveksjon. Gruppen fant h med Nusselt nummeret. Først fant gruppen Nu gjennom Re og Pr . Fra utregningene fikk gruppen et Pr på:

$$\begin{aligned} Pr &= \frac{\mu c_p}{k} \\ &= \frac{0.0005036Pas \cdot 4186J/kg \cdot K}{0.65W/m \cdot K} \\ &= 3.27 \end{aligned}$$

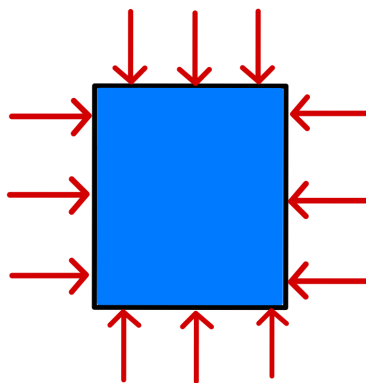
Putter Pr verdien inn i Nu formel 8:

$$\begin{aligned}\text{Nu} &= 0.023 \cdot \text{Re}^{0.8} \cdot \text{Pr}^{0.3} \\ &= 0.023 \cdot 17701.1^{0.8} \cdot 3.26^{0.3} \\ &= 82.1\end{aligned}$$

Etter å ha beregnet Nusselt nummeret ved hjelp av formel 8, benyttet vi denne verdien i formel 9. Deretter løste vi formelen med hensyn til h .

$$\begin{aligned}\text{Nu} &= \frac{h \cdot L}{k} \\ h &= \frac{\text{Nu} \cdot k}{L} \\ h &= \frac{82.1 \cdot 0.65 \text{W/m} \cdot \text{K}}{0.01 \text{m}} \\ h &= 5300.8 \text{W/m}^2.\end{aligned}$$

A er indre overflateareal til vannkanalen, som er arealet hvor det foregår konveksjon. Figur 7.8 viser varmeprofilen til tverrsnittet med konduksjon. På grunn av antagelsene gruppen har gjort med å se bort fra konduksjon, så er den nye varmeprofilen ved konveksjon slik:

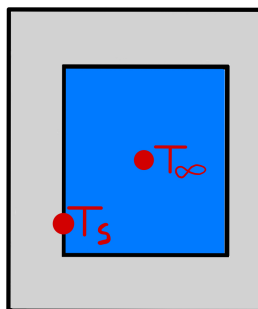


Figur 7.9: Konveksjonsprofil.

Figur 7.9 viser at det kommer varmekraft inn i fra alle fire sider. Konveksjonsområdet til konveksjonsprosessen blir det indre overflate arealet til vannkanalen. Det indre overflate arealet til kjøleblokken er 0.0051108m^2 .

Overflatetemperaturen, T_S , er temperaturen som vi finner på innsiden av kjøleblokken, altså overflatearealet til vannkanalen, mens T_∞ er temperaturen som vi

finner midt i vannkanalen. Her har gruppen brukt vannets gjennomsnittstemperatur fra simuleringene.



Figur 7.10: Illustrasjon av plassering til T_s og T_∞ .

Siden gruppen har forutsatt at all varmen går til vannet, så kan vi snu formelen for å finne overflatetemperaturen til kjøleblokken, med på løse formelen for T_s :

$$T_s = \frac{\dot{Q}}{h \cdot A} + T_\infty$$

Etter å ha snudd om formelen for overflatetemperatur, så kan man se på formelen at $\frac{\dot{Q}}{h \cdot A}$ blir temperatur forskjellen i regnestykke. Dette betyr at vi kan regne ut temperatur forskjellen, siden T_∞ varierer. Temperaturforskjellen blir da:

$$\begin{aligned} T_s &= \frac{400W}{5300 \cdot 0.003066} \\ &= 14.8K \end{aligned}$$

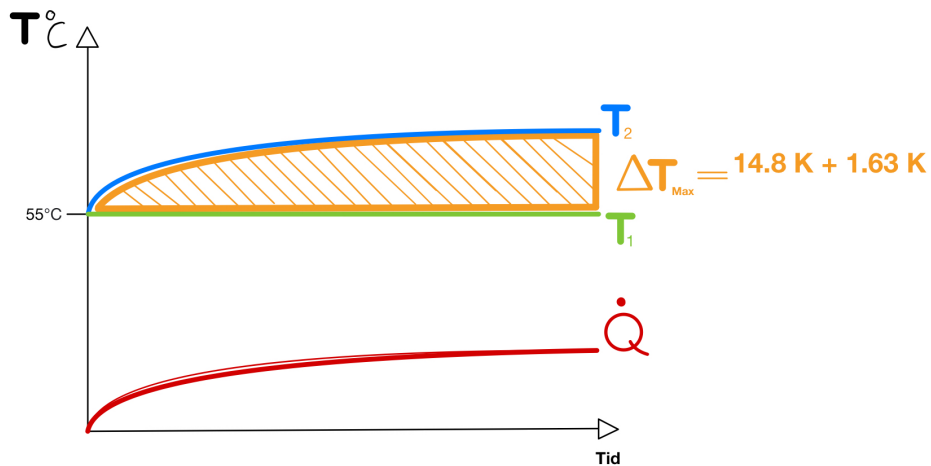
Vannet strømmer inn i kjøleblokken på en temperatur rundt 50 °C, dette er fordi vannet er oppvarmet av andre systemer som motorer. Underveis i vannkanalen vil temperaturen til vannet stige, på grunn av varmenstrømmen som kommer gjennom kjøleblokken. Dette medfører at gjennomsnitttemperaturen, T_∞ , er avhengig av resten av kjølesystemet.

Denne situasjonen kompliserer beregningene med tanke på innløpstemperatur. Regnestykket viser at kjøleblokken får en temperatur differanse i forhold til vannet på 14.8 K, uavhengig av temperaturen i innløpet. For å finne forskjellen mellom innløpstemperaturen og varmekilden kan temperaturdifferansene som oppstår i konduksjon og konveksjon summeres. Den samlede temperatur differansen blir

$$\begin{aligned}
\Delta T_{Total} &= \Delta T_{konduksjon} + \Delta T_{konveksjon} \\
&= 14.8K + 1.632K \\
&= 16.432K
\end{aligned}$$

Dette betyr hvis innløps temperaturen overstiger 64°C , så resulterer det i at kjøleblokken overstiger maksimal temperatur.

Dette er visualisert ved hjelp av figur 7.11 som tar for seg varmemotstand mellom vannet og varmekilden. Konveksjonen i kjøleblokken har høy varmemotstand som fører til en økt varmemotstand mellom varmekilden og vannet. Hadde motstanden vært lavere ville temperaturforskjellen vært mindre. Varmeforskjellen vises som ΔT . Vannet i kjøleblokken vil ikke absorbere 400W før denne temperaturforskjellen er oppnådd visualisert som \dot{Q} . \dot{Q} vil til en hver tid følge ΔT og viser varmestrømmen som fjernes i sammenheng med ΔT (\dot{Q} er ikke avhengig av total temperatur eller tid). Figuren 7.11 illustrerer også at temperaturen til inverteren (T_2) er fullstendig avhengig av temperaturen til vannet inn i kjøleblokken.



Figur 7.11: Illustrasjon av termisk motstand i kjølesystemet.

