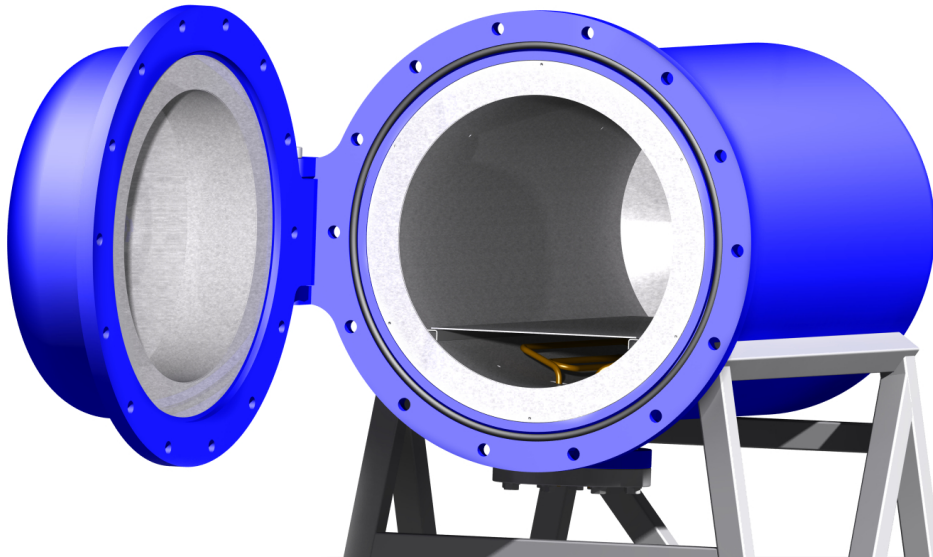




CHALMERS



Konstruera och bygga en autoklav

för härdning av kompositer i Chalmers kompositverkstad

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

PETTER BARRENG
TOBIAS BREDENBERG
BIRK FORSSTRÖM
FREDRIK HOLMBERG
JOHAN KARLSSON

KANDIDATRAPPORT 2018

Konstruera och bygga en autoklav

för härdning av kompositer i Chalmers kompositverkstad

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

PETTER BARRENG TOBIAS BREDENBERG

BIRK FORSSTRÖM FREDRIK HOLMBERG

JOHAN KARLSSON



CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2018

Konstruera och bygga en autoklav
för härdning av kompositer i Chalmers kompositverkstad
Petter Barreng, Tobias Bredenberg, Birk Forsström, Fredrik Holmberg, Johan Karlsson

© Petter Barreng, Tobias Bredenberg, Birk Forsström, Fredrik Holmberg, Johan Karlsson,
2018.

Handledare: Knut Andreas Meyer, Institutionen för industri- och materialvetenskap
Examinator: Mikael Enelund, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatrapport 2018
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola

Framsida: CAD-modell av autoklaven.

Typeset in L^AT_EX

Konstruera och bygga en autoklav
för härdning av kompositer i Chalmers kompositverkstad
PETTER BARRENG, TOBIAS BREDENBERG, BIRK FORSSTRÖM, FREDRIK HOLM-
BERG, JOHAN KARLSSON
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola

Sammandrag

För att fortsätta försörja arbetsmarknaden med nyutexaminerade studenter från Chalmers och göra nya framsteg inom forskning krävs utveckling. Arbetet uppnår detta genom att konstruera en autoklav till maskinhusets kompositverkstad. I det första skedet används systematisk utvecklingsmetodik för att kunna ta fram koncept. Sedan genomfördes dimensionering av autoklaven med hjälp av handberäkningar på hållfastheten och uppvärmningssystemet. Följt av detta gjordes modellering med hjälp av CATIA v5, där modellerna sedan användes för simuleringar i finita elementprogrammet ANSYS 18.2. Dimensioneringen av reglersystemet genomfördes med hjälp av simuleringar i systemdesignsprogrammet Simulink. Med hjälp av dessa verktyg har gruppen tagit fram en konstruktion med tillhörande ritningar och komponenter. De huvudsakliga komponenterna är ett tryckkärl med dimensionerna $\varnothing 508 \times 1190$ mm, ett reglersystem baserat på en Raspberry Pi 3+ och ett uppvärmningssystem med maximal effekt på 2,3 kW. Autoklaven är dimensionerad för arbetstrycket 0,7 MPa och högsta temperaturen 150 °C. Styrsystemet visar när autoklaven är i drift och stänger av vid eventuella fel. Om styrsystemet skulle haverera finns en mekanisk övertrycksventil som försäkrar om att trycket släpps ut.

Abstract

To keep the supply of alumnae going from Chalmers and to make new research possible innovation is needed. This project achieves this through the design of an autoclave intended to be used in Chalmers new composite workshop. In the first phase of the project a systematic development method was used. In the next phase the product was designed with tools like basic calculations of the structural integrity and the heating system. Then models were made in CATIA v5 and simulated with the finite element method in ANSYS 18.2. A model for the control system was developed and simulated in the system design program Simulink. With the help of these tools the project group has made a complete design with blueprints and components. The major components are; a pressure vessel with the dimensions $\varnothing 508 \times 1190$ mm, a Raspberry Pi 3+ based control system and a heating system with the maximal active power 2,3 kW. The autoclave is designed for a working pressure of 0.7 MPa and maximal temperature of 150 °C. The control system indicates when the autoclave is in use and shuts down when any errors occur. If the control system where to malfunction a mechanical pressure valve guarantees safety by releasing the air.

The report is written in Swedish.

Nyckelord: Autoklav, tryckkärl, komposit, härdning av kompositer, värde modellen, ANSYS, Simulink, CAD, Raspberry Pi 3+, rörellement

Förord

Projektet förklarar tillvägagångssättet för att konstruera och tillverka en autoklav för härdning av kompositer. Detta utförs i form av ett kandidatarbete vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper under vårterminen 2018 på Chalmers tekniska högskola, Göteborg. Vi vill ägna ett stort tack till vår handledare Knut Andreas Meyer, doktorand på institutionen för industri- och materialvetenskap. Knut har genom sitt personliga intresse även motiverat oss och med hjälp av vägledning givit oss ett stort stöd genom hela projektet. Ett stort tack riktas även till vår examinator Mikael Enelund, biträdande professor vid institutionen för mekanik och maritima vetenskaper, som med sitt höga engagemang för att bidra till Chalmers utveckling och framtid inspirerar oss studenter.

Innehåll

Figurer	xi
Tabeller	xiii
1 Inledning	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Syfte	1
1.3 Avgränsningar	2
1.4 Precisering av målbild	2
1.5 Samhälleliga och etiska aspekter	2
2 Teori	5
2.1 Autoklav	5
2.2 Kompositer	5
2.2.1 Härdning av kompositer	6
3 Framtagning av koncept	7
3.1 Marknadsundersökning	7
3.2 Uppdelning i delsystem	7
3.3 Fri idégenerering	8
3.4 Morfologisk matris	9
3.5 Pughmatris	10
3.6 Val av primära delsystem	11
3.7 Val av sekundära delsystem	13
3.8 Presentation av slutgiltigt koncept	14
4 Detaljkonstruktion	17
4.1 Metod	17
4.1.1 Computer-aided design (CAD)	17
4.1.2 Tryckkärl	17
4.1.3 Flänsar	19
4.1.4 Isolering	22
4.1.5 Reglersystem	23
4.1.6 Uppvärmningssystem	25
4.2 Resultat	25
4.2.1 Slutgiltig design	26
4.2.2 Tryckkärl	28
4.2.3 Flänsar	30
4.2.4 Isolering	32

4.2.5	Reglersystem	32
4.2.6	Uppvärmningssystem	36
5	Diskussion	37
6	Slutsats	39
A	Kravspecifikation	I
B	Intervjuer	V
B.1	Intervju med institutionen	V
B.2	Intervju med CFS	V
C	Ritningar	VII
D	Kretsschema	XXXIII
E	Komponentprislista med budget	XXXV

Figurer

2.1	Generaliserad härdningscykel som visar förändringen av tryck och temperatur genom härdningen. Bild tagen från källa [1].	6
3.1	Kategorisering av autoklavens mekaniska delsystem.	8
3.2	Kategorisering av autoklavens elektriska delsystem.	8
3.3	Handmålade skisser av genererade koncepten A till F.	10
3.4	Pughmatris som skapades. De olika koncepten jämfördes mot koncept A som var referens.	11
3.5	Slutgiltigt koncept för de primära delsystemen. De primära delsystemen är tryckkärl, dörr, värmesystem, kylsystem, reglersystem och luftcirkulation. .	15
4.1	Principiell Wöhlerkurva. Kurvan visar antal lastcykler till brott. σ_b är brottsgränsen vid statisk belastning och σ_u är utmattningsgränsen. För metall antas oändlig livslängd över 10^6 lastcykler.	18
4.2	Illustration av ett segment för flänsförbandet.	19
4.3	Illustration av kontaktytorna där sättning sker.	20
4.4	ANSYS-modell för analys av dörr och flänsar.	22
4.5	Illustration av de olika skikten. α är det termiska motståndet varje skikt utgör.	22
4.6	Simulinkmodell av reglerloop.	24
4.7	Simulinkmodell av autoklaven.	25
4.8	Slutgiltig design av ingående komponenter.	27
4.9	Spänningarna vid skorstenen. Det röda området illustrerar det område med högst spänningar för simuleringen. Dessa uppkommer i hålranden och är 149,5 MPa. Spänningen i svetsen visas av mätpunkten och uppgår till 92,6 MPa.	28
4.10	Figur över optimerad konstruktion av skorstenen. Spänningarna i hålranden uppgår till 131,2 MPa och 69,1 MPa i svetsen.	29
4.11	Spänningar vid avståndet $0,4x$ och x för hotspotanalys, där x är tryckkärllets godstjocklek. Skalan visar de högsta och lägsta spänningarna som uppstår. .	30
4.12	Deformation av flänsen i 130 gånger verklig skala. Den verkliga deformationen uppgår till 0,09 mm.	31
4.13	En övergripande illustration av systemet.	33
4.14	Simulerad temperatur i kärlet i förhållande till referenssignal.	34
4.15	Två svarskurvor från simulering i Simulink: Förhållandet mellan in- och utsignal av temperatur, avvikelser till önskad temperatur och effekten styrenheten matar elementet med.	35
4.16	Rörelse för uppvärmning.	36

Tabeller

3.1	Resultat från fri idégenerering. Lösningalternativen till de primära delsystemen.	9
3.2	Resultat från den morfologiska matrisen.	9
3.3	Val av delsystem i slutgiltigt koncept.	15
4.1	Grundläggande mått för design av tryckkärlet.	26
4.2	Materialdata för tryckkärlsstål. E_s är elasticitetsmodulen, $\sigma_{s,20^\circ\text{C}}$ är sträckgränsen vid 20 °C, $\sigma_{s,150^\circ\text{C}}$ är den reducerade sträckgränsen vid 150 °C och σ_b är brottsgränsen.	28
4.3	Reduktionsfaktorerna som används för att reducera brottsspänningen. De beror av lastfall, spänningskoncentrationer och materialets yta.	29
4.4	Konstanter och utlästa värden för dimensionering av skruvförband.	30
4.5	Resultat och dimensioner på skruvförband.	31
4.6	Tabellerad indata för isolering.	32
4.7	Resultat från dimensioneringen av isolering.	32
4.8	Tabellerad indata för reglersimulering.	34
4.9	Indata och resultat för värmemängdsberäkningar.	36

1

Inledning

När fiberförstärkta kompositer introducerades på marknaden öppnades nya vägar till vad som är möjligt att tillverka. Det starka och lätta materialet revolutionerade bland annat bil- och flygindustrin med lättare bilar och mer energieffektiva flygplan, ändå har kompositer inte blivit det vanligaste materialet att konstruera med. Detta är på grund av komplicerade och tidskrävande processer med dyra maskiner som driver upp kostnaden.

Med tillgång till en autoklav kommer nya tillverkningsprocesser kunna implementeras i Chalmers utbildningar. En autoklav är en trycksatt ugn som i detta fall används för härdning av kompositer. Utan tillgång till en autoklav pressas kompositen mot formen med enbart vakuum. Med en autoklav kan man utnyttja både vakuum och ett övertryck för att pressa ut fibrerna mot formen samtidigt som temperaturen regleras för att uppnå bästa egenskaperna hos kompositen. Detta ger studenter möjligheten att i utbildningssyfte arbeta med tillverkning av kompositer vilket bidrar till ökad kunskap inom ämnet samt att fler kompositkunniga ingenjörer kommer ut i industrin.

1.1 Bakgrund

På Chalmers finns ett ökande fokus på forskning och utbildning inom tillverkning, bearbetning samt simulering av kompositer. Det tillverkas, testas och bearbetas kompositer i forskningssyfte och till studentprojekt som Formula Student, Formula Sailing och Eco Marathon. Genom att bygga en kompositverkstad på Chalmers kommer dessa möjligheter att öka. Som del av denna verkstad skall det finnas tillgång till en autoklav. En autoklav möjliggör experiment med olika material och processparametrar för att bygga upp goda kunskaper om kompositer och dess egenskaper. På uppdrag av maskinteknikprogrammet skall denna autoklav konstrueras i detta kandidatarbete. Kandidatarbetsgruppen består av studenter från civilingenjörsprogrammen Automation och mekatronik, Elektroteknik och Maskinteknik, således finns kompetens inom alla relevanta områden.

1.2 Syfte

Uppgiften är att konstruera och tillverka en autoklav som kan härda kompositer under en given tryck- och temperaturcykel. Autoklaven ska kunna användas av både studenter och forskare. Utöver detta ska gruppen utveckla kunskaper och färdigheter i att hantera mångdisciplinära problem med öppna lösningsmängder.

1.3 Avgränsningar

Från beställaren har följande begränsningar ställts på projektet.

- Budgeten för projektet är 20 000 kronor.
- Tidsramen för projektet är 10 veckors heltidsarbete fördelat på 20 veckor.
- Vid tillverkning och konstruktion ska standarder för tryckkärl [2] följas för att bibehålla en hög säkerhet.
- Kärlet skall dimensioneras efter den kompressor och vakuumpump som finns att tillgå i kompositverkstaden.
- Tryckkärlet måste svetsas av licensierad svetsare [3].

Utöver begränsningarna ifrån beställaren har gruppen egna avgränsningar för projektet. Avgränsningar är nödvändiga för att uppfylla beställarens begränsningar.

- Standardkomponenter kommer att användas för att skapa en mer modulerbar produkt samt spara tid.
- Tillverkningen ska kunna ske i Chalmers prototypplabb.
- Ett begagnat kärl kommer inte användas då konstruktionen av ett eget tryckkärl anses vitalt från ett lärandeperspektiv.

1.4 Precisering av målbild

Målet med projektet är att nå en färdig produkt som uppfyller beställarens och intressenternas krav samt önskemål. Därav kan målet delas upp i tre huvudsakliga frågor: Är projektets tidsram tillräcklig för att uppnå en färdig produkt? Är budgeten tillräcklig för att täcka alla utgifter? Uppfylls alla krav i kravspecifikationen?

1.5 Samhälleliga och etiska aspekter

Då autoklaven ska användas inom utbildning och forskning finns det flera etiska aspekter som är viktiga att ta hänsyn till. Eftersom den ska användas i skolmiljö är det viktigt att ingen kan komma till skada. Med de stora krafterna ett tryckkärl utsätts för så är konstruktionen viktig. En felkonstruerad komponent kan leda till att all kraft frigörs samtidigt vilket kan medföra allvarliga personskador. Då det är ett skolprojekt utfört av studenter som baserat konstruktionen på teori granskades därför projektet noggrant. Detta är inte bara för att en olycka hade varit förödande utan också för att bibehålla universitets anseende som ett bra lärosäte. För att minimera dessa risker kommer autoklaven att ha olika säkerhetssystem. Säkerhetssystemen kommer att testas och en provtryckning av kärlet ska genomföras innan första användningen.

När alla lösningar sammanställs till en slutgiltig produkt förväntas den göra nytta inom utbildning och forskning. Det är viktigt att kolla på nyttan kopplat till etiska problem som skapas efter färdigställandet. Med möjligheten att hantera kompositmaterial ökar framtagandet av sådana produkter. Som följd av detta kommer efterbearbetning av kompositer

att genomföras vilket är hälsoskadligt [4]. Detta är något som projektgruppen kan styra vilket leder till frågan om ansvaret ligger på framtida administration av användandet. En autoklav ger också möjlighet att analysera egenskaperna för naturfiber och växtbaserade bindemedel vilket bidrar till ökad kunskap inom CO₂-neutrala alternativ [5]. Detta sammanfaller väl med Chalmers fokus på hållbarhet och effektivt resursutnyttjande.

2

Teori

Detta kapitel förklarar teorin om autoklaver och kompositer samt härdning av kompositer.

2.1 Autoklav

En autoklav är ett uppvärmt och trycksatt kärl. Autoklaver används bland annat inom bil- och flygindustrin [6] för härdning av kompositer. Några andra användningsområden är inom vården för sterilisering av materiel och inom kemiindustrin för vulkanisering av gummi, där används dock andra tryck och temperaturer. För härdning kompositer är det normala intervallet för övertryck från 0,08 MPa till 0,7 MPa och temperaturen varierar mellan 75 °C och 180 °C [7]. Temperatur och tryck kontrolleras och regleras med hög noggrannhet. Utöver övertryck har även autoklaver för kompositer möjligheten att hålla produkter vakuumsatta. På grund av detta krävs genomföringar för vakuumslangar vilket är den största skillnaden i förhållande till autoklaver för andra tillämpningar.

Autoklaver används flitigt i tillverkning av högpresterande kompositer. Detta ger många fördelar [8], exempelvis:

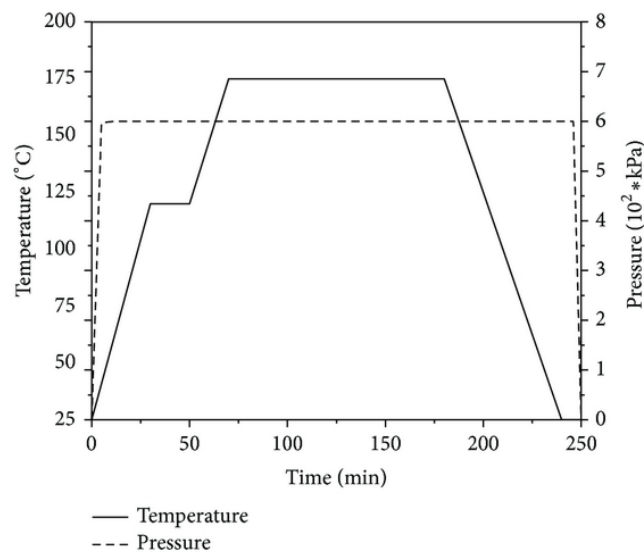
- att mängden bindemedel minskas vilket gör kompositen upp till 60% lättare [9],
- att hållfastheten i materialet ökar med cirka 20% [10],
- att bildandet av luftbubblor minimeras i väven då dessa skapar svagheter i kompositen och
- att mer komplexa geometrier kan konstrueras då övertrycket pressar ut fibrerna mot formen.

2.2 Kompositer

Komposit är ett samlingsnamn för kombinationer av olika material med enskilda egenskaper där kombinationen åstadkommer nya egenskaper. Det kan vara egenskaper som ökad styvhet eller minskad vikt. Försättningsvis när kompositmaterial nämns så är det fiberförstärkta polymerer som avses, då det är dessa som kommer härdas i autoklaven. Kompositer består av en fiberväv, ofta glas- eller kolfiber, som gjuts in i ett bindemedel av polymerer. De vanligaste polymererna är polyester och epoxy vilka tillhör kategorin härdplaster.

2.2.1 Härdning av kompositer

Härdning är en kemisk process som förändrar polymerens struktur och gör kompositen starkare. Härdplaster härdas genom att en kemisk reaktion bildar starka tvärbindingar mellan polymerkedjorna [11]. För att påbörja härdningen av en härdplast behöver omgivningen vara i en viss temperatur, oftast över 14 °C [12]. Under denna temperatur avstannar polymersationen och därmed härdningen. Efter härdningen kan inte härdplaster omformas eller lösas upp i lösningsmedel utan återvinns genom att malas ned till pulver och därefter användas i andra applikationer [11].



Figur 2.1: Generaliserad härdningscykel som visar förändringen av tryck och temperatur genom härdningen. Bild tagen från källa [1].

En härdningscykel inleds med en tryckökning till önskat härdningstryck, detta följs av en mindre temperaturökning för att polymeren ska fördelas jämnt i formen, se figur 2.1. Komplexiteten och storleken på formen avgör hur lång tid processen tar. Nästa steg är att öka temperaturen till härdningsnivån för polymeren. Trycket är högt tills härdningen är klar, då kan tryck och temperatur avlägsnas samtidigt [1]. Temperaturökningen, även kallad rampning, får inte vara för hög under härdningsprocessen då detta kan få polymeren att härdas ojämnt. Rampningen brukar variera mellan två och tio grader per minut.

3

Framtagning av koncept

Tillvägagångssättet som användes för att skapa de olika koncepten var influerat av värde-modellen [13], som är en välkänd och effektiv systematik vid produktutveckling. Metoden användes för att den har ett systematiskt tillvägagångssätt med bra dokumentationsunderlag. En kravspecifikation användes genom hela processen som underlag för att säkerställa att det slutliga produkten uppfyller alla krav. Innan konceptgenereringen påbörjades genomfördes litteraturstudier för att ha goda förkunskaper om ämnet.

3.1 Marknadsundersökning

För att komma fram till vad som efterfrågades av produkten genomfördes en marknadsundersökning. Marknadsundersökningen bestod av intervjuer med intressenter och studiebesök. Studiebesöket var hos Aston Harald AB som använder autoklav i sin produktion. De primära intressenterna som intervjuades var Chalmers Formula Student (CFS) och professor Leif Asp på avdelningen för material och beräkningmekanik samt ansvarig för kompositverkstaden. Med hjälp av ett frågeformulär genomfördes muntliga intervjuer vilket gav ett bra underlag för en kravspecifikation. Frågor och svar redovisas i bilaga B.

När litteraturstudien var gjord och resultaten från marknadsundersökningen var sammanställda skapades en kravspecifikation. Intressenternas, beställarens och gruppens krav och önskemål kombinerades i en lista med kriterier. Önskemålen viktades med hänsyn till prestandans inverkan på en skala från ett till fem, där ett var det högst prioriterade och fem det lägst prioriterade. Kravspecifikationen visas i bilaga A.

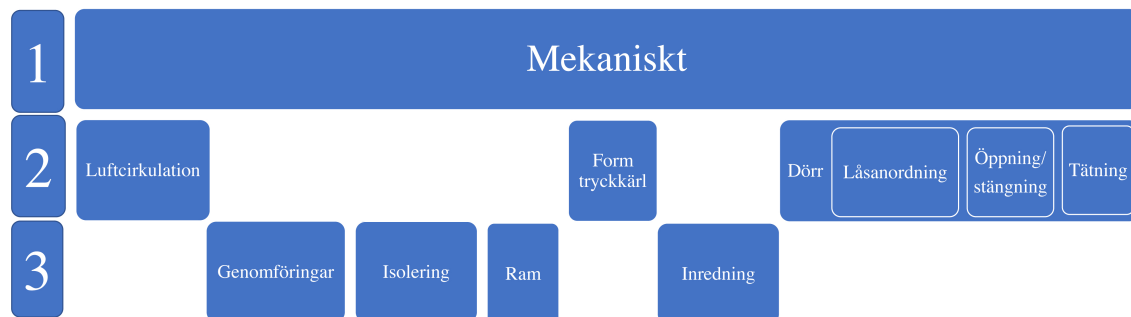
I kravspecifikationen anges vem som är kravställare för de olika kraven och önskemålen, vilket underlättar verifiering vid ett senare tillfälle. Verifieringen sker genom olika metoder beroende på krav. Dessa delades in i tre olika kategorier, teoretiska, praktiska och övriga verifieringsmetoder. De teoretiska verifieringsmetoderna används för de krav och önskemål som kan verifieras med hjälp av konstruktion eller design, exempelvis antalet vakuumanslutningar. Genom att använda praktiska verifieringsmetoder som mätning, vägning och provtryckning kan exempelvis rampningstiden verifieras via mätningar. Den sista verifieringsmetoden är övrig verifiering som kan innefatta kontroll mot Gantt-schemat och avtalsbaserade krav, här kan exempelvis verifiering på att budgeten följdes göras genom kostnadskalkyl.

3.2 Uppdelning i delsystem

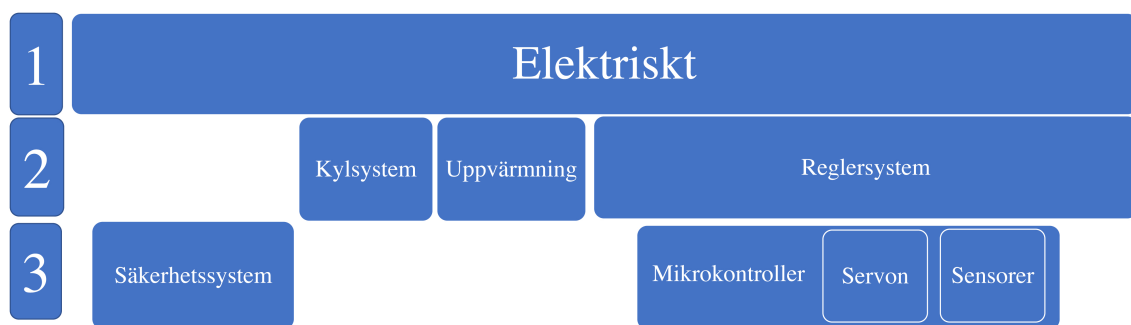
För att få en insikt av vilka ingående komponenter som en autoklav består av delades den upp i delsystem enligt figur. För att nyttja hela gruppens kompetenser delades autoklaven

3. Framtagning av koncept

upp i två system, ett elektriskt, se figur 3.2, och ett mekaniskt enligt figur 3.1. Detta var ett naturligt sätt att dela upp autoklaven då de flesta delsystemen enkelt kunde kategoriseras. Vissa delsystem var dock svårplacerade, exempelvis luftcirkulation då både mekaniska och elektriska lösningar förekommer. Dessa placerades utefter vad som är vanligast på marknaden.



Figur 3.1: Kategorisering av autoklavens mekaniska delsystem.



Figur 3.2: Kategorisering av autoklavens elektriska delsystem.

Kategori ett är övergripande. Kategori två är de primära delsystemen. De anses primära då de har högre komplexitet och funktion som påverkar produktens prestanda. Kategori tre är de sekundära delsystemen, dessa ses som mindre vitala för produkten.

3.3 Fri idégenerering

Efter uppdelningen genererades separata lösningar till delsystemen. För att inte fastna i hur delsystemen fungerar tillsammans gjordes detta på ett delsystem åt gången. En brainstorming genomfördes för att på ett snabbt och effektivt sätt generera många olika lösningar. Alla lösningar dokumenterades oavsett relevans eller möjlighet att tillverkas, en orealistisk idé kan leda till en bättre. Efter brainstormingsfasen valde gruppen att sälla bort de lösningar som inte var genomförbara. Lösningarna till de olika delsystem listas i tabell 3.1.

Delsystem	Lösningalternativ			
Tryckkärl	Sfär	Cirkulär cylinder		
Dörr: öppning/stängning	Gångjärn	Kranupphängning	Skjutsdörr	Manuellt
Dörr: låsning	Skruvförband	Roterande fläns	Roterande dörr	Utskjutande kilar
Dörr: tätning	O-ring	Uppblåsbar gummiring	Metallpackning	
Värmesystem	Rörellement	Kabelvärme	Vattenburet sys.	
Kylsystem	Vattenburet sys.	Luftcirkulation	Ej kylsystem	
Reglersystem	PLC	Mikrokontroller		
Luftcirkulation	Fläkt	Ingen luftcirkulation		

Tabell 3.1: Resultat från fri idégenerering. Lösningalternativen till de primära delsystemen.

