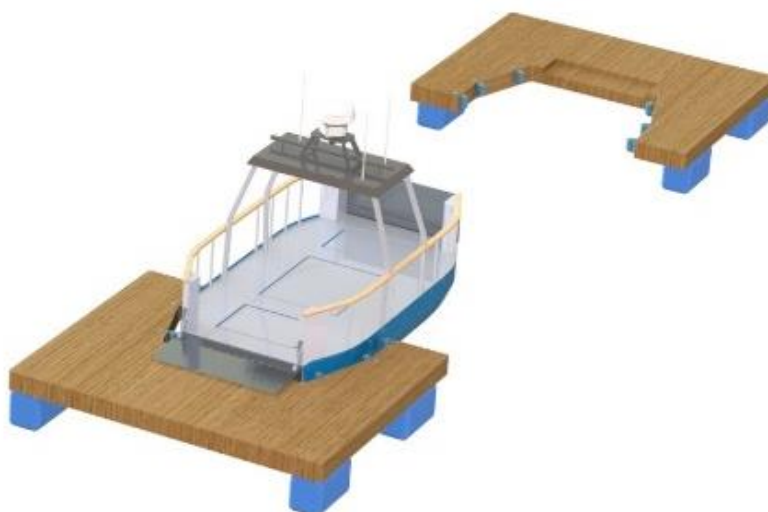




Institutt for maskinteknikk
og produksjon

Design av et automatisk dokkingsystem for en liten autonom passasjerferge

20. Mai 2019



Lars Digerud & Andreas Nordstrøm Fagerhaug



RAPPORT BACHELOROPPGAVEN

**FAKULTET FOR
INGENIØRVITENSKAP**
**Institutt for maskinteknikk og
produksjon**
7491 Trondheim

Besøksadresse:
R.Birkelands vei, 2B, Trondheim

Tittel

Design av et automatisk dokkingsystem for en liten autonom passasjerferge

Design of an Automatic Docking System for a Small Autonomous Passenger Ferry

Prosjektnr

MTP-K-2019-07

Forfattere

Lars Digerud

Andreas Nordstrøm Fagerhaug

Oppdragsgiver eksternt

Egil Eide

Dato levert

20. mai 2019

Antall vedlegg

4

Totalt antall sider

63

Veileder internt

Anna Olsen

Rapporten er ÅPEN

Kort sammendrag

Gjennom oppgaven har prosjektgruppen designet en løsning på et automatisk dokkingsystem for den autonome fergen milliAmpere for Autoferry-prosjektet til NTNU. Løsningen er basert på hvilke forhold og kravspesifikasjoner en liten passasjerferge krever. Deler av systemet er ferdigbygget. Til slutt blir det presentert forbedringer for videre utvikling av design.

Stikkord fra prosjektet

Automatisk dokkingsystem, Autoferry, design, styrkeberegninger, maskintegninger

Forord

Denne bacheloroppgaven er skrevet i forbindelse med avsluttende utdanning ved Institutt for maskinteknikk og produksjon ved NTNU. Hovedoppgaven består av en skriftlig rapport som sammen med en avsluttende presentasjon gir 20 studiepoeng. Oppgavens mål er å få et dypere innsikt i et spesifikt område.

Oppgaven er en del av Autoferry-prosjektet til NTNU med mål om å designe mekanikken i et dokkingsystem for en liten autonom passasjerferge. Gjennom prosjektet har prosjektgruppen fått stor nytte av sine kunnskaper om produktutvikling, mekanikk og maskinkonstruksjon. Prosjektgruppen har brukt SolidWorks for design, simuleringer og beregninger.

Gjennom prosjektet har prosjektgruppen fått god veiledning og oppfølging, og ønsker derfor å takke følgende personer og grupper:

Egil Eide, ekstern veileder og oppdragsgiver på prosjektet

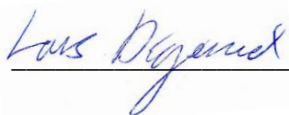
Anna Olsen, intern veileder på prosjektet

Jon Boye Hansen, ekstern båtbygger med mange gode innspill og idéer

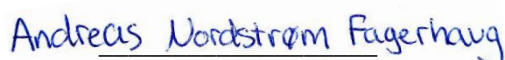
Verksted, for bygging av endelig design og hjelp med det praktiske

En siste takk går til elektrogruppen for lærerikt og godt samarbeid.

Lars Digerud



Andreas Nordstrøm Fagerhaug



Sammendrag

Målet med denne oppgaven har vært å designe et dokkingsystem for fergen milliAmpere i Autoferry-prosjekt til NTNU, som handler om å utvikle en liten urban autonom passasjerferge. Konseptet med å ha en liten autonome ferge er å skape nye muligheter for bytransport, redusere pendlingstid og forbedre livskvaliteten for mennesker som bor i byer. Autoferry-prosjektet har som mål å kombinere og lage teknologi som gjør dette mulig.

Utover det å designe og styrkeberegne dokkingsystemet har prosjektgruppen undersøkt andre mulige dokkingsmetoder, hvilke forhold og krefter et dokkingsystem må designes etter. Denne oppgaven har blitt løst parallelt med en annen bacheloroppgave som har jobbet med å lage et styresystem som automatiserer mekanikken i dokkingsystemet. Dette har blitt utført av elektroingeniører fra NTNU med fordypningen automatiseringsteknikk.

Arbeidet i denne oppgaven følger metoden fra boken *The Mechanical Design Process* (Ullman, 2018) for mekanisk design. Dette innebar for prosjektgruppen å gjøre research, skape idéer og detaljdesigne en spesifikk løsning. Researchfasen skapte grunnlaget for generering av ulike idéer om hvordan et dokkingsystem kunne designes. Dette gjorde at grunnlaget for å gå videre med en løsning ble bedre. Fasen med research satte videre krav til hva den endelige utformingen måtte dekke og bygges for.

På bakgrunn av kravspesifikasjonene skisserte gruppen opp og valgte ut fem potensielle løsninger som ble målt opp mot hverandre. CAD-programmet SolidWorks har vært et sentralt verktøy for å designe, utvikle og visualisere løsninger. Av disse fem løsningene ble én løsning valgt for videre utvikling. Den endelige løsningen ble designet gjennom flere iterasjoner for optimalisering i forhold til kravspesifikasjonene og funksjonalitet. På den endelige løsningen ble det utført simuleringer og analyser på spenning og deformasjoner på det som ble ansett som de mest kritiske komponentene i dokkingsystemet.

Parallelt gjennom prosjektet har gruppen sendt maskintegninger til et verksted på NTNU for produksjon av dokkingsystemet. Deler av det endelige designet som lem og skap for aktuatorene på fergen har blitt bygget. Systemet som låser fergen til bryggen ble ikke bygget på grunn av sen levering av sentrale deler.

Til slutt i rapporten har prosjektgruppen kommet med forbedringer for videre utvikling av den valgte løsningen.

Abstract

The objective of this thesis has been to design a docking system for the ferry, milliAmpere, which is a part of NTNU's Autoferry project about building a small urban autonomous ferry. The concept of having a small autonomous ferry is to create new possibilities for urban transport, reducing commuting time and improve quality of life for people living in cities. The aim of the Autoferry project is about combining and create technology that makes this possible.

In addition to design and calculate the forces on a docking system, the project group have examined other docking methods and analyzed what conditions and forces a docking system requires. The thesis has been done in parallel with another bachelor thesis which has been about automating the mechanics of the docking system. This has been done by electrical engineers within the field automation at NTNU.

The work in this thesis follows the method in the book *The Mechanical Design Process* (Ullman, 2018) for mechanical designing. This has involved doing research, create ideas and detail design of a specific solution. The initial research created the basis for generating several ideas for how a docking system could be formed. This made it easier to determine a good solution for further detail designing. The research phase provided the requirements for what a final design had to cover and be built for.

Based on the required specifications, the group outlined five potential solutions, where each solution was measured against each other. The CAD program SolidWorks was used to develop, design and visualize solutions. Out of these five solutions, one solution was chosen for further development. The final solution was designed through several iterations for optimization in relation to the required specifications and functionality. On the final solution, SolidWorks was used to run stress and deformation analyzes on what the project group think were the most critical components of the docking system.

In parallel with the project the group has sent technical drawings to a workshop at NTNU for building the docking system. Parts of the docking system, like the bow ramp and the actuator cabinets on the ferry have been built. The locking system that locks the ferry to the pier was not built due to late delivery of central parts.

Finally, the project group has shown what further improvements the final design needs.

Innholdsfortegnelse

Forord	i
Sammendrag	ii
Abstract	iii
Innholdsfortegnelse	iv
Figurliste	vii
Tabelliste	viii
Symboler og forkortelser	ix
1 Innledning	1
1.1 Bakgrunn for oppgaven.....	1
1.2 Problemstilling.....	1
1.3 Forutsetninger.....	1
1.4 Løsningsprosess.....	2
1.4.1 Fremgangsmåte.....	2
1.4.2 Fagpersoner og verksted.....	2
1.4.3 SolidWorks.....	2
1.4.4 Oppbevaring og levering.....	3
1.4.5 Utfordringer underveis.....	3
1.5 Oppbyggingen av rapporten.....	3
2 Teori	4
2.1 Generelt om fergeforbindelser.....	4
2.2 Autonome ferger.....	4
2.3 Dokkingmetoder og fordelene med å automatisere denne prosessen.....	5
2.3.1 Vakuumbaserte fortøyningsystemer.....	6
2.3.2 Mekanisk baserte fortøyningsystemer.....	6
2.4 Krefter og bevegelser ved dokking.....	7
2.5 Materialer og korrosjonsbestandighet.....	8
2.5.1 Stål.....	8
2.5.2 Aluminium.....	9
2.5.3 Andre materialer.....	9
2.6 Automatiseringen.....	10

3	Metode.....	11
3.1	Produktutvikling.....	11
3.1.1	Designtenkning	11
3.1.2	Prosjektgruppens tilnærming til produktutvikling.....	12
3.2	Kravspesifikasjoner	13
3.2.1	Konstruksjonskrav.....	13
3.2.2	Funksjon- og brukerkrav	14
4	Rammer og teknologivalg for løsningene	15
4.1	Dimensjonene til fergen.....	15
4.2	Hydrauliske vs elektriske lineæraktuatorer	15
4.3	Materialvalg	17
4.4	Bryggeutforming.....	18
5	Aktuelle løsninger	19
5.1	Kriteriene for de aktuelle løsningene	19
5.1.1	Løsning 1 - Rampe.....	20
5.1.2	Løsning 2 - Vakuum	21
5.1.3	Løsning 3 - Mekanisk.....	22
5.1.4	Løsning 4 - Krokodillegap	23
5.1.5	Løsning 5 - Karabinkrok.....	25
5.2	Valg av endelig løsning.....	27
6	Valgt løsning og detaljdesign	28
6.1	Design av skap.....	28
6.2	Design av lem	29
6.3	Design av system kai	31
6.3.1	Løsning 1.1	31
6.3.2	Løsning 1.2	32
6.3.3	Løsning 1.3	32
6.3.4	Endelig løsning 1.4	33
6.4	Design av krok og brakett til aktuatorene	35
6.5	Dokkingprosessen	36
7	Beregning og dimensjonering	38
7.1	Lineær aktuatorene.....	39
7.2	Lem.....	40

7.3	System kai	43
7.3.1	Oppbygging og kraftoverføring på system brygge.....	43
7.3.2	Belastning på hjulaksel.....	44
7.3.3	Fjæropplagring	44
7.4	Oppsummering av beregningene.....	47
8	Simulering og sammenligning.....	48
8.1	Simuleringer	48
8.2	Resultater fra simulering.....	52
8.3	Refleksjon mellom håndberegninger og simulering	53
9	Resultater fra produksjon.....	54
9.1	Det produserte systemet	54
9.2	Utfordringer under produksjon	55
10	Analyse og diskusjon.....	56
10.1	Diskusjon av konsept og løsning	56
10.2	Videre utvikling	58
10.2.1	Forbedringer på nåværende design.....	59
10.3	Forslag til ny løsning.....	59
11	Konklusjon.....	60
12	Referanser og kilder	61
	Vedleggsliste.....	63

Figurliste

Figur 1 – milliAmpere.....	1
Figur 2 – Vakuumbasert fortøyningsystem	6
Figur 3 – Mekanisk basert fortøyningsystem	6
Figur 4 – Krefter på ferge	7
Figur 5 – Krefter fra passasjerer.....	7
Figur 6 – Krefter fra siden. Den store røde pilen illustrerer resultantkraften av undervannsstrømmen.....	8
Figur 7 – Ultralydsensor	10
Figur 8 – Nærhetssensor	10
Figur 9 – Dimensjoner milliAmpere	15
Figur 10 – milliAmpere.....	15
Figur 11 – Oppbygning elektrisk lineæraktuator	15
Figur 12 – Brygge ovenfra	18
Figur 13 – Brygge forfra	18
Figur 14 – Løsning 1	20
Figur 15 - Løsning 2	21
Figur 17 – Løsning 3, sett ovenfra.....	22
Figur 17 – Løsning 4, sett fra siden	23
Figur 19 – Løsning 5, sett fra siden	25
Figur 19 – Løsning 5 låst i dokk	25
Figur 20 – Løsning 5 opplåst	25
Figur 22 – Plassering av skap	28
Figur 22 – Skap sett forfra, bakfra og fra siden.....	28
Figur 24 – Dimensjoner lem.....	29
Figur 25 – Oppbygning lem	30
Figur 26 – Forslag 1 på fjæring av lem	30
Figur 27 – Endelig løsning på fjæring av lem	30
Figur 28 – Løsning 1.0	31
Figur 29 – Løsning 1.1	31
Figur 30 – Løsning 1.2	32
Figur 31 – Løsning 1.3	32
Figur 32 – Løsning 1.4 med støtdempere	33
Figur 33 – Løsning 1.4 med stivt system	33
Figur 34 – Løsning 1.4 maks utslag	33
Figur 34 – Løsning 1.4 med ferge i normalposisjon og ferge tungt lastet	34
Figur 36 – Løsning 1.4 sett forfra. Illustrasjon med forsterkere/forlengere for hjulaksel	34
Figur 37 – Løsning 1.4 sett fra siden. Utslaget til hjulet kan justeres. Illustrasjon med støtdempere	34
Figur 38 – Løsning 1.4 sett ovenfra.....	34
Figur 39 – Krok	35
Figur 40 – Brakett.....	35
Figur 41 – Fergen kommer inn mot kai.....	36
Figur 42 – Lem senkes til 45°.....	36
Figur 43 – Lem og hjul i kontakt.....	36

Figur 44 – System i lås.....	37
Figur 45 – Lem og hjul på vei opp	37
Figur 46 – Opplåst system.....	37
Figur 47 – Krefter som operer på system	38
Figur 48 – Posisjon til aktuator	39
Figur 49 – Dimensjoner til aktuator	39
Figur 49 – Krefter på lem med egenvekt og aktuator.....	40
Figur 51 – Krefter på lem med passasjerer	41
Figur 52 – Krefter system kai	43
Figur 53 – Krefter hjulkaksel	44
Figur 54 – Krefter system kai	44
Figur 55 – Fjæropplagring	45
Figur 56 – Bevegelsesbanen til aksel	46
Figur 57 – Spenningsanalyse på aksel.....	48
Figur 58 – Hjulopplagring	48
Figur 59 – Analyse av utbøyning på aksel	49
Figur 60 – Spenningsanalyse på forlenger/avstiver	49
Figur 61 – Spenningsanalyse av brakett.....	50
Figur 62 – Brakett.....	50
Figur 62 – Spenningsanalyse på avstiver lem	51
Figur 64 – Detalj over høyeste spenning.....	51
Figur 64 – Analyse av utbøyning på avstiver lem.....	52
Figur 66 – Produsert skap	54
Figur 67 – Produsert lem oppreist	54
Figur 68 – Produsert lem utslagsvinkel	55
Figur 69 – Produsert lem liggende	55
Figur 70 – Skade på foring.....	55
Figur 71 – Nytt forslag.....	59
Figur 72 – Nytt forslag.....	I
Figur 73 – Dokkingprosessen sett fra siden. Går fra høyre mot venstre	I
Figur 74 – Nytt forslag illustrert	I

Tabelliste

Tabell 1 – Symboler med definisjoner	ix
Tabell 2 – Forkortelser med definisjoner	ix
Tabell 3 – Hydrauliske aktuatorer	16
Tabell 4 – Elektriske aktuatorer	16
Tabell 5 – Vurdering av løsning 1	20
Tabell 6 – Vurdering av løsning 2	21
Tabell 7 – Vurdering av løsning 3	22
Tabell 8 – Vurdering av løsning 4	24
Tabell 9 – Vurdering av løsning 5	26

Tabell 10 – Resultat av løsningsvurdering	27
Tabell 11 – Oppsummering av beregningene	47
Tabell 12 – Resultater fra simulering	53

Symboler og forkortelser

Tabell 1 – Symboler med definisjoner

Symbol	Definisjon	Enhet
F	Kraft	N
F _x	Kraft i x-retning	N
F _y	Kraft i y-retning	N
M	Moment om akse	Nm
F _D	Dynamisk kraft	N
m	Masse	kg
g	Tyngdeakselerasjon	m/s ²
L	Lengde	m
I _z	Arealtreghetsmoment	mm ⁴
t	Veggtykkelse	mm
y	Avstand til massesenter	mm

Symbol	Definisjon	Enhet
F_passasjer	Kraft passasjer	N
F_lem	Kraft lem	N
F_aktuator	Kraft aktuator	N
F_hjul	Kraft hjul	N
F_ferge	Kraft ferge	N
F_fjær	Kraft fjær	N
S _n	Vandringen til en fjær	mm
K	Fjærkonstant	N/mm
L _n	Maks belastet lengde	mm
F _o	Initialkraft	N
L _o	Ubelastet lengde	mm

Tabell 2 – Forkortelser med definisjoner

Forkortelse	Definisjon
CAD	Computer Aided Design
CNC	Computer Numerical Control (maskineringsmetode)
DAK	Dataassistert Konstruksjon
FEM	Finite Element Analysis
PLS	Programmerbar Logisk Styring (styringsenhet)
POM	Polyoksymetulen (termoplast)

1 Innledning

1.1 Bakgrunn for oppgaven

Biler og busser som er helt eller delvis selvkjørende blir mer og mer synlig i hverdagen til mennesker. Å frakte mennesker over sjø har frem til nyere tid i utgangspunktet kun blitt gjort av mennesker. Som en konsekvens av nyere teknologi har mulighetene for å del- og helautomatisere denne prosessen blitt mulig. Dette har åpnet opp for muligheten av å ha mindre urbane ferger som transportmidler. Byer er ofte sentrert rundt elver og havner, der vannet ofte fungerer som en hindring for fotgjengere. Å bygge bruer blir i mange tilfeller ikke aktuelt, da dette er dyrt og kan være til hinder for båttrafikken.