Faktorer som spiller inn i varmemotstanden i konveksjon er h og A . Motstanden (R) vil bli redusert ved en økning i enten h eller A . A er direkte knyttet til geometrien til vannkanalen. Arealet kan økes ved å forlege kanalen, øke tverrsnittet eller implementere indre geometri. Uten om den indre geometrien er dette faktorer som er vanskelig å øke. Tverrsnittet er begrenset av høyden til kjøleblokk, mens leng-

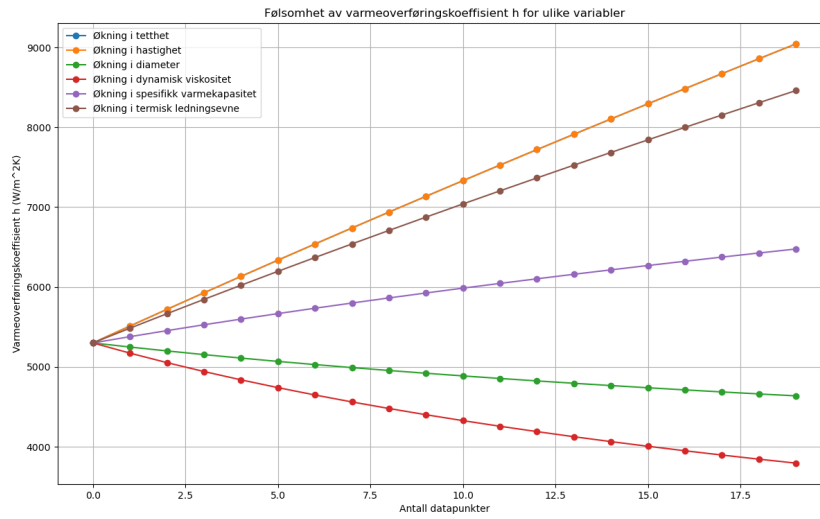
den er begrenset størrelsen til grensebetingelsene til kjøleblokken. I tillegg vil en potensiell endring i tverrsnittsareal og lengde endre på trykktapet i kjøleblokken etter som at Reynolds nummer er avhengig av hastigheten til fluidet og diameteren til røret. Trykktapet som kommer fra friksjon i røret vil øke ved lengden og h vil bli endret. Dette fører til at en endring i indre geometri vurderes som beste løsning for å eventuelt øke kontaktoverflate arealet. Den indre geometrien bidrar til trykktap gjennom tapkoeffisienten ζ , noe som gjør det utfordrende å nøyaktig beregne dens innvirkning på trykktapet. Dette skyldes at formen kan være irregulær og det finnes ingen standarder for slike beregninger.

Faktoren h er avhengig av flere faktorer. Nedenfor vises utviklingen av variablene som inngår i beregningen av h :

$$\begin{aligned}
 h &= \frac{Nu \cdot D}{k} \\
 &= \frac{(0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.3}) \cdot D}{k} \\
 &= \frac{(0.023 \cdot (\frac{\rho \cdot u \cdot D}{\mu})^{0.8} \cdot (\frac{\mu c_p}{k})^{0.3}) \cdot D}{k}
 \end{aligned}$$

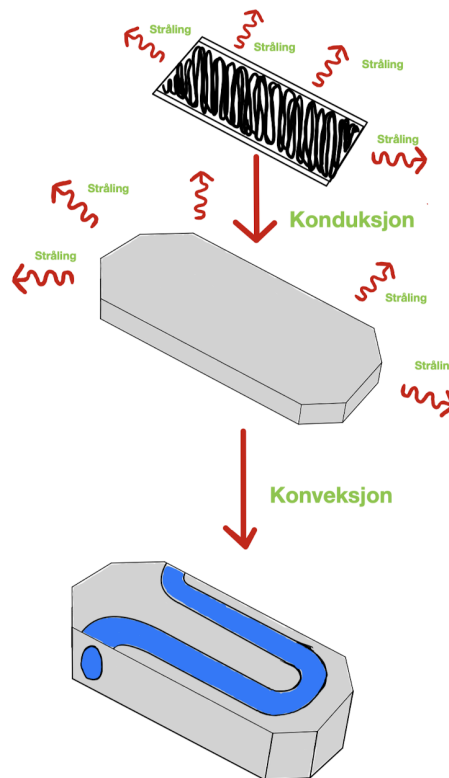
Denne utviklingen av variabel h viser at det tilsammen er seks variabler som påvirker hvordan h verdien blir. Dette er mange variabler å ta hensyn til, så det er laget et følsomhets diagram.

Figur 7.12 illustrerer hvordan følsomheten til de ulike variablene utover 20 datapunkter. Denne grafen er laget i Python med en økning på 5% per datapunkt. Figuren viser at variablene som har størst påvirkning er hastigheten til fluiden, den termiske ledningsevnen og den dynamiske viskositeten. Den termiske ledeevnen og den dynamiske viskositeten har stor påvirkning på utsalget til h fordi begge variablene er med i formelen to ganger. Hastigheten har stor påvirkning på grunn av Reynolds tall. Når hastigheten til fluiden øker, så øker Reynolds tallet linjert med hastigheten. Dette fører til mer turbulent strømming og økt varmeoverføring. Det er to tiltak som kan gjøres for å øke hastigheten til fluiden. Tiltakene som kan gjøres for å øke hastigheten til fluiden er å redusere diameteren og/eller øke pumpekraften i kjølesystemet.



Figur 7.12: Følsomhetsanalyse av varmeoverføringskoeffisienten h .

Figuren 7.13 viser total oversikt over den termiske prosessen. På toppen finner vi en sort rektangel som er kretskortene. Kretskortet ligger oppå lokket, og her foregår det en konduksjonsprosess. Lokket ligger oppå bunnparti, hvor den termiske prosessen er en konveksjonsprosess.



Figur 7.13: Oversikt over den termiske prosessen.

7.5 Sammenligning av simulering og teoretiske utregninger

I dette delkapittelet skal vi se nærmere på tallene fra de digitale simuleringene, og teoretiske beregningene. Her vil det bli drøftet forskjell på tallene, og hvorfor de kan være forskjellige.

7.5.1 Mekanikk

Simuleringene som er utført digitalt og utregningene for nedbøyning samsvarer ikke. Utregningene er utført med en rekke antagelser, en av disse er tverrsnittsmodulem (W). Kjøleblokken har konstant varierende geometri, det å finne en god tilnærming til dette kan være vanskelig. Fra utregningene kan man se at W er et avgjørende faktor. Dette er også faktoren med størst usikkerhet i likningen. M_x er også en faktor som det kan være knyttet usikkerhet til. Den viser til dreiemomentet om akselen som danner torsjon. Ulikheter kan forekomme i form av regnefeil eller dårlige antagelser. Dette kan også spille en stor rolle på resultatet i håndregningene. En annen potensiell feilkilde er bjelkeformelen som bruker punktlast i håndregningene. Dette var den mest sammenlignbare bjelkeformelen krefter og innfesting som gruppen fant.

Simuleringsprogrammet vil automatisk finne tverrsnittsmodulem over 3D-figuren og andre geometriske tall med mindre annet er definert. Dette gjør simuleringsprogrammer effektive på å regne ut de geometriske egenskapene til figurer. Abaqus og FEA er også relativt følsomt på oppsettet og hvordan man definerer krefter og innfesting. Denne følsomheten er en av svakhetene til digitale simuleringprogrammer. Det kreves en dyp forståelse av både situasjonen og programvaren for å kunne sette opp simuleringer som gir resultater som er sammenlignbare med virkeligheten.

Resultatene fra Abaqus kan også være påvirket av kvaliteten på mesh. Meshet er bygd opp av hex (8 node) og tet (10 node) mesh. Dette skal gjøre meshet relativt presist på grunn av antall noder. FEA er også testet for konvergering undervis i simuleringene for å få så gode svar som mulig. Dette skal tilsammen gjøre innvirkningen på feilkilder fra meshet mindre.

Selv om resultatene fra disse to metodene var forskjellige burde nedbøyningen ligge et sted mellom simuleringene og håndregningene. Simuleringsresultatet endte på omtrent 0.3mm nedbøyning og håndregningene ende på omtrent 0.7mm. Begge disse resultatene er akseptable selv om håndregningen er 133% større, er det kun

snakk om 0.4mm som er svært liten distanse i virkeligheten. Dette vil peke mot at resultatene er innefor toleranseområdet, men antageligvis er Abaqus simuleringen litt mer realistisk på grunn av antagelsene og forenklingene som måtte utføres på grunn av tverrsnittsmoduleen (W) i håndregningene.

