



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Masteroppgave 2020 30 stp
Fakultetet for realfag og teknologi

Utvikling av hydraulisk presse for forming av metallplate-materialer

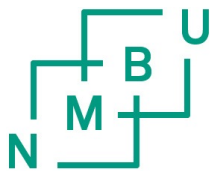
Development of hydraulic press for the forming of
sheet metal-materials

Øyvind Svendsen Søgaard
Maskin, prosess- og produktutvikling

Utvikling av hydraulisk presse for forming av metallplate- materialer

av

Øyvind Svendsen Sjøgaard



Norges miljø- og
biovitenskapelige
universitet

Mastergradsoppgave - Maskin, prosess- og produktutvikling

Fakultetet for realfag og teknologi

Våren 2020

Forord

Dette prosjektet er min avsluttende mastergradsoppgave ved Norges Miljø- og Biovitenskapelige Universitet, ved instituttet for realfag og teknologi. Fra tidligere har jeg en bachelorgrad som maskiningeniør fra OsloMet, og høsten 2018 ble jeg tatt opp til høyere årstrinn for masterprogrammet maskin, prosess- og produktutvikling ved NMBU. Mastergradsoppgaven skrives vårsemesteret 2020 og har et omfang på 30 studiepoeng.

Motivasjonen min for å bli maskiningeniør kom opprinnelig fra min interesse for motorsykler. Det begynte med lettmotorsykkel, deretter road-racing som 17-åring og tunglappen da jeg ble 18 år. Felles for alle motorsyklene jeg har hatt er at jeg har skrudd alle helt fra hverandre for å se hvordan de fungerer og så fjernet ting som gir unødvendig vekt. Vektbesparing ble så morsomt at jeg kjøpte en ramme og motor fra en Honda V-twin for å bygge en racing-sykkel fra bunnen.


Masterprosjektet stammer fra hovedfaget TIP300 hvor jeg utredet et tidlig idégrunnlag for å presse metallplater ved bruk av hydrostatisk trykk. Pressen er tenkt å kunne forme f.eks. bensintanker og dermed kan jeg kombinere universitetsutdannelsen med interessen for å bygge motorsykler. Prosjektet er en produktutviklingsoppgave hvor det er fokus på teori, praksis, sikkerhet og funksjonelle løsninger.

Masteroppgaven har vært veldig spennende og lærerik, og jeg ønsker å takke min veileder, førsteamanuensis Jan Kåre Bøe, for god prosjektveiledning og oppfølging gjennom hele masterprosjektet. Jeg setter pris på friheten og tilliten jeg fikk til å utvikle min egen idé.

Jeg vil også takke overingeniør Henrik Folke Holmberg for innspill til design og sikkerhet, senioringeniør Egil Stemsrud for hjelp med FEM-analyser, og overingeniør Øyvind Hansen for hjelp med design og planlegging av fremtidig produksjon.

Til sist vil jeg takke min samboer Elisabeth Svennevik som har støttet meg gjennom hele prosjektet.

Oslo 01.06.2020



Øyvind Svendsen Søgaard

Sammendrag

I dagens moderne samfunn er uendelig mange hverdagslige ting lagd av metallplater; Bilkarosserier, flykropp- og vinger, bensintanker, brusbokser, telefondeksler og mange andre objekter. Metallplatene fremstilles ved valsing av formbare metaller, ved støping, eller ved pressing og sintring. Metallplater kan kuttes og bøyes til mange former, men når formene blir kompliserte er arbeidsprosessen både vanskelig, tidkrevende og dyr. En formingsprosess som er idéel for kompliserte former er hydroforming; Her vil et hydrostatisk trykk presse og forme metallplaten mot en matrise.

Hydroformingsmaskiner er store og dyre, og er derfor lite tilgjengelig for mindre bedrifter og privatpersoner som driver med forming av metallplater. I hovedfaget TIP300 designet jeg en bensintank som var egnet til å produseres med hydroforming, og med bakgrunn i dette var det ønskelig å utvikle en liten og rimelig hydroformingsmaskin. Dette ledet til hovedmålet i denne oppgaven som er; ”Å utrede, utvikle og designe en hydraulisk presse som former metallplate-materialer ved væsketrykk. Konseptet skal gjøre hydroforming av metallplate-materialer lettere tilgjengelig for små bedrifter og privatpersoner. Videre å dokumentere utviklingsprosessen med tekniske anvisninger for tilvirkning og evt. rettighetsbeskyttelse”.

For å nå hovedmålet ble det laget et prosessdiagram hvor prosjektet deles inn i utviklings-trinn og aktiviteter. Prosjektet kan deles inn i fire faser; Utredningsfasen, utviklingsfasen, konstruksjon- og designfasen, og realiseringsfasen.

I utredningsfasen ble det formulert en oppdragsbeskrivelse, samt problemstillinger som måtte løses og teknologiske flaskehalsen som måtte overkommes. Deretter ble oppgavens hovedmål formulert, etterfulgt av delmål med underordnede aktiviteter. For å sikre stødig fremgang i prosjektet ble det utarbeidet en prosjektplan med en oversikt over aktiviteter, tid til rådighet, og milepæler. Videre ble produktutviklingsmetoder som IPD, Pughs metodikk, SCAMPER og QFD beskrevet og brukt som fremgangsmetoder i prosjektet. IPD metodikken har som hensikt å påse at utviklingsprosessen blir gjort i riktig rekkefølge og at ting ikke blir glemt underveis. Idémyldringsverktøyet SCAMPER ble hovedsakelig brukt under konseptgenereringen for å sette ting i nytt perspektiv og for å komme opp med nye løsninger. Pughs metodikk ble brukt til å utvikle seleksjonsmatriser for å utføre en egenscreening av foretrukne løsningsalternativer. Etter metodikken ble det listet hvilke løsningsverktøy som ble brukt under prosjektet og hvordan innholdet i prosjektet skulle kvalitetssikres. Videre ble det gjort en teknologitredning hvor det vises og forklares fem hydroformingsprosesser for å forme metallplater. Til slutt i utredningsfasen ble det gjennomført en teoriutredning med nødvendig teori for å danne grunnlaget for senere beregninger og dimensjonering.

I utviklingsfasen ble det utredet for to størrelser av hydroformingsmaskinen: En fremtidig fullskala prototype som er tenkt å kunne forme deler til motorsykler, samt en mindre forsøksmodell som skal teste og verifisere konseptet. Videre analyser, beregninger og dimensjoneringer i oppgaven ble gjort med hensyn på forsøksmodellen.

I starten av utviklingsfasen ble det gjennomført en produktspesifisering hvor produktmålet og viktige produkttegenskaper ble formulert. Deretter ble det utredet grensespesifikasjoner for fullskalaprototypen ved å gjennomføre en analyse av størrelsen på chassisdeler til ut-

valgte motorsykler. Basert på grensespesifikasjonene ble det gjort en metrisk grovspefisering for prototypen, mens størrelsen på forsøksmodellen ble bestemt av hvilke materialer som var tilgjengelig på NMBUs verksted. For å sikre at produktet oppfyller alle kritiske funksjoner ble det gjennomført en funksjonsanalyse. I analysen ble det utviklet flere løsningsalternativer for hver funksjon, hvor løsningsalternativene senere ble vurdert, vektet og valgt uavhengig av hverandre. De valgte løsningsalternativene ble så satt sammen til et endelig konseptvalg. For å kvalitetssikre konseptet ble det gjennomført en eksperundersøkelse i form av et spørreskjema hvor ekspertene kunne gi tilbakemeldinger på utvalgte løsninger. Til slutt i utviklingsfasen ble det utarbeidet en plan for tidlige forsøk, hvor det gjøres rede for forsøksmål for å kunne teste om konseptet fungerer.

I konstruksjon- og designfasen ble det utført beregninger med en sikkerhetsfaktor mot flyt, med påfølgende dimensjonering av produktets elementer og komponenter. Deretter ble produktet 3D modellert i Solidworks og det ble lagd en sammenstillingstegning som viser alle komponenter og standarddeler. Til slutt ble det utført FEM-analyser av hovedelementene for å verifisere beregningene og for å avdekke svakheter.

I realiseringsfasen ble det gjort rede for produksjonsmetoder samt kostnadskalkyler for forsøksmodellen og fullskalaprototypen. Dette blir etterfulgt av en markedspresentasjon hvor det vises renderte bilder av begge modellene. Til slutt ble det lagd tekniske tegninger og anvisninger for å kunne produsere forsøksmodellen.

Resultatet av prosjektet ble et konseptforslag for en hydraulisk presse som former metallplater med et hydrostatisk væsketrykk. Konstruksjonen består av to hovedelementer; et trykkammer og et lokk. I lokket er det integrert en membran som fylles med fett, og ved hjelp av en fettpresse bygges det opp et trykk som gjør at membranen ekspanderer og former metallplater mot en matrise. Både lokk og trykkammer er sylindrisk utformet med utvendig diameter på 200mm, innvendig diameter på 120mm og konstruksjonens totale høyde er på 177mm. For å koble sammen lokk og trykkammer vil det brukes 10 stk. M16 skruer, og i bunnen og siden av trykkammeret bores det dreneringskanaler som skal drenere luft og eventuelle lekkasjer. Lokk og trykkammer vil produseres i S355 konstruksjonsstål og konstruksjonens samlede vekt er på ca. 27,6kg, hvor lokket utgjør 12,4kg. Totalkostnaden for en forsøksmodell er på ca. 646000 NOK, hvor ca. 77% av dette går til utviklingskostnadene.

Videre arbeid vil bestå i å finne løsninger for produksjon av membranen, og å gjennomføre søk på nett for å se om det finnes standardmembraner som kan brukes. Deretter bør det gjennomføres grundigere FEM-analyser, samt ta kontakt med verkstedet ved NMBU for å optimalisere konstruksjonen før produksjon. Til slutt skal det gjennomføres forsøk for å teste om konseptet fungerer. Hvis konseptet fungerer skal det arbeides videre med fullskalaprototypen.

Abstract

In today's modern society, endless objects are made of sheet metal; car bodies, fuselage- and wings, fuel tanks, soda cans, phone covers, etc. The sheet metal is made by rolling moldable metals, by casting, or by pressing and sintering. Sheet metal can be cut and bent to many shapes, but when the shapes get complicated, the work process is both difficult, time-consuming and expensive. One forming process which is ideal for creating complicated shapes is hydroforming; here, a hydrostatic pressure will press and shape the sheet metal against a die matrix.

Hydroforming machines are large and expensive, and are therefore not readily available to smaller companies and private individuals engaged in sheet metal forming. In the major subject TIP300, I designed a fuel tank that could be produced by hydroforming, and based on this it was desirable to develop a small and affordable hydroforming machine. This led to the main goal of this thesis; "To study, develop and design a hydraulic press that shapes sheet metals with a fluid pressure. The concept aims to make hydroforming of sheet metal more easily accessible to small businesses and individuals. Further to document the development process with technical instructions for manufacturing, and any possible copyright protection."

In order to reach the main goal, a process diagram was created where the project was divided into development steps and activities. The project can be divided into four phases; The investigation phase, the development phase, the construction- and design phase, and the realization phase.

In the investigation phase, a job description was formulated, as well as issues that had to be solved and technological bottlenecks that had to be overcome. Then, the main objective of the task was formulated, followed by sub-goals with subordinate activities. In order to ensure steady progress in the project, a project plan was prepared with an overview of activities, time available, and milestones. Furthermore, product development methods such as IPD, Pugh's methodology, SCAMPER and QFD were described and used as methodologies in the project. The IPD methodology aims to ensure that the development process is done in the right order and that things are not forgotten along the way. The brainstorming tool SCAMPER was mainly used during the concept generation to put things in a new perspective and to come up with new solutions. Pugh's methodology was used to develop selection matrices for selecting preferred solution alternatives. After the methodology, software and tools used during the project were listed, along with a specification on how the project was to be quality assured. Furthermore, a technology study was conducted in which five hydroforming processes are shown and explained. At the end of the investigation phase, a theory study was conducted with the necessary theory to form the basis for later calculations and dimensioning.

During the development phase, two sizes of the hydroforming machine were investigated: a future full-scale prototype that is intended to be able to form parts for motorcycles, as well as a smaller experimental model to test and verify the concept. Further analyzes, calculations and dimensions of the thesis were made with regard to the experimental model.

At the beginning of the development phase, a product specification was carried out in which the objectives for the product and the main product characteristics were formu-

lated. Next, boundary specifications for the full-scale prototype were investigated by conducting an analysis of the size of chassis parts for selected motorcycles. Based on the boundary specifications, a rough specification was made for the prototype, while the size of the experimental model was determined by the materials available at NMBU's workshop. To ensure that the product fulfills all critical functions, an analysis of functions was performed. In the analysis, several solutions were developed for each function, where the solutions were later evaluated and selected independently of each other. The selected solutions were then assembled for a final concept solution. In order to ensure the quality of the concept, an expert survey was conducted in the form of a questionnaire in which the experts could provide feedback on selected solutions. At the end of the development phase, a plan for early trials was made, explaining experimental objectives in order to test whether the concept works or not.

During the construction- and design phase, calculations were performed with a safety factor against yield, with subsequent dimensioning of the product elements and components. Then, the product was 3D modeled in Solidworks and an assembly drawing was made showing all components and standard parts. Finally, FEM analyzes of the main elements were performed to verify the calculations and to detect weaknesses.

The result of the project was a concept for a hydraulic press that forms sheet metal with a hydrostatic fluid pressure. The construction consists of two main elements; a pressure chamber and a lid. In the lid, a membrane is filled with grease, and with the help of a grease gun a pressure is built up which causes the membrane to expand and press the sheet metal against a die matrix. Both the lid and pressure chamber are cylindrically designed with an outside diameter of 200mm, an inside diameter of 120mm and the overall height of the structure is 177mm. To connect the lid and pressure chamber, 10 M16 screws will be used, and drainage ducts are drilled in the bottom and side of the pressure chamber to drain air and any leaks. The lid and pressure chamber will be manufactured in S355 structural steel and the total weight of the structure is approximately 27,6kg where the lid weighs 12,4kg. The total cost of an experimental model is approximately 646000 NOK, where approximately 77% of this goes to development costs.

Further work will include finding solutions for membrane production, and conducting online research to see if standard membranes can be used. Then, more thorough FEM-analyzes should be conducted, as well as contact the workshop at NMBU to optimize the design before production. Finally, tests will be conducted to test whether the concept works. If the concept works, work on the full-scale prototype will continue.

Begreper

Tabell 1 Begreper og forkortelser brukt i oppgaven.

Generelle begreper	Beskrivelse
IPD	Integrated Product Development, fremgangsmetode
Pugh	Fremgangsmetode, utvelgelsesmetodikk
SCAMPER	Kreativ teknikk, huskeliste
QFD	Quality Function Deployment, metodikk
NMBU	Norges Miljø- og biovitenskapelige universitet
FEM	Finite Element Method, elementmetoden
EAA	Experimental Aircraft Association, flyorganisasjon
CNC	Computer Numerical Control, databasert maskinering
CAD	Computer Aided Design, dataassistert design
CAE	Computer Aided Engineering, dataassistert konstruksjon
FTO	Freedom to Operate, fri fra juridiske forpliktelser
WIPO	World Intellectual Property Organization, verdensomspennende patentorganisasjon
EPO	European Patent Office, Europeisk patentkontor
NS	Norsk Standard, standarder utgitt av Standard Norge
ASME	American Society of Mechanical Engineers
EU	Europeiske Union
CE	Communauté Européenne, produktmerking
SI-enhet	Internasjonalt system for måling av fysiske enheter
SSB	Statistisk SentralByrå, Norges statistiske byrå
Spesifikke begreper	Beskrivelse
Trykkammer	Produktets hoveddel som inneholder matrisen og metallplaten
Lokk	Inneholder membranen og forseglar trykkammeret
Membran	Skiller hydraulikkvæsken fra metallplaten
Matrise	Form som metallplaten formes etter
Trykktilførsel	Komponent som fører hydraulikkvæske inn i membranen
Forkortelser	Beskrivelse
F.eks	For eksempel
Pga.	På grunn av
f.Kr.	Før Kristus
Mv.	Med videre
Evt.	Eventuelt

Innhold

Forord	iii
Sammendrag	iv
Abstract	vi
Begreper og definisjoner	viii
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn	1
1.2 Mennesket, metaller og forming av metallplater	1
1.3 Konseptbeskrivelse	5
1.4 Produktets plassering i markedet	7
1.5 Oppdragsbeskrivelse	8
1.6 Problemstillinger og teknologiske flaskehalsar	8
1.6.1 Problemstillinger og fokuspunkter	8
1.6.2 Teknologiske flaskehalsar	9
2 Prosjektplanlegging	10
2.1 Prosjektmalsettingar	10
2.1.1 Hovedmal	10
2.1.2 Delmal	10
2.2 Tids- og arbeidsplan med milepaer	11
2.3 Tidlige begrensningar for arbeidet	12
3 Metodebeskrivelse	13
3.1 Terminologi	13
3.2 Metodebruk	23
3.3 Modularisering	27
3.4 Løsningsverktøy	27
3.5 FEM-analyse	28
3.6 Litteraturstudie	28
3.7 Kildesøk	28
3.7.1 Søk etter konkurrerende løsningar	28
3.7.2 Søk etter eksisterende patenter	29
3.8 Kvalitetssikring	30
3.9 Prosesstrinn	30
4 Teknologiutredning	32
4.1 Metallplate-hydroforming	32
4.2 Hydroforming med en gummimembran	32
4.3 Hydromekanisk dyp-trekking	33
4.4 Hydraulisk strekking	34
4.5 Kombinert dyp-trekking og strekking	34
4.6 Dobbelt-plate hydroforming	35

5	Teoriutredning	36
5.1	Forskrift om trykkpåkjent utstyr	36
5.2	Standarder	36
5.3	Hydroforming av metallplater	37
5.4	Materialer passende til hydroforming	37
5.5	Hydraulikk	41
5.5.1	Hydrostatikk	42
5.5.2	Hydraulikkvæsker	42
5.6	Trykkbeholdere	44
5.6.1	Tynnvegget sylinder	44
5.6.2	Tykkvegget sylinder	45
5.6.3	Estimering av tykkelse for rundt flatt lokk	47
5.6.4	Estimering av tykkelse for firkantet flatt lokk	49
5.6.5	Svikt i trykkbeholdere	51
5.7	Skruer	52
5.7.1	Skruens mekanikk	53
5.7.2	Forspenning av skruer	55
5.7.3	Dynamisk belastning	59
5.7.4	Dimensjonering av skruer under strekk	60
5.7.5	Nødvendig inngrepslengde	61
5.8	Pakningsteori	62
5.8.1	Flate pakninger	62
5.8.2	O-ringer	63
5.9	Diverse formler	65
6	Produktspesifisering	67
6.1	Produktmålsetting	67
6.2	Rangering av viktige produkttegenskaper	67
6.3	Metriske grensespesifikasjoner, variasjonsbredde	68
6.4	Metriske grovspefiseringer for produkttypen	71
6.4.1	Metriske grovspefiseringer for fullskala prototype	71
6.4.2	Metriske grovspefiseringer for forsøksmodell	71
7	Konseptgenerering	72
7.1	Funksjonsanalyse for produkttypen	72
7.2	Funksjonsalternativer med skisser	73
7.2.1	Løsninger for lokk og trykkammer	73
7.2.2	Løsninger for trykktilførsel	74
7.2.3	Løsninger for å fjerne luft fra trykkammeret	75
7.2.4	Løsninger for sammenkobling	75
7.2.5	Løsninger for forsegling mellom lokk og trykkammer	76
7.2.6	Løsninger for forsegling mellom over- og underside av plate	77
7.2.7	Løsninger for å overvåke trykk	78
7.3	Tidligvurderinger av brukspåkjenninger	78
7.4	Tidlig materialdrøfting	80

8	Egenscreening og konseptvalg	82
8.1	Utvikling av seleksjonsmatrise	82
8.2	Egen konseptscreening	82
8.3	Foretrukne løsnings- og estetikkalternativer	85
8.4	Utvidede funksjonsalternativer for membranen	87
9	Ekstern konsepttesting	90
9.1	Målsettinger for testingen	90
9.2	Valg av testpopulasjon	90
9.3	Innhold og form på testskjemaer, kommunikasjonsform	90
9.4	Resultater og resultattolkning	91
10	Dimensjonering	93
10.1	Beregningsplan og forutsetninger	93
10.2	Beregning av sylinder	94
10.3	Beregning av bunn og lokk	95
10.4	Skrueberegninger	95
10.5	Membran	98
10.6	Trykktilførselen	98
10.7	O-ringer	101
10.7.1	O-ring mellom lokk og trykkammer	101
10.7.2	O-ring mellom trykktilførsel og lokk	102
11	Planlegging av tidlige forsøk	104
11.1	Forsøksmål	104
11.2	Testing av sikkerhet	104
11.3	Testing av membran	104
11.4	Testing av metallplate-pressing	105
12	Produktarkitektur og konseptdesign	106
12.1	Sammenstilling	106
12.2	Design av hovedelementer	111
12.3	Design av komponenter	111
12.4	Modularisering og standardkomponenter	112
13	Robusthet, vedlikehold og resirkulering	113
13.1	Styrkeberegninger med FEM	113
13.1.1	Oppsett av FEM-simulering	113
13.1.2	Resultater av FEM-simulering	115
13.2	Materialegenskaper, overflatebehandling og vedlikehold	119
13.3	Miljøkrav og resirkulering	121
13.3.1	Resirkulering	121
13.3.2	Livsløpsanalyse	122
14	Framstilling og produksjonskostnader	124
14.1	Produksjonsmetoder	124
14.2	Kostnadskalkyle for forsøksmodell	125
14.3	Kostnadskalkyle for fullskala prototype	126
14.4	Resultater fra kostnadsanalyser	127

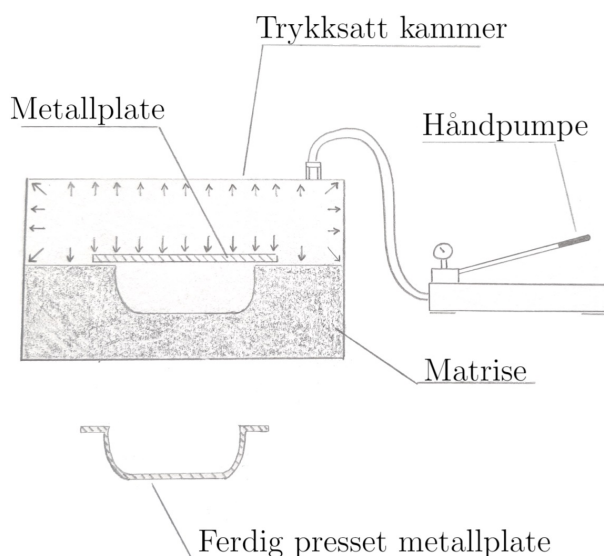
14.5 Konkurrentanalyse	128
15 Markedspresentasjon	129
15.1 Renderte fremstillinger	129
15.1.1 Forsøksmodell	129
15.1.2 Fremtidig prototype	131
15.2 Transportemballasje	133
15.3 Tekniske beskrivelser	134
16 Prosessevaluering og diskusjon	137
16.1 Konseptutviklingsarbeid, forbedringspotensialer	137
16.2 Designrevisjon, produksjon, kostnadsreduksjon	138
17 Konklusjon	140
17.1 Resultater og anbefalinger	140
17.2 Videre arbeid	141
18 Referanser	143
19 Vedlegg	145

1 Innledning

For å vise prosjektets hensikt redegjøres det for bakgrunn og konseptbeskrivelse. Med en oppdragsbeskrivelse forklares målet med prosjektet, etterfulgt av problemstillinger som må løses og teknologiske flaskehalsen som må overkommes.

1.1 Bakgrunn

Bakgrunnen for dette masterprosjektet har sitt utgangspunkt i hovedfaget TIP300 der jeg utredet et tidlig idégrunnlag for en presse som former metallplate-materialer ved bruk av hydrostatisk trykk. Dette masterarbeidet fokuserer på å utvikle denne konseptidéen videre med et trykkammer hvor et hydrostatisk trykk former metallplater etter en utskiftbar matrise. Med et slikt verktøy kan man presse metallplater nøyaktig, raskt og kostnadseffektivt. I figur 1.1 vises en skisse av pressen slik jeg så det for meg i faget TIP300.



Figur 1.1: Skisse av tidlig idégrunnlag for å forme metallplater med hydrostatisk trykk. I figuren vises et trykkammer som blir trykksatt av en hydraulisk pumpe. Inne i trykkammeret blir en metallplate formet etter en matrise pga. det hydrostatiske trykket. [42]

1.2 Mennesket, metaller og forming av metallplater

Den forhistoriske verden gikk fra steinalderen, gjennom bronse- og jernalderen, for å komme til dagens moderne samfunn, et samfunn som er eksistensielt avhengig av metaller og legeringer. Det tidlige mennesket oppdaget kobber ca. 9000 f.Kr., og i årtusenene som fulgte utviklet den metallurgiske kunnskapen seg fra en kunst til vitenskap. De seks metallene gull, sølv, kobber, tinn, bly og jern ble brukt av det forhistoriske mennesket. Gull og sølv er så mykt at det kun egnet seg som dekorasjon, mens kobber kunne smis til verktøy.

De fleste metaller forekommer som mineraler som har reagert med andre metaller eller med ikke metalliske atomer, og de få metallene som ikke har reagert med andre stoffer

kalles naturlige metaller. Små klumper av disse naturlige metallene ble smidd til verktøy og dekorasjoner. Ca. 4000 – 3000 f.Kr. ble det oppdaget at kobber kunne utvinnes ved å varme opp covellin eller malakitt.

Ved å blande kobber med tinn utviklet mennesket bronse, en legering som kunne støpes, smis og brukes til både verktøy og våpen. Utviklingen av bronse førte mennesket inn i bronsealderen som fant sted ca. 3000 – 1500 f.Kr.

De eldste smidde jerngjenstandene man kjenner til er fra 3000 – 2700 f.Kr., funnet i Tell Asmar i Mesopotamia (i det nåværende Irak) [23]. Selv om det tidlige mennesket begynte å bruke jern allerede i starten av bronsealderen så regnes ikke jernalderen for å ha startet før ca. 1500 f.Kr. Varigheten av jernalderen varierer avhengig av regionen som vurderes og jernalderen begynner lokalt når det blir utbredt med verktøy og våpen som er overlegne deres bronseekvivalenter.

Med verktøy lagd av jern var det mulig å øke effektiviteten i de fleste grener av næringslivet, slik som jordbruket. Alt i tidlig jernalder fikk for eksempel jordbruksredskaper som ljà, sigd og løvkniv den formen som de har hatt helt opp til den industrielle tidsalder.

Gode våpen gav makt. Ved å varme jern i et rødglødende kull-bål over en lengre periode vil karbonatomer diffusere inn i jernet, og man får stål. Den keltiske invasjonen av Italia i 223 f.Kr. var mislykket delvis på grunn av den dårlige kvaliteten på keltiske våpen [38]. Romerne hadde våpen lagd av stål, mens kelterne hadde våpen lagd av jern. Kelternes jernvåpen ble bøyd mot romernes stålvåpen og måtte rettes ut etter å ha fått et slag. De som hadde kunnskap og tilgang til stål var derfor overlegne og stålet var med på å forme nasjoner.

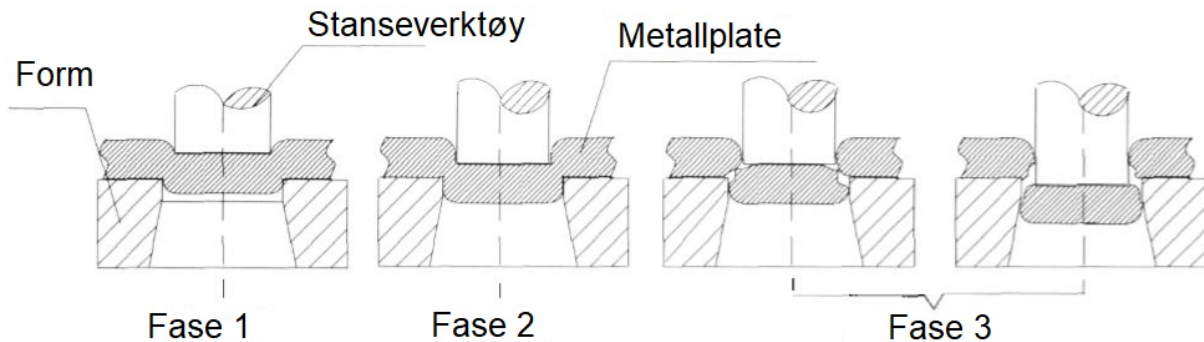
Det skulle gå helt til 17- og 1800-tallet før man oppdaget mange av de viktige moderne metallene som krom, molybdenum, vanadium, tungsten, magnesium, titan og aluminium.

Forming av metaller til metallplater begynte allerede i forhistorisk tid ved at man banket duktile materialer som gull og sølv til plater. Platene ble brukt til utsmykninger, men kunne også brukes til å kle treverk for å lage skjold eller andre typer rustninger. Vendepunktet i plateproduksjon kom ikke før sent på 1400-tallet da Leonardo Da Vinci tegnet ned en idé om et valseverk. Valseverket bestod av to parallelle valser som modifiserte tykkelsen til metallet. Om dette valseverket noen gang ble bygd er ikke sikkert. Det første industrielle valseverket var i bruk i 1615 [26] og det valset bly- og tinn plater.

I dagens moderne samfunn er uendelig mange hverdagslige ting lagd av metallplater; Bilkarosserier, flykropp- og vinger, bensintanker, brusbokser, telefondeksler og mange andre objekter. Metallplater kan lages ved valsing av formbare metaller, ved støping eller ved pressing og sintring av spesielle materialer (for eksempel hardmetall eller støpejern). Tradisjonelt skjelner man mellom følgende typer: grovplater (over 5mm tykkelse), mellomplater (5-3mm tykkelse), tynnplater (3-0,5mm tykkelse) og blikk (under 0,5mm tykkelse).

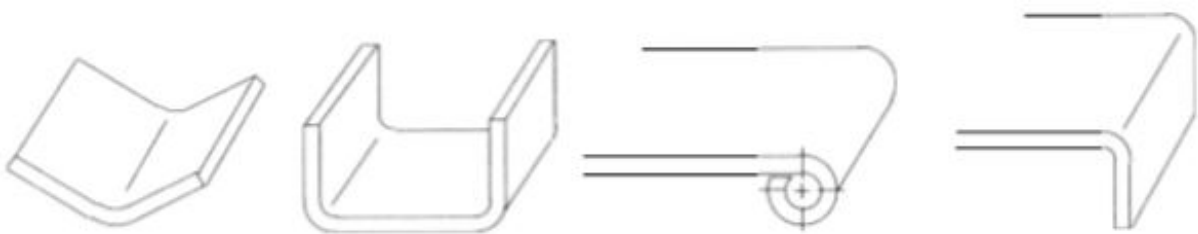
Forming av metallplater kan gjøres ved metoder som, men ikke begrenset til, stansing, klipping, bøyning, dyp-strekking og hydroforming.

Stansing er en prosess som kutter metallplater ved bruk av et stanseverktøy og en form. Stanseprosessen kan deles inn i tre faser: I fase 1 er metallplaten lett deformert og fastklemt mellom stanseverktøyet og formen. Spenningene i materialet overstiger ikke den elastiske grensen og denne fasen blir kalt den elastiske fasen. I fase 2 dytter stanseverktøyet metallplaten videre ned i formen. Denne fasen blir kalt den plastiske fasen siden materialet har oversteget den elastiske grensen. I fase 3 er spenningsene så høye at det blir brudd i materialet og delene skilles. I figur 1.2 vises de tre fasene i prosessen.



Figur 1.2: De tre fasene i stanseprosessen vises fra venstre til høyre. I figuren kan man gradvis se hvordan stanseverktøyet stempler ut en del av metallplaten ved hjelp av formen som ligger under platen. [4]

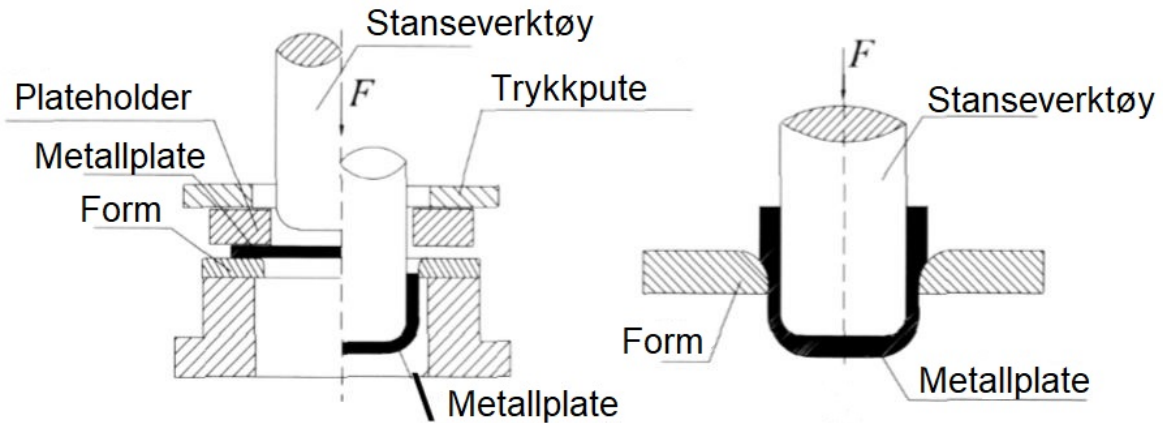
Bøying er en av de mest brukte plateformingsprosessene. Ved å bøye metallplaten over en akse får materialet en plastisk deformasjon og platen endrer geometri. I tillegg til å gi ønsket geometri brukes også bøying til å øke styrke og stivhet til metallplater, til å endre en dels treghetsmoment, eller for å fjerne skarpe kanter. I figur 1.3 vises profiler som er lagd ved bøying.



Figur 1.3: Eksempler på former lagd med bøying. [4]

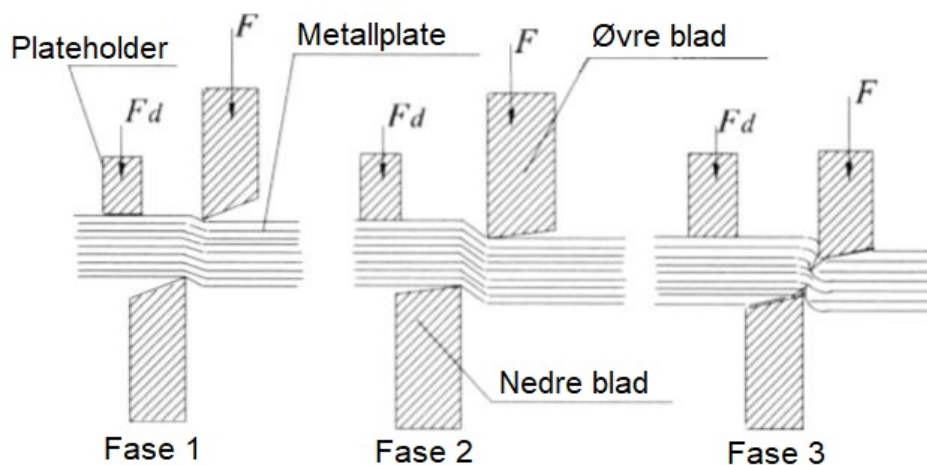
Dyp-strekking er en prosess hvor metallplater blir presset inn i en form ved hjelp av et stanseverktøy. Prosessen er rask og man kan produsere monteringsklare deler med få operasjoner og minimalt med svinn. I figur 1.4 vises to dyp-strekking prosesser:

- Materialtykkelsen endrer seg ikke (ren strekking).
- Materialtykkelsen reduseres (stryking).



Figur 1.4: Til venstre vises prosessen med ren strekking der materialtykkelsen ikke endrer seg. Til høyre vises prosessen med stryking. Her er stanseverktøyet oppvarmet og materialtykkelsen reduseres ettersom platen blir formet etter formen. [4]

Klipping er en prosess hvor metallplaten blir holdt i ro og kuttet med kraften fra et øvre blad mot et stasjonært nedre blad. Klippeprosessen kan deles i tre faser: I fase 1 er spenningen i materialet påført av bladet lavere enn flytegrensen, og fasen blir kalt den elastiske fasen. I fase 2 er spenningen i materialet høyere enn flytegrensen, men lavere enn bruddgrensen. Denne fasen blir kalt den plastiske fasen. I fase 3 er spenningen i materialet lik skjærfastheten og det oppstår brudd. I figur 1.5 vises de tre fasene.

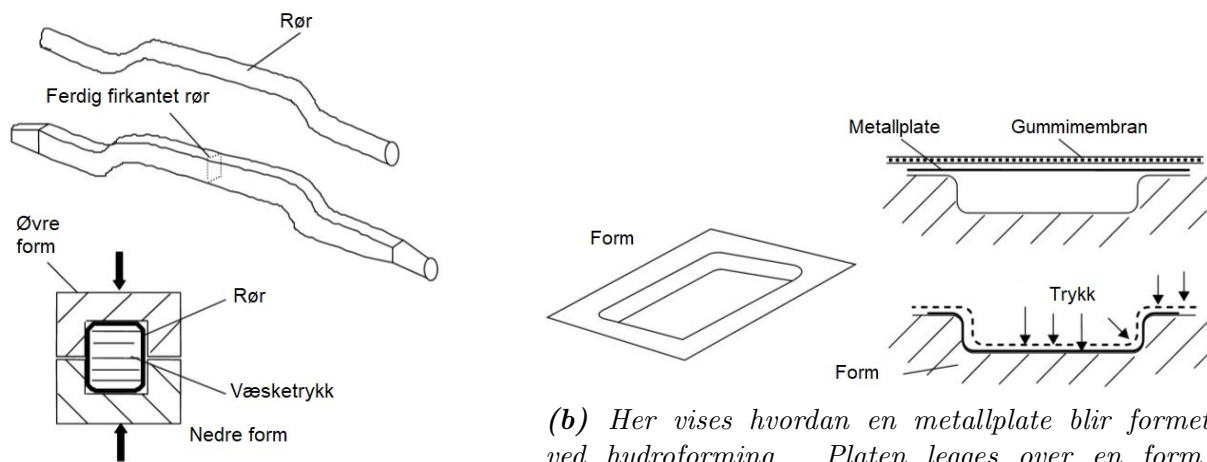


Figur 1.5: Til venstre i figuren vises fase 1 hvor elastisk deformasjon forekommer. I fase 2 er det plastisk deformasjon og i fase 3 oppstår brudd i metallplaten. F er kraft på øvre blad og F_d er kraft for å holde fast metallplaten. [4]

Hydroforming er en prosess hvor duktile metallemmner blir formet mot en form ved væsketrykk. Metallemmene kan være både plater og rør. Hvis emnene er rør blir prosessen kalt *rør-hydroforming*, mens prosessen med plater blir kalt *metallplate-hydroforming*. I begge disse prosessene trengs en form, en hydraulisk presse og et kammer for intensivering av væsketrykk.

Rør-hydroformingsprosessen egner seg for masseproduksjon. De formede delene har bedre vekt-til-styrke forhold og lavere kostnader sammenlignet med konvensjonelle pressede og sveiste konstruksjoner, noe som har gjort prosessen populær i bilindustrien. Prosessen gjennomføres ved at røremnet legges i den nedre delen av formen, så plasseres og låses den øvre delen av formen, og så tilføres et væsketrykk inne i røret. Trykket er så stort at røret deformeres plastisk og får samme form som formen. Denne prosessen vises i figur 1.6a

Metallplate-hydroformingsprosessen, som denne oppgaven handler om, er sammenlignbar med presseprosessen. Der presseprosessen former metallplaten med en øvre og en nedre form, erstatter hydroformingsprosessen den ene formen med et væsketrykk. Ved formingsprosessen er en side av metallplaten i kontakt med væsken eller med en gummimembran, noe som gir en mer uniform belastning over platens overflate. Fordeler med metallplate-hydroformingsprosessen er god overflatefinish, god presisjon på delen, kort utviklingstid på formene og lave utgifter med produksjon av formene. Fordi det tar lang tid å utføre en enkelt formingsprosess er denne prosessen mest egnet for produksjon av små serier. Denne prosessen vises i 1.6b.



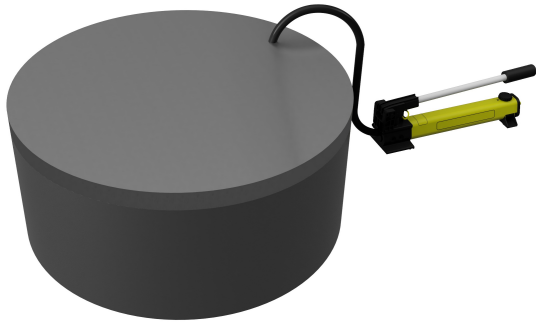
(a) Her vises hvordan et rundt rør blir formet ved hydroforming. Det runde røret legges i den nedre formen, den øvre formen låses, det bygges opp trykk inne i røret, og røret presses ut mot formen. [19]

(b) Her vises hvordan en metallplate blir formet ved hydroforming. Platen legges over en form, en gummimembran adskiller platen og væsken, det bygges opp et trykk over gummimembranen, og platen presses ned i formen. [19]

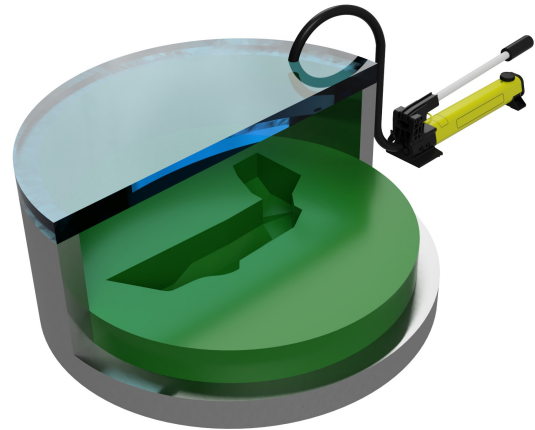
Figur 1.6: I figur a vises rør-hydroforming og i figur b vises metallplate-hydroforming.

1.3 Konseptbeskrivelse

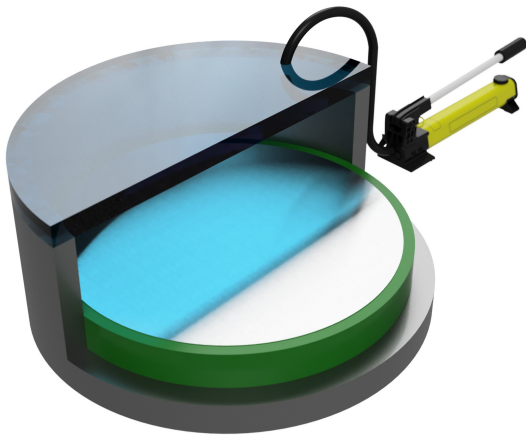
Konseptet er å lage en hydraulisk presse for å forme metallplater. Pressen vil være relativt liten, med et enkelt design, bestå av få deler, og den skal gjøre hydroformingsprosessen tilgjengelig for små bedrifter. På neste side i figur 1.7 vises en illustrasjon for hvordan en aluminiumstank jeg designet i faget TIP300 kan bli produsert ved å bruke en slik hydraulisk presse.



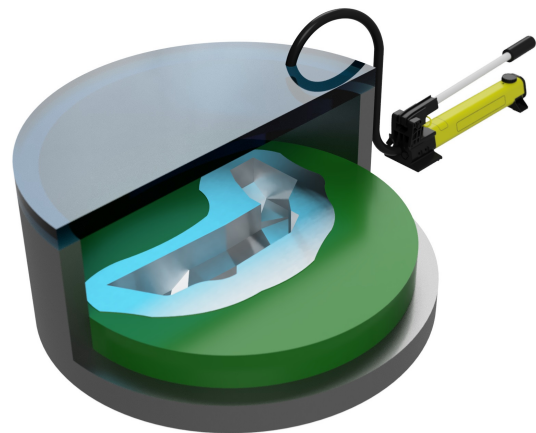
(a) Hydroformingsverktøyet som består av et trykkammer, en hydraulisk pumpe og en utskiftbar matrise. Matrisen vises ikke på dette bildet.



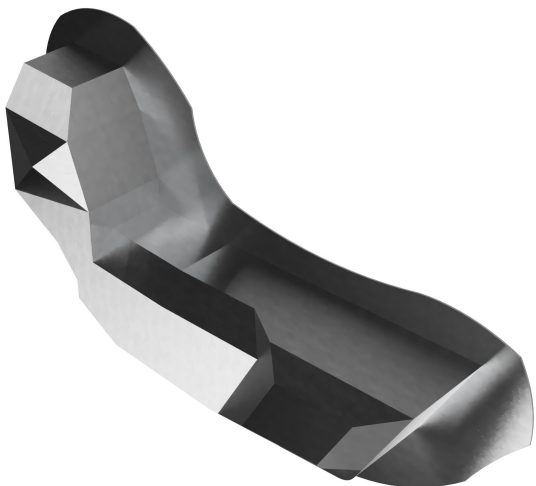
(b) Her er trykkammeret snittet slik at man kan se matrisen som former halve tanken.



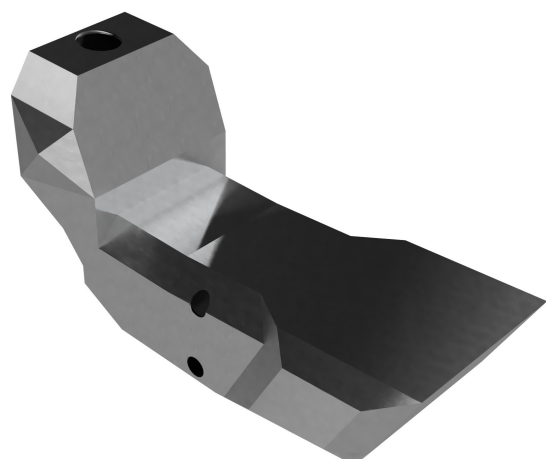
(c) En aluminiumsplate blir lagt over matrisen og kammeret fylles med væske (væsken vises ikke her). En membran vil skille væsken fra platen.



(d) Ved hjelp av den hydrauliske pumpen lages det et trykk og platen formes etter matrisen.



(e) Platen er formet etter matrisen og overflødig materiale fjernes. Nå er halve tanken formet.



(f) Når den andre halvdelen av tanken er formet sveises de to halvdelene sammen.

Figur 1.7: En illustrasjon av hvordan bensintanken jeg designet i faget TIP300 kan produseres med et hydroformingsverktøy.

1.4 Produktets plassering i markedet

Produktet er tenkt å markedsføres mot mindre mekaniske verksteder innen plateindustrien og private som holder på med plateforming på hobbybasis. Eksempler på produkter som kan lages med et slikt hydroformingsverktøy er drivstofftanker, chassis deler til motorsykler og vingestrukturer til mikrofly.

Parallelt med masterprosjektet søker jeg på Norges Forskningsråds studententreprenørskap, STUD-ENT [16]. I søknaden står mitt firma Søgaard Engineering AS som eier av idéen og hydroformingsverktøyet kalles MPress. I forbindelse med søknaden har jeg vært i kontakt med interessenter av hydroformingsverktøyet. Interessentene er Joakim Kobro fra Oslo som er med i styret i Norges avdeling av EAA (the Experimental Aircraft Association)[2], og Roel Scheffers fra Scheffers Engineering i Velfjord [13].

Joakim Kobro, EAA

"I hereby wish to state my interest in the MPress machine. I am a pilot and an aircraft enthusiast, and the machine can be useful in the work I do on maintaining my airplane and for building and fixing self-built airplanes. I am a board member of the Norwegian department of the Association for Home-Built Aircraft and Helicopters, the Experimental Aircraft Association (EAA). It is an international organization of aviation enthusiasts with more than 200 000 members. The organization has about 1,000 local associations in a number of countries, gathering private individuals who build aircraft themselves.

The machine can be useful for us in making parts of aluminium for airplanes. The proposed machine seems very interesting because it can make metal pressing accessible to a larger group due to its lower price and smaller size.

Due to my great interest in aircrafts and mechanical workshops, I would like to follow the development of this machine and I am willing to provide support to Øyvind and Elisabeth in the testing phase of the machine. I can be involved in conducting user testing, figuring out areas of application and map out needs for technological development to reach its market potential.

Further, I can be interested in either buying the machine and metal sheets, or in ordering parts and spare-parts for our work, made from the machine.

*Sincerely,
Joakim Kobro"*

Roel Scheffers, Scheffers Engineering:

"Scheffers Engineering is stating it's interest in the MPress machine. Scheffers Engineering is a company specialised in designing and (cnc)producing motorcycle parts. Our main focus is on CNC machining of parts. When it comes to sheet metal we have experi-

ence making gas tanks and seats in aluminium by hand; Shrinker/stretcher, hammer/sack and the english wheel.

I see possibilities in the MPress machine because it could combine our specialisation in CAD-engineering with production of sheet metal parts by hydroforming. Scheffers Engineering has a wide network of custom motorcycle builders. The custom building of bikes is following the trends of time with lots of 3D modelling and designing, something that could work well with the MPress machine's concept.

Scheffers Engineering is willing to support Sørgaard Engineering in the developing process, testing and eventually providing work for the machine. Scheffers Engineering can also use it's network to gather interest and eventually customers for the machine.

*Kind regards,
Roel Scheffers
Scheffers Engineering"*

1.5 Oppdragsbeskrivelse

Målet med prosjektet er å gjennomføre et produktutviklingsoppdrag. Det skal utredes og utvikles et konsept for en hydraulisk presse som former metallplate-materialer ved væsketrykk. Videre skal det designes en forsøksmodell i liten skala, samt utformes en plan for tidlige forsøk.

Arbeidet i prosjektet vil bli basert på en felles IPD-systematikk-plattform, dvs. integrert produkt-utvikling. Eksisterende hydroformingsprosesser skal kartlegges, spesielt mindre maskiner som kan konkurrere med dette konseptet. Videre skal teoretisk grunnlag for hydroformingsprosessen gjennomgås og det skal gjøres påfølgende beregninger for å finne nødvendig hydrostatisk trykk.

For produktet skal det utføres funksjonsanalyser med metrisk spesifiserings- og vurderingsgrunnlag for utvikling og vurdering av alternative designløsninger, fulgt av enkle konseptuelle forslag (delløsninger og systemløsninger) som screenes trinnvis, teknisk og funksjonelt fram til en foretrukken konseptløsning. Denne løsningen skal grunnlagsberegnes med hensyn til materialvalg, styrkeforhold, komponentvalg mv., konstruksjonsmodelleres og visualiseres i 3D for videre beregnings optimalisering. Hvis det er tid og ressurser skal det fremstilles en tidlig prototype for forsøk.

1.6 Problemstillinger og teknologiske flaskehals

I dette delkapittelet presenteres problemstillinger som må løses og teknologiske flaskehals som må tas hensyn til.

1.6.1 Problemstillinger og fokuspunkter

- Hvilke tekniske løsninger og alternativer finnes allerede på området.

- Hvor stort hydrostatisk trykk trengs for å forme platene.
- Hvilke tykkelser og metallplate-materialer er det tenkt at pressen skal forme.
- Hvilken utforming av trykkammeret er mest gunstig. Kammeret er under høyt trykk, samt at det skal produseres, anvendes og være lekkasjetett.
- Hvilke standarder og godkjenninger må følges/oppnås for å kunne kommersialisere produktet.

1.6.2 Teknologiske flaskehalsar

Materialer:

- **Materialkvaliteter**
For å holde materialkostnadene nede bør det brukes standard materialkvaliteter. Materialet må tåle kontakt med den hydrauliske væsken.
- **Materialprofiler**
For å holde produksjonskostnadene nede bør det brukes standard materialprofiler der det er mulig.
- **Standarddeler**
For å holde produktkostnadene nede bør det brukes så mange standarddeler som mulig, f.eks. standard bolter.

Sammenstilling og design:

- **Pakninger for å tette trykkammeret**
For å senke brukskostnadene for brukeren bør trykkammeret forsegles med pakninger som kan brukes flere ganger.
- **Brukervennlighet**
Trykkammeret bør designes slik at det raskt kan åpnes/forsegles.
- **Sikkerhet**
Trykkammeret må designes slik at det ikke er mulig å overstige maks tillatt trykk. Det må lages en mekanisme som hindrer lekkasjestråler i å gjøre skade på personer.
- **Vekt**
Lokket på trykkammeret bør være lett nok til at det enkelt kan åpnes av en person.
- **Forsegling mellom væske og utskiftbar matrise**
Det må lages en forsegling som hindrer væsken i å trenge under metallplaten og ned i matrisen. Forseglingen kan være over metallplaten slik at platen ikke er i kontakt med væsken, eller så kan forseglingen være under metallplaten slik at platen er i kontakt med væsken.

2 Prosjektplanlegging

Ved å lage en prosjektplan kan man tidlig danne et overblikk over prosjektets aktiviteter og omfang. Ved å fordele tid og ressurser til prosjektets aktiviteter sikrer man at prosjektet blir ferdig til gitt tidsfrist og at produktet oppfyller alle viktige egenskaper.

2.1 Prosjekt målsettinger

Prosjekt målsettingene er konkrete mål som skal være oppnådd ved gjennomført prosjekt. Målene deles inn i et hovedmål med underliggende delmål som fører frem til hovedmålet. Målsettingene legger føringen for prosjektet og sørger for at utviklingen holdes på rett kurs.

2.1.1 Hovedmål

Kortfattet er hovedmålet for masterprosjektet:

”Å utrede, utvikle og designe en hydraulisk presse som former metallplatematerialer ved væsketrykk. Konseptet skal gjøre hydroforming av metallplatematerialer lettere tilgjengelig for små bedrifter og privatpersoner. Videre å dokumentere utviklingsprosessen med tekniske anvisninger for tilvirkning og evt. rettighetsbeskyttelse”

2.1.2 Delmål

For å oppnå hovedmålet må følgende delmål oppfylles:

- Beskrive terminologi, begreper, metodikk, og gjøre en teori- og teknologiutredning.
- Utvikle teknisk konseptunderlag ved å gjennomføre en produktspesifisering, og gjøre konseptgenerering med funksjonsalternativer og skisser som fører til et konseptvalg.
- Utføre konstruksjonsberegninger og dimensjonering samt lage produktarkitektur og konseptdesign.
- Utføre FEM-analyse av produktet.
- Gjøre rede for produksjonsmetoder og beregne produksjonskostnader. Lage markedspresentasjon.
- Gjennomføre en prosessevaluering og diskusjon om konseptutviklingsarbeidet. Drøfte resultater, anbefalinger og videre arbeid.
- Ferdigstille og trykke rapport, til slutt fremføre prosjektet.