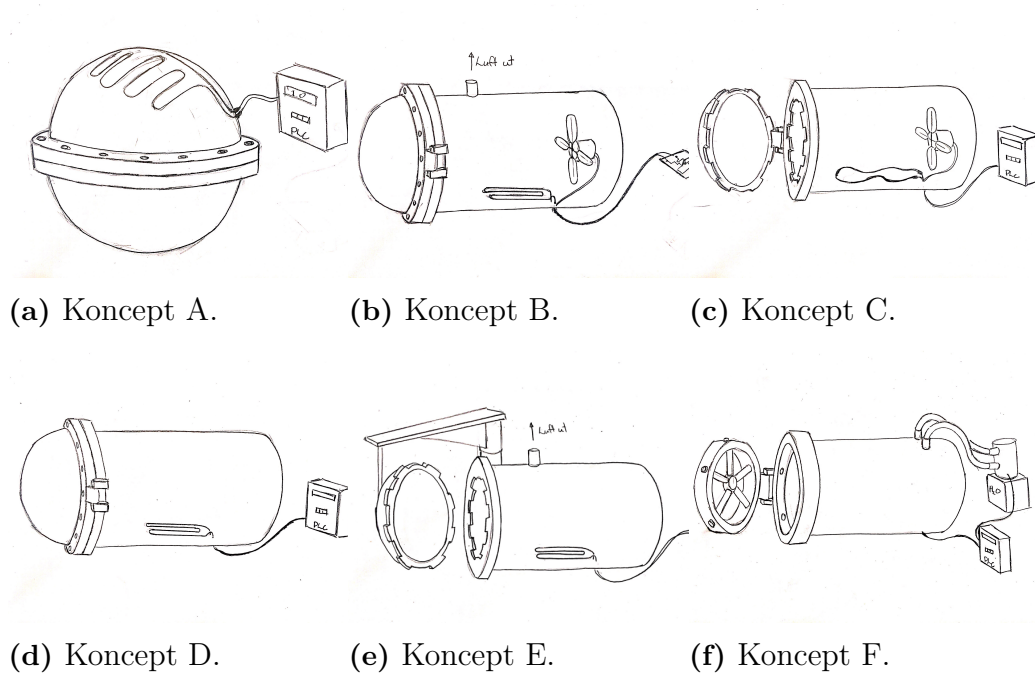
3.4 Morfologisk matris

För att kunna generera koncept av delsystemens lösningalternativ används en morfologisk matris. Denna metod valdes för att på ett strukturerat sätt kombinera de olika lösningarna till de primära delsystemen för att skapa hela koncept. Totalt genererades sex stycken koncept, se tabell 3.2.

Delsystem	Koncept A	Koncept B	Koncept C	Koncept D	Koncept E	Koncept F
Tryckkärl	Sfär	Cirkulär cylinder	Cirkulär cylinder	Cirkulär cylinder	Cirkulär cylinder	Cirkulär cylinder
Dörr: öppning/stängning	Manuellt	Gångjärn	Gångjärn	Gångjärn	Kranupphängning	Gångjärn
Dörr: låsning	Skruvförband	Skruvförband	Roterande fläns	Skruvförband	Roterande dörr	Utskjutande kilar
Dörr: tätning	O-ring	Metallpackning	Uppblåsbar gummiring	O-ring	Uppblåsbar gummiring	O-ring
Värmesystem	Rörellement	Rörellement	Kabelvärme	Rörellement	Rörellement	Vattenburet sys.
Kylsystem	Ej kylsystem	Luftcirkulation	Ej kylsystem	Ej kylsystem	Luftcirkulation	Ej kylsystem
Reglersystem	PLC	Mikrokontroller	PLC	PLC	Mikrokontroller	PLC
Luftcirkulation	Ingen luftcirkulation	Fläkt	Fläkt	Ingen fläkt	Ingen fläkt	Ingen fläkt

Tabell 3.2: Resultat från den morfologiska matrisen.

Genom att direkt ta hänsyn till komplexitet och pris kunde många koncept väljas bort då det ansågs bli för komplexa och dyra att tillverka. Handmålade skisser för koncepten kan ses i figur 3.3.



Figur 3.3: Handmålade skisser av genererade koncepten A till F.

3.5 Pughmatris

Det slutgiltiga steget i designprocessen var att välja ut det koncept som uppfyllde kraven bäst, detta gjordes med en Pughmatris. I Pughmatrisen används ett koncept som referens och sedan jämförs de andra koncepten mot referensen på hur väl de uppfyller de olika kriterierna. Genom flera iterationer med olika koncept som referens kan ett slutgiltigt koncept skapas, det kan vara ett enskilt koncept eller en kombination av flera. Kriterierna som koncepten jämfördes mot är tydliga, dock finns två som behöver ytterligare förklaring. Komplexitet avser helhetsbilden hos konceptet som total mängd ingående komponenter och hur enkelt dessa kan sammanfogas. Tillverkningsbarhet avser hur väl produkten kan tillverkas med de färdigheter som finns inom gruppen, det skulle kunna vara kompetens eller tillgångar.

Efter den första Pughmatrisen upplevde gruppen att metoden inte passade för denna produkt. Att jämföra hela koncept visade sig vara svårt då vissa delsystem hade stor inverkan på resultatet. Exempelvis fick koncept F, se figur 3.3, väldigt dåligt på många kriterier endast för att det hade vattenburen uppvärmning. Därför valde gruppen att analysera varje delsystem för sig och diskutera kring dessa. De kriterierna som användes från Pughmatrisen och blev centrala vid analysen var komplexitet, tillverkningsbarhet och användbar volym. Pughmatrisen visas i figur 3.4.

Chalmers	Pughmatris (Relativ beslutsmatris):					
Utfärdare: MMSX20-18-07			Skapad: 2018-02-22 Modifierad: 2018-02-22			
Kriterier	Alternativ					
	Ref A	B	C	D	E	F
Komplexitet	R	-	-	0	-	-
Tillverkningsbarhet	E	-	-	+	-	-
Luftcirkulation	F	+	+	0	+	+
Användarvänlighet dörr	E	+	+	+	+	+
Modularitet styrsystem	R	+	0	0	+	0
Värmesystem	E	+	-	0	0	-
Användarbar volym	N	+	+	+	+	+
Kylsystem	S	+	0	0	+	0
Antal +		6	3	3	5	3
Antal 0		0	2	5	1	2
Antal -		2	3	0	2	3
Nettovärde		4	0	3	3	0
Rangordning		1	4	2	3	4

Figur 3.4: Pughmatris som skapades. De olika koncepten jämfördes mot koncept A som var referens.

3.6 Val av primära delsystem

Då Pughmatris visade sig vara en mindre bra metod för denna produkt valdes istället att analysera varje delsystem för sig. Genom att successivt gå igenom varje delsystem och analysera de olika lösningalternativen kunde beslut för varje delsystem fattas. Här genomförs detta på de primära delsystemen.

Tryckkärl

Då de flesta existerande tryckkärl och autoklaver har utformningen som ett tunnväggigt cylindriskt rör med kupade gavlar gjordes antagandet att denna autoklav skulle bli liknande. Den optimala utformningen ur en hållfasthetssynpunkt är ett tunnväggigt sfäriskt kärl, detta är dock inte praktiskt med avseende på användbar volym. Den materialtyp som antas är av typen tryckkärlsstål. Tryckkärlsstål har höga krav vad det gäller hållfasthet vid förhöjda temperaturer och är inte hårdbart på grund av den låga kolhalten [14]. Specifikt antas tryckkärlsstålet vara av typen P235GH [15] och P265GH [16] då detta är vanligt förekommande. Stålet certifieras enligt EN10204 3.1 [17].

Öppning/stängning

För att öppna och stänga kärlet fanns alternativen att ha ett gångjärn, en extern kran, skjutdörrslösning och manuell avhängning. Gångjärn ansågs som den enklaste och minst komplexa lösningen vilket ökade möjligheterna för egen tillverkning. Skjutdörrslösningen och kranen ansågs för komplexa. Den manuellt avhängda dörren var för opraktisk ur användarsynpunkt. Valet blev därför gångjärn.

Låsning

Förslagen var roterande fläns eller dörr, skruvförband samt en lösning med utskjutande kilar. Skruvförband har hög tillverkningsbarhet. Nackdelen med skruvförband är att användarvänligheten minskar. De andra lösningarna ansågs för komplicerade att tillverka, därför valdes skruvförband.

Tätning

Alternativen var metallpackning, uppblåsbar gummiring och O-ring. Utifrån studiebesök och litteraturstudier observerades att en uppblåsbar gummipackning är vanligaste lösningen, den är dock komplicerad att konstruera. Metallpackning kräver väldigt fina toleranser vilket inte kan åstadkommas med intern tillverkning. Det valdes därför en O-ring som tätning för att hålla nere komplexiteten. Spåret för O-ringen dimensioneras efter standarden SS1588 [18].

Värmesystem

Alternativen för värmesystemet var rörelement, värmeslingor och vattenburen uppvärmning. Rörelement förekommer med många olika effekter och kan placeras platseffektivt inuti autoklaven. Nackdelen är att yttemperaturen på röret blir väldigt hög, vilket skulle kunna påverka homogeniteten på luften. Värmekablar har fördelen att de är lätta att forma och placera runt om i kärlet vilket skulle göra det enklare att få en homogen temperatur. Däremot var det svårt att hitta värmekablar med tillräckligt hög effekt. Vattenburet system innebar endast nackdelar. Den användbara volymen i autoklaven minskar, det blir mycket upptagen yta utanför samt att det krävs många komponenter vilket ökar komplexiteten. För uppvärmning var lösningar med rörelement att föredra, därför valdes en lösning med rörelement.

Kylsystem

Alternativen för nedkylning av kärlet var vattenburen nedkylning, luftgenomströmning samt passiv kylning. Det vattenburna systemet delar samma nackdelar som vattenburen uppvärmning. En genomföring för att växla den varma luften till rumstempererad luft är bra då detta medför en jämn nedkylning, dock tillkommer en extra genomföring vilket är en nackdel. Ett aktivt kylsystem uteslöts helt, ingen kylning valdes. Öppning av kärlet efter trycksänkning anses vara tillräckligt, även här för att spara användbar volym och minska komplexiteten.

Reglersystem

För reglersystemet var alternativen en mikrokontroller eller en programmable logic controller (PLC). En mikrokontroller är billigare men kräver mer kringliggande elektronik vilket ökar komplexiteten. De används mycket i prototyputveckling och populariteten är stor vilket gör det enkelt att hitta exempelkod och beskrivningar. PLC används inom industrin och är därför tålig samt enkel att konfigurera. Som reglersystem valdes en mikrokontroller då den huvudsakliga skillnaden mellan denna och en PLC var kostnaden. En PLC är cirka tio gånger dyrare än en mikrokontroller vilket inte gick att rättfärdiga.

Luftcirkulation

Alternativen stod mellan en fläkt eller naturlig konvektion. Genom att ha tillförd luftcirkulation skulle homogeniteten av värmen i kärlet öka. En fläkt i ena änden skulle varit ett bra sätt att lösa detta, vilket är förekommande i redan befintliga autoklaver. Nackdelarna med detta är att komplexiteten ökar och den användbara volymen i kärlet minskar. Det som ansågs mest lämpligt i detta fall var därför att placera värmesystemet på ett sådant sätt att homogeniteten av värmen uppstår genom konvektion, därav valdes ingen fläkt.

3.7 Val av sekundära delsystem

På samma sätt som för de primära delsystemen genomfördes även analys av de sekundära delsystemen.

Isolering

Isolering på insidan och utsidan jämfördes mot varandra. Fördelar med att montera isoleringen på utsidan av tryckkärlet var att det inte tar plats från den användbara volymen av kärlet. Nackdelen är att tryckkärlet måste värmas upp samt kylas ner vilket kräver mer effekt då stål kan lagra en stor mängd energi. Dessutom blir det svårt att se sprickbildning på tryckkärlet. Med isolering på insidan värms inte kärlet upp lika mycket. Kontrollerbarheten av temperaturen blir snabbare då inte lika mycket massa måste värmas upp, dock blir det mindre användbar volym. Att montera isoleringen på insidan är också den vanligaste lösningen ute i industrin. Med detta som grund togs beslutet att isoleringen ska sitta på insidan. För att montera isoleringen på insidan behövs något för att hålla den på plats. Genom att använda sig av en blank plåt blir ytan reflekterande vilket ger en mer homogen temperatur. Stålblåt jämfördes mot aluminiumplåt då tillgången på dessa är hög. Med motiveringen att stålblåten är lättare att svetsa och leder värme sämre valdes denna. Två olika sorters isolering jämfördes, stenull och glasull. Stenull har fördelen att det är mer värmefåligt samt att det är lättare att hantera. Glasull har jämförbara isolerande egenskaper som stenull men har nackdelen att temperaturtåligheten är lägre. Baserat på detta så valdes stenull.

Mikrokontroller

Valet av mikrokontroller stod mellan två av de vanligaste modellerna på marknaden, Raspberry Pi+ och Arduino. Raspberry Pi+ benämns ofta mikrodator då den är kraftfull nog att driva ett operativsystem, dock saknar de analoga ingångar. En Arduino är en enklare krets med ett brett spann av ingångstyper. Valet blev slutligen en Raspberry Pi+ då ett operativsystem tillåter användning av utvecklingsmiljön Codesys som ansågs passande för detta reglerproblem. Tidigare kunskap om Codesys och Raspberry Pi+ finns även att tillgå i gruppen.

Ram

Det bestämdes att en ram skulle konstrueras för att hålla autoklaven i bra arbetshöjd samt underlätta förflyttning av autoklaven. Konstruktionen gjordes enkel och det bestämdes därför att en modell baserad på tillgängligt material från prototypverkstaden räckte som belägg för valet. Ramen som designades visas i figur 4.8c.

Säkerhetssystem

En knapp för nödstopp valdes att implementeras för att bryta huvudströmmen till maskinen vid behov. En driftsindikator i form av en lampa ansågs även lämplig för att indikera att kärlet är trycksatt. Vid oväntat övertryck finns en mekanisk pysventil som hanterar detta. Alternativet hade varit ett sprängbleck men skulle innebära för höga kostnader.

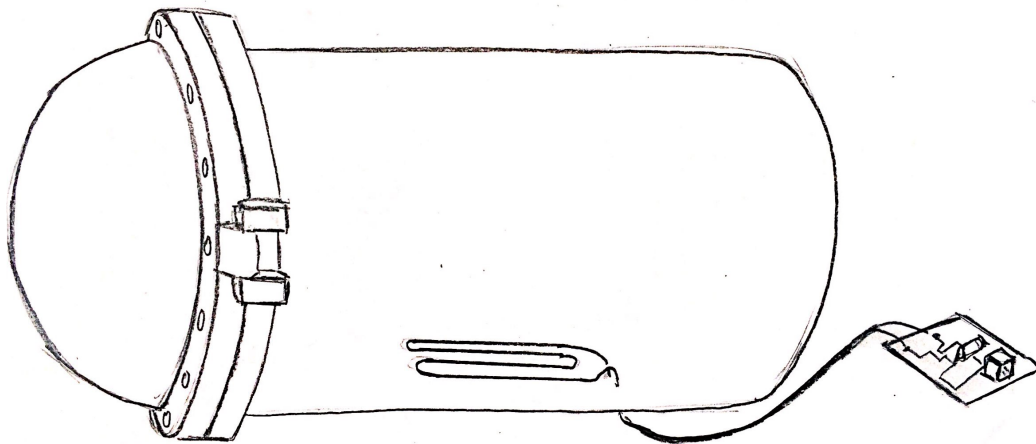
Genomföringar

Det finns ett flertal saker som måste ha genomföringar från utsidan av kärlet till insidan. För att få en mer hållfast konstruktion och undvika små hål direkt i kärlet samlades alla genomföringar i en skorsten. Skorstenen placerades på undersidan av kärlet för att undvika komplicerad design av värmeelement. Genomföringarna i skorstenen är två för värmeele-

mentet, en för vakuum, en för sensorkablar samt en för trycksättning. Genomföringen för trycksättning avser tryck in, tryck ut, trycksensor samt en övertrycksventil. Dessa fyra kommer förgrenas utanför vilket medför att dessa endast behöver en genomföring i skorstenen. Placeringen av trycksensorn kan därför flyttas längre ifrån den höga temperaturen vilket minskar kravet på komponenten, vilket gör den betydligt billigare. Totalt blir det fem stycken genomföringar i skorstenen, en illustration av detta visas i figur 4.13.

3.8 Presentation av slutgiltigt koncept

I tabell 3.3 presenteras det slutgiltiga konceptvalet. Tabellen innehåller lösningarna för de primära och sekundära delsystemen. I figur 3.5 illustreras även en handmålad skiss av det slutgiltiga konceptvalet.



Figur 3.5: Slutgiltigt koncept för de primära delsystemen. De primära delsystemen är tryckkärl, dörr, värmesystem, kylsystem, reglersystem och luftcirkulation.

Primära delsystem	Slutkoncept
Tryckkärl	Cirkulär cylinder
Dörr: Öppning/stängning	Gångjärn
Dörr: Låsning	Skruvförband
Dörr: Tätning	O-ring
Värmesystem	Rörellement
Kylsystem	Passiv kyld
Reglersystem	Mikrokontroller
Luftcirkulation	Ingen luftcirkulation
Sekundära delsystem	
Isolering: Typ	Stenull
Isolering: Montering	Internt m.h.a. blank plåt
Mikrokontroller	Raspberry Pi
Ram	Enkel stålkonstruktion
Säkerhetssystem	Nödstopp och driftsindikator
Genomföringar: Metod	Genom skorsten
Genomföringar: Antal	Fem stycken

Tabell 3.3: Val av delsystem i slutgiltigt koncept.

4

Detaljkonstruktion

I detta kapitel dimensioneras det slutgiltiga konceptvalet och alla dess ingående delsystem. Resultaten från detaljkonstruktionen ger underlag till inköp av material samt tillverkningen.

4.1 Metod

Här presenteras de metoder som användes för dimensionering av vitala komponenter i autoklaven. Metoden kommer innehålla beräkningar på bland annat isolering och uppvärmningssystemet. Metoden för de modelleringar och simuleringar som gjordes av designen, hållfasthet och reglersystemet presenteras.

4.1.1 Computer-aided design (CAD)

En design av autoklaven skapades i CAD-programmet CATIA v5 [19]. Modellen används sedan som underlag för beräkningar i finita elementprogrammet ANSYS 18.2 [20]. Ytterligare användningsområden var att generera konstruktionsunderlag, verifiera att alla individuella komponenter passar ihop innan tillverkning samt att säkerställa funktionen hos de rörliga komponenterna.

4.1.2 Tryckkärl

Genom att göra en spänningsanalys kunde hållfasthetsberäkningar med avseende på plastisering och utmattning göras. Detta för att få en insikt i hur godstjockleken, diametern och spänningen beror av varandra. Tryckkärlet kan anses som tunnväggigt. Ring σ_φ -, axiell σ_z - och radialspeänningen σ_r kan då beräknas med ångpanneformlerna enligt

$$\sigma_\varphi = \frac{pr}{x} \quad (4.1)$$

$$\sigma_z = \frac{pr}{2x} \quad (4.2)$$

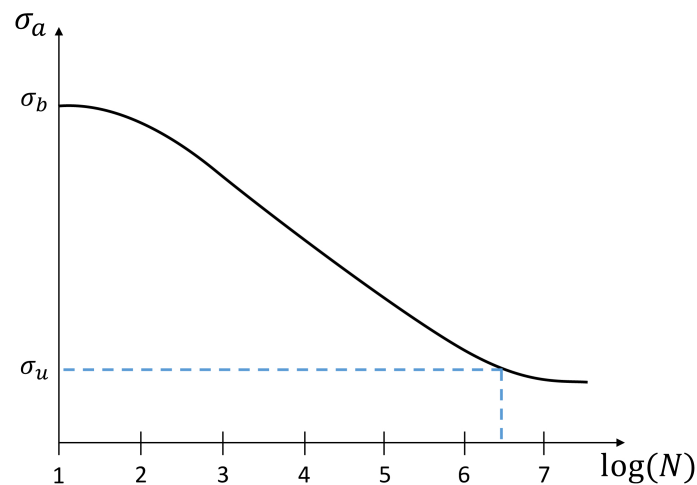
$$\sigma_r \approx 0 \text{ ty tunnväggigt tryckkärl} \quad (4.3)$$

där x är materialets godstjocklek, p är trycket och r är kärlets medelradie. Ångpanneformlerna användes på både cylindern och på det tillhörande gavlarna som approximeras halvsfäriska. För att dessa skall vara applicerbara krävs det att gavlarna är halvsfäriska därför genomfördes överslagsberäkningarna med detta antagande. Autoklavens arbetstryck kan uppgå till max 0,7 MPa på grund av den tillgängliga kompressorn. För dimensionering används en säkerhetsfaktor på 1,5 gånger arbetstrycket. Det finns en långsgående svets på

kärlet och för att ta hänsyn till de spänningskoncentrationer som uppstår multipliceras säkerhetsfaktorn med faktorn 1,15 vilket ger dimensioneringstrycket 1,21 MPa.

Efter överslagsberäkningarna användes en CAD-modell av tryckkärlet för att kunna göra mer exakta analyser med hjälp av finita elementprogrammet ANSYS. I samtliga ANSYS-simuleringar nyttjades lämpliga symmetrivillkor av kärlet för att minimera beräkningstiden. På grund av symmetri användes villkoret att förskjutningen normalt mot snittytan ska vara noll. Modellen fixerades i en punkt utan inverkan på resultaten, detta för att den skall vara låst i rummet och förhindra stelkroppsdeformation.

Det gjordes beräkningar på utmattning av kärlet. Syftet med dessa beräkningar var att få reda på livslängden, det vill säga hur många lastcykler klarar autoklaven innan tryckkärlet går sönder. Livslängden bestämdes på två olika ställen, på hela kärlet och i den svets där spänningen var som störst. Wöhlerkurvan, även kallat S-N diagram, visar förhållandet mellan amplitudspänning σ_a vid brott och antal lastcykler till brott N , se figur 4.1. Wöhlerkurvan är framtagen under ideala förhållanden i labbmiljö och för rent pulserande last vilket stämmer överens med lastfallet. Därför behöver utmattningsdata reduceras med avseende på geometri och ytans beskaffenhet. Utmattningsgränsen reduceras genom att multiplicera amplitudspänningen med reduktionsfaktorerna m_l , m_d och m_s som utförs i resultatkapitlet.



Figur 4.1: Principiell Wöhlerkurva. Kurvan visar antal lastcykler till brott. σ_b är brottsgränsen vid statisk belastning och σ_u är utmattningsgränsen. För metall antas oändlig livslängd över 10^6 lastcykler.

En annan kritisk del av konstruktionen är de svetsade delarna och främst utmattningen i dessa. För att beräkna utmattningen i den svets där spänningen är som störst genomfördes en hotspotanalys [21]. Genom att ta ut spänningarna i ANSYS på avstånd $0,4x$ och x från svetsens tå, där x är vägg tjockleken, kan spänningen i svetsen extrapoleras fram enligt

$$\sigma_{hs} = 1,67\sigma_{0,4x} - 0,67\sigma_x \quad (4.4)$$

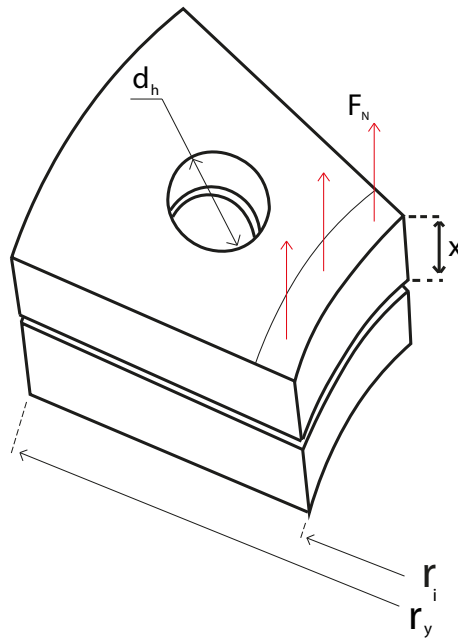
när spänningen i svetsen, σ_{hs} , är känd bestäms FAT-klassen. Den anger vilken maximal spänning som får uppstå i svetsen för att den ska klara 10^6 cykler, vilket för stål innebär

oändlig livslängd. Den varierar beroende på konstruktionens geometri och finns angivna i tabeller [21]. För att förenkla beräkningar anses svetsen vara homogen med övriga kärlet. Med antagandet att konstruktion ej medför några inbyggda spänningar och ett rent pulserande lastfall medför att ingen spänning uppstår i svetsen när kärlet ej är trycksatt. Detta ger att det konstanta spänningsamplitudsområdet $\Delta\sigma_{S,d} = \sigma_{hs}$. Antalet lastcykler till brott för svetsen kan sedan beräknas enligt

$$N_{\text{calc}} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\Delta\sigma_{R,d}}{\Delta\sigma_{S,d}} \right)^b \quad \begin{cases} \Delta\sigma_{R,d} = \text{FAT-klassen} \\ \Delta\sigma_{S,d} = \sigma_{hs} \\ b = \text{Lutningen på S-N kurvan under } 10^6 \text{ cykler} \end{cases} \quad (4.5)$$

4.1.3 Flänsar

För att dimensionera flänsarnas tjocklek och utformning behöver först skruvförbandet beräknas. Detta är på grund av att förspänningen i skruvarna både beror på antalet skruvar och flänsarnas tjocklek. Processen för att dimensionera skruvförbandet är iterativ och börjar med att välja antal skruvar samt dimensionen på skruvarna och flänsarna. Kraften på skruvförbandet beräknas genom att den projicerade arean av luckan multipliceras med övertrycket. Då symmetri råder kan flänsarna delas upp i lika många segment som det finns skruvar, illustration av ett sådant segment visas i figur 4.2. Kraften kan sedan fördelas jämnt på dessa. Under uträkningarna så användes ett högre tryck än dimensioneringsstrycket då skruvförbandet hanteras av operatören och på så sätt slits mer än övriga system.



Figur 4.2: Illustration av ett segment för flänsförbandet.

I beräkningarna som följer behöver styvheterorna för systemet beräknas, en för de delarna som pressas ihop och en för de som dras ut. De delar som pressas ihop kallas beräkningsmässigt underlag C_k och de delar som dras ut kallas beräkningsmässig skruv C_s , dessa beräknas enligt

$$C_s = \frac{E_s A_{\text{skruv}}}{2x} \quad C_k = \frac{E_s A_{\text{fläns}}}{2x} \quad (4.6)$$

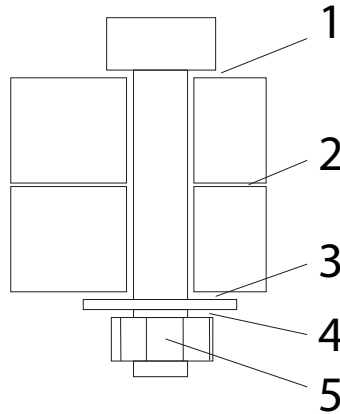
där E_s är elasticitetsmodulen för stål, A är arean och x är tjockleken av en fläns. I nästa steg beräknas förspänningen av skruven med villkoret att det inte ska skapas glapp vid provtryck. Utgångspunkt blir ekvationen för kontaktkraften mellan flänsarna

$$F_k = F_0 - \frac{C_k}{C_s + C_k} F_N \quad (4.7)$$

här representerar F_0 förspänningskraften, F_N kraften som skapas av trycket och C_k, C_s styvheterna. För att beräkna minsta förspänningskraft som behövs för att undvika glapp sätts klämkraften F_k till noll enligt

$$F_0 = \frac{C_k}{C_s + C_k} F_N \quad (4.8)$$

vid åtdragning av skruvarna kommer sättning att uppstå i de spänningsupptagande ytorna. Eftersom ytorna har olika finhet sker plastiskt deformation vilket leder till minskad förspänning och att glapp kan uppstå. För att kompensera detta identifieras först de olika kontaktparen där sättning uppstår, dessa visas i figur 4.3.



Figur 4.3: Illustration av kontaktytorna där sättning sker.