7.5.2 Termodynamikk og varmetransport

Figur 7.15 viser til temperatur resultatene i simuleringen der det indre designet ble hentet ut. Denne simuleringen er gjort med samme tverrsnitt og legde som håndberegningene. Dette betyr at resultatene burde korrelere dersom resultatene skal være presise.

Temperature					
Region	Subregion	Boundary	T_Max	T_Mean	T_Min
Water			341.81 K	327.15 K	327.15 K
↳		Outlet	328.5 K	328.5 K	328.5 K
↳		Inlet	327.15 K	327.15 K	327.15 K
↳		Boundary	339.11 K	333.73 K	333.55 K
Outer geometry			346.14 K	343.66 K	339.11 K
↳		Lid	346.14 K	343.66 K	339.11 K
Heat source			346.55 K	346.55 K	346.14 K

Figur 7.14: Temperatur resultater fra ColdStream simulering.

For simuleringen kan man se en temperaturforskjell fra yttergeometri til varmekilde der $\Delta T_{\text{konduksjon}} = 1.89K$ tatt ut fra gjennomsnittstemperaturen. Videre kan man se at $\Delta T_{\text{konveksjon}} = 16.51K$ mellom yttergeometri og vannet er 16.51K tatt fra gjennomsnittstemperaturen i begge elementene. Dette gir en samlet $\Delta T_{\text{Totalt}} = 18.4K$

$\Delta T_{\text{Konduksjon}}$ fra ColdStream korrelerer med håndberegningene innenfor 0.3K. En slik korrelasjon kan tilsvare at antagelsene om konduksjon- og konveksjonsprofilen var god.

Konveksjonen skiller to grader til utregningene, dette kan komme av mange faktorer som ble vist tidligere i figur 7.12. Hvorfor det er en temperaturdifferenanse på to grader er uvssit. Det er fordi det er ukjent hvordan ColdStream løser simuleringen.

Flow Rate			kg/s	m ³ /s	l/s
Region	Subregion	Boundary			
Water			0.070839 kg/s		
↳		Outlet	-0.070839 kg/s		
↳		Inlet	0.070839 kg/s		

Figur 7.15: Temperatur resultater fra ColdStream simulering.

Fluidet øker hastigheten litt i simuleringen, hvorfor dette skjer er ukjent. Massestrømmen er spesifisert i simuleringsprosessen, så det var ikke ventet at den skulle øke. Dette burde også kun påvirke positivt utfra følsomhetsanalysen til h . En mulighet til at det forekommer resultatforskjeller kan være at vannet og aluminiumen har andre verdier i ColdStream enn det som ble brukt for utregningene.

Forskjellen på temperatur i simuleringene og beregningene endte på 1.97K, der simuleringene var mer negative enn beregningen. Bidraget i 1.97K kommer hovedsaklig fra konveksjonprosessen. Det kan også være at konduksjonprofilen og da også konveksjonprofilen ikke har helt identisk spredning over tverrsnittet som antatt. Dette kan medføre til at et stort areal er brukt i utregningene som gir mer positive svar.

7.5.3 Fluidmekanikk

I simuleringene i Star CCM+ fikk vi et trykktap på 1100 Pa, mens i de teoretiske beregningene fikk vi et totalt trykktap på 1089 Pa. Dette er tallverdier som er nærme hverandre. Dette kan bety at gruppen har tenkt, og funnet riktige verdier som passer det virkelige scenariet. En faktor som virker merkelig er strømmingen i Star CCM+ simuleringene. Tidligere i delkapittel 7.1 ble det nevnt at simuleringen ved start hadde laminær strømming i starten av simuleringen, som betyr at trykktapet skulle vært høyere. Hvis trykktapet skulle vært høyere i simuleringene, kan dette indikere at trykktapet skulle vært høyere i de teoretiske beregningene også. Det ble beregnet følsomheten på friksjonsfaktor og tapskoeffisient i svinger tidligere delkapittel 7.3. Friksjonsfaktoren er en variabel som kan avleses feil i Moody-diagrammet. I tillegg er overflateruheten ikke målt, men anslått ut fra gjennomsnittlig ruhet for aluminium, noe som kan være en feilkilde.

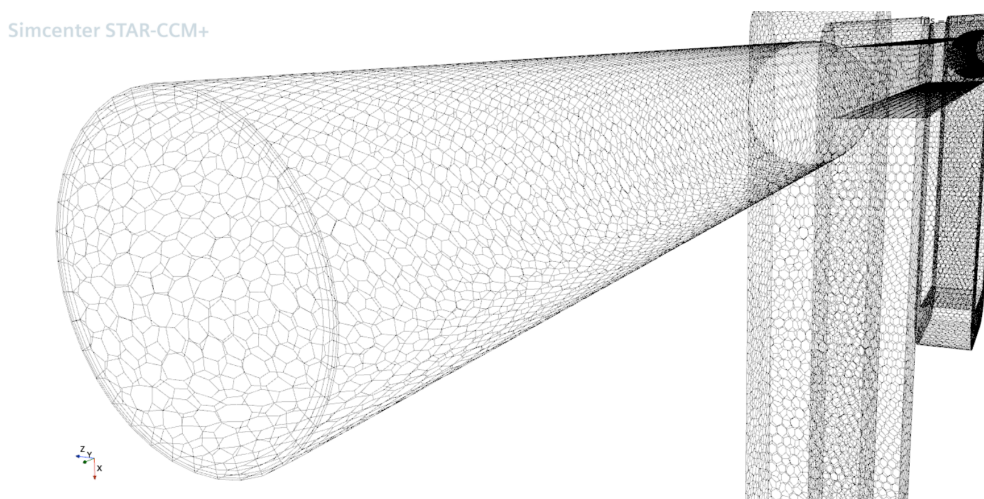
ColdStream-simuleringene viser forskjeller i trykktap sammenlignet med de teoretiske beregning og Star CCM+, men ikke mye. Resultatene fra ColdStream er

vist på figur 7.16, hvor vi ser et trykktap på 1278 Pa, noe som er tilsvarende Star CCM+-simuleringen og de teoretiske beregningene. En av årsakene til at ColdStream tallene er noe høyere enn Star CCM+ og de teoretiske beregningene kan være at ColdStream simuleringen har lagt til indre geometri som øker trykktapet.

Pressure				Pa	bar	PSI
Region	Subregion	Boundary	p			
Water			40680.03 Pa			
		Outlet	40000 Pa			
		Inlet	41278.98 Pa			

Figur 7.16: Trykktap fra ColdStream-simuleringene.

Det ble gjort simuleringer på Star CCM+ med diamanter som indre geometri, og denne simuleringen fikk et trykk tap på 2050Pa, som igjen er høyere trykktap en ColdStream-simuleringene. Dette betyr at diament geometrien øker trykktapet på med 950Pa, som er relativ stor økning. Ulike faktorer kan spille inn på de høye tallene til Star CCM+-simuleringene, hvor en av faktorene kan være mesh-oppløsningen. En finere mesh kan fange opp mer detaljer i strømmingen, noe som kan resultere i høyere trykktap. Det er uvisst om ColdStream bruker mesh under simuleringene, men det er ikke noe gruppen kunne tilføre i oppsettet. Figuren under viser meshet brukt i Star CCM+ - simulering.



Figur 7.17: Nærbilde av mesh på Star CCM+ simuleringene.