2.2 Tids- og arbeidsplan med milepæler

Tabell 2.1 Tids- og arbeidsplan som viser i hvilke uker prosjektets aktiviteter skal gjennomføres. De nummererte cellene representerer milepælene i prosjektet.

Aktiviteter/uke	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Innledning og prosjektplanlegging	1	1															
Metodebeskrivelse			1														
Teori- og teknologiutredning				1	1												
Produktspesifisering						1											
Konseptgenerering						1	1										
Konseptvalg							2										
Dimensjonering								1	1								
Konseptdesign										1	1						
FEM-analyse												1					
Produksjonsmetoder og kostnader													1				
Markedspresentasjon														1			
Prosessevaluering															1		
Konklusjon, Ferdigstilling																1	
Trykke og levere rapport																	1
Prototyping og testing																	1

Tabell 2.2 Tabell som viser nummererte milepæler, milepælenes innhold og datofrist.

Nummer	Milepæl	Datofrist
1	Innledning, prosjektplanlegging, teori og- teknologiutredning	09.02.2020
2	Metodebeskrivelse, produktspesifisering, konseptgenerering, konseptvalg	02.03.2020
3	Dimensjonering og konseptdesign	31.03.2020
4	FEM-analyse	10.04.2020
5	Produksjonsmetoder, produksjonskostnader og markedspresentasjon	17.04.2020
6	Prosessevaluering, konklusjon, forord og sammendrag	08.05.2020
7	Trykke og levere rapport	15.05.2020

2.3 Tidlige begrensninger for arbeidet

På grunn av prosjektets tidsramme blir det gjort noen begrensninger:

- Det vil ikke bli utført en markedsanalyse.
- Det vil ikke utredes for relevante hydraulikkpumper.
- Søk etter eksisterende patenter vil være begrenset.
- Beregninger og dimensjonerings vil ikke bli gjort etter relevante standarder.
- Det vil ikke bli utført utmattingsberegninger.
- Det vil ikke utføres beregninger for løsningen som hindrer hydraulikkvæsken i å trenge under metallplaten.
- Ved design og produksjon av forsøksmodellen vil ikke matrisen være utskiftbar.
- Det vil kun bli utført FEM-analyser av konstruksjonens hovedelementer.
- Det vil ikke bli utført strukturoptimeringer etter FEM-analysen, men det vil bli gjort rede for svakheter og eventuelle forbedringer.
- Økonomiske kostnadsberegninger vil være grove estimater.
- Det vil ikke bli utført kostnadsanalyse for serieproduksjon.

(*) På grunn av covid-19 har det ikke vært mulig å produsere en forsøksmodell eller å utføre forsøk på denne.

3 Metodebeskrivelse

For å vise hvordan prosjektet gjennomføres skal det gjøres rede for metodikk, løsningsverktøy og prosesstrinn i oppgaven. Symboler og formler settes inn i tabeller slik at dette kapittelet kan brukes som et oppslagsverk.

3.1 Terminologi

I tabell 3.1 listes det opp symboler som er brukt i teoriutredningen i kapittel 5 og beregningsarbeidet i kapittel 10.

Tabell 3.1 Symboler og enheter som er brukt i oppgaven med beskrivelse og tilhørende SI-enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
l	Lengde	m
l_0	Opprinnelig lengde	m
Δl	Endring i lengde	m
l_i	Momentan lengde	m
$L_{gjenget hull}$	Minimum inngrepslengde i gods	m
L_{min}	Minimum inngrepslengde for skrue	m
L_{skrue}	Minimum gjengelengde på skrue	m
X_1	Avstand til skruenes resultantkrafts tyngdepunkt, sirkulært lokk	m
X_2	Avstand til trykkets resultantkrafts tyngdepunkt, sirkulært lokk	m
x_1	Kraftens avstand fra diagonallinjen, rektangulært lokk	m
x_2	Reaksjonskraftens avstand fra diagonallinjen, rektangulært lokk	m
a	Lengde	m
x	Lengde	m
b	Bredde	m
h	Høyde	m

Tabell 3.1 forts: Symboler og enheter som er brukt i oppgaven med beskrivelse og tilhørende SI-enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
z	Høyde	m
t	Tykkelse	m
s_0	Sylinderveggs tykkelse ubelastet	m
A	Areal	m^2
A_0	Initielt areal	m^2
A_i	Momentant areal	m^2
A_s	Skrues spenningsareal	m^2
r	Radie	m
r_s	Minste radie ved hydroforming	m
r_m	Skrues middelradie, tynnveggt sylinders middelradie	m
r'_m	Friksjonsradie skruehode	m
r_i	Indre radie	m
r_y	Ytre radie	m
r_1	Radie til skruenes delesirkel	m
r_2	Radie til pakningens delesirkel	m
F	Kraft	N
F_l	Belastning på hver skrue grunnet trykk i trykkammer	N
F_a	Maksimal belastning på skruen	N
F_a	Aksiell kraft i sylinter	N
F_d	Kraft ved dynamisk belastning	N
F_t	Tangentiell kraft i sylinter	N
F_k	Kraft fra pakningen	N
F_i	Forspenningskraft	N

Tabell 3.1 forts: Symboler og enheter som er brukt i oppgaven med beskrivelse og tilhørende SI-enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
F_x	Kraft i x-retning	N
F_y	Kraft i y-retning	N
$F_{L,tot}$	Kraft for å holde trykkammer og lokk sammen	N
$F_{a,tot}$	Total kraft i skruene	N
$F_{K,tot}$	Total kraft fra pakningen	N
$F_{a,min}$	Minimum kraft på skruen ved dynamisk belastning	N
$F_{a,maks}$	Maks kraft på skruen ved dynamisk belastning	N
$F_{l,maks}$	Maks kraft på skruen grunnet trykk ved dynamisk belastning	N
F_{lokk}	Kraft på lokket grunnet trykk	N
τ_v	Skjærspenning ved vridning	N/mm^2
τ_{till}	Tillatt skjærspenning	N/mm^2
K	Kompressibilitetsmodul	N/mm^2
p	Trykk	N/mm^2
p_f	Hydroformingstrykk	N/mm^2
p_0	Trykk ved en væskes overflate	N/mm^2
p_i	Indre overtrykk i tank	N/mm^2
Δp	Trykkdifferanse	N/mm^2
V	Volum	m^3
ΔV	Volumendring	m^3
V_0	Initielt volum	m^3
ρ	Tetthet	kg/m^3
g	Gravitasjon	m/s^2
M	Moment	Nm

Tabell 3.1 forts: Symboler og enheter som er brukt i oppgaven med beskrivelse og tilhørende SI-enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
M_v	Vridemoment	Nm
M_s	Friksjonsmoment	Nm
M_{xx}	Moment i snitt x-x	Nm
M_b	Bøyemoment	Nm
E	Elastisitetsmodul	N/mm^2
W_b	Motstandsmoment bøyning	m^3
W_v	Motstandsmoment vridning	m^3
ν	Poissons tall	–
e	Tøyning i det elastiske området	–
ϵ	Tøyning	–
ϵ_b	Tverrkontraksjon	–
ϵ_l	Lengdeendring	–
y	Forhold forlengelse av skrue og sammenklemming av pakning	–
R_e	Flytegrense	N/mm^2
$R_{e,skrue}$	Flytegrense skrue	N/mm^2
$R_{e,gjengethull}$	Flytegrense i grunnmateriale	N/mm^2
R_m	Strekfasthet	N/mm^2
$R_{m,skrue}$	Strekfasthet skrue	N/mm^2
σ	Spenning	N/mm^2
σ_b	Bøyepening	N/mm^2
σ_e	Engineering spenning	N/mm^2
σ_t	True spenning	N/mm^2
σ_t	Tangentiell spenning	N/mm^2

Tabell 3.1 forts: Symboler og enheter som er brukt i oppgaven med beskrivelse og tilhørende SI-enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
$\sigma_{r,min}$	Minimum radiell spenning	N/mm^2
$\sigma_{r,maks}$	Maksimum radiell spenning	N/mm^2
$\sigma_{t,min}$	Minimum tangentiell spenning	N/mm^2
$\sigma_{t,maks}$	Maksimum tangentiell spenning	N/mm^2
σ_a	Aksial spenning	N/mm^2
σ_r	Radiell spenning	N/mm^2
σ_d	Spenning i skrue utsatt for strekk	N/mm^2
σ_1	Hovedspenning 1	N/mm^2
σ_2	Hovedspenning 2	N/mm^2
σ_3	Hovedspenning 3	N/mm^2
σ_{jf}	Jevnførende spenning	N/mm^2
ϕ	Gjengens stigningsvinkel	Grader
ϵ_1	Friksjonsvinkel	Grader
μ	Gjenges friksjonskoeffisient	–
μ'	Friksjonskoeffisient skruehode og underlag	–
P	Gjengestigning	m
2α	Profilvinkel til gjengen	Grader
H	Høyde av grunntriangel i gjenge	m
s	Nøkkelvidde	m
D	Diameter	m
D	Stordiameter for innvendig gjenge	m
D_1	Lillediameter for innvendig gjenge	m
D_2	Midtdiameter for innvendig gjenge	m

Tabell 3.1 forts: Symboler og enheter som er brukt i oppgaven med beskrivelse og tilhørende SI-enheter

Symbol	Beskrivelse	SI-enhet
d	Stordiameter for utvendig gjenge	m
d_1	Lillediameter for utvendig gjenge	m
d_2	Midtdiameter for utvendig gjenge	m
d_3	Lillediameter for skruegjengen	m
d_i	Kjernediameter skrue	m
d_h	Hulldiameter	m
n_k	Klemsikkerhet	—
n_f	Sikkerhet mot flyt	—
n	Antall skruer	—
n	ArbeidsherdningsekspONENT	—
c	Konstant	N/mm
δ	Forlengelse av skrue	m

Tabell 3.2 viser formler som brukes i oppgaven.

Tabell 3.2 Formler som er brukt i oppgaven med tilhørende indekseringer.

Formelnavn	Formel	Indeks
Hydroforming av metallplater		
Maks nødvendig trykk	$p_f = \frac{t \cdot R_m}{r_s}$	5.1
Minste radius	$r_s = \frac{t \cdot R_m}{p_f}$	5.2
Kraft for å holde trykkammer og lokk sammen	$F_{L,tot} = A_s \cdot p_f$	5.3
Materialegenskaper og forming		
Elastisitetsmodul	$E = \frac{\sigma_e}{\epsilon_e}$	5.4

Tabell 3.2 forts: Formler som er brukt i oppgaven med tilhørende indekseringer.

Formelnavn	Formel	Indeks
Poissons tall	$\nu = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_l}$	5.5
Engineering spenning	$\sigma_e = \frac{F}{A_0}$	5.6
Engineering tøyning	$e = \frac{\Delta l}{l_0}$	5.7
True spenning	$\sigma_t = \frac{F}{A_i}$	5.8
True tøyning	$\epsilon = \int \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0}$	5.9
Momentan lengde	$l_i = l_0 + \Delta l$	5.10
True tøyning formulert av engineering tøyning	$\epsilon = \ln(1 + e)$	5.11
True spenning ved engineering spenning	$\sigma_t = \sigma_e(1 + e)$	5.12
Hydraulikk		
Tyngdekraftens innvirkning på trykk i en væske	$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot z$	5.13
Volumendring i en væske	$\Delta V = \frac{-1}{K} \cdot V_0 \cdot \Delta p$	5.14
Trykkbeholdere, tynnvegget sylinder		
Grense for tynnveggede beholdere	$\frac{s_o}{r_m} \leq \frac{1}{10}$	5.15
Midlere tangentialspenning	$\sigma_t = \frac{p_i \cdot r_m}{s_o}$	5.16
Midlere radie	$r_m = \frac{r_y + r_i}{2}$	5.17
Aksialspenning	$\sigma_a = \frac{p_i \cdot r_m}{2 \cdot s_o}$	5.18
Trykkbeholdere, tykkvegget sylinder		
Grense for tykkveggede beholdere	$\frac{s_o}{r_m} \geq \frac{1}{10}$	5.19
Radiell spenning	$\sigma_r = \frac{[(\frac{r_i}{r_y})^2 - (\frac{r_i}{r})^2] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2}$	5.20
Tangentiell spenning	$\sigma_t = \frac{[(\frac{r_i}{r_y})^2 + (\frac{r_i}{r})^2] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2}$	5.21
Aksiell spenning	$\sigma_a = \frac{[(\frac{r_i}{r_y})^2] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2}$	5.22
Minimums radiell spenning	$\sigma_{r,min} = -p_i$, når $r = r_i$	5.23

Tabell 3.2 forts: Formler som er brukt i oppgaven med tilhørende indekseringer.

Formelnavn	Formel	Indeks
Maksimum radiell spenning	$\sigma_{r,maks} = 0$, når $r = r_y$	5.24
Minste tangentielle spenning	$\sigma_{t,min} = \frac{[2(\frac{r_i}{r_y})^2] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2}$	5.25
Høyeste tangentielle spenning	$\sigma_{t,maks} = \frac{[2(\frac{r_i}{r_y})^2 + 1] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2}$	5.26
Tre-akset jevnførende von Mises spenning	$\sigma_{j,f} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1}$	5.27
Estimering av tykkelse for rundt flatt lokk		
Tyngdepunktet til resultantkraften fra skruene på et halvt sirkulært lokk	$X_1 = \frac{2R}{\pi}$	5.28
Avstand fra resultantkraften forårsaket av beholdertrykket til midten av lokket	$X_2 = \frac{4R}{3\pi}$	5.29
Moment i diagonalsnittet	$M_b = 0,5F(X_1 - X_2)$	5.30
Moment i diagonalsnittet	$M_b = \frac{p \cdot R^3}{3}$	5.31
Motstandsmoment i diagonalsnittet	$W_b = \frac{R \cdot t^2}{3}$	5.32
Bøyespenning i diagonalsnittet	$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{p \cdot R^2}{t^2}$	5.33
Bøyespenning i diagonalsnittet med usikkerhet pga. pakning	$\sigma_b = \frac{1,2 \cdot p \cdot R^2}{t^2}$	5.34
Nødvendig tykkelse på lokket	$t = \sqrt{\frac{1,2 \cdot p \cdot r^2}{\sigma_b}}$	5.35
Moment i snitt x-x	$M_b = M_{xx} = \frac{F_{a,tot} \cdot 0.636 \cdot R_2}{2} - \frac{F_{K,tot} \cdot 0.636 \cdot R_1}{2} - \frac{F_{L,tot} \cdot 0.424 \cdot R^2}{2}$	5.36
Tilnærmet motstandsmoment	$W_b \approx \frac{R_2 \cdot t^2}{3}$	5.37
Bøyespenning	$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{3 \cdot M_b}{R_2 \cdot t^2}$	5.38
Bøyespenning med usikkerheter i beregningene	$\sigma_b = \frac{3,6 \cdot M_b}{R_2 \cdot t^2}$	5.39
Estimering av tykkelse for firkantet flatt lokk		
Kraft på halve flaten	$0.5F = 0.5 \cdot a \cdot b \cdot p$	5.40
Kraftens avstand fra diagonallinjen	$x_1 = \frac{a \cdot b}{3\sqrt{a^2 + b^2}}$	5.41

Tabell 3.2 forts: Formler som er brukt i oppgaven med tilhørende indekseringer.

Formelnavn	Formel	Indeks
Reaksjonskreftenes angrepspunkt fra diagonaltverrsnittet	$x_2 = \frac{a \cdot b}{2\sqrt{a^2 + b^2}}$	5.42
Bøyemoment	$M_b = 0.5 \cdot F(x_2 - x_1)$	5.43
Motstandsmoment	$W_b \approx \frac{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot t^2}{6}$	5.44
Bøyespennning	$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{3 \cdot 6 \cdot F(x_2 - x_1)}{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot t^2}$	5.45
Skruer		
Moment for å trekke til en trekantgjenget skruer	$M_v = F \cdot r_m \cdot \tan(\epsilon_1 + \phi)$	5.46
Gjengens middeleradius	$r_m = \frac{d_2}{2}$	5.47
Friksjonsvinkelen	$\epsilon_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\mu}{\cos \alpha}\right)$	5.48
Gjengens stigningsvinkel	$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right)$	5.49
Moment for å løsne en trekantgjenget skruer	$M_v = F \cdot r_m \cdot \tan(\epsilon_1 - \phi)$	5.50
Moment for å overvinne friksjon under skruens hode	$M_s = \mu' \cdot F \cdot r'_m$	5.51
Friksjonskraftens radius	$r'_m = \frac{s + d_h}{4}$	5.52
Totalt moment for å trekke til en skruer	$M = M_v + M_s$	5.53
Total kraft på lokket	$F_{lokk} = \frac{p \cdot \pi \cdot D^2}{4}$	5.54
Belastning på hver skruer grunnet trykk	$F_l = \frac{p \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot n}$	5.55
Forlengelse av stang utsatt for strekkraft	$\delta = \frac{F \cdot l}{E \cdot A}$	5.56
Forenkling av uttrykk	$\frac{E \cdot A}{l} = c$	5.57
Kraft for å forlenge stang	$F = \delta \cdot c$	5.58
Klemsikkerhet ved forspenning	$n_k = \frac{F_i}{F_i - F_k}$	5.59
Utledning av forspenningskraft 1	$\frac{\delta_1}{\delta_2} = y$	5.60
Utledning av forspenningskraft 2	$\delta_1 = y \delta_2$	5.61

Tabell 3.2 forts: Formler som er brukt i oppgaven med tilhørende indekseringer.

Formelnavn	Formel	Indeks
Utledning av forspenningskraft 3	$\frac{F_l + F_k}{F_i} = \frac{\delta_1 + \delta_2 - x}{\delta_1}$	5.62
Utledning av forspenningskraft 4	$\frac{F_i}{F_k} = \frac{\delta_2}{x}$	5.63
Utledning av forspenningskraft 5	$\frac{F_l + F_k}{F_i} = \frac{y\delta_2 + \delta_2 - x}{y\delta_2} = \frac{y+1}{y} - \frac{x}{y\delta_2}$	5.64
Utledning av forspenningskraft 6	$x = \delta_2 \cdot (1 - \frac{1}{n_k})$	5.65
Utledning av forspenningskraft 7	$F_k = F_i(1 - \frac{1}{n_k})$	5.66
Utledning av forspenningskraft 8	$\frac{F_l + (F_i - \frac{F_i}{n_k})}{F_i} = \frac{y+1}{y} - \frac{x}{y\delta_2}$	5.67
Utledning av forspenningskraft 9	$\frac{F_l}{F_i} + \frac{F_i(1 - \frac{1}{n_k})}{F_i} = \frac{y+1}{y} - \frac{x}{y\delta_2}$	5.68
Utledning av forspenningskraft 10	$\frac{F_l}{F_i} + 1 - \frac{1}{n_k} = 1 - \frac{1}{\frac{y}{n_k}}$	5.69
Utledning av forspenningskraft 11	$F_i = \frac{F_l}{(\frac{1}{n_k}) + \frac{1}{y}}$	5.70
Total belastning på skruen	$F_a = F_k + F_l$	5.71
Total belastning på skruen	$F_a = F_i(1 - \frac{1}{n_k}) + F_l$	5.72
Samlet belastning under dynamiske forhold	$F_a = (F_i + \frac{F_d}{2}) \pm \frac{F_d}{2}$	5.73
Spenning i skrue utsatt for strekk	$\sigma_d = \frac{F_a}{A}$	5.74
Skrues svakeste tverrsnitt	$A_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4}$	5.75
Skrues spenningsareal	$A_s = \frac{\pi}{4} (\frac{d_2 + d_3}{2})^2$	5.76
Spenning i skrue beregnet med spenningsarealet	$\sigma_d = \frac{F_a}{A_s}$	5.77
Torsjonsspenning	$\tau_v = \frac{M_v}{W_v} = \frac{M_v}{\frac{\pi \cdot d_1^3}{16}} = \frac{M_v \cdot 16}{\pi \cdot d_1^3}$	5.78
Jevnførende spenning	$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3\tau_v^2}$	5.79
Lengde på gjenget hull	$L_{gjenget\ hull} \geq \frac{R_{m,skrue}}{R_{e,gjenget\ hull}} \cdot \frac{2 \cdot A_s}{0,6\pi \cdot d}$	5.80
Lengde på skruens gjenger	$L_{skrue} \geq \frac{R_{m,skrue}}{R_{e,skrue}} \cdot \frac{2 \cdot A_s}{0,6\pi \cdot d_2}$	5.81
Minimums inngrepslengde	$L_{min} \geq maks(L_{gjenget\ hull}, L_{skrue})$	5.82

Tabell 3.2 forts: Formler som er brukt i oppgaven med tilhørende indekseringer.

Formelnavn	Formel	Indeks
Diverse formler		
Sikkerhetsfaktor mot flyt	$n_f = \frac{R_e}{\sigma_{jf}}$	5.83
Arealet av sirkulært tverrsnitt	$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 227 \text{mm}^2$	5.84
Tverrsnittsareal av sylinder	$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4}$	5.85
Kraft pga. trykk på et areal	$F = p \cdot A$	5.86
Tillatt skjærspenning	$\tau_{till} = \sqrt{\frac{\sigma_{jf}^2}{3}}$	5.87
Nødvendig høyde i sylindrisk areal	$h = \frac{F}{\tau_{till} \cdot \pi \cdot d}$	5.88

3.2 Metodebruk

Integrated Product Development, IPD [14] [20]

Integrert produktutvikling er en produktutviklingsmetodikk som fokuserer på tverrfaglig samarbeid og integrasjon mellom fagområdene utvikling, produksjon, økonomi og HMS. Ved at disse fagområdene fortløpende har en dataflyt om kundebehov og resultatmål, skapes større tverrfaglighet og samspill. Dette bidrar til at man lager et produkt som ivaretar miljø, pris og kundens ønsker.

Integrasjonen mellom fagområdene skjer ved kommunikasjon og bruk av en felles digital plattform med dataverktøyer som kommuniserer med felles filformater. God dataflyt fører til et effektivt arbeid. Hensikten med integrert produktutvikling er å gjennomføre utviklingsprosessen i riktig rekkefølge i et koordinert utviklingsløp, samt å passe på at ting ikke blir glemte underveis.

Tabell 3.3 Grov listing av relevante IPD hovedaktiviteter i prosjektet.

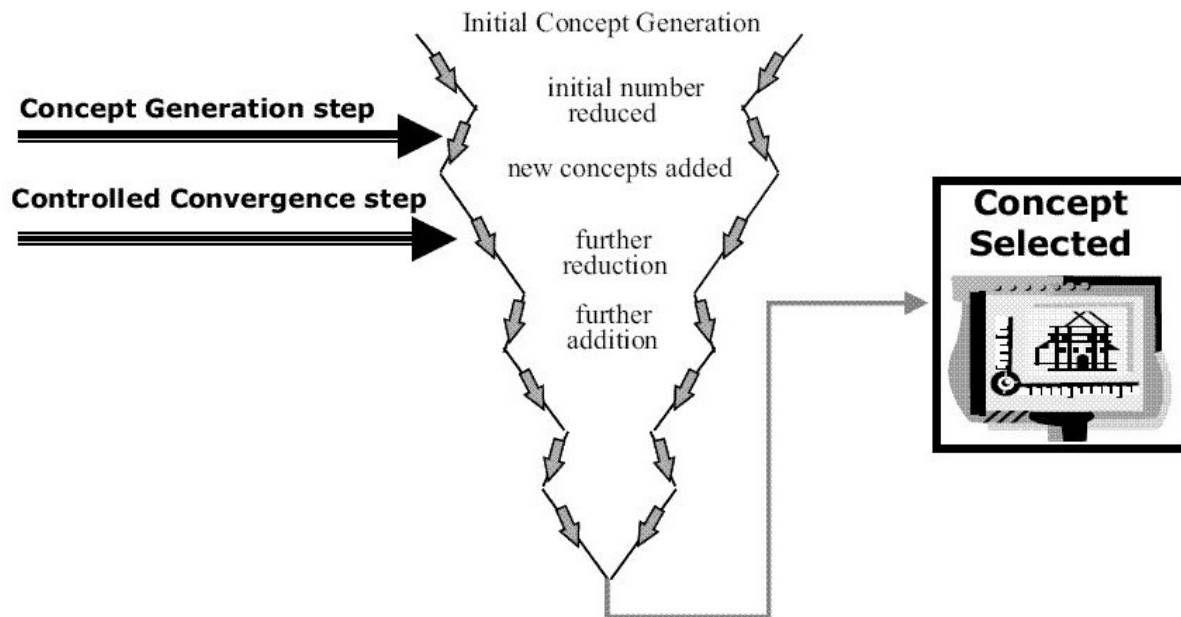
Nr.	Hovedelement	Beskrivelse
1	Klarlegging av kundens behov og markedets krav.	Det skal undersøkes hva som finnes av eksisterende produkter. Ved testing av konsepter i begrensede grupper kartlegges mulige forbedringer.
2	Planlegging og styring av produktutviklingsprosessen.	Prosjektet skal planlegges med hoved- og delmål. Delmålene fører til milepæler som blir satt inn i et gantt skjema med tids- og arbeidsplan.

Tabell 3.3 forts: Grov listing av relevante IPD hovedaktiviteter i prosjektet.

3	Bruk av produktutviklingsgrupper og lagarbeid.	Prosjektet er selvstendig arbeid og det er mulig oppgaven skal være konfidensiell og arbeidet vil derfor ikke bli gjort i grupper. Veiledere og utvalgte eksperter ved NMBU vil bli benyttet for inspirasjon og utvikling av produktet.
4	Integrering av prosessdesign.	Planlegging av fremstilling og produksjon begynner tidlig i prosjektet slik at produktdesignet får optimal ytelse og egenskaper. Eksperter ved NMBUs verksted vil bistå med dette.
5	Styring av prosjektkostnadene fra starten.	Økonomien ved produktutviklingen skal styres helt fra begynnelsen. Kostnadsrammer for en forsøksmodell blir diskutert med veileder og faktiske kostnader for produksjon av forsøksmodellen blir diskutert med ansatte ved NMBUs verksted.
6	Involvering av leverandører og underleverandører tidlig i prosessen.	Produktdesignet skal kunne benytte seg av flest mulig standard profiler og komponenter for å redusere kostnader ved produksjon.
7	Utvikle robuste design.	Produktets elementer vil bli konstruert og dimensjonert med sikkerhetsfaktorer. Hvis det blir tid skal forsøksmodellen utprøves for å avdekke eventuelle feil og forbedringspotensialer.
8	Integrere relevante utviklingsverktøy som CAE, CAD og CAM i utviklingsprosessen.	3D CAD blir benyttet for modellering og tekniske tegninger.
9	Datasimulering av produktets egenskaper og fremstillingsprosessen.	FEM-analyser vil bli gjort for å teste håndberegninger og for å optimalisere produktets design.
10	Generering av en effektiv tilnærming til utviklingsarbeidet.	Prosjektet utføres selvstendig med egen kompetanse, relevant faglitteratur, dataverktøyer og veiledning. Prosjektet styres etter prosjektplanen, og metodikken som er beskrevet blir brukt aktivt under hele prosessen.
11	Kontinuerlig forbedring av utviklingsprosessene.	Det skal kontinuerlig vurderes hva som er relevant for prosjektet og hvilke aktiviteter som bør lukes ut.

Pughs metodikk [37] [36]

Pughs metodikk er en seleksjonsprosess som brukes til å vekte idéer eller konsepter mot hverandre. Det blir spesifisert krav, metriske verdier og kriterier som det er viktig at konseptet skal oppfylle. Deretter lager man en seleksjonsmatrise hvor konseptene blir gitt en poengvurdering ut fra hvor godt de oppfyller kriteriene. De dårlige konseptene forkastes og nye løsningsforslag blir vurdert mot de man satt igjen med. Dette blir gjort flere ganger til man konvergerer til et endelig konsept. I figur 3.1 kan man se hvordan seleksjonsprosessen konvergerer til et endelig konsept.



Figur 3.1: Illustrasjon av hvordan Pughs seleksjonsmetodikk fungerer. Fra venstre kommer det inn konsepter og idéer som blir vurdert og selektert jo lenger ned man kommer i prosessen. Til slutt, på høyre side, sitter man igjen med et endelig konsept. [12]

SCAMPER [27]

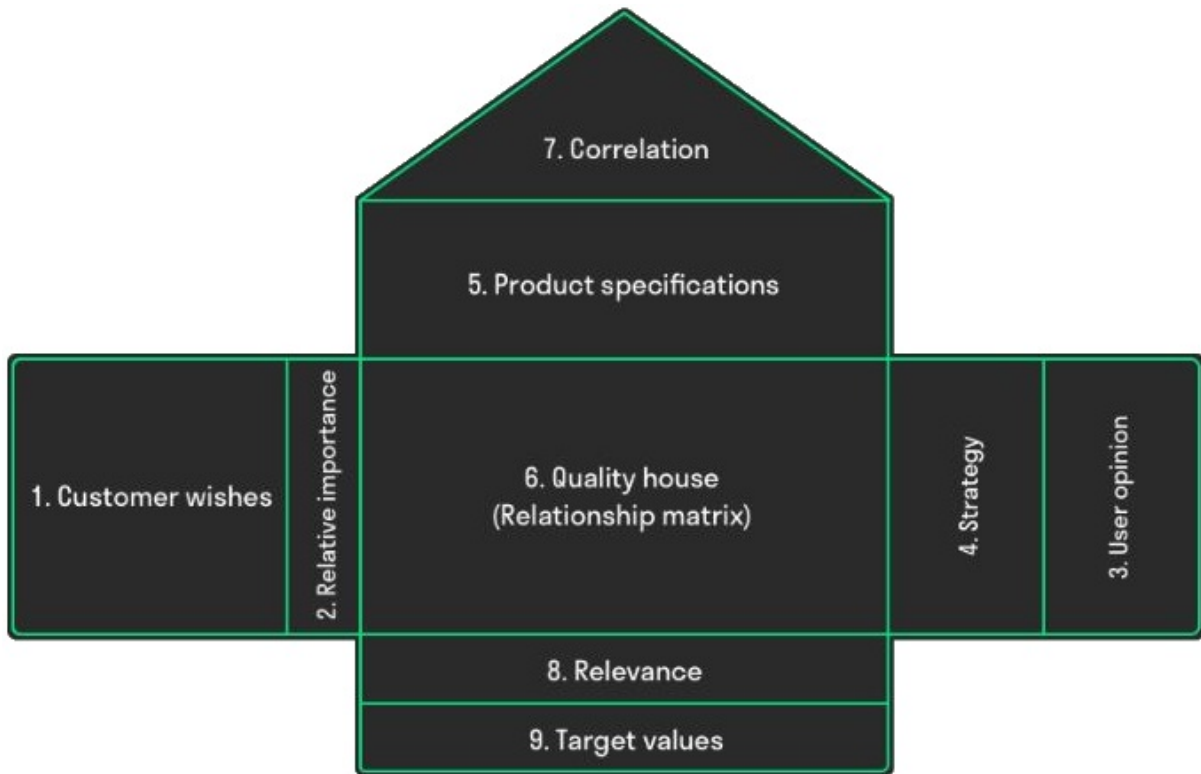
SCAMPER er et akronym for Substitute, Combine, Adapt, Modify, Put to another use, Eliminate og Reverse. SCAMPER er et kreativt idémyndringsverktøy som bruker de syv stikkordene til å revurdere og gå nye utviklingsveier, gjøre forenklinger, eller gjerne flere av disse tingene kombinert med hverandre. Denne metoden blir ofte brukt ubevisst.

QFD og House of Quality [14]

Begrepet QFD, som står for Quality, Function, Deployment, er blitt et viktig hjelpemiddel for bedrifter i produktutviklings- og realiseringsprosesser. QFD hjelper til med å definere produkter, gjøre strategiske valg av innsatsområder og til å bedre kommunikasjon. Kort forklart er QFD en strukturert måte for å planlegge, kvalitetssikre, utvikle og fremstille produkter ved å kontinuerlig ”høre og integrere kundens stemme”.

For å innføre og bruke QFD i en bedrift benytter man House of Quality. Dette er et verktøy for å praktisk systematisere QFD-tankegangen og ”kundens stemme” gjennom et

hus-formet blokkdiagram med ulike kombinasjonsmuligheter, som vist i figur 3.2. Romorganiseringen i huset kan være nesten en hvilken som helst kombinasjon og trenger ikke være helt lik som vist i figuren.



Figur 3.2: Her vises House of Quality og dets "rom og etasjer". [45]

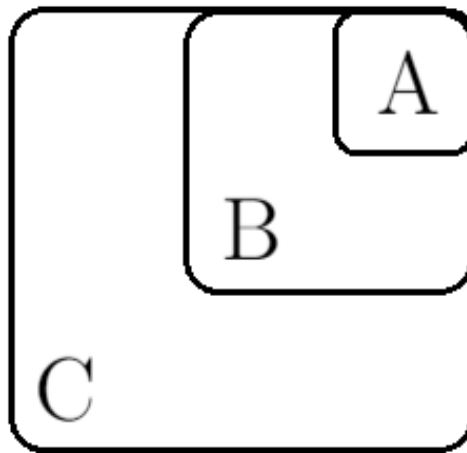
QFD-tankegangen og elementene i House of Quality bygges opp gjennom et antall hierarkiske spørsmål av formen "Hva er det?" og "Hvordan er det?". Videre analyseres hvert trinn i framveksten av et produkt, også servicetrinnene. Denne fremgangsmåten kan kort oppsummeres til følgende hovedtrinn/elementer:

- Identifisering og klassifisering av kundens ønsker.
- Identifisere hvor viktige disse ønskene er.
- Identifisere relevante tekniske/ingeniørfaglige aspekter.
- Korrelere relevante tekniske aspekter og kundens ønsker.
- Verifisere korrelasjonene.
- System- og produktkrav tildeles målsettinger og prioritet.

3.3 Modularisering

Modularisering er en teknikk hvor man går systematisk til verks for å undersøke utforminger og sammensetninger for ulike elementer i et produkt. Ved å benytte symmetri og standardisering i utformingen kan ulike elementer og deler settes sammen på ulike måter. I figur 3.3 vises et eksempel på modularisering. Fordelene ved modularisering er:

- Vedlikehold forenkles ved rask utskifting av deler og elementer.
- Stor fleksibilitet for standardiserte enheter som kan brukes i andre produktvarianter.
- Produksjonen forenkles.
- Lagerhold, emballeringskrav og transportlogistikk forenkles.



Figur 3.3: Eksempel på modularisering ved at sidene i kvadrat C og B er henholdsvis tre og to ganger så store som i kvadrat A.

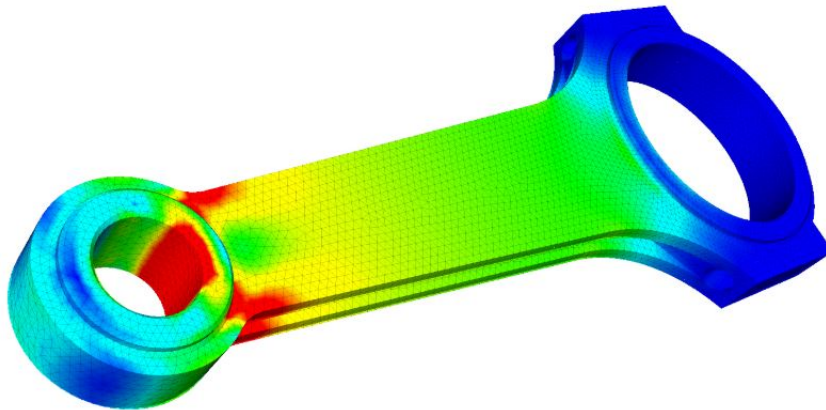
3.4 Løsningsverktøy

Tabell 3.4 Oversikt over programvarer og andre verktøy som er brukt i prosjektet.

Verktøy	Anvendelse
Autodesk Inventor 2019	CAD modellering
Autodesk Fusion 360	Fotorenderinger
Solidworks 2019	CAD modellering, FEM analyser og fotorenderinger
CES edupack	Livsløpsanalyse
Overleaf	Rapportskriving
Paint.net	Redigering av bilder
Microsoft paint	Redigering av bilder

3.5 FEM-analyse

FEM, som står for Finite Element Method, er en analyse- og beregningsmetode som bruker datasimuleringer til å forutsi hvordan et produkt vil reagere på påkjenninger i den virkelige verden. Man kan f.eks. simulere spenninger, utmatting, varmetap, væskestrøming m.m. Måten en FEM-analyse jobber på er å bryte ned et objekt til et stort antall elementer som kobles sammen i noder, som til sammen danner et mesh. Ved bruk av numeriske metoder beregner programmet løsningen for hvert enkelt element. Resultatene fra hvert element blir så satt sammen for å få en løsning på problemet. [3]



Figur 3.4: Her er en FEM-analyse utført på en råde. Råden er delt opp i et mesh, og løsningsverdien i hvert element er illustrert med en farge. [40]

3.6 Litteraturstudie

Litteraturstudien er en systematisk gjennomgang av tekstmateriell som er relevant for oppgaven. Tekstmateriellet kommer fra faglige bøker, artikler, kompendier fra NMBU, produktkataloger og nettsøk. Bøker, artikler og kompendier blir brukt til teori, formler og beregninger. Produktkataloger blir brukt til å finne tekniske spesifikasjoner for materialer og standarddeler. Nettsøk blir brukt til å finne konkurrerende løsninger, tekniske spesifikasjoner, bilder, og priser på materialer og standarddeler.

3.7 Kildesøk

For å sikre at man har FTO er det viktig å undersøke eksisterende løsninger, rettigheter og patenter.

3.7.1 Søk etter konkurrerende løsninger

Etter søk på nettet har jeg ikke kunnet finne hydroformingsmaskiner som ligner på mitt konsept. Søkene ble gjort på Google.com, Alibaba.com og Ebay.com.

Søkeord på Google:

- Hydroforming
- Sheet metal hydroforming
- Hydromechanical deep drawing
- DIY hydroforming
- Hydroforming at home
- Low volume hydroforming
- Fluid forming

Søkeord på Alibaba.com:

- Hydroforming
- Sheet metal hydroforming

Søkeord på Ebay.com:

- Hydroforming

3.7.2 Søk etter eksisterende patenter

For ikke å krenke eksisterende patenter er det gjort søk hos Patentstyret, WIPO og EPO. Her har det ikke blitt funnet patenter som hindrer mitt konsept.

Søkeord hos patentstyret.no:

- Hydroforming
- Forming med hydrostatisk trykk
- Hydraulisk presse

Søkeord hos patentscope.wipo.int:

- Hydroforming
- Hydroforming sheet metal
- Hydroforming diaphragm

Søkeord hos worldwide.espacenet.com

- Hydroforming
- Hydroforming sheet metal
- Hydroforming diaphragm

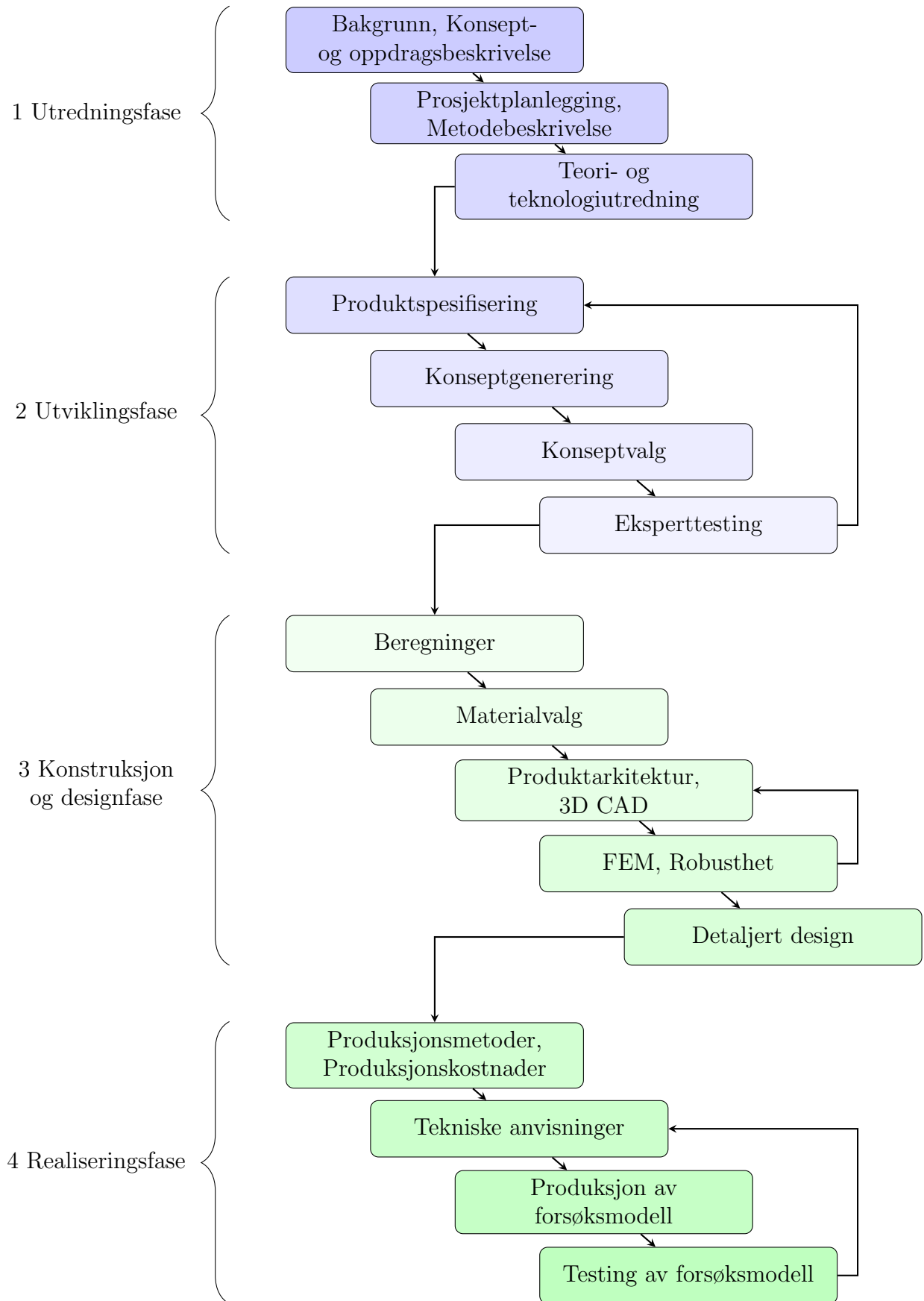
3.8 Kvalitetssikring

Kvalitetssikringen i prosjektet utføres med følgende hjelpemidler:

- Tekniske tegninger er utført i henhold til ISO128.
- Produktet og prosessen er kvalitetssikret i henhold til sentrale deler av ISO 9000 og ISO 9001 kap. 7(2000) og kap. 8 + vedlegg(2015).
- De fleste formler hentes fra kjent litteratur. Formler uten referanse er hentet fra tekniske tabeller.
- Valgte konseptløsninger kvalitetssikres med eksperttesting.
- Ved design av fremtidige salgsmodeller skal standarder for trykkpåkjent utstyr følges. Relevante standarder er:
 - NS-EN 13445, ikke-fyrte trykkbeholdere.
 - ASME, Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Pressure Vessels.

3.9 Prosesstrinn

I figuren på neste side er fremgangsmåten til utviklingsprosessen beskrevet. Pilene viser hvordan prosessen utføres steg for steg og de tilbakevendende pilene viser hvordan endringer i et steg fører til at man må gjøre endringer i et tidligere steg. Slike tilbakevendende itereringer øker kvaliteten på produktet og vil føre til et best mulig sluttresultat.



Figur 3.5: Skjematisk oversikt over prosesstrinnene i prosjektet. Tilbakevendende piler illustrer itereringer som kvalitetssikrer produktet etter ISO 9001.

4 Teknologitredning

Teknologi er læren om teknikker og tilhørende materielle produkter innenfor et bestemt område. Ved å gjennomføre en teknologitredning får man et overblikk over eksisterende formingsprosesser som gjør at man kan angripe prosjektet på en ingeniørmessig måte.

4.1 Metallplate-hydroforming

Metallplate-hydroforming kan sammenlignes med stanseprosessen. Verktøyene som brukes i stansing er en matrise, et stempel og en plateholder. Ved metallplate-hydroforming erstatter man matrisen eller stempelet med et væsketrykk som fungerer som et universalt verktøy. Væsken kan være i direkte kontakt med en side av metallplaten, ellers kan væsken og platen være adskilt av en gummimembran.

Ved å bruke metallplate-hydroforming kan man oppnå 1,5 ganger så stor dybde når man strekker platen, sammenlignet med andre eksisterende prosesser hvor man strekker med en matrise. Andre fordeler som kan nevnes er lave utgifter og utviklingstid for verktøy, god overflatefinish og lite tilbakefjæring i platen. Selv om det finnes mange fordeler er det en ulempe at formingsprosessen tar lang tid. Dette fører til at metallplate-hydroforming er best egnet til produksjon av små serier.

Det finnes fem metallplate-hydroformingsprosesser: Hydroforming med en gummimembran, hydromekanisk dyp-trekking, hydraulisk strekking, kombinert dyp-trekking og strekking, og dobbel-plate hydroforming.

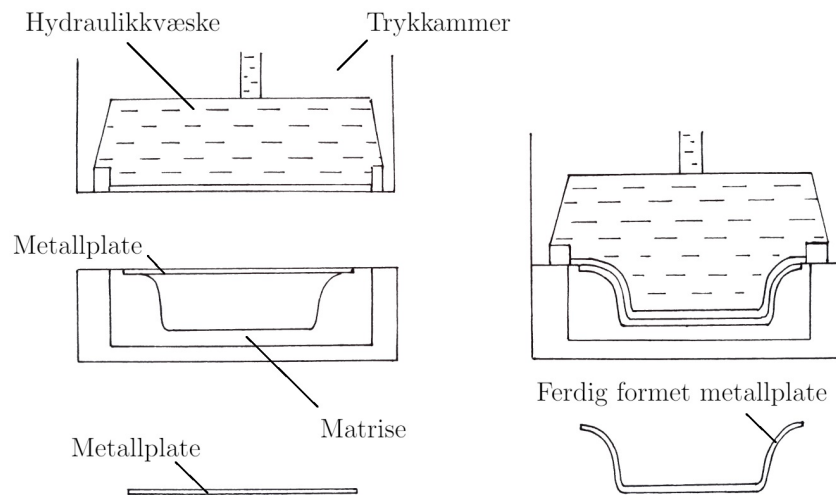
4.2 Hydroforming med en gummimembran

På slutten av 1940-tallet og begynnelsen av 1950-tallet ble denne prosessen utviklet for å imøtekomme et behov for lav-kost dyp-trekte deler. I hovedsak har prosessen vært brukt til å dyp-trekke flydeler.

I prosessen er det typisk at man har et væskefylt kammer som er forseglet med en elastisk gummimembran. Membranen holder fast metallplaten i tillegg til å fungere som et universalt verktøy som kan ta en hvilken som helst form. Se figur 4.1. Det andre formingsverktøyet kan være et stempel eller en matrise. Formingsprosessen tar vanligvis ca. 30 sekunder og består av følgende trinn:

- Metallplaten smøres og blir lagt over matrisen. En gummi kan bli lagt over platen for å skåne gummimembranen for slitasje.
- Det væskefylte kammeret plasseres over metallplaten og trykket økes.
- Så økes trykket enda mer og metallplaten blir formet etter matrisen.
- Trykket senkes, væskekammeret fjernes og den formede metallplaten tas ut av matrisen.

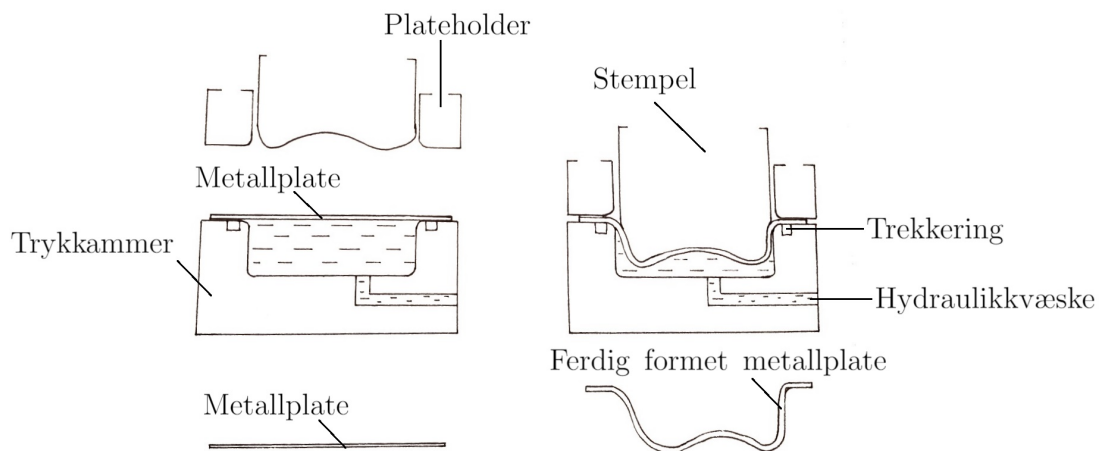
Levetiden til gummimembranen er 500-1500 sykler. Formingstrykket for denne prosessen går typisk fra 350-1000 bar med en trekke-dybde på opptil 300mm.



Figur 4.1: Hydroforming med en gummimembran. Til venstre plasseres metallplaten over matrisen og trykkammeret senkes. Til høyre har det blitt tilført trykk og metallplaten er formet etter matrisen.

4.3 Hydromekanisk dyp-trekking

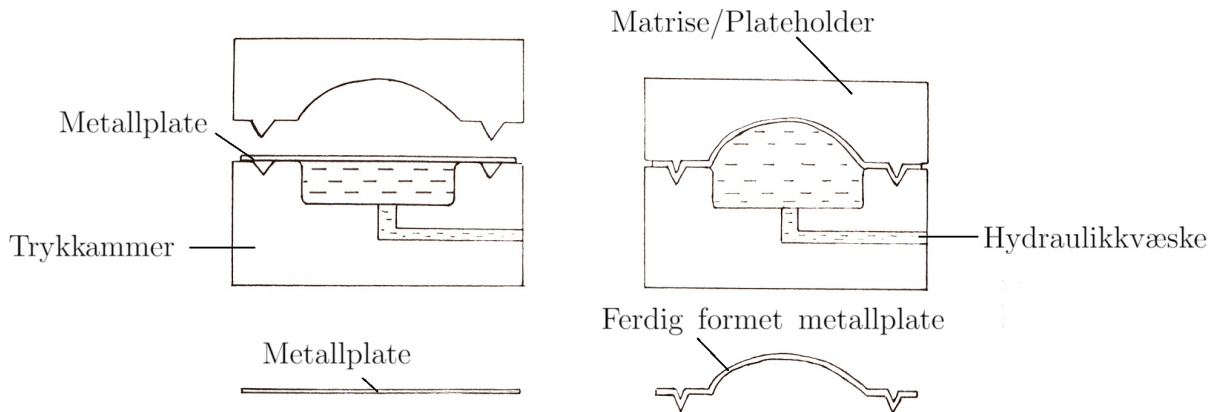
I denne prosessen er verktøyene et stempel, en plateholder, en trekking og et trykkammer. Se figur 4.2. Plateholderen er plassert rundt stampelet som vanligvis står over trykkammeret. Metallplaten blir plassert på trykkammeret og plateholderen senkes for å skape en forsegling mellom trekkingen og metallplaten. Trykket i trykkammeret økes og stampelet føres ned i metallplaten og formingen tar sted. Ved å kontrollere trykket på trekkingen sørger man for at stampelet drar metallplaten med seg.



Figur 4.2: Hydromekanisk dyp-trekking. Til venstre er stampelet og plateholderen plassert over trykkammeret og metallplaten. Til høyre senkes plateholderen, væsketrykket økes, stampelet senkes og formingen finner sted.

4.4 Hydraulisk strekking

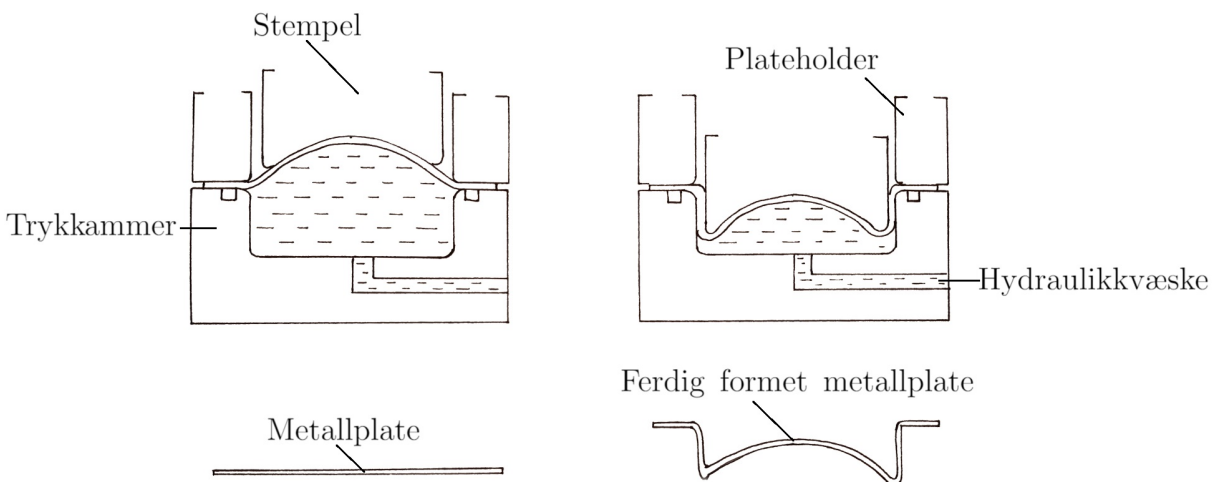
Ved hydraulisk strekking legges metallplaten på et trykkammer. En plateholder, som også fungerer som en matrise, føres ned på metallplaten og forsegler trykkammeret. Se figur 4.3. Trykket i trykkammeret øker og metallplaten strekker seg og formes etter matrisen.



Figur 4.3: Hydraulisk strekking. Til venstre er matrisen/plateholderen plassert over metallplaten og trykkammeret. Til høyre senkes matrisen/plateholderen og metallplaten formes.