De ytor där sättning sker är maskinbearbetade, ytfinheten på dessa är ett tabellerat R_a -värde [22]. Med ett R_a -värde kan profildjupet beräknas som behövs för att lösa ut sättningen δ_{pl} för varje enskilt kontaktpar [23]. Profildjupet beräknas enligt

$$H \approx 4R_a \quad (4.9)$$

genom att summera sättningen för varje kontaktpar, $\delta_{pl,m}$ och $\delta_{pl,k}$, kan den totala sättningen $\delta_{pl,tot}$ beräknas. På grund av sättning behöver förspänningskraften kompenseras genom ekvation

$$\Delta F_0 = \frac{C_s C_k}{C_s + C_k} \delta_{pl,tot} \quad (4.10)$$

den totala förspänningskraften blir då

$$F_{0,\text{tot}} = F_0 + \Delta F_0 \quad (4.11)$$

med den totala förspänningen kan sedan åtdragningsmomentet beräknas. Hänsyn behöver tas till friktionen i de olika kontaktparen. Ett intervall används på friktionen för obehandlade och osmorda ytor i gängan och i de övriga kontaktparen [23]. En övre gräns beräknas då friktionen är som störst enligt ekvation

$$M_{\text{ät}} = F_{0,\text{tot}}(0.16S + 0.59d_2\mu_{\text{max}} + \mu_{\text{b,max}}r_{\text{m}}) \quad (4.12)$$

i denna ekvation representerar S delningen på skruven, μ_{max} den största friktion mellan muttern och hårdad bricka, d_2 är skruvskallens medeldiameter och $\mu_{\text{b,max}}$ största friktion i gängan. Mutterbasensmedelradie r_{m} beräknas enligt

$$r_{\text{m}} = \frac{d_{\text{w}} + d_{\text{h}}}{4} \quad (4.13)$$

här representerar d_{w} ytterdiametern på skruvskallen och d_{h} diametern på hålet. Om detta åtdragningsmoment används i ett fall där friktionen är den lägsta i intervallet blir förspänningen högre och kan överstiga skruvens sträckgräns. Därför löses $F_{0,\text{tot}}$ ut ur tidigare ekvation (4.12) och friktionskoefficienterna byts ut från de högsta till de lägsta enligt ekvation

$$F_{0,\text{tot}} = \frac{M_{\text{ät}}}{0.16S + 0.59\mu_{\text{min}}d_2 + \mu_{\text{b,min}}r_{\text{m}}} \quad (4.14)$$

den spänningsupptagande arean beräknas enligt

$$A_{\text{sp}} = \frac{1}{16}(d_1 + d_2)^2 \quad (4.15)$$

där d_1 är skruvens innerdiameter. Den största och minsta spänningen som uppstår beräknas enligt

$$\sigma_{\text{sk,min}} = \frac{F_{0,\text{tot}}}{A_{\text{sp}}} \quad (4.16)$$

$$\sigma_{\text{sk,max}} = \frac{F_{0,\text{tot}} + \left(\frac{C_{\text{s}}}{C_{\text{s}} + C_{\text{k}}} F_{\text{N}}\right)}{A_{\text{sp}}} \quad (4.17)$$

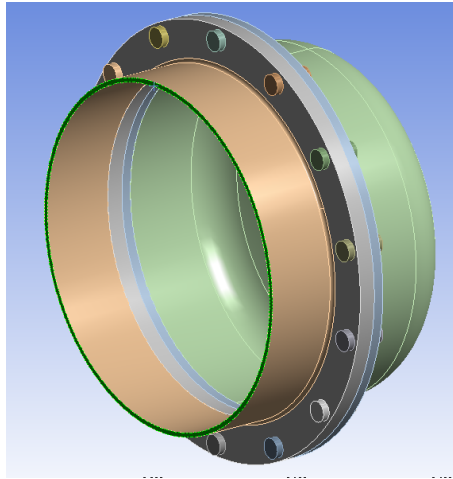
vid arbetstryck behöver skruvarna dimensioneras mot utmattning. Spänningsamplituden kontrolleras mot ett givet intervall enligt

$$\sigma_{\text{a}} = \frac{\sigma_{\text{sk,max}} - \sigma_{\text{sk,min}}}{2} \quad (4.18)$$

för att försäkra sig om att skruven hamnar inom tillåtna spännings- och amplitudintervall kontrolleras detta med hjälp av tabell [23].

Efter dimensioneringen av skruvförbadet kunde beräkningar på flänsarna genomföras. Det analyserades vilka spänningar som uppstod och hur stor deformationen blev. Även dessa beräkningar genomfördes i ANSYS. För att minimera beräkningstiden analyserades endast flänsarna och dörren, modellen snittades därför enligt figur 4.4. Här infördes randvillkoret att förskjutningen normalt mot snittytan ska vara lika med noll samt att en oberoende punkt för beräkningarna fixerades i de övriga riktningarna för att förhindra stelkropp deformation. Genom att ändra kontaktytan mellan fläns och skruv till friktionell istället

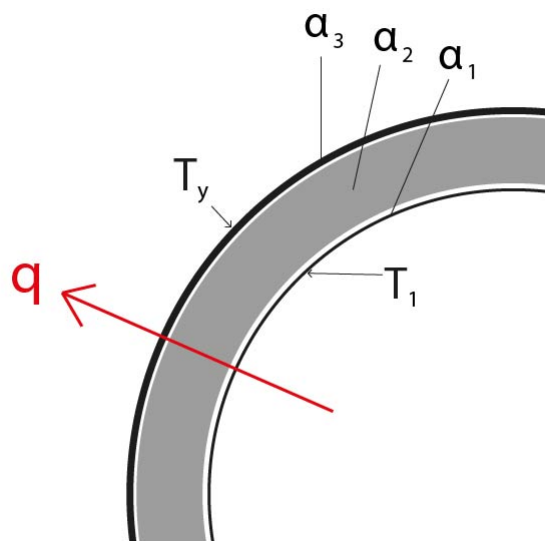
för bunden kunde deformationen på flänsarna analyseras kring skruvhuvudet då de inte ansågs som stumma.



Figur 4.4: ANSYS-modell för analys av dörr och flänsar.

4.1.4 Isolering

För att dimensionera isoleringen användes grundläggande ekvationer för värmeöverföring [24]. De olika geometrierna på autoklaven medförde att både cylindriska och sfäriska tillägg gjordes för att få realistiska resultat. Värmen som rör sig genom tryckkärlet möter motstånd i varje skikt bestående av en skyddsplåt α_1 , isolering α_2 och tryckkärlet α_3 , se figur 4.5.



Figur 4.5: Illustration av de olika skikten. α är det termiska motståndet varje skikt utgör.

Motståndet för ett enskilt skikt i den cylindriska delen beräknas enligt

$$\alpha_{c,s} = \frac{\log\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2\pi k L} \quad (4.19)$$

där r_1 representerar radien på insidan av skiktet, r_2 är radien på utsidan av skiktet, k är materialets värmeledningsförmåga och L är längden på cylindern. Motståndet som konvektionen från kärlets yta utgör ($\alpha_{c,y}$) beräknas enligt

$$\alpha_{c,y} = \frac{1}{h_{yta} 2\pi r L} \quad (4.20)$$

där h_{yta} är konvektionen på utsidan av kärlet. Det totala motståndet för den cylindriska delen α_c summeras som en seriekoppling enligt

$$\alpha_c = \sum \alpha_{c,s} + \sum \alpha_{c,y} \quad (4.21)$$

där $\alpha_{c,s}$ är motståndet för det cylindriska skiktet och $\alpha_{c,y}$ är motståndet för ytan på cylindern. Gavlarna betraktas som halvsfäriska och tillsammans bildar de en helsfär, motståndet i varje enskilt skikt ($\alpha_{s,s}$) beräknas enligt

$$\alpha_{s,s} = \frac{1}{4\pi k} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (4.22)$$

motståndet på sfärens yta ($\alpha_{s,y}$) approximerades med hjälp av ekvation (4.20) där längden (L) ersätts med diametern på sfären. Summan av motstånden i sfären (α_s) beräknas enligt

$$\alpha_s = \sum \alpha_{s,s} + \sum \alpha_{s,y} \quad (4.23)$$

det totala motståndet för värmen (α_{tot}) beräknas genom att motståndet för cylindern α_c och sfären α_s summeras som en parallellkoppling enligt

$$\alpha_{tot} = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_c} + \frac{1}{\alpha_s}} \quad (4.24)$$

med hjälp av det totala motståndet α_{tot} och temperaturskillnaden ΔT beräknas energiflödet q ut enligt

$$q = \frac{\Delta T}{\alpha_{tot}} \quad (4.25)$$

temperaturen på ytan (T_y) av autoklaven ges av

$$T_y = T_1 - q\alpha_{tot} \quad (4.26)$$

där T_1 är innertemperaturen.

4.1.5 Reglersystem

Reglersystemet behöver samla in data om styrparametrar, processera datan samt göra relevanta förändringar av styrparametrarna baserat på denna data. Systemet kan delas in i sensorer, signalprocessering, styrenhet samt styrdon. De parametrar som autoklaven har är tryck, temperatur och vakuum. Tryck och temperatur är beroende av varandra vilket kan beskrivas med den allmänna gaslagen enligt

$$pV = nRT \quad (4.27)$$

där p är tryck, V är volym, M är molmassa, R är gaskonstanten och T är temperatur. Det färdiga systemet illustreras i figur 4.7.

Under en typisk härdningscykel, se figur 2.1, förändras bara trycket vid start och avslut. Detta innebär att trycket inte behöver styras kontinuerligt utöver hantering av övertryck som följd av temperaturökningen. Vakuum kan ses som ett separat system då det är isolerat från de två andra parametrarna.

Systemets sensorer behöver klara av att mäta i de specificerade intervall autoklaven skall arbeta i. Sensorerna måste även klarar den miljö de utsätts för. Mätsignalen kan även vara av digital eller analog typ samt linjär eller olinjär. Analoga och/eller olinjära sensorer behöver signalbehandlas innan värdena kan användas i reglersyfte.

Styrdon är komponenter som kan påverkas av styrenheten och som i sin tur kan förändra önskade parametrar som tryck, temperatur och vakuum. Avvägningen som behöver göras här är om styrningen måste ske via styrenheten eller om en manuell lösning kan implementeras.

En modell skapades i systemdesignsprogrammet Simulink för att få en överblick av regler-systemet samt skapa en uppfattning av effektbehov. Det övergripande systemet illustreras i figur 4.6. Modellen baseras på temperaturförändringen

$$\frac{dT}{dt} = \frac{q_{in} - q_{ut}}{mc_{p,luft}} \quad (4.28)$$

q_{in} är effekten från värmeelementet, q_{ut} är värmeförlust från (4.25), m är luftmassan och $c_{p,luft}$ är värmekapaciteten för luft.

För att trycket skall hållas konstant när temperaturen ökar i kärlet behöver luftmassan minska. I simuleringen beräknas den aktiva luftmassan med den allmänna gaslagen omskriven för massa

$$m = \frac{pVM}{RT} \quad (4.29)$$

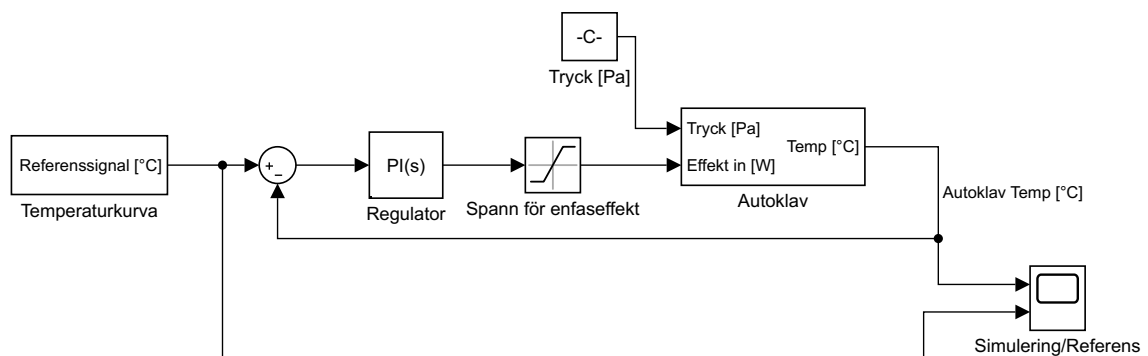
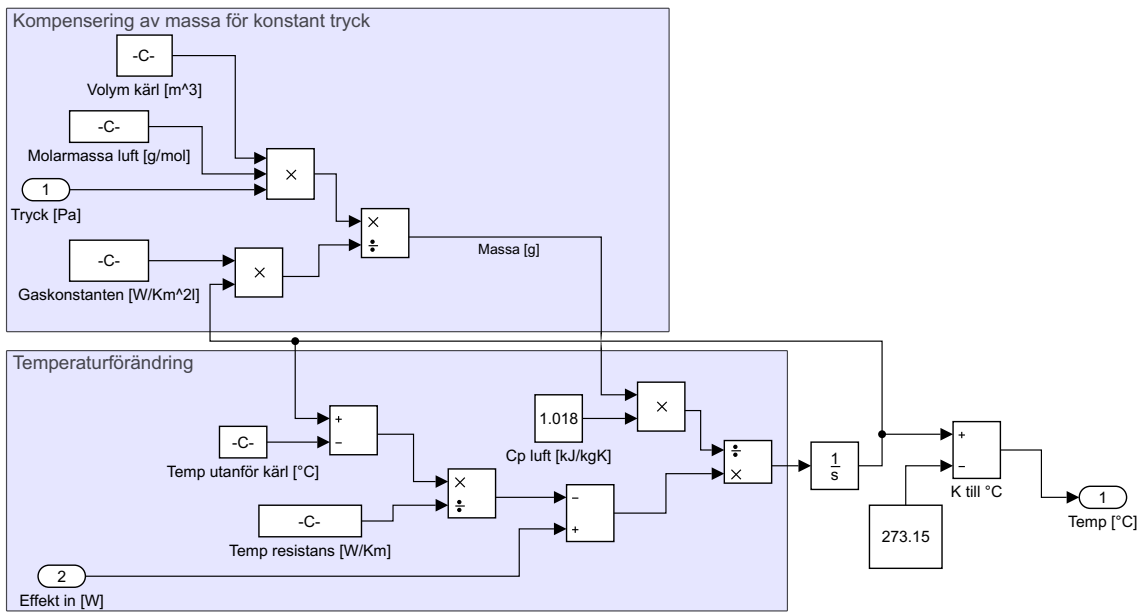


Figure 4.6: Simulinkmodell av reglerloop.



Figur 4.7: Simulinkmodell av autoklaven.

4.1.6 Uppvärmningssystem

Rörellementet dimensioneras med avseende på både effekt och form. Huvudsakligen baseras beräkningarna på resultaten från isoleringberäkningarna och rampningskraven angivna i kravspecifikationen. Den maximala effekten P som kan tas från eluttaget beräknas enligt

$$P = UI \cos(\varphi) \quad (4.30)$$

där U är spänningen, I är strömmen och φ är fasförskjutningen. Den reaktiva effekten i värmeelementet är försumbar, vilket medför att φ blir noll [25]. Energibehovet Q för att värma upp komponentens aluminiumform beräknas med massan m , värmekapaciteten $c_{p,alu}$ och temperaturskillnaden. Från det kan det aktiva effektbehovet P beräknas med följande ekvationer

$$Q = mc_{p,alu}(\Delta T) \quad (4.31)$$

$$P = \frac{Q}{t} \quad (4.32)$$

För att designa rörellementet kontaktades leverantören. Det finns standardlängder på zoner som inte får bockas, anslutningar samt områden som inte värms upp. Med information om standardlängderna från leverantören kunde en modell av elementet göras i CAD, anpassat till utrymmet i autoklaven.

4.2 Resultat

Nedan presenteras den slutgiltiga dimensioneringen av autoklaven. Med beräkningar och argumentation förklaras resultaten från de metoder som använts. En detaljerad komponentlista hittas i bilaga E.

4.2.1 Slutgiltlig design

De dimensioner som gruppen blev offererade var de dimensioner som modellerna baserades på. Grundläggande mått för tryckkärlet presenteras i tabell 4.1. För exakta mått och dimensioner se ritningar i bilaga C. Samtliga ingående komponenter redovisas i komponentlistan, se bilaga E.

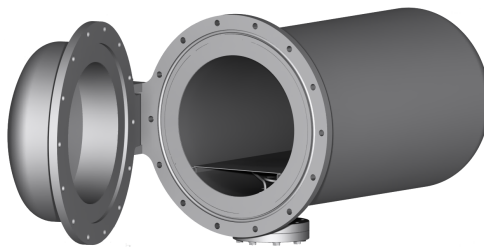
Del	Mått	Enhet
Cylinder till tryckkärlet	$\varnothing 508 \times 750 \times 6,3$	mm
Gavlar till tryckkärlet	$\varnothing 508 \times 220 \times 6,3$	mm
Cylinder till genomföringar	$\varnothing 114 \times 40 \times 8,8$	mm
Hål i tryckkärlet för genomföringar	$\varnothing 85$	mm
Flänsar	$\varnothing 630 \times 25$	mm

Tabell 4.1: Grundläggande mått för design av tryckkärlet.

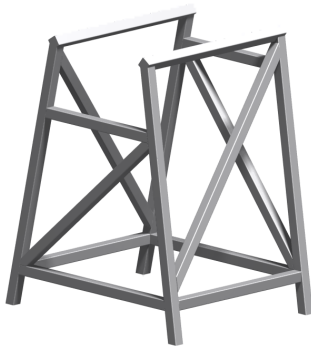
En central del av projektet har varit designen av dörren. I figur 4.8f illustreras den tänkta gångjärnslösningen. I figur 4.8a illustreras dörren i ett stängt läge för att visa hur skruvförbandet designats. Inredningen i kärlet illustreras i figur 4.8b och figur 4.8e. Slutligen illustreras designen på skorstenen i figur 4.8d och ram i figur 4.8c.



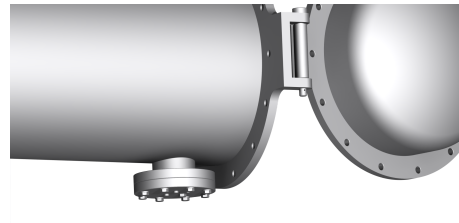
(a) Stängt tryckkärl.



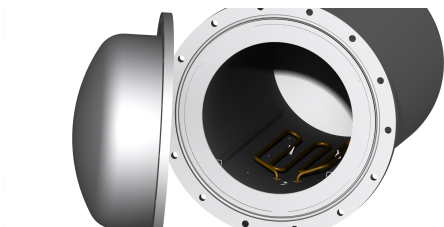
(b) Öppet tryckkärl.



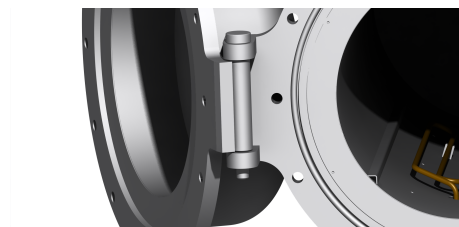
(c) Principiell skiss av ram.



(d) Skorsten.



(e) Inredning.



(f) Gångjärnslösning.

Figur 4.8: Slutgiltig design av ingående komponenter.

4.2.2 Tryckkärl

Materialdatan som användes för beräkningar av tryckkärlet, gavlarna och flänsarna redovisas i tabell 4.2.

Variabel	P235GH	P265GH	Enhet
E_s	206	206	GPa
$\sigma_{s,20^\circ\text{C}}$	215	265	MPa
$\sigma_{s,150^\circ\text{C}}$	191	229	MPa
σ_b	360	410	MPa

Tabell 4.2: Materialdata för tryckkärlsstål. E_s är elasticitetsmodulen, $\sigma_{s,20^\circ\text{C}}$ är sträckgränsen vid 20 °C, $\sigma_{s,150^\circ\text{C}}$ är den reducerade sträckgränsen vid 150 °C och σ_b är brottsgränsen.

Den största spänningen som uppstod var ringspänningen σ_φ på kärlet och den uppgick till 56 MPa. Med spänningskoncentrationerna kring hållanden vid skorstenen uppgick spänningarna till 140 MPa. Dessa värden ligger under sträckgränsen $\sigma_{s,150^\circ\text{C}}$ för båda materialen vilket innebär att ingen plasticering sker [26].

Samma geometri som för handberäkningarna simulerades i ANSYS. Från simuleringarna var det tydligt att spänningarna på cylindern och ute i gavlarna var under sträckgränsen. De största spänningarna var kring hållanden samt i svetsfogen för skorstenen. Dessa spänningar blev 149,5 MPa och 92,6 MPa, vilket ligger under sträckgränsen för materialen, se figur 4.9.

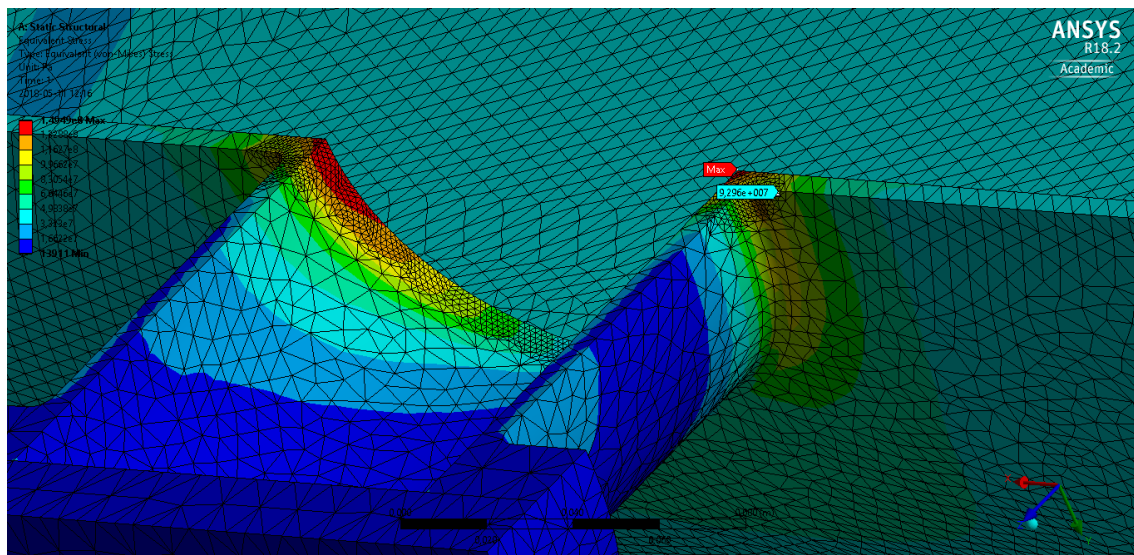
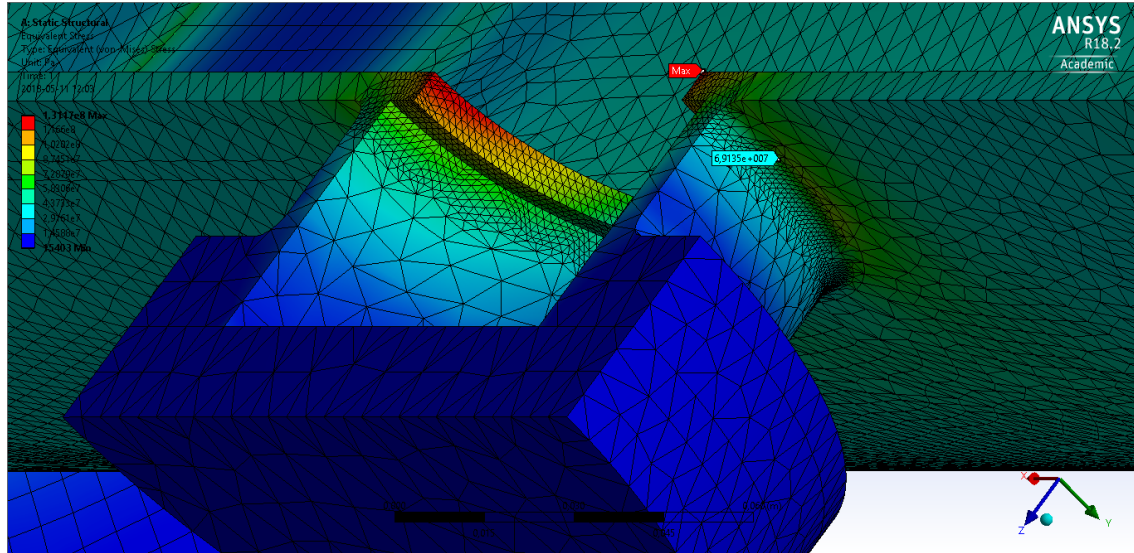


Figure 4.9: Spänningarna vid skorstenen. Det röda området illustrerar det område med högst spänningar för simuleringen. Dessa uppkommer i hållanden och är 149,5 MPa. Spänningen i svetsen visas av mätpunkten och uppgår till 92,6 MPa.

För att minska spänningarna optimerades konstruktionen. Genom att göra hålet mindre flyttas spänningskoncentrationerna från det kritiska området i svetsfogen. Spänningarna

i svetsfogen minskades från 92,6 MPa till 69,1 MPa och spänningarna kring hålranden minskades från 149,5 MPa till 131,2 MPa. Den optimerade konstruktionen visas i figur 4.10.



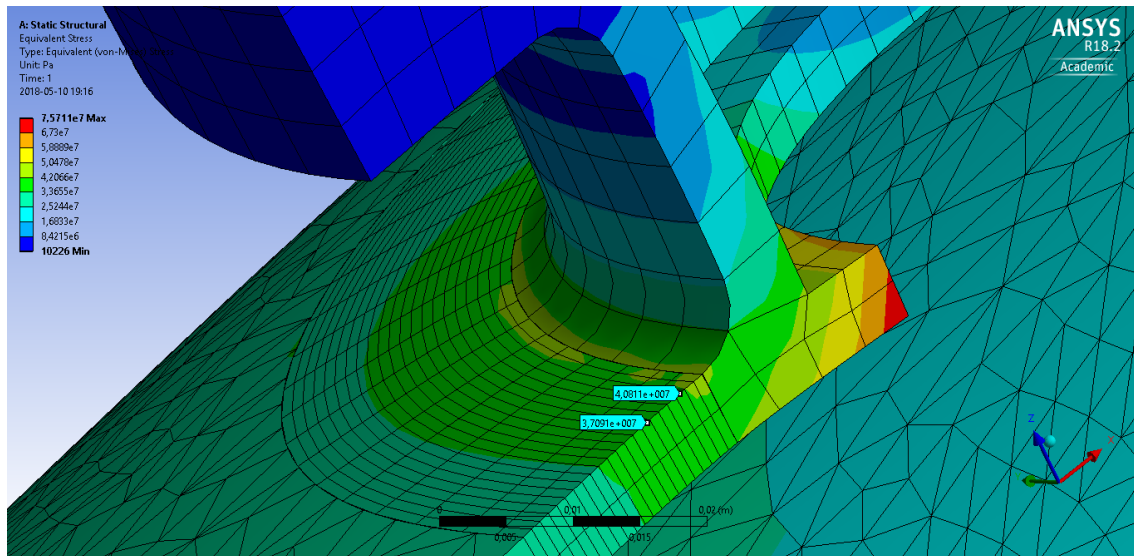
Figur 4.10: Figur över optimerad konstruktion av skorstenen. Spänningarna i hålranden uppgår till 131,2 MPa och 69,1 MPa i svetsen.

Från kravspecifikationen finns kravet på produktens livslängd som minst skall uppgå till tio år. Först beräknades livslängden för tryckkärlet. De reduktionsfaktorer som användes för att räkna ut den reducerade brottsspänningen σ_u presenteras i tabell 4.3.

Variabel	Värde
m_l	0,85
m_d	1
m_s	0,7
$FAT - Klass$	63
b	3

Tabell 4.3: Reduktionsfaktorerna som används för att reducera brottsspänningen. De beror av lastfall, spänningskoncentrationer och materialets yta.