8 Konklusjon og fremtidig arbeid

Gjennom oppgaven for Revolve NTNU har vi optimalisert kjøleblokken i både kjøleevne og vekt, ut i fra forutsetningene gruppen hadde. Arbeidet har inkludert en grundig analyse av kretskorttemperaturen, samt utforming av ytre og indre geometri. Kretskorttemperaturen kommer til å ligge et sted mellom 16.4K og 18.4K over innløpstemperaturen, hvilket innebærer at innløpstemperaturen er avgjørende for kretskortene. Indre diamantgeometri øker den turbulente strømming og kjøleeffekten ved økt overflateareal. Gruppen har i tillegg redusert vekten på kjøleblokken fra 841 gram til 269 gram, som er en reduksjon på 572 gram. Disse forbedringene fant gruppen ved analyser og ved bruk av digitale simuleringer og utregningene. SolidWorks og Abaqus bidro med optimalisering av ytre geometri og vektreduksjon. Star CCM+ og ColdStream ble brukt for optimalisering av trykktap og varmeoverføring.

Gruppen har gjennom prosjektet designet en optimal kjøleblokk for Formula Student-bilen, men dette designet viste seg å være mer utfordrende å produsere enn antatt. Dette resulterte i et nytt design som vil være mulig å produsere med en 3-akse fres. Vi anbefaler derfor Revolve NTNU å jobbe videre med dette designet.

Innovasjon spiller en nøkkelrolle for å fremme bærekraft, og ny teknologi viser hvordan kreative og innovative løsninger kan drive frem bærekraftige endringer. 3D-printing av metall er en relativt ny teknologi som bidrar til omstilling i næringslivet, mer effektiv ressursbruk, som igjen bidrar til et mer bærekraftig samfunn.

Ved fremtidig arbeid er det viktig å inkludere eksperimentelt validere termiske målinger for optimal drift av kretskortene. Videre bør kjøleblokkens funksjonalitet verifiseres under reelle driftsforhold, og simuleringens nøyaktighet kontrolleres. Utvikling av 3D-utkastet kan bidra til å forbedre ulike detaljer med kjøleblokken, slik som utfordringer knyttet til vannlekkasje, samt avhengighet av bolter til lokk kan elimineres. tillegg viser våre analyser at vekten kan reduseres ytterligere ved implementering av kompleks geometri. Kompleks geometri vil redusere materialforbruket i forbindelse med produksjon av kjøleblokken, samt bidra til mindre materialsvinn som igjen vil bidra til en mer bærekraftig løsning.

Gjennom arbeidet med oppgaven, utførte analyser og simuleringer har vi utviklet en ny kjøleblokk som oppfyller Revolv NTNU sin kravspesifikasjon. På bakgrunn av funnene kan vi konkludere med at vi har designet en optimalisert kjøleblokk for en elektrisk formula student-bil.

Referanser

- [1] Formula Student. *WRL - Formula Student Combustion*. URL: <https://fs-world.org/C/> (sjekket 01.05.2024).
- [2] FN - Sambandet. *FNs bærekraftsmål*. URL: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal> (sjekket 12.05.2024).
- [3] National Design Specification. *BEAM DESIGN FORMULAS WITH SHEAR AND MOMENT DIAGRAMS*. 2005. URL: <https://engineering.purdue.edu/~ce474/Docs/DA6-BeamFormulas.pdf>.
- [4] SimScale. *What Is FEA | Finite Element Analysis?* 7. des. 2023. URL: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/> (sjekket 08.02.2024).
- [5] NTNU. *Elements*. 2021. URL: <https://folk.ntnu.no/nilspv/TMM4175/elements.html> (sjekket 16.05.2024).
- [6] Lars Egil Helseth. *turbulens*. I: *Store norske leksikon*. 25. jan. 2023. URL: <https://snl.no/turbulens> (sjekket 31.01.2024).
- [7] Lars Egil Helseth. *Reynolds' tall*. I: *Store norske leksikon*. 23. aug. 2023. URL: https://snl.no/Reynolds'_tall (sjekket 08.05.2024).
- [8] GeeksforGeeks. *Second Law of Thermodynamics*. 5. apr. 2024. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/second-law-of-thermodynamics/> (sjekket 09.05.2024).
- [9] Equinor. *3D-printing og metalladditiv produksjon (AM)*. URL: <https://www.equinor.com/no/energi/3d-printing> (sjekket 18.03.2024).
- [10] TSBF Engineering. *Fresing*. 14. nov. 2016. URL: <http://www.tsbfengineering.com/jorgen/2016/11/14/fresing> (sjekket 18.03.2024).
- [11] V1 3D printing. *WHAT IS SELECTIVE LASER MELTING (SLM) 3D PRINTING?* 3. sep. 2023. URL: <https://v1-3d.com/knowledge-base/what-is-selective-laser-melting-slm-3d-printing> (sjekket 05.05.2024).
- [12] Vegard Brøtan. *Additiv produksjon kan gi mer bærekraftige produkter med mindre avfall*. 8. mar. 2021. URL: <https://blogg.sintef.no/vareproduksjon-nb/additiv-produksjon-barekraft/> (sjekket 11.05.2024).
- [13] ActOn Finishing Ltd. *Why You Need to Include 3D Printing Post Processing Into Your Manufacturing Process?* 28. okt. 2021. URL: <https://actonfinishing.madeinthemidlands.com/news/why-you-need-to-include-3d-printing-post-processing-into-your-manufacturing-process> (sjekket 14.05.2024).

-
- [14] Hugo Albero Rojas. *Advantages of Using a CNC Milling Machine | METROM*. 22. jul. 2022. URL: <https://metrom.com/the-benefits-of-using-a-cnc-milling-machine/> (sjekket 10.05.2024).
- [15] Dawson Shanahan. *An opportunity not to be wasted - reducing metal waste*. Dawson Shanahan. 21. aug. 2014. URL: <https://dawson-shanahan.co.uk/opportunity-wasted-reducing-metal-waste/> (sjekket 11.05.2024).
- [16] FN - Sambandet. *Ansvarlig forbruk og produksjon*. 2. mai 2023. URL: <https://fn.no/om-fn/fns-baerekraftsmaal/ansvarlig-forbruk-og-produksjon> (sjekket 12.05.2024).
- [17] Core77. *Design Rules for 3D Printing*. Core77. URL: <https://www.core77.com/posts/74401/Design-Rules-for-3D-Printing> (sjekket 11.05.2024).
- [18] WayKen Rapid Manufacturing. *Undercut Machining: A Complete Guide For CNC Machined Parts With Undercuts*. Prototech Asia. 26. jun. 2022. URL: <http://https%253A%252F%252Fprototechasia.com%252Fen%252Fplastic-cnc-machining%252Fquestions-cnc-machining> (sjekket 11.05.2024).
- [19] Vladan Jocić. *Profiling - the most important part of budgeting! How to deal with behavioral probabilistic alternatives? Is profiling the most important milestone?* 2015. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/profiling-most-important-part-budgeting-how-deal-behavioral-jocic> (sjekket 12.05.2024).
- [20] ASM. *Aluminum 7075-T6; 7075-T651*. URL: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma7075t6> (sjekket 18.03.2024).
- [21] Aalco. *Aluminium Alloy - Commercial Alloy - 6082 - T6~T651 Plate*. 18. jul. 2019. URL: https://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy_6082-T6~T651_148.ashx (sjekket 18.03.2024).
- [22] Matmatch. *AA Standards Grade 6082 T6*. URL: <https://matmatch.com/materials/mitf374-aa-standards-grade-6082-t6> (sjekket 18.03.2024).
- [23] MatWeb. *Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed Bar*. URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10d463eb3d3d4fff48fc57e0ad10374> (sjekket 18.03.2024).
- [24] ASM. *Titanium Ti-6Al-4V (Grade 5), Annealed*. URL: <https://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=mtp641> (sjekket 18.03.2024).
- [25] MatWeb. *304 Stainless Steel*. URL: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=abc4415b0f8b490387e3c922237098da> (sjekket 18.03.2024).