4.5 Kombinert dyp-trekking og strekking

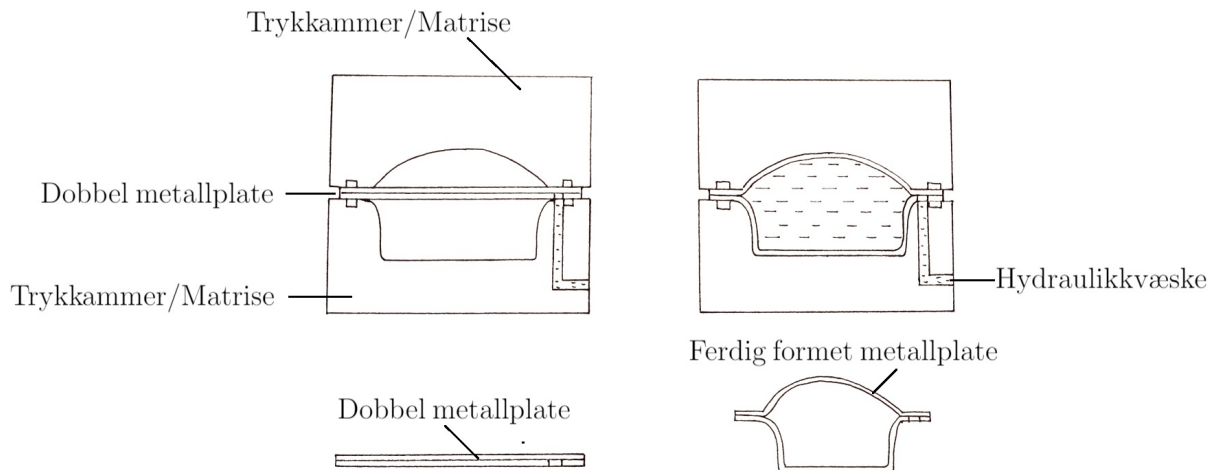
Ved å kombinere verktøyene fra de to forrige prosessen kan man utføre kombinert dyp-trykking og strekking i samme formingsprosess. Se figur 4.4. Først strekkes platen, noe som gir en jevn belastning og arbeidsharding. Så utføres dyp-trekking prosessen hvor metallplaten kan trekkes dypt. Kombinert dyp-trekking og strekking gir en hard overflate med perfekt finish, noe som gjør at prosessen egner seg til bilkarosserier.



Figur 4.4: Kombinert dyp-trekking og strekking. Til venstre holdes stampelet rolig og metallplaten strekkes. Til høyre føres stampelet ned og metallplaten dyp-trekkes.

4.6 Dobbel-plate hydroforming

I denne prosessen er to metallplater lagt oppå hverandre og sveist rundt periferien. Platene blir plassert mellom to matriser og det blir tilført et hydraulisk trykk som former platene mot matrisene. Se figur 4.5. Med denne metoden kan man produsere lukkede enheter som f.eks. drivstofftanker. Platene kan ha forskjellig tykkelse for å møte krav til masse og styrke.



Figur 4.5: Dobbel-plate hydroforming. Til venstre er to metallplater sveist sammen og lagt mellom to matriser. Til høyre tilføres det et hydraulisk trykk mellom platene og de formes etter matrisene.

Teori i teknologiutredningen er hentet fra Singh, [41]

5 Teoriutredning

En teori er et system av antagelser som er fremsatt som forklaring på en rekke kjensgjerninger eller fenomener. Ved å gjøre rede for relevant teori øker oversikten over fagfeltet og man får tyngde til å utføre senere beregninger og analyser.

5.1 Forskrift om trykkpåkjent utstyr

Direktoratet for samfunnssikkerhet og beredskap har fastsatt forskriften ”Forskrift om trykkpåkjent utstyr”. Formålet med denne forskriften er å sikre at trykkpåkjent utstyr og sammenstillinger som gjøres tilgjengelige på markedet oppfyller grunnleggende sikkerhetskrav.

Forskriften gjelder for konstruksjon, produksjon og samsvarsvurdering av trykkpåkjent utstyr som har et tillatt maksimalt overtrykk på 0,5 bar eller mer. En samsvarsvurdering vil si at produsenten viser at produktet oppfyller de sikkerhetskravene som er fastsatt i relevante forskrifter.

I forskriften om trykkpåkjent utstyr beskrives det forpliktelser for både produsenten, representanter for produsenten, importøren og distributøren. Kort forklart har disse til felles at de må kontrollere at trykkpåkjent utstyr er konstruert og produsert i samsvar med gjeldende forskrifter, samt at alt trykkpåkjent utstyr er CE-merket før det selges til kunde.

CE-merket finnes på en rekke ulike produkter, slik som medisinsk utstyr, maskiner, leker etc. CE-merkingen er utarbeidet av EU og er det synlige beviset på at produktet ansees å oppfylle kravene som er fastsatt i ett eller flere av ”ny metode” (The New Legislative Framework) direktivene/forordningene.

Når et produkt CE-merkes er det en deklarasjon på at produsenten garanterer og tar ansvar for at alle krav som stilles i direktivene/forordningene ansees å være oppfylt. CE-merkingen sier ikke noe om produktets generelle brukskvalitet, men at visse minstekrav til helse, miljø og sikkerhet er oppfylt.

For enkelte produkter kan produsenten selv foreta samsvarsvurderingen, men ved risikofylte produkter slik som medisinsk utstyr kreves det at en uavhengig tredjepart, et såkalt teknisk kontrollorgan utfører samsvarsvurderingen. Når CE-merket påføres et produkt skal det være godt synlig, lesbart og det skal vanskelig kunne fjernes.

Forskrift om trykkpåkjent utstyr er funnet hos Lovdata [25], mens teori om CE-merking er hentet fra Standard Norge [32].

5.2 Standarder

”En teknisk standard er en etablert norm eller krav til hvordan et produkt bør utarbeides og produseres, eller hvordan en tjeneste eller arbeidsprosess bør utføres. Vanligvis er standarden i form av et formelt dokument som for eksempel fastsetter dimensjoner, materialer, kvaliteter, prøvingsmetoder, funksjons- og sikkerhetskrav, systemer, prosesser og terminologi.” [24]

Relevante standarder for dette prosjektet er:

- NS-EN 13445, ikke-fyrte trykkbeholdere
- ASME, Boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Pressure Vessels

5.3 Hydroforming av metallplater

Det hydrostatiske trykket som trengs for å forme metallplaten etter matrisen bestemmes av platens minste radius, platens tykkelse og dens materialegenskaper. Nødvendig formingstrykk kan beregnes med formelen:

$$p_f = \frac{t \cdot R_m}{r_s} \quad (5.1)$$

Ved å endre ligningen til å gjelde for minste radius får man:

$$r_s = \frac{t \cdot R_m}{p_f}, \quad (5.2)$$

hvor:

t = platetykkelse
 r_s = innside radius
 R_m = strekkfasthet
 p_f = formingstrykk

Kraften som trengs for å holde lokk og trykkammer sammen beregnes med formelen:

$$F_{L,tot} = A \cdot p_f, \quad (5.3)$$

hvor:

$F_{L,tot}$ = trykkraft som virker på lokk og bunn
 A = overflateareal til topp eller bunn av trykkammeret
 p_f = formingstrykk

Teori om metallplate-hydroforming er hentet fra *Singh*, [41]

5.4 Materialer passende til hydroforming

Å velge et materiale for et produkt er en funksjon av mange, ofte motstridende krav. Et produkt som skal være konkurransedyktig må overholde mål som pris, vekt, funksjon og kvalitet. Ved produksjon av store serier er materialkostnaden en betydelig del av sluttsummen og det må derfor velges materialer med omhu. For metallplate-hydroforming kan man bruke de samme materialene som ved strekking, f.eks. aluminium, messing, stål, rustfritt stål, kobber, titan, bly og inconel [11].

Et materiales mekaniske egenskaper fås ved å gjennomføre strekkprøving. For duktile materialer er de mest brukte egenskapene:

- Elastisitetsmodul, E
- Flytegrense, R_e
- Poissons tall, ν
- Strekkfasthet, R_m
- ArbeidsherdningsekspONENT, n
- Plastisk tøyningforhold, r

Disse mekaniske egenskapene former basisen for å beregne parametere i hydroformingsprosessen, for å gjøre beregninger og for å gjennomføre FEM-analyser.

Materialets elastiske område

Når lasten under strekkprøvingen bygger seg opp er forlengelsen relativt liten helt til man når materialets flytegrense. Sammenhengen mellom spenning og tøyning opp til flytegrensen er lineær, slik det vises i figur 5.1a. Hvis man fjerner lasten i dette området vil materialet gå tilbake til sin opprinnelige form og derfor kalles dette det elastiske området. Materialets ytelse i det elastiske området er kvantifisert av tre mekaniske egenskaper:

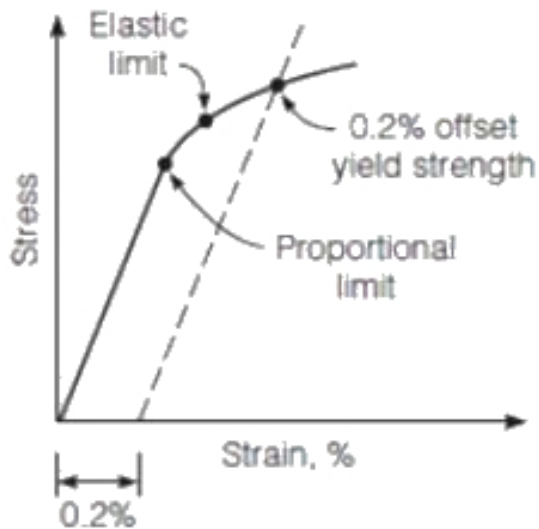
- Elastisitetsmodulen, E
- Flytegrensen, R_e
- Poissons tall, ν

Elastisitetsmodulen er skråningen i den elastiske delen av kurven som vist i figur 5.1a. Forholdet mellom spenning og tøyning i den elastiske delen representeres med formelen:

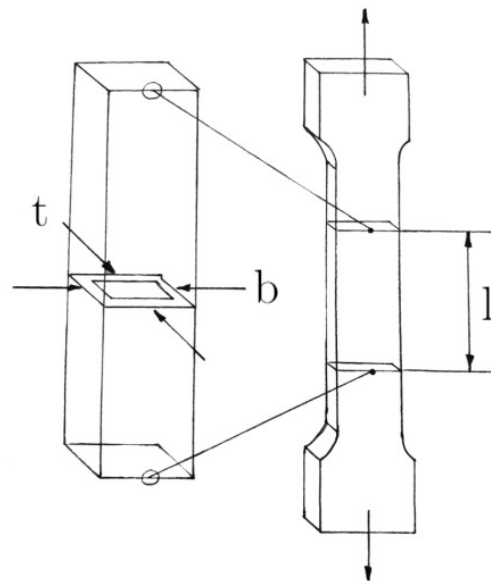
$$E = \frac{\sigma_e}{e}, \quad (5.4)$$

hvor:

- E = elastisitetsmodulen
- σ_e = spenning i det elastiske området
- e = tøyning i det elastiske området



(a) Spenning/tøyning kurve som viser hvordan man fastsetter flytegrensen ved 0,2% tøyning. Til venstre i figuren ser man at sammenhengen mellom spenning og tøyning er lineær.[22]



(b) Tverrkontraksjon og lengdeforandring av en prøvestav under strekkprøving.

Figur 5.1: Strekkprøve av prøvestav med tilhørende kurver for spenning og tøyning.

Materialets flytegrense er som oftest bestemt ved å trekke en linje med samme helning som den elastiske delen, fra punktet med 0,2% tøyning. Dette kan sees i figur 5.1a.

Når materialet er i den elastiske delen og strekkes i lengderetning vil bredden av materialet trekke seg sammen, slik det er vist i figur 5.1b. Forholdet mellom tverrkontraksjon og lengdeforandring kalles *Poissons tall* og finnes med formelen:

$$\nu = \frac{\epsilon_b}{\epsilon_l}, \quad (5.5)$$

hvor:

- ν = Poissons tall
- ϵ_b = tverrkontraksjon
- ϵ_l = lengdeforandring

Materialets plastiske område

Når lasten under strekkprøven er så stor at man overstiger materialets flytegrense kommer man over i det plastiske området. Når lasten fjernes i dette området vil materialet være permanent deformert og det er dette som skjer i alle metallformingsprosesser. Når en prøvestav har nådd flytegrensen og lasten økes vil hele lengden l i figur 5.1b forlenges jevnt opp til strekkfastheten. Dette er det ideelle området for å forme materialer til ønsket form. Materialets ytelse i det plastiske området er kvantifisert av de mekaniske egenskapene:

- Strekkfasthet
- Jevn forlengelse
- Prosentvis forlengelse
- ArbeidsherdningsekspONENT (n)
- Plastisk/tøynings forhold (r)

Under fasen med jevn forlengelse, når lengden til prøvestaven øker, vil også tverrsnittet reduseres. *Engineering* spenning- og tøyningsverdier er beregnet ved å bruke prøvestavens initielle dimensjoner og uten å ta hensyn til forandringene som skjer under fasen med jevn forlengelse:

$$\sigma_e = \frac{F}{A_0} \quad (5.6)$$

$$e = \frac{\Delta l}{l_0}, \quad (5.7)$$

hvor:

- σ_e = engineering spenning
- F = kraft på prøvestaven
- A_0 = det initielle arealet til prøvestaven
- e = engineering tøying
- Δl = prøvestavens forlengelse
- l_0 = prøvestavens opprinnelige lengde

Ved å bruke verdier fra *true*-spenning- og tøyningsverdier kan man mer nøyaktig beskrive materialeegenskapene med formlene:

$$\sigma_t = \frac{F}{A_i} \quad (5.8)$$

$$\epsilon = \int \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_i}{l_0} \quad (5.9)$$

hvor:

- σ_t = true spenning
- F = kraft på prøvestaven
- A_i = momentant areal
- ϵ = true tøying
- \ln = den naturlige logaritmen

- l_i = momentan lengde på prøvestaven
- l_0 = opprinnelig lengde på prøvestaven

Momentan lengde beregnes med formelen:

$$l_i = l_0 + \Delta l \quad (5.10)$$

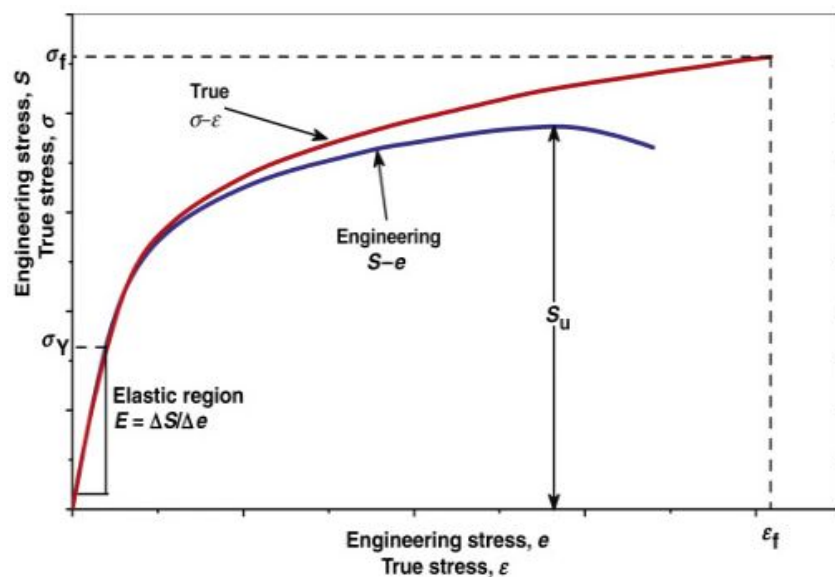
True tøyning kan også formuleres ved å bruke engineering tøyning:

$$\epsilon = \ln(1 + e) \quad (5.11)$$

True spenning kan også formuleres ved engineering spenning og engineering tøyning:

$$\sigma_t = \sigma_e(1 + e) \quad (5.12)$$

I figur 5.2 nedenfor kan man se illustrert kurver for engineering og true spenning/tøyning. Kurven for true spenning representerer virkeligheten best siden den tar høyde for prøvestavens tverrkontraksjon.



Figur 5.2: Sammenligning av engineering og true spenning/tøyningskurver. Blå kurve representerer engineering spenning/tøyning og rød kurve representerer true spenning/tøyning. [10]

Teori om materialer passende til hydroforming er hentet fra Singh, [41]

5.5 Hydraulikk

En nøyaktig definisjon av begrepet hydraulikk kan uttrykkes slik:

”Hydraulikk er den del av hydrodynamikken som omfatter læren om væskers egenskaper og oppførsel, i ro eller i bevegelse, i forhold til tilgrensede overflater eller legemer.” [5, s. 7]

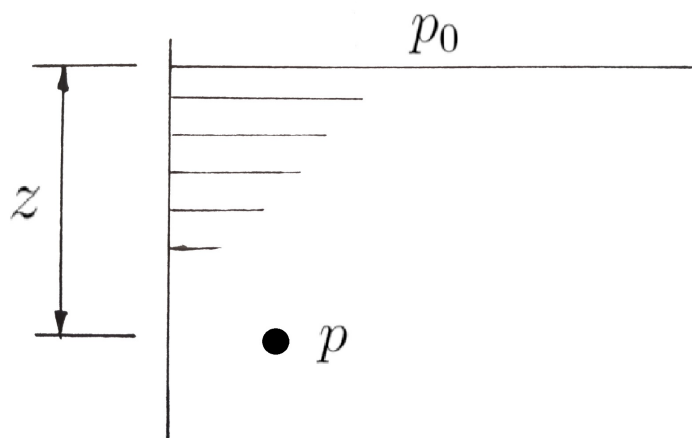
5.5.1 Hydrostatikk

I dette prosjektet blir en pumpe brukt til å omforme mekanisk energi til hydrostatisk energi. Hydrostatikk omhandler væsker som er i ro og generelt gjelder det at trykket i et punkt er likt i alle retninger. Trykket virker alltid normalt på en flate (plan eller krum) og den tilhørende kraften i en vilkårlig retning vil være lik kraften som trykket utøver vinkelrett på flatens projeksjon.

Tyngdekraften har innvirkning på trykket i en væske, og kan formuleres slik:

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot z, \quad (5.13)$$

der p_0 er trykket på den frie overflaten, z er dybden målt vinkelrett fra den frie overflaten, g er tyngdekraft og ρ er væskens densitet. Se figur 5.3. I oljehydraulikk kan man så å si alltid se bort fra tyngdens bidrag til trykket ($\rho g z \approx 0$).



Figur 5.3: Et åpent kar med en væske som står i ro. p_0 er trykket ved væskens overflate og punktet p har en avstand z fra overflaten.

5.5.2 Hydraulikkvæsker

Væsken som brukes i hydroformingsprosessen er hovedsakelig vann med et innhold av 5-10% smøremiddel [41]. Smøremiddelet sørger for at hydraulikksystemet fungerer optimalt. I tillegg til smøremidler er det små mengder med tilsetninger som sørger for korrosjonsbeskyttelse, hurtigtørking og desinfeksjon.

Hydraulikkvæske basert på mineraloljer består av en blanding av utvalgte smøreoljer pluss kjemiske tilsetninger som gir væsken ønskelige egenskaper. Fra råoljen raffineres basisoljen fra de tre hovedgruppene av hydrokarboner; aromater, naftener og parafiner. For oljehydraulikk er de beste oljene basert på parafiner. Ved bruk av mineralolje må man påse at pakninger tåler å være i kontakt med væsken da naturgummi ikke er motstandsdyktig mot dette. Syntetiske gummier som tåler å være i kontakt med hydraulikkolje er blant annet nitril, neopren, silikoner og fluorkarbongummi.

Organiske hydraulikkoljer blir presset fra frø og hører til i en kjemisk familie kalt naturlige estere. Frøene som blir mest brukt kommer fra soya, solsikke og raps. Organiske hydraulikkoljer kom på markedet i begynnelsen av 90-tallet og har blitt akseptert av industrien som en olje med mange gode egenskaper. Organiske oljer har flere egenskaper som er bedre enn mineraloljer: Høyere flammepunkt, bedre smøring og de er nedbrytbare og ikke-giftige som gjør at de kan brukes i områder hvor man må skåne miljøet. Selvfølgelig er det noen områder hvor organiske oljer ser seg slått av mineraloljer: De er mindre motstandsdyktige mot oksidering og de kan ikke brukes i like lave temperaturer som mineralolje.

Vann/glykol blandinger er brannhemmende og består vanligvis av 40-50% vann, glykol og et vannløselig tykningsmiddel som øker viskositeten. For å få bedre smøreegenskaper og for å hindre skumming og rust blir det nyttet spesielle tilsetninger. Vann/glykol blandinger angriper metallene Cd, Zn, Al og Mg. Når det kommer til pakninger kan man stort sett bruke pakninger som er beregnet for mineralolje.

Miljøtilpassede oljer

Betegnelsen miljøtilpassede oljer brukes om biologisk nedbrytbare oljer som ikke er giftige overfor mennesker, dyr, fisk, bakterier eller planter. Giftigheten måles gjennom Water Hazard Class (WHC) og inndeles i følgende klasser:

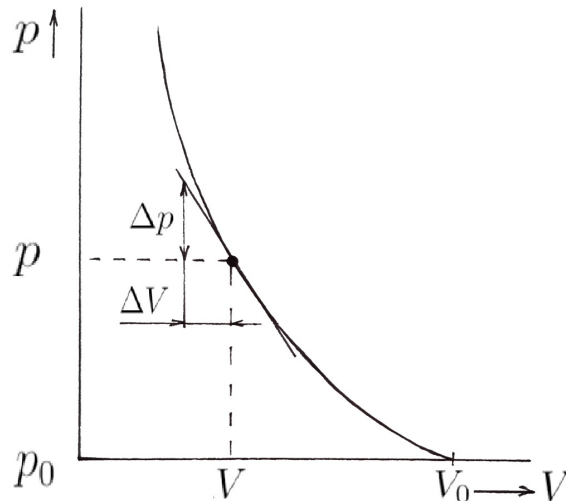
- WHC = 0 påvirker ikke vannkvaliteten.
- WHC = 1 innebærer meget liten påvirkning på vannkvaliteten.
- WHC = 2 påvirker vannkvaliteten
- WHC = 3 vesentlig påvirkning på vannkvaliteten.

Kompressibilitet i væsker

Hvis trykket i en væske øker vil volumet minske, og dette er fordi væsken er kompressibel. I figur 5.4 vises en generell trykkstigning når en væske blir komprimert fra volum V_0 . Hvis man har en væske med trykk p_0 og volum V_0 , og så øker trykket til p , vil volumendringen ΔV være:

$$\Delta V = \frac{-1}{K} \cdot V_0 \cdot \Delta p, \quad (5.14)$$

hvor $\Delta p = p - p_0$. En negativ volumendring betyr at det er volumminking. Symbolet K kalles for kompressibilitetsmodulen, og jo høyere K er, jo mindre blir volumendringen på grunn av trykkøkning. Slik kompressibilitetsmodulen er definert ovenfor brukes den til å beregne den totale kompresjonen på grunn av en bestemt trykkdifferanse.



Figur 5.4: Kompressibiliteten til en væske fremstilt som en funksjon av trykk og volum.

Teori om hydraulikk er hentet fra *Brautaset*, [5]

5.6 Trykkbeholdere

Som navnet tilsier er en trykkbeholder en beholder som holder på et trykk, som kan komme av en komprimert gass eller væske. En trykkbeholder kan ha forskjellige utforminger, men sylindriske trykkbeholdere er gunstige for å spre kreftene likt i beholderen. I dette delkapittelet blir det gjort rede for beregninger av tynnveggt og tykkvegget sylinder samt sirkulære og rektangulære lokk.

5.6.1 Tynnvegget sylinder

Teorien for tynnveggede beholdere er utviklet fra vanlige likevektsbetraktninger der man beregner en midlere spenning i tankveggen. Følgende benevnelser brukes:

r_y = ytre radius.

r_i = indre radius.

r_m = midlere radius.

l = lengde.

σ_t = tangentail spenning.

σ_r = radial spenning.

σ_a = aksial spenning.

s_o = tankveggens tykkelse ubelastet.

p_i = indre overtrykk i tanken.

p_y = ytre overtrykk i tanken.

Teorien for tynnveggede beholdere brukes når:

$$\frac{s_o}{r_m} \leq \frac{1}{10} \quad (5.15)$$

Kraften F_y kommer fra det indre trykket som virker på det projiserte arealet i et lengdesnitt gjennom røret. Kraften F_y holdes i likevekt av tangentialkraften F_t i rørveggen. Uttrykket for den midlere tangentialspenningen finnes ved:

$$F_y - 2F_t = p_i \cdot 2 \cdot r_m \cdot l - 2\sigma_t \cdot s_o \cdot l = 0 \Rightarrow \sigma_t = \frac{p_i \cdot r_m}{s_o} \quad (5.16)$$

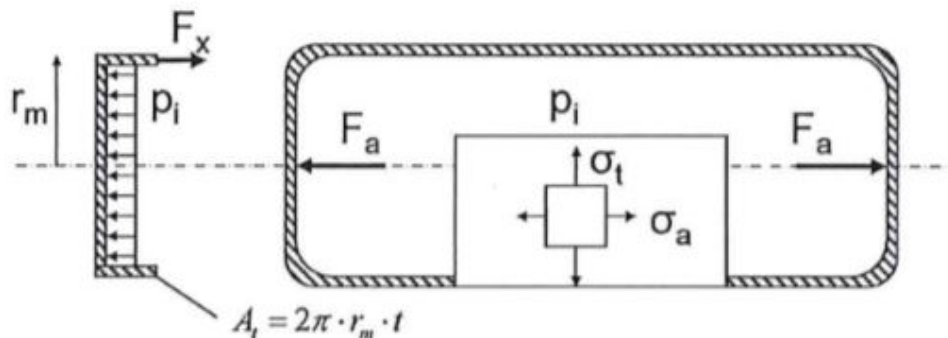
Den midlere radien settes til:

$$r_m = \frac{r_y + r_i}{2} \quad (5.17)$$

Radialspenningen settes lik 0 i tynnvegget beholder: $\sigma_r = 0$

I beholdere med endelokk kan man finne et uttrykk for aksialspenningen i sylinderveggen ved å gjøre en enkel likevektsbetraktning i horisontalretningen. I hver ende av cylinderen virker det indre trykket på et sirkulært snitt normalt på lengderetningen, som fører til kraften F_a . F_a holdes i likevekt av aksialkraften F_x i rørveggen. Se figur 5.5. Uttrykket for aksialspenningen utledes slik:

$$F_a - F_x = p_i \cdot \pi \cdot r_m^2 - \sigma_a \cdot 2\pi \cdot r_m \cdot s_o = 0 \Rightarrow \sigma_a = \frac{p_i \cdot r_m}{2 \cdot s_o} \quad (5.18)$$



Figur 5.5: Snitt av en tynnvegget beholder med endelokk. Som en forenkling regner man kun med aksial- og tangentiell spenning.

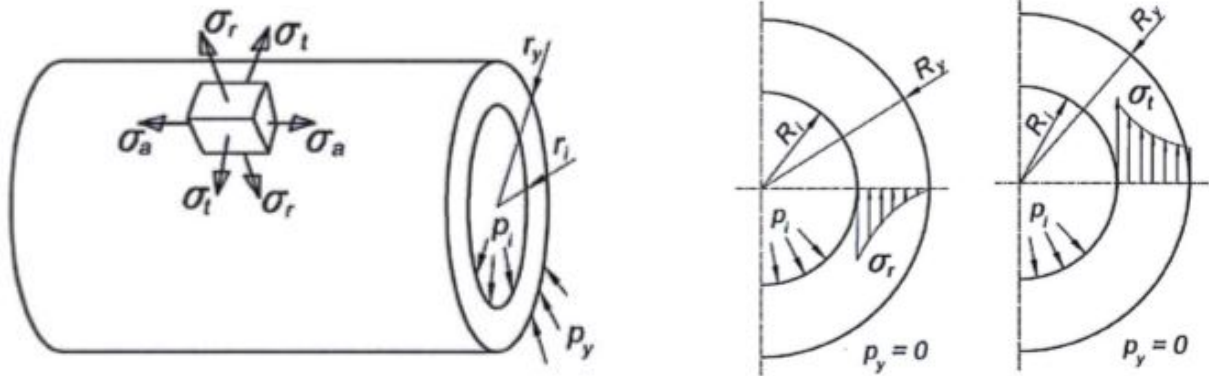
Formlene for tynnveggede sylindere er basert på forenklinger. Spenningen i rørveggen antas å være konstant, tykkelsen på tankveggen regnes som ubelastet, trykket antas å virke på hele middeleradiusen og tverrsnittsarealet blir sett på som et utbrettet rektangel.

5.6.2 Tykkvegget sylinder

Teorien for tykkveggede beholdere brukes når:

$$\frac{s_o}{r_m} \geq \frac{1}{10} \quad (5.19)$$

I figur 5.6 vises spenningene som virker på en tykkvegget sylinder.



(a) Spenninger, trykk og radier i en tykkvegget sylinder.

(b) Radiell og tangentiell spenningsplott i en tykkvegget sylinder

Figur 5.6: Tykkvegget sylinder med tilhørende symboler.

Formlene for disse spenninger gjelder ved indre overtrykk:

$$\sigma_r = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 - \left(\frac{r_i}{r}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2} \quad (5.20)$$

$$\sigma_t = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 + \left(\frac{r_i}{r}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2} \quad (5.21)$$

$$\sigma_a = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2} \quad (5.22)$$

Ekstremalverdier for σ_r :

$$\sigma_{r,min} = -p_i, \text{ n\aa}r \ r = r_i \quad (5.23)$$

$$\sigma_{r,maks} = 0, \text{ n\aa}r \ r = r_y \quad (5.24)$$

Ekstremalverdier for σ_t :

$$\sigma_{t,min} = \frac{\left[2\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2}, \text{ n\aa}r \ r = r_y \quad (5.25)$$

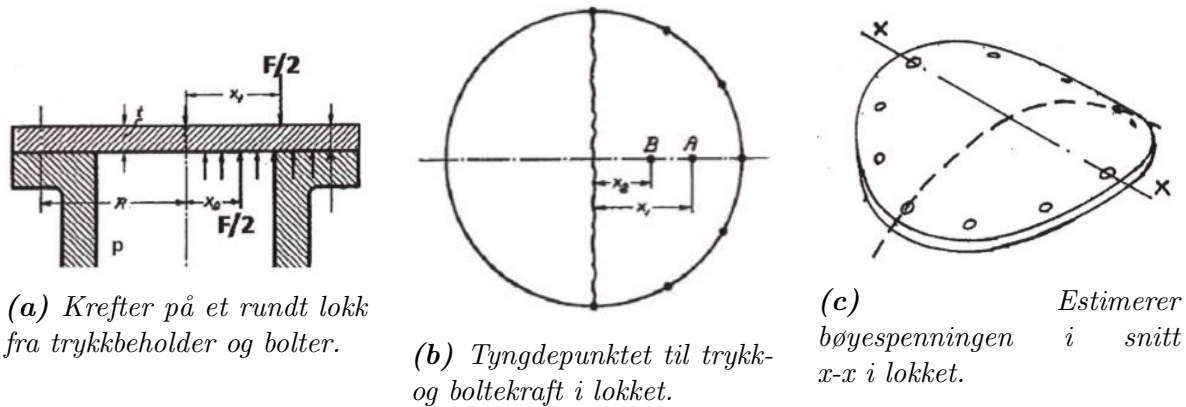
$$\sigma_{t,maks} = \frac{\left[\left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2 + 1\right] \cdot p_i}{1 - \left(\frac{r_i}{r_y}\right)^2}, \text{ n\aa}r \ r = r_i \quad (5.26)$$

I tykkveggede sylindere oppstår det tre-akset spenning og man beregner den jevnførende von Mises spenningen med formelen:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} \quad (5.27)$$

5.6.3 Estimering av tykkelse for rundt flatt lokk

I figur 5.7a nedenfor vises et flatt, rundt lokk som ligger an mot flensen til en trykkbeholder med et indre trykk "p". Delesirkelen "r" viser hvor lokket er festet med et antall skruer og det antas at forbindelsen er tett fra delesirkelen og ut.



Figur 5.7: Figuren viser hvordan kreftene fra trykkbeholder og skruer virker på lokket. Tyngdepunktet til disse kreftene samt tilhørende bøyespenning vises i et diametersnitt.

Den totale trykkraften på lokket er lik den totale reaksjonskraften fra skruene og beregnes med formel 5.3.

I figur 5.7b er det gjort et diametersnitt og man ser på bøyespenningen i dette snittet som vises i snitt x-x i figur 5.7c. På en halvdel av lokket virker kraften $F/2$. Det antas at det er så mange skruer at skruerkraften virker jevnt i delesirkelradien. Resultantkraften fra skruene virker i tyngdepunktet til halve skruesirkelen. Tyngdepunktet vises i punkt A i figur 5.7b.

Resultantkraftens tyngdepunkt beregnes med formelen:

$$X_1 = \frac{2r}{\pi} \quad (5.28)$$

Punkt B i figur 5.7b viser avstanden fra resultantkraften forårsaket av beholdertrykket til diagonalsnittet. Avstanden finnes med formelen:

$$X_2 = \frac{4r}{3\pi} \quad (5.29)$$

Momentet i diagonalsnittet er:

$$M_b = 0,5F(X_1 - X_2) \quad (5.30)$$

Som også kan skrives på formen:

$$M_b = \frac{p \cdot r^3}{3} \quad (5.31)$$

Motstandsmomentet til diagonalsnittet kan skrives:

$$W_b = \frac{r \cdot t^2}{3} \quad (5.32)$$

Bøyesspenningen blir da:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{p \cdot r^2}{t^2} \quad (5.33)$$

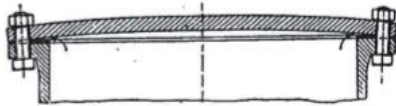
Hvor langt ut i pakningen trykket opptrer har en innvirkning på spenningene i lokket. Det blir derfor en usikkerhet i beregningsantagelsene og man legger derfor på 20%:

$$\sigma_b = \frac{1,2 \cdot p \cdot r^2}{t^2} \quad (5.34)$$

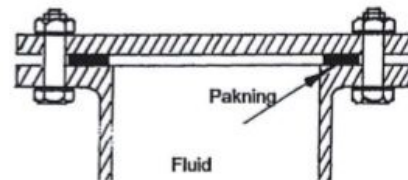
For å beregne nødvendig tykkelse på lokket kan formelen omformuleres til:

$$t = \sqrt{\frac{1,2 \cdot p \cdot r^2}{\sigma_b}} \quad (5.35)$$

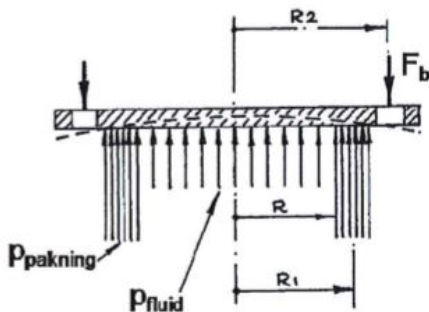
Dersom pakningen er plassert slik at lokket blir utsatt for bøyning når skruene trekkes til kan spenningene i lokket øke. I figur ?? vises et lokk hvor pakningen er plassert på innsiden av skruene med tilhørende trykk og tyngdepunkt. Det er også vist estimeringsverdier for kreftene som inngår i momentlikningen.



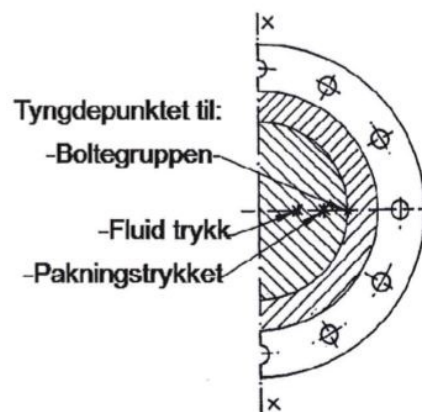
(a) Utbøyning av lokk (vist overdrevet) ved forspenning av skruene.



(b) Lokk med pakning plassert på innsiden av skruene.

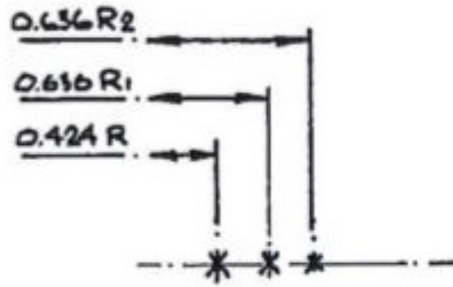


(c) Krefter fra skruer, pakning og fluidtrykk som virker på lokket.



(d) Tyngdepunkt til skruegruppen, fluidtrykket og pakningstrykket vises med piler.

Figur 5.8: Flatt lokk med pakningen på innsiden av skruene.



(e) Estimeringsverdier for kreftene som inngår i momentlikningen.

Figur 5.8 forts: Flatt lokk med pakningen på innsiden av skruene.

For å finne trykkraften bruker man samme beregningsmodell som tidligere, men man tar hensyn til pakningens innvirkning.

$F_{a,tot}$ = total kraft i boltene

$F_{K,tot}$ = total kraft fra pakningen

$F_{L,tot}$ = total kraft fra fluidet på lokket

Total kraft fra fluidet på lokket beregnes med formel 5.3.

Momentlikningen blir:

$$M_b = M_{xx} = \frac{F_{a,tot} \cdot 0.636 \cdot r_2}{2} - \frac{F_{K,tot} \cdot 0.636 \cdot r_1}{2} - \frac{F_{L,tot} \cdot 0.424 \cdot r}{2} \quad (5.36)$$

Motstandsmomentet er tilnærmet:

$$W_b \approx \frac{r_2 \cdot t^2}{3} \quad (5.37)$$

Bøyepeningen blir da:

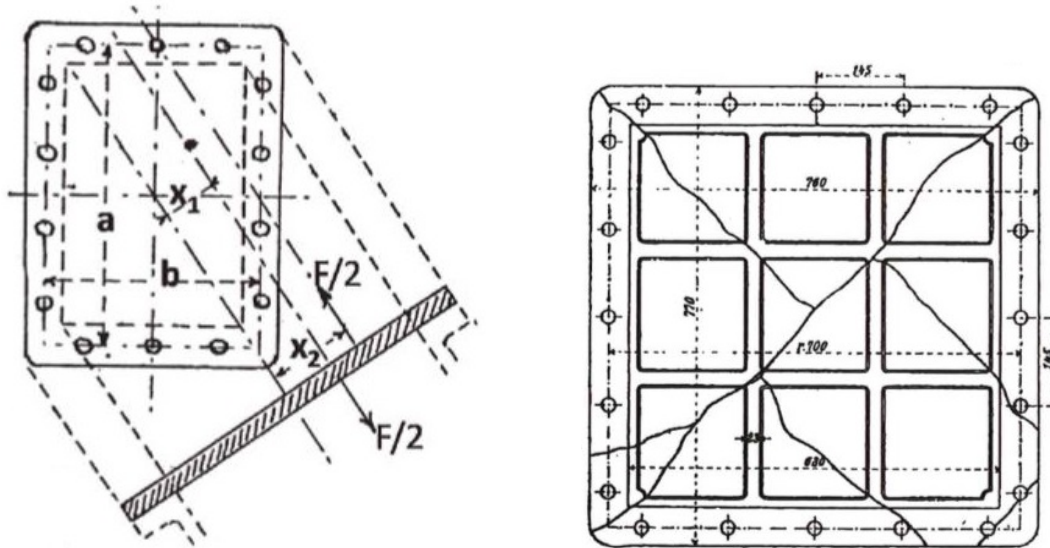
$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{3 \cdot M_b}{r_2 \cdot t^2} \quad (5.38)$$

På grunn av usikkerheter i beregningene legger man på 20%:

$$\sigma_b = \frac{3.6 \cdot M_b}{r_2 \cdot t^2} \quad (5.39)$$

5.6.4 Estimering av tykkelse for firkantet flatt lokk

Av erfaring ser man ofte at plane firkantede lokk som er påkjent med et jevnt fordelt trykk får brudd i diagonalen. På grunn av dette er det vanlig å dimensjonere disse med hensyn på bøyepeningen i diagonalsnittet. I figur 5.9a ser man et firkantet lokk med sidekanter "a" og "b" (ut til skruelinjen) som er belastet med et trykk p. Figur 5.9b viser brudd i et kvadratisk lokk med ribber.



(a) Rektangulært lokk med kraftens og reaksjonskraften avstand fra diagonallinjen.

(b) Brudd i kvadratisk lokk med ribber.

Figur 5.9: Firkantede lokk påkjent av jevnt fordelt trykk får ofte brudd i diagonalen.

Kraften på halve platen med trekantform kan skrives:

$$0.5F = 0.5 \cdot a \cdot b \cdot p \quad (5.40)$$

Kraftens avstand fra diagonallinjen blir:

$$x_1 = \frac{a \cdot b}{3\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5.41)$$

Reaksjonskreftene langs sidene "a" og "b" er totalt på $0.5F$. Hvis denne kraften regnes forenklet til å være jevnt fordelt over lengden $(a + b)$, vil angrepspunktets avstand fra diagonaltverrsnittet være:

$$x_2 = \frac{a \cdot b}{2\sqrt{a^2 + b^2}} \quad (5.42)$$

Bøyemomentet som de to kreftene danner blir da:

$$M_b = 0.5 \cdot F(x_2 - x_1) \quad (5.43)$$

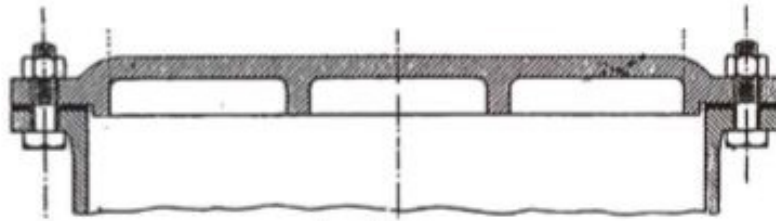
Forenkler vi motstandsmomentet til:

$$W_b \approx \frac{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot t^2}{6}, \quad (5.44)$$

og legger til 20% for usikkerhet i beregningsmodellen, blir bøyepeningen:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{1.2 \cdot 0.5 \cdot F(x_2 - x_1)}{\frac{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot t^2}{6}} = \frac{3.6 \cdot F(x_2 - x_1)}{\sqrt{a^2 + b^2} \cdot t^2} \quad (5.45)$$

Ved å legge ribber på trykksiden av lokket forsterkes lokket betydelig. Tverrsnittsmodulem må selvsagt tilpasses tverrsnittet i diagonalen. Se figur 5.10 nedenfor.



Figur 5.10: Boltet flens hvor lokket er forsterket med ribber på trykksiden.

Teori og figurer om sylindere og estimering av tykkelse på lokk er hentet fra *Terjesen*, [44]

5.6.5 Svikt i trykkbeholdere

Svikt i trykkbeholdere forekommer og dette kan bli delt inn i fire kategorier som beskriver *hvorfor* det skjedde. Videre kan man dele inn i typer svikt, som beskriver *hvordan* det skjedde. Hver svikt har en historie, og kan f.eks. ha sviktet *gjennom* korrosjon *fordi* man valgte feil materiale.

Kategorier av svikt

- Materiale: Man har valgt feil materiale, eller det kan være defekter i materialet.
- Design: Man kan ha et dårlig design, feil design data eller utilstrekkelig testing av designet.
- Produksjon: Dårlig kvalitetskontroll, utilstrekkelige sveiseprosedyrer og varmebehandling.
- Bruk og vedlikehold: Vedlikehold blir ikke opprettholdt av bruker, bruker har ikke tilstrekkelig kunnskap om bruk av utstyret.

Typer svikt

- Sprøbrudd: Kan forekomme ved lave temperaturer. Sprøbrudd har skjedd i trykkbeholdere lagd av lavlegert karbonstål i temperaturområdet 5-10 °C. Testen var en hydrotest og trykkbeholderen hadde mindre skader.
- Overflødig plastisk deformasjon: Spenningene blir for store og man får brudd eller kollaps i trykkbeholderen.
- Kryp: Krypdeformasjon som følge av sykliske påkjenninger og utmatting.
- Høy belastning - lavsykelutmatting: Forekommer hovedsaklig i materialer med lav styrke og høy duktilitet.
- Sprekkdannelse pga. korrosjon: Væsker kan korrodere trykkbeholderen og det er fare for sprekkdannelse. Det er godt kjent at klorid kan føre til korrosjonsprekkdannelse i rustfritt stål.

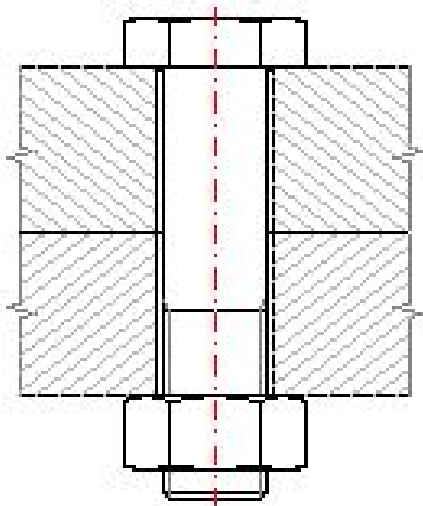
- Utmatting pga. korrosjon: Forekommer når både korrosive og utmattende belastninger inntreffer på samme gang. Materialvalg og utmattingssegenskaper er avgjørende.

Ved design av trykkbeholdere må man finne spenningene som forekommer og sjekke de opp mot de mulige måtene svikt kan forekomme på. I tillegg til å finne relevante spenninger må man ta hensyn til geometri, stivhet og materialegenskaper. Designdetaljer og produksjonsmetoder er like viktig som maks tillatt spenning i trykkbeholdere som operer under sykliske belastninger. Den som designer trykkbeholderen må ha et klart bilde av hvilke forhold den skal operere under.

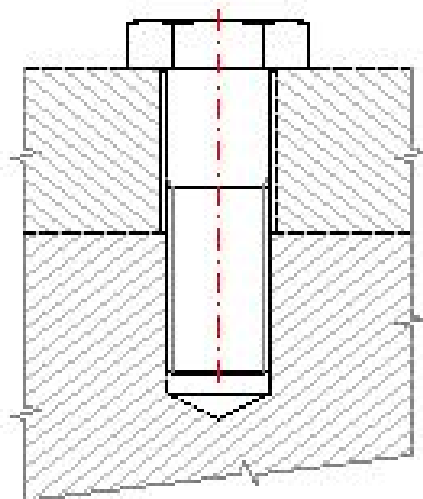
Teori om svikt i trykkbeholdere er hentet fra *Moss*, [29]

5.7 Skruer

I nesten alle konstruksjoner brukes skrueforbindelser, og skruer som holder to eller flere deler sammen kalles for *festeskruer*. Skruene kan enten føres gjennom frihull i vedkommende deler og festes med en mutter, ellers kan de gjenges direkte i gods. Se figur 5.11. *"En konstruktør bør alltid foretrekke ISO-metriske gjenger, dersom det ikke er helt spesielle forhold som tilsier noe annet."* [9]



(a) Skruer er ført gjennom frihull i både under- og overdel og festet med mutter på undersiden.



(b) Skruer er ført gjennom frihull i øverste del mens nedre del er gjenget.

Figur 5.11: Illustrasjon av de to måtene festeskruer kan festes: Festet med mutter eller gjenget direkte i gods. [28]

Gjengens middeleradius r_m er:

$$r_m = \frac{d_2}{2} \quad (5.47)$$

Friksjonsvinkelen ϵ_1 er:

$$\epsilon_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\mu}{\cos\alpha}\right) \quad (5.48)$$

Gjengens stigningsvinkel ϕ er:

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right) \quad (5.49)$$

Momentet som trengs for å løse skruen er:

$$M_v = F \cdot r_m \cdot \tan(\epsilon_1 - \phi) \quad (5.50)$$

Momentet M_v er momentet som trengs for å overvinne skruens stigningsmotstand og gjengens friksjon. Når skruens underside (eller mutterens underside) kommer i kontakt med underlaget oppstår en friksjonskraft som motvirker trekkingen. Se figur 5.13. Formelen for dette momentet er:

$$M_s = \mu' \cdot F \cdot r'_m \quad (5.51)$$

F = aksialkraften

μ' = friksjonskoeffisient mellom skruehode og underlag

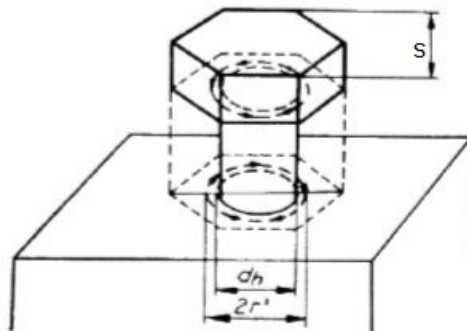
r'_m = friksjonskraftens radius

s = nøkkelvidden

d_h = hulldiameter

Friksjonskraftens radius r'_m er:

$$r'_m = \frac{s + d_h}{4} \quad (5.52)$$



Figur 5.13: Ved tiltrekking av skruen oppstår det friksjon mellom skruehode og underlag. I figuren er skruen løftet opp fra underlaget for å lettere kunne illustrere hvordan friksjonen fungerer. [17]

Totalt moment for å trekke til en skrue blir da:

$$M = M_v + M_s \quad (5.53)$$

Friksjonskoeffisientene μ og μ' varierer etter overflaten på skruen, mutteren, underlaget og om skruen er smurt eller ikke. For ubehandlede skruer og muttere kan følgende verdier forekomme:

$$\begin{aligned} \mu &= 0.18 - 0.35 \text{ ved tørre flater} \\ \mu &= 0.14 - 0.26 \text{ ved smurte flater} \end{aligned}$$

På grunn av store variasjoner i underlaget er det vanskelig å angi tilnæringsverdier for μ' . Ved å bruke herdede underlagsskiver får man større sikkerhet i beregningene og følgende verdier kan brukes:

$$\begin{aligned} \mu' &= 0.19 - 0.35 \text{ ved tørre flater} \\ \mu' &= 0.08 - 0.18 \text{ ved smurte flater} \end{aligned}$$

5.7.2 Forspenning av skruer

For at trykkammeret ikke skal sprenges fra hverandre eller lekke når det er tilført trykk på undersiden av lokket er det nødvendig å trekke til skruene med en viss *forspenning*. Den totale kraften som virker på lokket beregnes med formelen:

$$F_{\text{lokk}} = \frac{p \cdot \pi \cdot D^2}{4} \quad (5.54)$$

hvor D = lokkets innerdiameter. Med n skruer blir belastningen på hver skrue:

$$F_l = \frac{p \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot n} \quad (5.55)$$

Avhengig av hvordan flensen tettes vil forspenningen hver skrue trenger endres. Som veiledning for forspenningskraften F_i kan man sette opp følgende verdier:

$$\begin{aligned} \text{Med myk pakning: } F_i &= F_l \\ \text{Med hard pakning: } F_i &= 1,3 \cdot F_l \\ \text{Uten pakning: } F_i &= 1,5 \cdot F_l \end{aligned}$$

Den maksimale belastningen på skruen, F_a , vil ikke være lik $F_l + F_i$. Kraften vil være mye mindre og for de tre pakningstilfellene over kan man sette:

$$\begin{aligned} \text{Med myk pakning: } F_a &\approx 1,5 \cdot F_l \\ \text{Med hard pakning: } F_a &\approx 1,7 \cdot F_l \\ \text{Uten pakning: } F_a &\approx 1,8 \cdot F_l \end{aligned}$$

Skruer som har riktig forspenning F_i vil bare bli utsatt for en brøkdel av de arbeidskreftene som opptrer parallelt med skruens akse, og som vanligvis er dynamiske. Ved

å forspenne elastiske skruer av fasthetsklasse 8.8 til 12.9 oppnår man den laveste utmattingspåkjenningen. Delene som skal forbindes bør være så stive som mulig. Høy forspenning er den beste forholdsregelen mot at skruen løsner av seg selv eller setter seg.

Hvis en stang utsettes for en strekkraft vil strekkraften gjør at stangen forlenges, og dette kan beregnes med formelen:

$$\delta = \frac{F \cdot l}{E \cdot A} \quad (5.56)$$

For stangen er E-modulen E, arealet A og lengden l konstanter, og uttrykket kan derfor forenkles til:

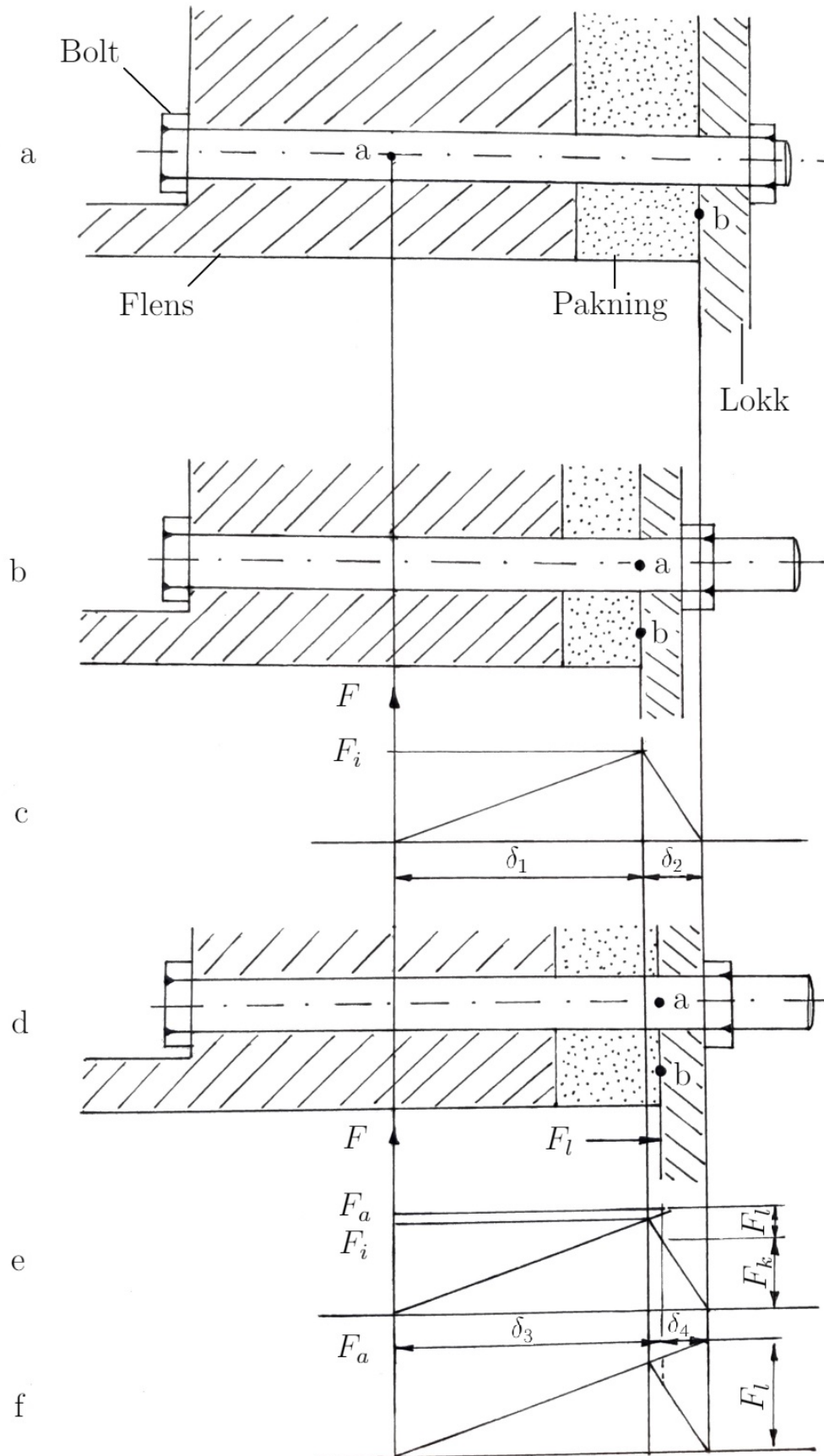
$$\frac{E \cdot A}{l} = c \quad (5.57)$$

Hvis denne konstanten settes inn i likning 5.56 får man formelen:

$$F = \delta \cdot c \quad (5.58)$$

I figur 5.14 på neste side er det vist en trykkbeholder som er tettet med en flens, pakning, lokk og skrue. Det skal nå forklares hva som skjer når skruene trekkes til og lokket belastes med et trykk fra innsiden. Bokstavene nedenfor viser til figuren:

- a) Skruen er ikke trukket til og pakningen har sin opprinnelige tykkelse.
- b) Skruen trekkes til og forlenges, og pakningen komprimeres. Punktet a på skruen har nå flyttet seg distansen δ_1 , som representerer skruens forlengelse på grunn av forspenningskraften F_i . Forspenningskraften overføres fra skruen via mutteren til lokket, som igjen komprimerer pakningen. Trykkraften på pakningen er derfor lik F_i . Distansen δ_2 som punkt b har flyttet seg representerer sammentrykningen av pakningen.
- c) $F - \delta$ - diagrammene tegnes sammen.
- d) Nå belastes lokket med kraften F_l og skruen forlenges ytterligere, mens pakningen utvider seg.
- e) δ_3 representerer nå forlengelsen av skruen, som tilsvarer en kraft F_a . δ_4 representerer sammentrykningen av pakningen, som tilsvarer kraften F_k . Differansen mellom F_a og F_k er lasten F_l . Total belastning på skruen blir $F_a = F_k + F_l < F_i + F_l$.
- f) Hvis F_l øker forlenges skruen enda mer og pakningen utvides. Hvis F_l er så stor at pakningen får sin opprinnelige form, blir $F_l = F_a$ og beholderen begynner å lekke.