Faktorn m_l tar hänsyn till om lasten är växlande böjning eller rent drag-tryck. Faktorn m_t används för att ta hänsyn till spänningskoncentrationer. Materialets yta påverkar också utmattningsgränsen vilken reduceras med m_s för att ta hänsyn till ytans ojämnheter[27]. Den reducerade brottsspänningen blir 107,1 MPa. Med Wöhlerkurvan, se figur 4.1, ger det ett cykelantal på $1,25 \cdot 10^6$ cykler. Med antagandet att autoklaven används två gånger per dag och fem dagar i veckan under 50 veckor per år så blir livslängden 2 500 år. Med hjälp av ANSYS tas spänningarna till hotspotanalysen ut, $\sigma_{0,4x} = 40,81$ MPa och $\sigma_x = 37,1$ MPa, se figur 4.11. Med dessa spänningar blev cykelantalet 800 000. Med samma antagande som ovan blir livslängden 1 600 år, vilket innebär att tryckkärlet klarar kravet i kravspecifikationen. Utmattning är därför inte dimensionerande.



Figur 4.11: Spänningar vid avståndet $0,4x$ och x för hotspotanalys, där x är tryckkärlets godstjocklek. Skalan visar de högsta och lägsta spänningarna som uppstår.

4.2.3 Flänsar

Första uppskattningen av antal och storlek på skruvarna som ska användas var tolv stycken M12, dessa visade sig inte fungera då spänningarna i både skruvar och flänsar blev för höga. Efter att flera olika dimensioner och antal hade testats blev resultatet att 14 stycken M16 ska användas. För att användaren inte skall behöva skruva åt ett stort antal skruvar vid öppning och stängning av kärlet valdes dimensionen att ökas. Skruvdimensionen ökades från M12 till M16 och antalet skruvar ökades med två, vilket förbättrar användarvänligheten.

De konstanter och utlästa värdena som användes i uträkningarna presenteras i tabell 4.4.

Variabel	Värde	Enhet
E_s	206	GPa
$\mu_{b,min}$	0,19	-
$\mu_{b,max}$	0,35	-
μ_{min}	0,18	-
μ_{max}	0,35	-
R_a	1,6	μm
$\delta_{pl,m}$	4	μm
$\delta_{pl,k}$	1,75	μm
δ_{pl}	11	μm
p	1,5	MPa
d_1	0,0138	m
d_2	0,0147	m
d_w	0,0225	m
d_h	0,0175	m

Tabell 4.4: Konstanter och utlästa värden för dimensionering av skruvförband.

Vid dimensioneringen av skruvförbandet användes trycket 1,5 MPa. Vid detta tryck måste förspänningen i varje skruv vara 29,2 kN för att undvika glapp mellan flänsarna. Med största möjliga friktion mellan kontaktytorna blir åtdragningsmomentet 198 Nm. Med samma åtdragningsmoment och minsta friktionen skapas den största förspänningen på 53 kN. Spänningen på skruven uppnår då 335 MPa vilket gör att en skruv av 8.8-kvalité är tillräcklig.

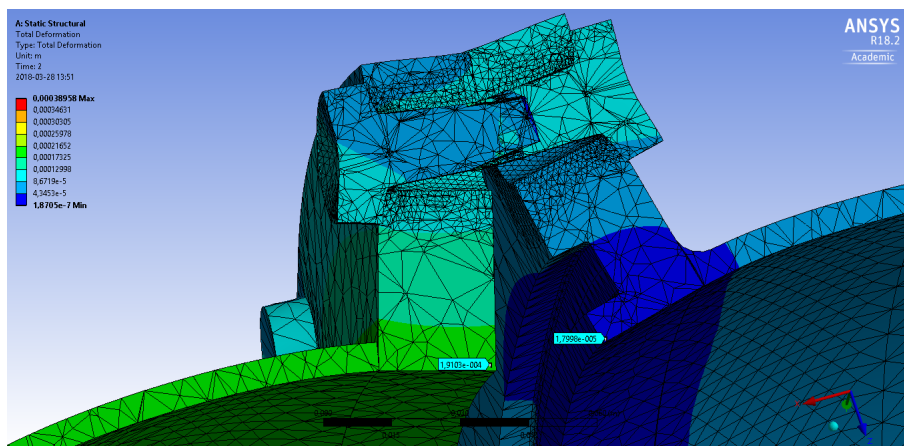
Spänningsamplituden på skruven vid arbetstryck blev 47,7 MPa, vilket ligger under det tillåtna intervallet på 60 MPa. För att undvika glapp behövs åtdragningsmomentet 125 Nm.

Skruvförbandets dimensionering redovisas i tabell 4.5.

Variabel	Värde	Enhet
<i>Skruv</i>	M16	-
<i>Antal skruvar</i>	14	st
$x_{\text{fläns}}$	25	mm
$r_{i,\text{fläns}}$	254	mm
$r_{y,\text{fläns}}$	315	mm
$d_{\text{skruvhål}}$	18	mm
$\sigma_{\text{sk,max}}$	335	MPa
$\sigma_{\text{a,skruv}}$	47,7	MPa
$M_{\text{åt,prov}}$	198	N m
$M_{\text{åt,anv}}$	125	N m

Tabell 4.5: Resultat och dimensioner på skruvförband.

Med dimensioneringen av skruvförbandet kan spänningarna och deformationen i flänsarna beräknas. Den största spänningen i flänsen uppkommer i spåret för O-ringen och blev 123 MPa. Deformationen mellan flänsarna blev 0,09 mm. Med anligg på flänsarna, en planhetstolerans på 0,1 mm och ett O-ringsutstick på 1,35 mm anses flänsförbandet tätt. Hur flänsarna deformerar sig samt vart spänningarna uppstår visas i figur 4.12.



Figur 4.12: Deformation av flänsen i 130 gånger verklig skala. Den verkliga deformationen uppgår till 0,09 mm.

4.2.4 Isolering

Vid uträkningarna gjordes två antaganden. Det första antagandet var att plåten på insidan har samma yttemperatur som luften inne i autoklaven. Det andra antagandet var att rummet är bra ventilerat och därför kan de övre värdena från konvektionens intervall användas. På detta sätt kunde isoleringen dimensioneras med en försäkran om att yttemperaturen på autoklavens utsida inte överstiger 45 °C.

Konstanterna som användes under uträkningarna samlas i tabell 4.6. Då ett exakt värde av den fria konvektionen h_{yta} är svårt att uppskatta användes ett intervall [24]. Efter att beräkningarna utförts blev resultatet att 45 mm tjock stenull ska isolera tryckkärlet. Tjockleken på isoleringen är anpassad efter standarddimensioner som leverantörerna tillhandahåller, detta för att minska kostnaden.

Variabel	Värde	Enhet
$k_{\text{stålplåt}}$	16	W/mK
k_{stenull}	0,045	W/mK
$k_{\text{tryckkärl}}$	50	W/mK
h_{yta}	2 - 25	W/m ² K
ΔT	125	°C

Tabell 4.6: Tabellerad indata för isolering.

Med ekvation (4.25) blev det beräknade energiflödet genom kärlets väggar 139 W vid minimal fri konvektion och 188 W vid maximal fri konvektion. Med ekvation (4.26) och intervallet för fri konvektion blir yttemperaturen 29 °C vid minimal konvektion och 61 °C vid maximal konvektion. Den högsta tillåtna yttemperaturen enligt kravspecifikationen är 45 °C, denna uppnås med en konvektion av 5 W/m²K. Spannet för fri konvektion ligger mellan 2 W/m²K och 25 W/m²K vilket ger en stor marginal till den övre gränsen. Det är därför rimligt att anta att yttemperaturen inte kommer överstigas. Resultaten samlas i tabell 4.7.

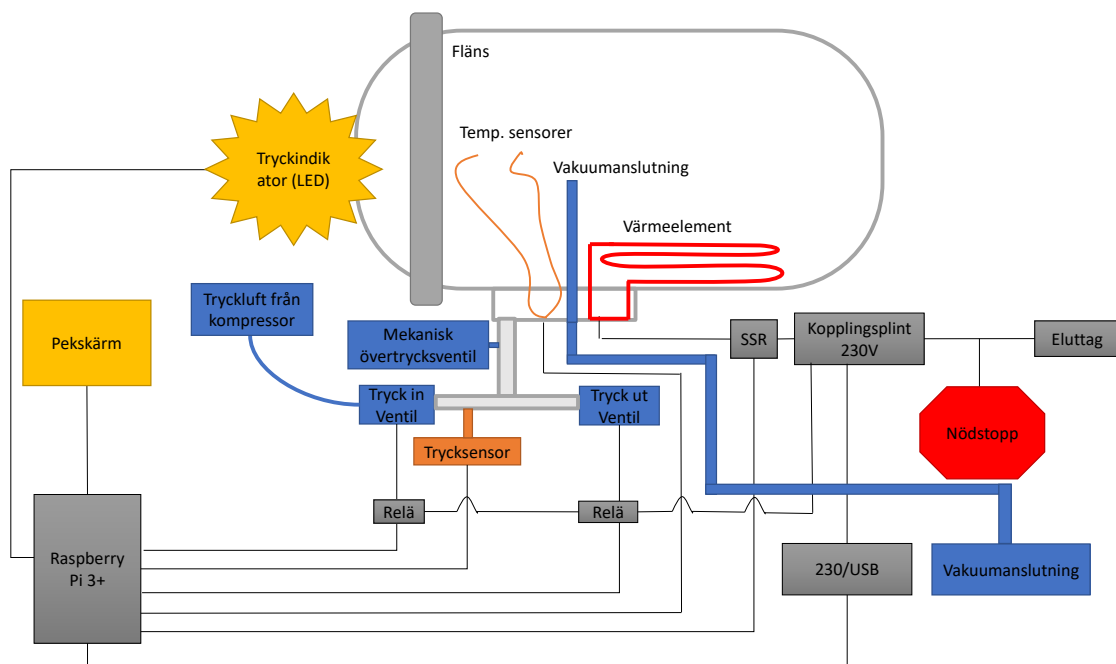
Variabel	Värde	Enhet
$q_{\min}$	139	W
$q_{\max}$	188	W
$T_{y,\min}$	29	°C
$T_{y,\max}$	61	°C

Tabell 4.7: Resultat från dimensioneringen av isolering.

4.2.5 Reglersystem

Den trycksensorn som valdes var en Honeywell PX3 sensor dimensionerad för 1 MPa vilket ger en marginal till autoklavens arbetstryck på 0,3 MPa. Signaltypen är analog vilket innebär att en analog till digital (A/D) omvandlare behövdes för att konvertera signalen. Temperaturen på komponenten och i kärlet mäts med termoelement av typ K. Till dessa används två Resistance To Digital (RTD) kretsar som både hanterar sensorernas olinjäritet

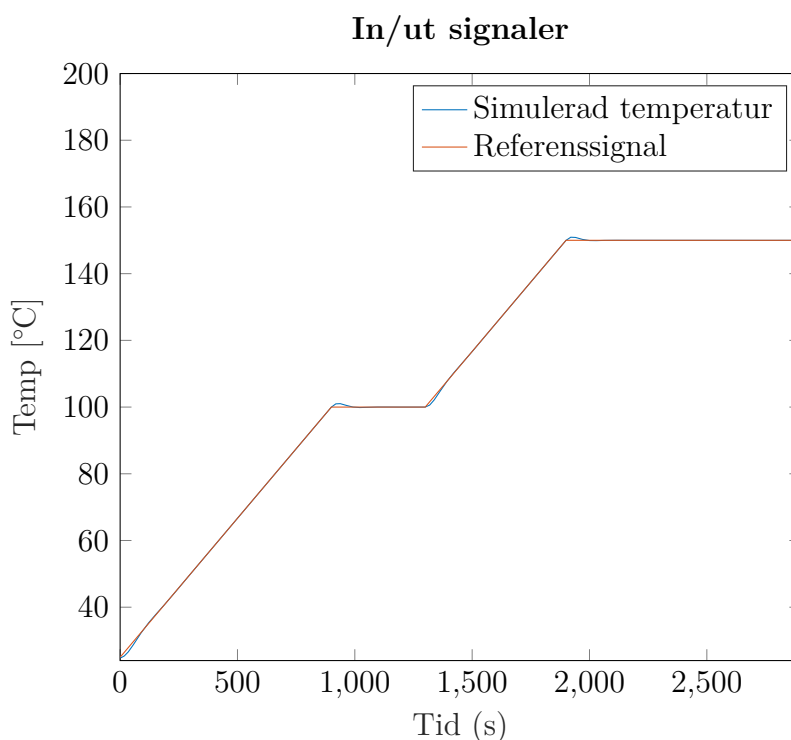
och agerar A/D omvandlare. Kombinationen var billig och gav en mätosäkerhet på $\pm 2^\circ\text{C}$. Styrenheten är en Raspberry Pi 3+ som tar in sensorvärdena genom ett Serial Peripheral Interface (SPI). En pekskärm användes för att ta input från användaren. Enheten programmeras i Codesys där även en enklare Graphical user interface (GUI) designades som visas på skärmen. Styrningen av effekt till värmeelementet sköts med ett Solid State Relay (SSR). Effekt regleras genom att variera tiden SSR:en är påslagen genom pulsbreddsmodulering (PWM). En SSR tillåter högre växlingsfrekvenser än ett mekaniskt relä vilket ger större noggrannhet. Trycket regleras med två solenoidventiler med driftspänning 230V. En ventil av typen strömlöst stängd används för kontroll av inkommande tryckluft. Av säkerhetsskäl används en strömlöst öppen ventil för tömning av kärlet för att undvika att kärlet står trycksatt vid strömavbrott. För att styra dessa ventiler används mekaniska reläer då dessa öppnas och stängs med låg frekvens. Övertryck i tanken hanteras med en mekanisk ventil kalibrerad till 0,7 MPa. Vakuüm styrs manuellt av användaren genom kompositverkstadens vakuumpump, då kostnaden och den ökade komplexiteten för digital styrning inte kunde rättfärdigas. En fullständig skiss av systemet kan ses i figur 4.13 och ett detaljerat kretsschema kan ses i bilaga D.



Figur 4.13: En övergripande illustration av systemet.

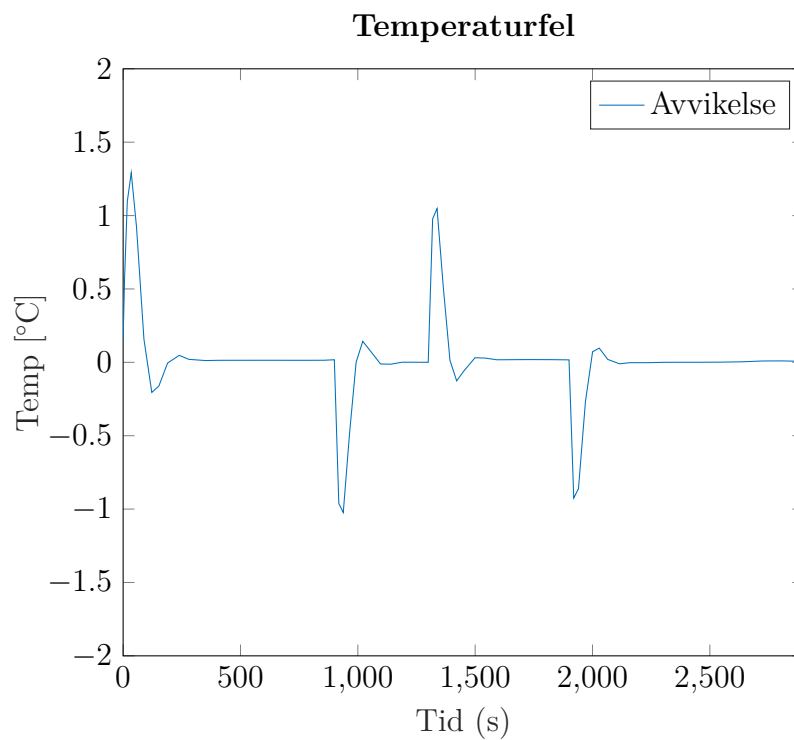
Variabel	Värde	Enhet
V	0,146	m^3
M_{luft}	28,9	g/mol
p	0,7	MPa
R	8,31	J/molK
$C_{p,\text{luft}}$	1,02	kJ/kgK
T_y	25	$^{\circ}\text{C}$
α_{tot}	0,662	K/W

Tabell 4.8: Tabellerad indata för reglersimulering.

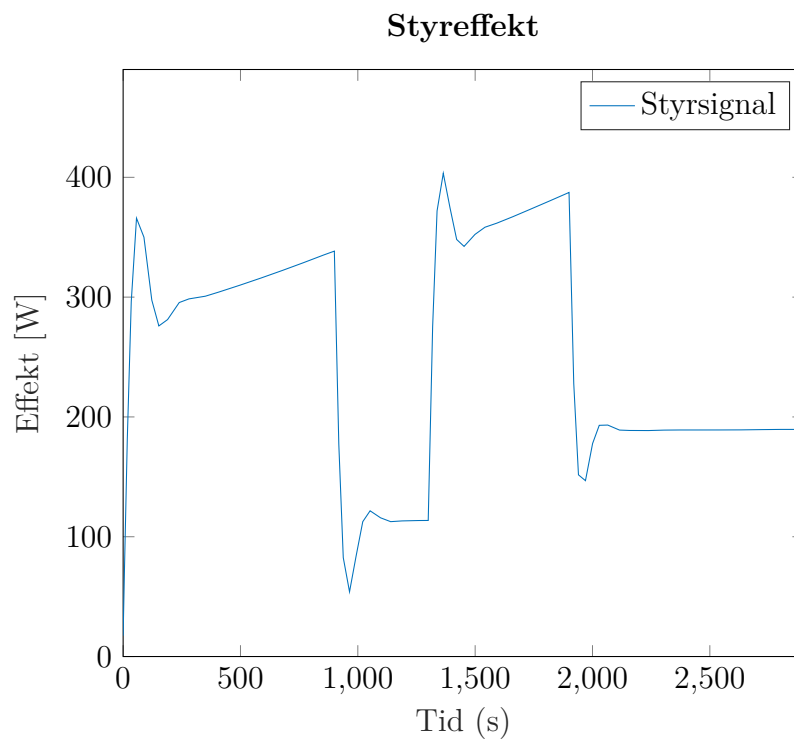


Figur 4.14: Simulerad temperatur i kärlet i förhållande till referenssignal.

De simulerade resultaten stämmer överens med beräknade värden av effektbehov under maximal konvektion från isoleringsberäkningarna i avsnitt 4.2.4. Regulatorn justerades för att följa en temperaturkurva, se figur 4.14, med en temperaturavvikelse inom $\pm 1,5^{\circ}\text{C}$ vilket visas i figur 4.15a. Temperaturrampning valdes till 5°C/min för att dimensionera mot kravspecifikationens önskemål, resulterande effektförbrukning P_{reg} ligger under $0,4\text{ kW}$ vilket illustreras i figur 4.15b.



(a) Temperaturavvikelse.



(b) Pålagd effekt från styrenheten.

Figur 4.15: Två svarskurvor från simulering i Simulink: Förhållandet mellan in- och utsignal av temperatur, avvikelsen till önskad temperatur och effekten styrenheten matar elementet med.

4.2.6 Uppvärmningssystem

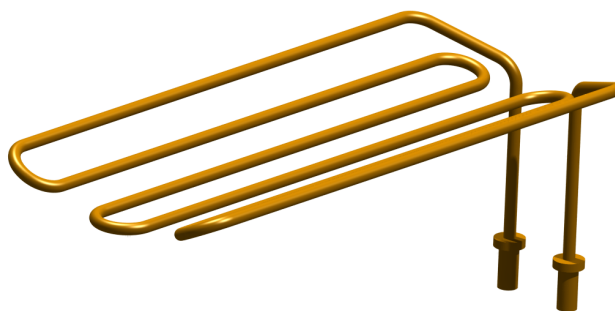
I avsnitt 4.2.5 beräknades effektförbrukningen till 0,4 kW. Effektbehovet för rampning vid 5 °C/min av en 20 kg aluminiumform är P_{alu} enligt ekvation (4.32). Summan av dessa effektbehoven blev 1,89 kW. Rörelementet dimensionerades därför för 2,3 kW, vilket är den maximala effekten ett enfassystem kan leverera. Rörelementet har möjlighet att ge mer effekt än vad systemet kräver. Då luften är stillastående bör rörelementet inte användas på maximal effekt på grund av risk för överhettning. Elementets area blir även större vilket leder till att värmen fördelas bättre och homogeniteten ökar.

Variabel	Värde	Enhet
Q	2332	kJ
m	20	kg
$c_{p,\text{alu}}$	0,897	kJ/kgK
ΔT	130	°C
t	1560	s
P_{alu}	1,49	kW
P_{tot}	1,89	kW
P_{reg}	0,4	kW
U	230	V
I	10	A

Tabell 4.9: Indata och resultat för värmemängdsberäkningar.

Q är energibehovet vid uppvärmning, m är massan på aluminiumformen, $c_{p,\text{alu}}$ är värmekapaciteten för aluminium, ΔT är temperaturskillnaden mellan rumstemperatur och högsta temperatur inne i autoklaven, t är tiden för att nå 150 °C i sekunder, P är effektbehoven för uppvärmning, U är spänningen och I är strömmen.

I figur 4.16 illustreras designen av rörelementet och i bilaga C visas ritningen för detta.



Figur 4.16: Rörelement för uppvärmning.

5

Diskussion

Syftet med projektet var att utforma, konstruera och tillverka en autoklav. Det slutgiltiga resultatet med projektet är en färdig detaljkonstruktion för att kunna bygga autoklaven. I detta ingår en produktlista på vilka komponenter som beställts, kopplingsschema för elektroniken, kompletta ritningar av kärlet och dess invända design samt en modell för programmering av reglersystemet. En färdig autoklav kostar ungefär 400 000 SEK [28] och för detta projekt var budgeten begränsad till 20 000 SEK. Budgeten blev således en av de mest centrala delarna i projektet. Genom att kontakta ett flertal leverantörer inom varje område skapades inte bara en bra bild av vad som finns på marknaden utan också vilka priser som förekommer. Detta ledde till att gruppen kunde göra strategiska val av vilka leverantörer som skulle väljas för att hålla nere priset. Den slutgiltiga kostanden för de komponenter som beställdes blev ca 30 000 SEK.

För att kunna göra tillverkningen på Chalmers behövdes också komplexiteten på produkten hållas ner, vilket var den andra centrala delen för projektet. Genom att låsa dörren med skruvförband istället för roterande flänsar kan komplexiteten minimeras och tillverkning av hela dörrsystemet kan ske internt. Även reglersystemet har optimerats för att hålla nere priset och minska komplexiteten genom att välja standardkomponenter. Utöver detta är vi nöjda med lösningen för samtliga genomföringar. Genom att placera en större skorsten runt hålet innehållande alla genomföringar skapades en mer hållfast konstruktion med möjligheten att addera fler genomföringar i framtiden.

Den största motgången i projektet var att produkten inte blev färdigbyggd. Detta påverkar i sin tur möjligheterna testa produkten. Den största förlusten med att inte hinna testa produkten är att många av kraven och önskemålen i kravspecifikationen inte kunde verifieras. Den största anledningen till att produkten inte blev färdigbyggd var att kommunikationen mellan gruppen och leverantörer tog väldigt lång tid vilket ledde till att beställningarna skedde alldeles för sent. Ytterligare faktorer som påverkade projektets framfart var valet av metod vid konceptgenerering. Gruppen valde till en början att använda sig av värdemodellen. Vilket visade sig vara ett mindre bra verktyg i detta fall, eftersom det har ett högt fokus på hela koncept och inte så specifikt på delsystemen. Att bestämma lösningar till de olika delsystemen och jämföra dem mot varandra visade sig passa bättre för framtagning av denna produkt. Utöver detta var inlärningsstiden för de mjukvaror som användes var hög och att mycket tid spenderades på att lära sig dessa. Detta utvecklade dock kompetens för samtliga gruppmedlemmar och vi fick nyttiga lärdomar. Slutligen upplevdes problem med intressenterna vilket kostade projektet tid. Då projektet var att skapa en autoklav till utbildnings- och forskningssyfte fanns det intressenter i båda dessa grupper. Intressenterna ifrån forskningssidan var svåra att få tag på vilket senare visade sig vara på grund av lågt intresse. Detta medförde även att de inte ställde några konkreta önskemål och krav att följa.

Det finns även förbättringsmöjligheter vid återskapande av detta projekt. De yttre begränsningarna från uppdragsgivaren kunde varit flera för att minska tidsbristen. Exempel på detta skulle kunna vara att få datablad på tillgängligt material på marknaden, för att lättare kunna sätta dimensioner till marknadsstandard, vilket hade underlättat sökandet av material. Övriga saker som gruppen hade kunnat göra annorlunda kommer direkt ifrån stycket ovan. Det skulle exempelvis valts ett annat tillvägagångssätt vid framtagning av koncept, komponenter skulle beställts tidigare samt tiden för inlärn timer av mjukvaror borde involverats i tidsplaneringen.

Säkerheten vid konstruktion av ett tryckkärl är väldigt viktig. Krafterna som byggs upp i ett tryckkärl är stora och vid felaktig konstruktion kan allvarliga personskador uppstå. Det finns därför vissa aspekter som gruppen har haft i åtanke före, under och efter konstruktion. Under den litteraturstudie som utfördes ingick säkerhetsregler och standarder för tryckkärl. Anledningen till detta var att få en god insikt i dessa krav innan framtagning av koncept och därmed minimera riskerna för felkonstruktion. Tryckkärlet dimensioneras med säkerhetsfaktorn som anges i säkerhetsföreskrifter. Säkerhetsfaktor bidrar till ett ökat pris på vissa komponenter, då säkerheten är av högsta prioritet måste alltid hänsyn tas till denna kostnad.

Kärlet ska svetsas ihop av en licensierad svetsare och därefter provtryckas under kontrollerade former. Eftersom vatten är ett inkompressibelt medium används detta vid provtryckning vilket medför att ett haveri inte orsakar någon explosion. Provtryckningar genomförs av utbildade personer inom området. Anledningen till att provtryckningar genomförs är att identifiera defekter i materialet samt brister vid konstruktion och tillverkning. För att minimera dessa risker är allt ingående material i tryckkärlet certifierat enligt EN10204 3.1, vilket sätter krav på tillverkaren av materialet innan leverans [17].

Säkerheten kan även ökas genom att minimera riskerna för handhavande fel. För att åstadkomma detta måste användarvänligheten tas i beaktelse för besluten som togs vid dimensionering. Störst fokus på användarvänligheten lades på dörrlösningen och reglersystemet. Autoklaven styrs med en pekskärm då den agerar knappar och skärm samtidigt. Detta gör det enklare att anpassa mjukvaran efter användaren, till exempel hur många knappar det finns på skärmen samtidigt. Dörrlösningen med roterande flänsar minskar antalet moment och underlättar ett konsekvent resultat vid stängning, detta var inte genomförbart på grund av projektets begränsningar. Då autoklaven inte ska användas för massproduktion likt en industri samt att de personer som ska använda den måste genomföra en utbildning anses användarvänligheten tillräcklig med skruvförband. För att öka användarvänligheten ytterligare kommer en användarmanual till autoklaven att skrivas.

6

Slutsats

Syftet med projektet var bland annat att utforma, konstruera och tillverka en autoklav och att få kunskaper och färdigheter att hantera mångdisciplinära problem med öppna lösningsmängder. Lärandet ses i efterhand som den del i syftet som uppfylldes bäst. Gruppen har fått möjligheten att utvecklas inom ett flertal områden, tillämpa tidigare inlärd kunskaper och färdigheter samt samarbeta med studenter från olika civilingenjörsprogram.

Här presenteras svaret på de frågor som angavs i precisering av målbild samt ger rekommendationer för återskapande av liknande projekt.

Är projektets tidsram stor nog för att uppnå en färdig produkt?

En färdig produkt uppnåddes ej, allting genomfördes förutom tillverkningen. I sammanhanget kan tiden för tillverkningen anses som en väldigt liten del av projektet då den estimerade tillverkningstiden ligger långt under tiden gruppen lagt ner för konceptgenerering och dimensionering.

Är budgeten tillräcklig för att täcka alla utgifter?

Det korta svaret på den frågan är nej. Projektet översteg budgeten, men den summan är försumbar om man jämför mot de priser som presenterades i diskussion för att köpa en färdig autoklav. Med tillgång till en komplett verkstad kan en autoklav konstrueras för ungefär 70 000 SEK.

Uppfylls alla krav i kravspecifikationen?