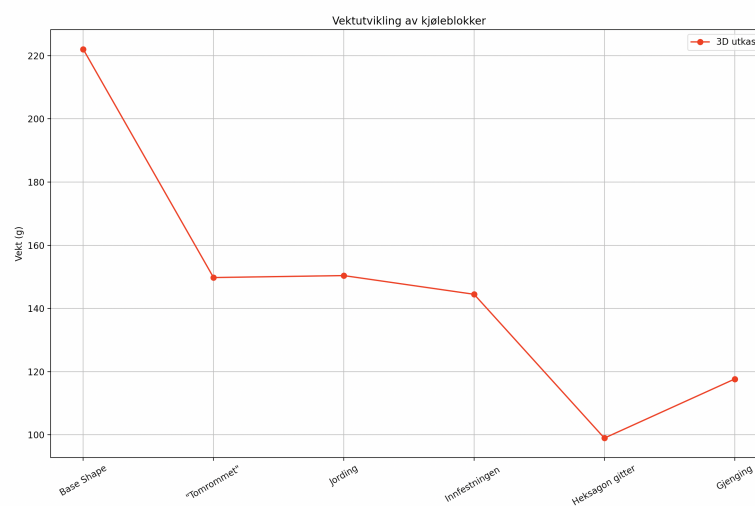
-
- [26] Norsk Hydro. *Aluminium recycling*. 3. mar. 2024. URL: <https://www.hydro.com/en-NO/aluminium/about-aluminium/aluminium-recycling/> (sjekket 19.05.2024).
- [27] M. Bartlett mfl. *An Introduction to Triply Periodic Minimal Surfaces in Thermal Applications*. 5. feb. 2024. URL: <https://www.thermopedia.com/content/10389/> (sjekket 18.05.2024).
- [28] Esri. *Why hexagons?* URL: <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/h-whyhexagons.htm> (sjekket 14.05.2024).
- [29] Wikipedia. *Pressure drop*. I: *Wikipedia*. 16. jul. 2023. URL: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Pressure_drop&oldid=1165699929 (sjekket 02.05.2024).
- [30] The Engineering Toolbox. *Water - Density, Specific Weight and Thermal Expansion Coefficients*. 2003. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/water-density-specific-weight-d_595.html (sjekket 02.05.2024).
- [31] Anton Paar. *Viscosity of Water*. URL: <https://wiki.anton-paar.com/en/water/> (sjekket 06.05.2024).
- [32] The Engineering ToolBox. *Roughness & Surface Coefficients*. 2003. URL: https://www.engineeringtoolbox.com/surface-roughness-ventilation-ducts-d_209.html (sjekket 07.05.2024).
- [33] Henryk Kudela. "Hydraulic losses in pipes". I: (). URL: http://fluid.itcmp.pwr.wroc.pl/~znmp/dydaktyka/fundam_FM/Lecture11_12.pdf.
- [34] The Efficient Engineer. *Understanding Laminar and Turbulent Flow*. 8. sep. 2020. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=9A-uUGOWR0w> (sjekket 03.05.2024).
- [35] Milan Zeljković mfl. *THE DETERMINATION OF THE EMISSIVITY OF ALUMINUM ALLOY AW 6082 USING INFRARED THERMOGRAPHY*. 30. jun. 2015. URL: https://www.researchgate.net/publication/291802248_THE_DETERMINATION_OF_THE_EMISSIVITY_OF_ALUMINUM_ALLOY_AW_6082_USING_INFRARED_THERMOGRAPHY#:~:text=. . . ,0.09%20to%200.24.%20. . .

Vedlegg

A

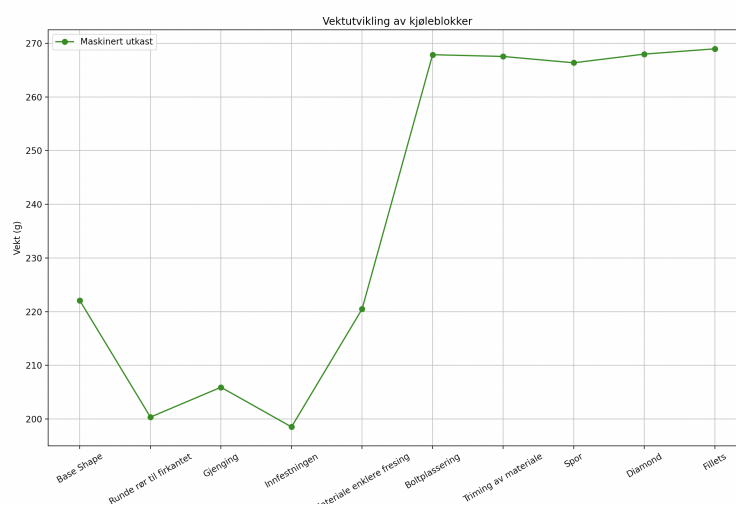
A.1 Vektutvikling

A.1.1 Vekt 3D- utkast



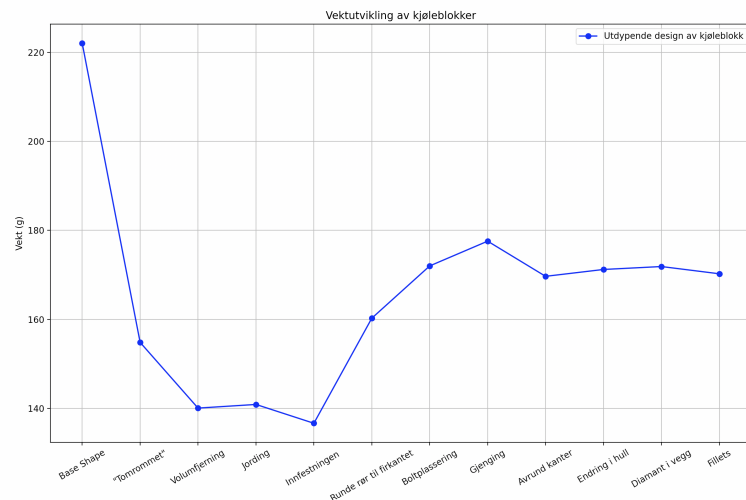
Vektutvikling 3D

A.1.2 Vekt maskinert utkast



Vektutvikling maskinert

A.1.3 Vekt Utdypende utkast

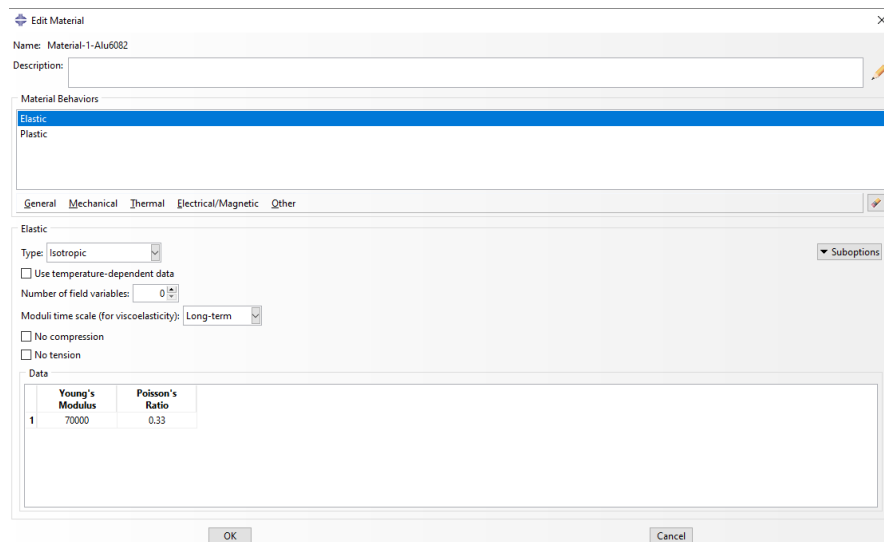


Vektutvikling maskinert

B FEA

B.1 Abaqus material

B.1.1 Aluminium 6082-T6



Abaqus Aluminium 6082-T6

B.1.2 Stål

Edit Material [X]