Figur 5.14: Konstruksjon av et skrueidiagram vist med en boltet flens.

Tilfellet som forekommer i figur 5.14f må unngås, og det gjør man ved at forspenningskraften F_i blir gjort tilstrekkelig stor. Klemsikkerheten beregnes med formelen:

$$n_k = \frac{F_i}{F_i - F_k} \quad (5.59)$$

Ved statisk belastning bør klemsikkerheten være fra 1,5 til 2.

Som man ser av ligning 5.58 er hellingsvinkelen $c = \frac{EA}{l}$ lett å finne for skruen, men for flensen er det vanskeligere å finne arealet A som blir deformert. Det går an å beregne arealet, men det finnes følgende erfaringsverdier for forholdet $\frac{\delta_1}{\delta_2}$:

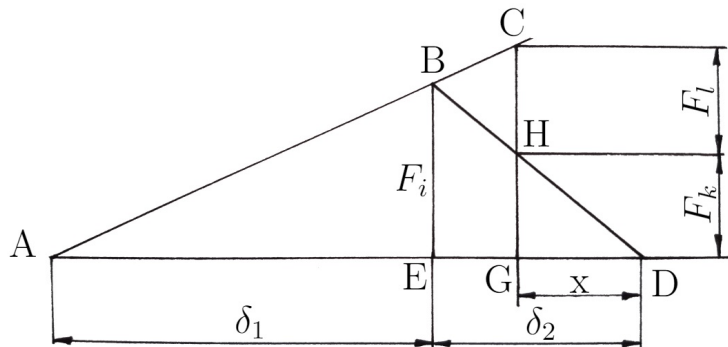
Myk pakning: $\frac{\delta_1}{\delta_2} = 0,5-1$

Hard pakning: $\frac{\delta_1}{\delta_2} = 1-2$

Uten pakning, normal flens: $\frac{\delta_1}{\delta_2} = 2-3$

Tykke flenser: $\frac{\delta_1}{\delta_2} = 4-10$

Ved hjelp av formlikhet fra figur 5.15 kan man utlede en formel for forspenningskraften F_i med variablene F_l , n_k og forholdet $\frac{\delta_1}{\delta_2}$.



$$\begin{aligned} \triangle ACG &\sim \triangle ABE \\ \triangle DEB &\sim \triangle DGH \end{aligned}$$

Figur 5.15: Nødvendig forspenningskraft kan bestemmes ved å bruke formlikhet.

Man kan sette opp følgende ligninger:

$$\frac{\delta_1}{\delta_2} = y \quad (5.60)$$

$$\delta_1 = y\delta_2 \quad (5.61)$$

$$\frac{F_l + F_k}{F_i} = \frac{\delta_1 + \delta_2 - x}{\delta_1} \quad (5.62)$$

$$\frac{F_i}{F_k} = \frac{\delta_2}{x} \quad (5.63)$$

Setter man ligning 5.61 inn i ligning 5.62 får man:

$$\frac{F_l + F_k}{F_i} = \frac{y\delta_2 + \delta_2 - x}{y\delta_2} = \frac{y+1}{y} - \frac{x}{y\delta_2} \quad (5.64)$$

Av ligning 5.63 får man:

$$x = \delta_2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n_k}\right) \quad (5.65)$$

Av ligning 5.59 får man:

$$F_k = F_i \left(1 - \frac{1}{n_k}\right) \quad (5.66)$$

Ligning 5.62 kan da skrives:

$$\frac{F_l + (F_i - \frac{F_i}{n_k})}{F_i} = \frac{y + 1}{y} - \frac{x}{y\delta_2} \quad (5.67)$$

$$\frac{F_l}{F_i} + \frac{F_i(1 - \frac{1}{n_k})}{F_i} = \frac{y + 1}{y} - \frac{x}{y\delta_2} \quad (5.68)$$

Setter inn ligning 5.65 i ligning 5.68:

$$\frac{F_l}{F_i} + 1 - \frac{1}{n_k} = 1 - \frac{1}{n_k} \frac{x}{y\delta_2} \quad (5.69)$$

Ved å løse ut for F_i får man:

$$F_i = \frac{F_l}{\frac{(\frac{1}{n_k})}{y} + \frac{1}{n_k}} \quad (5.70)$$

Ved å sette inn for kraften F_l , ønskelig klemsikkerhet n_k og forholdet $\frac{\delta_1}{\delta_2}$ får man nødvendig forspenningskraft F_i .

Total belastning på skruen F_a beregnes slik:

$$F_a = F_k + F_l \quad (5.71)$$

Ved å sette ligning 5.66 inn i ligning 5.71 får man:

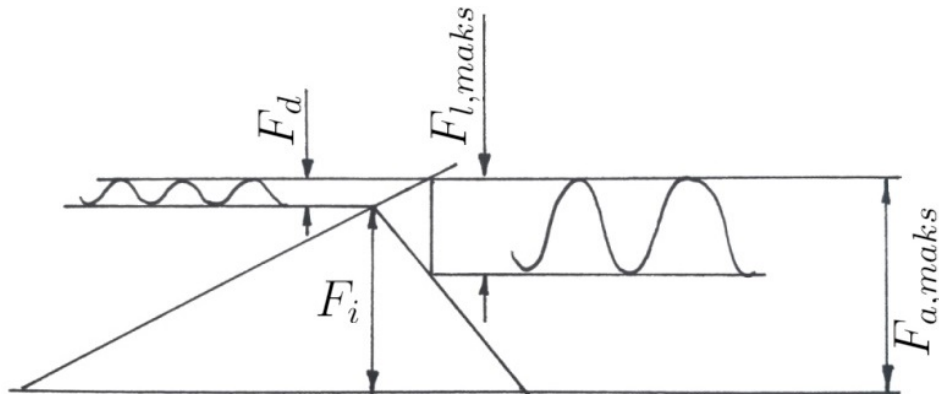
$$F_a = F_i \left(1 - \frac{1}{n_k}\right) + F_l \quad (5.72)$$

5.7.3 Dynamisk belastning

Hvis lasten F_l ikke er konstant og varierer mellom en maks- og minimumsverdi, vil den samlede belastningen F_a på skruen få sin maksimumsverdi $F_{a,maks}$ ved $F_{l,maks}$, mens skruens minste belastning aldri kan komme under forspenningskraften F_i . Det vil si at $F_{a,min} = F_i$, og i figur 5.16 vil samlet belastning variere etter kurven til venstre. Gjennomsnittskraften i skruen som bestemmer middelspenningen blir lik $F_i + \frac{F_d}{2}$ og amplituden blir $\frac{F_d}{2}$. Den samlede belastningen beregnes med formelen:

$$F_a = \left(F_i + \frac{F_d}{2}\right) \pm \frac{F_d}{2} \quad (5.73)$$

Skruen dimensjoneres for utmatting etter de vanlige reglene i fasthetslæren. Av figur 5.16 kommer det frem at F_d blir mindre, og belastningen gunstigere, jo mindre helling $F - \delta$ -linjen har. Det er derfor gunstig at skruen er fjærende, og en lang skrue gir god fjæring såfremt den er plassert i frihull.



Figur 5.16: Krefter i skruen ved dynamisk belastning.

5.7.4 Dimensjonering av skruer under strekk

En skrue som er utsatt for strekk beregnes med formelen:

$$\sigma_d = \frac{F_a}{A} \quad (5.74)$$

Det svakeste tverrsnittet i skruen er kjernen med diameter d_i . Arealet i likning 5.74 skulle da være:

$$A_i = \frac{\pi \cdot d_i^2}{4} \quad (5.75)$$

Kraften F_B som fører til brudd skal være lik $\sigma_B \cdot A_i$, men i virkeligheten viser det seg at F_B blir 5-25% større enn dette. Dette er fordi den aktive flaten er noe større enn A_i og at gjengene motvirker kontraksjonen. Begrepet *spenningsareal* A_s har blitt innført for å få riktige resultater ved beregning. A_s regnes forskjellig for de to gjengesystemene, og for metriske gjenger er formelen:

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2}\right)^2 \quad (5.76)$$

Spenningen i en skrue som er utsatt for strekk får man da av formelen:

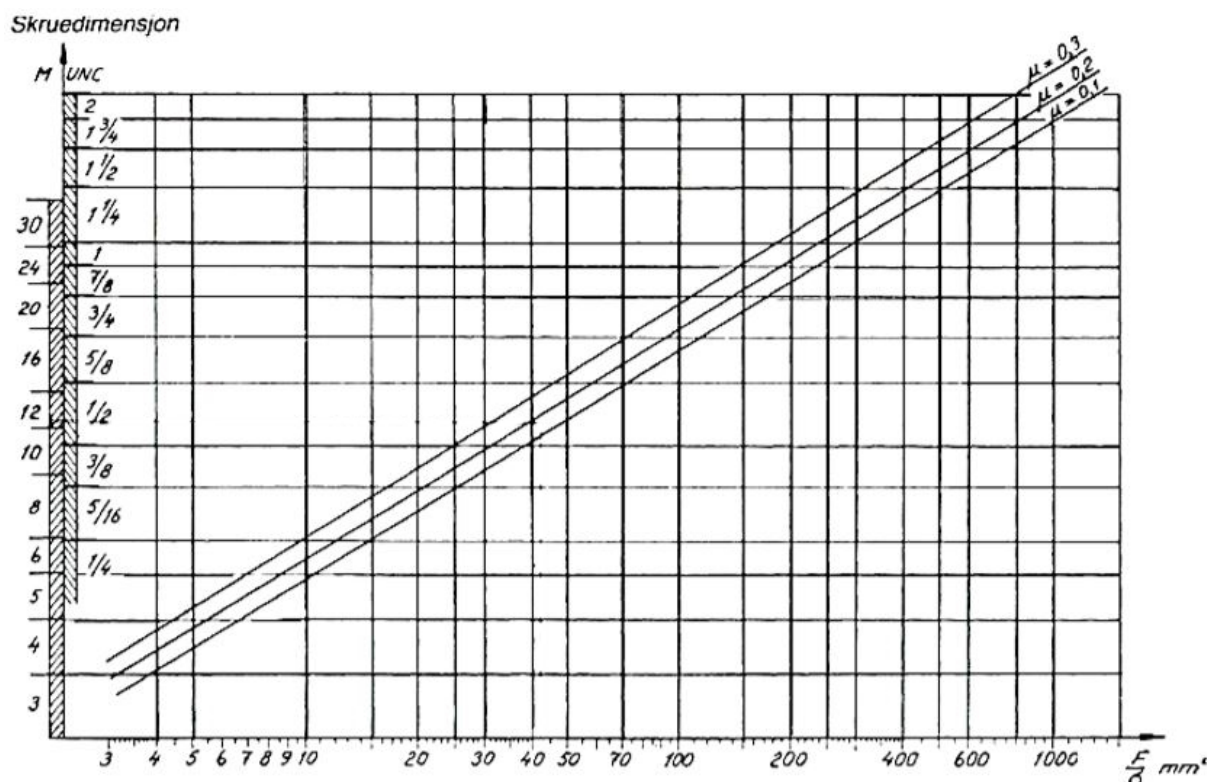
$$\sigma_d = \frac{F_a}{A_s} \quad (5.77)$$

Fordi det trengs et visst moment for å trekke til en skrue vil den bli belastet med både strekk og vridning. Momentet fører til en torsjonsspenning τ_v og en aksialkraft F . Torsjonsspenningen τ_v og den jevnførende spenningen beregnes med ligning 5.78 og 5.79. I uttrykket for M_v skal da F_i brukes.

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_v} = \frac{M_v}{\frac{\pi \cdot d_1^3}{16}} = \frac{M_v \cdot 16}{\pi \cdot d_1^3} \quad (5.78)$$

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3\tau_v^2} \quad (5.79)$$

Når man dimensjonerer skruer er det vanlig å bruke et dimensjoneringsdiagram som vist i figur 5.17. Når man vet friksjonskoeffisienten, aksialkraften og tillatt spenning i skruen kan man gå inn i diagrammet og lese av nødvendig dimensjon. Dette er en konservativ måte og det er mer nøyaktig å bruke formelene 5.77 og 5.78.



Figur 5.17: Dimensjoneringsdiagram for å velge skruedimensjon. Ved å dele aksialkraften F på skruens tillatte spenning σ_{till} får man nødvendig tverrsnittsareal på skruen. Fra arealet på x -aksen går man vertikalt opp til friksjonskoeffisienten for så å gå horisontalt og lese av skruedimensjonen på y -aksen. [17]

5.7.5 Nødvendig inngrepslengde

Inngrepslengden er antall gjenger som er i inngrep mellom skruen og det gjengede hullet. Jo mykere grunnmaterialet er, jo flere gjenger må være i inngrep. Hvis det skulle oppstå brudd vil man at det skal bli et strekkbrudd i skruen og ikke avskrelling av gjengene.

Følgende minste inngrepslengder kan tjene som veiledning ved bruk av stålskruer: I lettmetall = 2-2,5d; i bronse og messing = 1,3-1,5d; i støpejern = 1,2-1,3d og i stål = 1d. For å beregne nødvendig inngrepslengde kan følgende formler brukes som et estimat:

$$L_{gjenget\ hull} \geq \frac{R_{m,skruer}}{R_{e,gjenget\ hull}} \cdot \frac{2 \cdot A_s}{0,6\pi \cdot d} \quad (5.80)$$

$$L_{skruer} \geq \frac{R_{m,skruer}}{R_{e,skruer}} \cdot \frac{2 \cdot A_s}{0,6\pi \cdot d_2} \quad (5.81)$$

$$L_{min} \geq maks(L_{gjenget\ hull}, L_{skruer}) \quad (5.82)$$

$L_{gjenget\ hull}$ = minimum inngrepslengde i hullet

L_{skruer} = minimum inngrepslengde for skruen

L_{min} = minimum inngrepslengde

R_m = strekkfasthet

R_e = flytegrense

A_s = spenningsareal

d = nominell diameter

d_2 = middeldiameter

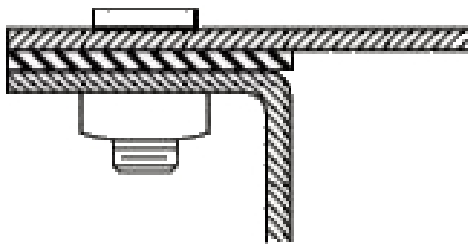
Der ikke annet er angitt er teori om skruer hentet fra *Dahlwig, Christensen, Strømsnes*, [9]

5.8 Pakningsteori

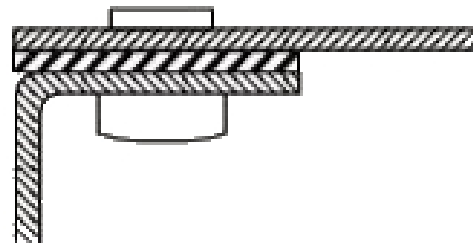
En pakning er en mekanisk tetning som hindrer lekkasje mellom to anliggende flater, enten fra utsiden av et objekt eller inn i et objekt. Per definisjon er en pakning kun nødvendig hvis overflatene i koblingen ikke har perfekte overflater. Hvis koblingen var perfekt, noe som vil si at den er uendelig stiv og helt flat, ville ikke en pakning vært nødvendig. I virkeligheten er dette veldig dyrt, om i det hele tatt mulig. Løsningen er da å bruke en pakning som fyller ujevnheter i koblingens overflater.

5.8.1 Flate pakninger

Flate pakninger er den eldste og mest populære måten å forsegle en flenskobling. Pakningene kan være stemplet, skjært eller formet til ønsket størrelse. Avhengig av hvilken applikasjon de skal brukes til kan flate pakninger være lagd av alt fra papir, gummi/fiber, eller metall. Ved bruk av flate pakninger skal ikke boltehull være nærmere kanten på flensen enn tykkelsen av pakningen. Man må også passe på at pakningen ikke deformeres mer enn 10%, sammenlignet med 15-30% for støpte og ekstruderte pakninger, og 50% for hule pakninger. Hvor det er mulig burde flensen være vendt utover slik at boltene ikke befinner seg i det trykksatte området, som vist i figur 5.18. Hvis flensen er vendt innover må pakningen passe godt rundt boltene slik at man unngår lekkasjer rundt gjengene.



(a) Flensen vender ut fra det trykksatte området.



(b) Flensen vender inn i det trykksatte området.

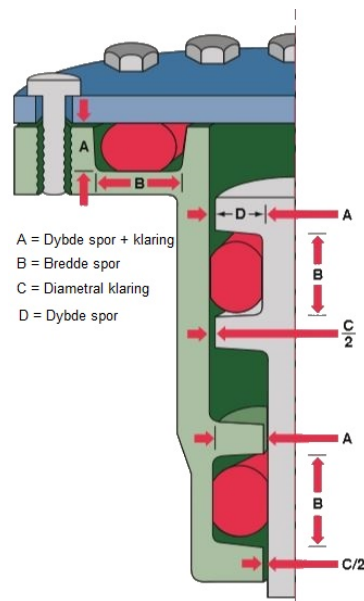
Figur 5.18: Trykkbeholder lagd av platemateriale hvor det brukes flat pakning.

Teori om flate pakninger er hentet fra *Parker Chomerics*, [6]

5.8.2 O-ringer

En o-ring er en smultringformet ring som defineres av dens diameter, tverrsnitt, hardhet og materiale. I figur 5.19 illustreres tre bruksområder for en o-ring: Statisk, hvor o-ringen ligger rolig og forsegler et lokk, og dynamisk, hvor o-ringen tetter mot et stempel eller en stempelstang. Som vist i figuren vil en riktig utformet forsegling komprimere o-ringen. Ved atmosfæretrykk er det kun elastisiteten til den komprimerte o-ringen som sørger for forsegling. Når det kommer trykk i systemet vil o-ringen tvinges til det freste sporets lavtrykkside og fylle ujevnheter mellom flatene.

Når man skal beregne tverrsnittdiameteren til o-ringen må man ta hensyn til sporet som skal fylles og hvor mye o-ringen må komprimeres for å få en god forsegling. Så godt som alle flater som ligger mot hverandre har en liten klaring, og derfor er det viktig at o-ringens tverrsnittdiameter er større enn høyden til sporet. Når o-ringen komprimeres blokkeres klaringen mellom flatene og man får en forsegling.

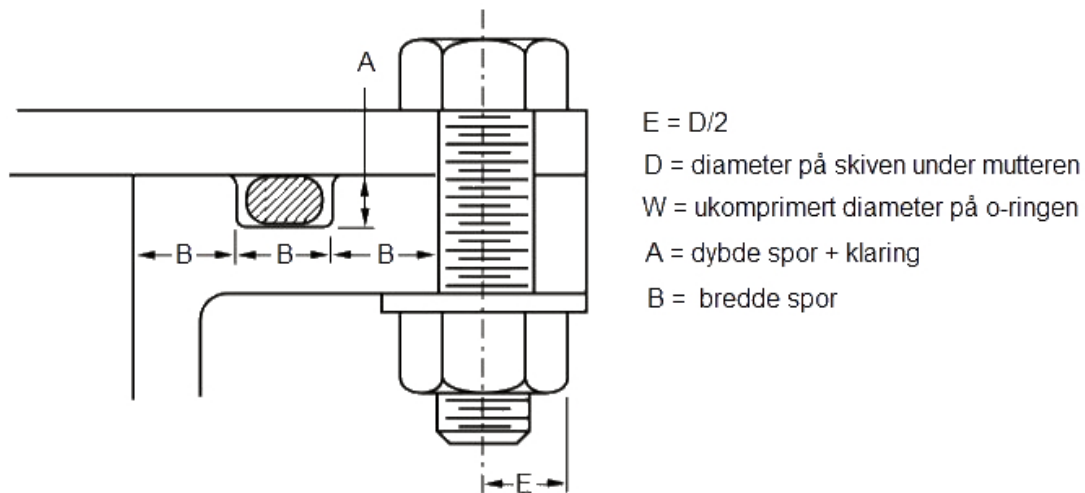


Figur 5.19: Hydraulisk sylinder med stempel, hvor lokket er en boltet flens. Her vises tre forseglingsmåter for o-ringer: Statisk under lokket, og dynamisk ved stempelet og stempelstangen.

Beregningene av o-ringens bredde avhenger av om man har en statisk eller dynamisk situasjon. Ved en statisk situasjon bestemmer man dybden på sporet, og så multipliserer man dette med hvor mye o-ringen skal komprimeres. Hvis sporet er f.eks. 2mm dypt og o-

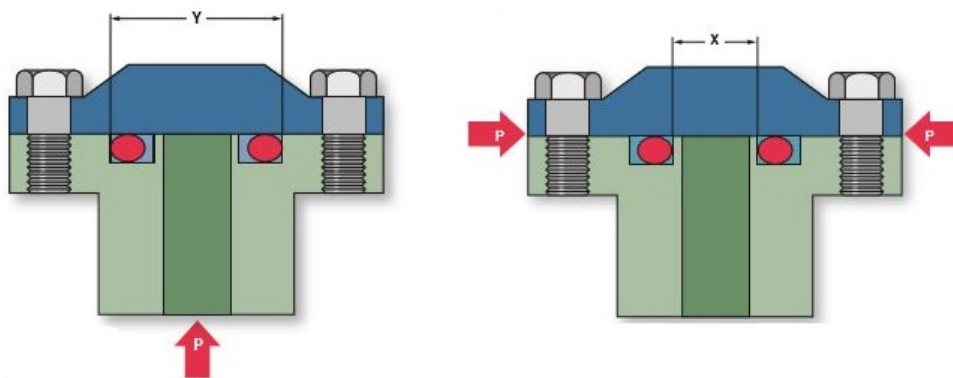
ringen skal komprimeres 25% så er o-ringens tverrsnittsdiameter lik: $2\text{mm} \cdot 1,25 = 2,5\text{mm}$. Solide o-ringer er normalt begrenset til ikke å komprimeres mer enn 25% av høyden sin.

I figur 5.20 vises en flens som er forseglet med en o-ring, og med tilhørende dimensjoner. Høyden til det freste sporet, A, bør være $0,75-0,90W$, hvor W er diameteren til o-ringens. Bredden til sporet, B, skal være lik $1,1W$. I sporet skal det være nok plass slik at pakningen ikke fyller mer enn 95%. En god designpraksis er å ikke la tverrsnittsdiameteren til o-ringens være større enn bredden på sporet. Et mer optimalt forhold er å la tverrsnittsdiameteren til o-ringens være halvparten av bredden til sporet.



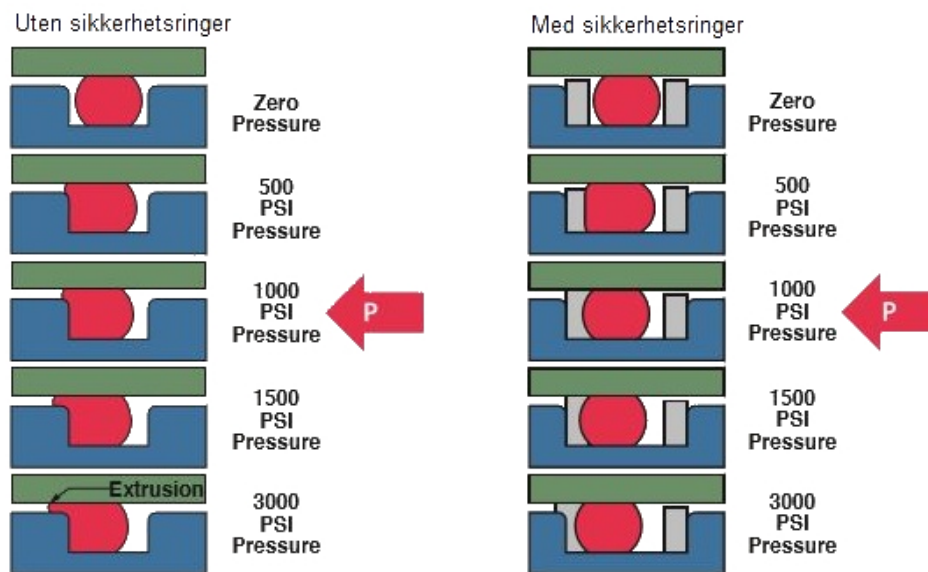
Figur 5.20: En boltet flens med maskinert spor for o- eller d-ring med tilhørende plasseringer.

O-ringens indre diameter blir bestemt av trykkets retning, altså om det kommer fra utsiden eller innsiden. Hvis trykket presser o-ringens mot dens indre diameter, som vist til høyre i figur 5.21, skal o-ringens designes slik at dens indre diameter ligger mot sporets indre diameter. Motsatt, hvis trykket presser o-ringens mot dens ytre diameter, som vist til venstre i figuren, skal o-ringens ytre diameter ligge mot sporets ytre diameter.



Figur 5.21: Til venstre vises det hvordan o-ringens blir trykt mot sporets ytre diameter pga. det indre trykket er størst. Til høyre er det utvendige trykket størst og o-ringens blir trykt mot sporets indre diameter.

Etter at man har valgt størrelse på o-ringene må man velge materiale. Et viktig element ved materialet er at det må tåle å være i kontakt med kjemikalier som er i systemet, ellers vil o-ringene til slutt feile. Trykkdifferansen på sidene av o-ringene klemmer den til lavtrykkssiden, og tverrsnittet deformeres. Se figur 5.21. Dette gjør at klaringen mellom flatene tettes, men hvis trykket blir høyere enn det o-ringene tåler vil den flyte inn i klaringen. Dette vil igjen føre til tidlig svikt av forseglingen og lekkasje. Metoder som ofte blir brukt for å hindre at o-ringene flyter inn i klaringen er å øke o-ringens hardhet, bruke sikkerhetsringer (se figur 5.22), redusere klaringen eller senke systemtrykket. Hvis man bruker sikkerhetsringer anbefales det å bruke en på hver side av o-ringene slik at man unngår monteringsfeil. Hvis man bruker kun en sikkerhetsring må den plasseres på lavtrykkssiden av o-ringene.



Figur 5.22: Til høyre i figuren ser man hvordan sikkerhetsringer hindrer o-ringene å flyte inn i klaringen mellom anleggsflatene. Her er trykket vist i PSI.

Teori og figurer om o-ringene er hentet fra *Apple Rubber*, [39]

5.9 Diverse formler

I dette delkapittelet vises diverse formler som er nyttige for senere beregninger.

Sikkerhetsfaktor mot flyt beregnes med formelen:

$$n_f = \frac{R_e}{\sigma_{jf}} \quad (5.83)$$

Arealet av et sirkulært tverrsnitt beregnes med formelen:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 227 \text{mm}^2 \quad (5.84)$$

Tverrsnittsarealet av en sylinder beregnes med formelen:

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} \quad (5.85)$$

Kraft på grunn av et trykk som virker på et areal:

$$F = p \cdot A \quad (5.86)$$

Tillatt skjærspenning med hensyn på jevnførende spenning:

$$\tau_{till} = \sqrt{\frac{\sigma_{jf}^2}{3}} \quad (5.87)$$

Nødvendig høyde h i et sylindrisk areal som er utsatt for en kraft F og med tillatt skjærspenning τ_{till} :

$$h = \frac{F}{\tau_{till} \cdot \pi \cdot d} \quad (5.88)$$

6 Produktspesifisering

Hensikten med en produktspesifisering er å sette målsettinger for produktet, rangere viktige produktegenskaper, metriske grensespesifikasjoner og metriske grovspefiseringer. Dette gjøres for å fokusere på viktige egenskaper som igjen gir et best mulig sluttprodukt.

6.1 Produktmålsetting

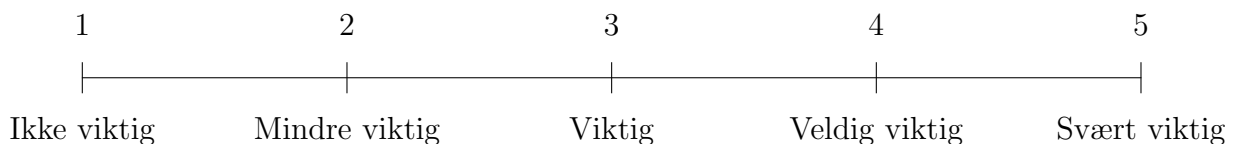
Produktmålet er å forme metallplater. Dette skal gjøres ved at metallplatene presses etter en utskiftbar matrise ved bruk av hydrostatisk væsketrykk.

Delmålet til produktet er å gjøre det enkelt å produsere forskjellige plattformen ved å ha en utskiftbar matrise. Videre skal den være sikker og enkel å bruke, lett å montere og vedlikeholde, og med et enkelt design som gjør den rimelig.

Målgruppen for produktet er små mekaniske bedrifter og privatpersoner som former metallplater.

6.2 Rangering av viktige produktegenskaper

I tabellen nedenfor er det listet opp viktige egenskaper for produktet. Egenskapene er vektet etter viktighet med en skala fra 1 til 5. Skalaen sees i figur 6.1 nedenfor:



Figur 6.1: Poengskala fra 1 til 5 for rangering av viktige produktegenskaper.

Tabell 6.1 Oversikt over viktige produktegenskaper med tilhørende vektninger og begrunnelser.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
Sikkerhet	Verktøyet er robust og sikkert å anvende	5	Med det høye trykket i trykkammeret er det viktig at konstruksjonen er tilstrekkelig dimensjonert og at det finnes sikkerhetsmekanismer som gjør at trykket ikke overstiger det den er dimensjonert for.

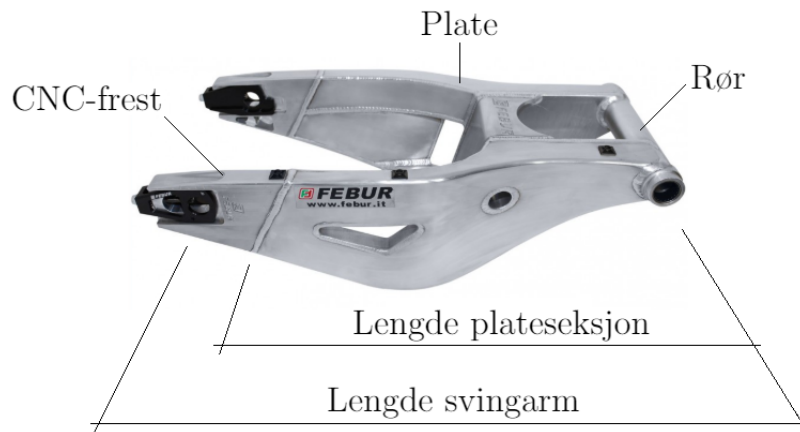
Tabell 6.1 forts: Oversikt over viktige produkttegenskaper med tilhørende vektinger og begrunnelser.

Egenskap	Beskrivelse	Vekting	Begrunnelse
Ergonomi	Bruk av verktøyet skal ikke føre til skader eller ugunstige påkjenninger hos bruker.	4	Det er viktig at produktet er lett å håndtere slik at bruker ikke pådrar seg skader.
Estetisk design	Produktets utseende.	3	Designet skal være appellerende, men er ikke hovedprioritet da produktet designes med hensyn på god funksjon og sikkerhet.
Vedlikehold	Det er enkelt å utføre vedlikehold og å bytte slitasjedeler.	4	For å sørge for god sikkerhet og holdbarhet til produktet er det viktig at det lar seg gjøre å gjennomføre vedlikehold på produktet. Ved slitasje skal komponenter lett kunne byttes ut.
Brukervennlighet	Det skal være enkelt å betjene produktet	5	Produktet skal designes slik at det er enkelt å bruke og intuitivt hvordan den monteres og demonteres.
Kostnad	Lav produktjonskostnad.	4	For at produktet skal kunne rette seg mot privatpersoner og små bedrifter er det viktig at det har en gunstig pris.
Vekt	Produktet har lavest mulig vekt.	3	Det er viktig at lokket har lav vekt slik at det er lett å håndtere. Trykkamerets vekt er ikke like viktig.

6.3 Metriske grensespesifikasjoner, variasjonsbredde

Hydroformingsverktøyet er tenkt å kunne brukes til å lage små serier med motorsykkeldeler, spesielt chassisdeler som svingarmer og bensintanker. På bakgrunn av dette er det undersøkt størrelsen på svingarmer og bensintanker fra et utvalg av nyere 1000 kubikk sportsmotorsykler. Disse motorsyklene er ofte brukt til racing og det er vanlig å oppgradere til svingarmer og bensintanker lagd av lettvektsmetallplater.

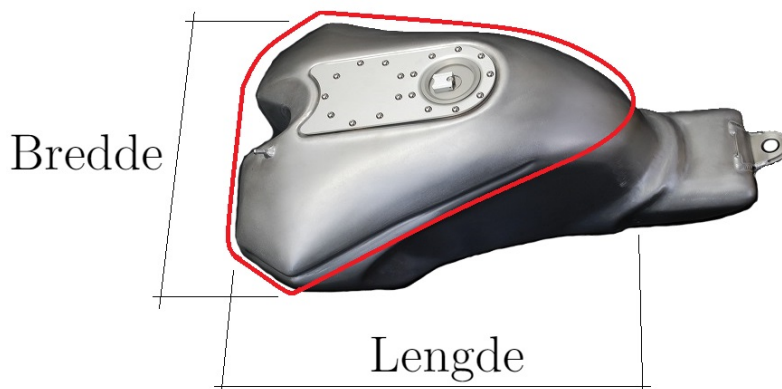
Størrelsene det er interessant å vite er lengden og dybden til svingarmene og bensintankene, slik det er vist fra figur 6.2 til figur 6.4 på neste side. Det var vanskelig å finne mål på dybde, så dybden er målt fra figur 6.3 til å være 85mm. Svingarmene er ofte lagd av en kombinasjon av plater, rør og CNC-freste deler som vist i figur 6.2. I tabell 6.2 vises en oversikt over lengden på svingarmenes lengste plateseksjon. Bensintankene er for store til å kunne presses i en del, så det er tenkt at man kan presse flere plater som sveises sammen til en tank. I figur 6.4 vises det hvordan lengden på tankene er målt, mens tabell 6.3 viser lengdene.



Figur 6.2: Svingarm til Yamaha YZF R1 2015-19 lagd av Febur. Bakerst til venstre på svingarmen ser man de to freste festene til bakhjulsakselen, mens til høyre ser man røret som festes til rammen. Midtseksjonen er lagd av plater som sveises sammen. [15]



Figur 6.3: Svingarm til Honda VTR 1000 SP2 sett ovenfra. Dybden som vises på bildet er minimumsdybde til den utskiftbare matrisen.



Figur 6.4: Bensintank til Ducati 749/999 hvor området i rødt er tenkt å kunne formes med hydroformingsverktøyet. [21]

Tabell 6.2 Oversikt over lengde på svingarmer til utvalgte sportsmotorsykler. [30]

Motorsykel	Lengde på svingarmens plateseksjon
Ducati Panigale V4R 2019	510mm
Honda CBR 1000RR 2004	500mm
Honda CBR 1000RR-R 2020	530mm
Kawasaki ZX10R 2004	485mm
Kawasaki ZX10R 2006	460mm
Suzuki GSX-R 1000 2010	490mm
Suzuki GSX-R 1000 2019	525mm
Yamaha YZF R1 2004	490mm
Yamaha YZF R1 2006	505mm
Yamaha YZF R1 2010	510mm

Tabell 6.3 Oversikt over lengde på bensintanker til utvalgte sportsmotorsykler. [30]

Motorsykel	Lengde på bensintank
BMW S1000RR 2016	505mm
Ducati 749/999 2003	470mm
Honda CBR 1000RR 2016	500mm
Kawasaki ZX10R 2016	475mm
Yamaha YZF R1 2019	510mm

Tabell 6.4 Metriske grensespesifikasjoner og gjennomsnittverdier for svingarmer og bensintanker.

Spesifikasjon	Metriske grensespesifikasjoner		
	Minimum	Maksimum	Gjennomsnitt
Lengde på svingarmens plateseksjon	460mm	530mm	500,5mm
Lengde på bensintank	470mm	510mm	492mm
Dybde på svingarm og bensintank	85mm	-	-

6.4 Metriske grovspesifiseringer for produkttypen

Hvis det blir tid i løpet av prosjektet skal det lages en forsøksmodell for å teste om produktets funksjoner fungerer. Ved å gjøre forsøksmodellen mindre enn en fullskala prototype sparer man tid og minimerer kostnader under testperioden. I de to neste seksjonene vises metriske grensespesifiseringer for en fremtidig fullskala prototype og for en mindre forsøksmodell.

6.4.1 Metriske grovspesifiseringer for fullskala prototype

Ut fra de metriske grensespesifikasjonenes gjennomsnitt blir det valgt dimensjoner som det er ønskelig at det endelige produktet skal ha. Disse dimensjonene vil være innvendige dimensjoner i trykkammeret, altså lengde/diameter og høyde.

Gjennomsnittslengdene til svingarmene og bensintankene er 500,5mm og 492mm. Det var vanskelig å finne dybde til svingarmene, men jeg fikk målt dybden til å være 85mm på en svingarm fra en Honda VTR 1000 SP2. Den utskiftbare matrisen må derfor være minimum 85mm høy i tillegg til at den må ha litt gods i bunnen. Metriske grovspesifiseringer for trykkammerets innside vises i tabell 6.5 nedenfor.

Tabell 6.5 Oversikt over metriske grovspesifiseringer for fullskala prototype.

Metrisk grovspesifisering for fullskala prototype	
Innvendige dimensjoner i trykkammer	Mål
Lengde/diameter	600mm
Høyde	100mm

6.4.2 Metriske grovspesifiseringer for forsøksmodell

For å bestemme dimensjonene til forsøksmodellen henvendte jeg meg til overingeniør Øyvind Hansen ved NMBUs verksted. På verkstedet har de liggende et S355 rundstål med diameter $\varnothing 200\text{mm}$ som kan dreies til lokk og trykkammer. I tabell 6.6 nedenfor vises grovspesifiseringer for forsøksmodellen.

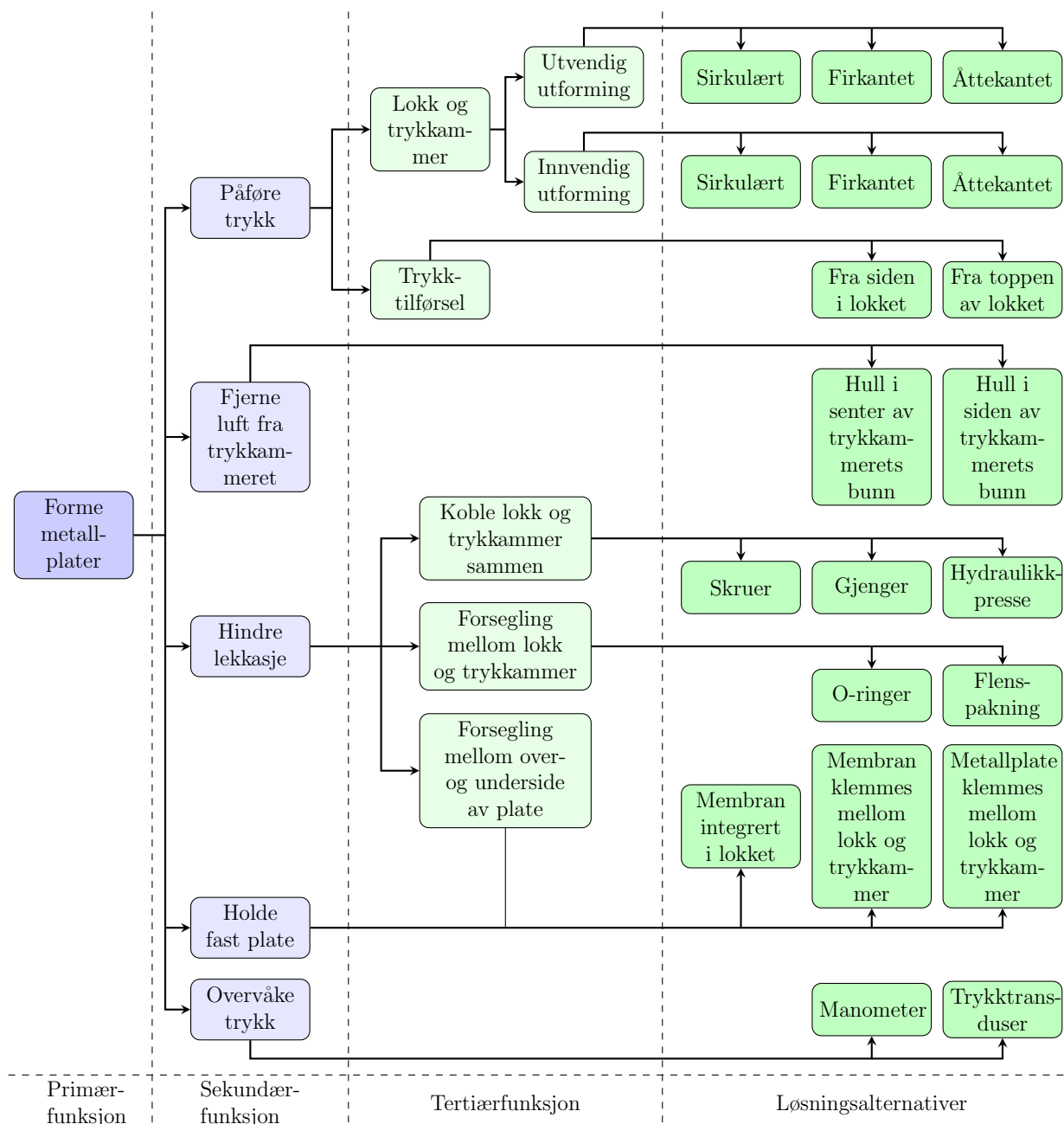
Tabell 6.6 Oversikt over metriske grovspesifiseringer for forsøksmodellen.

Metrisk grovspesifisering for forsøksmodell	
Dimensjoner	Mål
Utvendig diameter på lokk og trykkammer	200mm
Innvendig høyde i trykkammer	25mm

7 Konseptgenerering

I en funksjonsanalyse brytes produktet ned til hovedmål og delmål slik at man kan analysere dets funksjoner. Med funksjonene separert fra hverandre kan man enklere finne løsningsforslag som er med på å oppfylle produktmålene.

7.1 Funksjonsanalyse for produkttypen



Figur 7.1: Funksjonsanalyse av hydroformingsverktøyet hvor man tar utgangspunkt i produktmålet og deler dette inn i primær-, sekundær- og tertiærfunksjoner. Funksjonene blir deretter tildelt løsningsalternativer.

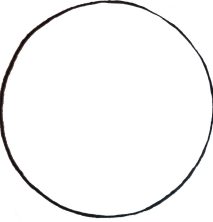
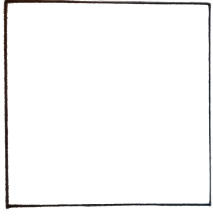
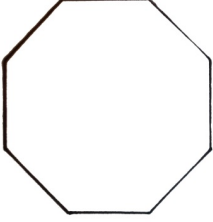
7.2 Funksjonsalternativer med skisser

For å få en oversikt over funksjonsalternativene har hver av sekundær/tertiærfunksjonene fått et eget underkapittel hvor det vises skisser for løsningsforslagene. For å holde orden på løsningsforslagene er de merket med bokstaver og indeksert med tall. Med skissene følger beskrivelse, fordeler og ulemper.

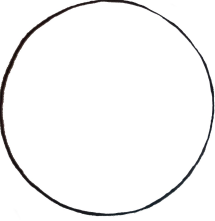
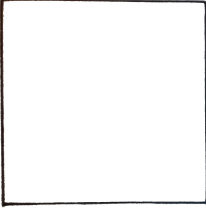
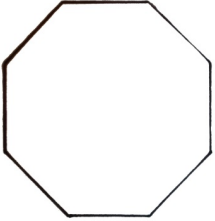
7.2.1 Løsninger for lokk og trykkammer

Trykkammeret er den største delen av hydroformingsverktøyet og det er her pressingen av metallplatene skjer. Trykkammeret skal ta opp krefter fra det hydrostatiske trykket og inneholde den utskiftbare matrisen med tilhørende metallplate. Det er antatt at bunnen og veggene i trykkammeret er en solid del. I tabell 7.1 vises løsningsalternativer for utvendig utforming av lokk og trykkammer, mens løsningsalternativer for innvendig utforming av lokk og trykkammer vises i tabell 7.2.

Tabell 7.1 Løsningsalternativer for utvendig utforming av lokk og trykkammer.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
A ₁		Trykkammeret og lokkets utside er sylindrisk utformet.	Et sirkulært design er optimalt for å spre trykk og gir en jevn deformasjon i trykkammeret. Designet gir lavere vekt enn et firkantet eller åttekantet design.	Det er mer tidkrevende å frese enn et firkantet eller åttekantet design.
A ₂		Trykkammeret og lokkets utside er kvadratisk utformet.	Designet er enkelt.	Vekten er høy og trykkammeret vil ikke deformeres jevnt.
A ₃		Trykkammeret og lokkets utside er formet åttekantet.	Utseendet er appellerende.	Tyngre enn en sirkulær utforming

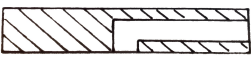

Tabell 7.2 Løsningsalternativer for innvendig utforming av lokk og trykkammer.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
B_1		Trykkammeret innside er sylindrisk utformet.	Et sirkulært design er optimalt for å spre trykk og gir en jevn deformasjon i trykkammeret. Designet gir lav vekt	Tidkrevende å frese selve trykkammeret og den utskiftbare matrisen.
B_2		Trykkammerets innside er kvadratisk utformet.	Det er enkelt å tilpasse den utskiftbare matrisen slik at den passer i trykkammeret. Det kan plasseres flere matriser i trykkammeret.	Trykket fordeles ikke jevnt som igjen fører til at deformasjonene ikke er uniforme. Dette kan bli et problem for forseglingen.
B_3		Trykkammerets innside er formet åttekantet.	Ingen spesielle fordeler.	Tidkrevende å frese. Ikke gunstig med tanke på utforming av matrisen.

7.2.2 Løsninger for trykktilførsel

Den hydrauliske væsken må tilføres på oversiden av metallplaten og det er derfor naturlig at tilførselen kommer gjennom lokket. Boring av væskepassasjer bør gjøres slik at lokket svekkes minst mulig.


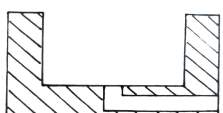
Tabell 7.3 Løsningsalternativer for trykktilførsel.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
C_1		Tilførselen kommer fra siden i lokket.	Væsketilførselen vil ikke være til hinder når man kobler lokk og trykkammer sammen.	Komplekst fordi det må bores to kanaler. Fare for at boret vandrer i den horisontale kanalen.
C_2		Tilførselen kommer fra toppen av lokket.	Det bores kun en vertikal kanal, noe som er enkelt og prisgunstig.	Kan være til hinder. Boringen vil gi store spenningskonsentrasjoner hvis den er feilplassert.

7.2.3 Løsninger for å fjerne luft fra trykkammeret

Når trykkammeret og lokket forsegles er det viktig at luften fjernes under formingsprosessen. Hvis luften er innestengt under metallplaten vil den komprimeres og fungere som en fjær når trykket i hydraulikkvæsken øker. Ved å ha en liten boring i bunn av matrisen, og en liten klaring mellom matrisen og trykkammeret kan luften unnsnippe gjennom boringer i trykkammerets bunn.

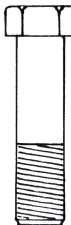
Tabell 7.4 Løsningsalternativer for å fjerne luft fra trykkammeret.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
D_1		Luften fjernes gjennom et hull som er boret rett gjennom bunnen av trykkammeret.	Det bores kun en vertikal kanal, noe som er enkelt og prisgunstig.	Dreneringsslanger i bunnen gjør at trykkammeret må heves fra flaten den står på.
D_2		Luften fjernes gjennom en kanal som er boret i bunnen og ut på siden av trykkammeret.	Dreneringsslanger blir plassert på siden av trykkammeret og er ikke til hinder.	Komplekst fordi det må bores to kanaler. Fare for at boret vandrer i den horisontale kanalen.

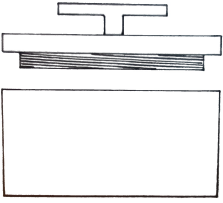
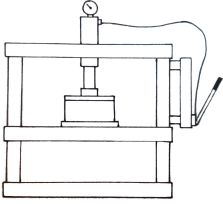
7.2.4 Løsninger for sammenkobling

Det hydrostatiske trykket som former metallplatene vil prøve å tvinge lokket og trykkammeret fra hverandre. For å motvirke kraften fra det hydrostatiske trykket må det lages en løsning som presser lokket og trykkammeret sammen.

Tabell 7.5 Løsningsalternativer for å koble lokk og trykkammer sammen.

	Skisse	Beskrivelse	Fordel	Ulemper
E_1		Trykkammeret og lokket presses sammen med skruer. Skruene kan festes med muttere eller man kan gjenge godset i trykkammeret.	Billig løsning hvor man kan bruke standard skruer. Det er enkelt å bore vertikale hull til skruene.	Tidkrevende å stramme/løsne skruene. Ved høyt trykk og stort areal på lokket blir skruene grove.

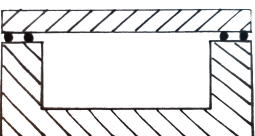
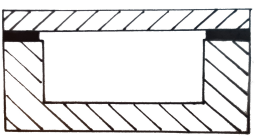
Tabell 7.5 forts: Løsningsalternativer for å koble lokk og trykkammer sammen.

	Skisse	Beskrivelse	Fordel	Ulempe
E_2		Lokket og trykkammeret er gjenget og skruset sammen.	Få deler.	Tidkrevende/vanskelig å lage gjengene. Vanskelig å oppnå tilstrekkelig klem på pakningen. Når lokket skruses på er det fare for å skade/vri pakningen.
E_3		Lokket presses mot trykkammeret ved bruk av en hydraulisk presse.	Det finnes standard verkstedspreser. Enkel betjening.	Når arealet på lokket og trykket blir stort vil ikke vanlige verkstedspreser gi tilstrekkelig kraft. Det må lages/kjøpes store, dyre presser.

7.2.5 Løsninger for forsegling mellom lokk og trykkammer

I hydroformingsverktøyet finnes det to forseglinger: En indre forsegling hindrer hydraulikkvæsken i å trenge under metallplaten, og den ytre forseglingen forsegler mellom lokket og trykkammeret. Hvis den indre forseglingen feiler fungerer den ytre forseglingen som en sikkerhet og drenerer hydraulikkvæsken til tank. Den ytre pakningen må kunne stå imot høyt trykk, tåle å være i kontakt med den hydrauliske væsken, være prisgunstig og kunne brukes flere ganger.

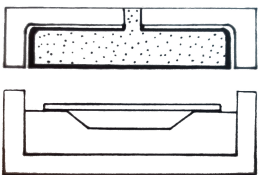
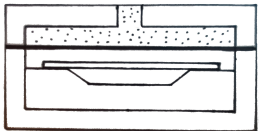
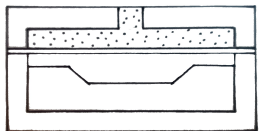
Tabell 7.6 Løsningsalternativer for forsegling mellom lokk og trykkammer.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
F_1		Forsegling mellom trykkammer og lokk gjøres ved å bruke en o-ring.	Enkel, billig og velprøvd løsning. O-ringer finnes i mange størrelser og materialer. Kan motstå høyt trykk. Kan brukes flere ganger.	Det må freses et spor som pakningen skal ligge i.
F_2		Forsegling mellom trykkammer og lokk gjøres ved å bruke en flenspakning.	Billig løsning og stort utvalg av standarddeler.	Tåler ikke like høyt trykk som o-ringer.

7.2.6 Løsninger for forsegling mellom over- og underside av plate

For at metallplaten skal formes mot matrisen er det nødvendig med en trykkdifferanse mellom oversiden og undersiden av platen. Det må derfor lages en forsegling slik at den hydrauliske væsken ikke trenger inn under metallplaten. I funksjonsanalysen er det en funksjon for å holde fast platen, og de kommende løsningsforslagene vil oppfylle dette i tillegg til forsegling mellom over- og underside av platen.