Figur 1 – milliAmpere

Dette er noe NTNU gjennom Autoferry-prosjektet ser på og har som mål om å utvikle teknologi og konsepter for, for å gjøre det mulig å sette i bruk små autonome passasjerferger for transport av mennesker i urbane områder.

1.2 Problemstilling

Denne oppgaven er skrevet med motivasjon om å designe en løsning for et automatisk dokkingsystem for en liten autonom passasjerferge. Utover det å designe en løsning, skal prosjektgruppen analysere og styrkeberegne løsningen. Dersom tiden tillater det, er det ønskelig å få bygd og testet systemet om bord i fergen milliAmpere.

Oppgaven kommer til å presentere prosjektgruppens tanker og refleksjoner om hva som kreves av et automatisk dokkingsystem. Videre vil det bli presentert idéer og konsepter på hvordan fergen kan låses. Den endelige løsningen er en prototype laget for fergen milliAmpere i NTNUs Autoferry-prosjekt.

1.3 Forutsetninger

Hovedforutsetningen i prosjektet har vært at låsesystemet og ombordstigning til dokkingsystemet skulle plasseres i baug og i akterenden av fergen. Passasjerfergen driftes av elektrisitet. Denne oppgaven ikke skal ta med lading av batteriene når fergen ligger til kai som en del av oppgaveløsningen.

Videre var en annen forutsetning for oppgaven at måten fergen skulle låses på ikke skulle bli designet eller dimensjonert for krefter som angrep på tvers av fergens kjøreretning. Dette er krefter som kan komme av undervannsstrømmer som går på tvers av skroget og kan gi et moment

på låsing. Bakgrunnen for denne begrensningen er at bryggen kan utformes slik at den tar opp sidekrefter. Låsemekanismene gruppen har designet har derfor ikke tatt hensyn til laterale krefter.

En annen forutsetning for mekanikken var hvordan fergen beveget seg i forhold til bryggen. Oppgaven tar høyde for at fergen kan bevege seg opp og ned med et utslag på 10 cm mellom brygge og baug på fergen.

1.4 Løsningsprosess

1.4.1 Fremgangsmåte

I starten av semesteret hadde gruppen møte med oppdragsgiver på NTNU, hvor prosjektet, tanker og idéer ble presentert for bachelorgruppen. Det ble tidlig klart at gruppen stod fritt til å komme opp med egne idéer og konsepter på hvordan låsing av fergen kunne være. Det ble i starten brukt mye tid på idémyldring og utvikle idéer på hvordan passasjerfergen kunne låses, hvilke faktorer, krav og rammer som måtte være på plass. Det ble skissert opp flere løsninger, der hver løsning ble vurdert og diskutert sammen med oppdragsgiver. Løsningene ble også utviklet og vurdert med hjelp av en ekstern båtbygger for å få bedre innsikt om hva som kunne fungere og ikke fungere i praksis.

Når én løsning ble valgt, ble denne løsningen designet i detalj. Detaljdesigningen handlet om å optimere designet for produksjon, slik at løsningen kunne bygges av et verksted hos NTNU. Beregninger og forbedringer har blitt gjort parallelt i utviklingen, men de største delene av beregningene har blitt gjort etter produksjon for evaluering av det endelige designet.

1.4.2 Fagpersoner og verksted

Gjennom prosjektet har prosjektgruppen søkt hjelp og kunnskaper fra firmaer som jobber med båtbygging og fra leverandører om deres produkter. Dette er ekspertise som har hjulpet prosjektgruppen i å få nye idéer og dypere innsikt til ulike komponenter i prosjektet.

For å kunne bygge et fungerende system har prosjektgruppen jobbet tett sammen med NTNUs mekaniske verksted på teknisk kybernetikk for å optimalisere design for produksjon og gjøre fortløpende forbedringer.

1.4.3 SolidWorks

Som simulerings- og analyseverktøy har CAD-programmet SolidWorks blitt brukt for å lage 3D-modeller. SolidWorks har også blitt brukt til å gjøre spenningsanalyser, visualisere konsepter, lage maskintegninger og som et verktøy til å vise andre hvordan løsninger fungerer for å få innspill til forbedringer

1.4.4 Oppbevaring og levering

Gruppen har brukt Google Drive som felles plattform for å lagre og samle informasjon, da Google Drive tilbyr en løsning som enkelt kan deles på tvers av datamaskiner og har flere innebygde verktøy som Word, Excel og avanserte delingsfunksjoner. Google Drive har fungert helt utmerket til dette.

1.4.5 utfordringer underveis

Underveis i prosjektet har prosjektgruppen møtt på flere utfordringer. Den første utfordringen var at det fantes lite tilgjengelig forskningslitteratur om utvikling av automatiske dokkingsystemer for mindre passasjerferger. Som et resultat av dette ble det viet en del tid til å undersøke ulike låsmekanismer fra andre områder og prøve å tilpasse disse til prosjektet. En annen utfordring var å forstå hvordan ulike krefter og bevegelser virket på dokkingsystemet, og hvordan disse kreftene kunne blitt tatt hånd om.

Etterhvert som det ble noen få løsninger som prosjektgruppen mente var gode valg, var det utfordrende for prosjektgruppen å velge ut én løsning for videre utvikling. Dette ble løst ved å lage en vurderingsfase hvor hver løsning ble vurdert ut ifra hvor godt de oppfylte de ulike kriteriene.

1.5 Oppbyggingen av rapporten

Rapporten er bygd opp slik at relevant teori kommer først. Deretter produktutviklingsmetoden prosjektgruppen har jobbet etter. Under metodekapittelet blir kravspesifikasjonene til hva den endelige løsningen må ha bli presentert. Videre blir rammene for løsningene satt. Deretter blir fem løsninger diskutert og målt opp mot hverandre, hvor én blir valgt for videre detaljdesigning. Denne løsningen blir beregnet og detaljsimulert. Til slutt blir resultat, diskusjon og konklusjon presentert.

2 Teori

Hensikten med dette kapittelet er å presentere teori som har vært viktig i prosjektet og ansett som relevant for å løse oppgaven.

2.1 Generelt om fergeforbindelser

Ferger blir brukt som en forbindelse mellom to steder hvor det er vanskelig eller ugunstig å bygge en permanent veiforbindelse. Ferger kan enklere ta seg fram der biler og busser ikke kan gå. En fergeforbindelse blir oftere sett på som et billigere alternativ til bruer (Jørgensen & Solvoll, 2019). En fergeforbindelse øker transporttilbudet i byer og tettsteder.

Størrelsene og utformingen av ulike passasjerferger er forskjellig og avhenger av behovet. Til felles for passasjerferger er at de i større eller mindre grad blir styrt av personell. Størrelsen på besetningen som kreves for å operere en fergeforbindelse varierer, der prosessene som er involvert i en fergeforbindelse har som konsekvens av ny teknologi blitt effektivisert de siste tiårene.

2.2 Autonome ferger

En rekke større selskaper har fattet interesse for autonome ferger og jobber med å skape styringssystemer som gjør det mulig å bruke autonome ferger. Innenfor den maritime sektoren har Kongsberg Maritime (Kongsberg Maritime, 2017), Rolls Royce (Sawers, 2018), ABB (ABB, 2018) og Wärtsilä (WÄRTSILÄ, 2018) laget fungerende konsepter av autonome ferger. Til felles for disse firmaene er at de utvikler systemer som gjør store ferger autonome, men utvikler ikke det fysiske dokkingsystemet som kreves for at en ferge skal kunne dokke automatisk.

Nivået av hva som defineres som autonomt varierer og handler om hvor mye en passasjerferge kan operere på egenhånd. Norwegian Forum for Autonomous Ships, NFAS, foreslår fire grader av autonomitet (NFAS, 2017). Forskjellen mellom de ulike nivåene er hvor mye personellet behøver å involvere seg. Disse fire nivåene er:

- **Hjelp til beslutninger:** Fergen gir ved hjelp av sensorer feedback til mannskapet om ulike situasjoner.
- **Automatikk:** Fergen har ulike automatiske styresystemer som utfører ulike operasjoner uten menneskelig interaksjon.
- **Begrenset autonom:** Fergen kan operere seg selv i de fleste situasjoner og har ulike forhåndsdefinerte prosedyrer for dette.
- **Full autonomitet:** Fergen kan operere alle situasjoner av seg selv.

I Autoferry-prosjektet utvikles milliAmpere til å ha en autonomitetsgrad på fire, full autonomitet.

MilliAmpere skal kunne fungere som en helt autonom ferge uten noe mannskap, men som skal kunne bli overvåket fra en sentral som kan gripe inn om nødvendig. For at milliAmpere skal kunne fungere autonomt, er det nødvendig at dokkingprosessen ikke er for vanskelig for en autonom ferge. Det er derfor viktig at et dokkingsystem fungerer enkelt, og at mekanismene som dokkingsystemet må ha ikke er for utfordrende å implementere i et styringssystem.

2.3 Dokkingmetoder og fordelene med å automatisere denne prosessen

Det eksisterer i dag få løsninger på automatiske dokkingsystemer for mindre autonome ferger. Det finnes imidlertid noen firmaer som har utviklet teknologi for å fortøye store skip til kai og disse løsningene blir presentert i senere i dette delkapittelet.

Måten ulike ferger kan fortøyres på er flere. Ferger kan bli fortøyd til en brygge med tau eller stå til en brygge med motorkraft. Utformingen av et dokkingsystem kan være forskjellig og kommer an på forhold som fergestørrelse og omgivelser. Det som er til felles, er at de fleste dokkingmetoder har et variert behov for personell som kan utføre spesifikke oppgaver i dokkingprosessen. Dette er oppgaver som utføres omtrent likt hver gang.

Fordelene med å automatisere dokkingprosessen regnes for å være flere:

- **Drift og økonomi:** Det vil bli mindre behov for personell som må være til stede for å styre og dokke fergen. Det kan for eksempel være en sentral som overvåker flere dokkingsystemer samtidig.
- **Miljø:** En elektrisk passasjerferge kan frakte flere mennesker over nye strekninger. Dette åpner for muligheten for at brukeren kan komme seg fra A til B på en smartere og mer miljømessig måte.
- **Sikkerhet:** Et automatiske dokkingsystem kan øke sikkerheten ved å redusere menneskelige feil. Et konkret eksempel på dette er at kapteinen kan fokusere mindre på dokkingen, men mer på omgivelsene og bryte inn ved nødvendighet. Ved å benytte et automatisk dokkingsystem er det dessuten ikke lenger nødvendig å bruke tau og vaiere som fortøyningsmetode. 53% av alle ulykker ved fortøyning på skip er relatert til tau og vaiere ifølge det marine forsikringsselskapet, The UK P&I Club (Fuse, 2019).
- **Nye muligheter:** Fergen kan fungere dynamisk, som innebærer at brukeren kan trykke på én knapp hvor fergen kan komme på bestilling og transportere brukeren til en annen bestemt destinasjon. Behovet for å bygge bruer kan reduseres, og behovsprøves med en autonom ferge. Dersom det ikke lenger er nødvendig med en autonom ferge over en bestemt strekning, kreves det lite for å flytte fergen og dokkingsystemet til et nytt område hvor det er mer aktuelt.

2.3.1 Vakuumbaserte fortøyningssystemer

Trelleborg AS og Cavotec Group er to firmaer som har spesialisert seg på å lage fortøyningssystemer for store skip. De leverer et vakuumbasert system, som fungerer ved å presse en plate som fungerer i prinsipp som en «sugekopp» til skipsskroget, der luften imellom blir redusert. Dette systemet skaper et undertrykk som låser skipet til kaien.

Fordelen med denne fortøyningsmetoden er at den kan fortøye store skip raskt og krever færre arbeidere i dokkingprosessen. Dette korter ned tiden som kreves for å fortøye store lasteskip, som må fortøyes raskt, slik at de kan frakte varer på kortere tid. En annen fordel med systemet er at skroget kan ha noe ulik form og platene krever ikke at de må plasseres på samme sted på skipsskroget hver gang. Når skipene er fortøyd, har skipet fortsatt mulighet til å kunne bevege på seg, ettersom armene kan gjøres fleksible. Videre kan systemet enkelt monitores fra en sentral ved å måle trykket mellom hver plate og slik få feedback på hvor sterk låsingen er (Trelleborg, 2019).



Figur 2 – Vakuumbasert fortøyningssystem

2.3.2 Mekanisk baserte fortøyningssystemer

TTS Group er et annet firma som har utviklet en mekanisk fortøyningsmetode for store skip (TTS, 2006). Denne metoden fungerer ved å bruke mekaniske armer som låser seg på ulike festepunkter på skipet. Når armene er låst til skipet, kan armene trekke skipet til kaien, slik at skipet blir helt låst til kaien. Skipet har dermed ingen mulighet til å bevege på seg, og dette anses som gunstig når store kontainere skal lastes mellom skip og land.

Fordelen med denne metoden er at systemet tåler store krefter. Ulempen er at skipet må være bygget slik at armene kan gå inn i på ulike festepunkter på skipet og gripe.



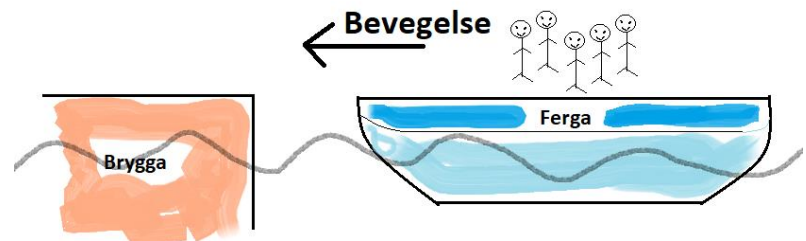
Figur 3 – Mekanisk basert fortøyningssystem

2.4 Krefter og bevegelser ved dokking

Utfordringen med å designe det mekaniske på et automatisk dokkingsystem for en liten passasjerferge er at ferger og brygger beveger seg dynamisk når de ligger i vannet. Mindre ferger blir mer påvirket av omgivelsene enn store skip. Det kreves større krefter for å få de samme utslagene på et stort skip, ettersom faktorene som påvirker stabiliteten til en liten ferge som bølger, vind og tyngden gir større utslag på en mindre passasjerferge. Et annet moment som er viktig er når fergen går inn for dokking er antall passasjerer og hvor passasjerene befinner seg på fergen. Illustrasjonene viser hvilke krefter et dokkingsystem må ta hensyn til.