Name: Material-2-Steel

Description: []

Material Behaviors

- Elastic
- Plastic

General Mechanical Thermal Electrical/Magnetic Other

Elastic

Type: Isotropic [Suboptions]

Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term

No compression

No tension

Data

	Young's Modulus	Poisson's Ratio
1	200000	0.3

OK Cancel

Abaqus Stål

B.2 Interaksjon

B.2.1 Kontakt definisjon

Edit Contact Property [Close]

Name: AluAlu

Contact Property Options

- Tangential Behavior
- Normal Behavior**

Mechanical Thermal Electrical [Edit]

Normal Behavior

Pressure-Overclosure: "Hard" Contact

Constraint enforcement method: Default

Allow separation after contact

OK Cancel

Abaqus kontakt definisjon

B.2.2 Friksjon definisjon

Edit Contact Property [X]

Name: AluAlu

Contact Property Options

- Tangential Behavior
- Normal Behavior

Mechanical Thermal Electrical [Edit]

Tangential Behavior

Friction formulation: Penalty

Friction Shear Stress Elastic Slip

Directionality: Isotropic Anisotropic (Standard only)

Use slip-rate-dependent data

Use contact-pressure-dependent data

Use temperature-dependent data

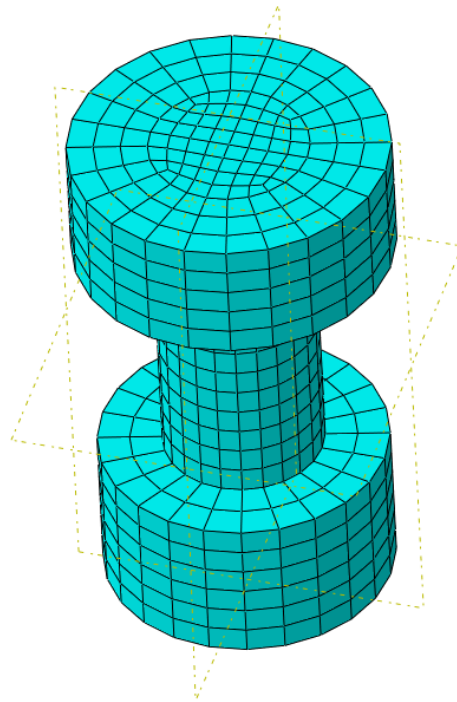
Number of field variables: 0

Friction Coeff
1.05

OK Cancel

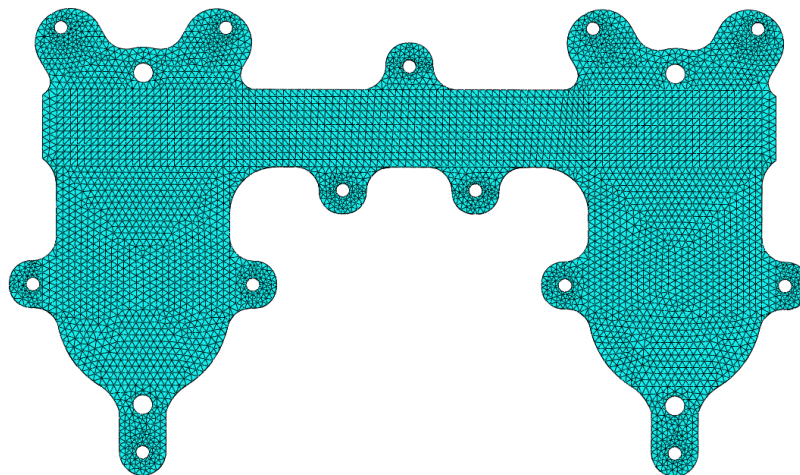
Abaqus friksjon definisjon

B.2.3 Bolt



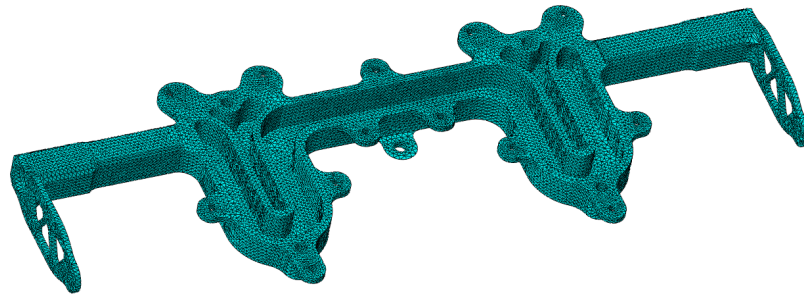
Mesh på bolt

B.2.4 Lokk



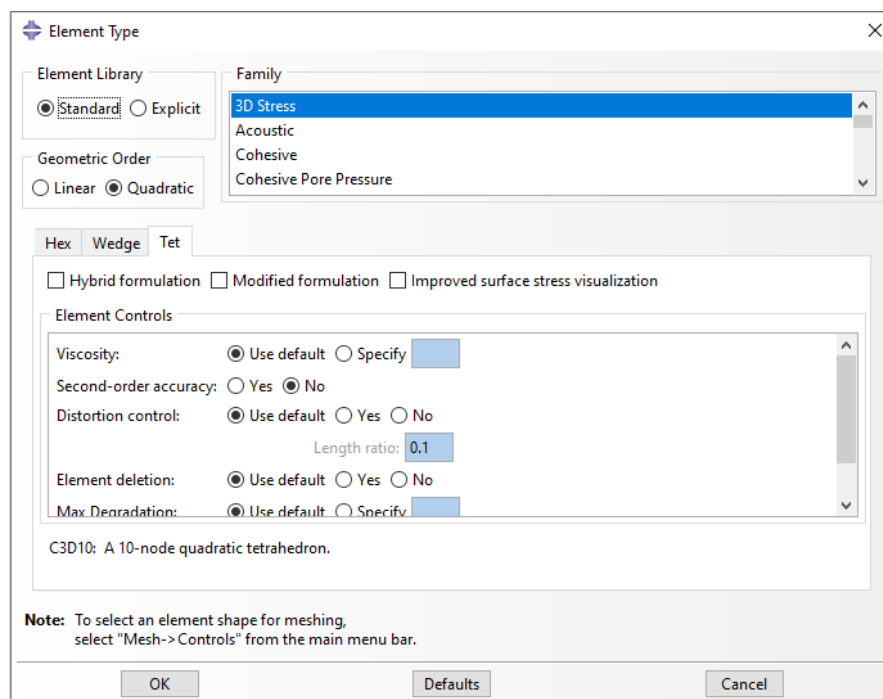
Mesh på Lokket

B.2.5 Bunnpartiet



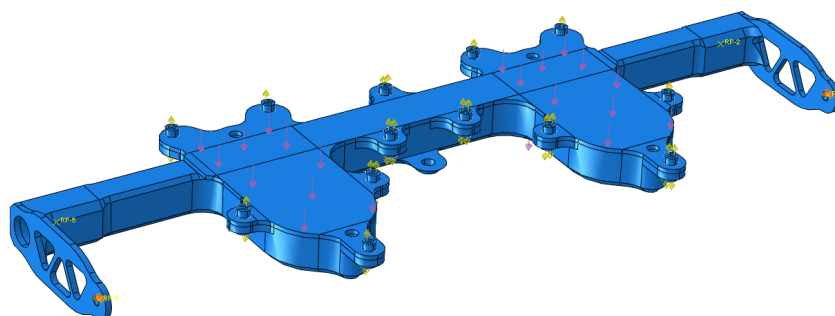
Mesh på Bunnpartiet

B.2.6 Tet-mesh egenskaper



Tet-Mesh egenskaper

B.2.7 Overbilde av krefter og innfestning

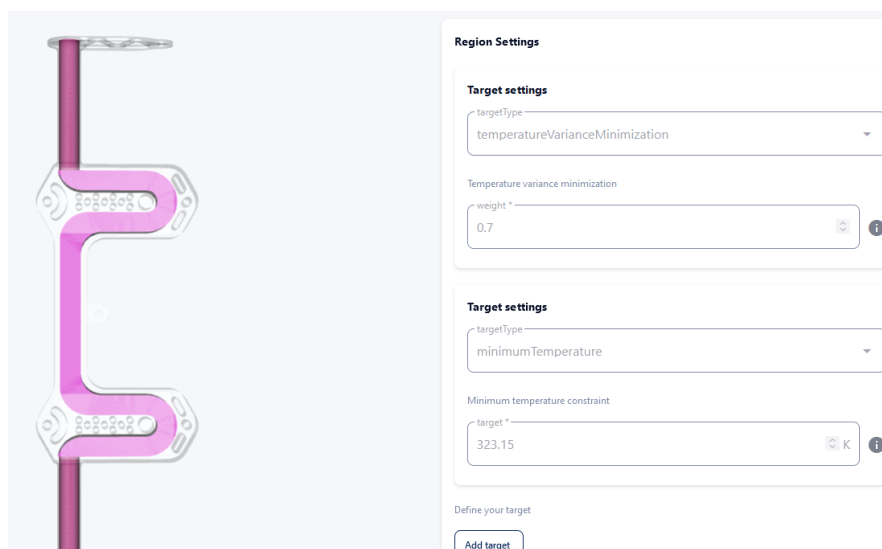


Overbilde av krefter og innfestning

C ColdStream

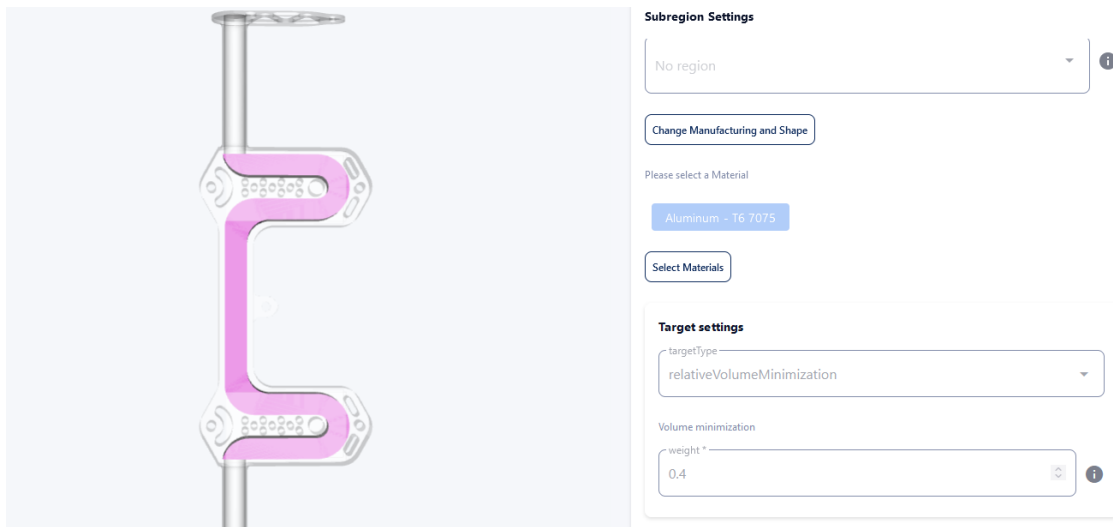
C.1 ColdStream oppsett

C.1.1 Fluid Mål



Mål og egenskaper til fluidet

C.1.2 Design område



Mål og egenskaper for design området