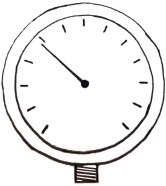
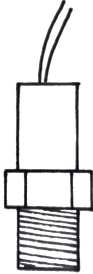
Tabell 7.7 Løsningsalternativer for forsegling mellom over- og underside av plate.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
G_1		I lokket integreres en ballong/belg av gummi som fungerer som en membran. Hydroformingsprosessen med en gummimembran er beskrevet i delkappittel 4.2.	Med en membran er man fri til å bruke hvilken som helst platestørrelse. Med en membran integrert i lokket hindrer man søl av hydraulikkvæske hver gang man separerer trykkammer og lokk.	Utformingen av membranen kan bli kompleks. Det kan være vanskelig å feste membranen i lokket.
G_2		En gummimembran klemmes fast mellom lokk og trykkammer for å hindre den hydrauliske væsken i å trenge under metallplaten. Hydroformingsprosessen med en gummimembran er beskrevet i seksjon 4.2.	Med en membran er man fri til å bruke hvilken som helst platestørrelse. Designet er enkelt.	Det vil være vanskelig å plassere membranen korrekt for å få god forsegling.
G_3		Metallplaten klemmes fast mellom lokket og trykkammeret og hindrer hydraulikkvæsken i å trenge under platen. Denne prosessen kalles hydraulisk strekking og er beskrevet i seksjon 4.4.	Få deler.	Det vil være vanskelig å oppnå forsegling. Platene må ha en eksakt diameter for å oppnå forsegling.

7.2.7 Løsninger for å overvåke trykk

Nødvendig trykk for å presse metallplatene avhenger av materiale, tykkelse og form. Trykket bør kunne måles for å se når man har oppnådd ønskelig trykk.

Tabell 7.8 Løsningsalternativer for å overvåke trykk.

	Skisse	Beskrivelse	Fordeler	Ulemper
H_1		Trykket overvåkes med et manometer.	Det finnes mange standarddeler. Billig. Enkel analog design.	Manometeret er høyt og kan være til hinder når man skal sammenkoble lokk og trykkammer.
H_2		Trykket overvåkes med en trykktransduser.	Det finnes mange standarddeler. Tar liten plass.	Den må ha strømforsyning og et display for å vise trykket.

7.3 Tidligvurderinger av brukspåkjenninger

Basert på de metriske grovspesifiseringene som ble gjort i delkapittel 6.4 blir det gjort en tidligvurdering av brukspåkjenninger. Ved å gjøre dette kan man tidlig danne seg et bilde av lastene og velge dimensjoner deretter. Tidligberegningene blir gjort med tanke på forsøksmodellen hvor trykkammerets utside har en diameter på 200mm og innvendig høyde på 25mm. Det er antatt at veggtykkelsen til trykkammeret er 10mm.

Påkjenningene på hydroformingsverktøyet kommer hovedsaklig fra det hydrostatiske trykket inne i trykkammeret, som vist i figur 7.2a. I beregningene er det antatt at lokk og trykkammer er sirkulært utformet både utvendig og innvendig. Trykkammeret blir lagd i én solid del, men for å forenkle beregningene deles den opp i en sylinder og en bunn. Se figur 7.2b. For å forenkle beregningene ytterligere utformes bunn og lokk likt. Det blir utført tidlige beregninger for krefter som virker på sylinder og bunn/lokk.

Med formel 5.1 kan man beregne nødvendig formingstrykk når man vet platens tykkelse, strekkfasthet og minste formingsradius. Det har blitt gjort søk på nett etter hvilke typer metallplater som er brukt til å forme svingarmer, bensintanker og rammedeler til motorsyklar. Det er lite informasjon å finne, men flere antyder at 6061-T6 aluminium blir mye brukt. Dette er en legering med medium styrke som er sveisbar. For å bestemme platetykkelse gjorde jeg mål på ramme og svingarm til en Honda VTR 1000 SP2 hvor største platetykkelse var 3mm. For å ikke trenge så stort formingstrykk bestemmes minste radius til å være 20mm. I tabell 7.9 vises en oversikt over variablene som brukes til å beregne formingstrykket.

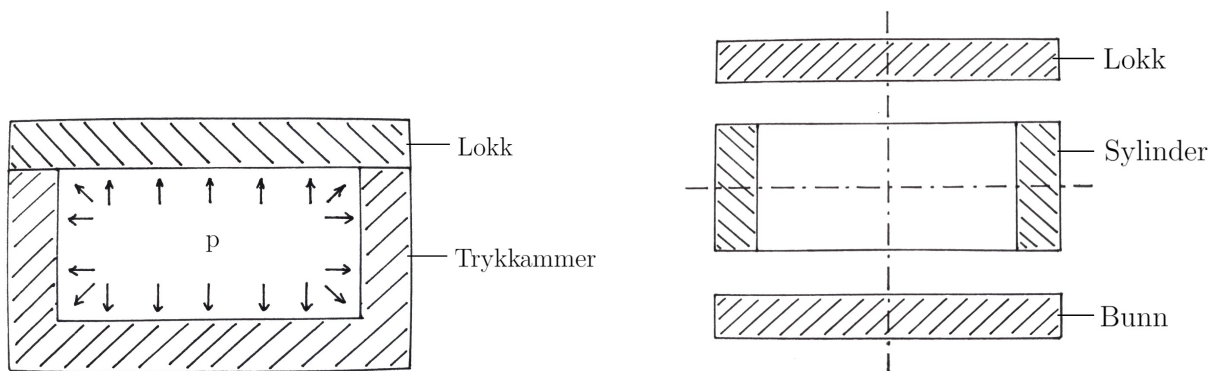
Tabell 7.9 Variabler for å beregne formingstrykk.

Variabel	Størrelse
Platetykkelse, t	3mm
Strekfasthet 6061-T6, R_m [1]	310MPa
Innside radius, r_s	20mm

$$p_f = \frac{t \cdot R_m}{r_s} \quad (7.1)$$

$$p_f = \frac{3\text{mm} \cdot 310\text{N/mm}^2}{20\text{mm}} = 46,5\text{N/mm}^2 \quad (7.2)$$

Som det fremkommer er nødvendig arbeidstrykk 46,5MPa, som rundes opp til $p_f = 500\text{bar}$.



(a) Det hydrostatiske trykket presser på lokk og trykkammer.

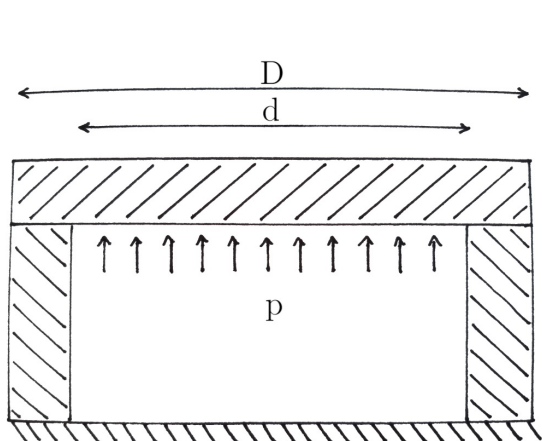
(b) Trykkammeret deles opp slik at det blir en sylinder og en bunn. Bunnen utformes likt som lokket og hydroformingsverktøyet blir derfor symmetrisk utformet.

Figur 7.2: Trykkammeret deles opp for å utnytte symmetri. Her er lokk og trykkammer snittet.

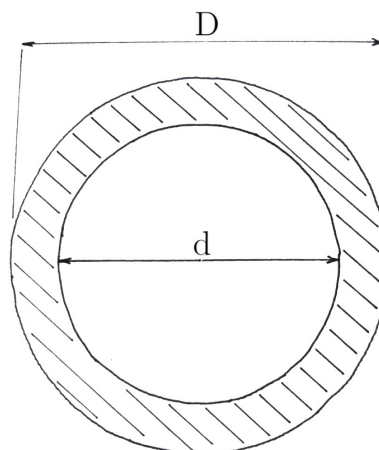
I tidligberegningene av sylinderen sees det på krefter i aksiell og tangentiell retning. Aksiell kraft kommer av trykket som virker på lokk og bunn, se figur 7.3. Kraften som virker på lokket og sylinderens tverrsnittsareal beregnes med formel 5.3:

$$F_{L,tot} = A \cdot p_f = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p_f \quad (7.3)$$

$$F_{L,tot} = \frac{\pi \cdot (180\text{mm})^2}{4} \cdot 50\text{N/mm}^2 = 1272\text{kN} \quad (7.4)$$



(a) Det indre trykket virker på lokkets flate som har diameter d .



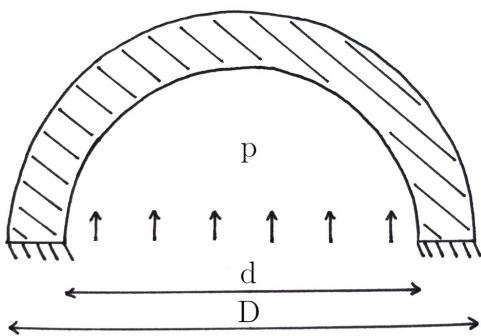
(b) Sylindereens tverrsnittsareal med ytre diameter D og indre diameter d .

Figur 7.3: Aksiell spenning forekommer i sylindereens tverrsnittsareal på grunn av trykket som virker på lokkets indre flate.

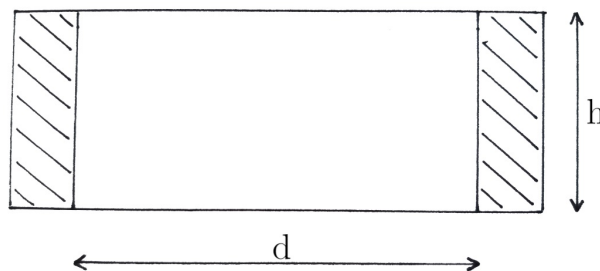
Den tangentielle kraften kommer fra trykket som presser på sylindereens vegger. Den totale kraften $F_{\text{tangentiell}}$ fås ved å gange formingsstrykket med sylindereens projiserte areal. Altså trykket p_f ganget med innvendig diameter d , ganget med sylindereens høyde h . Se figur 7.4.

$$F_{\text{tangentiell}} = p_f \cdot (d \cdot h) \quad (7.5)$$

$$F_{\text{tangentiell}} = 50 \text{ N/mm}^2 \cdot (180 \text{ mm} \cdot 40 \text{ mm}) = 360 \text{ kN} \quad (7.6)$$



(a) Det indre trykket virker normalt på sylindereens projiserte areal.



(b) Sylindereen er kuttet i to og det skraverte feltet er arealet som tar opp kraften fra det indre trykket.

Figur 7.4: Tangentiell spenning forekommer i sylindereen på grunn av trykket som virker normalt på sylindereens projiserte areal.

7.4 Tidlig materialdrøfting

Valg av materiale er viktig for å kunne gjennomføre vektning av løsningsalternativer i neste kapittel. Materialet har direkte innvirkning på egenskaper som vekt, kostnad, vedlikehold

og produksjonsmetoder. Ved en tidlig materialdrøfting er det ikke nødvendig å velge et eksakt materiale eller legering, men det er ønskelig å vite om man skal bruke f.eks. stål eller aluminium. Materialdrøftingen vil være rettet mot produksjon av en fullskala prototype siden det allerede er bestemt at forsøksmodellen skal produseres av S355 konstruksjonsstål.

Det hydrostatiske trykket overfører store krefter til trykkammer, lokk og skruer. Trykkammeret er tenkt å stå i ro og vekt er ikke så viktig. Her er det naturlig å tenke stål fordi det er sterkt og prisgunstig. Det er ønskelig å velge et duktilt stål slik at det oppstår flyt og ikke brudd hvis trykket skulle bli for høyt. Siden trykkammeret vil komme i kontakt med hydraulikkvæsken er det viktig at stålet er korrosjonsmotstandig.

For lokket er det viktig med så lav vekt som mulig. Dette for å sørge for god ergonomi og brukervennlighet hver gang man skal fjerne eller montere lokket. Ved å velge samme stålmateriale som i trykkammeret eliminerer man faren for galvanisk korrosjon der lokk og trykkammer møtes. Et alternativ for å spare vekt og bedre ergonomien er å velge en aluminiumslegering med god styrke. Her kan 6082 legeringen være et alternativ med god styrke, god korrosjonsmotstand og gode maskineringssegenskaper.

Skruene som sammenfører lokket og trykkammeret bør være sterke og lett tilgjengelige. Det vil derfor være naturlig å bruke skruer av stål, og fasthetsklassene 4.6 og 8.8 er mest brukt. For å minimere antall skruer og antall borer i lokk og trykkammer kan man velge skruer med fasthetsklasse 12.9.

Membranen som integreres i lokket må være motstandsdyktig mot hydraulikkvæsken, være slitesterk, ha en høy elastisitet og den bør gå tilbake til sin opprinnelige form når trykket avtar. Et egnet materiale er polyuretan, hvor f.eks. Gallagher Corporation [8] støper membraner i polyuretan til hydroforming. Et annet materiale som kan være egnet er Nitril. Nitril tåler kontakt med hydraulikkolje og vann, er slitesterkt, kan strekkes opptil 600% og går tilbake til sin opprinnelige form [7].

Avhengig av hvilke standarder man konstruerer og dimensjonerer etter vil det være angitt materialer som skal brukes.

8 Egenscreening og konseptvalg

Hensikten med en egenscreening er å foreta valg av foretrukne løsningsalternativer basert på hvor godt de oppfyller viktige produkttegenskaper og spesifikasjoner.

8.1 Utvikling av seleksjonsmatrise

Seleksjonsmatrisene ser på funksjonsanalysens løsningsalternativer som er presentert i delkapittel 7.1, og ved bruk av Pughs metodikk blir løsningsalternativene vurdert mot et utvalg av de viktige produkttegenskapene i delkapittel 6.2. Hvert løsningsforslag vil bli tildelt poeng etter hvor godt de oppfyller de viktige produkttegenskapene i en skala fra 1-5, hvor 5 er best. Poengene til løsningsforslagene blir multiplisert med vektingen av de viktige produkttegenskapene, for så å bli summert. Løsningsforslagene med høyest sum blir valgt som endelig alternativ.

I tabell 8.1 nedenfor vises oppsettet på seleksjonsmatrisen. I de to kolonnene til venstre er de viktige produkttegenskapene som er relevante for funksjonen med tilhørende vekting. Til høyre for disse kolonnene er funksjonen med tilhørende løsningsalternativer og tildelte poeng. I den nest nederste raden blir poengene summert før løsningsalternativene blir rangert, hvor 1 er best og velges videre.

Tabell 8.1 Utforming av seleksjonsmatrise med viktige egenskaper, vekting, funksjon og løsningsalternativer. I de to nederste radene blir poengene summert og rangert.

Egenskap	Vekting	Funksjon		
		X_1	X_2	X_3
Relevant viktig egenskap 1				
Relevant viktig egenskap 2				
SUM				
Rangering				

8.2 Egen konseptscreening

Tabell 8.2 Seleksjonsmatrise med valg av utvendig utforming av lokk og trykkammer.

Egenskap	Vekting	Utvendig utforming av lokk og trykkammer		
		A_1	A_2	A_3
Estetisk design	3	3	2	4
Kostnad	4	3	4	3
Vekt	3	5	1	3
SUM		36	25	33
Rangering		1	3	2

Løsning A_1 hvor utvendig utforming av lokk og trykkammer er sylindrisk velges.

Tabell 8.3 Seleksjonsmatrise med valg av innvendig utforming av lokk og trykkammer.

Egenskap	Vekting	Innvendig utforming av lokk og trykkammer		
		B_1	B_2	B_3
Sikkerhet	5	5	2	3
Kostnad	4	3	4	3
Vekt	3	5	1	3
SUM		52	29	36
Rangering		1	3	2

Løsning B_1 hvor innvendig utforming av lokk og trykkammer er sylindrisk velges.

Tabell 8.4 Seleksjonsmatrise med valg av væsketilførsel.

Egenskap	Vekting	Trykktilførsel	
		C_1	C_2
Brukervennlighet	5	4	3
Kostnad	4	2	5
SUM		28	35
Rangering		2	1

Løsning C_2 hvor væsketilførselen kommer fra toppen av lokket velges.

Tabell 8.5 Seleksjonsmatrise for fjerning av luft fra trykkammeret.

Egenskap	Vekting	Fjerne luft fra trykkammeret	
		D_1	D_2
Brukervennlighet	5	3	5
Kostnad	4	5	3
SUM		35	37
Rangering		2	1

Løsning D_2 hvor luften fjernes gjennom en kanal som er boret i bunnen og ut på siden av trykkammeret velges.

Tabell 8.6 Seleksjonsmatrise for å koble lokk og trykkammer sammen.

Egenskap	Vekting	Koble lokk og trykkammer sammen		
		E_1	E_2	E_3
Sikkerhet	5	5	2	4
Ergonomi	4	3	3	5
Vedlikehold	4	5	2	3
Brukervennlighet	5	5	3	3
Kostnad	4	5	3	1
SUM		102	57	71
Rangering		1	3	2

Løsning E_1 hvor lokk og trykkammer kobles sammen med bolter velges.

Tabell 8.7 Seleksjonsmatrise for forsegling mellom lokk og trykkammer.

Egenskap	Vekting	Forsegling mellom lokk og trykkammer	
		F_1	F_2
Sikkerhet	5	5	3
Vedlikehold	4	5	5
Kostnad	4	5	4
SUM		65	51
Rangering		1	2

Løsning F_1 hvor forseglingen mellom lokk og trykkammer gjøres med o-ring velges.

Tabell 8.8 Seleksjonsmatrise for forsegling mellom over- og underside av plate.

Egenskap	Vekting	Forsegling mellom over- og underside av plate		
		G_1	G_2	G_3
Sikkerhet	5	5	4	3
Ergonomi	4	5	3	3
Vedlikehold	4	3	4	4
Brukervennlighet	5	5	3	3
Kostnad	4	3	5	5
Vekt	3	3	4	4
SUM		103	95	90
Rangering		1	2	3

Løsning G_1 hvor en gummimembran integreres i lokket for å forsegle mellom over- og undersiden av platen velges.

Tabell 8.9 Seleksjonsmatrise for å overvåke trykk.

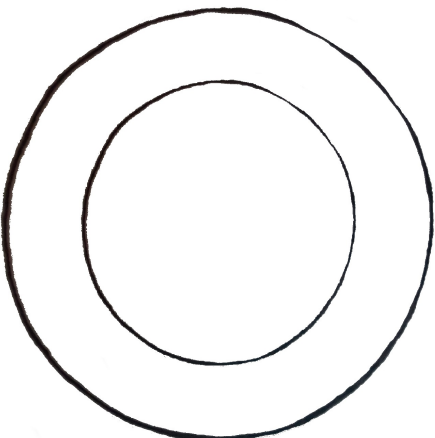

Egenskap	Vekting	Overvåke trykk	
		H_1	H_2
Brukervennlighet	5	4	5
Kostnad	4	5	3
SUM		40	37
Rangering		1	2

Løsning H_1 hvor trykket overvåkes med et manometer velges.

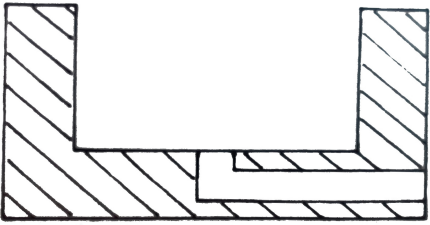
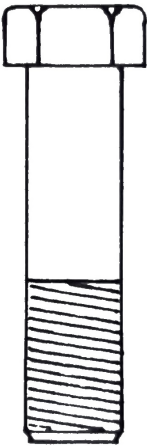
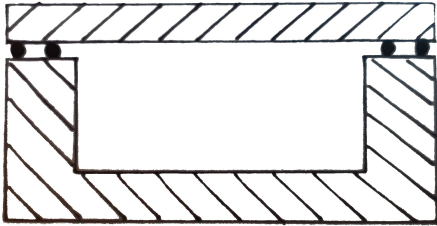
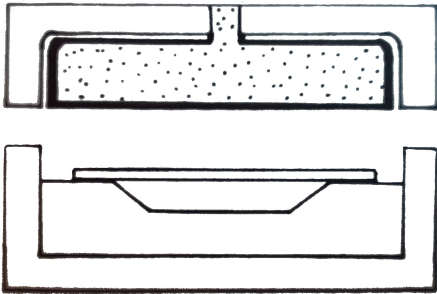
8.3 Foretrukne løsnings- og estetikkalternativer

Fra seleksjonsmatrisene i seksjon 8.2 har det blitt valgt åtte løsningsalternativer som skal sørge for at produktet oppfyller alle funksjoner og ønskelige egenskaper. De foretrukne løsningsalternativene er oppsummert nedenfor med tilhørende skisser og beskrivelser.


Tabell 8.10 Oversikt over de valgte løsningsalternativene med tilhørende beskrivelser.

Løsninger	Beskrivelse
	<p>Utvendig og innvendig utforming av lokk og trykkammer velges sirkulært. Dette gir trykkammeret en sylindrisk form som er optimalt med tanke på å spre trykket, samtidig som det fører til en jevn deformasjon. Den jevne deformasjonen gjør at det oppnås bedre forsegling mellom lokk og trykkammer som igjen gir bedre sikkerhet. Den sirkulære utformingen gir lavest mulig vekt som igjen gjør det ergonomisk for brukeren når lokket skal løftes av og på.</p>
	<p>Trykktilførselen velges å komme fra toppen av lokket. Dette er enkelt og prisgunstig siden man kun trenger å bore en vertikal kanal. Det er valgt å integrere en ballong/belg i lokket for å forsegle mellom over- og undersiden av platen og ved å bore en vertikal kanal gjennom lokket blir det enklere å feste denne ballongen. Boringen må plasseres slik at man unngår store spenningskonsentrasjoner og det er ønskelig å utstyre boringen med en hurtigkobling for trykkslangen. Med en slik hurtigkobling kan man enkelt fjerne slangen når man skal åpne/lukke trykkammeret.</p>

Tabell 8.10 forts: Oversikt over de valgte løsningsalternativene med tilhørende beskrivelser.

Løsninger	Beskrivelse
	<p>For å fjerne luft fra undersiden av metallplaten må det bores dreneringskanaler i matrisen og i bunnen av trykkammeret. Ved å ha dreneringskanalen ut på siden er det enkelt å feste slanger som fører eventuelle lekkasjer av hydraulikkvæske tilbake til tank. En annen fordel er at slangene ikke er til hinder på undersiden av trykkammeret. Det er fare for at boret vandrer når man borer den vertikale kanalen, men hvis denne kanalen gjøres kort nok vil ikke det bli et problem.</p>
	<p>Ved å bruke skruer til å koble sammen lokket og trykkammeret oppnår man en enkel og billig løsning hvor det er enkelt å finne standarddeler. Det er ønskelig å gjenge hullene i trykkammeret slik at man unngår å bruke muttere. Dette forenkler prosessen ved at man slipper å holde igjen muttere i bunnen når man strammer skruene. Det er tidkrevende å stramme alle skruene så det er ønskelig å bruke så få skruer som mulig.</p>
	<p>For å forsegle mellom lokk og trykkammer velges det å bruke en o-ring. O-ringer er enkle, billige, finnes i mange størrelser og kan motstå høyt trykk. O-ringen fungerer som en sikkerhet i tilfelle ballongen/belgen med hydraulikkvæsken skulle sprekke. På innsiden av o-ringen blir det boret dreneringskanaler som fører hydraulikkvæsken tilbake til tank.</p>
	<p>Ved å bruke en membran til å hindre hydraulikkvæsken i å trenge under metallplaten står man fritt til å legge inn metallplater av hvilken som helst størrelse i trykkammeret. Man kan også modularisere matrisen og presse flere mindre plater på samme gang. Ved å støpe en ballong/belg av gummi og integrere denne i lokket vil hydraulikkvæsken være forseglet hver gang man åpner og lukker trykkammeret. Dette gjør produktet brukervennlig og man skjærer brukeren fra eventuell giftig hydraulikkvæske.</p>

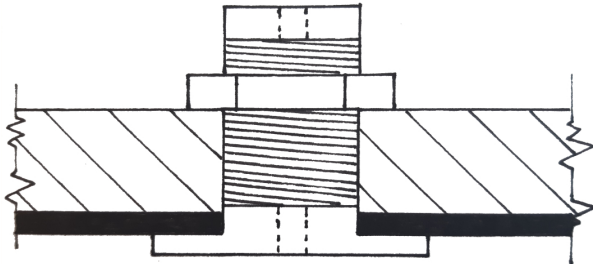
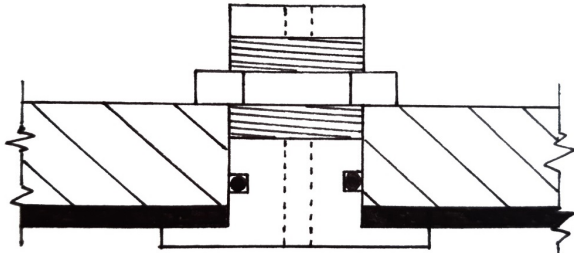
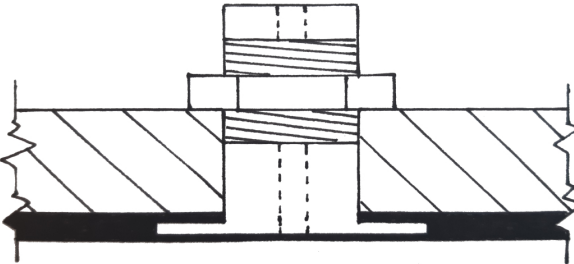
Tabell 8.10 forts: Oversikt over de valgte løsningsalternativene med tilhørende beskrivelser.

Løsninger	Beskrivelse
	<p>For å overvåke trykket velges det å bruke et manometer. Det finnes et stort utvalg av standarddeler, de er rimelige og de har et enkelt intuitivt design. Det kan være ønskelig å integrere manometeret sammen med trykktilførselen slik at man slipper å bore et ekstra hull i lokket.</p>

8.4 Utvidede funksjonsalternativer for membranen

Siden det ble valgt å integrere en membran i lokket for å forsegle hydraulikkvæsken må det finnes en løsning for å feste og tette membranen. Det blir derfor utredet tre løsningsalternativer for å feste membranen til lokket. Alle løsningsforslagene består av en skrue med en flens som presser membranen mot lokket. I tabell 8.11 nedenfor vises løsningsalternativene.

Tabell 8.11 Løsningsalternativer for å feste og tette membranen.

	Skisse	Beskrivelse
I_1		<p>Hullet i lokket gjenges og skruen skrues oppover slik at flensen klemmer membranen mot undersiden av lokket for å oppnå forsegling. På toppen av skruen brukes en låsemutter. Som forsegling i gjengene brukes f.eks. loctite.</p>
I_2		<p>Hullet i lokket er ikke gjenget og ved å stramme mutteren klemmes membranen mot undersiden av lokket og man oppnår forsegling. For å forsegle hullet i lokket brukes en o-ring.</p>
I_3		<p>Flensen støpes inn i membranen for å oppnå forsegling. Ved å stramme mutteren festes membranen mot undersiden av lokket.</p>

Tabell 8.12 Fordeler og ulemper ved løsningene for å feste og tette membranen.

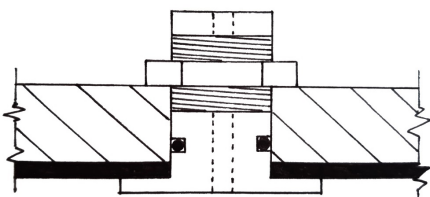
	Fordeler	Ulemper
I_1	Få deler og enkel design. Skruen er ikke festet til membranen og er derfor gjenbrukbar. Gjengene kan enkelt forsegles med loctite for å hindre eventuelle lekkasjer gjennom lokket.	Selve skruen må skrues rundt for å klemme membranen mot lokket og dette kan skade membranen.
I_2	Hullet i lokket trenger ikke gjenges. Skruen er ikke festet til membranen og er derfor gjenbrukbar. Når man strammer mutteren vil det ikke være rotasjon mellom flensen og membranen, noe som vil forhindre at membranen blir skadet.	Det må freses spor til o-ringen.
I_3	Siden flensen er støpt inn i membranen vil man oppnå fullstendig forsegling av membranen. Hullet i lokket trenger ikke gjenges.	Siden skruen er festet til membranen må den byttes hver gang man bytter membranen. Dette vil være ugunstig med tanke på kostnader.

Tabell 8.13 Seleksjonsmatrise for å feste og tette membranen.

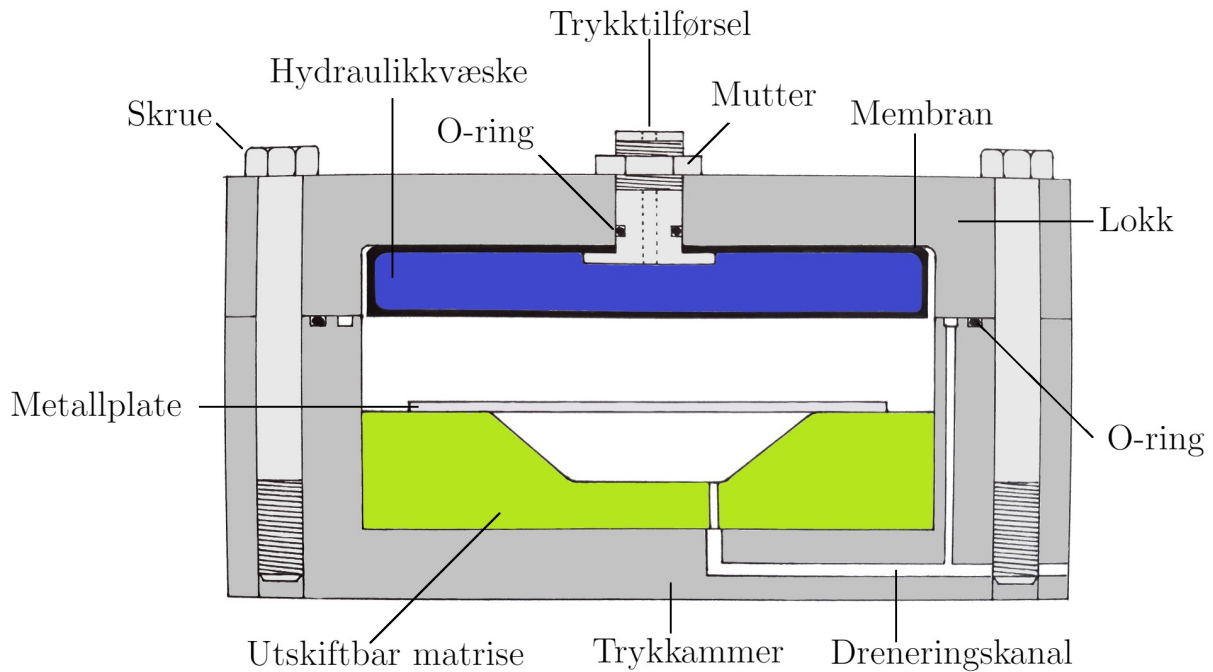
Egenskap	Vekting	Feste og tette membranen		
		I_1	I_2	I_3
Sikkerhet	5	3	5	5
Vedlikehold	4	5	5	3
Brukervennlighet	5	4	4	4
Kostnad	4	4	5	3
SUM		71	85	69
Rangering		2	1	3

Løsning I_2 hvor en mutter brukes for å klemme fast membranen velges.

Tabell 8.14 Oversikt over valgt løsningsalternativ for å feste og tette membranen med tilhørende beskrivelse.

Skisse	Beskrivelse
	Ved å stramme mutteren på oversiden av lokket vil flensen klemme fast membranen og man oppnår forsegling. Denne løsningen skåner membranen ved at skruen kun beveger seg i vertikal retning og ikke roterer. Dette er viktig for å unngå lekkasje. Hvis det skulle oppstå en lekkasje mellom flensen og membranen vil o-ringen tette hullet i lokket slik at lekkasjen føres til dreneringskanalene.

I figur 8.1 nedenfor er det lagd en prinsippskisse hvor løsningsalternativene er markert. Manometeret er ikke tegnet da det antas at det festes før trykktilførselskoblingen. Skissen er kun ment for å illustrere løsningsalternativene og proporsjonene er derfor ikke riktige. Skruen med flens som tetter membranen vil heretter bli kalt for *trykktilførselen*.



Figur 8.1: Skisse av de valgte løsningsalternativene. På toppen av lokket sitter trykktilførselen og skruehodene. Integrert i lokket er en gummimembran som inneholder den hydrauliske væsken. Under lokket er trykkammeret som inneholder den utskiftbare matrisen og metallplaten. I bunnen og siden av trykkammeret er det boret dreneringskanaler for å fjerne luft og eventuelle lekkasjer.

9 Ekstern konsepttesting

Ved å gjennomføre en eksperttest kan man rådføre seg med personer som har ekspertise på utvalgte områder, og dermed kvalitetssikre valgte konseptløsninger.

9.1 Målsettinger for testingen

Målsettingen for testingen er å få tilbakemeldinger og innspill fra eksperter for å vurdere om det bør gjøres endringer på det valgte konseptforslaget.

Det er ønskelig å innhente følgende informasjon:

- Få tilbakemeldinger på utvalgte løsningsalternativer:
 - Forbinde lokk og trykkammer.
 - Feste og tette membranen.
- Kartlegge hva de syns om sikkerhetsfunksjonene.
- Kartlegge hva de syns om å bruke forskjellige materialer i lokk og trykkammer.
- Få egne innspill fra ekspertene.

9.2 Valg av testpopulasjon

Siden prosjektoppgaven er konfidensiell vil ekspertene komme fra ansatte ved NMBU. Følgende eksperter blir brukt:

- Egil Stemsrud: Senioringeniør ved NMBU.
- Henrik Folke Holmberg: Overingeniør ved NMBU.
- Øyvind Hansen, Overingeniør ved NMBU.

9.3 Innhold og form på testskjemaer, kommunikasjonsform

Eksperttestingen ble gjort ved å sende et spørreskjema over mail, som så ble besvart og sendt tilbake som en PDF. Spørreskjemaet kan deles i to deler, hvor det i del én blir gjort rede for bakgrunnen for testingen, hva masterprosjektet går ut på, en konseptbeskrivelse, oppdragsbeskrivelse, og en prinsippskisse med forklaringer.

I del to kommer spørsmålene, hvor det først blir spurt om tilbakemeldinger på valgte løsningsalternativer. Ekspertene kan svare om de er enige med valget, ikke enige, eller at de ikke vet. I tillegg kan de gi en kommentar. Spørreskjemaet med tilhørende tilbakemeldinger ligger i vedlegg 1.

9.4 Resultater og resultattolkning

Forbinde lokk og trykkammer

Øyvind og Egil er enige med at det er greit å bruke skruer til å forbinde lokk og trykkammer. Øyvind foreslår å bruke pineskruer i trykkammeret og muttere på toppen av lokket.

Henrik er uenig i valget av bolter og mener det er bedre å gjenge lokk og trykkammer slik at de kan skrues sammen. Han mener dette er tidsbesparende ved serieproduksjon og at tid er en viktigere faktor enn hva det koster å lage festet.

For forsøksmodellen velger jeg å fortsette med valget av skruer siden det er en enkel og billig løsning. For en fremtidig fullskala modell vil jeg bruke pineskruer med muttere på toppen av lokket siden det minimerer faren for å skade gjengene ved gjentatte monteringer. Jeg er enig med Henrik at det kan være tidsbesparende ved en serieproduksjon å gjenge lokk og trykkammer, men konseptet går ut på å produsere små serier med deler.

Feste og tette membranen

Øyvind er enig med valget hvor det bores et hull i lokket og flensen på trykktilførselen presser mot og tetter membranen. Han mener man må passe på at det ikke blir for høyt flatetrykk mellom flensen og membranen. Egil er usikker og mener det er usikkert om membranen greier å holde tett der den ikke er kontinuerlig.

Jeg velger å gå videre med den valgte løsningen da jeg mener det er den mest skånsomme metoden å forsegle membranen på. Som Øyvind nevner er det viktig at det ikke blir for høyt flatetrykk mellom flensen og membranen.

Sikkerhetsfunksjoner

Henrik og Egil mener det høres fornuftig ut å bruke o-ringer og en sikkerhetsventil. Øyvind foreslår et deksel mellom kammer og operatør.

Jeg velger å fortsatt bruke o-ringer til å sikre mot lekkasjestråler, og ved en fullskala modell vil jeg også bruke en sikkerhetsventil slik at det ikke går å overstige det dimensjonerende trykket. For forsøksmodellen vil jeg la vær å bruke en sikkerhetsventil for å gjøre design og produksjon enklere. Ved utføringen av forsøkene vil det brukes en fett-presse med integrert manometer slik at man enkelt har kontroll på trykket. I tillegg følger jeg Øyvinds råd med å lage en skjerm som beskytter operatøren.

Forskjellige materialer i lokk og trykkammer

Øyvind mener at det ikke vil være et problem med galvanisk korrosjon hvis lokk og trykkammer er lagd av forskjellige materialer. Lokket og trykkammeret kommer ikke til å sitte sammen lenge av gangen og i tillegg må det være en elektrolytt tilstede. Det kan også forhindres ved å bruke en nøytral væske.

Henrik lurer på om ikke lokket må være like stivt som resten av konstruksjonen, og Egil følger opp dette med å nevne at E-modulen til aluminium er en tredjedel av stål og at man fort kan ende opp med samme vekt.

Jeg velger å bruke samme materiale i både lokk og trykkammer, og stål ser ut til å være det mest egnede materialet. Ved å bruke like materialer eliminerer man også sjansen for galvanisk korrosjon.

Egne innspill fra ekspertene

Øyvind tror konseptet vil fungere og at begrensningene ligger på materialtyper og former, som ellers når man former metall. Han kommenterer at ved dette konseptet slipper man å produsere tappen som tradisjonelt går ned i matrisen ved hydroforming.

Henrik mener at konseptet bør testes med en enkel prototype og det stemmer bra siden det skal lages en liten forsøksmodell.

Egil er bekymret for skarpe kanter som membranen må flyte over når metallplaten formes. Jeg har sett at dette kan løses ved å legge en ”slitegummi” over metallplaten som skåner membranen. Det kan også oppstå skarpe kanter i overgangen der lokk og trykkammer ligger an mot hverandre hvis de ikke er riktig sentrert. Dette løses ved å bruke styrepinner som senterer lokk og trykkammer. Egil nevner også at man må ta hensyn til maks % flyt i materialet som formes slik at det ikke oppstår sprekker.

10 Dimensjonering

For å kontrollere styrkeforhold i forhold til sikkerhet og størrelser blir det gjennomført håndberegninger. Med beregningsverdiene kan man dimensjonere komponenter og velge materialkvaliteter.

10.1 Beregningsplan og forutsetninger

Målsettingen for beregningene er å påse at produktet skal fungere og at det er sikkert å anvende. Kritiske komponenter og oppgaver er å:

- Beregne nødvendig tykkelse for sylindere.
- Beregne nødvendig tykkelse i lokk og bunn.
- Dimensjonere skruene som holder lokk og trykkammer sammen.
- Dimensjonere trykktilførselen.
- Bestemme størrelse på o-ringer og o-ringenes spor.

I delkapittel 3.8 er det blitt gjort rede for relevante standarder som kan brukes for beregning og dimensjonering av trykkpåkjent utstyr, men disse er såpass dyre at de ikke kunne kjøpes inn for dette masterprosjektet. Ved beregning og dimensjonering av en fremtidig salgsmodell vil disse standardene brukes.

For forsøksmodellen skal membranen fylles med fett i stedet for hydraulikkvæske. Fett er lite eksplosivt og anses som sikrere ved eventuelle lekkasjer. Det vil bli brukt en fett-presse med integrert manometer slik at man har god oversikt over trykket i trykkammeret. Forsøksmodellen vil bli brukt så lite at man ser bort fra utmatting og dimensjonerer for statisk belastning. Lokk og trykkammer skal ha en sikkerhet mot flyt på 2,5.

Verkstedet ved NMBU har et $\varnothing 200\text{mm}$ S355 rundstål liggende og det er derfor gunstig å bruke denne til lokk og trykkammer. For å minimere antall skruer er det valgt å bruke skruer av fasthetsklasse 12.9. Ved statisk belastning kan en i mange tilfeller belaste skruen helt opp til flytegrensen [9], men her velges det å bruke en sikkerhetsfaktor på $n_f = 1,5$. I tabell 10.1 nedenfor er det vist materialeegenskaper, sikkerhetsfaktorer mot flyting og tillatte spenninger for sylinder, lokk og skruer.

Tabell 10.1 Materialeegenskaper, sikkerhetsfaktorer og tillatte spenninger brukt i beregningene.

Element	R_m	R_e	n_f	σ_{till}
S355 konstruksjonsstål	470-630MPa	355MPa	2,5	142MPa
Skruer fasthetsklasse 12.9	1200MPa	1080MPa	1,5	720MPa

Alle beregninger gjøres med formler som er utledet i kapittel 5, og ved hver beregning blir det referert til hvilken formel som brukes. Alle svar fra utregninger i dette kapitlet blir indekset med utformingen 10.x, hvor 10 er kapittelnummeret og x har verdi fra 1 og oppover.

10.2 Beregning av sylinder

Utvendig diameter er 200mm og innvendig diameter antas å være 120mm. For å sjekke om man kan bruke teorien for tykkvegget sylinder brukes formel 5.19. Følgende variabler brukes til beregningene av en tykkevegget sylinder:

$r_y =$ ytre radie = 100mm
 $r_i =$ indre radie = 60mm
 $r_m =$ middelradie = 80mm
 $s_o =$ veggtykkelse = 20mm
 $p =$ indre trykk = 50MPa

$$\frac{s_o}{r_m} \geq \frac{1}{10} \Rightarrow \frac{20mm}{80mm} = \frac{1}{4} \geq \frac{1}{10} \quad (10.1)$$

Teorien for tykkveggede beholdere brukes.

Det skal nå beregnes tangentiell spenning, aksial spenning og radiell spenning, slik det fremkommer av figur 5.6. Ekstremalverdiene for radiell- og tangentiell spenning skjer ved sylindrens indre radius, r_i . Den radielle spenningen beregnes med formel 5.23, den tangentielle spenningen med formel 5.26 og den aksielle spenningen med formel 5.22:

$$\sigma_{r,min} = -p_i = \mathbf{-50N/mm^2} \quad (10.2)$$

$$\sigma_{t,maks} = \frac{[(\frac{r_i}{r_y})^2 + 1] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2} = \mathbf{106N/mm^2} \quad (10.3)$$

$$\sigma_a = \frac{[(\frac{r_i}{r_y})^2] \cdot p_i}{1 - (\frac{r_i}{r_y})^2} = \mathbf{28N/mm^2} \quad (10.4)$$

Finner jevnførende spenning med von Mises hypotese fra formel 5.27:

$\sigma_1 = \sigma_t = 106N/mm^2$
 $\sigma_2 = \sigma_a = 28N/mm^2$
 $\sigma_3 = \sigma_r = -50N/mm^2$

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_2 - \sigma_2\sigma_3 - \sigma_3\sigma_1} = \mathbf{135N/mm^2} \quad (10.5)$$

Sikkerhetsfaktor mot flyt beregnes med formel 5.83:

$$n_f = \frac{R_e}{\sigma_{jf}} = \mathbf{2,6} \quad (10.6)$$

Med ytre diameter 200mm og indre diameter 120mm tilfredsstilles kravet om sikkerhetsfaktor mot flyting $n_f \geq 2,5$.

10.3 Beregning av bunn og lokk

For å beregne nødvendig tykkelse på et sirkulært lokk eller bunn brukes formel 5.35. Følgende variabler brukes i beregningene:

$\sigma_b = \sigma_{till} =$ tillatt spenning = 142MPa

$p =$ indre trykk = 50MPa

$r =$ innvendig radie i lokket = 60mm

$$t = \sqrt{\frac{1,2 \cdot p \cdot r^2}{\sigma_b}} = \mathbf{39mm} \quad (10.7)$$

Tykkelsen på lokk og bunn settes til $t=40\text{mm}$.

10.4 Skrueberegninger

Krefter på skruene:

Med formel 5.55 beregnes kraften F_l som virker på hver skrue:

$n =$ antall skruer = 10

$D =$ indre diameter til lokket = 120mm

$p =$ indre trykk = 50MPa

$$F_l = \frac{p \cdot \pi \cdot D^2}{4 \cdot n} = \mathbf{56,5kN} \quad (10.8)$$

For å kunne beregne forspenningskraften må man sette en verdi for forholdet $\frac{\delta_1}{\delta_2}$ og klemsikkerheten n_k . Flensene anses som tykke og $\frac{\delta_1}{\delta_2}$ settes konservativt til 10. Klemsikkerheten n_k settes til 1,5. Forspenningskraften F_i beregnes med formel 5.70:

$\frac{\delta_1}{\delta_2} = y = 10$

$n_k =$ klemsikkerhet = 1,5

$F_l = 56,5\text{kN}$

$$F_i = \frac{F_l}{\frac{(\frac{1}{n_k})}{y} + \frac{1}{n_k}} = \mathbf{77,0kN} \quad (10.9)$$

Den totale kraften F_a som virker på skruen beregnes med formel 5.72:

$F_i =$ forspenningskraft = 77,0kN

$n_k =$ klemsikkerhet = 1,5

$F_l =$ belastning pga. trykk = 56,5kN

$$F_a = F_i \left(1 - \frac{1}{n_k}\right) + F_l = \mathbf{82,2kN} \quad (10.10)$$

Dimensjonering av skruer:

Som beskrevet i seksjon 5.7.4 kan man bruke to fremgangsmåter for å dimensjonere skruer: En måte er å bruke et dimensjoneringsdiagram, mens den andre er å beregne den jevnførende spenningen i skruen. Den mest nøyaktige metoden er å finne den jevnførende spenningen og derfor vil denne metoden brukes. Dette sørger for at skruedimensjonen blir så liten som mulig.

Det sjekkes om M16 skruer i fasthetsklasse 12.9 er tilstrekkelig. Spenningen σ_d i skruen på grunn av strekk beregnes med formel 5.77:

F_a = total kraft på skruen = 82,2kN

A_s = spenningsareal = 157mm²

$$\sigma_d = \frac{F_a}{A_s} = \mathbf{524MPa} \quad (10.11)$$

For å finne torsjonsspenningen i skruen må man vite momentet M_v som trengs for å trekke til skruen. For å beregne M_v må man beregne gjengens middeleradius r_m , friksjonsvinkelen ϵ_1 , og gjengens stigningsvinkel ϕ med de respektive formlene 5.47, 5.48 og 5.49:

d_1 = lillediameter = 13,835mm

d_2 = midtdiameter = 14,503mm

μ = gjengens friksjonskoeffisient = 0,20

α = halve profilvinkelen = 30°

P = gjengestigning = 2mm

$F = F_i = 77,0kN$

$$r_m = \frac{d_2}{2} = \mathbf{7,252mm} \quad (10.12)$$

$$\epsilon_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\mu}{\cos\alpha}\right) = \mathbf{13,00^\circ} \quad (10.13)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right) = \mathbf{2,51^\circ} \quad (10.14)$$

Momentet M_v beregnes med formel 5.46:

$$M_v = F \cdot r_m \cdot \tan(\epsilon_1 + \phi) = \mathbf{155kNmm} \quad (10.15)$$

Torsjonsspenningen τ_v beregnes med formel 5.78:

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_v} = \frac{M_v \cdot 16}{\pi \cdot d_1^3} = \mathbf{298MPa} \quad (10.16)$$

Den jevnførende spenningen σ_{jf} beregnes med formel 5.79:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3\tau_v^2} = \mathbf{736MPa} \quad (10.17)$$

Sikkerhet mot flyt beregnes med formel 5.83:

$$n_f = \frac{R_e}{\sigma_{jf}} = \mathbf{1,47} \quad (10.18)$$

Sikkerhet mot flyt n_f er 1,47, noe som er rett under den ønskede verdien på 1,5. Dette er imidlertid såpass nære at $n_f \approx 1,5$ og M16 skruer er tilstrekkelige i forbindelsen.

Inngrepslengde

Når man dimensjonerer for inngrepslengden er det ønskelig at ved et brudd skal det være et strekkbrudd i skruen og ikke avskrelling av gjengene. Følgende variabler er nødvendige for beregningene:

$$R_{m,skrue} = 1200MPa$$

$$R_{e,skrue} = 1080MPa$$

$$R_{e,gjenget hull} = 355MPa$$

$$A_s = \text{spenningsareal} = 157mm^2$$

$$d = \text{hulldiameter} = 16mm$$

$$d_2 = \text{midtdiameter} = 14,503mm$$

Minimums inngrepslengde i hullet beregnes med formel 5.80:

$$L_{gjenget hull} \geq \frac{R_{m,skrue}}{R_{e,gjenget hull}} \cdot \frac{2 \cdot A_s}{0,6\pi \cdot d} = \mathbf{35,2mm} \quad (10.19)$$

Minimums inngrepslengde for skruen beregnes med formel 5.81:

$$L_{skrue} \geq \frac{R_{m,skrue}}{R_{e,skrue}} \cdot \frac{2 \cdot A_s}{0,6\pi \cdot d_2} = \mathbf{12,8mm} \quad (10.20)$$

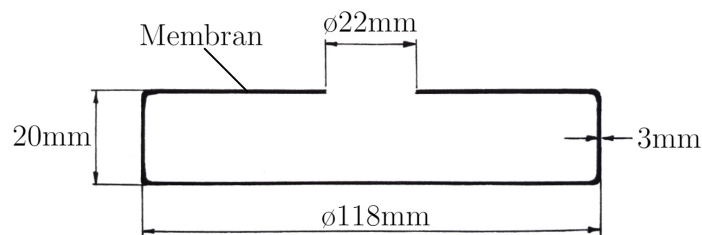
Minimums inngrepslengde bestemmes av formel 5.82:

$$L_{min} \geq \text{maks}(L_{gjenget hull}, L_{skrue}) = \mathbf{35,2mm} \quad (10.21)$$

Hullet i trykkammeret må gjenges minimum 35,2mm for å være sikker på at det oppstår strekkbrudd i skruen og ikke avskrelling av gjengene.

10.5 Membran

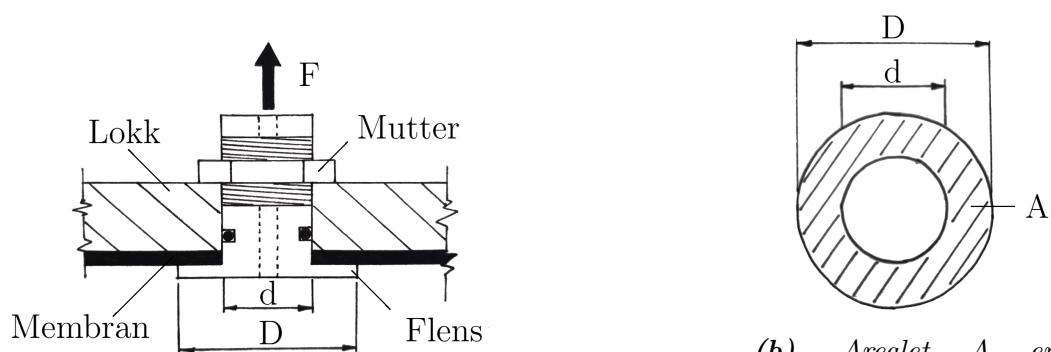
Det er fortsatt uklart hvilket materiale som skal brukes i membranen og hvilken størrelse som er nødvendig for å kunne forme platene. Man må antageligvis lage membraner av forskjellige materialer og forskjellige størrelser og gjennomføre testinger for å se hva som fungerer. Foreløpig er det antatt at utvendig høyde på membranen er 20mm, utvendig diameter er 118mm og tykkelse er 3mm. Hullet i toppen hvor trykktilførselen kommer har en diameter på 22mm. I figur 10.1 nedenfor er det laget en skisse hvor membranen er målsatt.



Figur 10.1: Skisse av membranen med mål. Membranen er sirkulær og i toppen er det lagd et sirkulært hull til trykktilførselen.

10.6 Trykktilførselen

For å sørge for at membranen tettes må flatetrykket mellom flensen på trykktilførselen og membranen være større enn det hydrostatiske trykket i trykkammeret. Ved å stramme mutteren som vises i figur 10.2a vil flensen presses mot membranen, som igjen presses mot undersiden av lokket og man oppnår forsegling. Maks trykk i trykkammeret er 50MPa, og det er ønskelig at flatetrykket mellom flensen og membranen er 60MPa. I figur 10.2b er arealet A kontaktflaten mellom flensen og membranen. D er ytre diameter til flensen og d er diameteren til hullet i membranen.



(a) Ved å stramme mutteren vil det oppstå en kraft F som presser flensen på trykktilførselen mot membranen.

(b) Arealet A er kontaktflaten mellom flensen på trykktilførselen og membranen.

Figur 10.2: Flensen på trykktilførselen klemmes mot undersiden av lokket slik at membranen klemmes fast og forsegles.

Arealet A beregnes med formel 5.85:

$D = \text{største diameter} = 40\text{mm}$

$d = \text{minste diameter} = 22\text{mm}$

$$A = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} = \mathbf{877\text{mm}^2} \quad (10.22)$$

Nødvendig kraft F som trengs for å oppnå tilstrekkelig flatetrykk beregnes med formel 5.86:

$p = \text{indre trykk} = 50\text{MPa}$

$$F = p \cdot A = \mathbf{52,6\text{kN}} \quad (10.23)$$

For å oppnå en aksialkraft F må mutteren strammes med et moment M . Momentet M er summen av momentet M_v som trengs for å overvinne friksjon i gjengene og momentet M_s som trengs for å overvinne friksjonen mellom mutteren og underlaget. For å beregne M_v må man beregne gjengens middelradius r_m , friksjonsvinkelen ϵ_1 , og gjengens stigningsvinkel ϕ med de respektive ligningene 5.47, 5.48 og 5.49: Den gjengede delen er i dimensjon M20. Variable for beregningene er:

$d_1 = \text{lillediameter} = 17,294\text{mm}$

$d_2 = \text{midtdiameter} = 18,164\text{mm}$

$\mu = \text{friksjonskoeffisient} = 0,20$

$\mu' = \text{friksjonskoeffisient} = 0,20$

$\alpha = \text{halve profilvinkelen} = 30^\circ$

$P = \text{gjengestigning} = 2,5\text{mm}$

$F = \text{aksialkraft} = 52,6\text{kN}$

$$r_m = \frac{d_2}{2} = \mathbf{9,082\text{mm}} \quad (10.24)$$

$$\epsilon_1 = \tan^{-1}\left(\frac{\mu}{\cos\alpha}\right) = \mathbf{13,00^\circ} \quad (10.25)$$

$$\phi = \tan^{-1}\left(\frac{P}{\pi \cdot d_2}\right) = \mathbf{2,51^\circ} \quad (10.26)$$

Momentet M_v beregnes med ligning 5.46:

$$M_v = F \cdot r_m \cdot \tan(\epsilon_1 + \phi) = \mathbf{132,6\text{kNmm}} \quad (10.27)$$

For å beregne momentet M_s må man beregne friksjonskraftens radius r'_m . Variabler for beregningene er:

$$s = \text{nøkkelvidde} = 30\text{mm}$$

$$d_h = \text{frihull} = 20\text{mm}$$

Beregningene gjøres med formel 5.52:

$$r'_m = \frac{s + d_h}{4} = \mathbf{12,5\text{mm}} \quad (10.28)$$

Momentet M_s beregnes med formel 5.51:

$$\mu' = \text{friksjonskoeffisient} = 0,20$$

$$F = \text{aksialkraft} = 52,6\text{kN}$$

$$M_s = \mu' \cdot F \cdot r'_m = \mathbf{131,5\text{kNmm}} \quad (10.29)$$

Det totale momentet M som mutteren skal strammes med beregnes med formel 5.53:

$$M = M_v + M_s \approx \mathbf{265\text{Nm}} \quad (10.30)$$

Spenninger

Når mutteren strammes vil det oppstå en aksialkraft F og et vridemoment M_v som fører til spenninger. Maks spenning vil oppstå i tverrsnittsarealet der det er frest et spor til o-ringen. Diameteren her er $d=17\text{mm}$. Tverrsnittsarealet beregnes med formel 5.84:

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = 227\text{mm}^2 \quad (10.31)$$

Spenningen på grunn av strekk beregnes med formel 5.77:

$$F_a = F = 52,6\text{kN}$$

$$A_s = A = 227\text{mm}^2$$

$$\sigma_d = \frac{F_a}{A_s} = \mathbf{232\text{MPa}} \quad (10.32)$$

Torsjonsspenningen beregnes med formel 5.78:

$$M_v = \text{vridemoment} = 132,6\text{kNmm}$$

$$d_1 = d = 17\text{mm}$$

$$\tau_v = \frac{M_v}{W_v} = \frac{M_v \cdot 16}{\pi \cdot d_1^3} = \mathbf{137MPa} \quad (10.33)$$

Den jevnførende spenningen beregnes med formel 5.79:

$$\sigma_{jf} = \sqrt{\sigma_d^2 + 3\tau_v^2} = \mathbf{332MPa} \quad (10.34)$$

Ved beregning av den jevnførende spenningen er det ikke beregnet med en kjervfaktor.