Dimensioneringen genomfördes för att autoklaven skall klara av de krav som specificerades i kravspecifikationen. Detta innebär att i teorin uppfyller autoklaven kravspecifikationen. Men för att verifiera att produkten uppfyller alla krav i praktiken krävs en fysisk produkt för att genomföra de praktiska verifieringsmetoderna.

Rekommendationer

Rekommendationerna baseras på de lärdomar som gruppen fått genom projektets gång. En stor del av tiden fick spenderas på att kommunicera med leverantörer. Genom att designa autoklaven efter standarddimensioner kan stora tidsbesparingar göras och priset kan minimeras genom att undvika specialbeställningar. Ytterligare en rekommendation är att tidigt i projektet bestämma vilken produktutvecklingsmetodik som ska användas och fundera på varför man använder den. Självklart kan metodiken behöva ändras ändå, men med noggranna avvägningar minskas denna risk. Den slutliga rekommendationen är att inte underskatta de tidsförluster som uppstår i samband med leverantörer. Tiden för att få offerter, leveranser och svar på frågor är oftast längre än förväntad och ett bra sätt att minska dessa tidsförluster är att ha ett bra underlag redan vid första kontakten med leverantörerna.

Litteraturförteckning

- [1] J. C. S. Vasileios M. Drakonakis and C. C. Doumanidis, "Curing pressure influence of out-of-autoclave processing on structural composites for commercial aviation," p. 14, 2013. [Online]. Available: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2013/356824/>
- [2] Anna Middelman, "Enkla tryckkärl (afs 2016:2), föreskrifter," vol. 2017-02-23, 2017.
- [3] "Ss-en 287-1:2011 och ss-en iso 9606 certifiering av svetsare och kvalitetsstyrning vid svetsning," 2018. [Online]. Available: https://www.inspecta.com/PageFiles/32753/is_cesvetsarprovningen287_sv_ww_120412.pdf?epslanguage=sv
- [4] "Carbon fibre composites - ohs information sheet," 2015. [Online]. Available: <https://www.monash.edu/ohs/info-docs/safety-topics/chemical-management/carbon-fibre-composites-ohs-information-sheet>
- [5] "Hampafiber gör kompositmaterialet lättare," 2015. [Online]. Available: <https://www.nyteknik.se/automation/hampafiber-gor-kompositmaterialet-lattare-6394853>
- [6] A. R. Upadhyaya, G. N. Dayananda, G. M. Kamalakannan, J. Ramaswamy Setty, and J. Christopher Daniel, "Autoclaves for Aerospace Applications: Issues and Challenges," *International Journal of Aerospace Engineering*, vol. 2011.
- [7] "Prepeg data sheet, epoxy," 2018. [Online]. Available: <http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Prepreg>
- [8] F. Y. Boey, "Development of an autoclave curing system for fibre reinforced polymer composites," *Polymer Testing*, vol. 8, no. 6, pp. 375 – 384, 1988. [Online]. Available: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142941888900414>
- [9] "Wet carbon fiber vs. dry carbon fiber," 2018. [Online]. Available: <http://www.scopioneusa.com/wet-carbon-fiber-vs-dry-carbon-fiber-material-differences-advantages-disadvantages/>
- [10] C. Shennan, "Prepeg and infusion: Process for modern wind turbine blades," p. 30, 2013. [Online]. Available: <http://www.hexcel.com/innovation/Documents/Prepreg%20and%20Infusion%20Processes%20for%20Modern%20Wind%20Turbine%20Blades%20.pdf>
- [11] B. Terselius, "Härdplast," 2018. [Online]. Available: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lång/härdplast>
- [12] G. Nordgren, *Plastreparation och lackering*. Liber, 1993.
- [13] P. Lindstedt, J. Burenius, "The Value Model: How to Master Product Development and Create Unrivalled Customer Value," *Nimba*, vol. Senaste upplagan, 2003.

- [14] “Kolstål,” 2018. [Online]. Available: <http://nordicpipe.se/kolstal>
- [15] “P235gh,” 2018. [Online]. Available: <http://www.livallco.se/wp-content/uploads/2014/10/P235GH.pdf>
- [16] “P265gh,” 2018. [Online]. Available: <http://www.livallco.se/wp-content/uploads/2014/10/P265GH.pdf>
- [17] “En10204 certification for steel plates,” 2018. [Online]. Available: <http://www.oakleysteel.co.uk/thick-steel-plates/steel-information/en10204-steel-certification>
- [18] S. S. Institute, “Tätningselement – o-ringar – inbyggnadsmått för allmän användning,” 2017. [Online]. Available: <https://www.teknikprodukter.se/wp-content/uploads/delightful-downloads/2015/01/Toleranser-och-inbyggnad.pdf>
- [19] “Catia v5, dassault systems,” 2018. [Online]. Available: <https://www.3ds.com/products-services/catia/>
- [20] “Ansys 18.2,” 2018. [Online]. Available: <https://www.ansys.com>
- [21] A. Hobbacher, *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components, 2nd edition*. University of Applied Sciences, WILHELMSHAVEN, 2016.
- [22] G. Sjödin, “kursmaterial från kursen maskinelement (ppu210) om måttjämkning ytfinitet,” 2014.
- [23] K. M. Mart Mägi, *Lärobok i maskinelement*. EcoDev International AB, 2006.
- [24] T. L. Bergman, *Incropera’s Principles of Heat and Mass Transfer*. John Wiley & Sons Inc, 2017.
- [25] R. C. D. . J. A. Svoboda, *Introduction to Electric Circuits, 8th Edition*. John wiley & Sons, Inc., 1994.
- [26] Tryckkärlskommissionen, *Tryckkärlsnormer*. SIS Förlag AB, 1987.
- [27] A. Ekberg, *Materialutmattning, version 1.2*. Department of Applied Mechanics, CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2017.
- [28] “Underlag för prisuppskattning,” 2018. [Online]. Available: https://www.alibaba.com/product-detail/0-01Mpa-pressure-difference-20-vacuum_60341329634.html?spm=a2700.details.maylikever.14.6d064f573D3JDT

A

Kravspezifikation

A. Kravspecifikation

	Dokumenttyp:	Kravspecifikation				Skapad:	2018-01-25
	Projekt:	Kandidatarbete MMSX20-18-07				Modifierad:	2018-02-15
	Utförare:	Petter Barreng, Tobias Bredenberg, Birk Forsström, Fredrik Holmberg, Johan Karlsson					
	Funktion/er	Målvärde:	Mätenhet	K/Ö	Vikt	Verifieringsmetod	Referens (kravställare)
1	Prestanda						
1.1	Värme	Kärlets innertemperatur skall kunna uppnå 150	°C	K		Test och mätning	Intressenter
		Kärlets innertemperatur skall kunna uppnå 200	°C	Ö	2	Test och mätning	Gruppen
		Uppvärmningstid minst 3	°C/min	K		Test och mätning	Intressenter
		Uppvärmningstid minst 5	°C/min	Ö	1	Test och mätning	Gruppen
		Nedkylning minst 5	°C/min	K		Test och mätning	Intressenter
		Nedkylning minst 10	°C/min	Ö	3	Test och mätning	Gruppen
		Följa given tid/temperatur graf		Ö	1	Test och mätning	Gruppen
		Homogen temperatur i kärlet med en noggrannhet på 5 grader	°C	K		Test och mätning	Intressenter
		Temperaturmätning i kärlet		K		Design	Gruppen
		Temperaturmätning av komponenten		K		Design	Gruppen
		Flyttbara temperaturgivare för mätning av flera punkter		Ö	2	Design	Gruppen
1.2	Vakuüm	En invändig vakuümanlutning		K		Design	Intressenter
		Två invändiga vakuümanlutningar		Ö	1	Design	Intressenter
		Fyra invändiga vakuümanlutningar		Ö	3	Design	Gruppen
		Vakuümmätning		K		Test och mätning	Gruppen
		Individuell vakuümmätning per produkt		Ö	3	Test och mätning	Gruppen
1.3	Tryck	Reglerbart tryck i kärlet		K		Test och mätning	Intressenter
		Tryckmätning i kärlet		K		Test och mätning	Intressenter
		Kärlets arbetstryck 0.7	MPa	K		Test	Intressenter
		Provtryckningstryck 1.0	MPa	K		Test	Säkerhetsbestämmelser
		Designtryck 1.2075	MPa	K		Beräkningar	Gruppen
		Skall hålla arbetstryck under 1 timme med max 0,1% tryckförlust		K		Mätning	Gruppen
1.4	Interface	Intuitiv manual		Ö	1	Tidtagning av testperson	Gruppen
		Reglerbar dekompression		K		Design	Gruppen
		Avläsning av tryck		K		Design	Intressenter
		Avläsning av temperatur		K		Design	Intressenter
		Avläsning av vakuüm		Ö	1	Design	Intressenter
		Styrning av temperaturrampning		K		Test	Intressenter
		Styrning av konstant temperatur		K		Test	Intressenter
		Styrning av härdningstid		K		Test	Intressenter
1.5	Ljudnivå	Under 80	dB	K		Ljudmätning	Arbetsmiljöverket
		Under 60	dB	Ö	4	Ljudmätning	Gruppen
1.6	Ram	Mobil		K		Design	Beställaren
		Skall kunna flyttas med pallyft		Ö	1	Design	Beställaren
		Skall bära autoklavens vikt +20%	kg	K		Design	Gruppen
		Designad för att bära kringliggande system		Ö	2	Design	Gruppen
1.7	Dörr	Manuell öppning och stängning med handkraft		K		Design	Gruppen
		Automatisk öppning och stängning		Ö	5	Design	Gruppen
		Låsbar		K		Design	Gruppen

A. Kravspecifikation

2	Miljö						
2.1	Under Drift	Förnyelsebar elanvändning		Ö	5	Avtalsbaserat	Gruppen
2.2	Under konstruktion	Minimera transporter		Ö	3	Leverantörsval	Gruppen
		All färg skall vara svanenmärkt		Ö	5	Leverantörsval	Gruppen
2.3	Återvinning	80 viktprocent återvinningsbar		K		Vägning och beräkning	Gruppen
3	Livslängd						
3.1	Hela produkten	10	år	K		Beräkningar	Gruppen
		20	år	Ö	2	Beräkningar	Gruppen
3.2	Reglersystem	10	år	Ö	3	Beräkningar	Gruppen
3.3	Serviceintervall	2	år	K		Beräkningar	Arbetsmiljöverket
4	Underhåll						
4.1	Slitagedelar	Skall vara standardkomponenter		K		Design och beräkningar	Gruppen
		Reparationstid max en timme	h	Ö	3	Design och test	Gruppen
	Rengöring	Lättrengjorda ytor		Ö	2	Design och test	Gruppen
		Vattensäker rengöring		K		Design och test	Gruppen
5	Projektkostnad						
5.1	Budget	20 000	kr	K		Budgetkalkyl och resultaträkning	Beställaren
6	Storlek						
6.1	Dimension	Skall rymma 150x350x350	mm	Ö	1	Beräkningar	Intressenter
		Skall rymma 300x400x10	mm	Ö	1	Beräkningar	Intressenter
7	Vikt						
7.1	Vikt	Totalvikt max 1 000	kg	K		Beräkningar	Gruppen
8	Material						
8.1	Kärlet	Tryckkärnsstål		K		Beräkningar	Arbetsmiljöverket och säkerhetsbestämmelser
8.2	Ram	Stål		K		Design	Gruppen
8.3	Övrigt	Tryckslangar av trycktåligt material		K		Design	Gruppen
		Vakuumslangar av värme samt trycktåligt material		K		Design	Gruppen
9	Ergonomi						
9.1	Kärlet	Skall vara höj- och sänkbar		Ö	5	Design	Gruppen
		Plan avställningsyta inuti kärlet		K		Design	Gruppen
		Utdragbar avställningsyta inuti kärlet		Ö	4	Design	Gruppen
10	Tidsschema						
10.1	Design	En	månad	Ö	1	Gantt-schema	Gruppen
10.2	Byggnation	Två	månad	Ö	2	Gantt-schema	Gruppen
11	Säkerhet						
11.1	Kärlet	Max yttertemperatur 45	°C	K		Mätning	Gruppen
		Säkerhetssystem vid övertryck i kärlet		K		Design	Säkerhetsbestämmelser
		Följa givna standarder		K		Godkänning via instutionen	Säkerhetsbestämmelser
11.2	Dörr	Säkerhetslås vid trycksatt kärl		K		Design	Säkerhetsbestämmelser
		Klämskydd		Ö	4	Design	Gruppen
11.3	Ram	Inga vassa kanter		K		Design	Gruppen
11.4	Styrsystem	Arbetsindikation		K		Design	Gruppen
		Nödstopp		K		Design och test	Säkerhetsbestämmelser

B

Intervjuer

B.1 Intervju med institutionen

Intervjuperson: Leif Asp, Professor på avdelningen för Material- och beräkningsmekanik.

Vad vill du kunna använda autoklaven till?

Behov inom Formula Student och Formula Sailing. Finns bara till termoplaster just nu, behövs till hårdplaster.

Hur stor vill du att autoklaven skall vara?

Inte så viktigt för forskningen, den skulle behövas vara större än vad vi kan göra. Sikta på Formulas behov istället.

Vilken temperatur behöver nås? (Följa temperaturkurvor?)

250 grader täcker nog allt som skall göras här

Reglerbart tryck & temperatur?

Viktigt att man kan reglera temperatur.

Mobilitet?

Rimligt att den är mobil. Kunna stå på ett rullbord?

B.2 Intervju med CFS

Intervjuperson: Johan Idoffsson, ansvarig för kompositproduktion i CFS

Vad skulle formula kunna använda den till?

Kul att tillverka fälgarna i den. Ca diameter 300-400 mm. Testpaneler ca 300x400 mm 500x500, höjd ca 400 mm. Fälg, 300x150. Så som det ser ut nu måste dom antingen göras på Hisingen eller i Uddevalla.

Temperatur?

Cyklerna som körs nu går till ca 130 grader, trycket går upp till 5 bar. Kunna kontrollera temperaturen, följa temp kurva 2-3 c/min upp 5-6 c/min ner. Problemet ligger troligen i kylningen.

Användargränssnitt?

Behöver inte alls vara avancerat, temperaturreglage, tid, och reglerbart tryck.

Övrigt

Göra bra former som verkligen klarar det som man skall göra, tips eller handbok på hur man använder autoklaven.

Vakuum

Har bara kört 1 anslutning, eventuellt behövs fler på fälgarna.

Toleranser

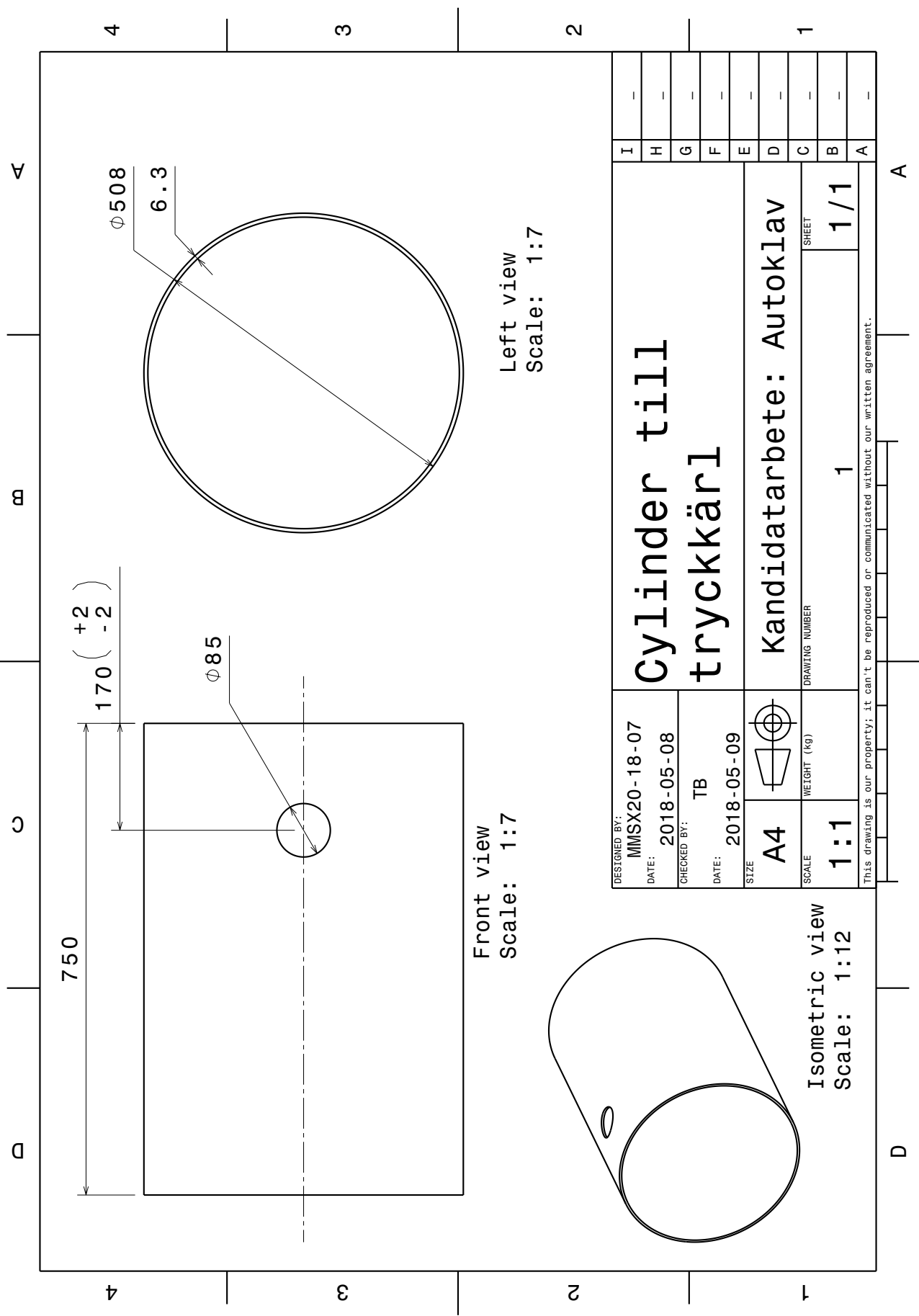
+/-0.5 bar i tryck gissar han på.

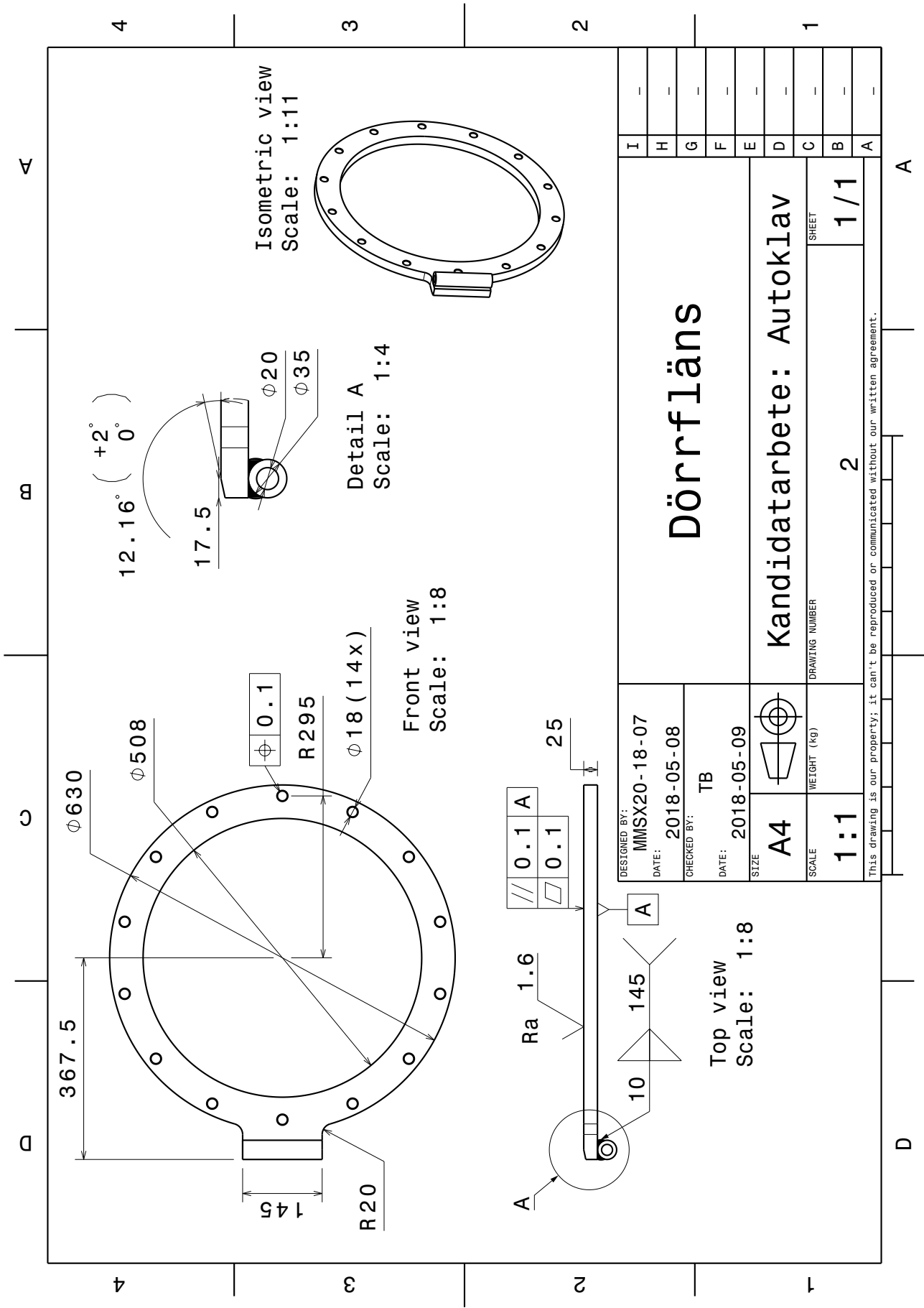
Luftcirkulation

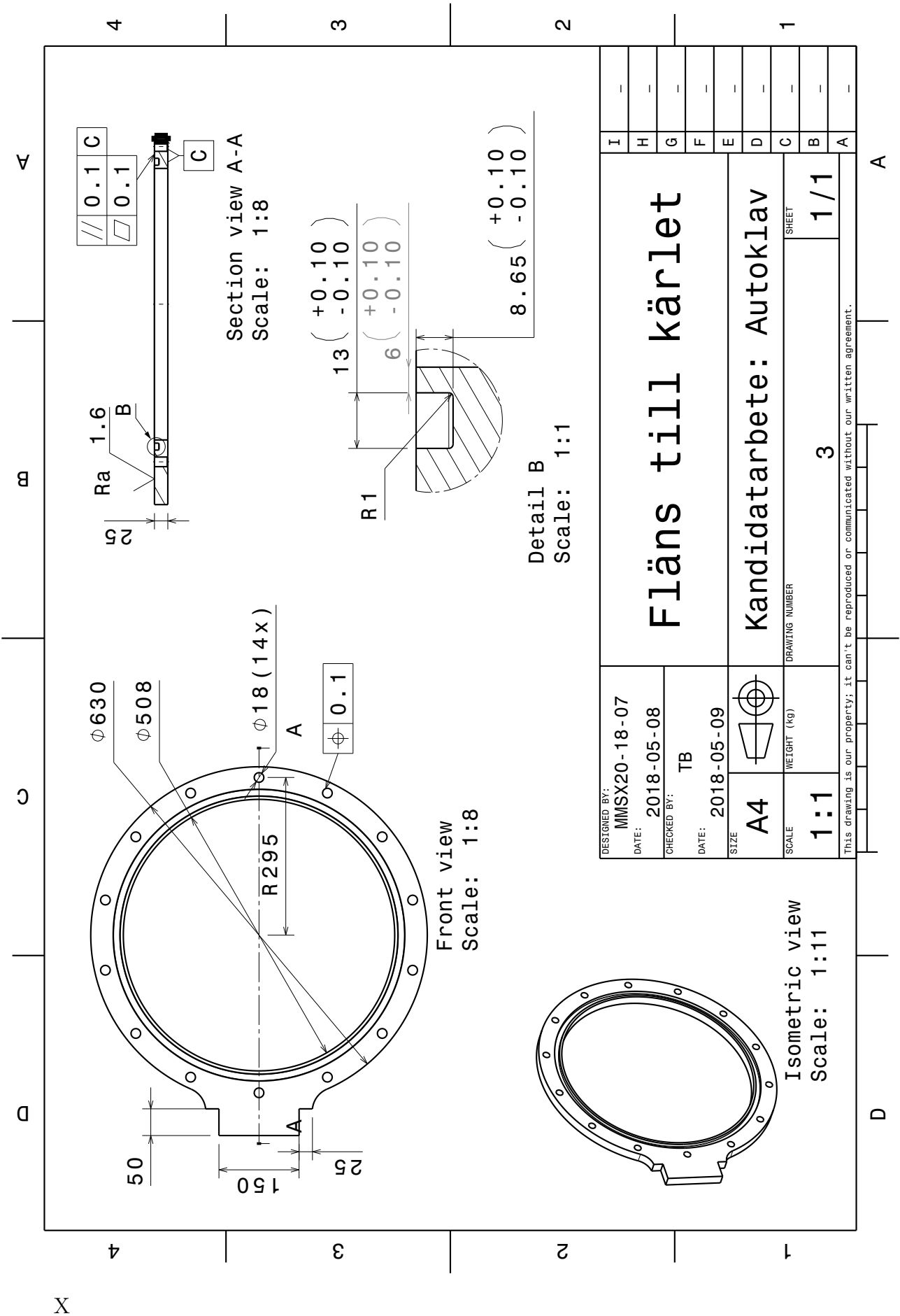
Kan man få till en fläkt eller någon konstruktion för cirkulation i luften hade det varit bra.