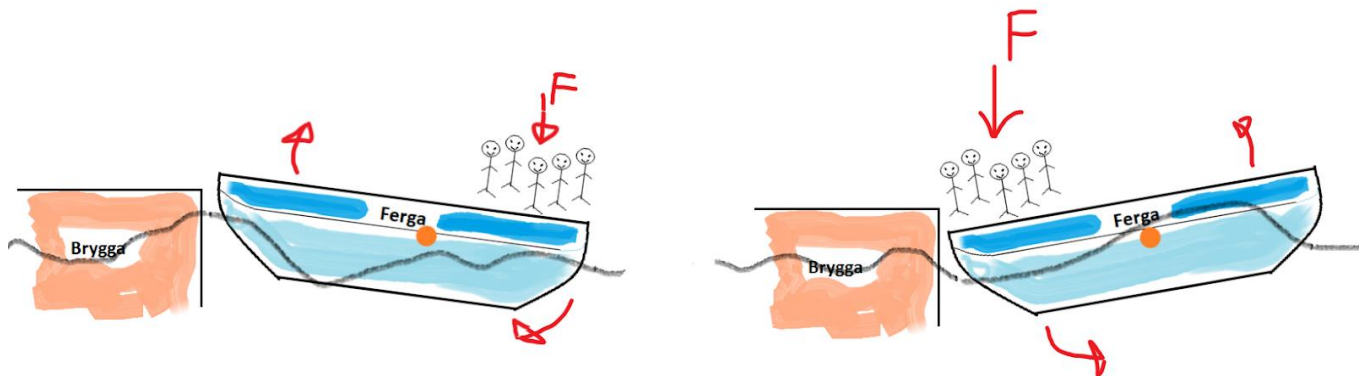
Når fergen legger til bryggen vil

styringssystemet til fergen redusere farten, slik at fergen dokker med lav fart. Likevel kan styringssystemet til en autonom ferge svikte eller beregne feil hastighet på grunn av undervannsstrømmer, bølger, vindkast og dermed komme inn for dokking med for høy hastighet. Et dokkingsystemet bør derfor være dimensjonert til å tåle slikt potensielt støt og ha mulighet til å dempe disse støtene for passasjerene, slik at det ikke blir noe rykk når fergen dokker.



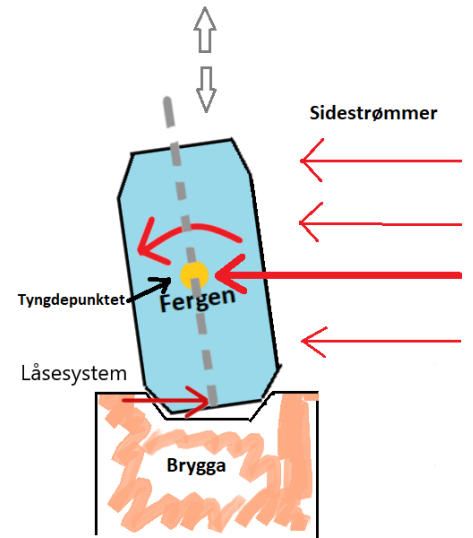
Figur 4 – Krefter på ferge

Når fergen ligger til bryggen kan det være bølger fra passerende båter som gjør at fergen beveger seg. I tillegg vil ombordstigningen påvirke fergens bevegelser ytterligere. Når passasjerene går om bord vil tyngdepunktet til fergen flytte på seg, slik at fergen blir presset ned i ene enden, mens fergen blir løftet opp i andre enden. Denne bevegelsen blir størst hvis alle passasjerene går om bord samtidig i den ene enden og det samtidig kommer en bølge som løfter akterenden.



Figur 5 – Krefter fra passasjerer

Krefter fra siden er aktuelt hvis opplegget med ferge og brygge er plassert på tvers i en kanal, vil kanalens strømretning gå på tvers av fergeren. Denne strømmen vil gi sidekrefter på fergeren som kan skape et moment på låsesystemet. Fergesiden vil kunne fungere som en lang arm, slik at de laterale kreftene som virker på et låsesystem i baugen blir forsterket.



Figur 6 – Krefter fra siden. Den store røde pilen illustrerer resultatantkraften av undervannsstrømmen

Disse problemstillingen var ikke utforsket tidligere med tanke på et dokkingsystem for en liten passasjerferge. Til forskjell fra store skip, blir en liten passasjerferge påvirket av omgivelsene i mye større grad. I tillegg til at fergeren, milliAmpere, var en prototype, fantes det lite data på stabiliteten og hvordan fergeren oppførte seg når den lå i vannet.

2.5 Materialer og korrosjonsbestandighet

Dokkingsystemet må stå inntil havkanten og må derfor bygges i korrosjonsbestandige materialer, slik at det ikke korroderer. Delkapitlene under gir derfor informasjon om de ulike materialene som var aktuelle i prosjektet.

I dette prosjektet innebar dimensjoneringen materialegenskaper som flytegrense og elastisitetsmodul. Flytegrensen har vært viktig fordi den sier noe om når et materiale begynner å få plastisk deformasjon. Ved plastisk deformasjon vil materialet ikke lenger gå tilbake til sin opprinnelige form og dermed være permanent deformert. Elastisitetsmodulen er forholdet mellom spenning og tøyning (Ormestad, 2014), og sier noe om materialets stivhet. Elastisitetsmodulen er et mål på hvor stivt et materiale er, og er viktig i dimensjoneringen for å unngå utbøyinger.

2.5.1 Stål

Stål blir i dette prosjektet delt opp i tre typer etter hvordan Smith Stål i deres lagerkatalog deler opp ståltypene; vanlig stål, rustfritt stål og syrefast. Disse forskjellige ståltypene var derfor aktuelle i prosjektet og skilles i hovedsak på type legering de har. Vanlig stål inneholder mellom 1,7 - 2 prosent karbon og andelen karboninnhold har stor innvirkning på stålets egenskaper (Christensen & Almar, 2019). Det som skiller vanlig stål fra de andre ståltypene, er at vanlig stål korroderer lett. Rustfritt stål består av en høyere andel av krom, nikkel eller en kombinasjon av

disse metallene. Ved å øke konsentrasjonen av disse metallene blir hinnen som blir skapt på stålet sterkere og det er denne hinnen som virker som en passiv beskytter for det underliggende stålet. Syrefast stål er en ståltype som har en enda høyere korrosjonsbestandighet og dette kommer av at mengden metallet molybden økes, mens mengden karbon blir redusert.

2.5.2 Aluminium

Aluminium er et lettmetall, og som stål, et metall som enkelt kan formes og bearbeides. I motsetning til stål, er aluminium lettere, mykere og har lavere smeltepunkt. Aluminium regnes som ca. $\frac{1}{3}$ lettere og har en elastisitetsmodul som er ca. $\frac{1}{3}$ lavere enn stål. Det betyr i praksis at ved dimensjonering av aluminium kreves det tre ganger så mye aluminium for å få samme stivhet som stål (Grøndalen, 2002).

Til forskjell fra vanlig stål korroderer ikke aluminium direkte. Aluminium regnes som et rustfritt metall. Når ytterlaget av aluminiumet reagerer med oksygen, blir det dannet en tynn hinne av aluminiumoksid. Denne hinnen kan brytes, slik at aluminiumet likevel kan begynne å korrodere.

2.5.3 Andre materialer

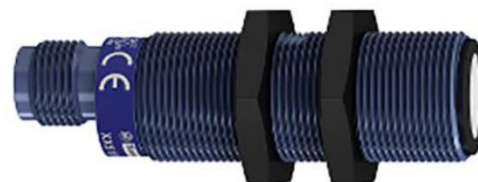
Tre andre typer materialer er magnesium, titan og ulike varianter av kompositt. Magnesium er et lettmetall, som har lav vekt og høy mekanisk styrke som kan fungere som et alternativ til aluminium og stål i konstruksjoner (Pedersen, 2019). Et annet alternativ er lettmetallet titan, som i forhold til stål er lett, og i forhold til aluminium har høy styrke og til felles er meget korrosjonsbestandig (Pedersen, 2019). Kompositt er et materiale som er sammensatt av to eller flere forskjellige materialer for å få ønskede materialegenskaper (Johansen, 2008). Eksempler på kompositt er armert betong og ulike typer av fiberkompositter. Fordelene med fiberkompositt er at det har høy styrke, er meget korrosjonsbestandig og har lav vekt. Ulempen er at det er dyrt og krevende å lage.

2.6 Automatiseringen

For at fergen skal kunne dokke automatisk må fergen bruke sensorer som kan detektere ulike situasjoner. Sensorene vil bli koblet opp til en Programmerbar Logisk Styring, PLS, som vil fungere som en sentral og bearbeide informasjonen den får fra sensorene. PLSen utfører videre ulike sekvenser basert på hvilken situasjon, som brukes til å styre mekanikken. De ulike sensorene milliAmpere skulle bruke til dokkingsystemet var:

Ultralydsensorer som skulle brukes til å måle avstanden mellom fergen og kaien fra en lengre avstand. Disse skulle brukes når fergen gikk inn til dokking. Ultralydsensoren fungerer ved at de sender ut lydbølger som blir reflektert av det objektet lydbølgene treffer. Tiden lydbølgen bruker på ut fra sensor til objekt og tilbake til sensor brukes til å regne ut avstanden mellom objekt og sensor (Keyence, 2019).

Nærhetssensorer som skulle brukes til å måle hvor nærme et objekt var. Disse sensorene bruker magnetiske felt, lys eller lyd til å detektere om et objekt er i nærheten. Denne sensoren kan detektere objekter fra ulike retninger. Nærhetssensorer har mye kortere rekkevidde enn ultralydsensorer, men er mer nøyaktige (Budimir, 2019).



Figur 7 – Ultralydsensor



Figur 8 – Nærhetssensor

3 Metode

I dette kapittelet blir fremgangsmåten som er blitt benyttet i arbeidsprosessen beskrevet og hvilke kravspesifikasjoner som ble stilt til den endelige løsningen.

3.1 Produktutvikling

For å optimalisere produktutviklingen har prosjektgruppen forsøkt å benytte seg av produktutviklingsmetoden som blir beskrevet i boken *The Mechanical Design Process* (Ullman, 2018). Hensikten med å benytte seg av denne produktutviklingsmetoden har vært for å jobbe mer effektivt og målrettet for å skape et bedre resultat. Å designe kan betraktes som en kompleks prosess, der både kreative og analytiske egenskaper blir brukt på områder hvor det finnes lite informasjon eller løsninger på markedet.

Gjennom prosjektet har det vist seg at det ikke bare har vært én riktig løsning, men flere løsninger som har vist seg å kunne fungere. Det har derfor vært viktig å bruke en produktutviklingsmetode som har kunnet fungere selv om det har kommet nye idéer og løsninger sent i prosessen.

3.1.1 Designtenkning

Metoden i *The Mechanical Design Process* (Ullman, 2018) kan deles inn i fire steg:

- 1 - Neddykking:** Denne fasen handler om å få en helhetlig forståelse over hva det endelige designet må dekke. Det vil si å gjøre research, kartlegge lignende løsninger og hvilke ressurser en har for å løse oppgaven. Researchen som blir gjort i denne fasen danner derfor grunnlaget for videre arbeid.
- 2 - Idégenerering:** Denne fasen går ut på å kombinere research som ble funnet i neddykkingen og skape idéer som samlet løser problemet. Dette kan være kreative idéer som kombinerer ulike felt eller blir inspirert av andre metoder eller løsninger.
- 3 - Konseptutvikling:** I dette steget blir idéene videre analysert og utviklet til å bli levedyktige løsninger. Det blir laget forenklede modeller for å kunne analysere om løsningen kan fungere. I denne fasen blir ulike løsninger skilt fra hverandre og trimmet ned gjennom en reduksjonsfase til ett konsept. Dette konseptet blir løsningen som videre utvikles.
- 4 - Prototype:** Det siste steget går ut på å detaljdesigne og lage en fungerende løsning. Hensikten med denne fasen er å kunne demonstrere, teste funksjon og design på en mer realistisk skala. Det innebærer å lage en fysisk prototype.

I praksis går de fire stegene mer om hverandre og er mindre klart avgrenset mellom start og slutt. Dette er en iterativ prosess som vil si at en hele tiden går tilbake og gjentar tidligere steg for å endre eller forbedre løsningen etter hvert som nye idéer/problemer dukker opp.

3.1.2 Prosjektgruppens tilnærming til produktutvikling

1 - Neddykking: I starten av prosjektet brukte prosjektgruppen mye tid på å gjøre research og sette seg inn i problemstillingen. Det innebar å undersøke hvilke krefter, hvilke systemer som måtte fungere og hvordan automatiseringsgruppen ønsket å automatisere mekanikken. Enkle eksisterende idéer og noen få nye idéer ble også laget i denne fasen, for å bedre kunne forstå de ulike momentene av problemstillingen. Denne fasen kulminerte med å lage kravspesifikasjoner over hva de ulike løsningene måtte dekke.

2 - Idégenerering: På bakgrunn av kravspesifikasjonene kunne prosjektgruppen lage mer realistiske idéer og løsninger. I denne fasen brukte gruppen en del tid på lage idéer som passet til kravspesifikasjonene.

3 - Konseptutvikling: De idéene som ble ansett til å ha best potensiale ble tegnet opp i CAD for å bedre simulere, undersøke, analysere geometri og mekanismer. På denne måten fikk prosjektgruppen bedre innsikt i hvilke idéer og løsninger som var mer egnet til problemstillingen og hva som kunne fungere i praksis. I denne fasen ble de ulike løsningene målt opp mot hverandre og rangert etter kriterier fra kravspesifikasjonene. På denne måten kunne prosjektgruppen velge ut én løsning som kunne bli designet i detalj.

4 - Prototype: I denne fasen ble den valgte løsningen detaljdesignet. Under detaljdesigningen ble ulike deler av den endelige løsningen bygget samtidig. På denne måten fikk prosjektgruppen gjort fortløpende analyser og forbedringer.

3.2 Kravspesifikasjoner

Under neddykkingen kom det frem at den endelige løsningen måtte designes etter noen bestemte kravspesifikasjoner. Dette delkapittelet tar for seg hvilke krav og tanker som ble lagt til grunn for hvordan de ulike løsningene skulle designes etter. Ulike konsepter og idéer blir senere i oppgaven målt opp mot hverandre på hvor godt de oppfylte kravspesifikasjonene.

3.2.1 Konstruksjonskrav

Konstruksjonskravene var de kravene som krevdes for at designet kunne bli bygget og at dokkingsystemet skulle kunne fungere for de belastningene det skulle utsettes for.

Krefter på dokkingsystemet: Det ble i starten av prosjektet bestemt at dokkingsystemet skulle bli designet for krefter i kjøreretning og ikke for laterale krefter. Dette forenklet designprosessen, da disse ikke trengtes å bli lagt inn i beregningene. Kraftene i kjøreretning kunne derfor summeres opp i trykk- og strekkrefter.

Produksjonskrav: For at verkstedet skulle kunne bygge en løsning, måtte løsningen være produksjonsvennlig. Det var derfor ønskelig å bruke så mange standardiserte komponenter som mulig. Dette vil gjøre arbeidet med å sette sammen konstruksjonen mindre krevende, og resultere i færre arbeidstimer på produksjon, med reduksjon av muligheten for design- og byggefeil.

Korrosjonsbestandighet: Det at designet skal bli brukt ved havkanten, betyr at komponenter i designet må være korrosjonsbestandige. Ulike materialer må derfor bli valgt etter dette kriteriet.

Vær og miljø: Sjøvann og snø var miljøfaktorer som det endelige designet måtte designes etter. Vann og snø er noe som kan legge seg på kritiske steder, som kan medføre at systemet slutter å fungere som det skal. Store bølger, vind og sterke undervannsstrømmer kan gjøre at styringssystemet til fergen sliter med å posisjonere seg og komme i riktig posisjon til dokk.

Dimensjonering: Dokkingsystemet skal designes til fergen milliAmpere i Autoferry-prosjektet, med mulighet for å kunne skaleres opp til en potensiell større versjon, Ampere. Her er det ønskelig at dokkingsystemet enkelt skal kunne monteres på fergen og på en brygge.

3.2.2 Funksjon- og brukerkrav

Funksjon og brukerkrav var de kravene designet måtte innfri for at dokkingsystemet skulle kunne fungere, oppleves intuitivt og brukervennlig for brukeren av en mindre passasjerferge.

Funksjonalitet: Dokkingsystemet må kunne låse fergen til en brygge, samt ha funksjonalitet for at passasjerer enkelt kan gå av eller om bord.

Brukeropplevelse: Løsningen krever å være designet slik at dokkingsystemet kan oppleves trygt og brukervennlig. Det innebærer at komponenter, mekanismer og låsing kan oppleves som solid og at brukeren ikke kan ødelegge dokkingsystemet eller selv komme til skade.

Driftssikkerhet: Ettersom fergen skal være autonom, må dokkingsystemet være utformet slik at fergen enkelt kan låse og repetere denne prosessen med lav feilmargin, og tåle potensielle støt fra fergen hvis den kommer med for høy hastighet.

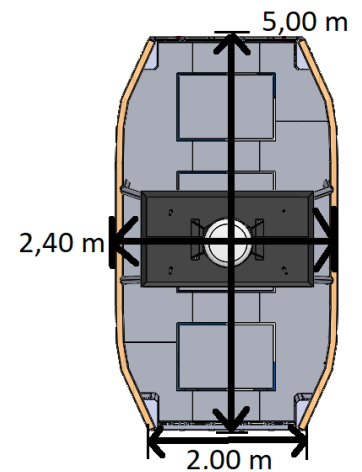
Sensorkrav: For at dokkingsystemet skal kunne fungere automatisk, må designet være utformet slik at sensorene kan detektere det de krever for å fungere optimalt.