C.1.3 Innløp Egenskaper

Boundary Settings

boundary type *
Fixed Flow Rate Inlet

name *
Inlet

Physical properties

Select type
Mass flow rate

m-dot
0.07 kg/s

T *
327.15 K

Omega
rad/s

Mål og egenskaper for innløpet

C.1.4 Innløp Mål

Target settings

targetType
pressureLoss

Maximum pressure loss constraint

target *
2500 Pa

i

Target settings

targetType
pressureLossMinimization

Pressure loss minimization

weight *
0.8

i

Mål for innløpet

C.1.5 Utløp

Boundary Settings

boundary type *
Pressure Outlet

name *
Outlet

Physical properties

p
40000 Pa 

Target settings

targetType
temperatureSpreadMinimization

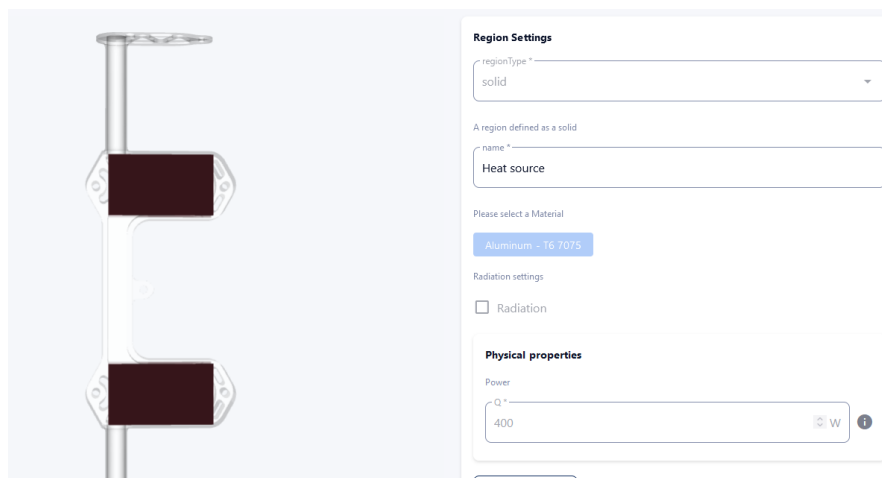
Volume temperature minimization

weight *
0.5 

target *
330 K 

Mål og egenskaper for utløpet

C.1.6 Varmekilde Egenskaper



Mål og egenskaper for Varmekilden

C.1.7 Varmekilde Mål

Target settings

targetType
temperatureMinimization

Volume temperature minimization

weight *
1 ⓘ

Target settings

targetType
maximumTemperature

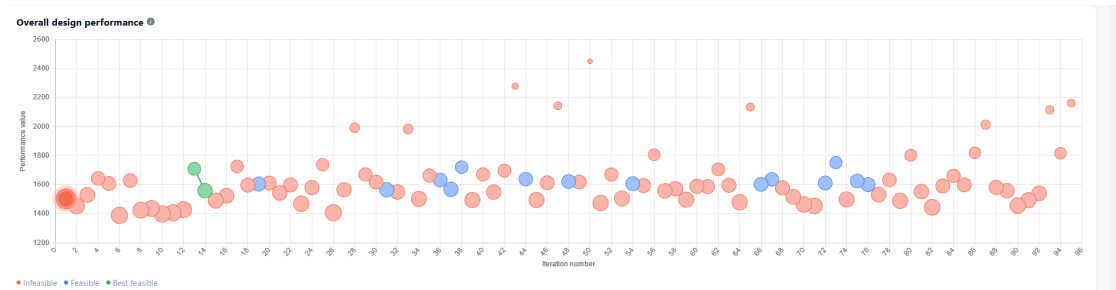
Maximum temperature constraint

target *
353.5 K ⓘ

Mål for Varmekilden

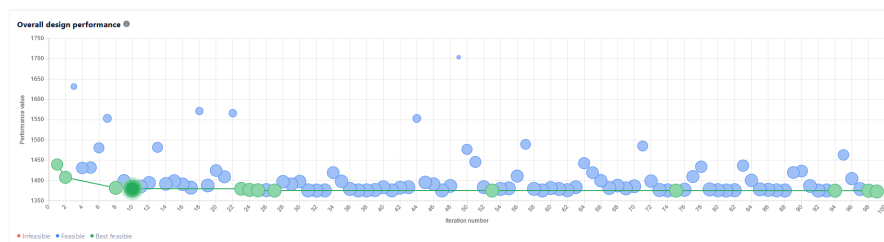
C.2 ColdStream Resultater

C.2.1 Iterasjoner ved streng simulering



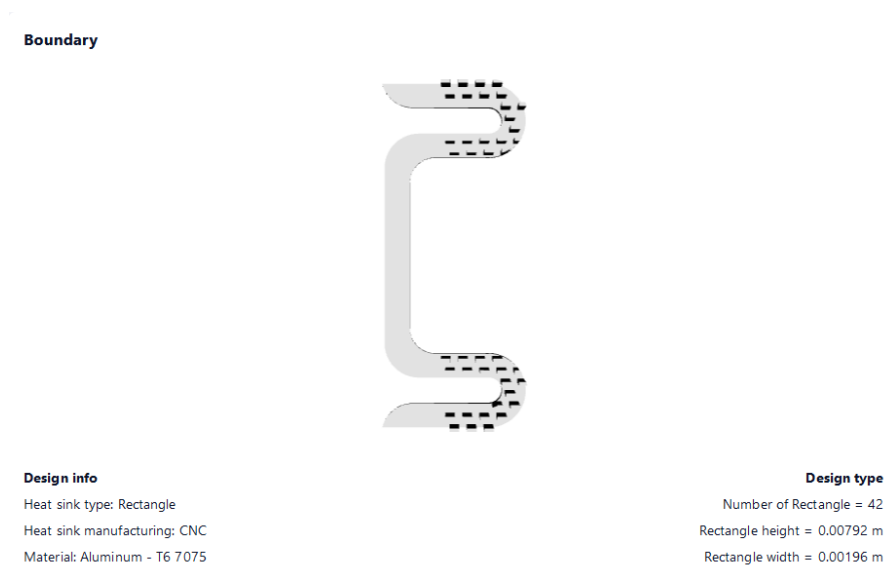
Resultater strenge mål

C.2.2 Iterasjoner ved god simulering



Resultater ved godt definerne mål


C.2.3 Designforslag ved rektangulær iterasjon



Rektangulær iterasjon

C.2.4 Designforslag ved sirkulær iterasjon

Boundary



Design info
Heat sink type: Circle
Heat sink manufacturing: CNC
Material: Aluminum - T6 7075

Design type
Number of Circle = 76
Circle height = 0.00790 m
Circle width = 0.00077 m

Sirkulær iterasjon

C.2.5 Resultat over varmetransport for iterasjonen det er hendvist til i oppgaven

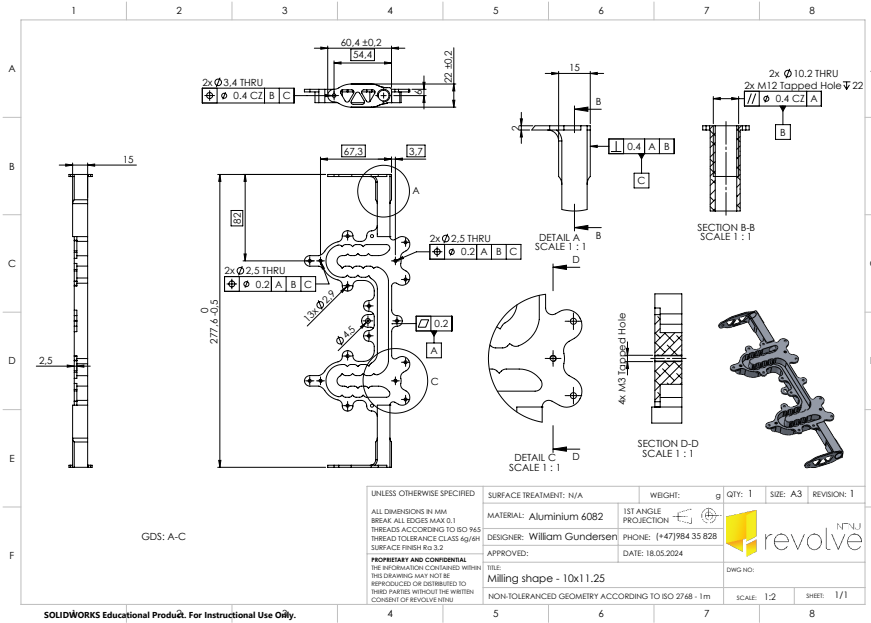
Heating power				W	kW
Region	Subregion	Boundary	Quantity		