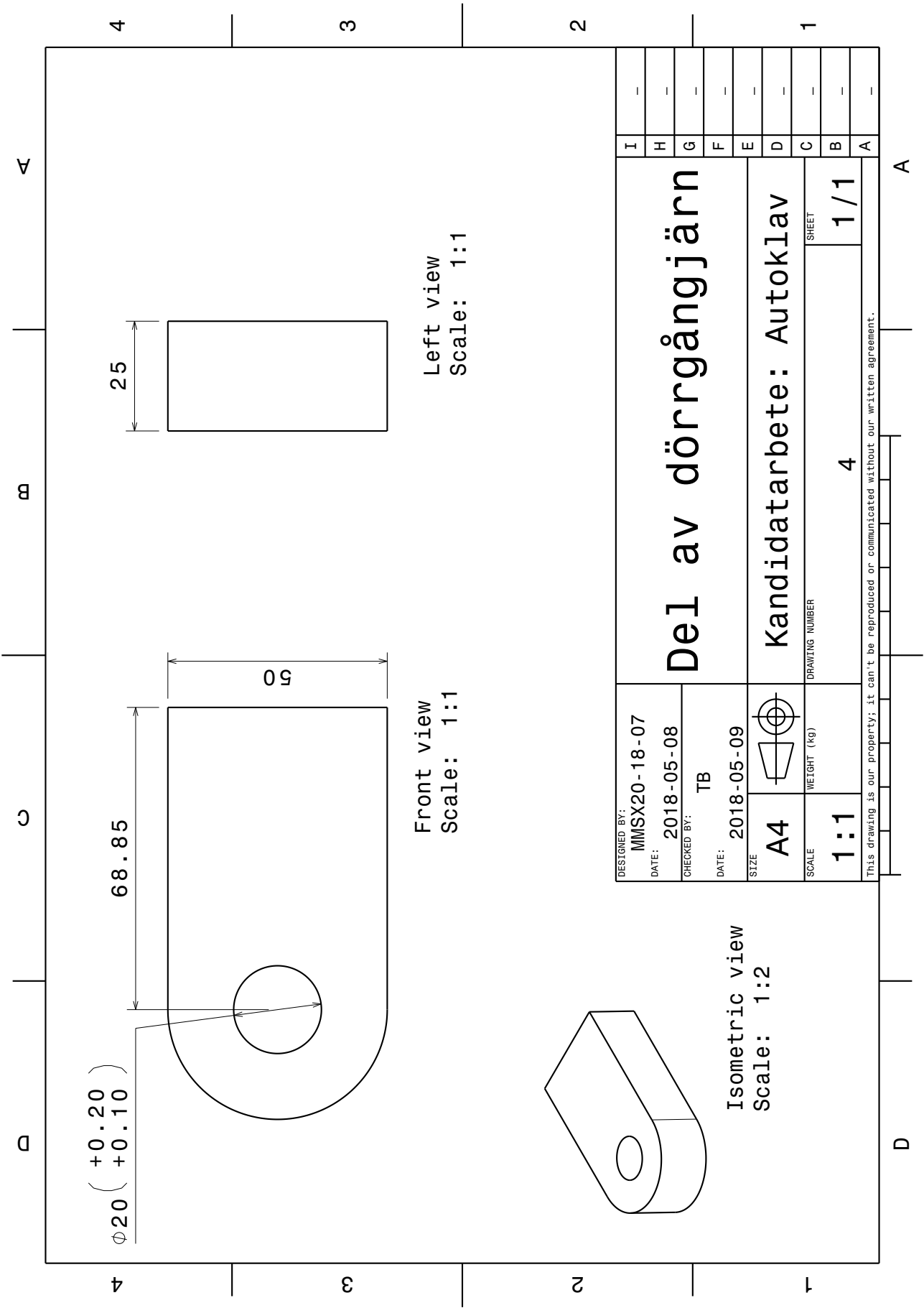
C

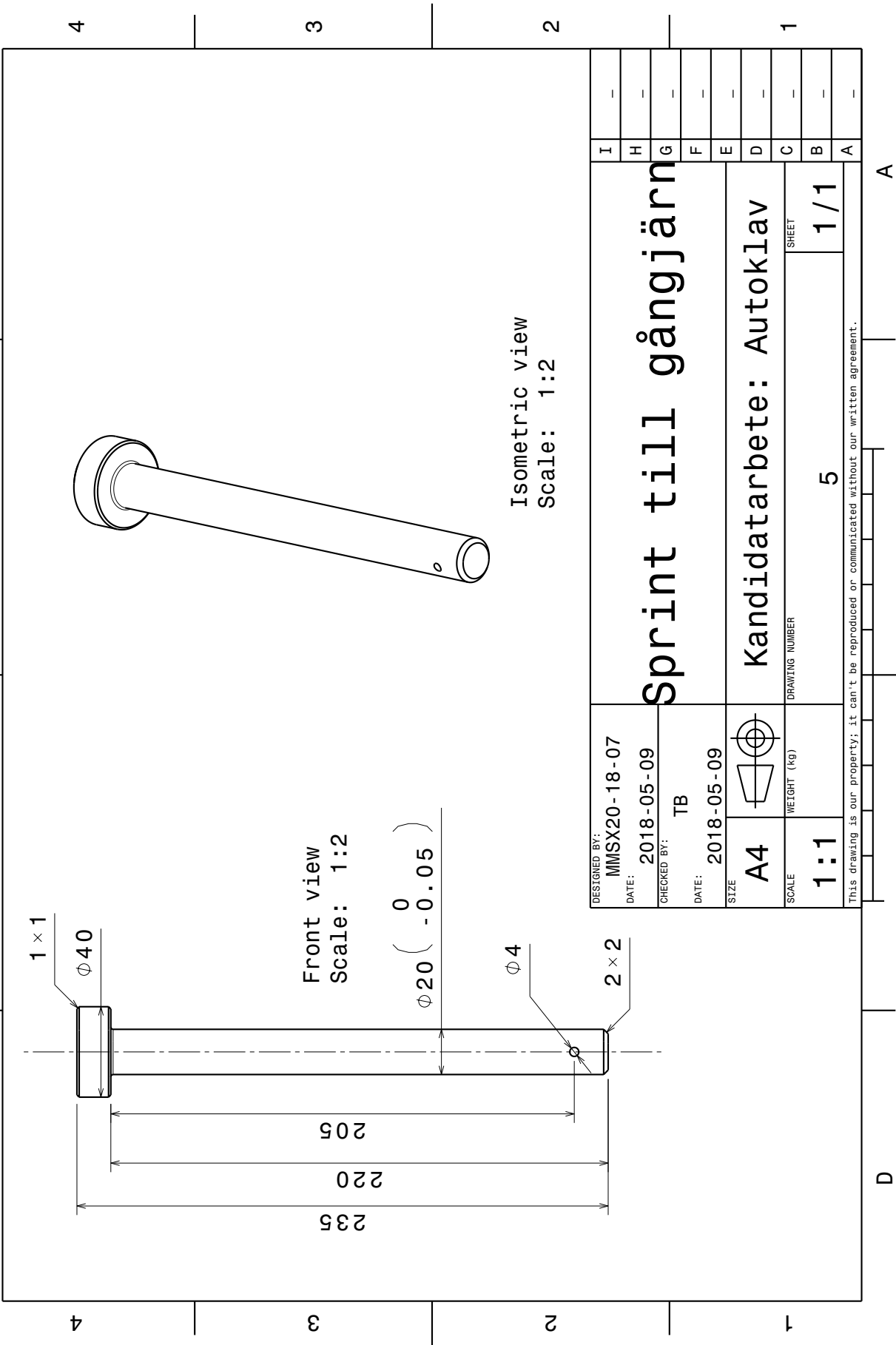
Ritningar

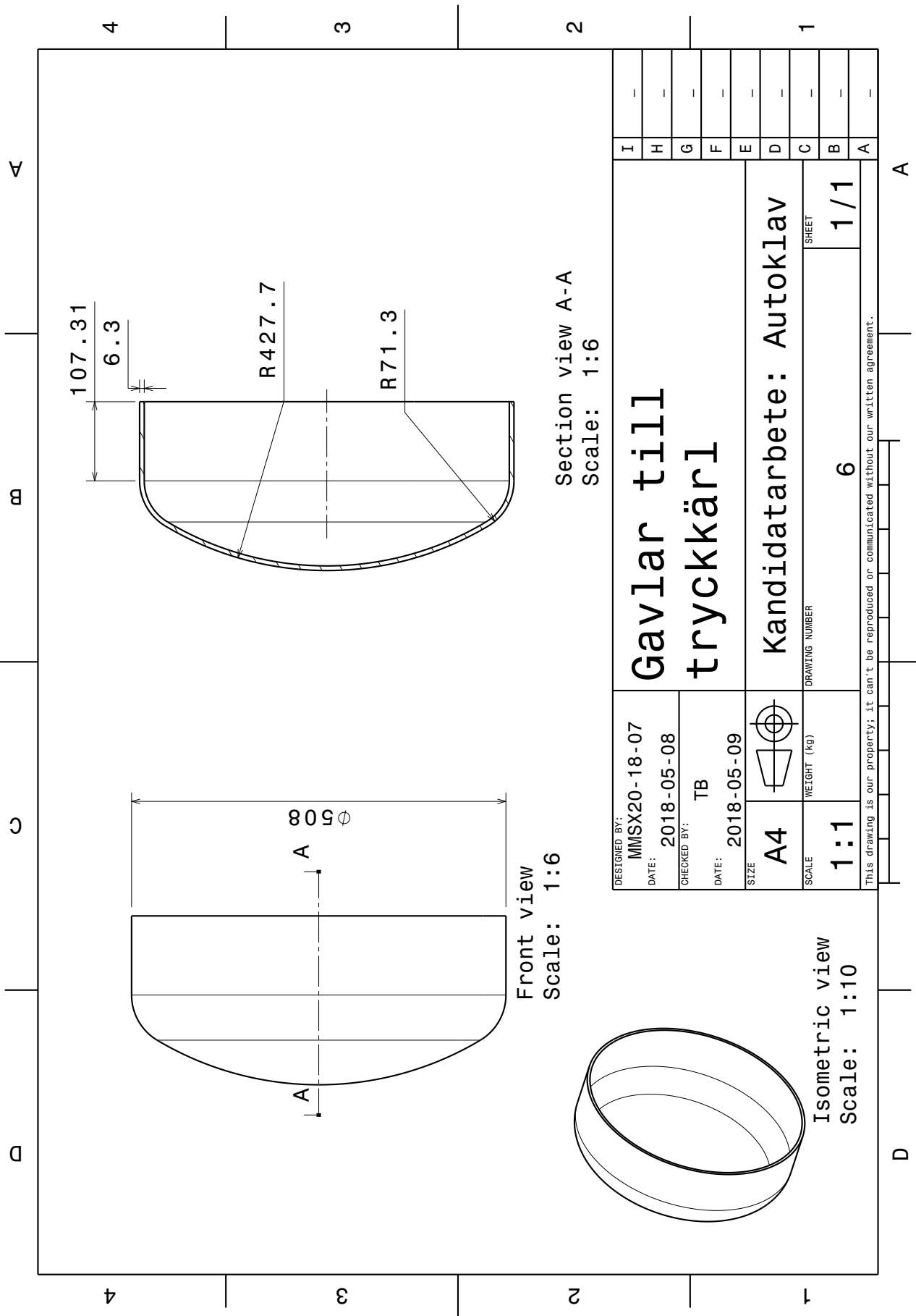


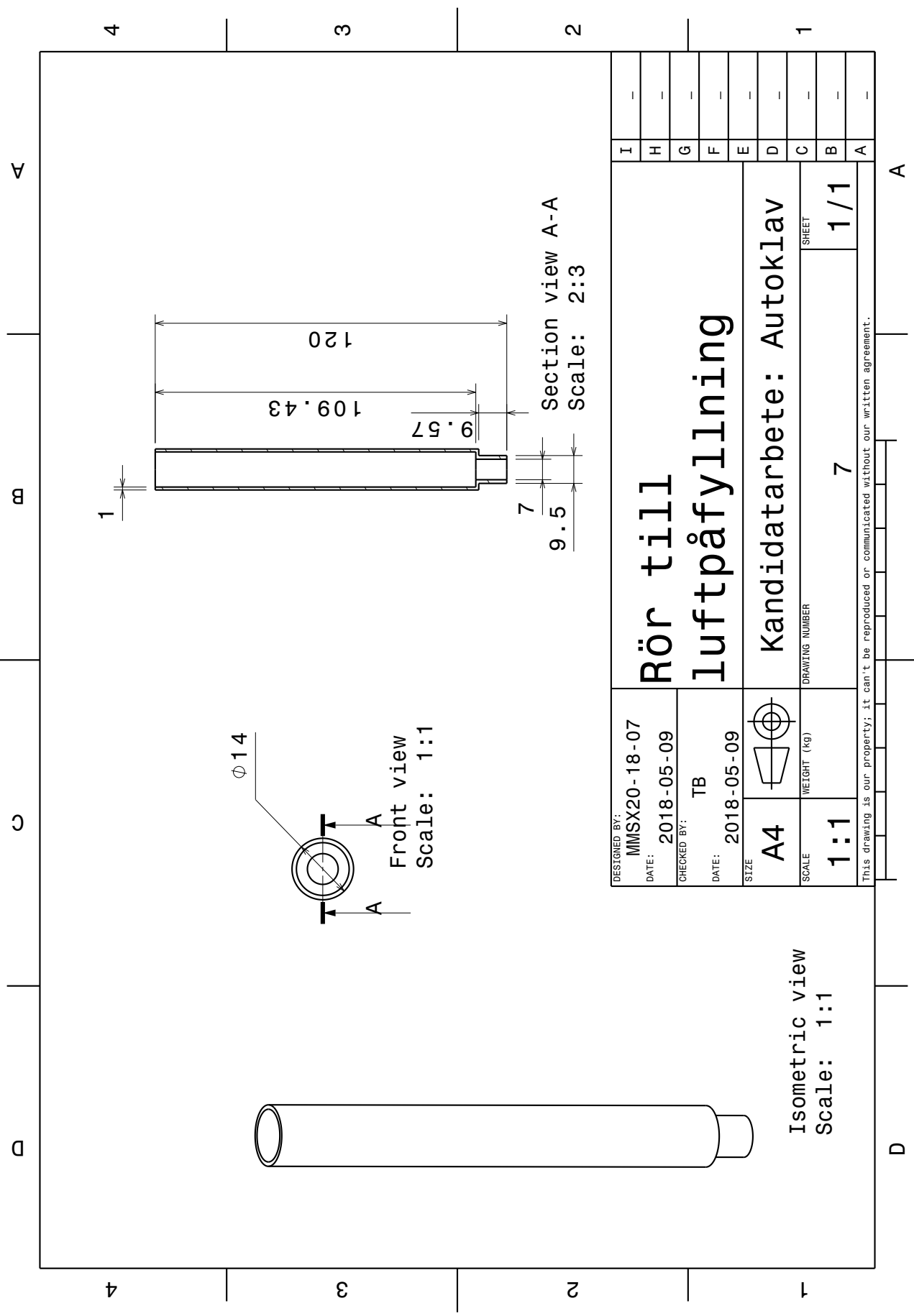










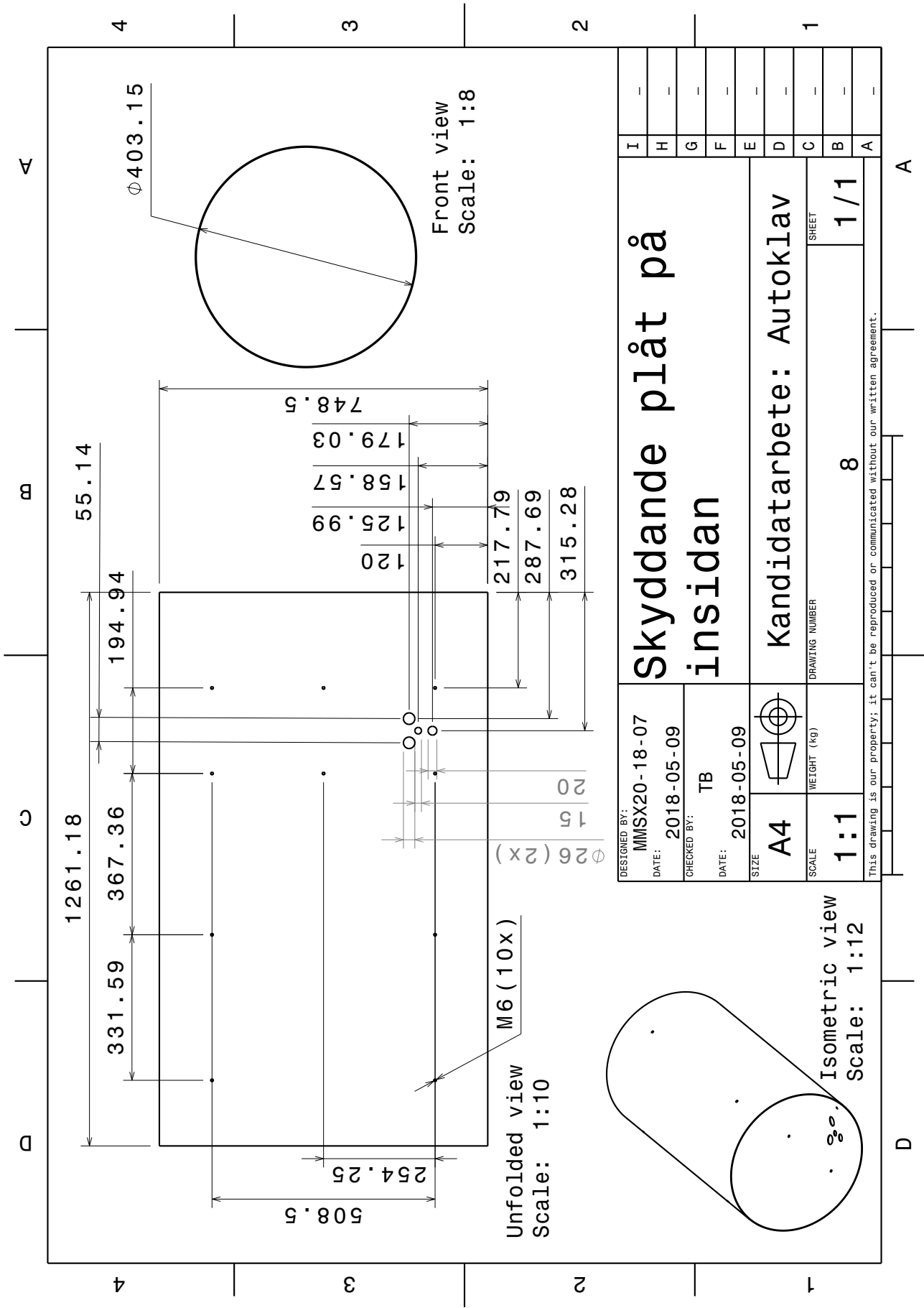


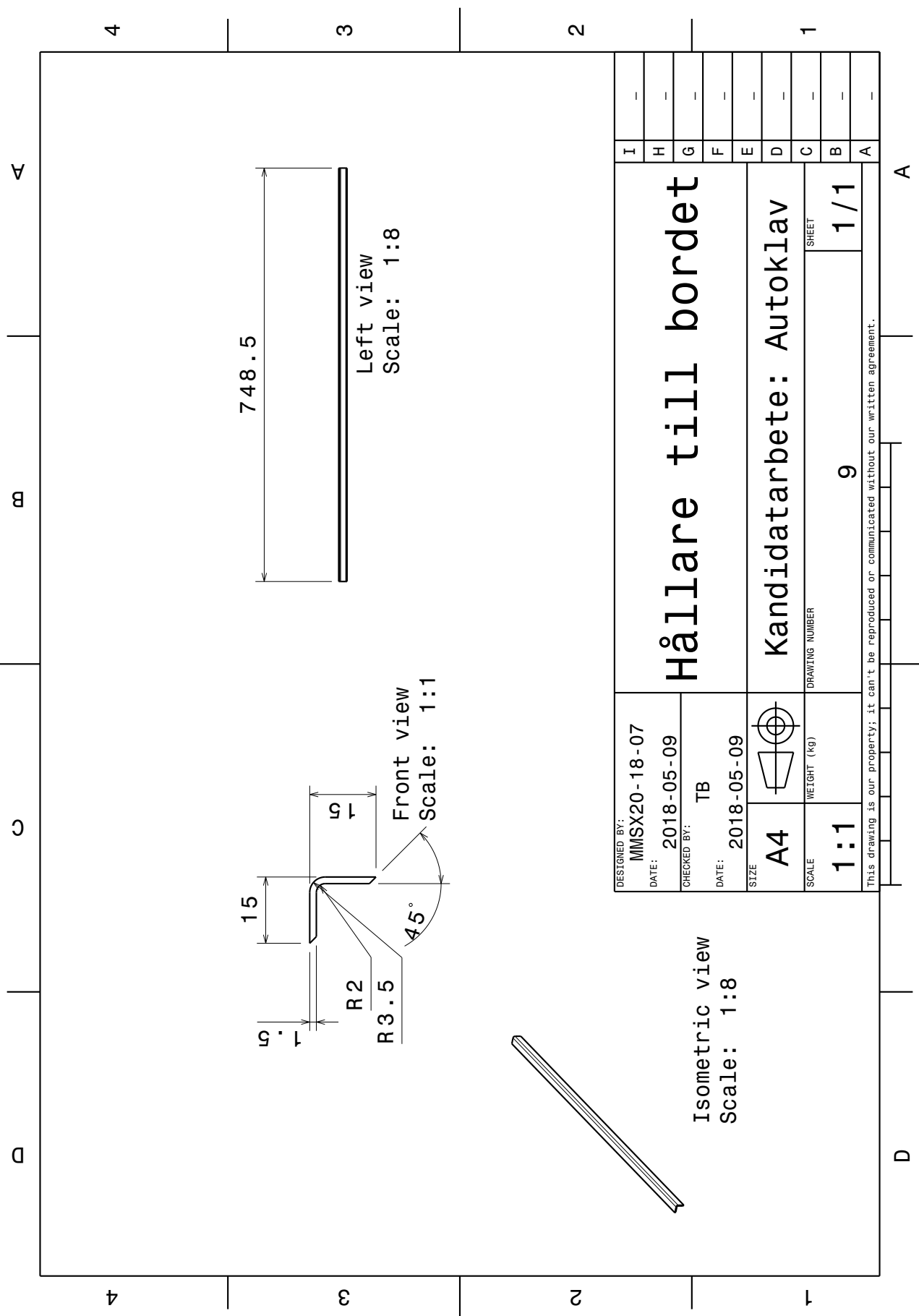
DESIGNED BY: MMSX20-18-07		I	-
DATE: 2018-05-09		H	-
CHECKED BY: TB		G	-
DATE: 2018-05-09		F	-
SIZE A4		E	-
SCALE 1:1		D	-
WEIGHT (kg)		C	-
DRAWING NUMBER 7		B	-
SHEET 1/1		A	-

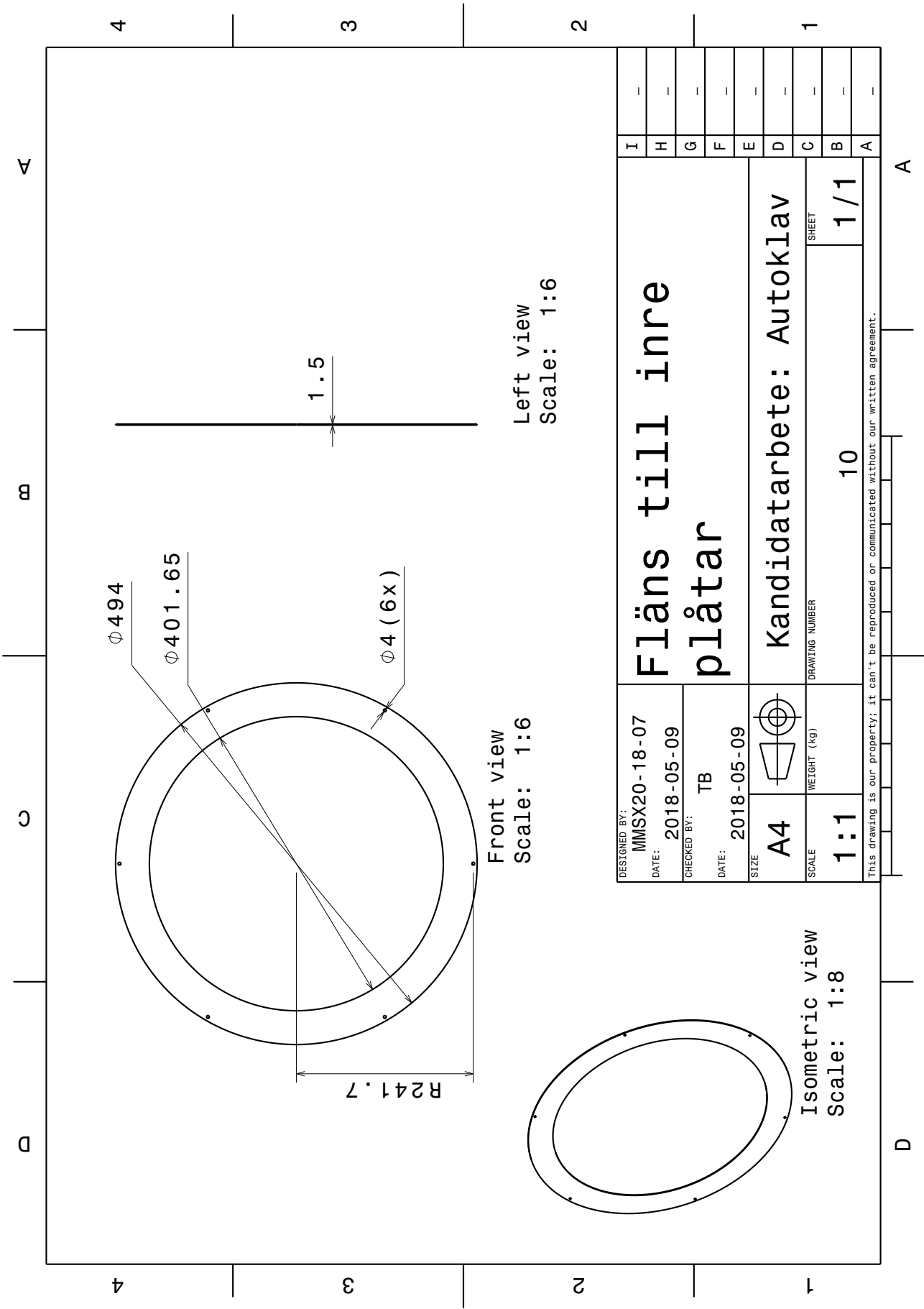
Rör till
Luftpåfyllning

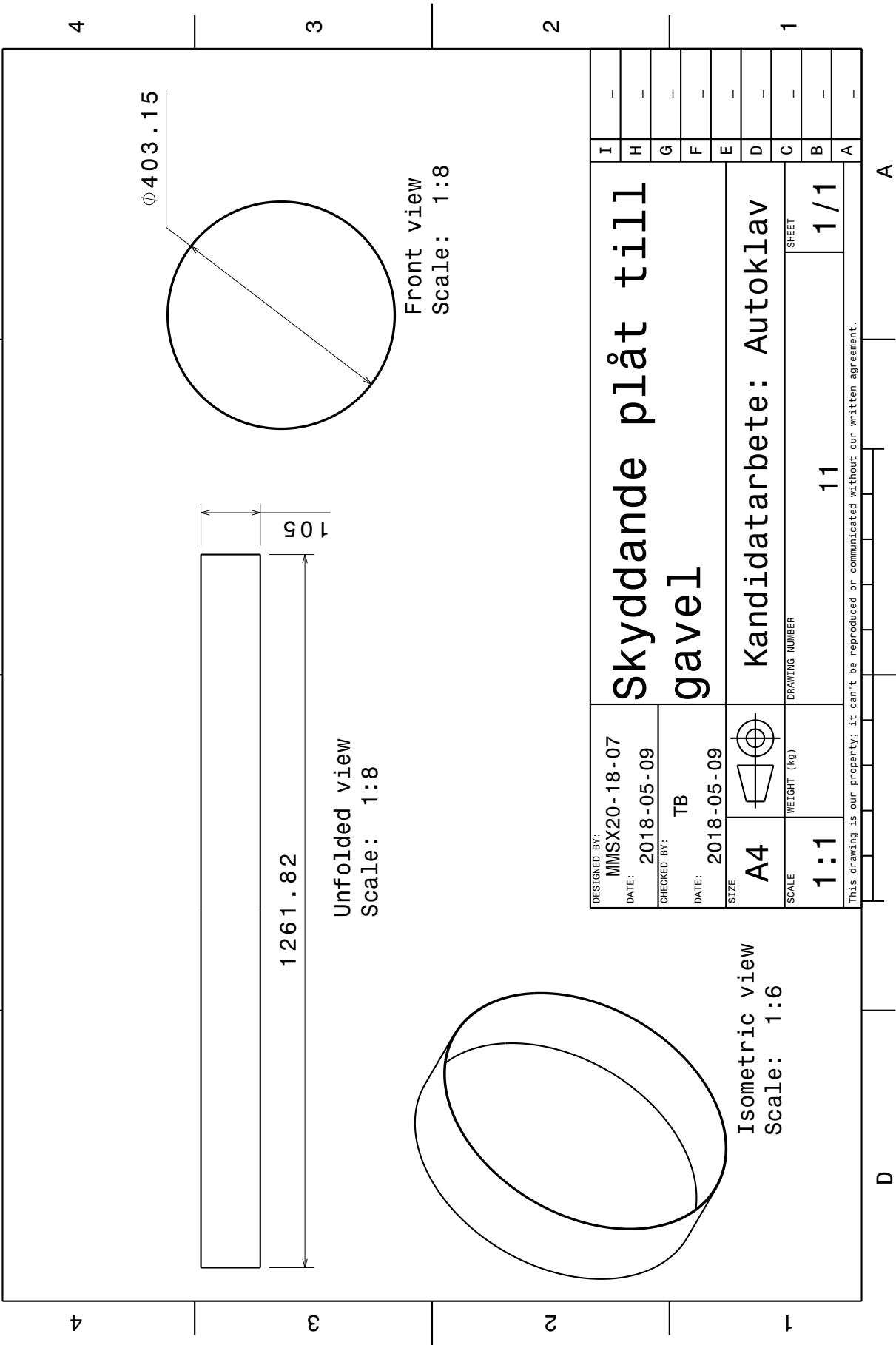
Kandidatarbete: Autoklav

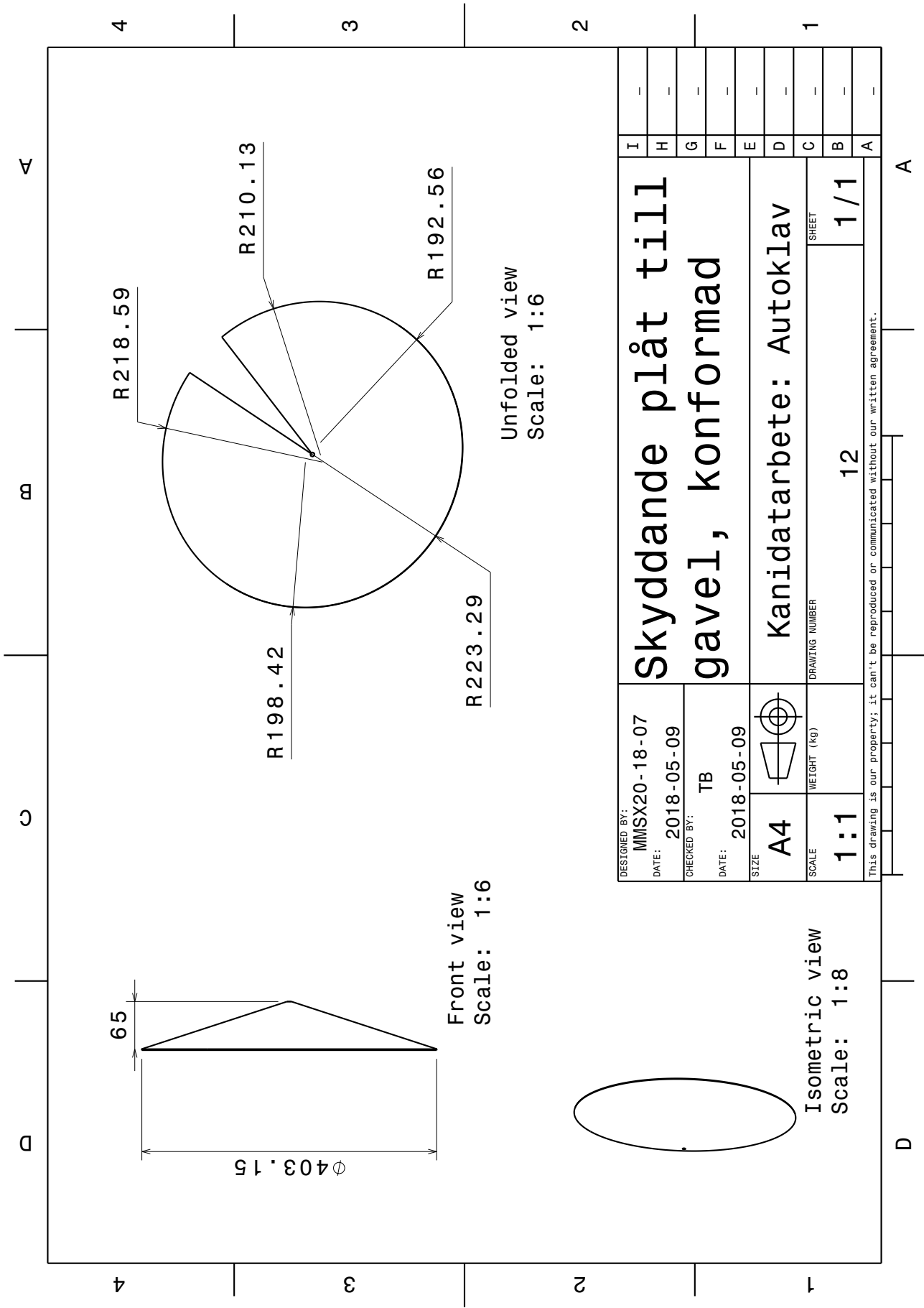
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