Spenninger i flensen

Der flensen møter lokket vil det bli en avskjæringsforbindelse og tykkelsen på flensen må beregnes. Det er ønskelig at den jevnførende spenningen er lik som i ligning 10.34. Det er antatt at det er en ren avskjæring og ingen bøyespenning. Ønskelig skjærspenning beregnes med formel 5.87:

$$\sigma_{jf} = 332MPa$$

$$\tau_{till} = \sqrt{\frac{\sigma_{jf}^2}{3}} = \mathbf{192MPa} \quad (10.35)$$

Tykkelsen på flensen beregnes med formel 5.88:

$$h = \frac{F}{\tau_{till} \cdot \pi \cdot d} = \mathbf{5,1mm} \quad (10.36)$$

Minimum tykkelse er beregnet til å være 5,1mm og flensens tykkelse settes til 6mm.

10.7 O-ringer

Størrelse på o-ringene som tetter mellom lokk og trykkammer, og lokk og trykktilførsel, bestemmes med Parkers o-ringkalkulator [6].

10.7.1 O-ring mellom lokk og trykkammer

I figur 10.3 er det vist hvordan dreneringssporet og o-ringssporet er plassert i forhold til innsiden av trykkammeret. Med o-ringkalkulatoren til Parker ble følgende nominelle dimensjoner satt:

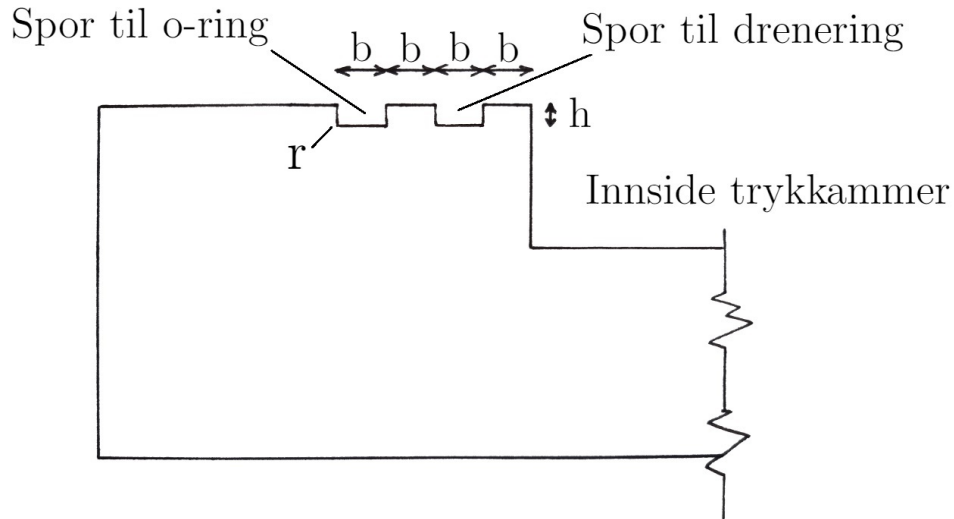
O-ringen:

O-ringens indre diameter, $\varnothing d1 = 142,000mm$

O-ringens tverrsnitt, $\varnothing d2 = 2,000mm$

O-ringens spor:Ytre diameter, $\varnothing d_7 = 144,000\text{mm}$ Bredde, $b = 3,000\text{mm}$ Høyde, $h = 1,450\text{mm}$ Radius, $r = 0,700\text{mm}$

For utfyllende informasjon om toleranser og tekniske beskrivelser, se vedlegg 3.



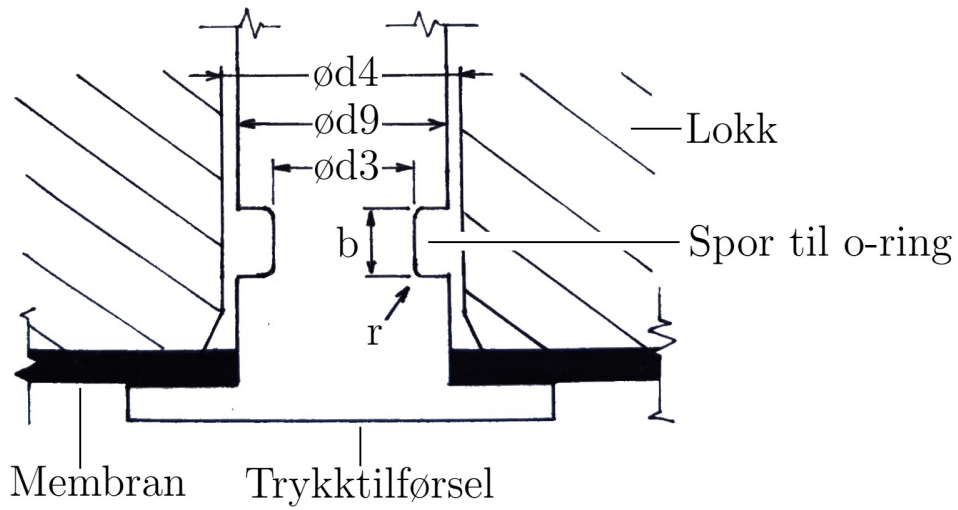
Figur 10.3: Plassering av o-ringssporet og dreneringssporet i trykkammeret.

10.7.2 O-ring mellom trykktilførsel og lokk

I figur 10.4 er trykktilførselen plassert i lokket og man kan se sporet til o-ringens og tilhørende dimensjoner. Med o-ringkalkulatoren til Parker ble følgende nominelle dimensjoner satt:

O-ringens:O-ringens indre diameter, $\varnothing d_1 = 16.500\text{mm}$ O-ringens tverrsnitt, $\varnothing d_2 = 2.000\text{mm}$ **O-ringens spor:**Nedre diameter, $\varnothing d_3 = 17,000\text{mm}$ Bredde, $b = 2,900\text{mm}$ Radius, $r = 0,700\text{mm}$ **Dimensjoner på trykktilførsel og lokk**Trykktilførselens største diameter, $\varnothing d_9 = 20.000\text{mm}$ Diameter på hullet i lokket, $\varnothing d_4 = 20,005\text{mm}$

For utfyllende informasjon om toleranser og tekniske beskrivelser, se vedlegg 4.



Figur 10.4: Dimensjoner på trykktilførselens o-ringspor og tilhørende diametere.

11 Planlegging av tidlige forsøk

For å verifisere at konseptet fungerer må det gjennomføres tester og målinger når forsøksmodellen er produsert. I dette kapitlet beskrives tre egenskaper som skal testes og med tilhørende testmål.

11.1 Forsøksmål

I de tidlige forsøkene er det ønskelig å teste tre egenskaper for å verifisere at konseptet fungerer:

- Produktets sikkerhet.
- Sjekke om membranen holder tett.
- Pressing av metallplater.

11.2 Testing av sikkerhet

Trykkammeret vil være belastet med et høyt trykk og hvis en lekkasjestråle treffer et menneske kan væsken trenge under huden, noe som fører til alvorlige skader og i verste fall dødsfall. Det kan innføres to typer sikkerhetstiltak: Designmessige sikkerhetstiltak og eksterne sikkerhetstiltak.

Designmessig monteres det en o-ring mellom lokk og trykkammer med en tilhørende drenering som drenerer hydraulikkvæsken til tank hvis membranen skulle sprekke. Som arbeidsmedium vil det brukes fett som har mindre eksplosiv oppførsel enn f.eks. vann ved en lekkasje.

Som eksterne sikkerhetstiltak kan trykkammeret nedsenkes i vann og/eller plasseres bak en skjerm under testingen. Ved en eventuell lekkasje vil vannet bremse lekkasjestrålen, mens skjermen vil stoppe lekkasjestrålen helt.

Målene for testing av sikkerhet er:

- Teste at o-ringen holder det dimensjonerende trykket.
- Teste og verifisere spenninger med strekkklapper.

11.3 Testing av membran

Membranen vil inneholde fett under høyt trykk og hvis det oppstår lekkasjer vil trykket synke, som igjen gjør at metallplatene ikke formes.

Målene for testing av membranen er:

- Teste at det ikke lekker i gjennomføringen i lokket.
- Teste at membranen tåler det dimensjonerende trykket.

- Teste membranens elastisitet.
- Teste hvor slitesterk membranen er.

11.4 Testing av metallplate-pressing

Når man vet at sikkerhetsfunksjonene fungerer og at membranen holder på trykket kan man begynne å presse metallplater. Til å begynne med vil det være ønskelig å benytte en matrise med en enkel geometri og med slippvinkler fra 0-30 grader.

Forskjellige platematerialer har forskjellige mekaniske egenskaper og det er ønskelig å teste hvordan de lar seg forme. Det er ønskelig å begynne med et materiale som er tynt og formbart, f.eks. tinn, før man går over til stivere materialer som f.eks. aluminium.

Målene for testing av metallplate-pressing er:

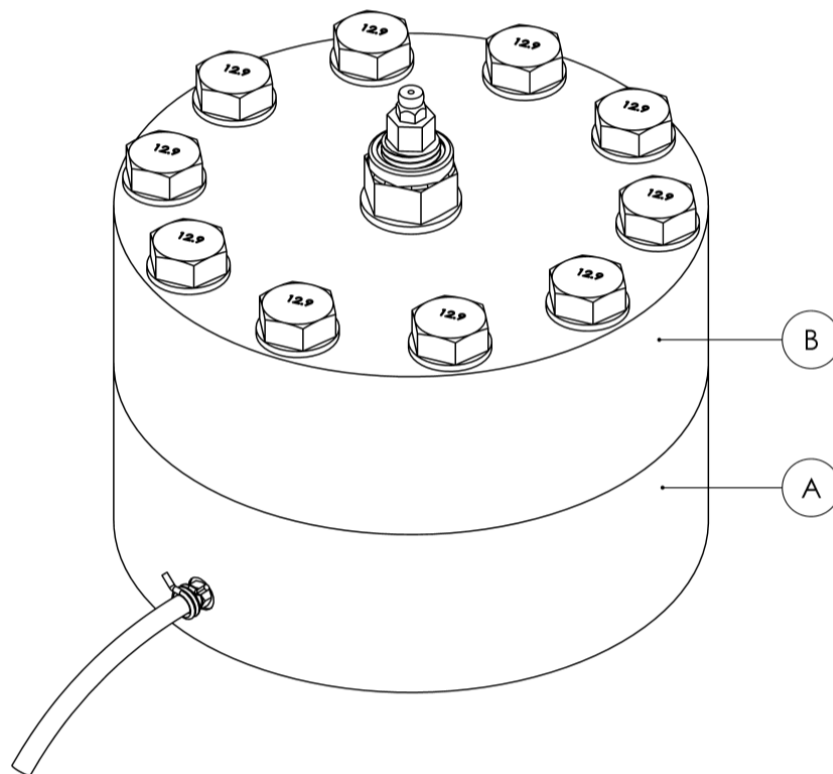
- Teste om metallplatene formes etter matrisen.
- Teste forskjellige materialer og platetykkelser for å se deres oppførsel.
- Teste og verifisere om formel 5.1, nødvendig formingstrykk, stemmer.

12 Produktarkitektur og konseptdesign

I dette kapitlet presenteres det endelige konseptdesignet som er basert på tidligere konseptvalg. Hensikten med dette er å vise en komplett sammenstilling av egendesignede- og standardiserte komponenter.

12.1 Sammenstilling

Figur 12.1 nedenfor viser en sammenstilling av forsøksmodellen. Produktet deles inn i to større hoveddeler: Trykkammer og lokk, som er merket A og B.

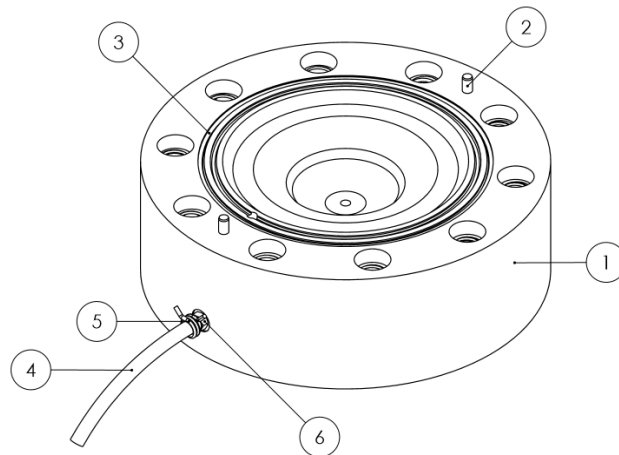


Figur 12.1: Sammenstillingstegning: A) trykkammer med tilhørende drenering, og B) lokk med skruer og integrert membran.

Tabell 12.1 Deleliste for forsøksmodellen.

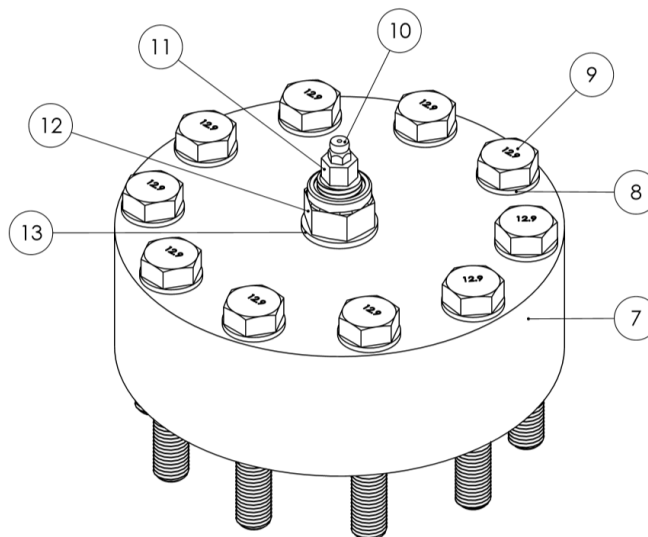
Nr.	Navn	Nr.	Navn	Nr.	Navn
1	Trykkammer	6	Slangenippel	11	Trykktilførsel
2	Styrepinne	7	Lokk	12	Mutter M20
3	O-ring 142,0x2,0mm	8	Underlagsskive M16	13	Underlagsskive M20
4	Dreneringsslange	9	Skrue M16	14	Membran
5	Slangeklemme	10	Fettnippel	15	O-ring 16,5x2,0mm

Hoveddel A, trykkammer med komponenter:

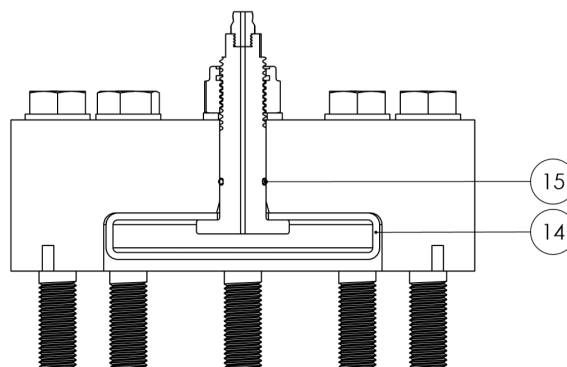


Figur 12.2: Hoveddel A som består av komponenter 1-6.

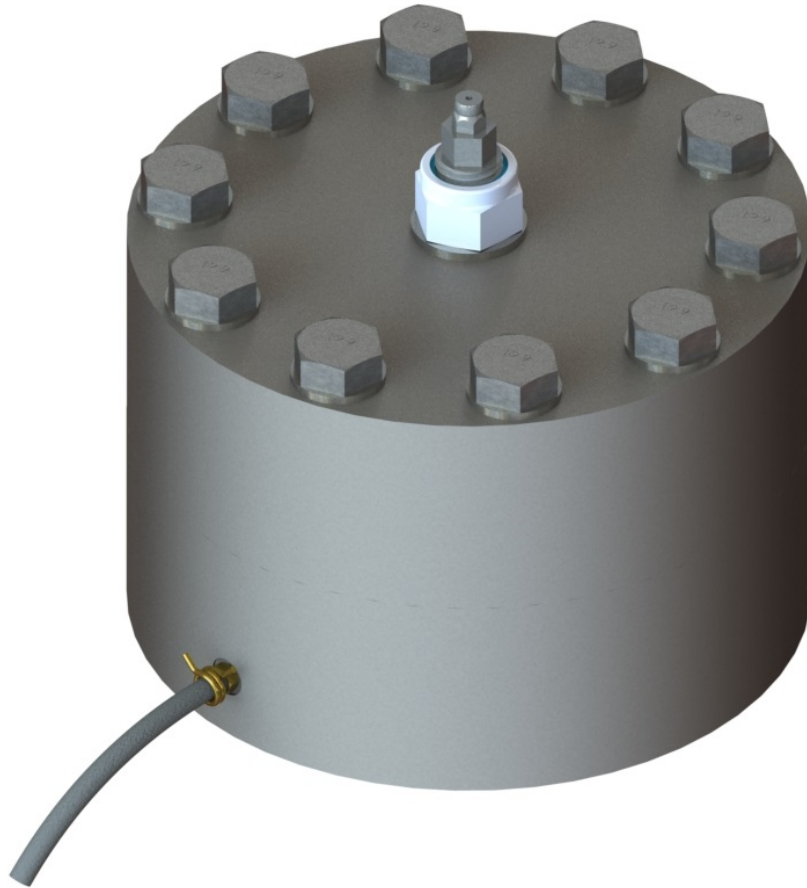
Hoveddel B, lokk med komponenter:



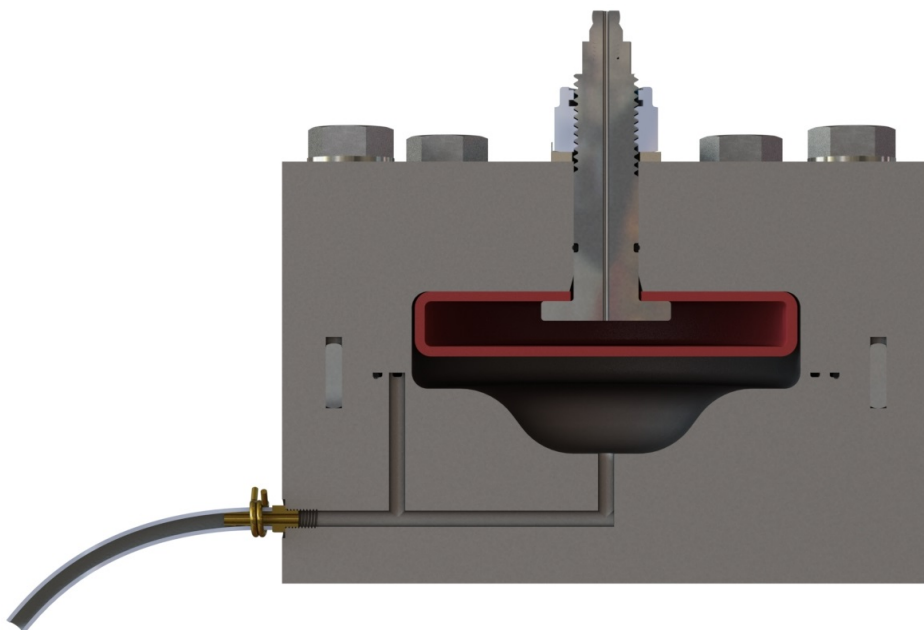
Figur 12.3: Hoveddel B sett fra utsiden med komponenter 7-13.



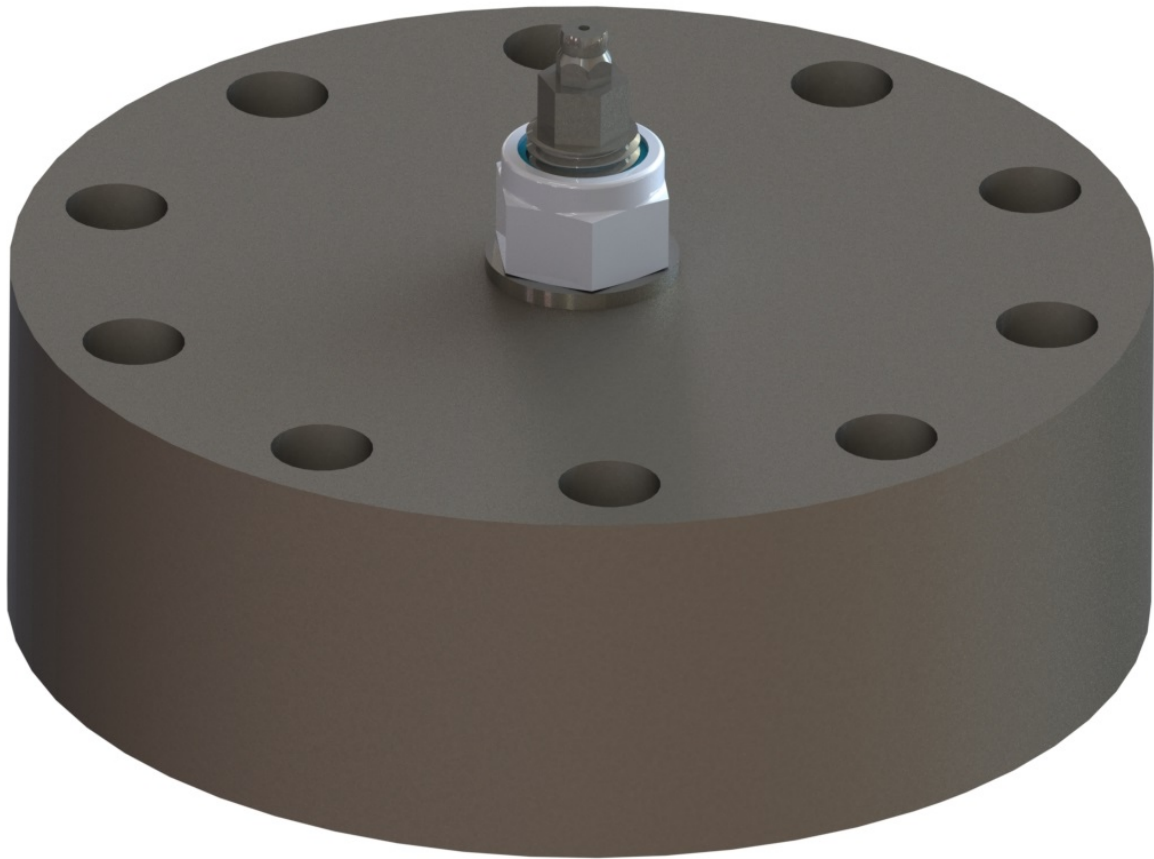
Figur 12.4: Hoveddel B er snittet i to slik at man ser komponent 14 og 15.



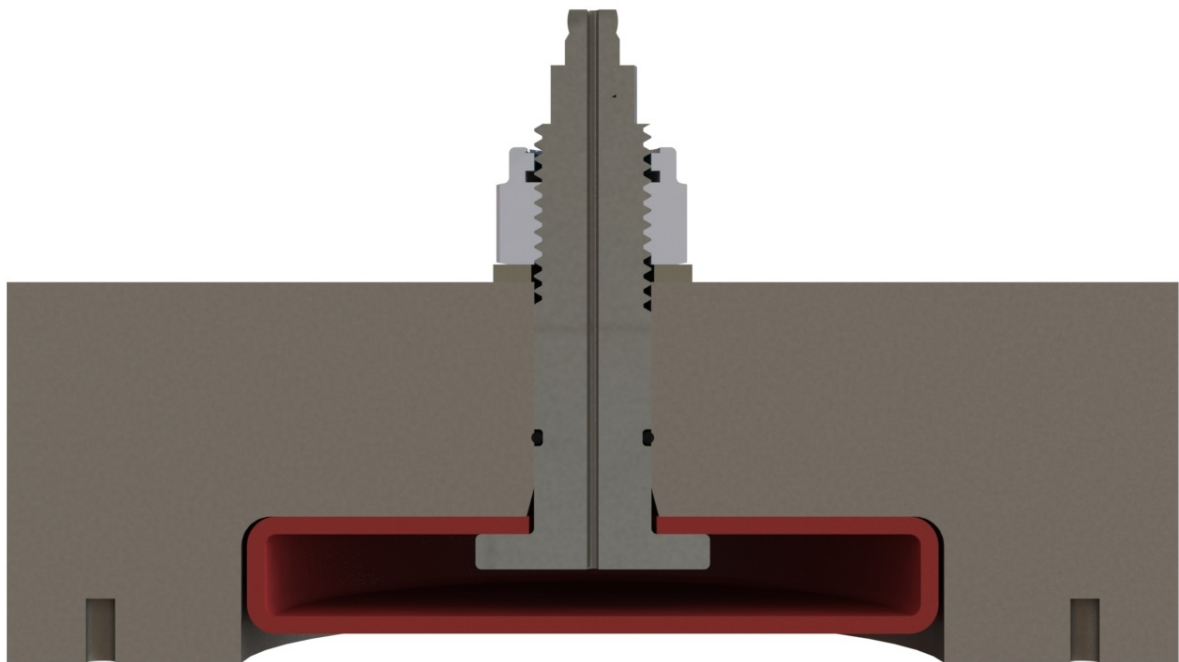
Figur 12.5: Produktet er komplett og montert, klart til bruk.



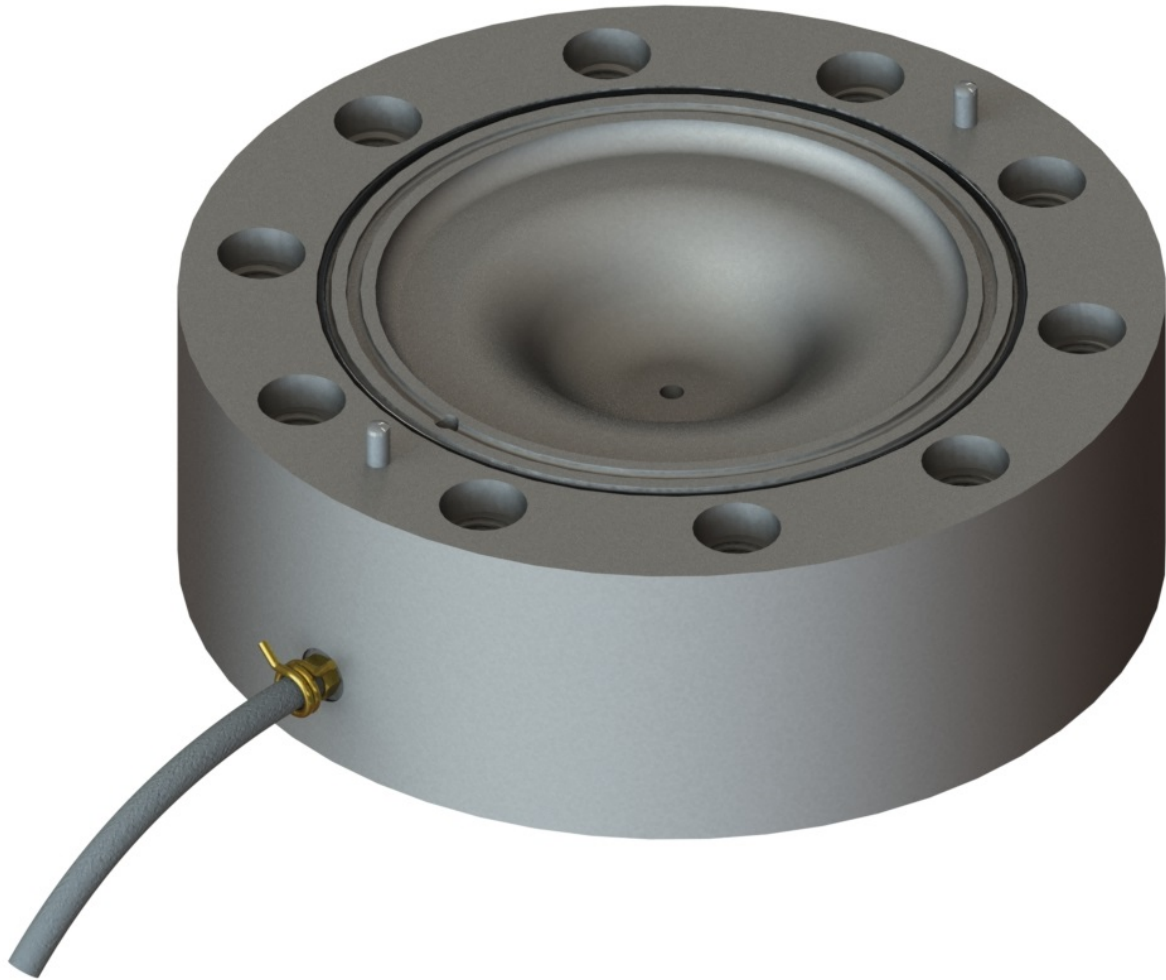
Figur 12.6: Produktet er snittet i to slik at man kan se innvendige komponenter og funksjoner.



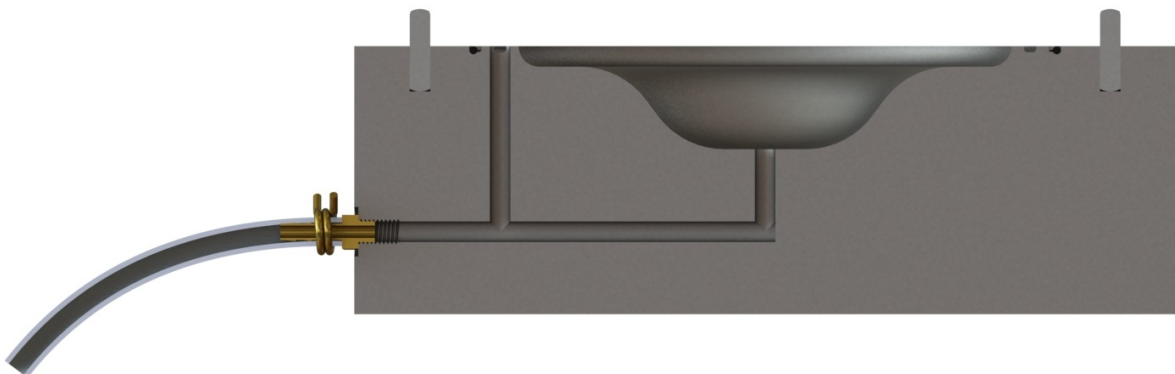
Figur 12.7: Lokk med integrert membran.



Figur 12.8: Lokket er snittet i to slik at man kan se membranen og hvordan den blir klemt fast av flensen.



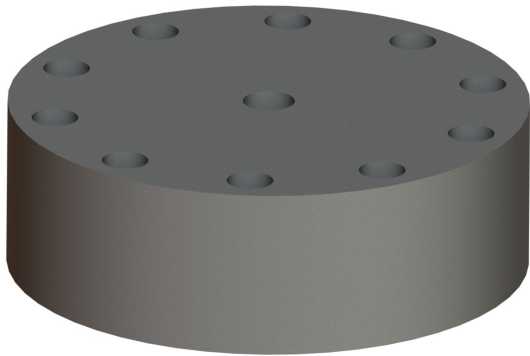
Figur 12.9: Trykkammer med monteret drenering, o-ring og styrepinner.



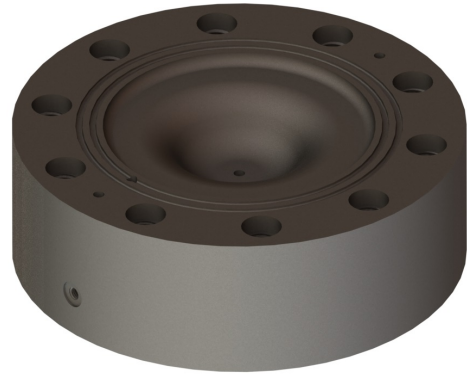
Figur 12.10: Trykkammeret er delt i to slik at man kan se dreneringskanalene.

12.2 Design av hovedelementer

Hovedelementene i konstruksjonen er de to største komponentene som tar opp trykket og hvor resten av de mindre komponentene blir festet.



(a) Lokk med frihull til skruer og et sentrert hull til trykktilførselen.



(b) Trykkammer med matrise, spor til o-ring, gjengede hull til skruer, hull til styrepinner og dreneringskanaler.

Figur 12.11: Hovedelementene i konstruksjonen.

12.3 Design av komponenter



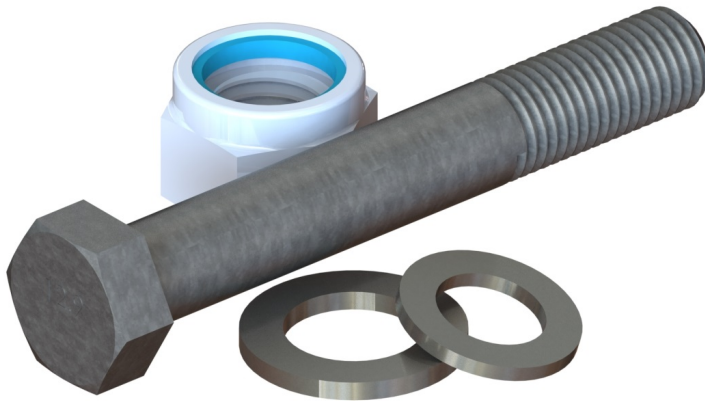
(a) Trykktilførselen som klemmer fast og tetter membranen.



(b) Membranen som holder på fettene og former metallplaten mot matrisen.

Figur 12.12: Egendesignede komponenter.

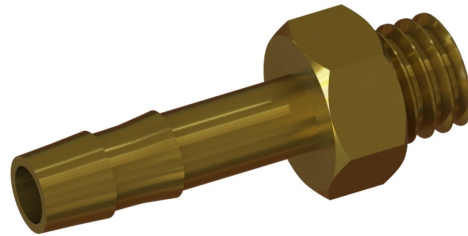
12.4 Modularisering og standardkomponenter



(a) Skruer, skiver og låsemutter.



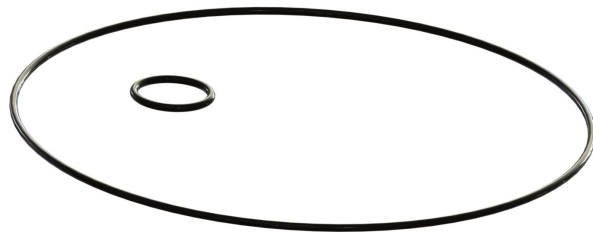
(b) Dreneringslange.



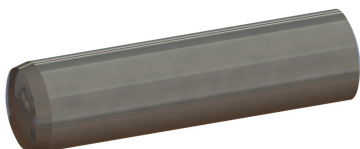
(c) Slangenippel.



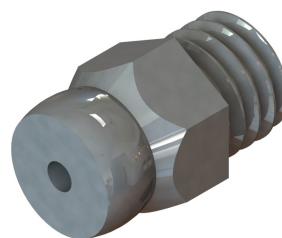
(d) Slangeklemme.



(e) O-ringer.



(f) Styrepinne.



(g) Fettnippel.

Figur 12.13: Standardkomponenter som brukes i forsøksmodellen.

13 Robusthet, vedlikehold og resirkulering

Produktet blir utsatt for et stort innvendig trykk og det er viktig at konstruksjonen er tilstrekkelig dimensjonert. Ved å gjennomføre simuleringer kan man avdekke svakheter og verifisere produktets sikkerhet.

13.1 Styrkeberegninger med FEM

I dette delkapittelet blir det utført en FEM-analyse av produktets hovedelementer, som er trykkammeret og lokket. Målet med analysen er å kartlegge jevnførende Von-mises spenning og deformasjon, for så å sammenligne spenningene med håndberegningene som ble utført i kapittel 10. Håndberegningene ble basert på forenklede geometrier som en tykkvegget sylindere og et flatt sirkulært lokk, og det er antatt at spenningene i FEM-analysen vil være høyere på grunn spenningskonsentrasjoner der det er kjerter, f.eks. midt i lokket der trykktilførselen er festet.

Hvis det blir avdekket store spenningskonsentrasjoner skal det vurderes om designet må endres, om spenningene er veldig lokale og kanskje akseptable, eller om spenningskonsentrasjonene kan skyldes oppsettet i FEM-analysen.

For å verifisere at FEM-analysen har konverget blir det utført en *mesh independence analyse*. Dette vil si at man først kjører en simulering med et grovt mesh, for så å gjøre meshet finere og finere helt til spenningene konvergerer. Ved å gjøre dette kan man verifisere at spenningene ikke lenger er avhengige av størrelsen på meshet.

13.1.1 Oppsett av FEM-simulering

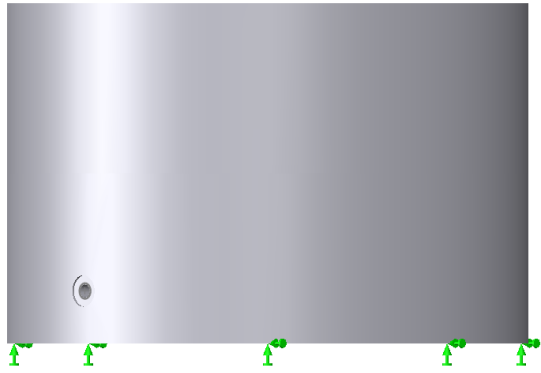
Forenklinger

For å minimere muligheten for feil i simuleringen blir det gjort forenklinger. Alle komponenter foruten underlagsskiver er fjernet fra både lokk og trykkammer slik at det kun er de to hovedelementene som er med i simuleringen. I trykkammeret er alle gjengene i hullene fjernet for å unngå problemer med meshet.

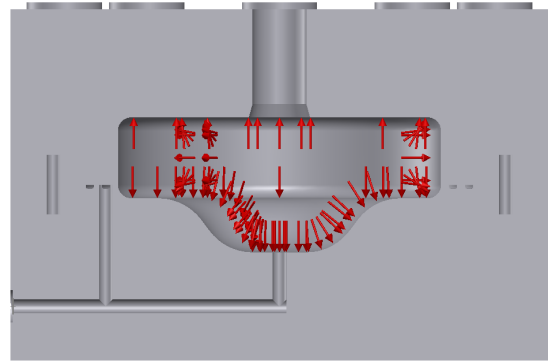
Opplagring, kontakter og krefter

- **Opplagring:** Opplagringen gjøres ved å låse fast bunnen av trykkammeret. Opplagringen sørger for låsing mot bevegelse og rotasjon i alle frihetsgrader. Se figur 13.1a.
- **Krefter:** Kreftene som virker på lokk og trykkammer kommer fra det hydrostatiske trykket som er 50MPa. Se figur 13.1b for å se flatene hvor trykket virker.
- **Forspenning av skruer:** I solidworks er det en egen funksjon for å simulere forspenning av skruer. Se figur 13.1c og 13.1d for å se hvordan skruene er festet. Forspenningen settes til 77kN.

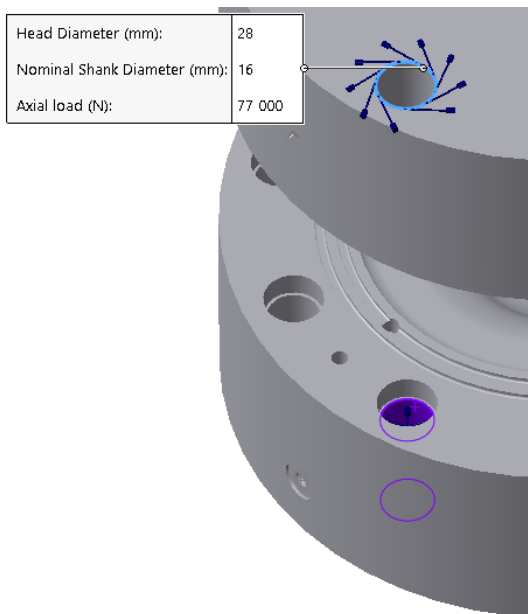
- **Kontakt mellom lokk og trykkammer:** Mellom lokk og trykkammeret blir det satt en kontaktflate med en friksjonskoeffisient på 0,15.
- **Kontakt mellom underlagsskive og lokk:** Mellom underlagsskiven og lokket blir det satt en kontaktflate med en friksjonskoeffisient på 0,15. Skivene settes til å være uendelig stive.



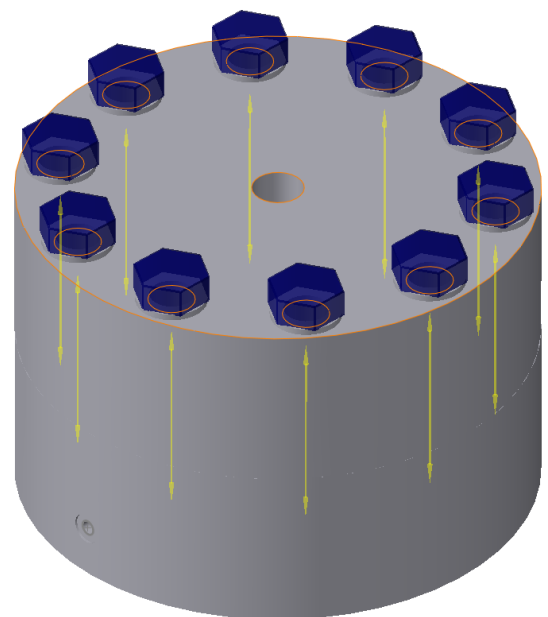
(a) Opplagring i bunnen av trykkammeret sørger for låsing av alle frihetsgrader.



(b) Det hydrostatiske trykket som virker på innsiden av lokk og trykkammer vises med røde piler.



(c) I blått vises det hvor skruehodet ligger an og hvor skruen festes i trykkammeret. Diameteren på skruehodet er 28mm, stammen er 16mm og forspenningen er på 77kN.

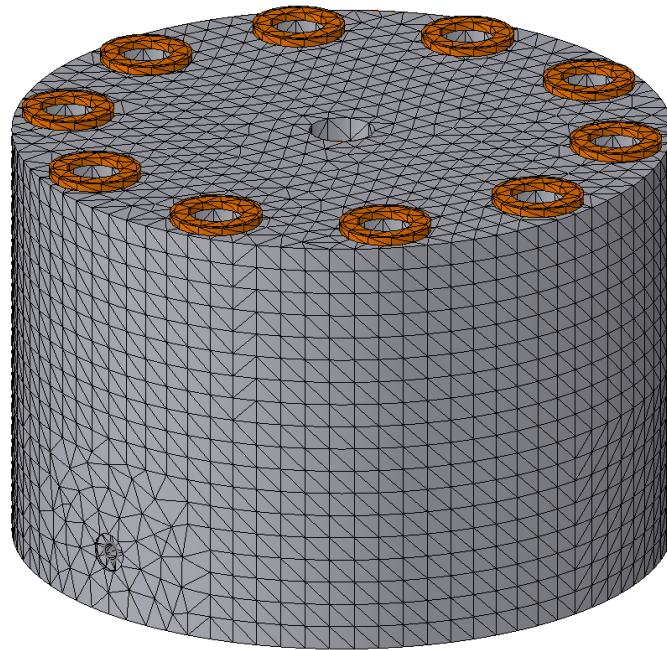


(d) Alle de 10 skruene vises i blått og er forspent med en kraft på 77kN.

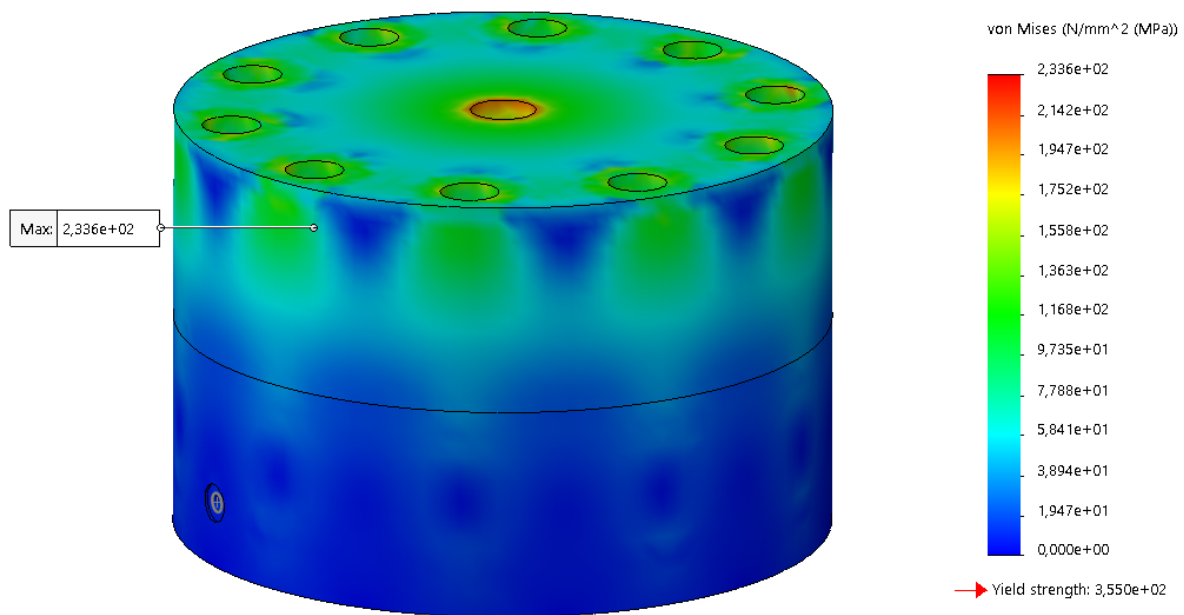
Figur 13.1: Opplagringer, trykk og forspenning av skruer under FEM-simuleringen.

13.1.2 Resultater av FEM-simulering

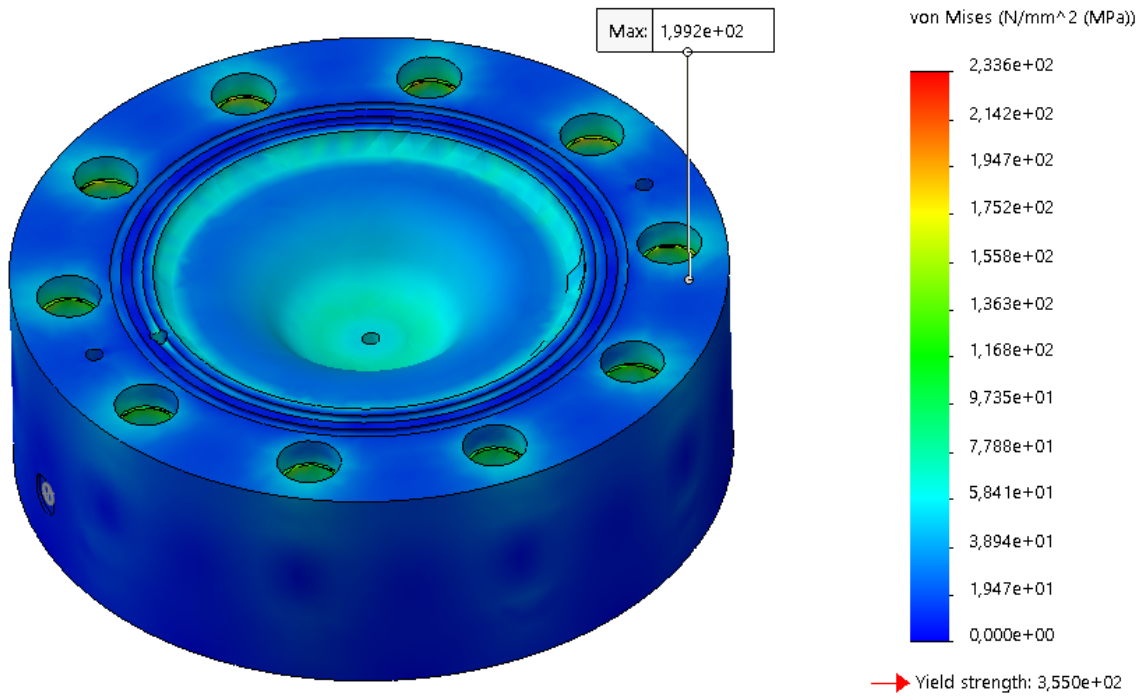
Mesh



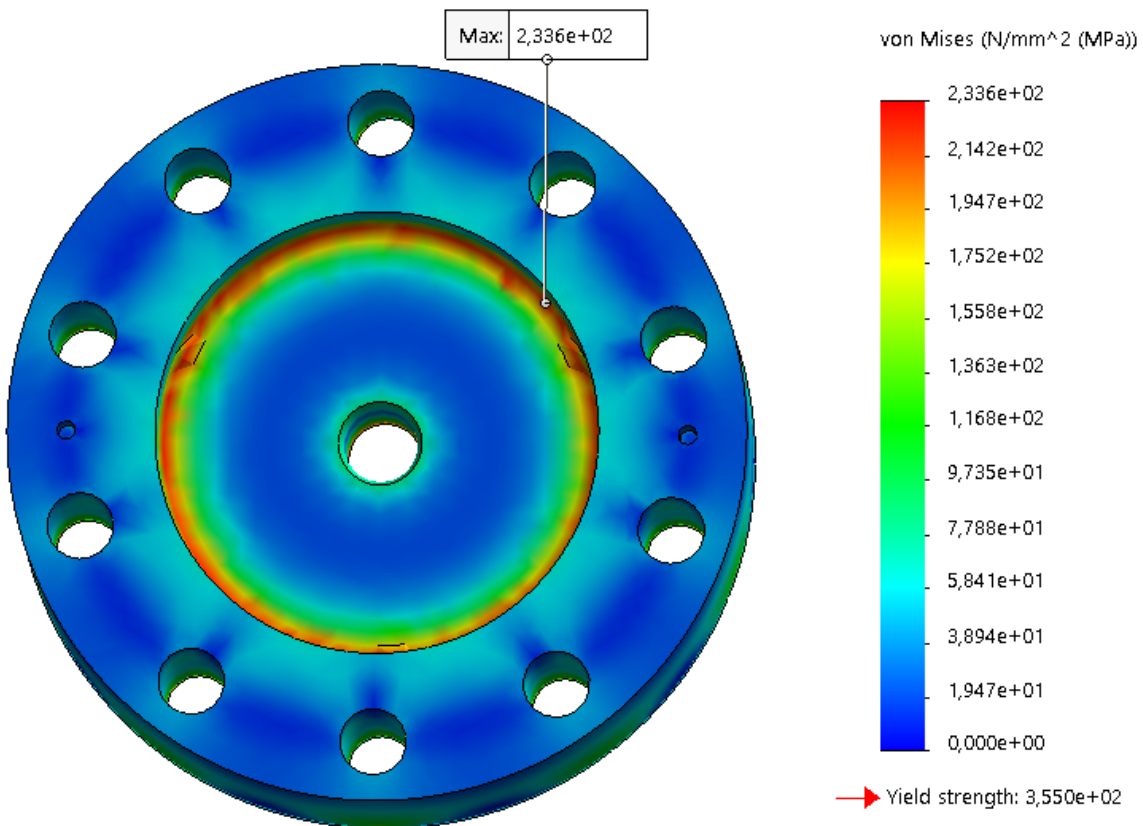
Figur 13.2: Det endelige meshet hadde en størrelse på 7,5mm, 73349 elementer og 335880 DOF når spenningene konvergente. I rødt på toppen av lokket vises underlagsskivene som er simulert som uendelig stive.



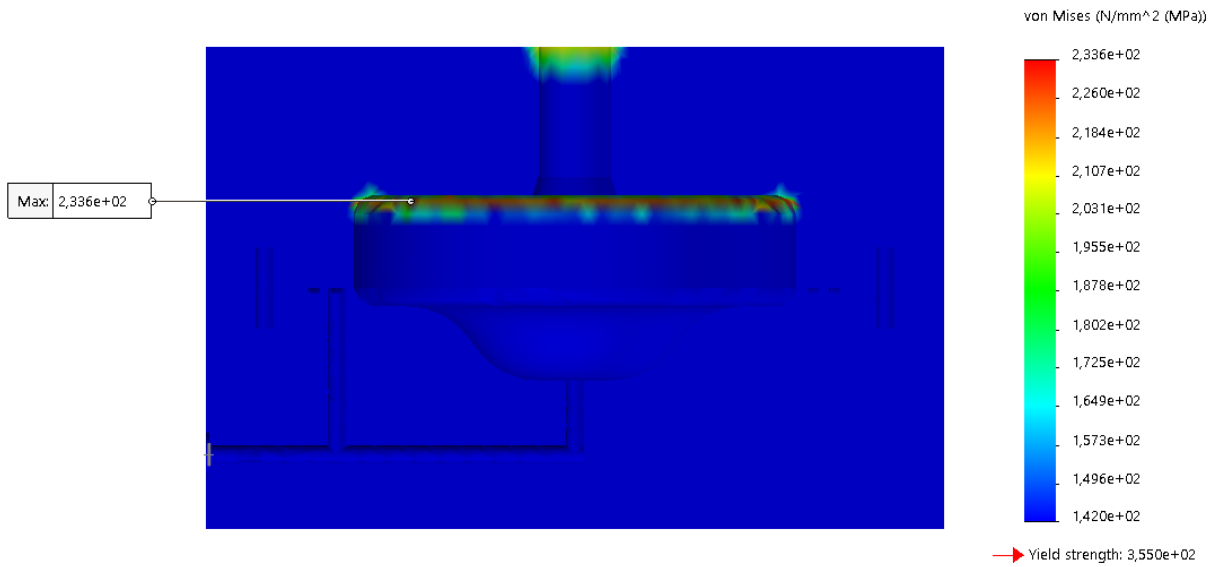
Figur 13.3: Plot av von Mises spenning på både lokk og trykkammer. Maks spenning er 233,6MPa og forekommer på innsiden av lokket.