4 Rammer og teknologivalg for løsningene

I dette kapittelet blir rammer og teknologivalg for de ulike konseptene bli presentert.

4.1 Dimensjonene til fergen

MilliAmpere er 5,00 meter lang, 2,40 meter bred på det bredeste og 2,00 meter på det smaleste. MilliAmpere er videre bygget til å ha en last på seks passasjerer om bord og har total egenvekt på fergen er 1 830 kg



Figur 9 – Dimensjoner milliAmpere

4.2 Hydrauliske vs elektriske lineæraktuatorer

Til felles for alle løsningene er at de skal inneholde en lem hvor passasjerene kan gå av og om bord på i front og i bakenden av fergen. Denne lemme kan bli løftet opp enten av et hydraulisk eller et elektrisk system. Disse systemene har fordeler og ulemper.

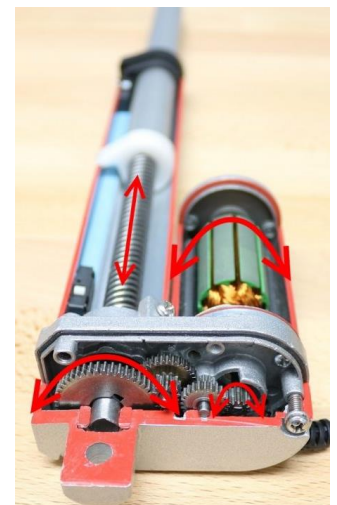
I utgangspunktet var planen at dokkingsystemet skulle bruke hydrauliske aktuatorene, ettersom hydraulikksystemer er det som er mest utbredt i maritime miljøer. Da dokkingsystemet skulle være en prototype for å teste ut teknologi, ble det bestemt at muligheten for å bruke elektriske lineæraktuatorer skulle utforskes.

Et hydraulisk system på fergen fungerer i korte trekk ved at en pumpe henter hydraulikkolje fra en tank som blir presset ut gjennom en T-kobling til to sylindere. Sylinderne er aktuatorer som beveger lemme ned. Når lemme har nådd en ønskelig posisjon blir pumpen skrudd av. En trykkreguleringsventil kan kobles til systemet, slik at lemme kan gi etter for ulike påkjenninger. Det betyr i praksis at lemme kan stå i en låst posisjon med en bestemt kraft fra aktuatorer og hvis det kommer en ytre belastning, kan aktuatorer og dermed lemme gi etter, slik at bevegelsene mellom lem og brygge blir dynamiske.

En elektrisk lineæraktuator fungerer ved at det er en liten motor inne i aktuatoren roterer en skrue som beveger stempelet inn eller ut. Når motoren ikke får strøm, blir systemet låst i posisjon. For å gjøre systemet fleksibelt, slik at lemme kan gi etter for ytre påvirkninger, må det brukes kraftmålere som blir plassert slik at de måler krefter ved ulike kontaktflater. Sensorene må være koblet opp til lineæraktuatorer, slik at aktuatorer kan gi etter for ulike



Figur 10 – milliAmpere



Figur 11 – Oppbygning elektrisk lineæraktuator

påkjenninger på systemet. Videre for å få to lineæraktuatorer til å gå synkront, må den ene aktuatorene bli satt opp som en “slave” etter den andre.

Det ble videre satt opp positive og negative sider på hver av systemene for å få en bedre oversikt over de.

Hydrauliske aktuatorer

Tabell 3 – Hydrauliske aktuatorer

Fordeler	Ulemper
Kan levere stor kraft	Middels dyrt i innkjøp
Driftssikker	Krever en del vedlikehold
Kan innstille seg etter ytre påvirkninger (trykkreguleringsventil)	Krever et hydraulisk aggregat, oljetank, ventiler, motor, pumpe, etc. Krever en del plass.
Tåler maritime forhold godt	Fare for lekkasje
Standarden for hva som blir brukt i dag	Støy
Når systemet er slått av vil systemet fortsatt være i lås	
Kan enkelt gå synkront.	

Elektriske aktuatorer

Tabell 4 – Elektriske aktuatorer

Fordeler	Ulemper
Stor presisjon	Kan ikke innstille seg etter ytre påvirkninger uten videre. Krever et sensorsystem som gir riktig feedback for å kunne dette.
Krever liten plass	Mindre egnet i maritime miljø
Krever minimalt med vedlikehold	Kan være dyre i innkjøp
Enkle å montere	
Gir feedback på bevegelse og har mange muligheter for å kunne programmeres.	
Kan gå synkront, hvis den ene aktuatoren blir programmert som en “slave”	

Hydraulikk ble betraktet som et bedre system av prosjektgruppen, ettersom systemet kunne tilpasse seg flere situasjoner enn et elektrisk system etter ytre påvirkninger. Dette ble ansett som viktig, ettersom en lem som kan justere seg etter bevegelsene til fergen og bryggen som ville gi lavere belastning på aktuatorene. Det ble likevel valgt å bruke elektriske lineæraktuatorer, ettersom potensialet for et elektrisk system ble ansett som stort. Et annet element var at alle de andre systemene om bord i fergen skulle drives av strøm. Denne avgjørelsen ble tatt i samråd med oppdragsgiver og automatiseringsgruppen. Dette på bakgrunn av at fergen var en prototype og det ville derfor være hensiktsmessig å utforske og teste mulighetene for å bruke en elektronisk løsning fremfor en hydraulisk løsning. Det å være nytenkende og fremtidsrettet ble sammen med at resten av fergen skulle drives på strøm avgjørende for at den elektroniske løsningen ble valgt.

4.3 Materialvalg

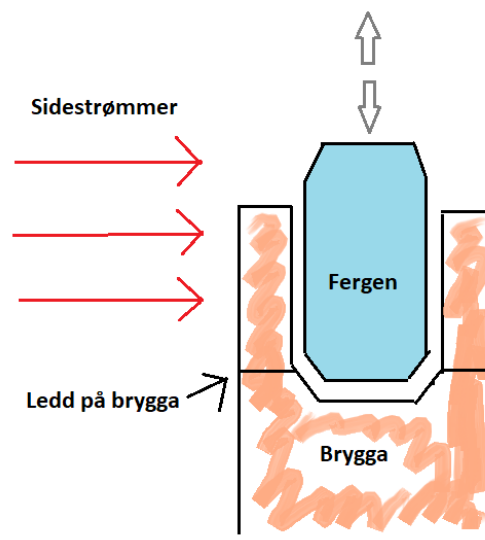
Av materialer var det viktig at designet ikke skulle begynne å ruste. I forhold til design av lem var det viktig at lemmen var lett, da lineæraktuatoren som ble valgt skulle kunne å løfte lemmen opp. Av tilgang av materialer ble magnesium, titan og kompositt valgt bort. Dette betød at prosjektgruppen stod igjen med stål og aluminium.

Aluminium er ca. 1/3 lettere, mens stål har omtrent en tre ganger så høy elastisitetsmodul (Grøndalen, 2002). I praksis betyr dette at det må bruke tre ganger så mye aluminium for å få samme stivhet som stål. Valget falt på aluminium, ettersom prosjektgruppen anså at ved å utforme lemmen og designet riktig geometrisk, så ville aluminium gi en lettere konstruksjon til slutt.

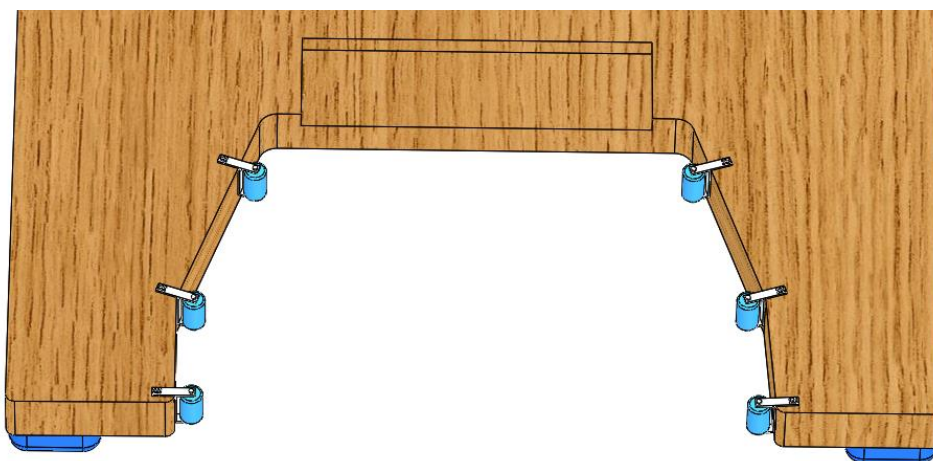
En utfordring med aluminium er at det vanskelig å sveise, men verkstedet som skulle hjelpe til på prosjektet hadde god erfaring med å sveise i aluminium. Det ble derfor besluttet å bruke aluminium.

4.4 Bryggeutforming

For å ha så gunstige forhold som mulig for dokkingsystemet, ble det bestemt at bryggen skulle flyte på vannet og utformes som en hestesko med hjul på innsiden, slik at fergen har muligheten til å gli inn i dokkingsystemet. Til forskjell fra en fast montert brygge, vil en flytebrygge følge bevegelsene til vannet bedre. Samt at når passasjerer går om bord, vil både brygge og ferge kunne justere seg, slik at høydeforskjellen mellom de blir mindre. Hensikten med denne hesteskoutformingen var at bryggen kunne ta opp potensielle sideveiskrefter fra fergen. Hesteskoutformingen vil også gjøre det lettere for styringssystemene til fergen å posisjonere fergen til låsesystemet.



Figur 12 – Brygge ovenfra



Figur 13 – Brygge forfra

5 Aktuelle løsninger

I dette kapittelet blir de aktuelle løsningene presentert og vurdert hver for seg. Til slutt blir løsningene sammenlignet, der én løsning ble valgt for videre arbeid.

5.1 Kriteriene for de aktuelle løsningene

På bakgrunn av kravspesifikasjonene og i samråd med oppdragsgiver og ekstern båtbygger ble det utformet flere konsepter på hvordan fergen kunne låses til en brygge. Det ble tatt to grep for å forenkle vurderingsfasen. Det første var å trimme kravspesifikasjonene ned til fire kriterier, ettersom noen kriterier ble ansett som mer vesentlige enn andre. Det andre var å velge ut de fem mest aktuelle løsningene. Dette bidro til å gjøre det enklere og klarere å vurdere de ulike løsningene mot hverandre.

De viktigste kriteriene som ble stilt til løsningene ble derfor:

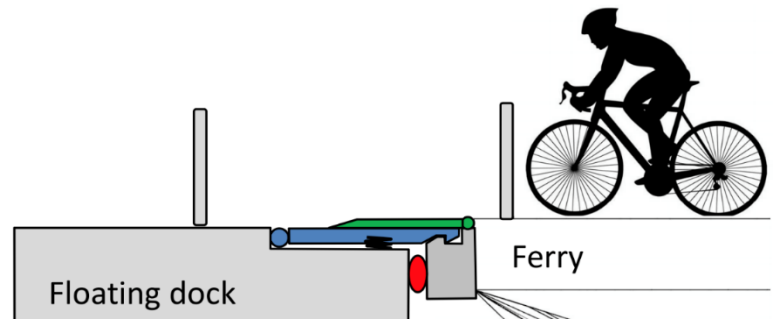
- **Krefter:** Hvordan kreftene virker inn på hverandre når fergen går til dokk og når fergen er i dokk.
- **Låsemekanisme:** Hvor godt låsingen fungerer og hvor sikker denne antas å være.
- **Aktuell for milliAmpere:** Hvor godt løsningen passer til milliAmpere.
- **Enkelhet:** Hva som seg lot seg bygge i praksis.

I vurderingsfasen ble hver løsning gitt en vurdering fra 1 til 6 basert på hvor godt den oppfylte hvert kriterie.

Denne vurderingen ble ansett som viktig, ettersom de ulike løsningene løser låsingen av fergen på ulike måter og fungerer i prinsippet veldig forskjellig. Dette anser prosjektgruppen som positivt, da det å utforske andre muligheter øker sannsynligheten for at man ender opp med en bedre løsning til slutt. Et annet moment er å implementere mindre funksjoner fra andre løsninger inn i den endelige løsningen. Ved å vurdere andre løsninger, kommer ulike løsnings egenarter mer frem og det blir tydeligere hva som er en god løsning og hva som er en dårlig løsning.

5.1.1 Løsning 1 - Rampe

Ved starten av prosjektet hadde oppdragsgiver en idé på hvordan låsingen og ombordstigningen av passasjerer kunne foregå. Denne løsningen kom fra en tidligere masteroppgave hos NTNU (Havdal, Heggelund, & Larssen, 2017). Idéen gikk ut på å ha en fjæropplagret plattform på bryggen med en knagg på enden. Fergen blir låst når knaggen blir presset ned i hengselet på fergen.



Figur 14 – Løsning 1

Fordelene med denne løsningen er at den kan gjøre flere mekanismer samtidig. Løsningen tar høyde for at fergen kan komme inn med forskjellig høyde i forhold til bryggen. Med en gang lemme er nede, er fergen låst og klar for ombordstigning av passasjerer. Mekanismen betraktes som enkel å designe, produksjonsvennlig og potensiale for videre utvikling.

Utfordringene med løsningen er at når fergen går inn til kai og dokker, så vil de elektriske aktuatorene bli låst i en bestemt posisjon. Når passasjerene går om bord vil vekten av passasjerene presse fergen ned mens flytebryggen vil stige. Her vil aktuatorene stå i en låst posisjon og motvirke denne bevegelsen. Dette kan føre til en høy belastning på aktuatorene.

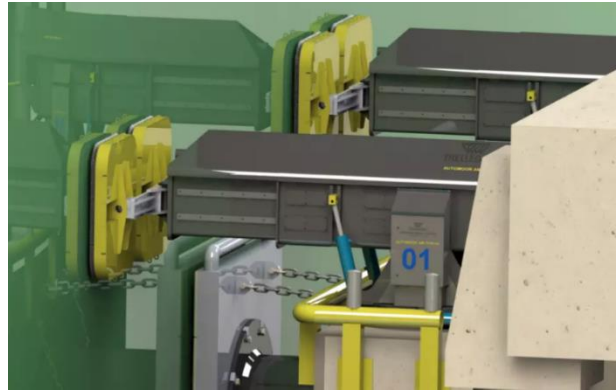
Tabell 5 – Vurdering av løsning 1

Vurderingskriterier	Begrunnelse	Karakter
Krefter	Under dokking: Krever at fergen kommer inn i riktig posisjon. Dokket: Utfordring med stor påkjenning på lineæraktuatorene når systemet er i lås.	3
Låsemekanisme	Enkel mekanikk og konstruksjon. Systemet har mulighet til å låse fergen dersom fergen kommer inn til bryggen med ulike høyder. Kan henge igjen når fergen forlater dokk.	4
Aktuell for milliAmpere	Denne løsningen vil være mulig å lage for milliAmpere.	6
Enkelhet	Produksjonsvennlig.	6

5.1.2 Løsning 2 - Vakuum

Denne løsningen er basert på metoden for vakuumlåsing av større skip (Trelleborg, 2019) og blir beskrevet i teorikapittelet.

Fordelene med systemet er at systemet ikke krever store inngrep på fergen. Systemet kan gi feedback til en sentral på hvor godt låsingen er ved å ha en trykkmåler som måler undertrykket. Muligheten til å kunne monitøre og ha alarmer for når låsingen begynner å svikte er derfor tilstede. Armene som holder platene til skroget kan gjøres fleksible, slik at fergen kan ha noe bevegelse når den ligger i dokk.



Figur 15 - Løsning 2

Ulempen med systemet er at det er et avansert system som krever jevn tilførsel av energi og kan ikke stå for nær vannlinjen. Systemet anses å være krevende å bygge og kan bli lett ødelagt av en ferge som støter når den går inn for dokk.