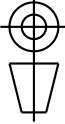




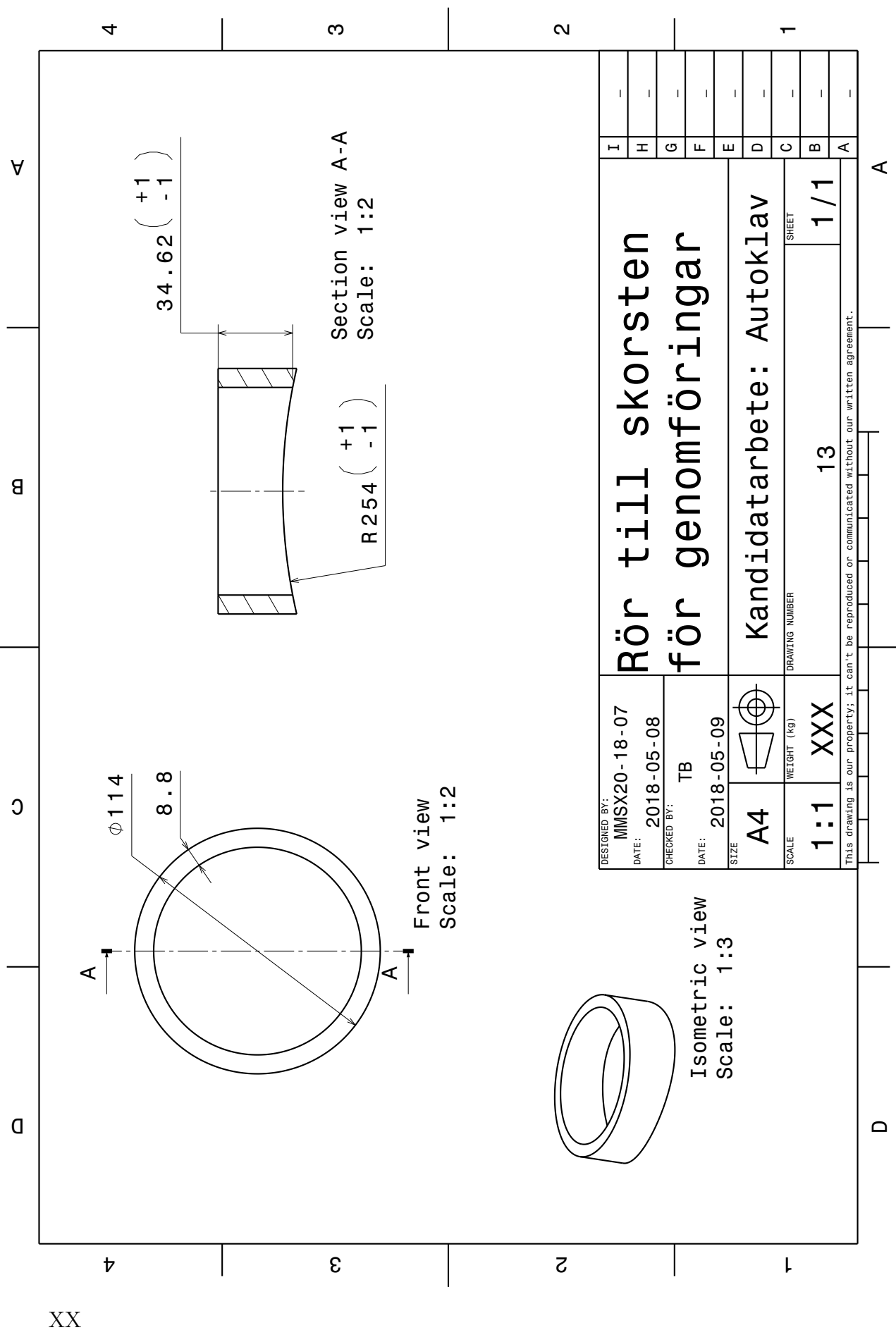


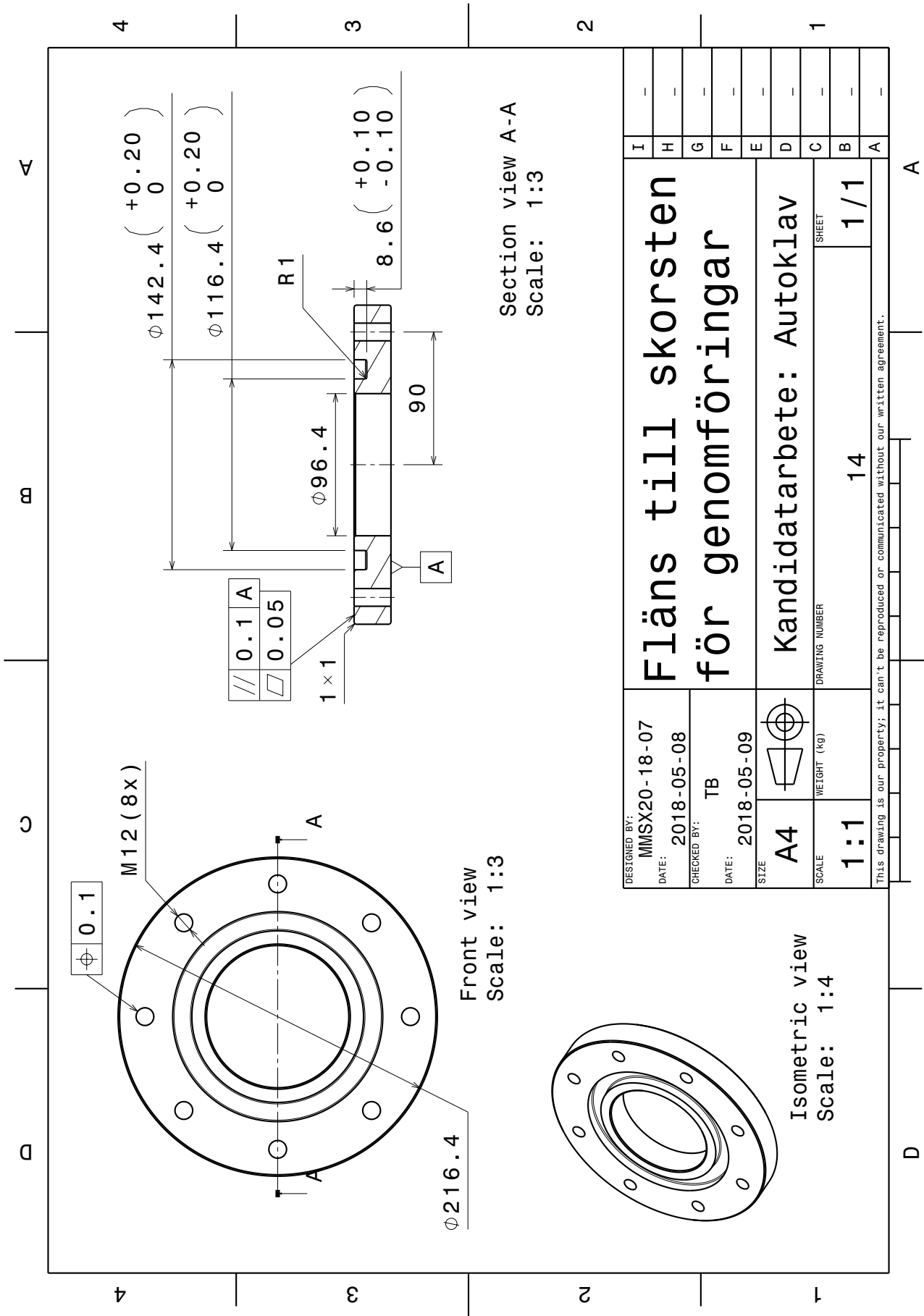


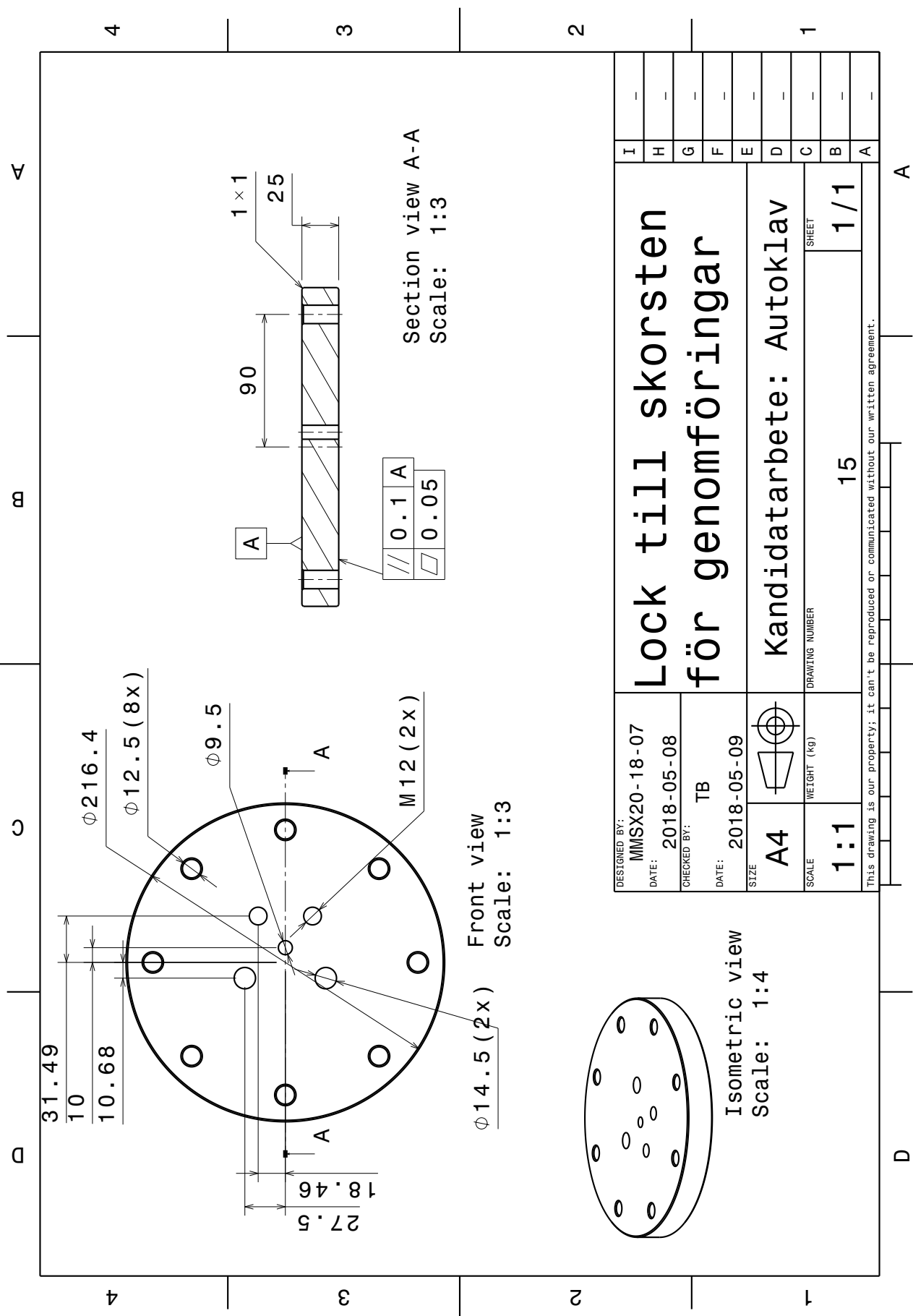


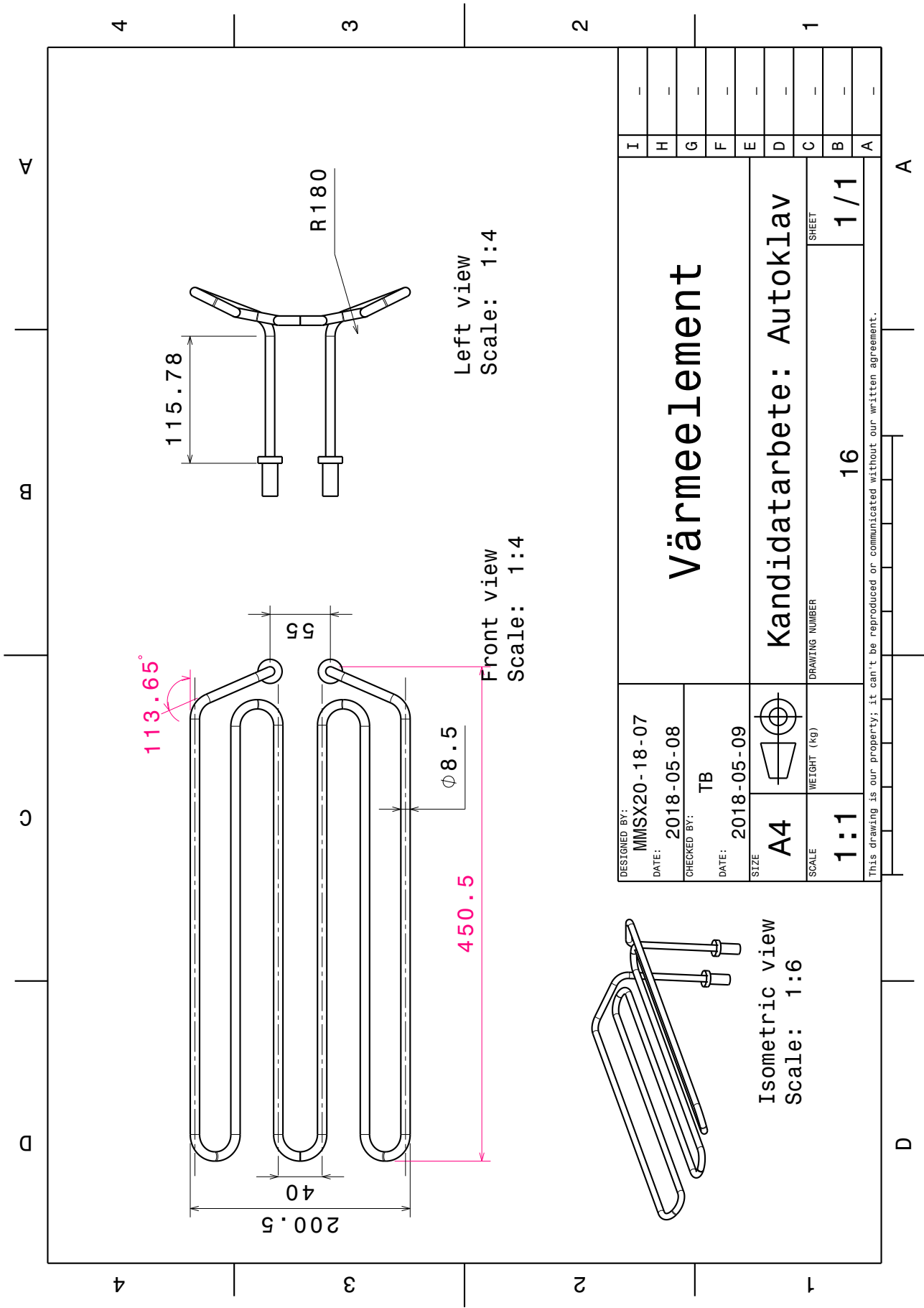
DESIGNED BY: MMSX20-18-07		I	
DATE: 2018-05-09		H	
CHECKED BY: TB		G	
DATE: 2018-05-09		F	
SIZE A4		E	
		D	
SCALE 1:1		C	
DRAWING NUMBER 12		B	
SHEET 1/1		A	
Kanidatarbete: Autoklav			
Skyddande plåt till gavel, konformad			

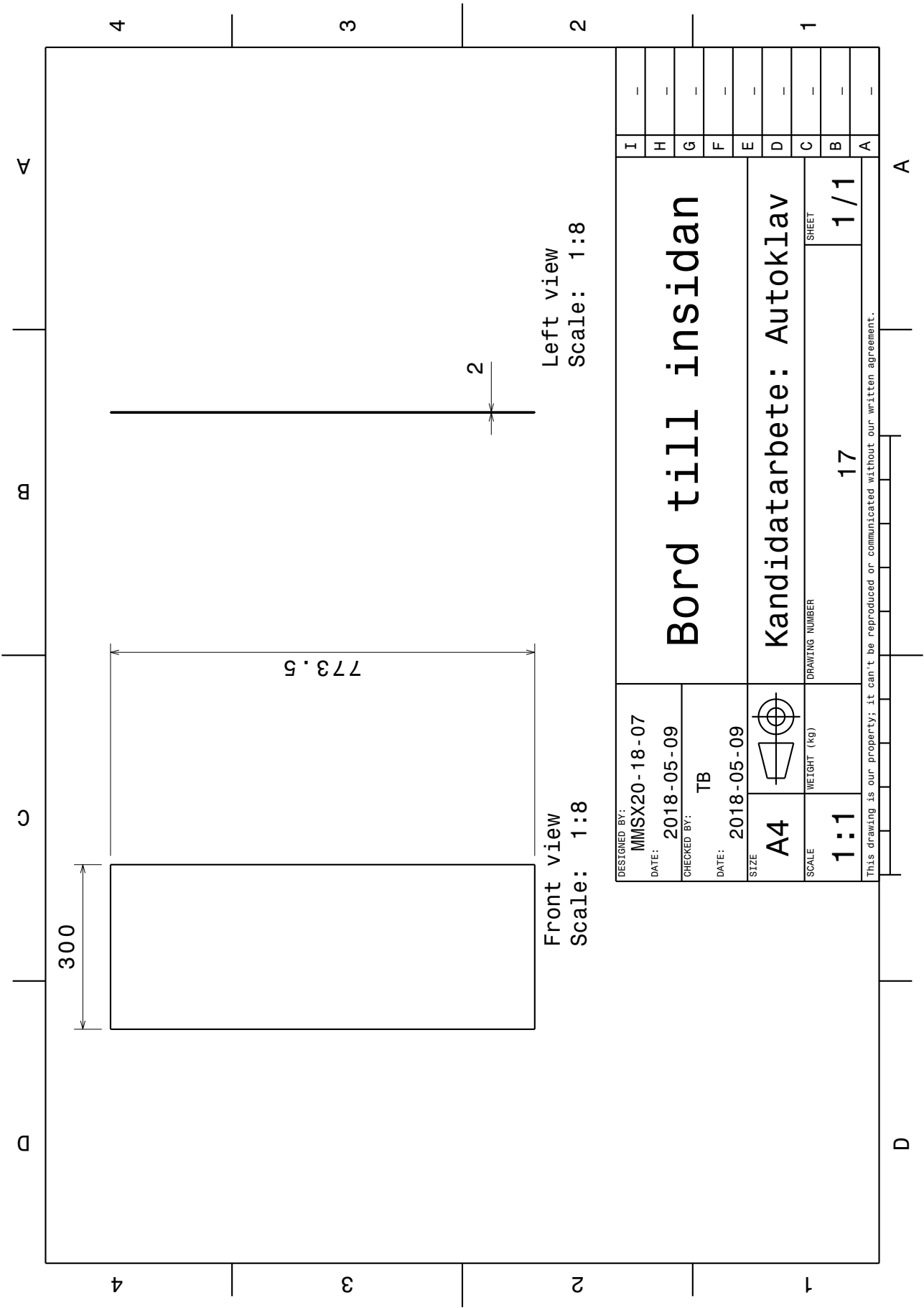
This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