Figur 13.4: Plot av von Mises spenning i trykkammeret. Maks spenning er 199,2MPa og forekommer der gjengene starter.

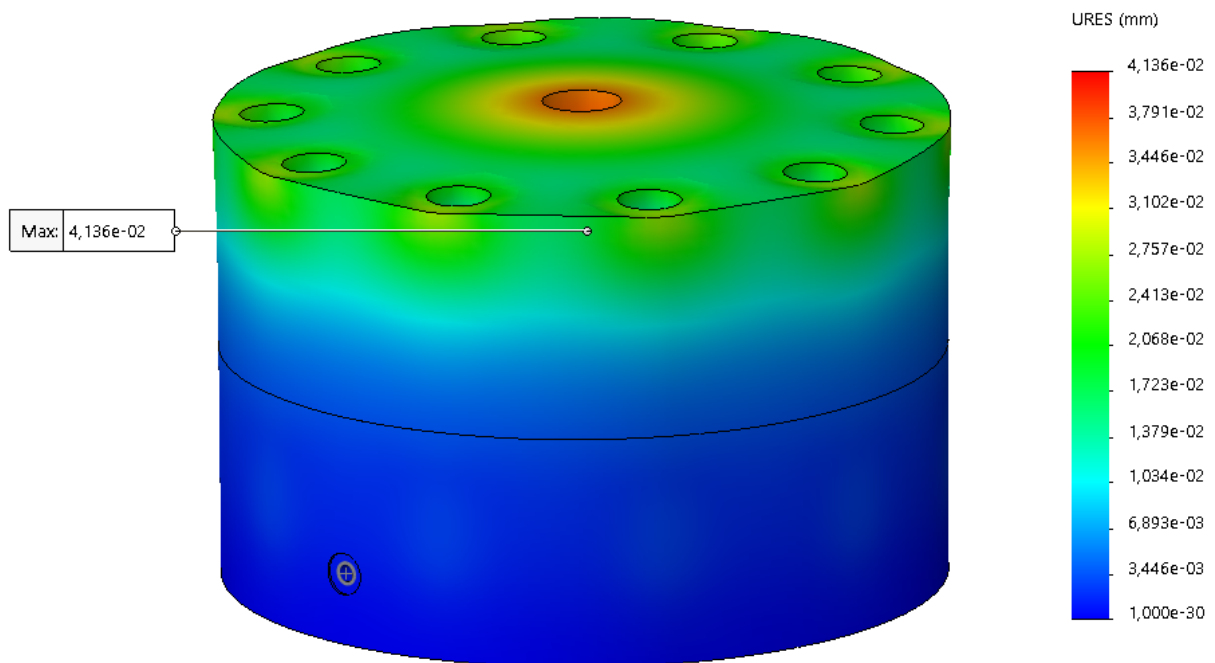


Figur 13.5: Plot av von Mises spenning i lokket. Maks spenning er 233,6MPa og forekommer i overgangen mellom lokk og sylinder.



Figur 13.6: Med en sikkerhet mot flyt på 2,5 er maks tillatt spenning 142MPa. Minimumsverdien på fargeskalaen til høyre er satt til å være 142MPa slik at alt i figuren som er farget blått vil tilfredsstille sikkerhetsfaktor mot flyt på 2,5.

Deformasjon



Figur 13.7: Plot av deformasjoner i både lokk og trykkammer hvor deformasjonen er forstørret 100 ganger. Maks deformasjon forekommer i senter på innsiden av lokket der det er boret hull for trykktilførselen. Maks deformasjon er på 0,04mm.

Som det fremkommer av figur 13.3 er maks jevnførende spenning på 233,6MPa. Maks jevnførende spenning opptrer i lokket i overgangen mellom sylinder og lokk og kan sees i figur 13.5. I trykkammeret oppstår maks jevnførende spenning i skruhellene der gjengene starter, og maks verdi er på 199,2MPa slik det vises i figur 13.4.

Maks deformasjon er på 0,04mm og opptrer i senter på innsiden av lokket, se figur 13.7. I figuren er deformasjonene illustrert 100 ganger så store som i virkeligheten.

Ved håndberegningene av sylinder og lokk i kapittel 10 kom jeg frem til spenninger på henholdsvis 135MPa og 142Mpa. Som forventet oppstår det spenningskonsentrasjoner der det er kjervdannelser slik som i overgangen mellom sylinder og lokk, i boringen i senter av lokket og ved de gjengede hullene i trykkammeret. På grunn av dette er de jevnførende spenningene i simuleringen høyere enn håndberegningene.

I figur 13.6 er minimumsverdien på fargeskalaen satt til 142MPa som gir en sikkerhet mot flyt på 2,5. Det vil si at alt som er farget blått i figuren har spenninger på 142MPa eller mindre, som igjen vil si at det er en sikkerhet mot flyt på minimum 2,5. Det er kun i toppen av senter på lokket, i overgangen mellom lokk og sylinder, og ved gjengene i trykkammeret at det finnes lokale spenningskonsentrasjoner som overstiger 142MPa. Med maks jevnførende spenning på 233,6MPa vil det gi en sikkerhet mot flyt på 1,5. Dette er noe lavt og kan forbedres ved å lage større radiuser slik at spenningene senkes.

For å verifisere at FEM-analysen konvergente ble det utført en *mesh independence analyse* hvor det globale meshet ble gjort finere og finere helt til spenningene konvergente. Denne metoden er tidkrevende da hele meshet gjøres finere og ikke kun der det oppstår spenningskonsentrasjoner. En mer effektiv metode er Solidworks innebygde metode som heter *h-adaptive meshing* som automatisk rafinerer meshet i områder hvor det er høy tøyingsenergi. Det ble prøvd å simulere med *h-adaptive meshing*, men det oppstod et problem med denne metoden hvor forspenningen av skruene førte til singulariteter.

For å få tips til opplagringen av modellen tok jeg kontakt med senioringeniør Egil Stemrud. Han mente at ved å låse fast modellen i senter av toppen på lokket så ville man kunne se hvordan lokket og trykkammeret ”buler” på grunn av trykket. Dette oppsettet ble prøvd flere ganger, men det endte med singulariteter og veldig høye spenninger i opplagringen. På grunn av dette ble det valgt en enklere metode hvor bunnen av trykkammeret ble låst fast. Med bunnen låst fast vil ikke deformasjonene bli helt riktige, men trykkammeret er såpass massivt og stivt at det antageligvis ikke vil ha for stor innvirkning.

Som man kan se i figur 13.6 er det tilfredsstillende sikkerhet mot flyt i så godt som hele modellen. Det går an å utvide den innvendige diameteren i trykkammeret, men dette vil føre til at trykket virker på en større overflate i lokket som igjen gir en større påkjenning i skruene. Dette kan føre til at man må bruke grovere skruer som igjen kan gjøre at det blir lite plass til o-ringen og dreneringsspoet. Med tanke på spenningskonsentrasjoner er det ugunstig å plassere trykktilførselen i midten av lokket da maks bøyemoment opptrer akkurat her, men ved å lage større radiuser burde spenningene senkes til et akseptabelt nivå. En forbedring man kan gjøre er å kjøre simuleringer for å se om man kan gjøre lokket og bunnen tynnere. Dette vil spare materialkostnader, forenkle produksjonen og føre til bedre brukervennlighet når man utfører forsøk.

13.2 Materialegenskaper, overflatebehandling og vedlikehold

Materialegenskaper

Konstruksjonen består av fire egendesignede deler; lokk, trykkammer, trykktilførsel og membranen. Siden endelig design og utforming på membranen ikke er klart vil det ikke bli oppgitt materialegenskaper for denne. Materialegenskaper for de andre komponentene er funnet hos Sverdrup steel [43].

Materiale for lokk og trykkammer ble bestemt av hva som fantes på lager hos verkstedet ved NMBU. Dette var tids- og kostnadsbesparende og størrelsen på komponentene ble designet med hensyn på et rundstål i S355 konstruksjonsstål.

I håndberegningene i kapittel 10 ble det funnet at jevnførende spenninger for en sylinder var 135MPa og for et sirkulært lokk var spenningene på 142MPa. Dette gir sikkerhetsfaktorer mot flyt på henholdsvis 2,6 og 2,5.

FEM-analysen viste at høyeste jevnførende spenninger er på 233,6MPa og forekommer i overgangen mellom lokk og sylinder. Dette gir en sikkerhet mot flyt på 1,5 og konstruksjonen burde optimaliseres for å bli kvitt spenningskonsentrasjonene. I tabell 13.1 og 13.2 nedenfor vises mekaniske egenskaper og kjemisk sammensetning for S355 konstruksjonsstål. Det er uvisst hvilken slagseighet det er på materialet.

Tabell 13.1 Mekaniske egenskaper for S355 konstruksjonsstål.

S355 konstruksjonsstål	
Egenskap	Verdi
Tetthet	7850kg/m ³
Flytegrense	355MPa
Strekfasthet	490MPa
E-modul	210000MPa
Skjærmodul	81000MPa
Poissons tall	0,30
Pris	50kr/kg

Tabell 13.2 Kjemisk sammensetning for S355 konstruksjonsstål.

Kjemisk sammensetning, S355				
C%	Mn%	P%	S%	Si%
≤ 0,23	≤ 1,6	≤ 0,05	≤ 0,05	≤ 0,05

S355 konstruksjonsstål inneholder mindre enn 5% legeringselementer og er derfor i stålgruppen lavlegert stål [35]. De lavlegerte stålene brukes til verktøy og maskindeler som skal herdes. S355 konstruksjonsstål er kategorisert som et lavlegert karbonstål.

For trykktilførselen viste håndberegningene i kapittel 10, ligning 10.34, at maks jevnførende spenning er på 332MPa. Det velges å bruke S165M rustfritt stål som har en flytegrense på minimum 700MPa. Dette gir en sikkerhet mot flyt på 2,1, noe som ansees som tilstrekkelig da de andre skruene ble dimensjonert med en sikkerhetsfaktor mot flyt på 1,5.

Tabell 13.3 Mekaniske egenskaper for S355 konstruksjonsstål.

S165M rustfritt stål	
Egenskap	Verdi
Tetthet	7700kg/m ³
Flytegrense	≥ 700MPa
Strekfasthet	900 – 1100MPa
E-modul	200000MPa
Pris	260kr/kg

Tabell 13.4 Kjemisk sammensetning for S165M rustfritt stål.

Kjemisk sammensetning, S355									
Vekt	C%	Si%	Mn%	S%	P%	Cr%	Ni%	Mo%	N%
Min.	0,00	0,30	0,60	0,005	0,00	15,00	4,00	0,80	0,02
Maks	0,06	0,70	1,50	0,030	0,040	17,00	6,00	1,50	

S165M er et høyfast, lavkarbon martensitisk/austenitisk rustfritt stål. Materialet kombinerer høy styrke og god utmattingsmotstand samt at det er sveisbart. S165M kan brukes i lett korrosive miljøer og blir ofte brukt i hydrauliske komponenter samt aksler, propeller og skruer.

Overflatebehandling

Produktet kommer til å brukes innendørs og det vil derfor ikke bli utsatt for nevneverdig fuktighet fra omgivelsene, men det kan være fare for korrosjon avhengig av hvilken type hydraulikkvæske man bruker.

I forsøksmodellen blir membranen fylt med fett, som i mange tilfeller motvirker korrosjon. Trykktilførselen blir lagd i rustfrittstål og er derfor lite utsatt for korrosjon. På grunn av dette er det lite hensiktsmessig å bruke tid og penger på å overflatebehandle forsøksmodellen.

For fremtidige prototyper og endelige produkter kan det være ønskelig å overflatebehandle utsiden av lokk og trykkammer. Overflatebehandlingen burde gi et behagelig utseende samt tåle slag og støt. Her anbefales pulverlakkering eller en industrilakk. Innsiden av lokk og trykkammer er kanskje mest utsatt da det er mulig at man bruker vann med tilsetningsstoffer som hydraulikkvæske. Her vil det være gunstig å polere stålet slik at membranen kan bevege seg fritt samt at poleringen kan bedre stålets korrosjonsmotstand.

Vedlikehold

Alle komponentene i produktet er utbyttbare, og alt kan vedlikeholdes, betjenes og byttes med fastnøkler i størrelse 10,14 og 30mm, skralle med 24mm pipe og en momentnøkkel.

Membranen er en slitasjedel med begrenset levetid og denne må byttes med jevne mellomrom. O-ringene kan bli klemt i stykker og disse må inspiseres for skader. Når man er ferdig med å bruke produktet skal man tørke av skruene og passe på at det ikke ligger væske i skruehull og dreneringskanaler.

13.3 Miljøkrav og resirkulering

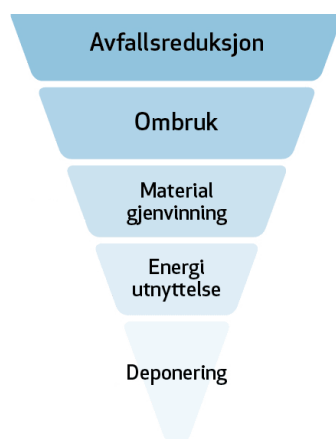
I dette delkapittelet blir det gjort en enkel forklaring av resirkulering etterfulgt av en livsløpsanalyse for produktet.

13.3.1 Resirkulering

Alle materialer har en verdi. Materialene begynner sitt kretsløp når de blir utvunnet fra naturen, deretter raffinert, omgjort til produkter, brukt og til slutt ender opp som avfall. Avfall betegner kasserte materialer, produkter og energibærere som ikke lenger har sin opprinnelige verdi. Avfall er likevel en riktig ressurs og i figur 13.8 nedenfor kan man se avfallspyramiden som er et begrep i norsk avfallspolitikk. Avfallspyramiden vil minske forbruk og sørge for resirkulering av brukte produkter.

Avfallspyramiden har et hierarki som begynner på toppen og har følgende punkter:

- **Avfallsreduksjon:** Reduser mengden avfall som produseres.
- **Ombbruk:** Bruk ting om igjen fremfor å kaste dem.
- **Materialgjenvinning:** Gjenvinn materialene i kasserte produkter.
- **Energiutnyttelse:** Utvinn energi fra avfall som ikke kan brukes til materialgjenvinning.
- **Deponering:** Avfall som ikke kan brukes til noen av de foregående punktene deponeres på et egnet sted.



Figur 13.8: Hierarkiet i avfallspyramiden med sine fem punkter. [31]

13.3.2 Livsløpsanalyse

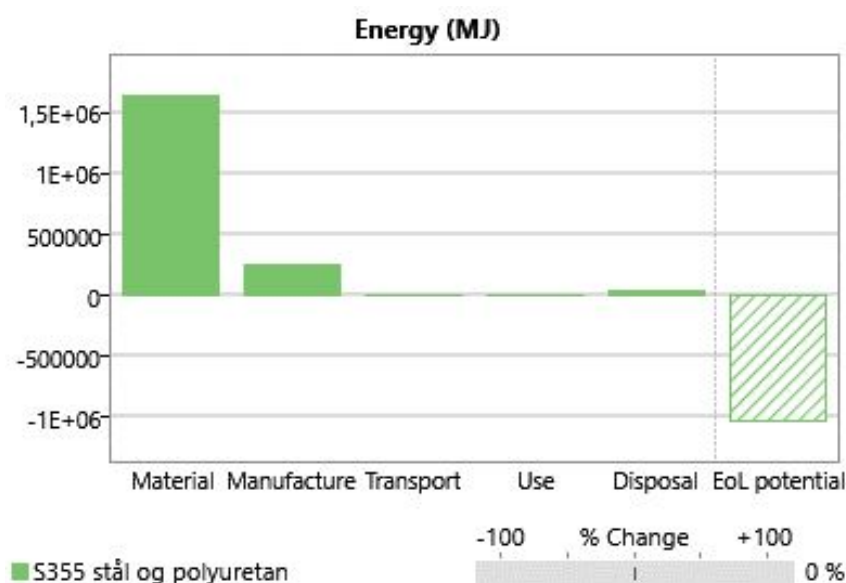
For å gjøre et estimat på energiforbruk og CO₂ utslipp ved transport og fremstilling av materialer, samt ved produksjon av hydroformingsverktøyet, er det gjort en livsløpsanalyse i programmet CES edupack. Livsløpsanalysen blir gjort med tanke på en fremtidig fullskala modell og materialforbruket er derfor veldig grove estimater. Det er antatt at lokk og trykkammer har en utvendig diameter på 700mm og en høyde på 200mm.

Levetiden til produktet er satt til å være 30 år og materialet handles og kjøres fra Sverdrup Steels [43] avdeling på Kløfta. Produksjonen er tenkt å gjennomføres i Oslo og transportdistansen blir på 40km med en 23 tonns lastebil. Det gjøres en forenkling ved å si at alle metalleder er lagd i konstruksjonsstål og med en total vekt på 600kg. Membranen er en slitedel og det antas at hvert produkt bruker 3 membraner i året, slik at totalen blir på 90 membraner pr. produkt. Hver membran har en vekt på 0,5kg, og materialvektene er vekt på materialet som blir levert til verkstedet. I tabell 13.5 nedenfor vises verdiene som ble brukt for materialer, produksjon og endt levetid.

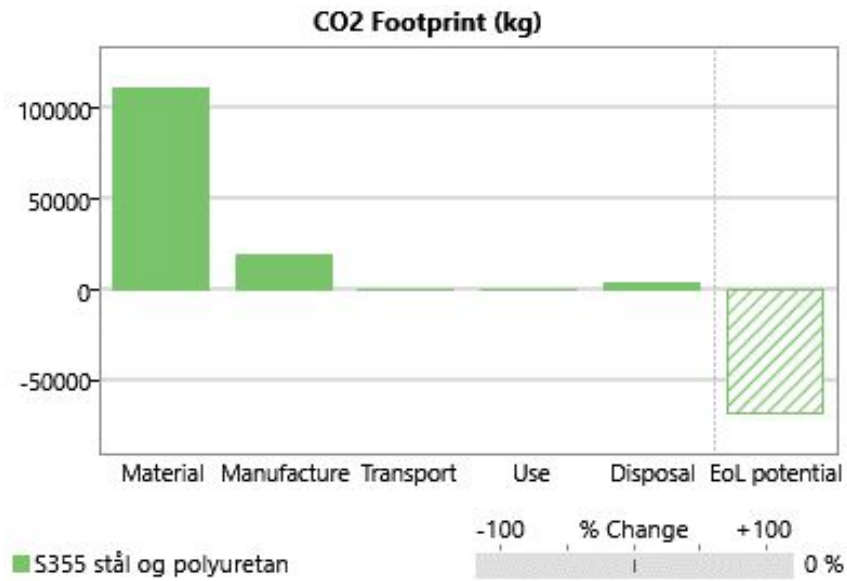
Tabell 13.5 Verdier for materialer, produksjon og levetid i livsløpsanalysen.

Materialer, produksjon og endt levetid						
Ant.	Del	Materiale	Resirkuleringsinnhold	Masse	Produksjon	Endt levetid
100	Ståldeler	Lavkarbon stål	Vanlig%	600kg	Smiing	Resirkulering
9000	Membran	Polyuretan	0%	0,5kg	Støping	Resirkulering

I figur 13.9 og 13.10 nedenfor vises resultatene fra analysen.



Figur 13.9: Energibruk ved 100 produserte enheter.



Figur 13.10: CO₂ utslipp ved produksjon av 100 enheter.

Livsløpsanalysen viser at for 100 enheter vil det brukes ca. $1,87 \cdot 10^6$ MJ til produksjon med en EOL (ved endt levetid) på ca. $1,1 \cdot 10^6$ MJ. CO₂ avtrykket vil være på ca. 117 tonn med en EOL på ca. 70 tonn.

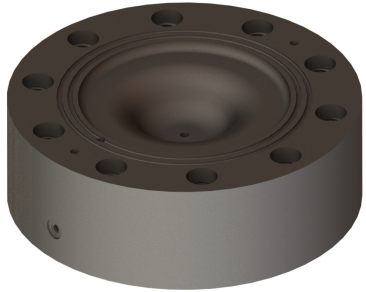
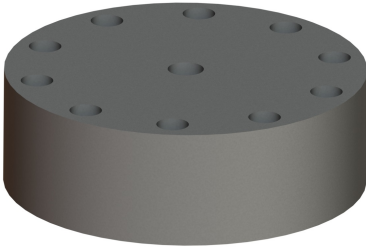


14 Framstilling og produksjonskostnader

Alle prosjekter har en kostnadsramme, og ved å sette opp kostnadskalkyler får man en god økonomisk oversikt. Hvis det skulle vise seg at kostnadene er for høye kan man vurdere å bruke andre komponenter eller produksjonsmetoder som er mer kostnadseffektive.

14.1 Produksjonsmetoder

I tabell 14.1 nedenfor vises en oversikt over komponentene som skal produseres med tilhørende produksjonsmetoder, materialkvaliteter og materialemner. Både trykkammer, lokk og trykktilførsel er sirkulært utformet og kan tilvirkes ved et dreieverksted. Hvordan membranen skal produseres er ennå usikkert, men det antas at den skal støpes i gummi, plastikk eller en blanding av disse. På grunn av membranens utforming med et stort innvendig hulrom og et lite innløp kan investeringsstøping være en egnet metode. Man kan 3D printe membranen i et materiale som polycast [33], for deretter å dekke den i gips og brenne ut modellen. Dette gir en støpeform med god toleranse. En annen teknikk kan være rotasjonsstøping.

Tabell 14.1 Produksjonsmetoder for konstruksjonens komponenter.

Del	Figur	Produksjonsmetode
1		Materiale: S355 konstruksjonsstål Emne: Rundstål <ul style="list-style-type: none">• CNC freses
7		Materiale: S355 konstruksjonsstål Emne: Rundstål <ul style="list-style-type: none">• CNC freses
11		Materiale: S165M rustfritt stål Emne: Rundstål <ul style="list-style-type: none">• CNC freses
14		Materiale: Gummi/plastikk <ul style="list-style-type: none">• Støpes

14.2 Kostnadskalkyle for forsøksmodell

For å estimere prisen på forsøksmodellen er det satt opp en kostnadskalkyle. Kostnadene er delt inn i tre grupper: Konseptutvikling, arbeidskostnader og til sist materialer og komponenter. Arbeidskostnadene for CNC fresing er et estimat fra overingeniør Øyvind Hansen, mens arbeidskostnader for støping av membranen er et grovt overslag jeg har gjort. For pris på materialer og standardkomponenter ble det gjort nettsøk hos Accu Products [34]

Tabell 14.2 Tabellen viser et estimat på kostnadskalkyle for 1 stk. forsøksmodell.

Konseptutvikling	Timer	Kvanta	Pris, NOK	Sum, NOK
Utredningsarbeid	250	-	550	137500
Utvikling	200	-	550	110000
Konstruksjon og design	150	-	550	82500
Realiseringsfase	100	-	550	55000
Skrive rapport	200	-	550	110000
Delsum	900	-	550	495000
Arbeidskostnader				
CNC fresing	16	-	1000	16000
Støpe membran	200	-	550	110000
Delsum	-	-	-	126000
Materialer og komponenter				
Skruer M16	-	10	210	2100
O-ring 142,0 x 2,0mm	-	1	20	20
O-ring 16,5 x 2,0mm	-	1	20	20
Fettnippel	-	1	20	20
Slangenippel	-	1	100	100
Dreneringsslange	-	1	100	100
Styrepinne	-	2	25	50
Slangeklemme	-	1	50	50
M20 låsemutter	-	1	200	200
Underlagsskiver M16	-	10	15	150
Underlagsskive M20	-	1	20	20
S355 Rundstål ø200mm	-	35kg	50	1750
S165M Rundstål ø40mm	-	2kg	260	520
Gummi/plast og støpeutstyr	-	-	-	20000
Delsum	-	-	-	25100
Totalkostnad				646100

14.3 Kostnadskalkyle for fullskala prototype

I kostnadskalkylen for en fullskala prototype er det antatt at lokket er så tungt at det må lages en åpne/lukke mekanisme og det har derfor blitt lagt til 100 timer arbeid på både utvikling og konstruksjon og design. Det har også blitt lagt til 100 timer på arbeidskostnader for å produsere denne mekanismen. Det antas at skruene er i M30 størrelse og at noen av de andre standardkomponentene har høyere pris siden de må være større. Materialvekten er basert på at lokk og trykkammer har en utvendig diameter på 700mm og en total høyde på 200mm. Det er mange usikkerheter knyttet til dimensjonene på prototypen så kostnadskalkylen vil derfor være et meget grovt estimat.

Tabell 14.3 Tabellen viser et estimat på kostnadskalkyle for 1 stk. prototype.

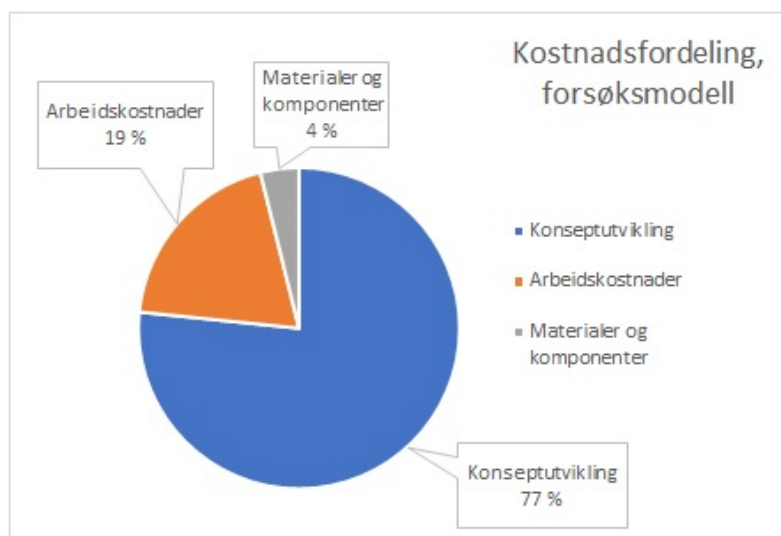
Konseptutvikling	Timer	Kvanta	Pris, NOK	Sum, NOK
Utredningsarbeid	250	-	550	137500
Utvikling	300	-	550	165000
Konstruksjon og design	250	-	550	137500
Realiseringsfase	100	-	550	55000
Skrive rapport	200	-	550	110000
Delsum	1100	-	550	605000
Arbeidskostnader				
CNC fresing	50	-	1000	50000
Støpe membran	200	-	550	110000
Åpne/lukke-mekanisme	20	-	1000	20000
Delsum	-	-	-	180000
Materialer og komponenter				
Skruer M30	-	20	250	5000
Stor o-ring	-	1	100	100
Liten o-ring	-	1	50	50
Hurtigkobling hydraulikk	-	1	500	500
Slangenippel	-	1	100	100
Dreneringsslange	-	1	100	100
Styrepinne	-	4	50	200
Slangeklemme	-	1	50	50
M20 låsemutter	-	1	200	200
Underlagsskiver M30	-	20	20	400
Underlagsskive M20	-	1	20	20
S355 Plate	-	600kg	50	30000
S165M Rundstål ø40mm	-	2kg	260	520
Gummi/plast og støpeutstyr	-	-	-	20000
Delsum	-	-	-	57240
Totalkostnad				842240

14.4 Resultater fra kostnadsanalyser

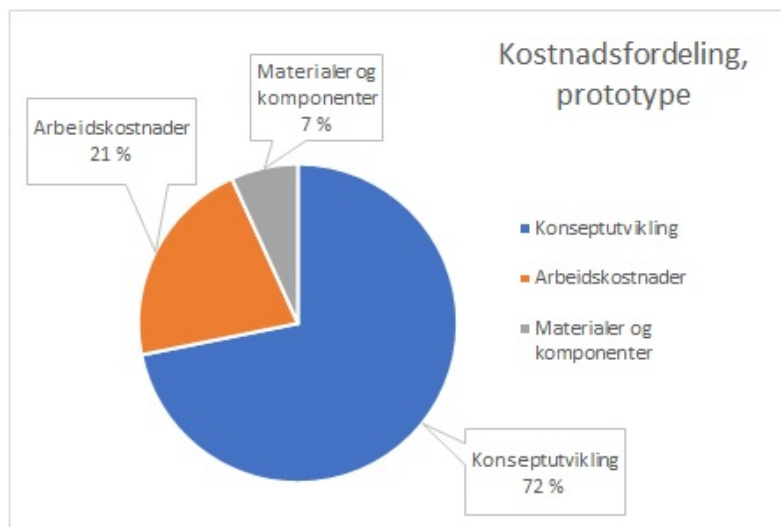
Estimert kostnad for forsøksmodellen er på 646100 NOK, hvor konseptutviklingsarbeidet utgjør 77% av dette. Hvis man ser bort fra konseptutviklingskostnadene er kostnadene på ca. 150000 NOK.

Estimert kostnad for en fullskalaprototype er på 842240 NOK, hvor konseptutviklingsarbeidet utgjør 72%. Sett bort fra konseptutviklingskostnadene så er kostnadene på ca. 240000 NOK.

For å tydeligere kunne se kostnadsfordelingene er kostnadene representert med sektordiagrammer i figur 14.1 og 14.2.



Figur 14.1: Kostnadsanalysen for forsøksmodellen viser at konseptutvikling utgjør 77%, arbeidskostnader 19% og materialer og komponenter 4%.



Figur 14.2: Kostnadsanalysen for prototypen viser at konseptutvikling utgjør 72%, arbeidskostnader 21% og materialer og komponenter 7%.

14.5 Konkurrentanalyse

Det har ikke blitt funnet konsepter som ligner på mitt, altså en liten hydraulisk presse som former metallplater med et hydrostatisk trykk. Men det er to andre formingsprosesser som kan gi et likt resultat.

En metode er å presse metallplatene mellom to former ved å bruke en verkstedpresse. Dette er en enkel innretning da det finnes mange verkstedpresser på markedet, men med denne metoden må man frese to former, noe som er dyrt og tidkrevende. I tillegg er verkstedpressen høy og tar mye plass.

Den andre metoden er *rubber pad forming*. Denne metoden er veldig lik hydroformingsprosessen da en gummiblokk presser og former metallplaten mot en form. Her brukes et stempel til å presse gummiblokken slik at trykket blir så høyt at gummi oppfører seg som en væske. Metoden gir gode resultater, men for at gummi skal oppføre seg som en væske må man tilføre et veldig stort trykk. På grunn av dette må man kjøpe en presse som er både dyr og veldig plasskrevende.

Hvis det viser seg at mitt konsept fungerer vil jeg tro at det er et marked for dette produktet. Konstruksjonen har få bevegelige deler, få egenproduserte deler, tar lite plass, og formingsprosessen er kostnadsbesparende ved at man kun trenger å lage en form.

15 Markedspresentasjon

For å vise det endelige produktets utforming lages en markedspresentasjon med renderte bilder i et naturlig miljø. Det blir vist bilder av forsøksmodellen samt hvordan en fremtidig fullskala prototype kan se ut. Tekniske beskrivelser sørger for riktig montering og bruk.

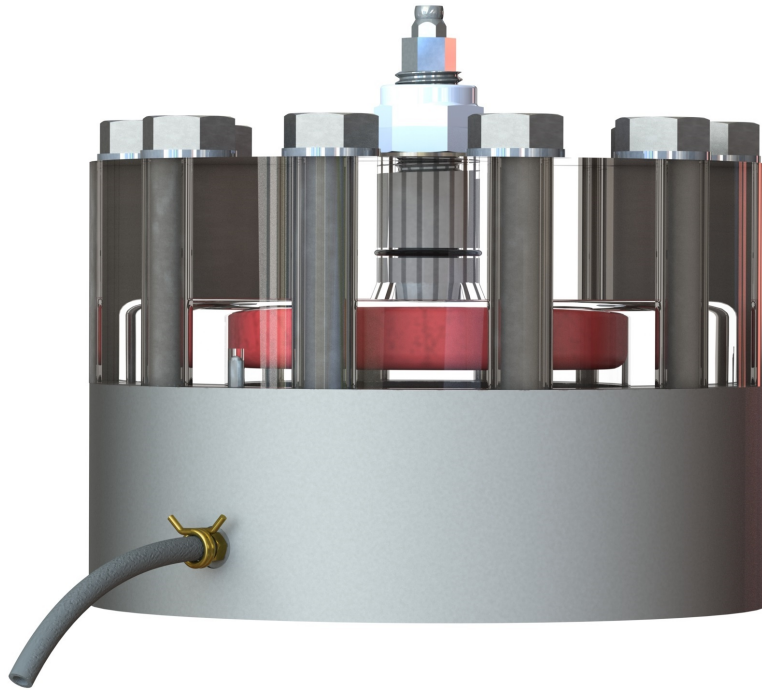
15.1 Renderte fremstillinger

I de renderte fremstillingene vil det bli presentert bilder av forsøksmodellen samt bilder av slik en fremtidig prototype kan se ut. Det vil presenteres bilder av selve produktet og bilder hvor produktet blir anvendt i en realistisk situasjon.

15.1.1 Forsøksmodell



Figur 15.1: *Forsøksmodellen er klar for testing. Trykkammeret er komplett med dreneringslange som drenerer eventuelle lekkasjer. I lokket er membranen integrert og på nippelen på toppen festes fettpressen som skal lage trykket. Skruene og skivene som brukes for å koble sammen lokk og trykkammer ligger i forgrunnen.*



Figur 15.2: Lokket er gjort gjennomsiktig og man kan se membranen i rødt. Trykktilførselen kommer gjennom senter av lokket og man kan se o-ringene som skal tette for lekkasjer. På toppen av trykkammeret, rett over dreneringsslangen, kan man se den ene styrepinnen som sørger for at lokket sentreres over trykkammeret.



Figur 15.3: Forsøksmodellen er montert og klar for testing. Mellom forsøksmodellen og brukeren er det en sikkerhetsskjerm som sikrer mot eventuelle lekkasjer og andre uforutsette hendelser. I fettpressen som ligger på bordet til høyre er det montert et manometer for å kunne overvåke trykket. Fra trykkammeret er det montert en dreneringsslange som drenerer eventuelle lekkasjer ned i en beholder for å unngå unødvendig søl. [18]

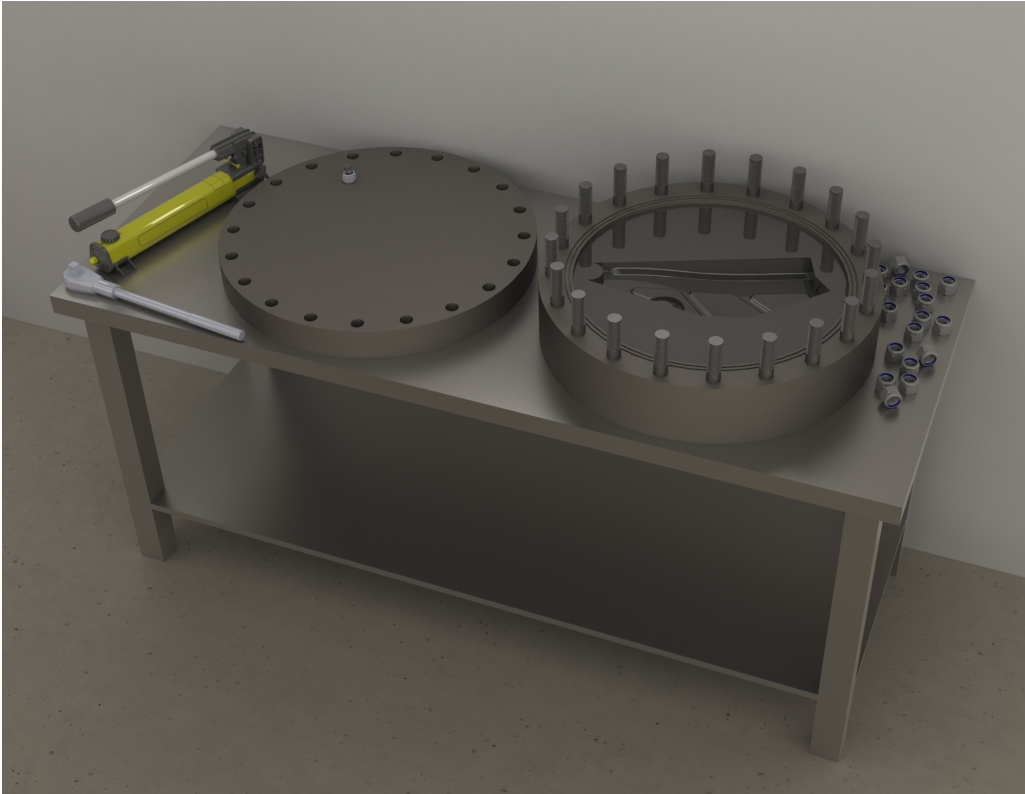


Figur 15.4: Nærbilde av forsøksmodellen som har fettpressen tilkoblet og som er klar for testing. [18]

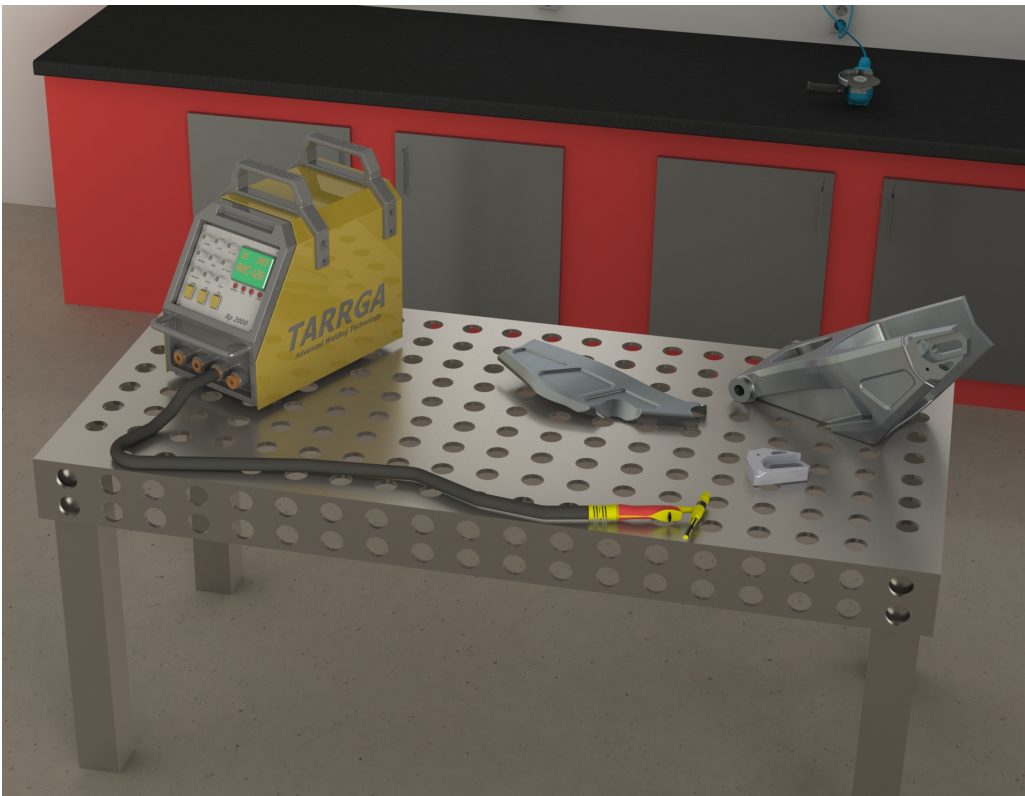
15.1.2 Fremtidig prototype



Figur 15.5: På bordet til høyre står en prototype med innvendig diameter på 600mm. På sveisebordet midt i bildet ligger en metallplate som er formet og klar til å sveises til en svingarm. [18]



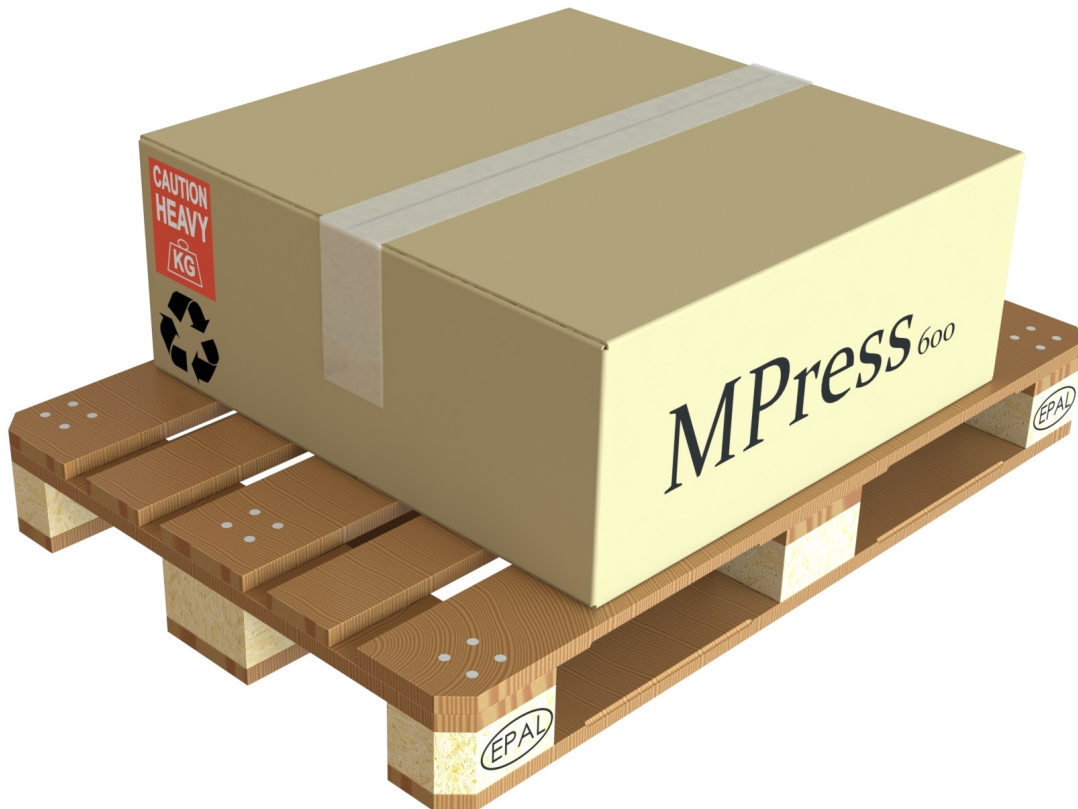
Figur 15.6: Her vises trykkammeret, lokket og pumpen som brukes til å lage det hydrostatiske trykket. Matrisen som ligger i trykkammeret former en side av en svingarm. [18]



Figur 15.7: Den ferdig pressede metallplaten er klar til å sveises til svingarmen. [18]

15.2 Transportemballasje

Siden forsøksmodellen ikke skal selges eller transporteres vises transportemballasjen for den fremtidige prototypen som har en indre diameter på 600mm.



Figur 15.8: Hydroformingsverktøyet er pakket inn i en pappeske og står på en europall klar for transport. Navnet MPress står for Metal Press og ble brukt når jeg søkte om midler fra forskningsrådet, slik det er beskrevet i delkapittel 1.4. Tallet 600 kommer fra trykkammerets innvendige diameter på 600mm. Det er påført en advarsel om at pakken er tung og at pappesken kan resirkuleres. [18]



Figur 15.9: Hydroformingsverktøyet er pakket inn og sees fra siden. [18]

15.3 Tekniske beskrivelser

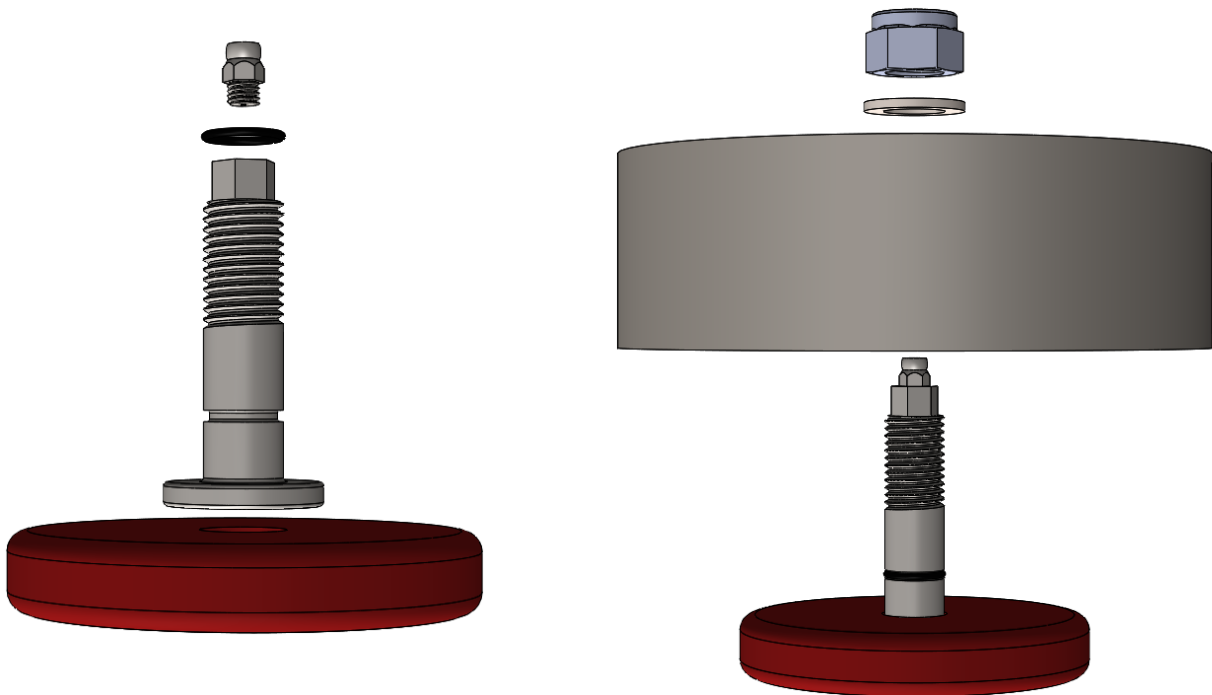
Tekniske beskrivelser gir en gjennomgang av hvordan produktet skal brukes:

Klargjøring av membranen, figur 15.10a:

- Fyll membranen med fett med et egnet verktøy og prøv å fjerne alle luftlommer. Fettet skal være av samme type som brukes i fettpressen.
- Utvid hullet i membranen og press trykktilførselen ned slik at flensen hviler på innsiden av membranen.
- Påfør et tynt lag med fett på o-ringene og rull den ned til sporet sitt. Påfør et lag med teip over gjengene slik at o-ringene ikke skades. Pass på at o-ringene ikke ligger vridd i sporet.
- Skru fast fettnippelen med en 10mm fastnøkkel.

Montering av membranen i lokket, figur 15.10b:

- Før trykktilførselen opp gjennom hullet i lokket.
- Før underlagsskiven over trykktilførselen og entre låsemutteren på gjengene.
- Skru til mutteren slik at den ligger an mot underlagsskiven.
- Trykktilførselen holdes fast i toppen med en 14mm fastnøkkel mens låsemutteren skrues til med et moment på 265Nm.



(a) Klargjøring av membranen.

(b) Montering av membranen i lokket.

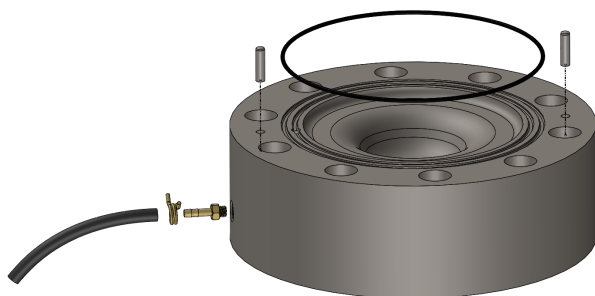
Figur 15.10: Klargjøring og montering av membranen.

Klargjøring av trykkammeret, figur 15.11a:

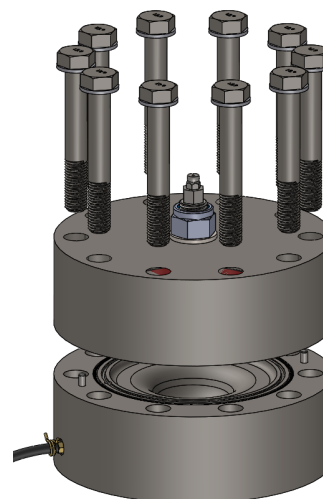
- Skru fast slangenippelen i siden av trykkammeret med en 10mm fastnøkkel.
- Før dreneringsslangen over slangenippelen og klem den fast med slangeklemmen.
- Sett styrepinnene ned i hullene sine.
- Påfør et tynt lag med fett på o-ringene og legg den i sporet sitt. Pass på at o-ringene ikke er vridd.
- Blås inn i dreneringsslangen og sjekk at dreneringskanalene er åpne.

Festing av lokket og pressing av metallplater, figur 15.11b:

- Legg metallplaten over matrisen i trykkammeret. Pass på at platen ikke har skarpe kanter som kan skade membranen.
- Legg en gummiduk over metallplaten for å beskytte membranen. Gummiduken skal ha en større diameter enn metallplaten.
- Plasser lokket over trykkammeret og pass på at styrepinnene ikke skraper opp membranen.
- Legg på underlagsskivene, entre skruene og trekk til med et moment på 155Nm.
- Fest fettpressen på nippelen.
- Det er nå klart til å lage trykk med fettpressen.



(a) Klargjøring av trykkammeret.



(b) Festing av lokket og pressing av plater.

Figur 15.11: Klargjøring av trykkammeret og festing av lokket.

Sikkerhetsanvisninger for bruk:

- Pass på at alle bolter er trekt til med korrekt moment.
- Hold et øye med manometeret slik at trykket ikke overstiger 500bar.
- Bruk vernebriller.
- Pass på at du alltid befinner deg bak en sikkerhetsskjerm når det er trykk i trykkammeret.

16 Prosessevaluering og diskusjon

For å kunne vurdere forbedringsmuligheter gjøres det en evaluering og diskusjon av arbeidet og resultatene i prosjektet. Her går man tilbake til prosessdiagrammet og gjør en trinnvis vurdering av prosesstrinnene.

16.1 Konseptutviklingsarbeid, forbedringspotensialer

Utredningsfase

- Plasseringen av produktet i markedet viste seg å være vanskelig. Det ble gjort søk hos blant annet SSB for å sjekke hvor mange mekaniske bedrifter som finnes i Norge, og herunder hvor mange som opererer i plateindustrien. Det lot seg ikke gjøre å finne tall for dette på deres nettsider, men man kunne kontakte SSB direkte for informasjon.
- En del av oppdraget var å kartlegge eksisterende løsninger for hydroformingsprosessen og spesielt mindre maskiner som vil konkurrere med mitt konsept. Det ble ikke funnet små hydroformingsmaskiner, men man kunne gjort søk på andre formingsmaskiner som kan gi tilnærmet likt resultat, slik som ”rubber pad forming”.
- En del av problemstillingen var å finne ut hvilke tykkelser og platematerialer det var tenkt at pressen skulle forme. Selv har jeg mye erfaring med motorsykler, men også her viste det seg å være vanskelig å finne hvilke legeringer og tykkelser produsentene bruker i drivstofftanker, rammer og svingarmer. Ved et tidligere stadie burde jeg bestemt en platetykkelse og et platemateriale slik at jeg kunne finne egnet teori.
- Teoriutredningen viste seg å ta betraktelig lenger tid enn det jeg først antok. Det ble skrevet ned mye generell teori som jeg senere så som overflødig og fjernet. Jeg burde ha laget en løs oversikt over teori jeg regnet med at trengtes, for så å gå videre til utviklingsfasen hvor jeg kommer frem til et endelig konsept. Da hadde jeg visst akkurat hvilken teori jeg trengte, noe som hadde vært tidsbesparende. Det skal sies at jeg lærte veldig mye av teoriutredningen.
- Under teoriutredningen ble det brukt mye tid på å finne relevante standarder for dimensjonering. Det ble funnet to standarder som kan brukes, men de var for dyre til å kjøpes. Her burde jeg tidlig ha forklart at standardene skal følges når en prototype skal lages, for så å dimensjonere forsøksmodellen med en sikkerhetsfaktor.

Utviklingsfase

- De metriske grensespesifikasjonene ble gjort ved å undersøke størrelsen på svingarmer og drivstofftanker fra et utvalg av motorsykler. For å nå ut til en bredere kundegruppe burde man se på andre plateprodukter som kan formes med hydroforming.
- Ved bestemmelse av nødvendig formingstrykk i delkapittel 7.3 ble det tatt utgangspunkt i en 3mm tykk plate lagd av 6061-T6 aluminium. Det kunne med fordel vært valgt en tynnere plate, f.eks. 1mm tykkelse slik at formingstrykket ikke hadde trengt å være så høyt. Dette hadde gitt mindre krefter på konstruksjonen som gjør at man kan bruke mindre skruer og ha tynnere vegger.

- Under konseptgenereringen burde det vært gjort tidlig-beregninger for en fullskala prototype tidlig i prosessen. Kjappe beregninger viser at et lokk med indre diameter på 600mm vil være så tungt at det ikke er ergonomisk eller brukervennlig å løfte lokket av og på. I konseptscreeningen ville man kanskje kommet frem til at man burde bruke hydraulikk til å heve og senke lokket.
- Gjennom den eksterne konsepttestingen fikk jeg både gode tilbakemeldinger og litt mindre utfyllende tilbakemeldinger. Det var opprinnelig tenkt å møte ekspertene personlig for å diskutere konseptet og valgte løsninger, men på grunn av covid-19 restriksjonene ble eksperttestingen gjort i form av en spørreundersøkelse sendt som en PDF. Hvis jeg hadde møtt ekspertene personlig kunne jeg forklart konseptet og løsningene bedre slik at de hadde fått en bedre forståelse.

Konstruksjon og designfase

- Det har blitt forsøkt å finne informasjon om materialer og fasonger på membraner brukt til hydroforming, men uten hell. Jeg var i kontakt med et firma som støper membranen spesifikt til hydroforming, men de kunne hverken gi fra seg informasjon om form på membranen eller materialegenskaper. Membranen har derfor fått en enkel utforming og det er tenkelig at formen på denne må endres.
- Det har blitt gjort søk for å finne informasjon om hvordan man bestemmer tverrsnittsdiameter på o-ringer, men etter min forståelse burde man utføre tester for å se hva som fungerer. Størrelsen på o-ringene og de freste sporene ble bestemt med en o-ringskalkulator fra Parker. Først etter tidlige forsøk får man vite om o-ringene holder på trykket.
- Trykktilførselen har blitt plassert midt i lokket, noe som er ugunstig da det største momentet i lokket opptrer her. Forsøksmodellen har såpass liten diameter og med tanke på membranen var en sentrert plassering gunstig, men ved en fullskala prototype vil trykktilførselen plasseres ut mot siden.
- FEM-beregningene viser at maks spenning er på 233,6MPa, noe som gir en sikkerhetsfaktor mot flyt på 1,5. Spenningene er veldig lokale og kan senkes ved å lage større radiuser. Resten av konstruksjonen har sikkerhetsfaktor på mer enn 2,5 og det er derfor muligheter til å lage konstruksjonen lettere.