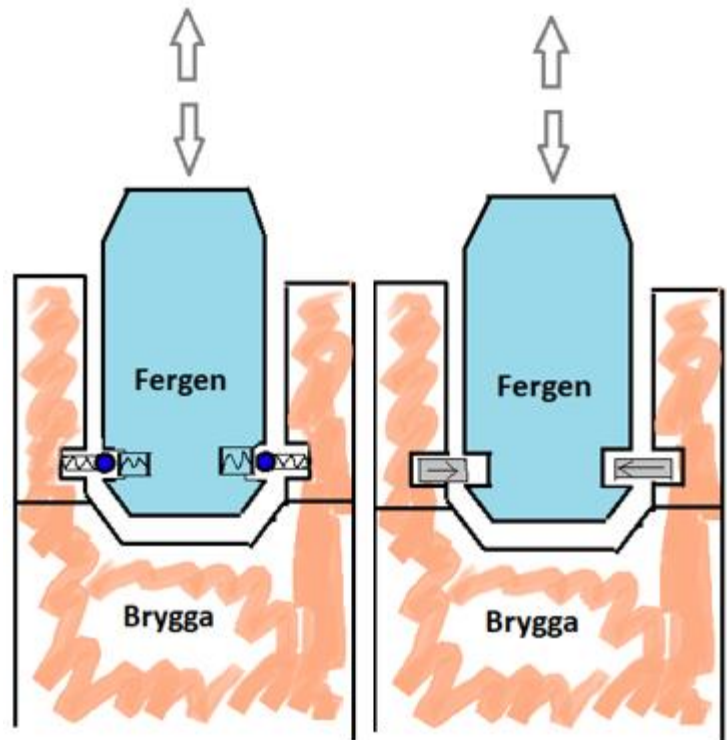
Tabell 6 – Vurdering av løsning 2

Vurderingskriterier	Begrunnelse	Karakter
Krefter	Under dokking: Krever at fergen står i riktig posisjon. Dokket: Systemet har mulighet til å justere seg og ta opp bevegelser fra fergen.	5
Låsemekanisme	Låsemekanisme som krever en mindre spesifikk utforming av skroget.	6
Aktuell for milliAmpere	Lite aktuell da løsningen er avansert, kostbar og det kan være en utfordring at platene må ligge nærme havnivået.	2
Enkelhet	Avansert system som må designes og spesiallages til prosjektet.	2

5.1.3 Løsning 3 - Mekanisk

Denne løsningen ble idémøydret i begynnelsen av prosjektet. Her var idéen at fergen kan bli låst av to fjæropplagrede hjul som blir presset inn mot et inngrep i skroget. Hjulene er plassert i enden av to armer, slik at hjulene kan rulle på yttersiden av skroget og inn i inngrepen på fergen. På den måten kan fergen gli inn i lås når den går inn for dokking. En annen fordel med mekanismen er at dersom det elektriske systemet om bord i fergen skulle svikte, kan fergen likevel dokke og gå i lås. For å låse opp fergen kan hjulene bli presset ut.

Ulempen med løsningen er at den stiller større krav til hvordan fergen er utformet og kan ikke ta opp et støt fra fergen.



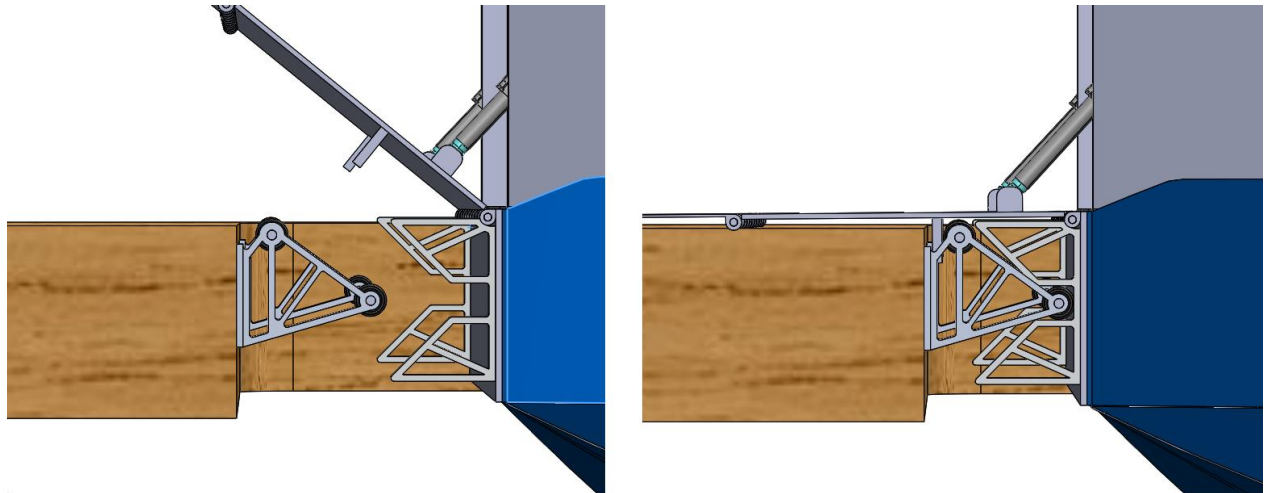
Figur 16 – Løsning 3, sett ovenfra

Tabell 7 – Vurdering av løsning 3

Vurderingskriterier	Begrunnelse	Karakter
Krefter	Ved dokking: Krever at fergen står i riktig posisjon. Dokket: Ingen uønskede krefter som oppstår her.	6
Låsemekanisme	Låser systemet selv om det elektriske systemet svikter.	6
Aktuell for milliAmpere	Løsningen krever at skroget på fergen er bygget med inngrep, slik at armene på kai kan gå inn i skroget. Er mindre aktuelt for dette prosjektet, da det å endre på utforming av skroget på milliAmpere ikke er aktuelt.	2
Enkelhet	Enkel konstruksjon og mekanisme som lar seg bygge.	4

5.1.4 Løsning 4 - Krokodillegap

Målet med denne løsningen er at fergen og bryggen ikke skal kunne bevege seg opp eller ned i forhold til hverandre, slik at det ikke skulle være noe belastning på lineæraktuatorene. Løsningen ble utformet på den måten at det skulle være to inngrep på fergen som er utformet til å kunne ta imot to hjul lagret opp på bryggen.



Figur 17 – Løsning 4, sett fra siden

Hensikten til det ene hjulet er å posisjonere fergen inn i inngrepet, mens det andre har til hensikt å låse fergen med en flapp som går ned bak hjulet. Fergen vil på den måten være i lås med bryggen og ikke ha mulighet til å kunne bevege seg i noen retninger. Fergen kan likevel rotere noe opp og ned, slik at fergen og bryggen kan følge bevegelsene til vannet.

Fordelene med denne løsningen er at den er enkel å konstruere. Systemet vil oppleves som solid for passasjerene, da ferge og brygge er i full lås. Videre kan inngrepene bygges inn i skroget på et senere prototype, slik at flappen som låser hjulet kan flyttes nærmere rotasjonsaksen til lemmen. På den måten skjules låsingen enda mer.

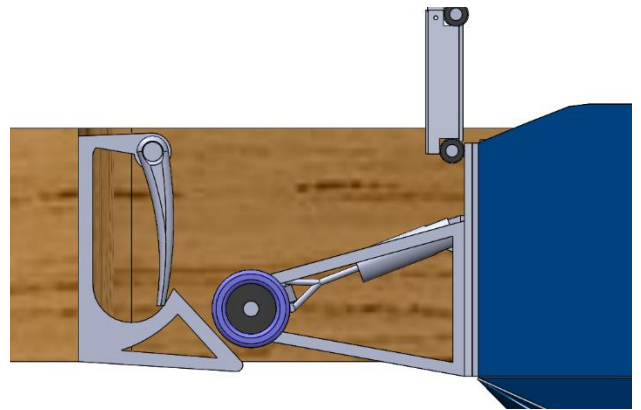
Utfordringen med denne løsningen er flere. En av disse er når fergen når en bølgebunn og er tungt lastet, så vil fergen måtte bruke mye kraft for å presse hjulene inn i inngrepene. Dette ble betraktet som noe som kunne oppleves som “støting” inn i inngrepene, og noe som ikke vil oppleves behagelig av passasjerene. Et annet problem er at løsningen ikke tar opp et potensielt støt fra fergen.

Tabell 8 – Vurdering av løsning 4

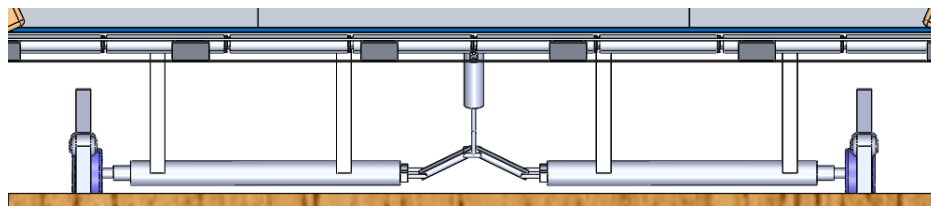
Vurderingskriterier	Begrunnelse	Karakter
Krefter	<p>Under dokking: Dersom fergen er for tungt lastet, kan fergen komme inn for lavt for inngrepene, slik at fergen må presse seg på plass i inngrepene.</p> <p>Dokket: Inngrepene tar opp alle vertikale krefter og låser fergen til en fast høyde hver gang. Fergen vil ligge stabilt i forhold til kai.</p>	2
Låsemekanisme	Låser fergen enkelt.	5
Aktuell for milliAmpere	Løsningen vil være mulig å lage for milliAmpere.	6
Enkelhet	Enkel konstruksjon som lar seg bygge.	5

5.1.5 Løsning 5 - Karabinkrok

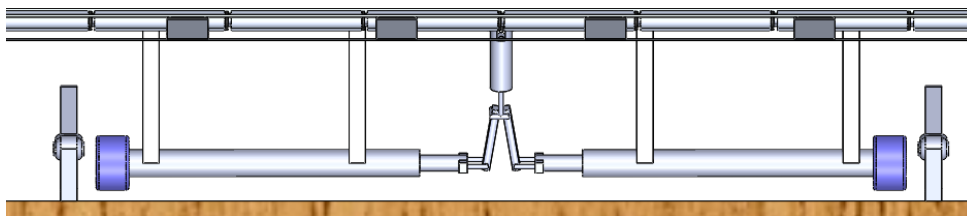
Løsning fem er en løsning motivert fra å låse fergen selv om det elektriske systemet skulle slutte å fungere. I denne løsningen er idéen at to hjul ruller inn i to karabiner og blir låst. Videre kan fergen bevege seg mens den ligger i dokk, slik at høyden mellom ferge og brygge kan variere. Hjulene er festet til en teleskopstang som trekker seg sammen, slik at hjulene ikke lenger er inni karabinkrokene.



Figur 18 – Løsning 5, sett fra siden



Figur 19 – Løsning 5 låst i dokk



Figur 20 – Løsning 5 opplåst

Fordelene med systemet er at fergen kan bevege seg en del når den er i lås og at fergen kan kjøre inn lås. Videre kan låse- og lemsystem fungere separat, som gir andre muligheter som å stenge av fergen om kvelden og likevel la fergen være i lås til bryggen.

Utfordringene med løsningen er flere. Systemet anses å være vanskelig å få til med elektriske aktuatorer av prosjektgruppen, da de vil være eksponert for korrosivt miljø og at de det kan bli høy belastning på aktuatoren når lemmen står nede. Fergen kan også måtte presses i lås og systemet krever høy presisjon fra fergen.

Tabell 9 – Vurdering av løsning 5

Vurderingskriterier	Begrunnelse	Karakter
Krefter	<p>Under dokking: Kan måtte presses i lås hvis fergen er tungt lastet.</p> <p>Dokket: Lav påkjenning når fergen er i lås. Fergen har også mulighet til å bevege på seg i vertikal retning. Fungerer dårlig med en lem som er i låst posisjon.</p>	5
Låsemekanisme	Kompleks låsemekanisme med mange komponenter. Større sjanse for at noe kan gå galt. Systemet vil gå i lås selv om det elektriske systemet svikter.	3
Aktuell for milliAmpere	Denne løsningen vil være utfordrende å lage for milliAmpere.	2
Enkelhet	Vanskelig geometri. Mange komponenter.	2

5.2 Valg av endelig løsning

Karakterene fra hver løsning ble videre satt inn i en tabell for å få et klarere bilde over styrkene og svakhetene til løsningene. På denne måten kunne prosjektgruppen bedre vurdere hvilken løsning som ble ansett som bedre. Den endelige løsningen ble valgt i samråd med oppdragsgiver. Tabellen viser resultatet for løsningsvurderingen.

Tabell 10 – Resultat av løsningsvurdering

Løsning	Krefter	Låsemekanisme	Aktuell for milliAmpere	Enkelhet	Totalt
L1: Rampe	3	4	6	6	19
L2: Vakuum	5	6	2	2	15
L3: Mekanisk	6	6	2	4	18
L4: Krokodillegap	2	5	6	5	18
L5: Karabin	5	3	2	2	12

Fra løsningsvurderingen var det klart at det var løsning 1 som ble ansett som bedre og hadde størst potensiale for videre utvikling. Begrunnelsen var at den virket smart, enkel og produksjonsvennlig. Videre utførte løsningen to prosesser på samme tid; låse og samtidig klargjøring av ombordstigning av passasjerer. Dette var noen som ble ansett som en metode som kunne fungere raskt, og noe som kunne være et viktig egenskap for en mindre urban passasjerferge med mulighet for hurtig fortøyning. Løsning 1 blir derfor i de neste kapitlene videreutviklet og detaljdesignet i SolidWorks.

6 Valgt løsning og detaljdesign

I dette kapitlet blir den valgte løsningen videreutviklet, detaljdesignet og gjennomgått i detalj sammen med materialvalg.

6.1 Design av skap

På fergen skulle det stå fire skap. To på hver ende av fergen. Skapene hadde som funksjon å beskytte lineæraktuatoren mot miljø og beskytte passasjerer mot klemfare. Det var ønskelig at skapene skulle være så små som mulig for å ikke ta opp plass fra passasjerene.

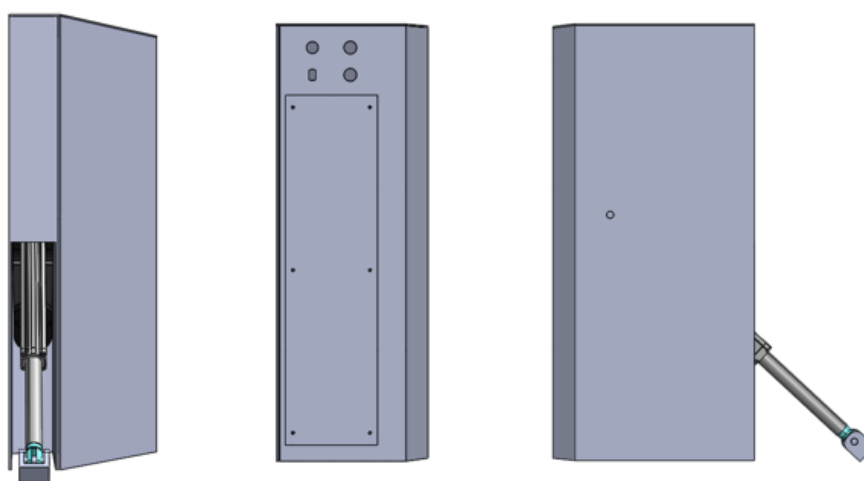
Hovedutfordringen med skapene var å beregne posisjonen til festepunktene som lineæraktuatorene skulle festes i. Skapene ble designet tidlig i prosjektet, og før prosjektgruppen hadde valgt en løsning for låsing. På dette tidspunktet var ikke lem designet og det var uvisst hvor mye lineæraktuatorene måtte ta opp av krefter.

Det ble derfor gjort noen enkle estimeringer på hvor stor kraft aktuatorene måtte løfte, og få inn så store aktuatorer som det var mulig i skapene.

Skapene ble designet til å passe skroget til fergen. Av materialer ble det brukt aluminiumsplater av myk klasse, ettersom disse enklere kunne bøyes til uten å få sprekker og store svekkelser i materialet.



Figur 21 – Plassering av skap



Figur 22 – Skap sett forfra, bakfra og fra siden

6.2 Design av lem

For at passasjerer enkelt og raskt skal kunne gå om bord på fergen, skulle fergen ha en bred lem som dekket hele fronten. Hvordan lemmen ble designet hadde stor innvirkning på om løsning 1 kunne fungere i praksis med elektriske aktuatorer. Lemmen skulle videre dimensjoneres og designes for å passe til milliAmpere.

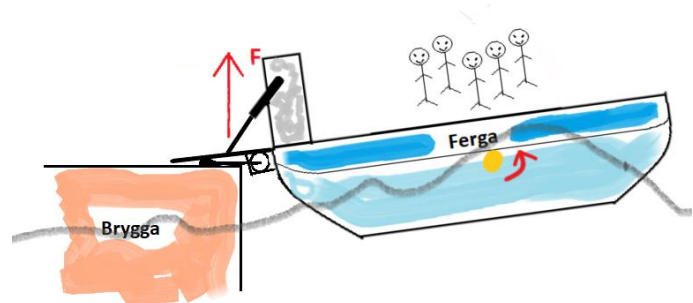
Ledd

Hovedutfordringen med lemmen var at den med elektriske aktuatorer ville virke som en lang arm låst til en bestemt posisjon. Når passasjerene går ut på lemmen, presser passasjerene lemmen ned mot brygga og dette kombinert med en bølge i akterenden, vil gjøre at aktuatorene blir presset sammen. Dette kunne løses på to måter; enten å bruke kraftsensorer som måler kreftene mellom ulike kontaktpunkter, eller å gjøre lemmen leddet.