Water			Q_source	0.00 W	
		Outlet	Q	-400 W	
		Inlet	Q	0.00 W	
Outer geometry			Q_source	0.00 W	
Heat source			Q_source	400 W	

Sirkulær iterasjon

D Maskintegninger

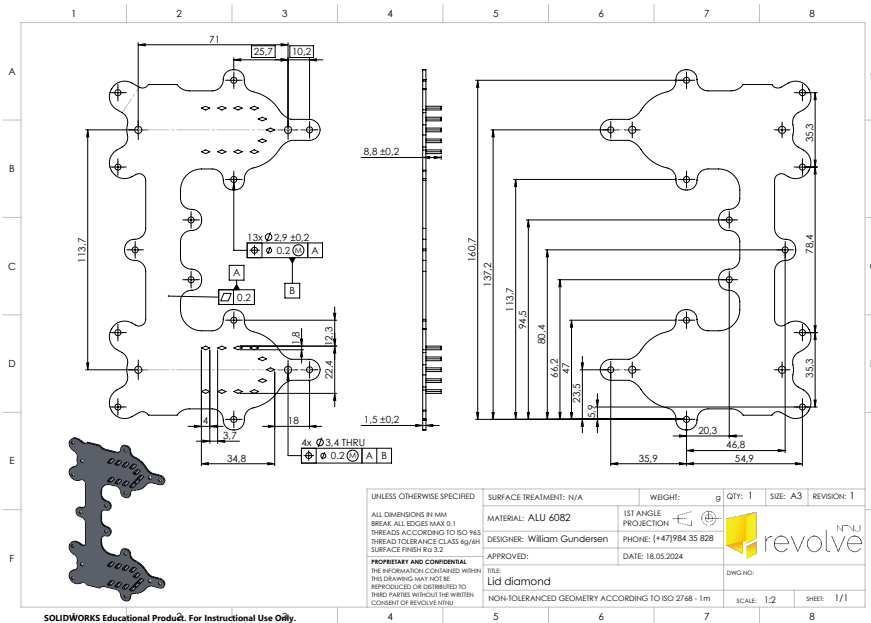
D.1 Maskintegninger

D.1.1 Maskintegning av bunnparti



Maskintegning av bunnpartiet

D.1.2 Maskintegning av Lokket



Maskintegning av Lokket

E Administrativt

E.1 Administrativt

E.1.1 Arbeidsplan

Uke / Dag	Planlagt arbeidstid 1. jan. - 21. mai							Lørdag	Søndag	0
	Mandag	Tirsdag	Onsdag	Torsdag	Freitag	Lørdag	Søndag			
1	x	x	x	x	x	x	x	x	0	
2	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	x	0	
3	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	x	10	
4	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	x	20	
5	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	10	
6	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	x	15	
7	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	0900-1800	0900-1400	x	x	26	
8	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	x	10	
9	x	x	x	x	x	x	x	x	0	
10	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	x	10	
11	x	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	15	
12	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1600	Press	0900-1400	x	x	30	
13					Påske				0	
14	x	x	0900-1400	0900-1400	0900-1400	0900-1400	0900-1400	x	20	
15	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1700	0900-1400	x	41	
16	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1600	0900-1400	x	40	
17	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-1400	0900-1400	65	
18	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-1600	0900-1400	67	
19	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	0900-2000	77	
20	0900-2200	0900-2200	0900-2200	0900-1400	x	1200-2200	0900-2200	0900-2200	67	
21	0900-2300	x	--	--	--	--	--	--	14	
Totall									547	

Planlagt arbeid