Realiseringsfase

- Fra starten av prosjektet var det tenkt å produsere en forsøksmodell ved NMBUs verksted for å kunne gjennomføre tidlige forsøk og teste konseptet. På grunn av covid-19 ble universitetet stengt og det var ikke mulig å gjennomføre tidlige forsøk. Konseptets hovedelementer og komponenter lar seg produsere ved NMBUs verksted så det er ønskelig å få produsert forsøksmodellen på et senere tidspunkt.

16.2 Designrevisjon, produksjon, kostnadsreduksjon

Med tanke på design er forsøksmodellen riktig utformet, hvor det brukes mange standarddeler, og lokk og trykkammer kan enkelt freses. Som tidligere nevnt vil lokket til en fullskala prototype være såpass tungt at det kan være ønskelig å lage en mekanisme til å

heve og senke lokket. Dette vil gi et litt annet konsept som er mer komplisert og dyrere, men det kan veie opp med at det blir mer ergonomisk og brukervennlig.

Hvis det velges å bruke skruer til å feste lokket ved en fullskalaprototype bør man prøve å redusere antall skruer. Det minker fresearbeidet for både lokk og trykkammer i tillegg til å senke kostnaden for skruene. Kostnader knyttet til produksjon av membranen er veldig usikkert og dette kan være produktets akilleshæl.

17 Konklusjon

Det har blitt gjennomført et utviklingsoppdrag hvor det har blitt utredet og utviklet et konsept for en hydraulisk presse som former metallplate-materialer ved væsketrykk. Videre har det blitt designet en liten forsøksmodell, med tilhørende plan for utførelse av tidlige forsøk.

Arbeidet i prosjektet har vært basert på en IPD-systematikk-plattform, dvs. integrert produktutvikling. Det har blitt kartlagt eksisterende hydroformingsprosesser og om det finnes eksisterende maskiner som kan konkurrere med mitt konsept. Det teoretiske grunnlaget for hydroformingsprosessen har blitt gjennomgått og det har blitt gjort beregninger for å finne nødvendig hydrostatisk trykk.

Det har blitt utført metriske grovspesifiseringer for produktet med tilhørende funksjonsanalyse hvor det har blitt utviklet og vurdert alternative designløsninger. Dette har blitt fulgt av enkle konseptuelle forslag som trinnvis har blitt screenet ved bruk av Pughs metodikk for å komme frem til den foretrukne konseptløsningen. Løsningen har blitt grunnlagsberegnet med hensyn til materialer, styrkeforhold og komponentvalg. Konstruksjonen har blitt modellert og visualisert i 3D med tilhørende FEM-analyser.

17.1 Resultater og anbefalinger

Funksjon:

- Konstruksjonen består av to hovedelementer; et trykkammer og et lokk.
- I lokket er det integrert en membran som fylles med fett.
- En fettpresse genererer et hydrostatisk trykk i membranen slik at membranen utvider seg og former metallplater mot en matrise.
- Lokket festes til trykkammeret med 10 stk. M16 skruer i fasthetsklasse 12.9.

Utforming, dimensjoner og vekt:

- Lokk og trykkammer er sirkulært utformet innvendig og utvendig.
- Ytre diameter er på 200mm, indre diameter i trykkammeret er på 120mm, og total høyde er på 177mm.
- Vekten er på totalt 27,6kg, hvor lokket utgjør 12,4kg.
- Pressen kan forme metallplater av 6061-T6 aluminiumslegering med en tykkelse på opptil 3mm.

Materialer:

- Lokk og trykkammer produseres i S355 konstruksjonsstål.
- Trykktilførselen produseres i S165M rustfritt stål.

Beregninger:

- Maks formingstrykk er 500 bar.
- FEM-analyse av lokk og trykkammer viser spenningskonsentrasjoner med maks jevnførende spenning på 233,6MPa. Sikkerhetsfaktor mot flyt er her 1,5.
- FEM-analysen av lokk og trykkammer viser at sikkerhet mot flyt i resten av konstruksjonen er på minimum 2,5.
- FEM-analysen viser at maks deformasjon er på 0,04mm.
- Festeskruer er forspent med en klemsikkerhet $n_k = 1,5$ og sikkerhet mot flyt er på 1,5.

Kostnader:

- Totalkostnaden for forsøksmodellen er på 646100 NOK.
- Utviklingskostnadene er på 495000 NOK og utgjør ca. 77% av totalkostnaden for forsøksmodellen.

Standarder og godkjenninger:

- Relevante standarder for konstruksjonen er NS-EN 13445, *ikke-fyrte trykkbeholdere*, og ASME, *boiler & Pressure Vessel Code, Section VIII, Pressure Vessels*.
- Produktet må CE-merkes for å kunne selges i Norge og Europa.

Anbefalinger:

Ved videreutvikling av produktet anbefales det å se på følgende:

- Det bør undersøkes å bruke hydraulikk eller en annen mekanisme for å løfte og senke lokket. Dette vil øke ergonomien og brukervennligheten når produktet skal produseres i fullskala.
- Trykktilførselen bør FEM-beregnes.

17.2 Videre arbeid

På grunn av prosjektets begrensede omfang og andre uforutsette hendelser er det behov for flere utredninger og optimaliseringer av konstruksjonen. Videre arbeid kan deles inn i to deler hvor den første delen omhandler forsøksmodellen, mens den andre delen ser på videreutvikling av en fullskala markedsrettet prototype.

Videre arbeid for forsøksmodellen:

- Finne løsninger for produksjon av membranen.

- Gjøre søk for å se om det finnes standardmembraner og om forsøksmodellen kan tilpasses disse. Et område å lete kan f.eks. være belger i akkumulatortanker.
- Utføre grundigere FEM-analyser hvor trykktilførselen er montert i lokket.
- Ta kontakt med verkstedet ved NMBU for å se på optimaliseringer av konstruksjonen. Herunder valg av o-ringer, klaringer mellom lokk og trykktilførsel, og andre ting som de måtte ha innspill til.
- Gjennomføre testing av forsøksmodellen.

Fremtidig arbeid for fullskala prototype:

- Gå til anskaffelse av standarden NS-EN 13445, *ikke fyrte trykkbeholdere*.
- Utarbeide løsninger for en mekanisme som hever og senker lokket.
- Kontakte produsenter som kan lage membraner.
- Innhente kostnader angående CE-godkjenning, f.eks. fra DNV-GL.
- Utføre en grundig markedsanalyse for å kartlegge kundegrupper.
- Kartlegge hva slags materialer, størrelser og tykkelser de ulike kundegruppene vil presse, for så å bestemme nødvendig arbeidstrykk og størrelse på konstruksjonen.
- Sjekke om det er et marked for flere størrelser. Man kan lage MPress₃₀₀, MPress₄₅₀ MPress₆₀₀
- Utføre grundige patentundersøkelser og sjekke om det er gunstig med en rettighetsbeskyttelse.

18 Referanser

Skriftlige kilder

- [4] Boljanovic, V.: *Sheet Metal Forming Processes and Die Design*. Connecticut, USA: Industrial Press, Inc., 2004 , s. 24-70.
- [5] Brautaset, K.: *Innføring i Oljehydraulikk, første utgave*. Sehesteds gate 3 , Oslo , Norge: Universitetsforlaget, 1983 , 340 s.
- [9] Dahlvig, G. Christensen, S. & Strømsnes G.: *Konstruksjonselementer, Andre utgave*. Sehesteds gate 4 , Oslo , Norge: Gyldendal Norsk Forlag AS, 1991 , s. 63-102.
- [14] Eversheim , W.: *Innovation Management for Technical Products: Systematic and Integrated Product Development and Production Planning (RWTH-edition) , 1st edition*. Berlin , Heidelberg , Tyskland: Springer Verlag, 2009 , 444 s.
- [19] Hu, S. J.: *Mechanics of Sheet Metal Forming, Second Edition*. Oxford, England: Butterworth-Heinemann, 2002 , s. 152-153.
- [20] Hunt , D. V.: *Reengineering: Leveraging the Power of Integrated Product Development (Executive Breakthrough Series)*. Sacramento, California, USA: Wight (Oliver) Publications Inc, 1993 , 256 s.
- [27] Michalko, M.: *Thinkertoys: A Handbook of Creative-Thinking Techniques , 2nd edition*. Berkeley, USA: Ten Speed Press, 2006 , 416 s.
- [29] Moss, D.: *Pressure Vessel Design Manual, 3rd edition*. Houston, Texas, USA: Gulf Professional Publishing, 2003 , s. 5.
- [36] Pugh, S. Clausing, D. & Andrade R.: *Creating Innovative Products Using Total Design*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., 1996 , 544 s.
- [37] Pugh, S.: *Total Design: Integrated Methods for Successful Product Engineering*. Essex, United Kingdom: Pearson Education, 1991 , 296 s.
- [38] Reardon, Arthur C.: *Metallurgy for the Non-Metallurgist*. Ohio, USA: ASM International, 2011 , 450 s.
- [41] Singh, H.: *Fundamentals of Hydroforming*. Markham, Canada: Society of Manufacturing Engineers, 2003 , 219 s.
- [42] Søgaard, Ø. S.: *Utrede, utvikle og designe et tanksystem til motorsykkelen Honda VTR 1000 SP2. , 2019 , s. 12.*
- [44] Terjesen, G.: *Spenningsanalyse og trykkbeholdere. , 2019 , 44 s.*

Nettkilder

- [1] INC Aerospace Specification Metals. 16.04.2020. URL: <http://asm.matweb.com/>.
- [2] The Experimental Aircraft Association. 15.02.2020. URL: <http://www.eaa573.no/>.
- [3] Autodesk. 17.03.2020. URL: <https://www.autodesk.com>.
- [6] Parker Chomerics. 10.03.2020. URL: <https://www.parker.com>.

- [7] Martin's Rubber Company. *16.04.2020*. URL: <https://www.martins-rubber.co.uk/>.
- [8] Gallagher Corporation. *16.04.2020*. URL: <https://gallaghercorp.com/>.
- [10] Science Direct. *08.03.2020*. URL: <https://www.sciencedirect.com>.
- [11] Engineers Edge. *15.03.2020*. URL: <https://www.engineersedge.com/>.
- [12] Quality Engineering. *09.03.2020*. URL: <https://qualityengineering.wordpress.com/>.
- [13] Scheffers Engineering. *15.02.2020*. URL: <https://www.scheffersengineering.com/>.
- [15] Febur. *14.04.2020*. URL: <http://www.feburstore.com/en/>.
- [16] Norsk Forskningsråd. *15.02.2020*. URL: <https://www.xn--forskningsrdet-vib.no>.
- [17] Høgskolen i Gjøvik. *21.03.2020*. URL: <http://www.ansatt.hig.no>.
- [18] GrabCAD. *20.04.2020*. URL: <https://grabcad.com>.
- [21] Beater Japan. *14.04.2020*. URL: <https://beater-japan.com/>.
- [22] Labguider. *17.03.2020*. URL: <http://www.labguider.com>.
- [23] Store Norske Leksikon. *02.02.2020*. URL: <https://snl.no>.
- [24] Store Norske Leksikon. *16.03.2020*. URL: <https://snl.no>.
- [25] Lovdata. *29.05.2020*. URL: <https://lovdata.no/>.
- [26] Metalworking World Magazine. *04.02.2020*. URL: <https://www.metalworkingworldmagazine.com>.
- [28] MITCalc. *20.03.2020*. URL: <http://www.mitcalc.com>.
- [30] Motorcyclespecs. *14.04.2020*. URL: <https://www.motorcyclespecs.co.za/>.
- [31] Avfall Norge. *26.05.2020*. URL: <https://www.avfallnorge.no>.
- [32] Standard Norge. *29.05.2020*. URL: <https://www.standard.no/>.
- [33] Polymaker. *26.05.2020*. URL: <https://eu.polymaker.com>.
- [34] Accu Products. *27.05.2020*. URL: <https://www.accu.co.uk>.
- [35] Frey Publishing. *24.05.2020*. URL: <http://frey.no>.
- [39] Apple Rubber. *16.03.2020*. URL: <https://www.applerubber.com>.
- [40] Simscale. *17.03.2020*. URL: <https://www.simscale.com>.
- [43] Sverdrup Steel. *24.05.2020*. URL: <https://www.sverdrupsteel.com>.
- [45] Toolshero. *17.03.2020*. URL: <https://www.toolshero.com>.

19 Vedlegg

Vedlegg 1: Spørreskjema

Vedlegg 2: Konstruksjonstegninger

Vedlegg 3: Spesifikasjoner o-ring 142,0 x 2,0mm

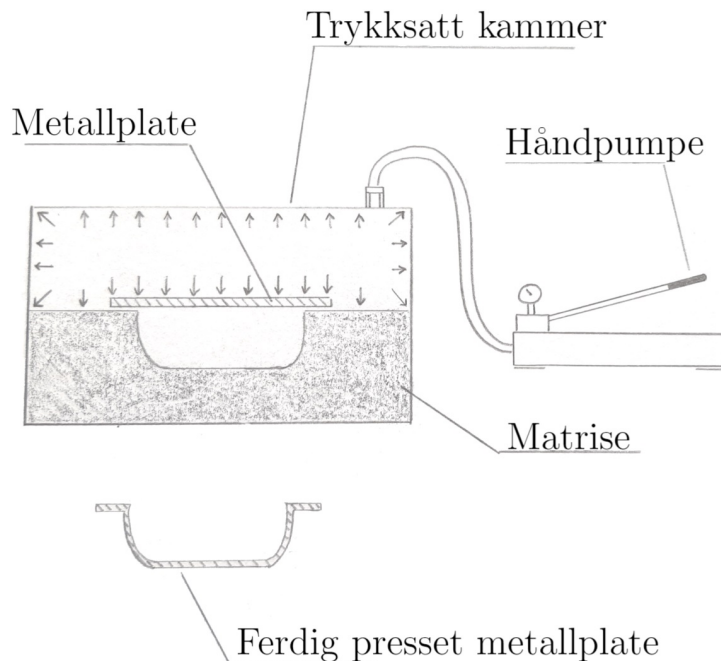
Vedlegg 4: Spesifikasjoner o-ring 16,5 x 2,0mm

Vedlegg 1 Eksperttesting

Bakgrunn:

Denne eksperttestingen gjøres i forbindelse med masteroppgaven min våren 2020. Masteroppgaven går ut på å utvikle en hydraulisk presse for å forme metallplater, og i den forbindelse er det ønskelig å gjøre en eksperttesting for å få tilbakemeldinger på valgte designløsninger.

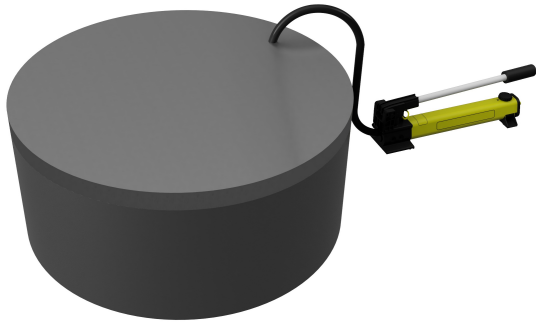
Bakgrunnen for masterprosjektet har sitt utgangspunkt i hovedfaget TIP300 der jeg utredet et tidlig idégrunnlag for en presse som former metallplate-materialer ved bruk av hydrostatisk trykk. Dette masterarbeidet fokuserer på å utvikle denne konseptidéen videre med et trykkammer hvor et hydrostatisk trykk former metallplater etter en utskiftbar matrise. Med et slikt verktøy kan man presse metallplater nøyaktig, raskt og kostnadseffektivt. I figur 1 vises en skisse av pressen slik jeg så det for meg i faget TIP300.



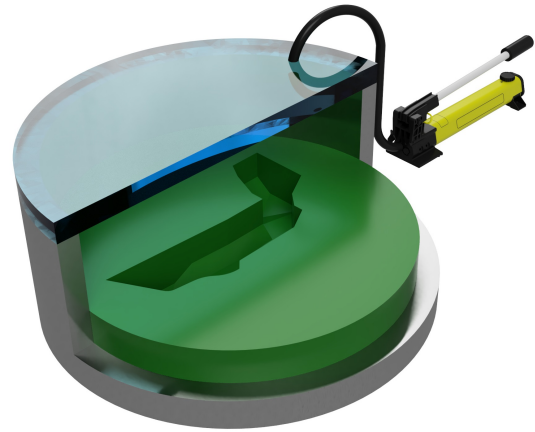
Figur 1: Skisse av tidlig idégrunnlag for å forme metallplater med hydrostatisk trykk. I figuren er et trykkammer som blir trykksatt av en hydraulisk pumpe. Inne i trykkammeret blir en metallplate formet etter en matrise pga. det hydrostatiske trykket.

Konseptbeskrivelse

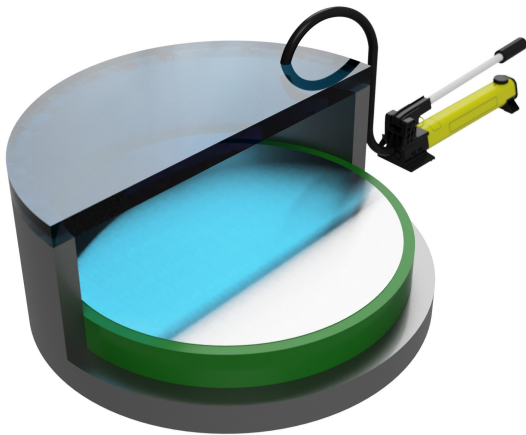
Konseptet er å lage en hydraulisk presse for å forme metallplater. Pressen vil være relativt liten, med et enkelt design, bestå av få deler, og den skal gjøre hydroformingsprosessen tilgjengelig for små bedrifter. På neste side i figur 2 vises en illustrasjon for hvordan en aluminiumstank jeg designet i faget TIP300 kan bli produsert ved å bruke en slik hydraulisk presse.



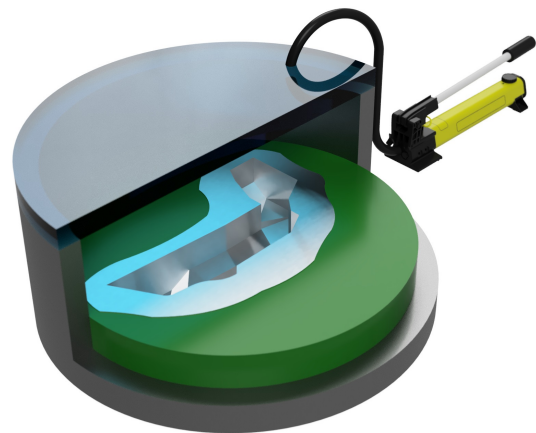
(a) Hydroformingsverktøyet som består av et trykkammer, en hydraulisk pumpe og en utskiftbar matrise. Matrisen vises ikke på dette bildet.



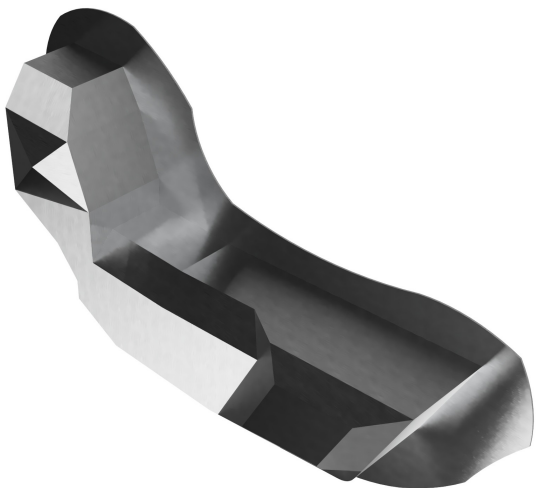
(b) Her er trykkammeret snittet slik at man kan se matrisen som former halve tanken.



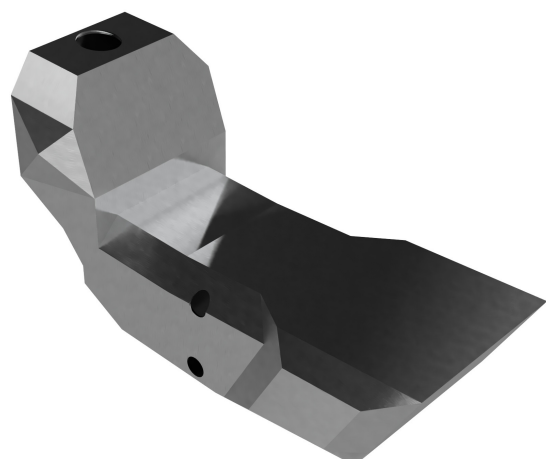
(c) En aluminiumsplate blir lagt over matrisen og kammeret fylles med væske (væsken vises ikke her). En membran vil skille væsken fra platen.



(d) Ved hjelp av den hydrauliske pumpen lages det et trykk og platen formes etter matrisen.



(e) Platen er formet etter matrisen og overflødig materiale fjernes. Nå er halve tanken formet.



(f) Når den andre halvdel av tanken er formet sveises de to halvdelene sammen.

Figur 2: En illustrasjon av hvordan bensintanken jeg designet i faget TIP300 kan produseres med et hydroformingsverktøy.

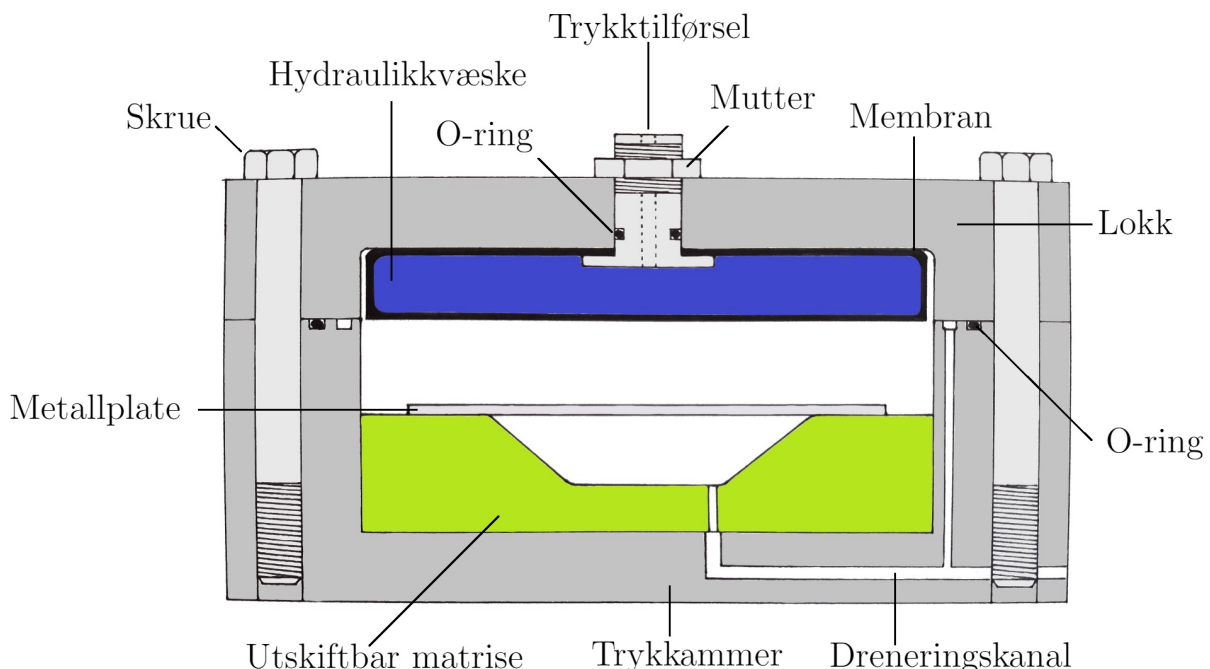
Oppdragsbeskrivelse

Målet med prosjektet er å gjennomføre et produktutviklingsoppdrag. Det skal utredes, utvikles og designes en hydraulisk presse som former metallplate-materialer.

For trykkammeret skal det utføres funksjonsanalyser med metrisk spesifiserings- og vurderingsgrunnlag for utvikling og vurdering av alternative designløsninger, fulgt av enkelte konseptuelle forslag (delløsninger og systemløsninger) som screenes trinnvis, teknisk og funksjonelt fram til en foretrukket konseptløsning. Denne løsningen skal grunnlagsberegnes med hensyn til materialvalg, styrkeforhold, komponentvalg mv., konstruksjonsmodelleres og visualiseres i 3D for videre beregnings optimalisering. Hvis det er tid og ressurser skal det fremstilles en tidlig prototype for forsøk.

Prinsippskisse

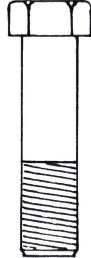
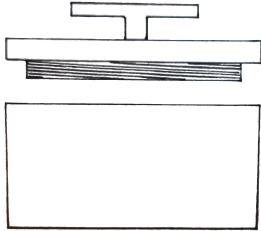
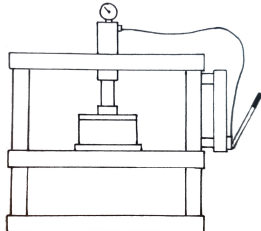
I figur 3 nedenfor er det lagd en prinsippskisse med forklaringer. Lokk og trykkammer er sylindrisk utformet innvendig og utvendig. Matrisen legges inn i trykkammeret, metallplaten plasseres over matrisen, lokket plasseres på trykkammeret, skruene strammes og så tilføres det trykk. Membranen vil da ekspandere og forme metallplaten etter matrisen. Hvis membranen skulle lekke vil o-ringen mellom lokk og trykkammer hindre farlige lekkasjestråler, og hydraulikkvæsken vil dreneres gjennom dreneringskanalen. Skissen er en illustrasjon og proporsjonene er derfor ikke riktige.



Figur 3: Skisse av de valgte løsningsalternativene. På toppen av lokket sitter trykktilførselen og skruhodene. Integrert i lokket er en gummimembran som inneholder den hydrauliske væsken. Under lokket er trykkammeret som inneholder den utskiftbare matrisen og metallplaten. I bunnen og i siden av trykkammeret er det boret en dreneringskanaler for å fjerne luft og eventuelle lekkasjer.

Spørsmål 1, forbinde lokk og trykkammer

Når det hydrostatiske trykket bygges opp vil det prøve å separere lokket og trykkammeret. Det må derfor finnes en løsning for å presse sammen lokket og trykkammeret. I tabellen nedenfor er det vist tre løsningsforslag for å presse sammen lokket og trykkammeret.

	Skisse	Beskrivelse
E_1		Trykkammeret og lokket presses sammen med bolter. Boltene kan festes med muttere eller man kan gjenge godset i trykkammeret.
E_2		Lokket og trykkammeret er gjenget og skrues sammen.
E_3		Lokket presses mot trykkammeret ved bruk av en hydraulisk presse.

Løsningsforslag E_1 ble valgt hvor skruene skrues inn i trykkammeret. Begrunnelse for dette er:

- Billig løsning hvor det finnes mange standard skruer.
- Det er enkelt å bore hullene i trykkammeret.

Er du enig i valg av løsningsforslaget? Sett kryss og gi gjerne en kommentar.

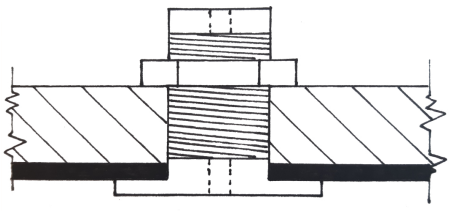
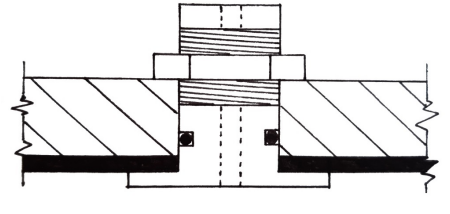
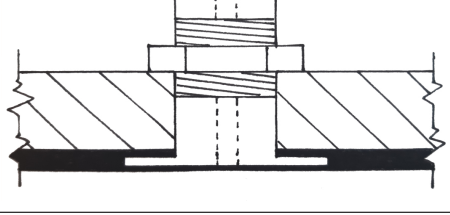
Ja	Nei	Vet ikke
Ø, E	H	
Kommentar		
<p>Øyvind: Det er komplisert å gjenge den stor diameteren. Gjengeløsningen krever rund form på kammeret. Gjenger i selve trykkammeret er ikke noe problem. Jeg ville gått for pinnebolter i trykkammeret og muttere over lokket. Da får du utnyttet gjengene bedre i bunnen og det blir mindre fare for at gjengene i trykkammeret ikke skades ved gjentatte monteringer.</p>		

Henrik: E_2 vil potensielt være raskere ved serieproduksjon. Tid er en viktigere faktor enn kost for festet.

Egil: Skruer er ok. Litt avhengig av antallet som skal produseres.

Spørsmål 2, feste og tette membranen

Membranen som inneholder hydraulikkvæsken vil bli støpt i et materiale som f.eks. polyuretan eller nitril. Membranen må festes til lokket og den må forsegles slik at hydraulikkvæsken ikke lekker. I tabellen under er det vist tre løsningsforslag for å feste og tette membranen.

	Skisse	Beskrivelse
I_1		Hullet i lokket gjenges og skruen skrues oppover slik at flensen klemmer membranen mot undersiden av lokket for å oppnå forsegling. På toppen av skruen brukes en låsemutter. Som forsegling i gjengene brukes f.eks. loctite.
I_2		Hullet i lokket er ikke gjenget og ved å stramme mutteren klemmes membranen mot undersiden av lokket og man oppnår forsegling. For å forsegle hullet i lokket brukes en o-ring.
I_3		Flensen støpes inn i membranen for å oppnå forsegling. Ved å stramme mutteren festes membranen mot undersiden av lokket.

Løsningsforslag I_2 ble valgt. Begrunnelse for dette er:

- Når mutteren strammes vil skruen kun bevege seg i vertikal retning og flensen vil ikke skade membranen.
- Hullet i lokket behøver ikke gjenges.
- Skruen er ikke støpt inn i membranen og er derfor gjenbrukbar.

Er du enig i valg av løsningsforslaget? Sett kryss og gi gjerne en kommentar.

Ja	Nei	Vet ikke
Ø		E
Kommentar		
<p>Øyvind: Det er greit her å ha en mulighet for å holde i mot på undersiden slik at ikke membranen blir deformert ved montering. Trykket inne i kammeret vil vel også bidra med kraft mot membranen slik at den tetter mer jo høyere trykk det er på innsiden. Det er vel en grense hva membranen tåler av trykk så det bør være riktig areal på skruehodet.</p> <p>Henrik: Jeg forstår ikke helt dette konseptet.</p> <p>Egil: Litt i tvil om hvordan membranen klarer å holde tett der hvor den ikke er kontinuerlig.</p>		

Spørsmål 3, sikkerhet

Formingstrykket er tenkt å være 500bar, og eventuelle lekkasjestråler kan i verste fall være dødelige. Det vil brukes to sikkerhetsanordninger:

- O-ring mellom lokk og trykkammer. Hvis membranen skulle sprekke vil o-ringen tette mellom lokk og trykkammer og hydraulikkvæsken vil dreneres til tank gjennom dreneringskanaler.
- Det monteres en tilbakeslagsventil for å hindre at trykket overstiger 500bar.

Har du noen tanker angående sikkerhetsanordningene? Kommenter gjerne her.

Kommentar
<p>Øyvind: Det er forholdsvis enkelt å lage et deksel som står mellom kammer og operatør.</p> <p>Henrik: Det høres fornuftig ut.</p> <p>Egil: Sikkerhetsventil er sikkert ok. Har du regnet ut trykket som du må ha for operasjonen (50MPa / 500bar)? Det er ikke nødvendig å gå altfor langt over det trykket som kreves.</p>

Spørsmål 4, materialer

For å bytte matrise og legge inn nye metallplater må lokket fjernes. Hvis lokket blir stort blir det veldig tungt og det vil være lite brukervennlig og lite ergonomisk. Det kan være ønskelig å lage lokket av et lettvektsmetall som aluminium, mens trykkammeret lages av stål. Hvis det brukes to forskjellige metaller kan det oppstå galvanisk korrosjon. Har du noen betenkeligheter rundt dette? Kan det være en løsning å bruke en korrosjonsbestandig aluminiumslegering slik som 6082?

Kommenter gjerne her.

Kommentar

Øyvind: Jeg tror ikke det blir noe stor problem. Delene kommer ikke til å sitte sammen veldig lenge av gangen og for at det skal oppstå galvanisk korrosjon må det være en elektrolytt tilstede. Det kan man jo hindre ved å bruke en væske som er nøytral?

Henrik: Må ikke lokket være like stivt som resten?

Egil: Aluminium har E-modul som er en tredjedel av stål. Her er det fort gjort å få samme vekten som for stål dersom en ikke gjør om designet.

Spørsmål 5, egne innspill

Hvis du har andre kommentarer å tilføye kan du gjøre det her. Eksempler på innspill kan være:

- Tror du konseptet vil fungere?
- Jeg syns konstruksjonen er enkel og tror det vil fungere hvis man får støpt en slitesterk membran som holder tett. Hva tror du?
- Materialer som kan brukes til membranen er f.eks. polyuretan eller nitril. Har du andre forslag?

Kommenter gjerne her.

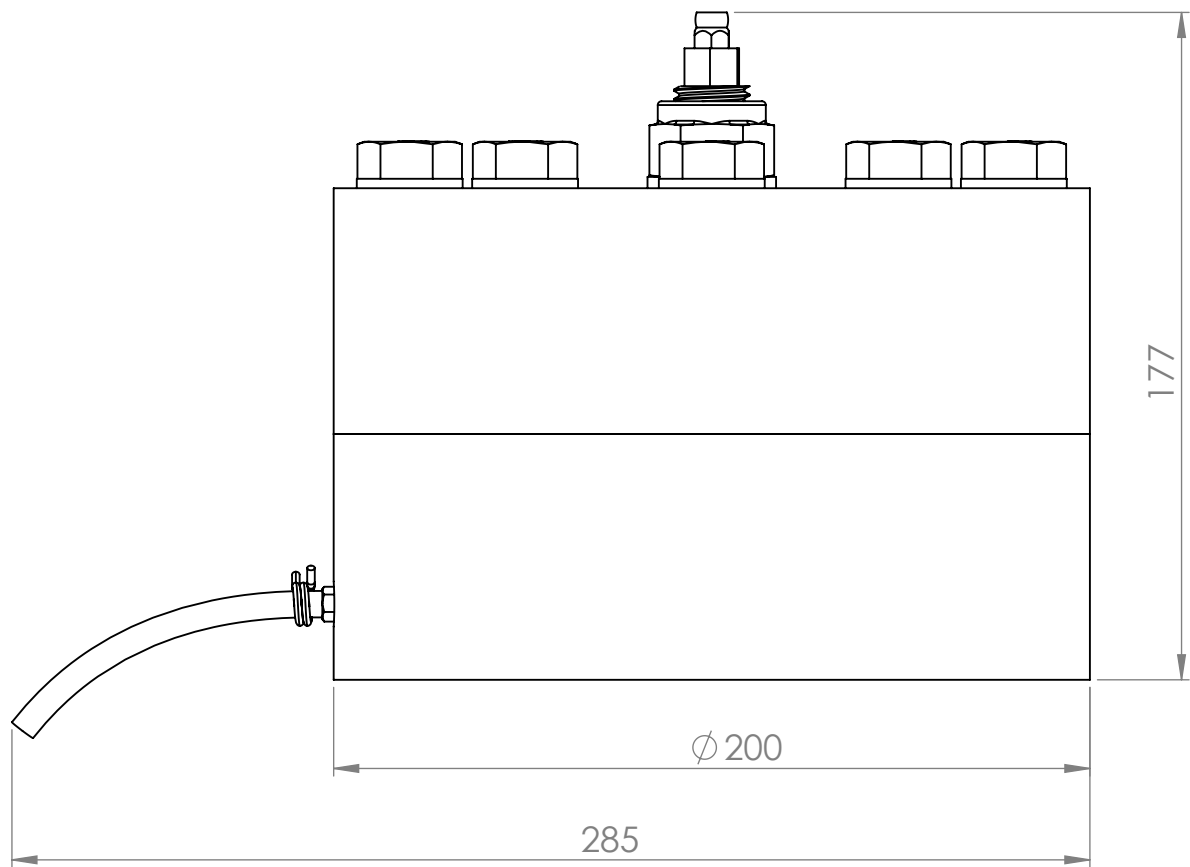
Kommentar

Øyvind: Jeg tror konseptet vil fungere. Begrensningene ligger sikkert på materialtyper og former som ellers når man former metall. Kostnadene ved produksjon av matriser er vel omtrent den samme. Man sparer selvfølgelig produksjon av tappen som tradisjonelt går ned i matrisen og selve pressen. Jeg har ikke erfaring med membranmaterialer.

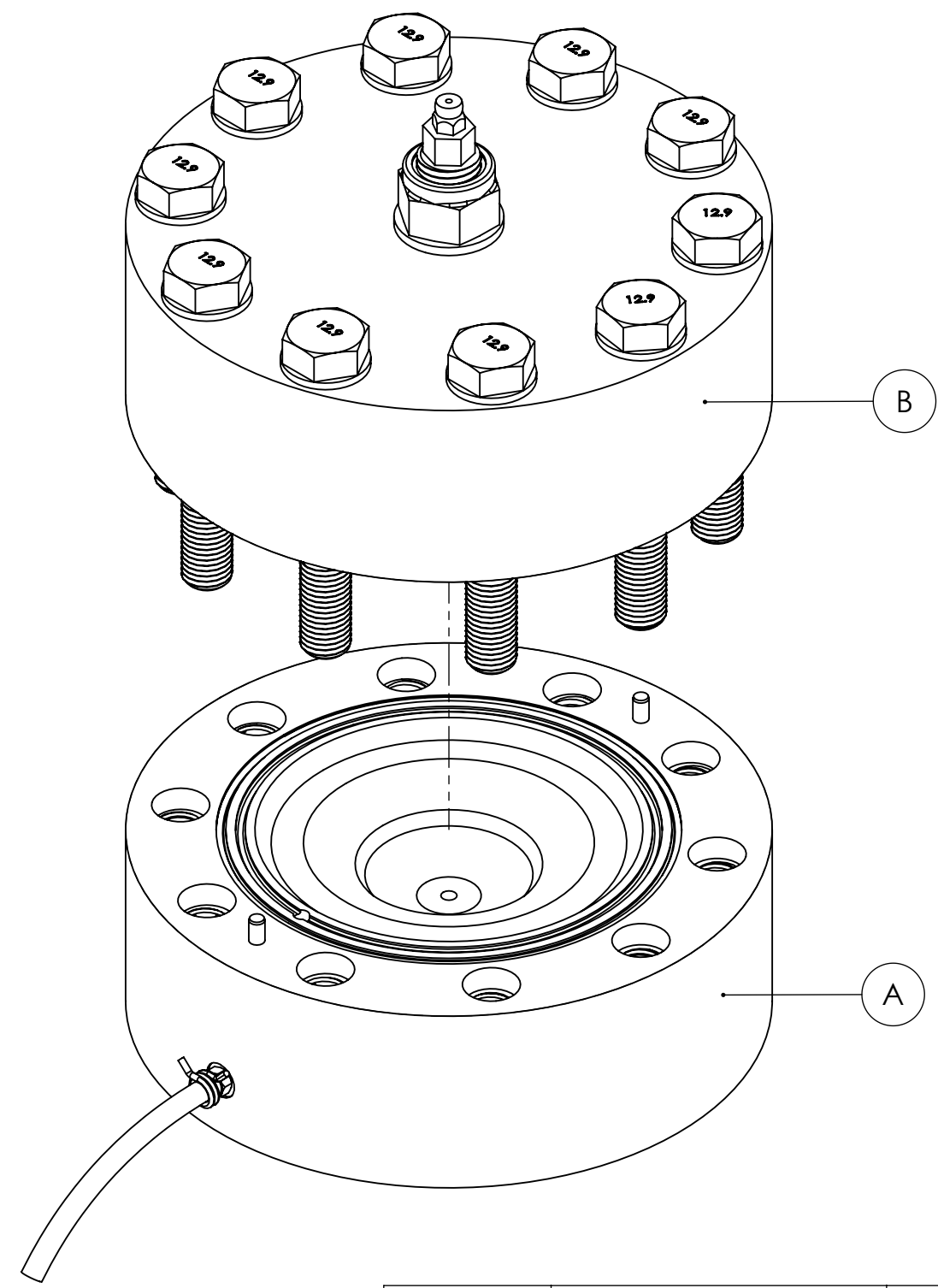
Henrik: Dette bør testes med en enkel prototype.

Egil: Hva med skarpe kanter som materialet skal flyte over når komponenten formes. Husk å ta hensyn til maks % flyt i materialet hvis ikke vil du kunne få sprekker.

Vedlegg 2

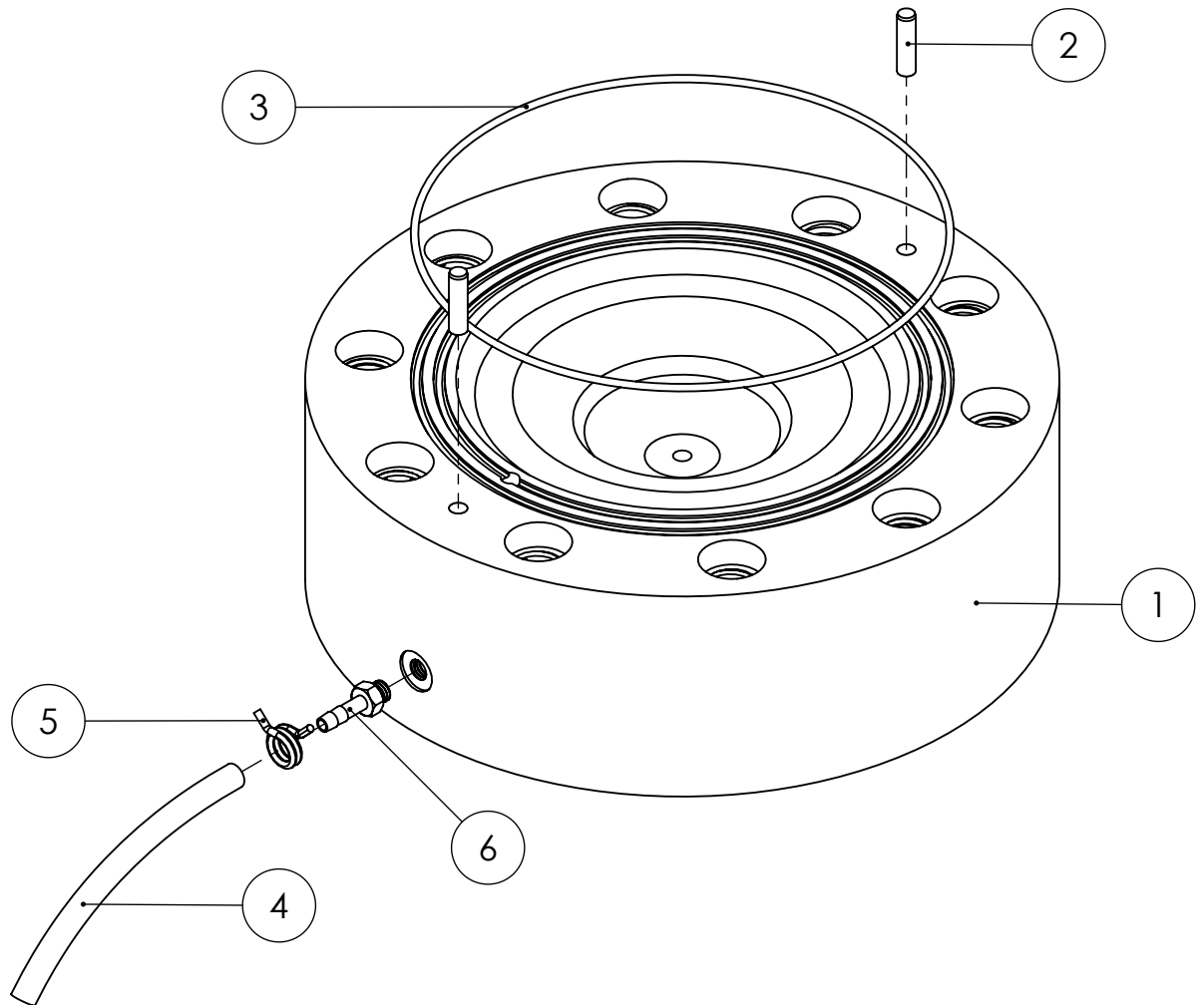


Drawn: Øyvind S. S.	Checked: Øyvind S. S.	Title: MPress, hydraulisk platepresse	Scale: 1:2
	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet	Description: Ytre mål	Sheet: 1
			A4



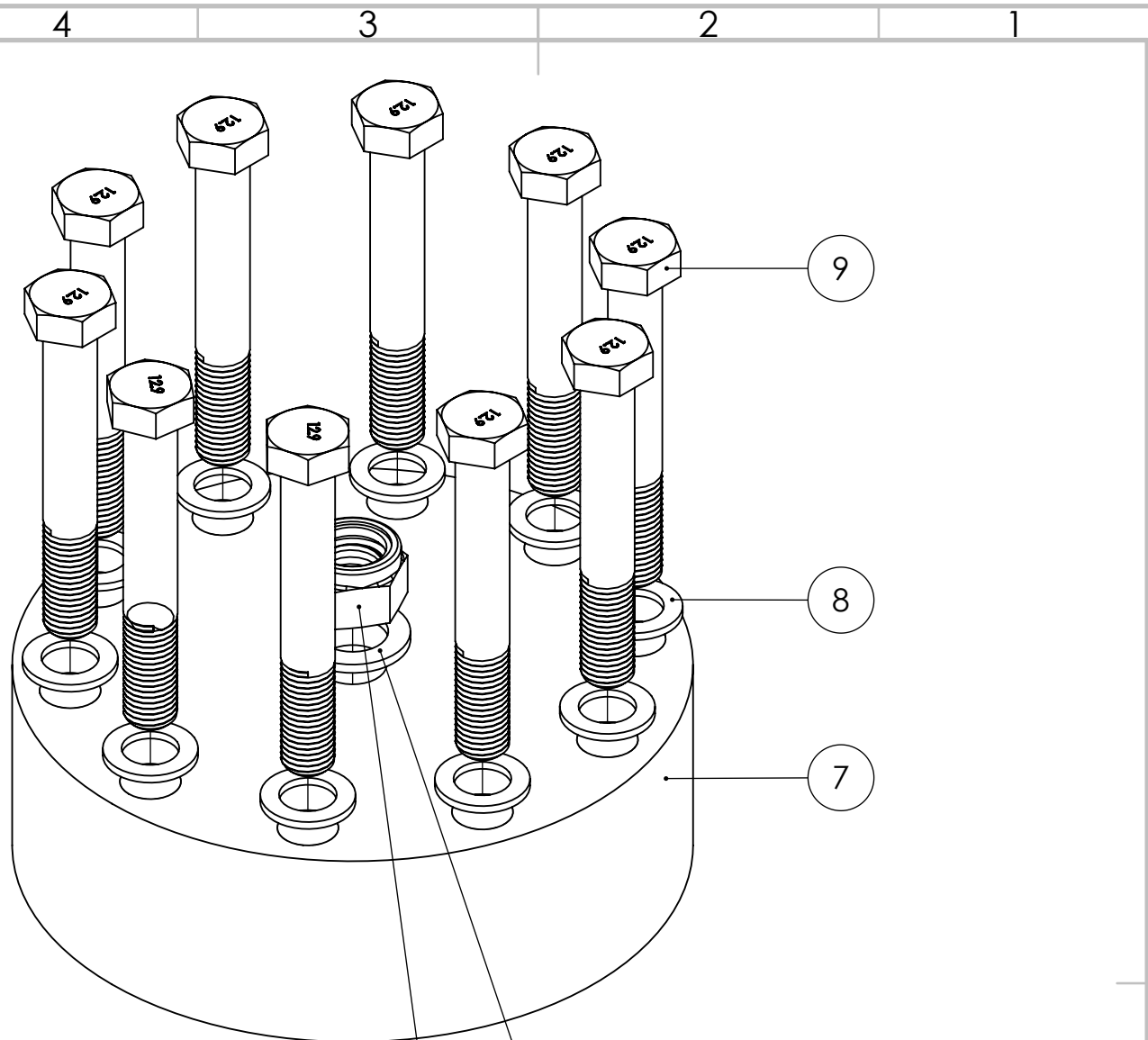
ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
A	Komplett trykkammer	1
B	Komplett lokk	1

Drawn: Øyvind S. S.	Checked: Øyvind S. S.	Title: MPress, hydraulisk platepresse	Scale: 1:2
	Norges miljø- og biovitenskapelige universitet	Description: Hoveddeler, eksplodert	Sheet: 2
			A4



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
1	Trykkammer	1
2	Styrepinne	2
3	O-ring 142,0 x 2,0mm	1
4	Dreneringslange	1
5	Slangeklemme	1
6	Slangenippel	1

Drawn: Øyvind S. S.	Checked: Øyvind S. S.	Title: MPress, hydraulisk platepresse	Scale: 1:2
		Description:	Sheet: 3
		Komplett trykkammer, eksplodert	A4



ITEM NO.	PART NUMBER	QTY.
7	Lokk	1
8	Skive M16	1
9	Skrue M16 x 110	1
10	Fettnippel	1
11	Trykktilførsel	1
12	Låsemutter M20	1
13	Skive M20	1
14	Membran	10
15	O-ring 16,5 x 2,0mm	10

Drawn: Øyvind S. S.	Checked: Øyvind S. S.	Title: MPress, hydraulisk platepresse	Scale: 1:2
		Description: Komplett lokk, eksplodert	Sheet: 4
			A4

Vedlegg 3



O-Ring Selector

Region: International Unit: mm

Service Conditions & Defining Attributes

Operating Temperature	Minimum: 0°C Maximum: 60°C
Polymer Group	Acrylonitrile Butadiene Nitrile (NBR, XNBR)
Seal Hardness	75 SHA
Compound	

O-ring Size Code

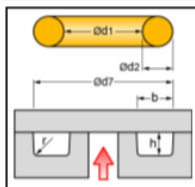
Hardware Configuration

Sealing Case	Axial - Internal Pressure
Application	Liquid

Thermal Expansion & Volume Swelling

Seal	Group default	$112 \times 10^{-6} / K$
Groove	Inactive	$0 \times 10^{-6} / K$
Seal max. volume swell		0 %

Sizing Selection



Back-up Rings	Amount : 0		Width : mm			
O-ring Size Code						
OR		Nominal	Tolerance	Limit	Min	Max
ød1	Inner diameter	142.000	ISO 3601-1 B ±	1.110	140.890	143.110
ød2	Cross section	2.000	ISO 3601-1 B ±	0.080	1.920	2.080
Groove		Nominal	Lower	Upper	Min	Max
ød7	Outer Diameter	144.000	0.000	0.100	144.000	144.100
b	Width	3.000	0.000	0.200	3.000	3.200
h	Depth	1.450	0.000	0.100	1.450	1.550
r	Radius	0.700	-0.200	0.200	0.500	0.900

Results

● Recommended ▲ Warning ✖ Critical

Results	Recommendation	Min	Max	
Interference of OR outer-ø	0...3	● 0.4	● 2.2	%
Compression of OR ød2	19...32	● 19.1	● 30.6	%
Gland fill	60...90	● 60.0	● 88.5	%
Total deformation force		611	1621	N

Notes

Recommendations on application design and material selection are based on available technical data and are offered as suggestions only. Each user should make his own tests to determine the suitability for his own particular use. Parker offers no express or implied warranties concerning the form, fit, or function of a product in any application.

Contact the US Application Engineers phone: 859-335-5101 email: OESmailbox@parker.com

Contact the European Application Engineers phone: +49 7142 351-0 email: praedifa@parker.com

Vedlegg 4



O-Ring Selector

Region: International Unit: mm

Service Conditions & Defining Attributes

Operating Temperature	Minimum: 0°C Maximum: 60°C
Polymer Group	Acrylonitrile Butadiene Nitrile (NBR, XNBR)
Seal Hardness	90 SHA
Compound	

O-ring Size Code

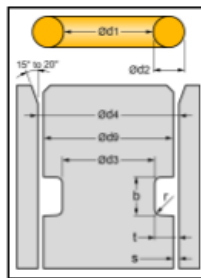
Hardware Configuration

Sealing Case	Radial - Piston Seal
Application	Static

Thermal Expansion & Volume Swelling

Seal	Group default	$112 \times 10^{-6} / K$
Piston / Groove	Inactive	$0 \times 10^{-6} / K$
Bore	Inactive	$0 \times 10^{-6} / K$
Seal max. volume swell		0 %

Sizing Selection



Back-up Rings		Amount : 0		Width : mm		
O-ring Size Code						
OR		Nominal	Tolerance	Limit	Min	Max
ød1	Inner diameter	16.500	ISO 3601-1 B ±	0.240	16.260	16.740
ød2	Cross section	2.000	ISO 3601-1 B ±	0.080	1.920	2.080
Groove		Nominal	Lower	Upper	Min	Max
ød4	Bore	20.005	0.000	0.033	20.005	20.038
ød9	Piston	20.000	-0.041	-0.020	19.959	19.980
ød3	Groove	17.000	-0.043	0.000	16.957	17.000
b	Width	2.900	0.000	0.200	2.900	3.100
r	Radius	0.700	-0.200	0.200	0.500	0.900

Results

● Recommended ⚠ Warning ❗ Critical

Results	Recommendation	Concentric		Eccentric		
		Min	Max	Min	Max	
t Depth + gap		1.503	1.541	1.480	1.580	mm
s gap		0.013	0.040		0.079	mm
Stretch of OR inner-ø	0...6	● 1.3	● 4.5			%
Compression of OR ød2	14...34	● 16.8	● 27.4	● 14.7	● 28.5	%
Gland fill	60...90	● 60.4	● 86.8			%
Total deformation force		135	366			N

Notes

Recommendations on application design and material selection are based on available technical data and are offered as suggestions only. Each user should make his own tests to determine the suitability for his own particular use. Parker offers no express or implied warranties concerning the form, fit, or function of a product in any application.

Contact the US Application Engineers phone: 859-335-5101 email: OESmailbox@parker.com

Contact the European Application Engineers phone: +49 7142 351-0 email: praedifa@parker.com



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

Postboks 5003
NO-1432 Ås
Norway