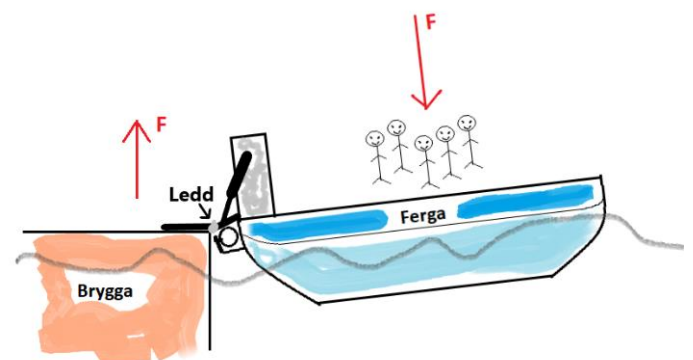
En idé for å minimere denne belastning ble derfor å gjøre lemmen leddet. På den måten kan den indre delen av lemmen hvor lineæraktuatorene er festet til gå ned til en fast posisjon hver gang og låse hjulet, mens den ytre delen av lemmen kan være fleksibel og hvile på bryggen. Belastningen på aktuatorene blir derfor lavere.

Stivhet

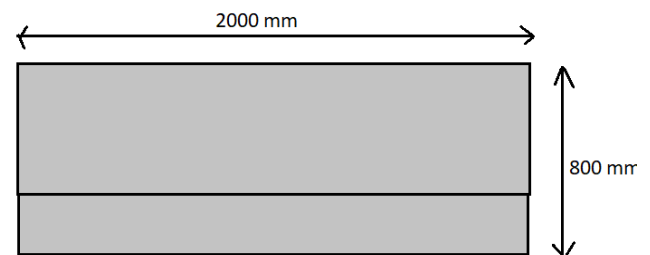
En annen utfordring var dimensjonene til lemmen. Lemmen skulle både være lett nok til at de elektriske lineæraktuatorene kunne dra opp lemmen, men samtidig stiv nok til å kunne gå på og oppleves som solid av passasjerene. Ettersom det skulle brukes aluminium, som har en lav elastisitetsmodul i forhold til stål krevde det mer av geometrien og det ble valgt å gå opp på tverrsnittsarealet, med tanke på at konstruksjonens stivhet økes ved øke tverrsnittsarealet. Prosjektgruppen valgte å bruke vanlige U-profiler fra Smith Stål som avstivere. I utgangspunktet var planen å bruke vanlige firkanttrør, som skulle kuttes diagonalt for bedre geometri, da ville man kunne få profiler med større høyde, som kunne gi høyere bøyestivhet, ref. annet arealmoment. Men etter råd fra verkstedet, ble denne



Figur 19 – Lem



Figur 20 – Leddet lem

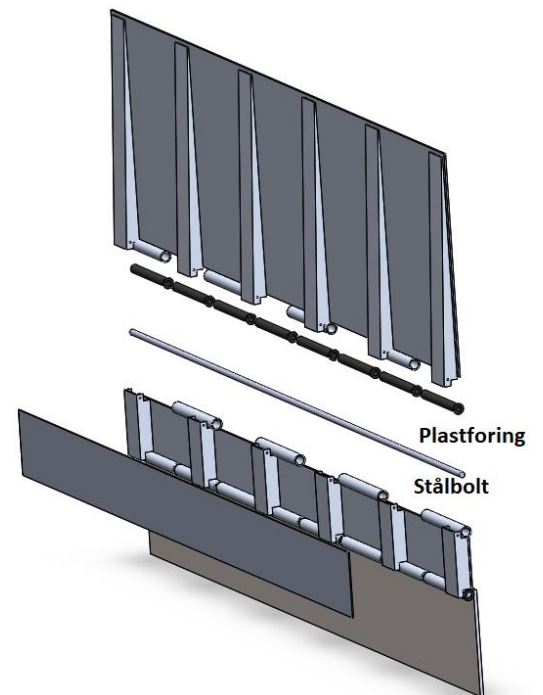


Figur 23 – Dimensjoner lem

planen gått bort i fra, da det var knyttet større usikkerhet om det ville dannes indre spenninger i firkantprofilene under kuttingen, slik at styrken til avstiverne ble svekket. Antallet avstivere og størrelsen til avstiverne ble valgt på grunnlag av det prosjektgruppen antok som tilstrekkelig.

Hengslene

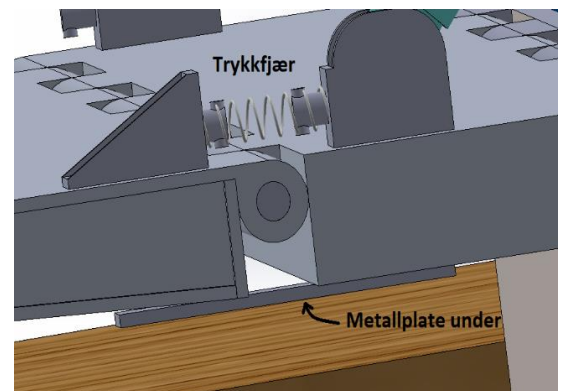
For å få en så fin overgang mellom fergedekk og lem, måtte prosjektgruppen å spesiallage pianohengsler. På den måten kunne det bli en fin overgang mellom lem og dekk på fergen. Pianohengslene ble bygget opp av vanlige aluminiumsrør. For å få tilstrekkelig stivhet i hengselet ble det valgt å bruke stålbolter. Stålboltene tilfører lemmen stivhet i aksial retning. For å minimere friksjonen mellom stålbolten og aluminiumsrøret ble det brukt foringer av plasttypen POM fra Astrup AS. POM er en termoplast som er enkelt å maskinere, absorberer lite vann og gir lav friksjon (Astrup, 2019).



Figur 24 – Oppbygning lem

Leddmekanismen

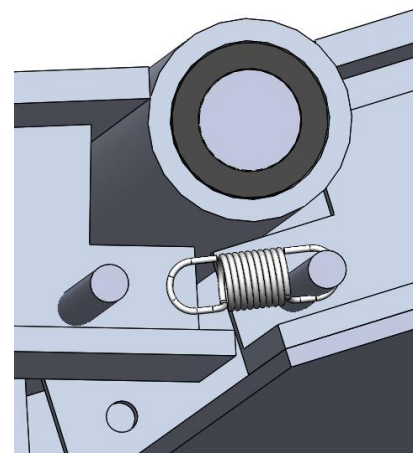
For at lemmen ikke skal kunne falle sammen, måtte leddet fjæropplagres. Det ble idémyldret tre metoder for dette. Den første idéen var å plassere en trykkfjær på oversiden, og en metallplate på undersiden. På den måten kunne lemmen bevege seg i én retning og ikke i den andre.



Figur 25 – Forslag 1 på fjæring av lem

Den andre løsningen gikk ut på å bruke to bladfjærer plassert på hver sin side av lemmen. Bladfjæren skulle plasseres på oversiden og gå langs med lemmen og presse den ytre delen ut. utfordringen her var å finne en sterk nok bladfjær i et materiale som kunne tåle sjøvann.

Tredje og siste løsning gikk ut på å plassere mindre strekkfjærer på undersiden av lem og inn i U-profilene. Fjærene vil da være gjemt og ikke til noe hinder for passasjerene. Her kunne det også brukes mange fjærer på undersiden av lemmen for å få tilstrekkelig styrke. Denne løsningen ble valgt.



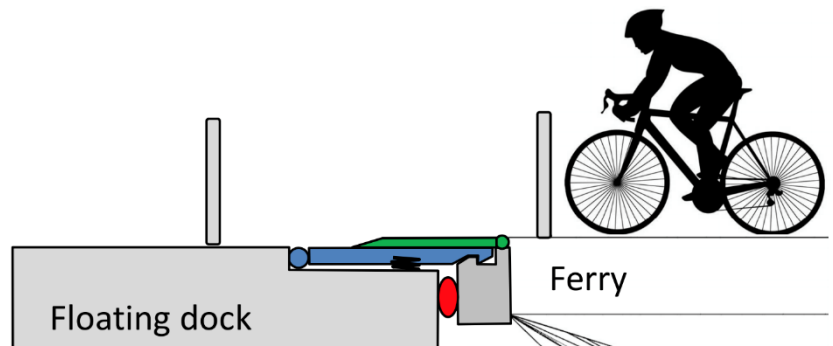
Figur 26 – Endelig løsning på fjæring av lem

6.3 Design av system kai

Løsning 1 hadde i utgangspunktet fire utfordringer: Geometri, belastning på aktuatorene, fjæropplagring og demping av fergen når den kom inn for dokk.

Den geometriske utfordringen ble betraktet som at fergen kunne henge igjen når fergen skulle ut av dokk. En annen utfordring var hvis “knaggen” lå under høyden til

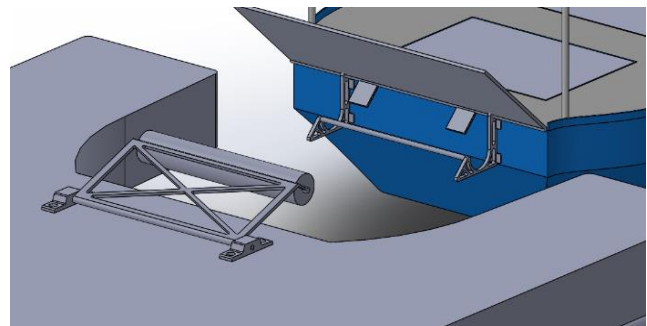
hengselet det skulle presses ned i. Måten løsningen skulle fjæropplagres på var også en utfordring, ettersom det var ønskelig at systemet skulle ta opp lite plass i høyden, slik at det enkelt kunne bygges ned i bryggen. Den siste utfordringen var hvordan et potensielt støt fra fergen kunne dempes.



Figur 27 – Løsning 1.0

6.3.1 Løsning 1.1

Første forbedring av grunnidéen ble derfor å plassere en rull av et mykt materiale i front istedenfor en knagg. Hensikten med denne forbedringen var at rullen ville fungere bedre hvis fergen kom inn til bryggen i forskjellige høyder og likevel gå i lås ved at rullen kunne rulle på plass. Dersom rullen ble liggende lavere enn hengselet kunne rullen rulle opp og ned i hengselet. Hvis fergen kom inn for lavt, kunne rullen treffe lemmen, og slik rulle ned i hengslet.

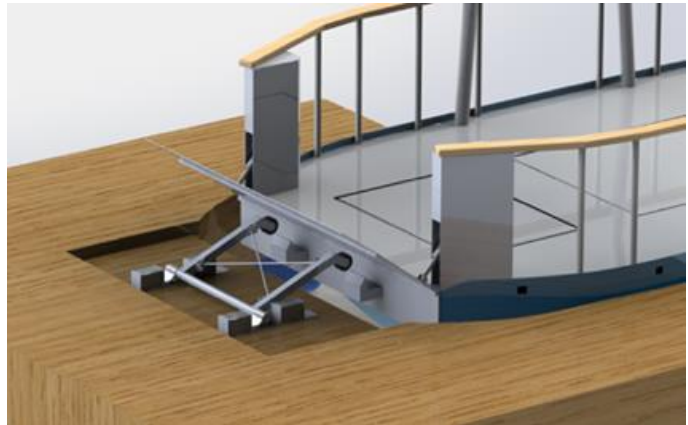


Figur 28 – Løsning 1.1

For å redusere muligheten for at rullen skulle kunne henge igjen i kroken når lemmen gikk opp, ble det plassert to flapper på akselen. Hensikten med flappene var å kunne presse rullen opp når lemmen gikk opp.

6.3.2 Løsning 1.2

Løsning 1.1 ble drøftet og videreutviklet sammen med en ekstern båtbygger. Her ble rullen byttet ut med to hjul. Dette på bakgrunn av at kreftene på rullen bare ville virke i ytterendene av rullen i form av trykk- og strekkrefter. Dette betød at den midtre delen av rullen i løsning 1.1 ikke hadde noen funksjon. Hjulene på hver side gjør den samme jobben som en rull med tanke på låsing. Flappene som hadde som funksjon å få opp rullen, ble fjernet, da det viste seg at de av geometri ville slå inn i skroget.



Figur 29 – Løsning 1.2

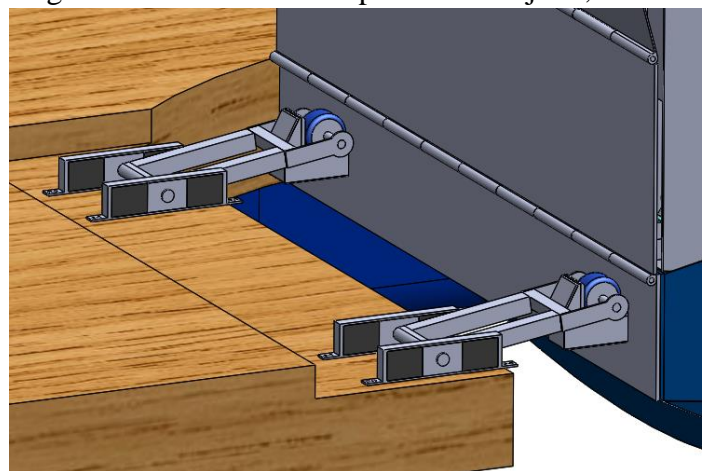
Forbindelsen mellom armene som holder hjulene ble byttet ut med vaiere. Dette ga systemet fleksibilitet til å kunne gi etter, slik at hvert stag kunne bevege seg noe i forhold til hverandre, dersom fergen skulle komme inn skjevt eller bevege seg fra side til side når den var dokket.

For å dempe et potensielt støt fra fergen, ble opplagringen på bryggen utformet slik at det kunne være noen gummiklosser på opplagringen, som kunne bli presset sammen og på den måten dempe støt. Fordelen med gummiklossene var at de var billige, enkle å kutte til og passet godt i et marint miljø. Hengslene på fergen ble byttet ut med to kroker. Utforming av krokene blir videre presisert i kapittel 6.4 Design av krok.

6.3.3 Løsning 1.3

I denne løsningen kom idéen om å gjøre lemmen leddet. Fordelene med dette blir presentert i kapittel 6.2 Design av lem. Denne idéen kom på bakgrunn av at når lemmen presser ned hjulet, så vil hjulet presse lemmen opp. Den ytre leddet av lemmen kunne derfor hvile på bryggen, mens aktuatorene kunne presse det indre leddet ned mot hjulene, som igjen ble presset opp av krokene på fergen. På denne måten ble belastningen på aktuatorene mindre, mens fergen kunne bevege seg, når den lå til brygga.

Videre ble det ønsket å gjøre løsning 1.2 mer fleksibel og bevegelig. En forbedring av løsning 1.2 ble derfor å dele låsingen opp i to



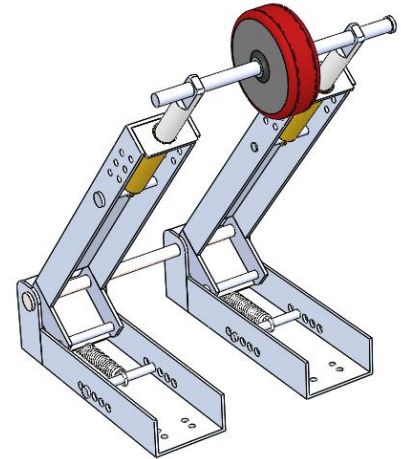
Figur 30 – Løsning 1.3

mindre systemer som kunne fungere separat. På denne måten kunne fergen ha større mulighet til å bevege seg når den lå i dokk..

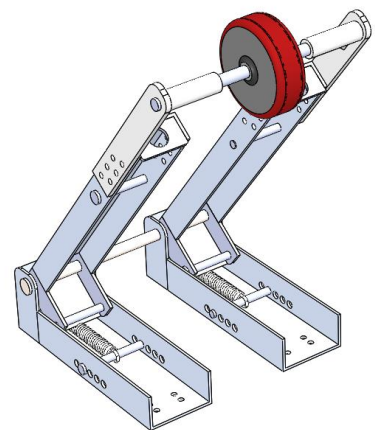
6.3.4 Endelig løsning 1.4

I utformingen av den endelige løsningen ble måten systemet skulle fjæres opp på bestemt og hvordan systemet skulle kunne dempe potensielle støt fra fergen. Utformingen av den endelige løsningen handlet også om å finne riktige komponenter og optimalisere designet for produksjon. Løsningen ble derfor detaljdesignet på bakgrunn av verkstedets produksjonsmetoder og tilgjengelige materialer. Denne fasen var en krevende prosess, da hver mekanisme måtte detaljanalyseres og beregnes for, slik at de riktige komponentene ble valgt.

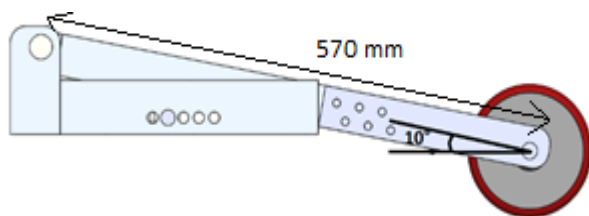
Ettersom systemet skulle være en prototype, har løsningen blitt designet slik at det kan testes for ulike funksjonaliteter og tilpasse armene til at de står i riktig høyde for når lemmen presser ned hjulene i krokene. Fjæringen av armene er lagt opp slik at man kan stramme opp fjæringen. Dette er en nødvendighet for å finne ut hvilken høyde systemet på bryggen må ha for at lemmen skal kunne presse hjulet ned i krokene. Løsningen er også designet slik at det kan testes for støtdempere eller ikke, og om det skal brukes to hjul eller ett hjul i forhold til kroken som står på fergen.