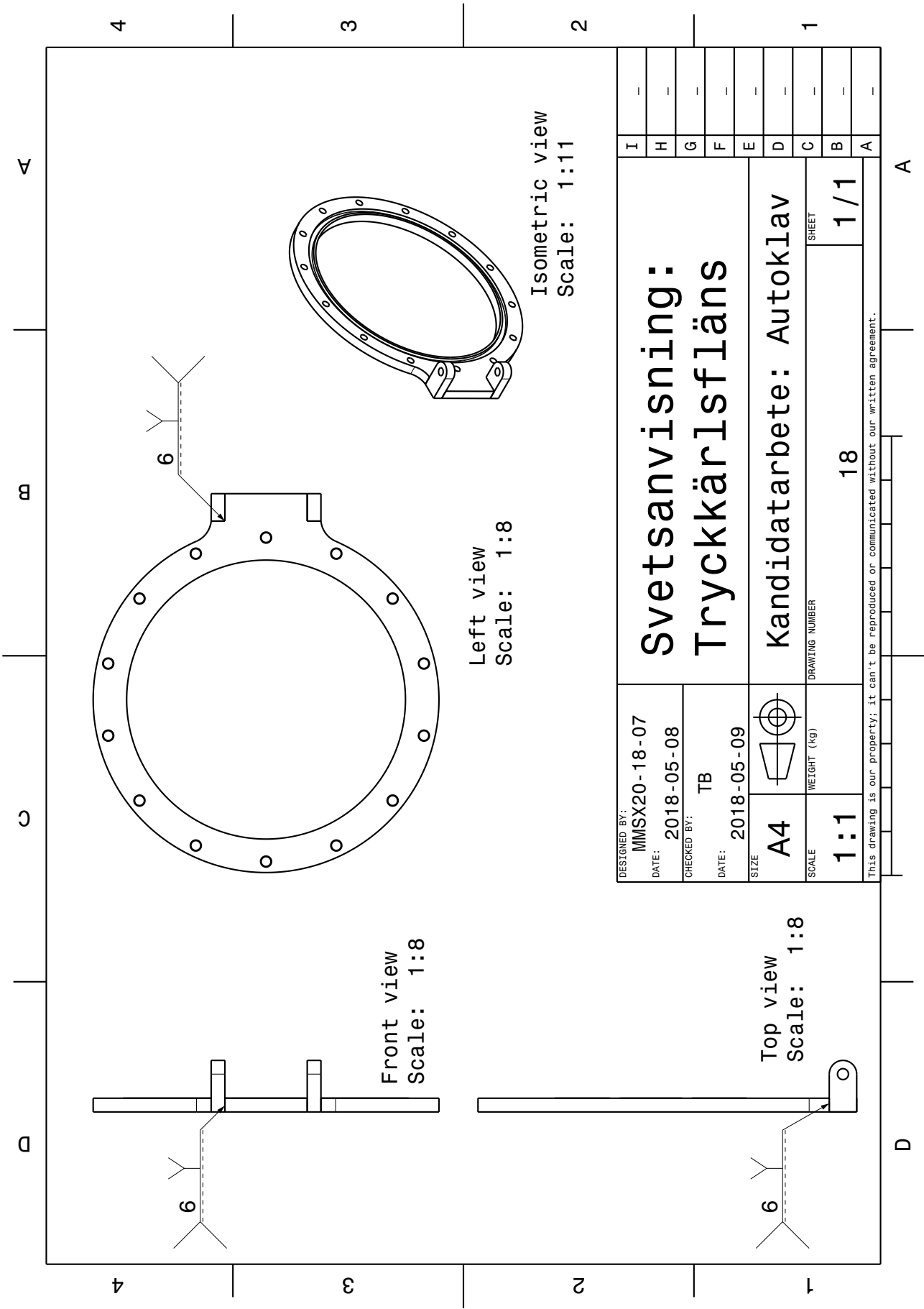




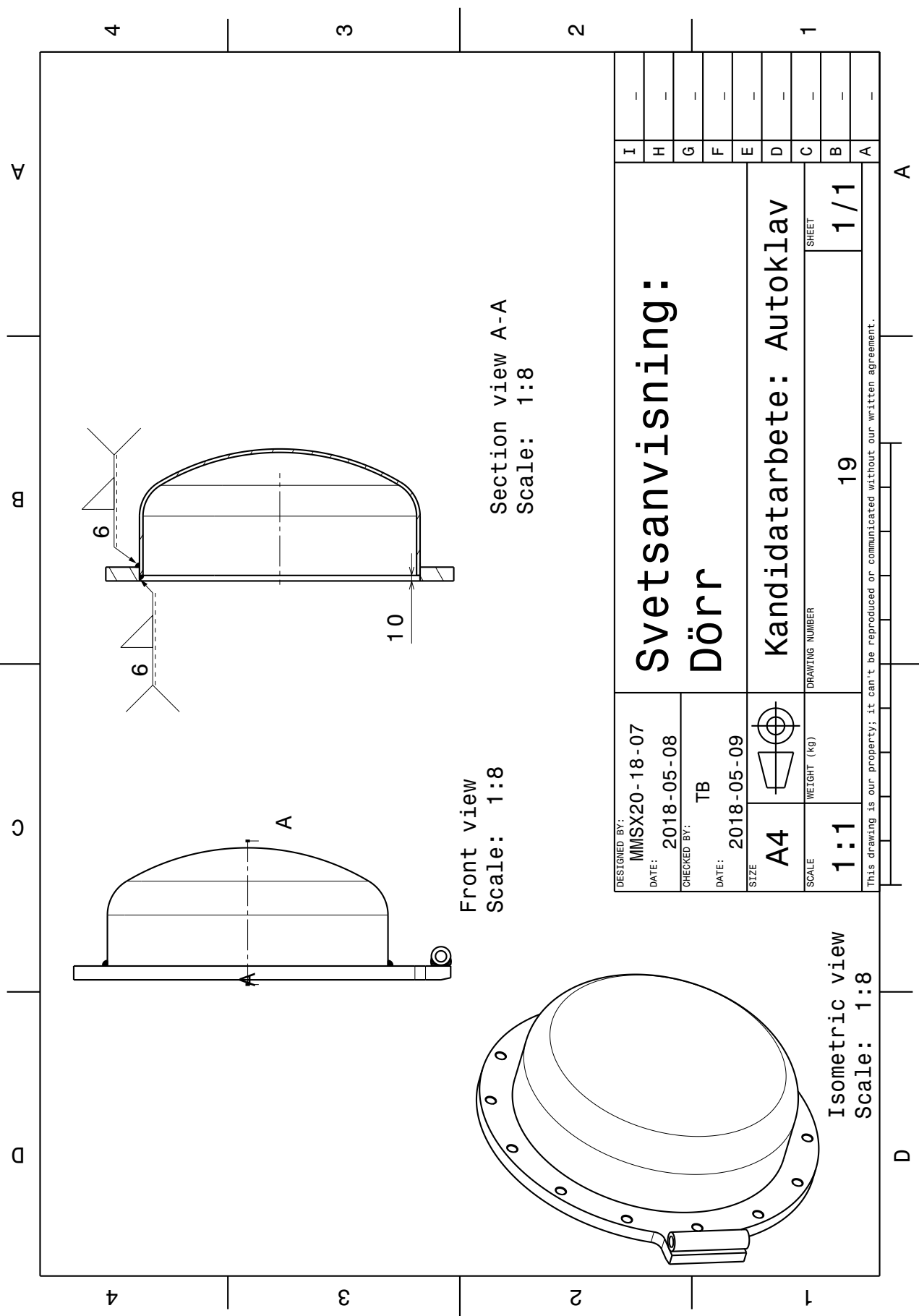


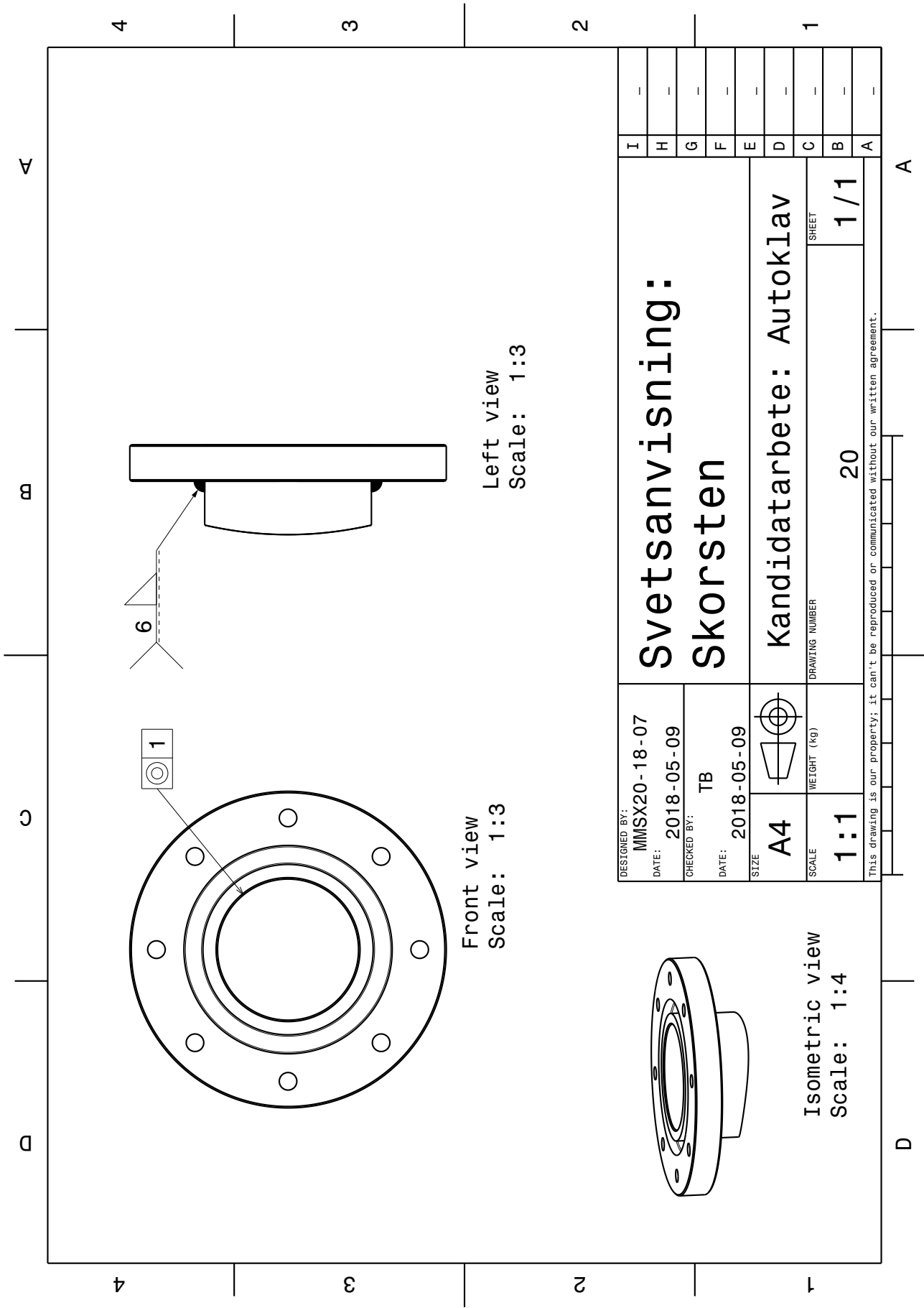




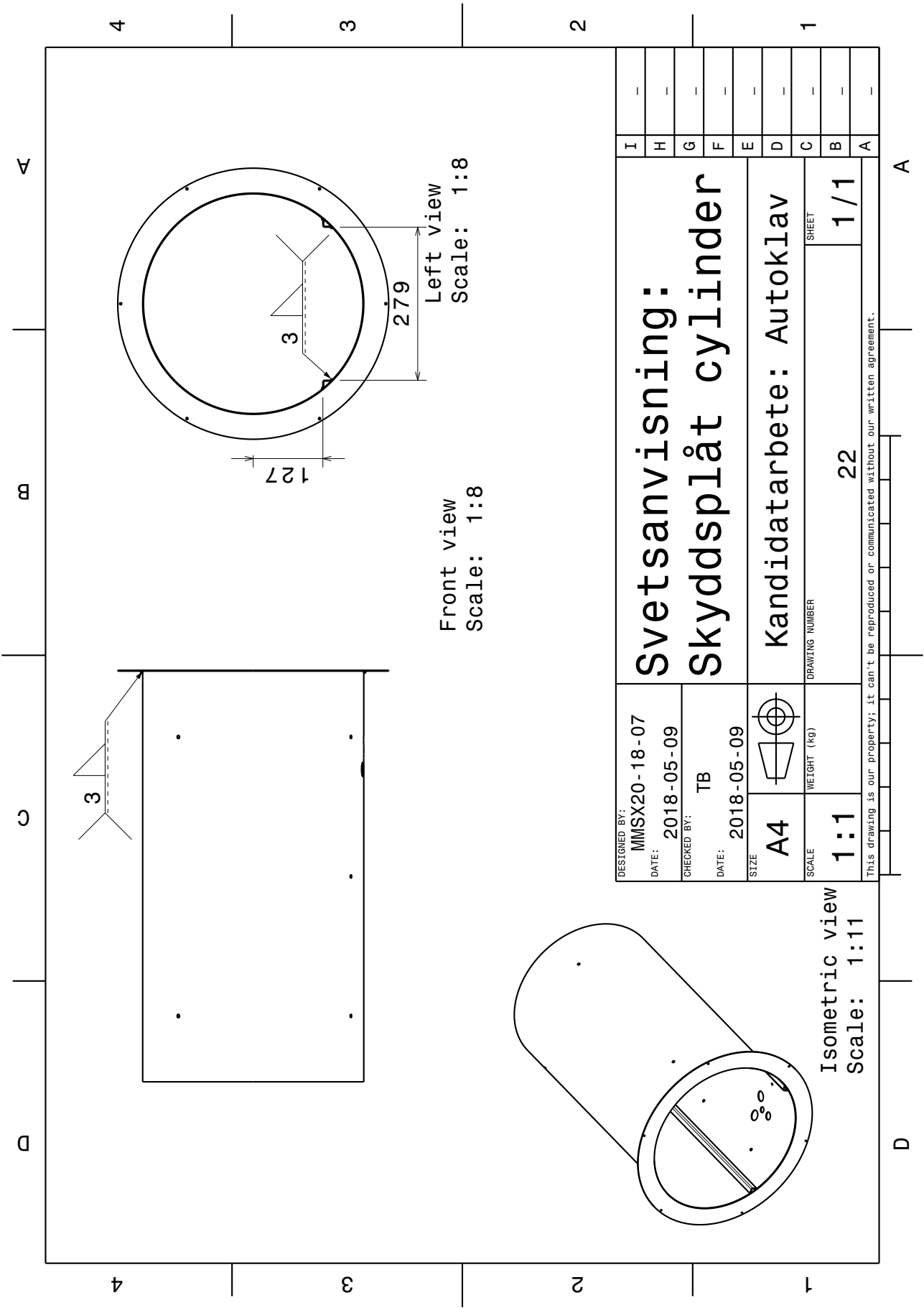


DESIGNED BY: MMSX20-18-07		I	-
DATE: 2018-05-08		H	-
CHECKED BY: TB		G	-
DATE: 2018-05-09		F	-
SIZE A4		E	-
SCALE 1:1		D	-
WEIGHT (kg)		C	-
DRAWING NUMBER 18		B	-
SHEET 1/1		A	-









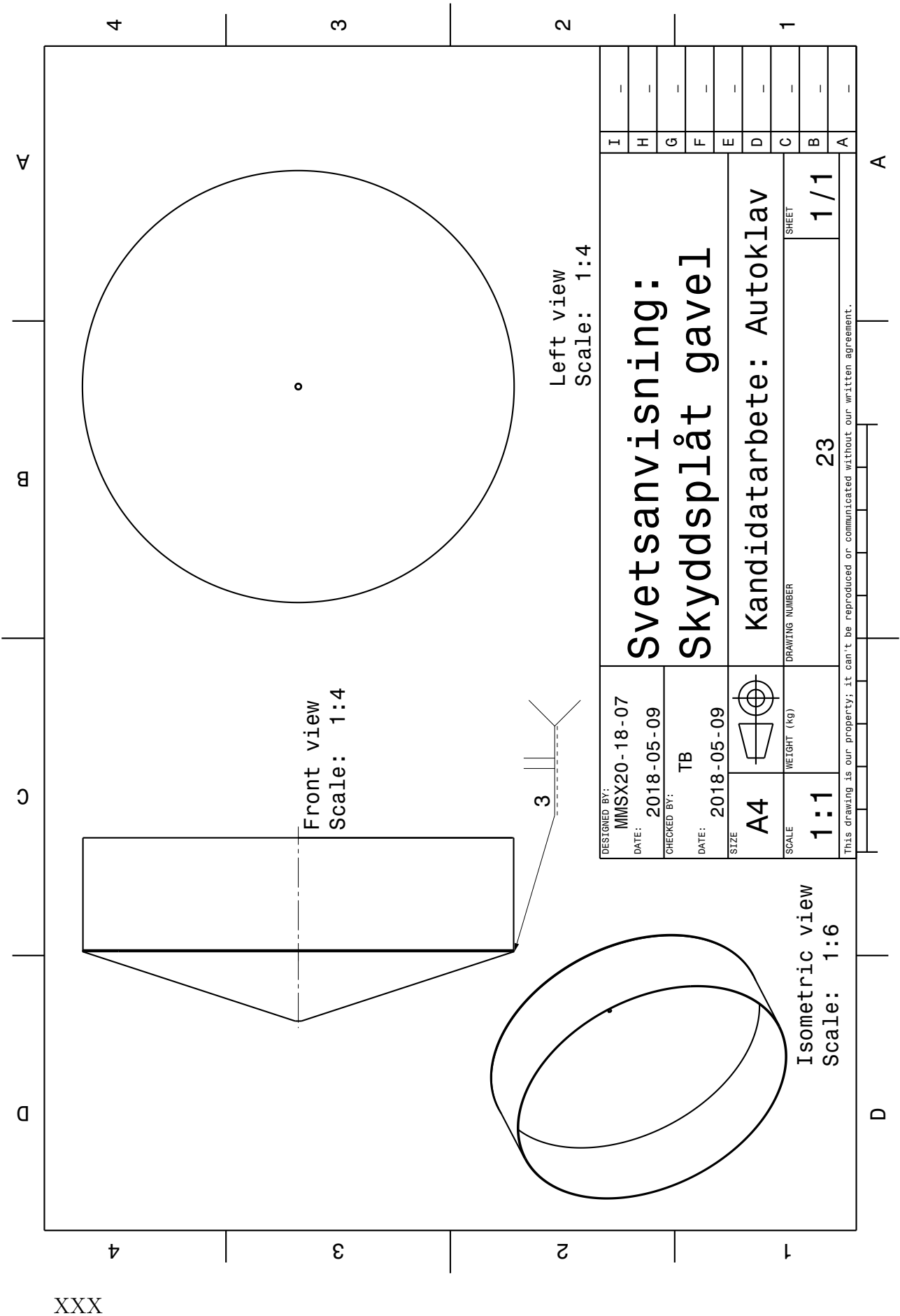
DESIGNED BY: MMSX20-18-07		I	-
DATE: 2018-05-09		H	-
CHECKED BY: TB		G	-
DATE: 2018-05-09		F	-
SIZE A4		E	-
SCALE 1:1		D	-
WEIGHT (kg)		C	-
DRAWING NUMBER 22		B	-
SHEET 1/1		A	-

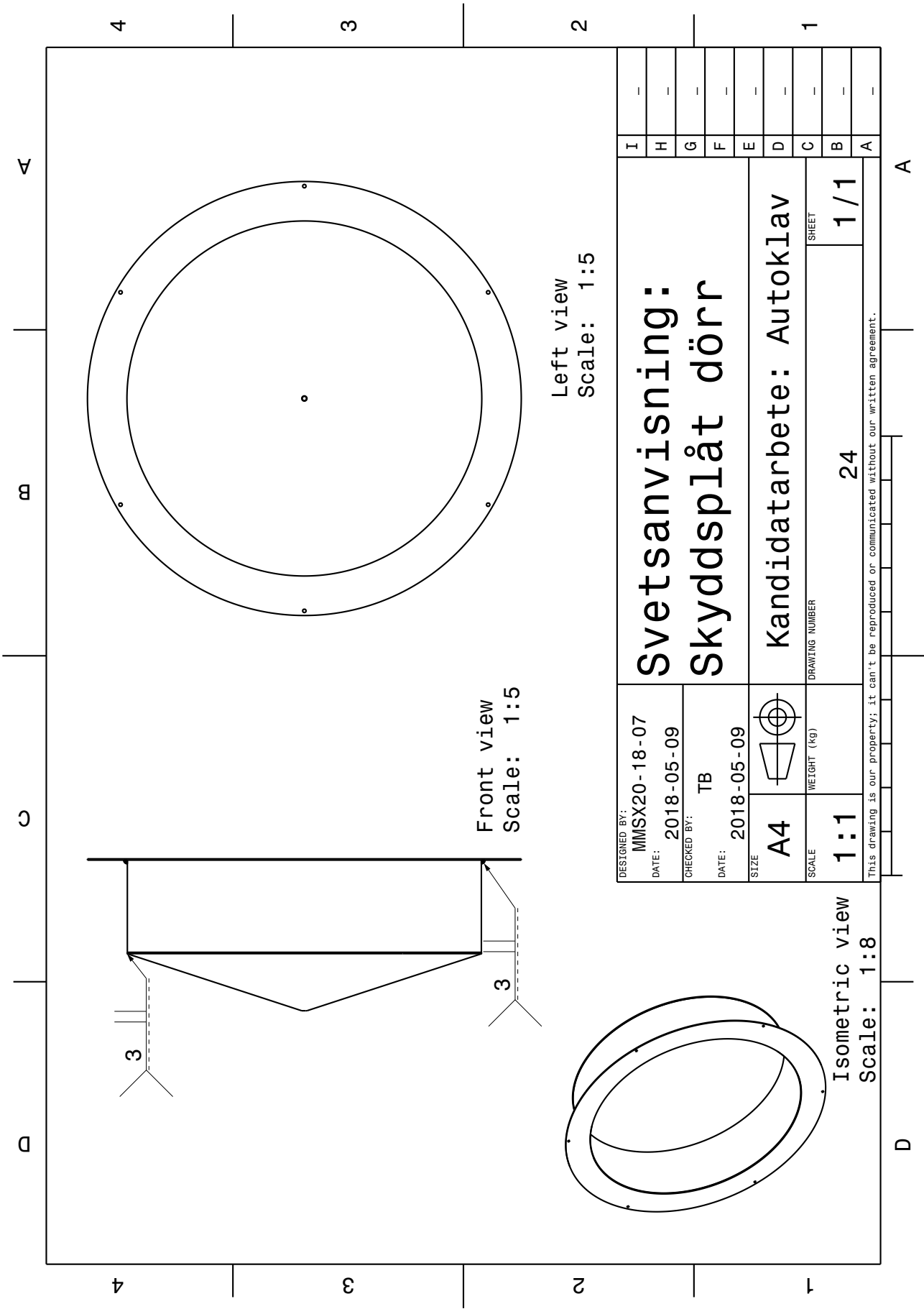
Svetsanvisning:
Skyddsplåt cylinder

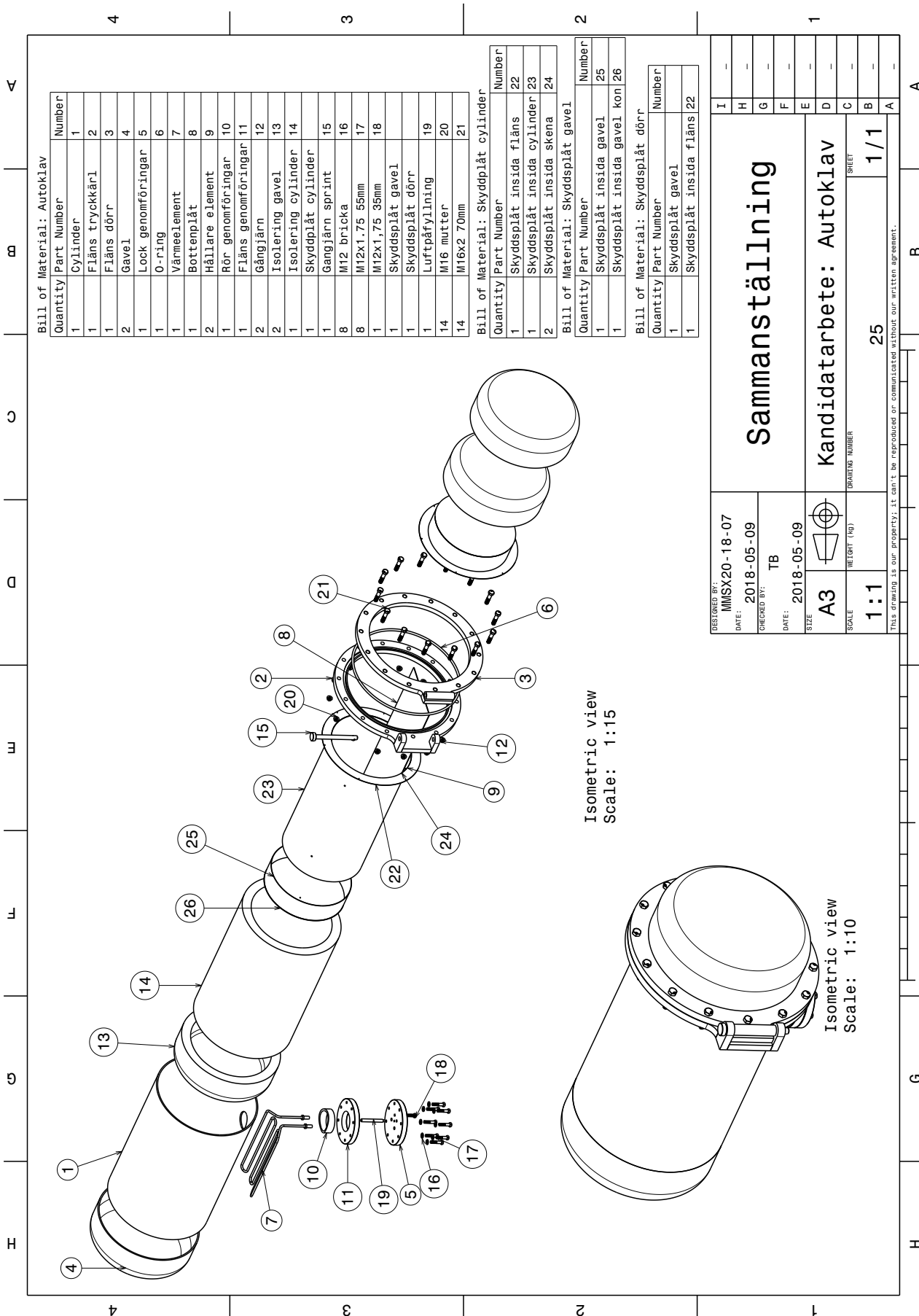
Kandidatarbete: Autoklav

Isometric view
Scale: 1:11

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

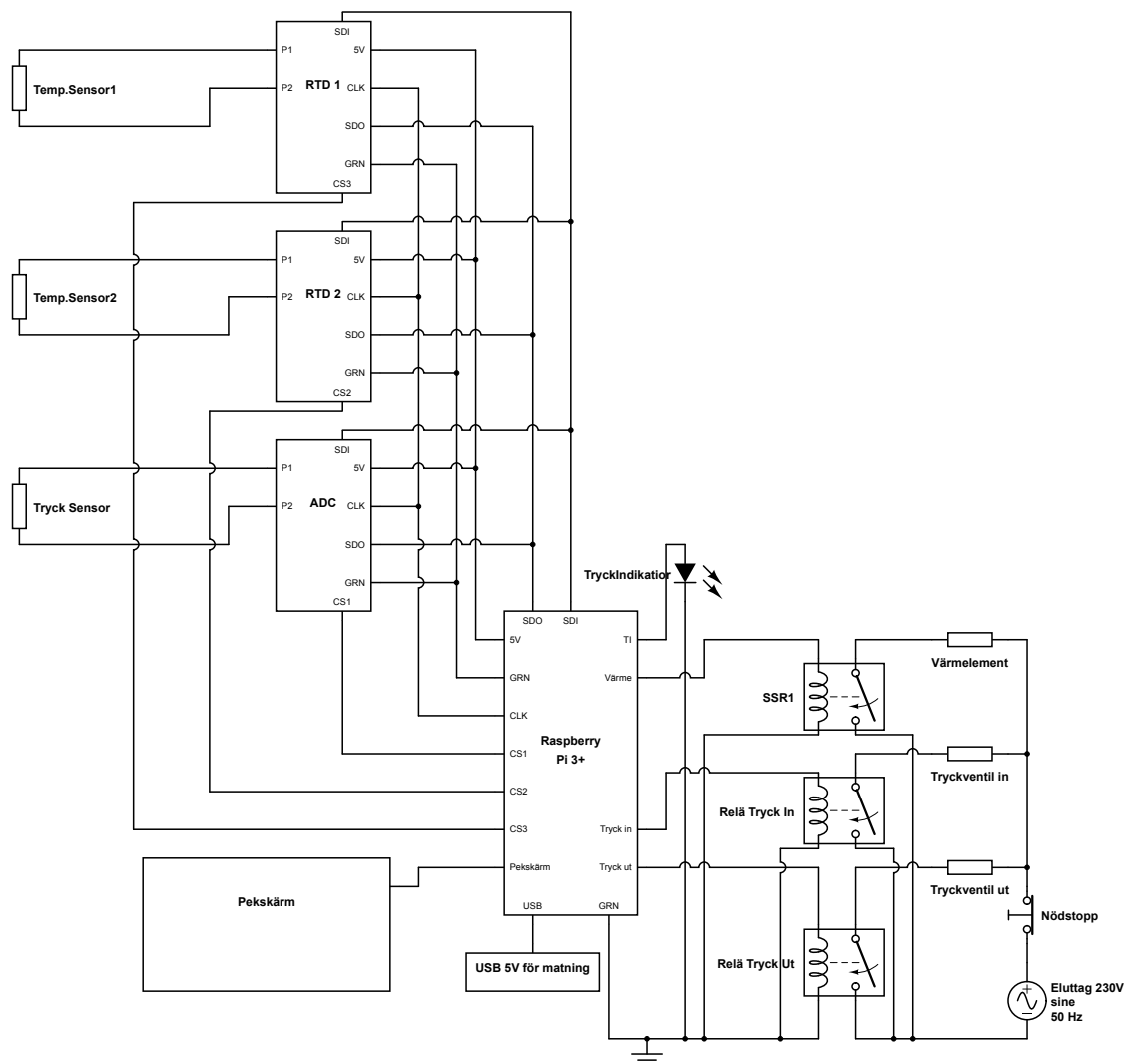






D

Kretsschema



Förkortning	Förklaring
RTD	Resisctance To Digital
ADC	Analog till digital konverterare
SSR	Solid State Relay
SDO	Serial Data Output
SDI	Serial Data Input
GRN	Jord
CLK	Klockpuls
CS1	Chip Select 1
CS2	Chip Select 2
CS3	Chip Select 3

E

Komponentprislista med budget

Komponent och prislista för autoklav					
Delsystem	Komponent	Antal	Beteckning	Inköpsställe	Pris [kr]
Isolering	Stenull	1	PAROC SOLID STENULL	Bauhaus	231
	Aluminiumplåt			Prototypplabbet	
Tryckkärl	Svetsat rör	1	P235GH TC1	Livalco AB	
	Gavel	2	P265GH, EN 10253-2 Type B	Livalco AB	
	Sömlöst rör	1	P235GH TC1	Livalco AB	13995
	Plåtar	2	Tryckkärilstål 730x670x25	Livalco AB	
	Certifikat	4	EN 10204-3.1	Livalco AB	
	O-ring	2		Momentum	2552,5
Elsystem	Rörellement	1	Egen design	Elvärmeprodukter	1000
Styrsystem	Sensor: Tryck	1	PX3AN1BH010BSAAX	Farnell	
	Signalhaterare: ADC	1	MCP3002-I/P	Farnell	
	Sensor: K-typ termo	2	XF-1230-FAR	Farnell	
	Signalhaterare: RTD till K-typ	2	MAX31855PMB1	Farnell	
	Knapp nödstopp	1	705.14.02	Farnell	
	Relä	2	PCJ-105D3MH,301	Farnell	2045,91
	SS-relä	1	G3NA-210B 5-24DC	Farnell	
	Varningslampa	5	KA-3529AQB25Z4S	Farnell	
	Vakuumslang	1	1025V14 00 08	Farnell	
	Raspberry Pi	1	RPI3-MODBP-NOOBS	Farnell	
	Pekskärm	1	RASPBERRYPI-DISPLAY	Farnell	
	Regulator (mek)	1	R38-10F00000	esska	
	Ventil NC G 3/8"	1	207213130604	esska	
	Ventil NO G 3/8"	1	207213230604	esska	
	Dubbelnippel - 1/8" till 2"	2	DN3838HDES00	esska	
	T-stycke utvändig gänga	1	TA38HD000000	esska	4443
	Gångreducering	1	962131010201	esska	
	T-stycke - Innergänga	1	T38HD0000000	esska	
	Övertrycksventil	1	855811312022	esska	
Budget					20000
- Utgifter					24267,41
Resultat					-4267,41