Figur 31 – Løsning 1.4 med støtdempere



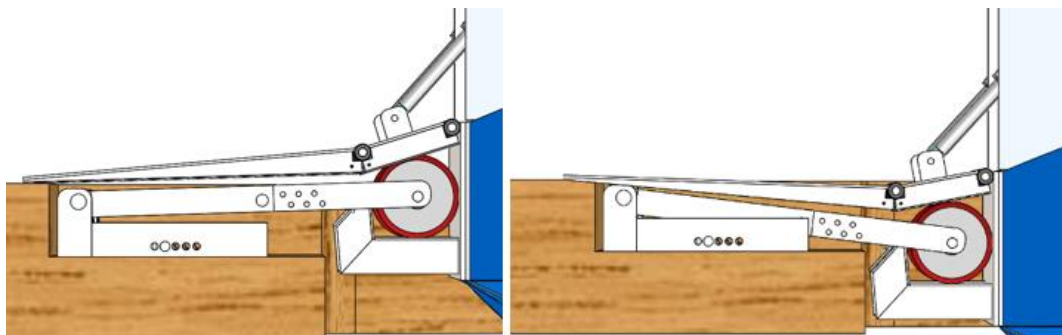
Figur 32 – Løsning 1.4 med stivt system



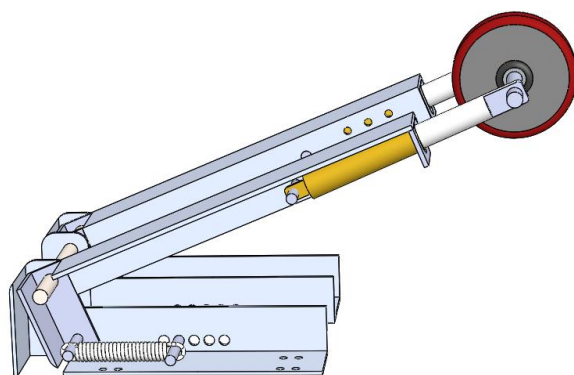
Figur 33 – Løsning 1.4 maks utslag

Med dette låsesystemet vil fergen kunne gå i lås om fergen kommer inn i med ulike høyder med tanke på last og bølgebevegelser. Låsesystemet kan stå med en vinkel på 10 grader nedover, noe som gir en et utslag på 9,9 cm ($570 \text{ mm} \cdot \sin(10) = 99 \text{ mm}$). Dette kommer også an på hvilken høyde systemet på bryggen blir plassert i forhold til fergen.

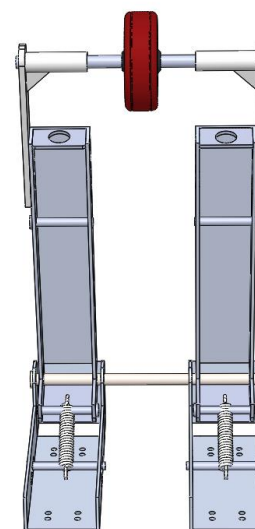
Figur 34 viser hvordan låsesystemet vil posisjonere seg etter fergen ved normalposisjon og når den er tungt lastet, og viser at løsningen i designet kan justere seg etter bevegelsene til fergen og bryggen.



Figur 34 – Løsning 1.4 med ferge i normalposisjon og ferge tungt lastet

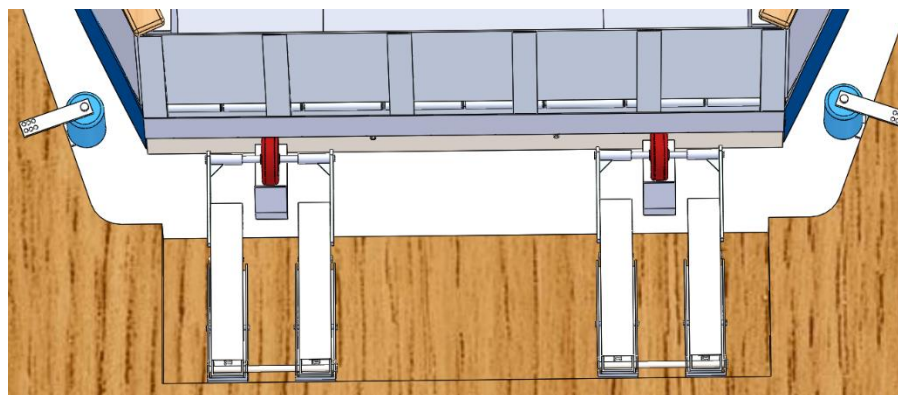


Figur 36 – Løsning 1.4 sett fra siden. Utslaget til hjulet kan justeres. Illustrasjon med støtdempere



Figur 35 – Løsning 1.4 sett forfra. Illustrasjon med forsterkere/forlengere for hjulaksel

Den endelige løsningen vil ha en margin på 16 cm til hver side av hjulet, dette blir ansett som tilstrekkelig av prosjektgruppen for en prototype, ettersom bryggeutformingen vil bidra til å posisjonere fergen.



Figur 37 – Løsning 1.4 sett ovenfra

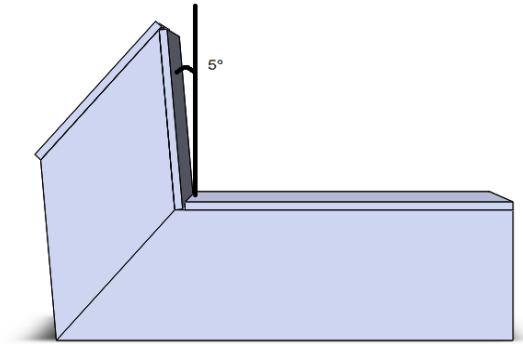
6.4 Design av krok og brakett til aktuatorene

Krok

Oppgaven for krokene er å fange opp hjulene ved dokking og holde de i riktig posisjon. Krokene er derfor utformet slik at de passer til hjulet og løsningen.

I utgangspunktet ble kroken designet slik at den besto av to solide vinkler på hver side og tynnplater rundt for å stabilisere delen og fange opp hjulet. Etter ønske fra verksted ble det bestemt at hele delen skulle produseres massiv, ettersom det var raskere og enklere å lage. Vekten av delen ble betydelig høyere, men dette ville ikke påvirke funksjonen. Å produsere den som massiv førte til at den kunne skaleres ned på størrelse og fortsatt være sterk nok.

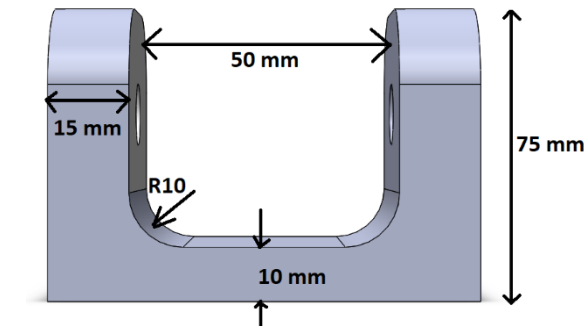
Den er skråstilt i ene enden, slik at hjulet enklere ruller inn kroken hvis hjulet skulle komme inn lavt. Innsiden av kroken står med 95 grader, slik at hjulet enklere går opp fra kroken.



Figur 38 – Krok

Brakett

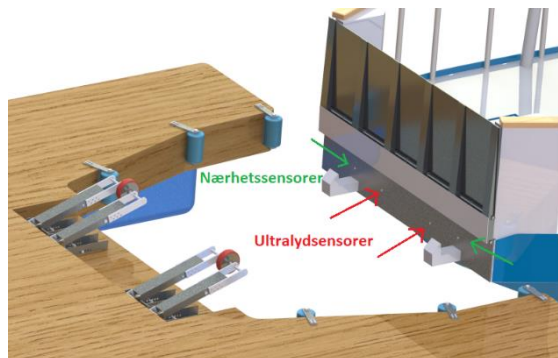
Braketten til aktuatorene måtte maskineres i aluminium for å kunne sveises på lemmen, ettersom en brakett i stål har høyt smeltepunkt ville det gjøre det vanskeligere å sveise braketten på lemmen som hovedsakelig består av aluminium. Utformingen av denne delen ble gjort i SolidWorks etter hvordan spenningene ble fordelt i komponenten, slik at det ble brukt nok aluminium til å fordele spenningene. En annen fordel med SolidWorks var at 3D-modellen kunne med noen få justeringer brukes videre i CNC-maskineringen av delen.



Figur 39 – Brakett

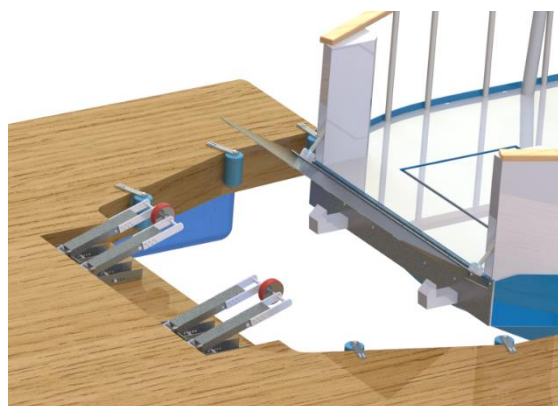
6.5 Dokkingprosessen

Prosjektgruppen ser for seg at dokkingprosessen av det endelige designet blir utført på følgende måte:



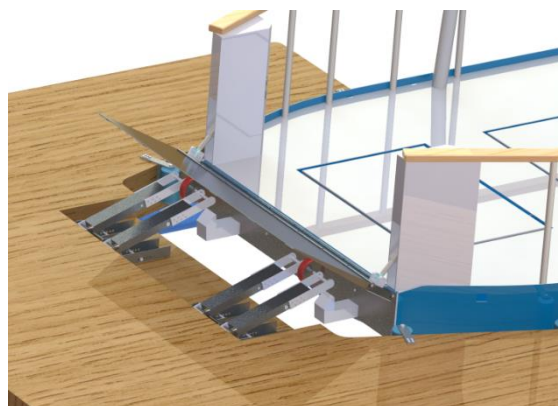
Figur 40 – Fergen kommer inn mot kai

Steg 1: Når fergen kommer innenfor en viss radius til bryggen vil ultralydsensorene aktiveres og sende et signal til PLSen.



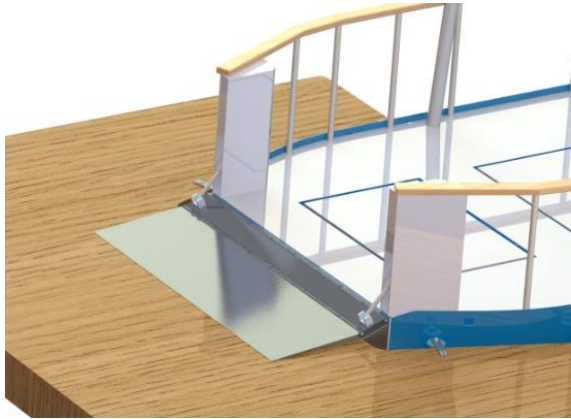
Figur 41 – Lem senkes til 45°

Steg 2: PLSen sender et signal videre til aktuatorene om å senke lemmen til en 45° vinkel.



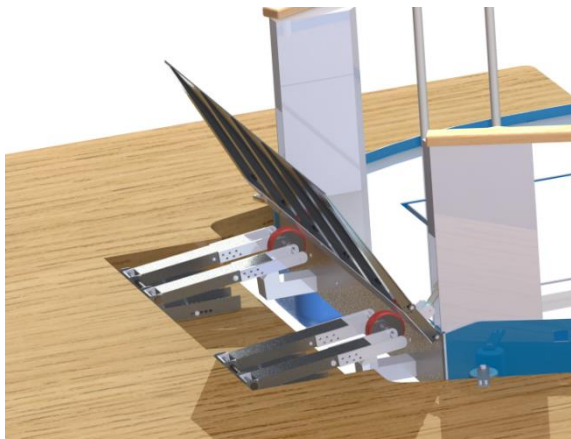
Figur 42 – Lem og hjul i kontakt

Steg 3: Når hjulene på kai og lemmen kommer i kontakt vil hjulene bli presset ned, rulle nedover lemmen og ned i krokene. Når hjulene er nede i krokene vil nærhetssensorene bli aktivert og sende et signal til PLSen.



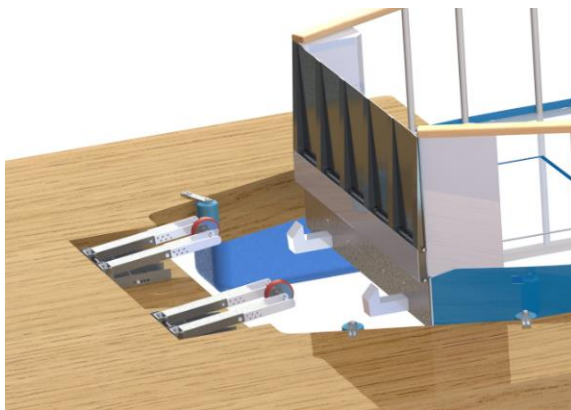
Figur 43 – System i lås

Steg 4: PLSen sender videre et signal til aktuatorene om at aktuatorene kan senke lemmen helt ned. Nå vil systemet være i lås og passasjerene kan gå om bord.



Figur 44 – Lem og hjul på vei opp

Steg 5: Når fergen er klar til å dra vil lemmen løftes helt opp, samtidig som at hjulene spretter opp fra krokene.



Figur 45 – Opplåst system

Steg 6: Når lemmen er helt oppe vil fergen kjøre videre.

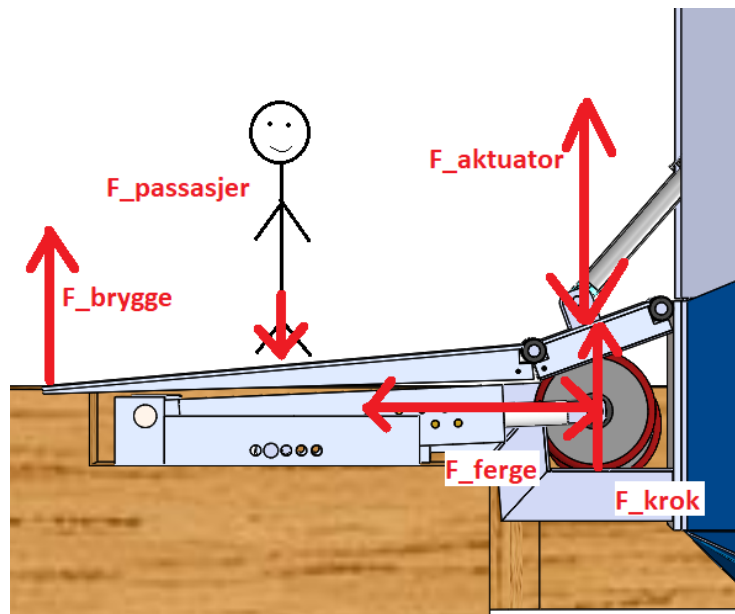
7 Beregning og dimensjonering

Det som gjør at løsning 1 fungerer, er måten mekanismene fungerer på. Mer spesifikt går det ut på hvordan mekanismene påvirker kreftene slik at de virker på de riktige “stedene”. I denne delen vil prosjektgruppen foreta håndberegninger av løsning 1. I styrkeberegningene har prosjektgruppen forsøkt å beregne på de kreftene som har blitt ansett som de mest kritiske for systemet. For å få så reelle tall som mulig, har prosjektgruppen tatt utgangspunkt i tabeller fra Smith Stål og Astrup AS over materialegenskapene til de ulike delene som løsning 1 består av. Flere av styrkeberegningene har blitt gjort i etterkant av når ulike materialer og design hadde blitt valgt.

Illustrasjonen viser hvilke krefter løsning 1 blir dimensjonert for. Dimensjonering av de ulike delene av løsning 1 blir gjort i dette kapittelet og neste, simuleringer.

Fra illustrasjonene blir kreftene definert slik;

- **F_brygge** er kraften bryggen presser lemmen opp med.
- **F_passasjer** er tyngden til passasjerene.
- **F_ferge** er strekk og trykkrefter (støtkraft) fra fergen til dokkingsystemet.
- **F_aktuator** er kraften aktuatorene trekker lemmen opp med og holder lemmen nede med.
- **F_krok** er kraften som kroken presser lemmen opp med, når lemmen står nede.



Figur 46 – Krefter som operer på system

7.1 Lineær aktuatorene

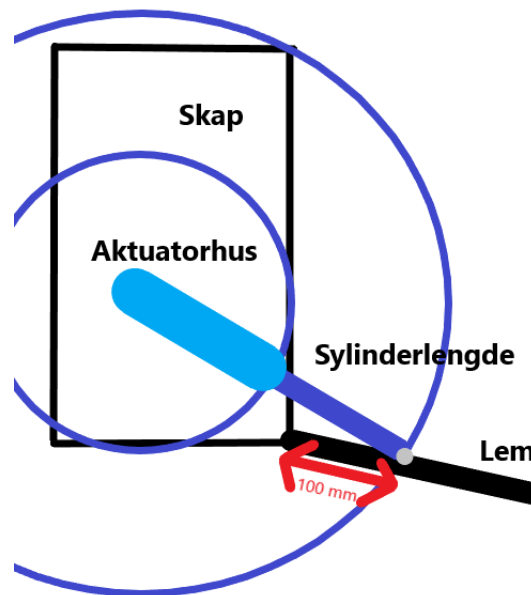
Dimensjonene til de elektriske lineæraktuatorene ble valgt på bakgrunn av størrelsen til skapene de skulle stå i. Skapene ble designet tidlig i prosjektet før en løsning hadde blitt valgt. Lineæraktuatorene ble valgt samtidig, og måtte bestilles tidlig på grunn av lang bestillingstid og at automatiseringsgruppen hadde behov for å kunne programmere disse. Skapene satte betingelsene for hva sylindrelengden for aktuatorene kunne bli og hvor langt ut de kunne festes på lemmen. Lineæraktuatorene ble derfor valgt slik at lemmen kunne få et utslag på 12 grader ned mot kaien. Dette var viktig hvis fergen stod høyere enn bryggen, og det viste seg seinere å være viktig for at det ytre leddet av lemmen skulle kunne hvile på bryggen.

Størrelsen til aktuatoren ble funnet ved å bruke passer og skissere opp største mulige rotasjonsbane som aktuatorhuset kunne rotere med uten å gå utenfor skapets vegger. Videre ble ytre bane skissert opp. Dette ble gjort iterativt, til det ble funnet en aktuator som passet geometrisk. En forenklet modell ble laget i SolidWorks for å dobbeltsjekke at geometrien passet. Braketten til aktuatorene ble funnet til å måtte bli plassert 100 mm fra rotasjonsaksen til lemmen

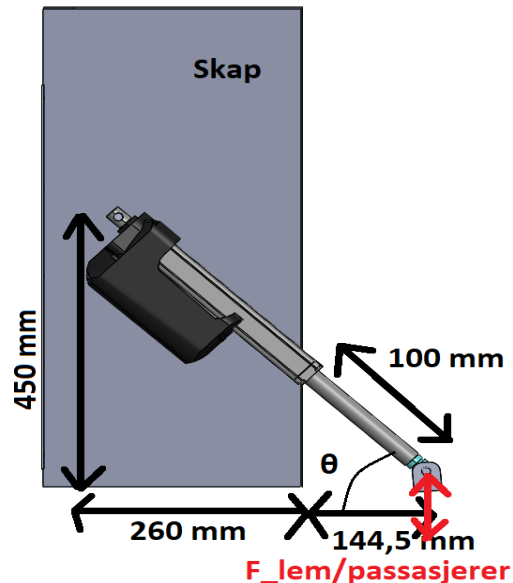
Aktuatorene som ble valgt, ble bestilt fra Linak AS og kunne produsere en dynamisk kraft på 1700 N under bevegelse og en statisk kraft på 2200 N når aktuatoren var låst i posisjon. Disse kreftene ble videre dekomponert for å finne kraften de reelt kunne trekke på lemmen for å dra lemmen opp.

I dette delkapittelet er det den dynamiske kraften som beregningene vil ta utgangspunkt i. Siden aktuatoren står med en vinkel er det viktig å finne ut hvor mye den løfter i vertikal retning. Arbeidet som aktuatorene må utføre er størst når lemmen står horisontalt.

Vinkelen blir funnet ved:



Figur 47 – Posisjon til aktuator



Figur 48 – Dimensjoner til aktuator

$$\tan\theta = \frac{y}{x} \quad (1)$$

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{x}{y}\right) = \tan^{-1}\left(\frac{450,0 \text{ mm}}{260,0 \text{ mm} + 144,5 \text{ mm}}\right) = 48,5^\circ$$

Den dynamiske kraften ($F_{y,Dynamisk}$) aktuatoren kan løfte med i vertikal retning blir dermed:

$$\sin \theta = \frac{F_{y,Dynamisk}}{F_R} \quad (2)$$

$$F_{y,Dynamisk} = \sin \theta \cdot F_R = \sin (48,5) \cdot 1700 \text{ N} = 1272,2 \text{ N}$$

Siden det er 2 aktuatorer blir den dynamiske kraften dobbelt så stor:

$$2 \cdot F_{y,Dynamisk} = 2 \cdot 1273,22 \text{ N} = 2546,5 \text{ N} \quad (3)$$

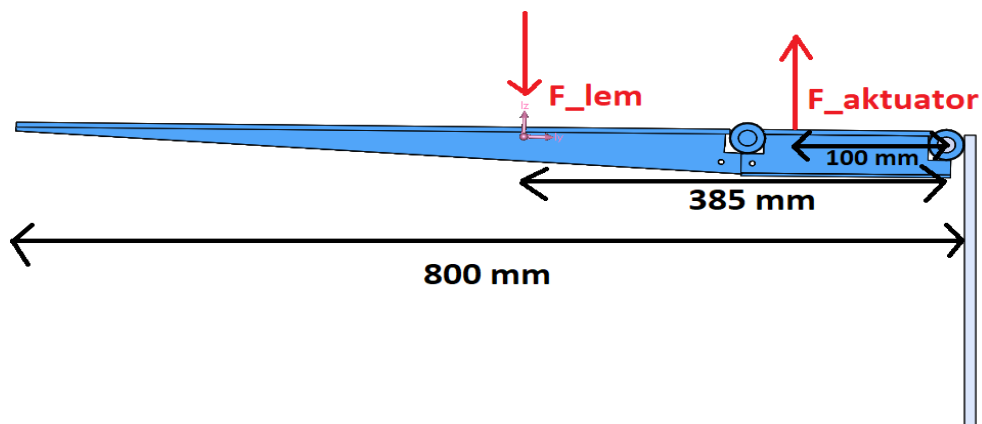
Kraften som aktuatorene må løfte med blir regnet ut i neste kapittel.

7.2 Lem

F_{lem} er tyngden til lemmen. Tyngden ble estimert ved å regne ut volumet til de ulike delene i SolidWorks. SolidWorks ble også benyttet til å estimere tyngdepunktet til lemmen, der tyngden angriper fra massesenteret til lemmen. Tyngdepunktet ble estimert til å være 385 mm ut fra rotasjonsaksen til lemmen.

F_{aktuator} er kraften aktuatoren må løfte lemmen med. Aktuatoren er festet 100 mm ut i fra rotasjonsaksen. Det må videre nevnes at disse beregningene ikke ha tatt hensyn til motstand i hengslene, da man ikke vet hvor stor friksjon som vil oppstå her. I utregningene antar man at motstanden er neglisjerbar. Det er lagt til en sikkerhetsfaktor på 1,2 for egenvekt og 1,6 for nyttelast (Dørum, 2016).

Dynamisk, kreftene som kreves for å løfte lemmen:



Figur 49 – Krefter på lem med egenvekt og aktuator

For å regne ut kraften som aktuatorene må løfte med, regner man på momentet om rotasjonsaksen under likevekt. I dette tilfellet når lemmen er nede. Uttrykket for hva aktuatorene til sammen må løfte med blir derfor:

$$\Sigma M_0 = 0 \quad (4)$$

$$F_{lem} \cdot L_{lem} - F_{aktuator} \cdot L_{aktuator} = 0$$

$$F_{aktuator} = \frac{F_{lem} \cdot L_{lem}}{L_{aktuator}} = \frac{38 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,2 \cdot 0,385 \text{ m}}{0,100 \text{ m}} = 1722,2 \text{ N}$$

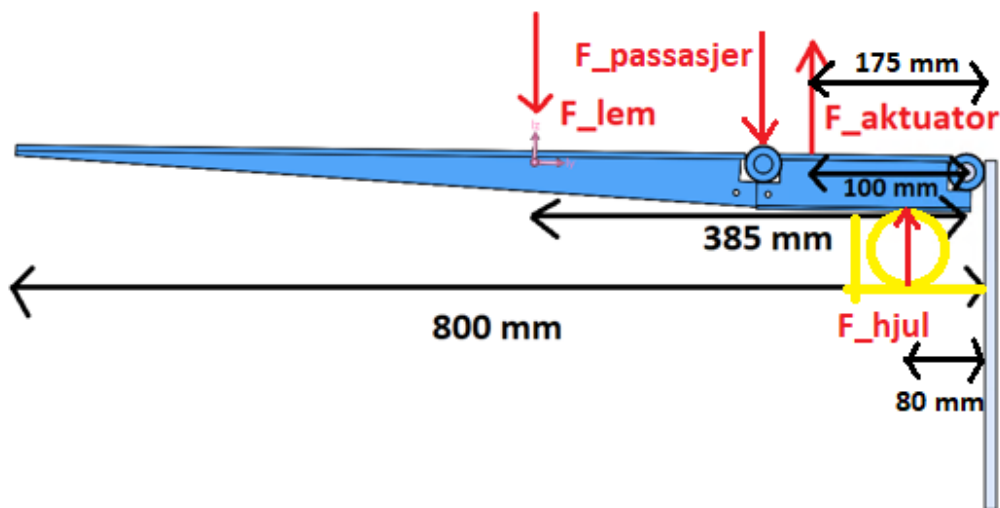
Dette gir en sikkerhetsfaktor (SF) på:

$$SF = \frac{F_{y,Dynamisk}}{F_{aktuator}} = \frac{2546,45 \text{ N}}{1722,24 \text{ N}} = 1,5 \quad (5)$$

og en sikkerhetsmargin på (SM) på:

$$SM = 2 \cdot F_{y,Dynamisk} - F_{aktuator} = 2546,45 \text{ N} - 1722,24 = 824,2 \text{ N} \quad (6)$$

Statisk, når lemmen står i ro:



Figur 50 – Krefter på lem med passasjerer

Når lemmen står nede vil den ytre leddet av lemmen hvile på kaien. I denne utregningen vil lemmen undersøkes for når aktuatorene står nede mens det går passasjerer over. I verste tilfelle antas det at det går seks personer på 80 kg over lemmen, og på et tidspunkt befinner alle samtidig seg 175 mm fra rotasjonsaksen. I realiteten vil disse passasjerene være fordelt over lemmen, slik at delen som hviler på bryggen vil overføre mer tyngde til bryggen.

Et viktig moment i denne løsningen er at den indre delen av lemmen hviler på hjulene, som videre hviler å krokene. Radiusen til hjulet er 80 mm. Det er regnet på en faktor på 1,6 for nyttelast og 1,2 for egenvekt.

$$F_{passasjer} = 6 \cdot 80 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,6 = 7534,1 \text{ N} \quad (7)$$

$$F_{Aktuatorer_statisk} = 2 \cdot 2200 \cdot \sin(48,5) = 3296,4 \text{ N} \quad (8)$$

$$F_{lem} = 38 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 1,2 = 447,3 \text{ N} \quad (9)$$

Regner så momentet om rotasjonsaksen for å finne hvor mye hjulet må presse opp med.

$$\Sigma M_0 = 0 \quad (10)$$

$$F_{passasjer} \cdot 175 \text{ mm} + F_{lem} \cdot 385 \text{ mm} - F_{Aktuator-statisk} \cdot 100 \text{ mm} - F_{hjul} \cdot 80 \text{ mm} = 0$$

$$F_{hjul} = \frac{7534,1 \text{ N} \cdot 175 \text{ mm} + 447,3 \text{ N} \cdot 385 \text{ mm} - 3296,4 \text{ N} \cdot 100 \text{ mm}}{80 \text{ mm}} = 14\,513,0 \text{ N} \approx 1479,4 \text{ kg}$$

1 479,4 kg er den totale tyngden hjulene må kunne ta opp. Hvert hjul har en maks kapasitet på 400 kg/stk. Antall hjul som vil være nødvendig er derfor:

$$\text{Antall hjul} = \frac{\text{masse}}{\text{masse/stk}} = \frac{1479,4 \text{ kg}}{400 \text{ kg/stk}} = 3,7 \text{ stk} \quad (11)$$

Siden hjulene er i hele enheter og hver av de to låsesystemene på bryggen skal være identiske vil det bli brukt fire hjul, altså to på hvert system. Dette fører til at den totale massen de fire hjulene må ta opp blir:

$$\text{Masse} = \text{stk} \cdot \frac{\text{masse}}{\text{stk}} = 4 \text{ stk} \cdot \frac{400 \text{ kg}}{\text{stk}} = 1600 \text{ kg} \quad (12)$$

Disse utregningene viser hvilken belastning hjulene og kroken bli utsatt for. Beregningene viser viktigheten av at det indre leddet på lemmen hviler på hjulene.

7.3 System kai

For systemet på kaien skal fungere må systemet dimensjoneres for å tåle et støt og at armene som holder hjulene er riktig fjæret opp til å gå lett opp fra krokene. Et hardt støt kan deformere konstruksjonen på bryggen, og det er ønskelig at systemet tåler å bli testet med, da milliAmpere er en prototype. I et potensielt hardt støt antar prosjektgruppen at bryggen også vil bli flyttet på, slik at både låsesystemet og bryggen tar opp et støt. Dette antar prosjektgruppen skjer over ett sekund. Videre for at konstruksjonen ikke skal deformeres, antas det støtet ikke deformerer konstruksjonen, som betyr at støtet er fullstendig elastisk. I et ekstremtilfelle der fergen kommer inn antas det fergen vil treffe låsesystemet og bryggen med en hastighet på 3 m/s. Fergen har en vekt på 1830 kg uten passasjerer, og en kapasitet på seks passasjerer. Vekten på passasjerene settes til 80 kg hver. Fullastet vekt på fergen blir dermed: $1\,830\text{ kg} + 6 \cdot 80\text{ kg} = 2\,310\text{ kg}$.

Ved å bruke en sammenheng av formlene for bevegelsesmengde $\Delta p = \Delta m \cdot v = m_0 \cdot v_0 - m_1 \cdot v_1$ (her er $v_1 = 0$, da hastigheten er null etter kollisjon) og kraftimpuls $I = F \cdot t$, får man sammenhengene:

$$F_{Ferge} \cdot t = m \cdot v \quad (13)$$

$$F_{Ferge} = \frac{m \cdot v}{t}$$

Kraften som fergen treffer dokkingsystemet med, blir dermed:

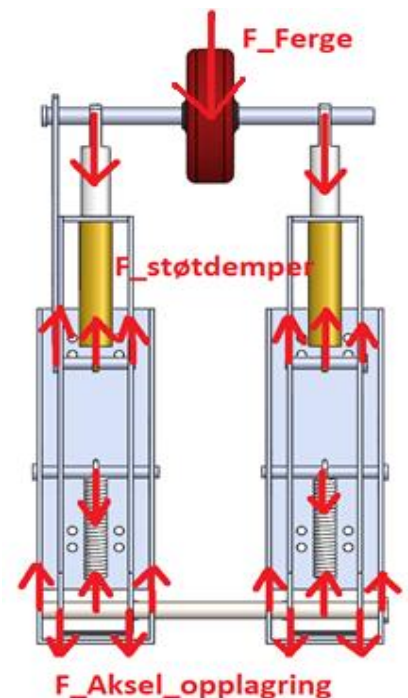
$$F_{Ferge} = \frac{2310\text{ kg} \cdot 3\text{ m/s}}{1\text{ sek}} = 6\,930\text{ N}$$

Som kan betraktes som at fergen støter mot bryggen med en tyngde på 706,4 kg. Dette er kun et tall for å ha noe reelt å jobbe med. Det er viktig at dette kun er et estimat, og forutsetter at låsesystemet ikke er fastopplagret på kaien.

7.3.1 Oppbygging og kraftoverføring på system brygge

Illustrasjonen viser hvordan kreftene virker på systemet som står på bryggen. Hjulet er både den komponenten som tar imot strekk og trykkrefter fra fergen og den som blir presset ned i kroken.

Videre forplanter kreftene seg til akselen som hjulet er festet på. Akselen kan bli lagret opp av to støtdempere eller av to stive plater. Platene og akselen til hjulet blir lagret opp av en U-profil som videre blir lagret opp av aksel for hele systemet. I dette tilfellet antas det at akselen som hjulet er lagret opp på er det elementet som er kritisk.



Figur 51 – Krefter system kai

7.3.2 Belastning på hjulaksel

Hjulakselen kan bli lagret opp av enten to støtdempere eller av to forlengere. Hensikten med å ha to støtdempere er å kunne dempe for et potensielt støt. Forlengerne er lagt opp slik at de forsterker akselen hjulene er lagret opp på, og skal brukes hvis støtdemperne blir for svake.

For et støt vil akselen få en kraft på $6930\text{N}/2 = 3465\text{ N}$ (pga. to systemer på brygge). I denne beregningen blir denne kraften betraktet som en punktlast. Ved å regne ut utbøyningen ved en punktlast får man,

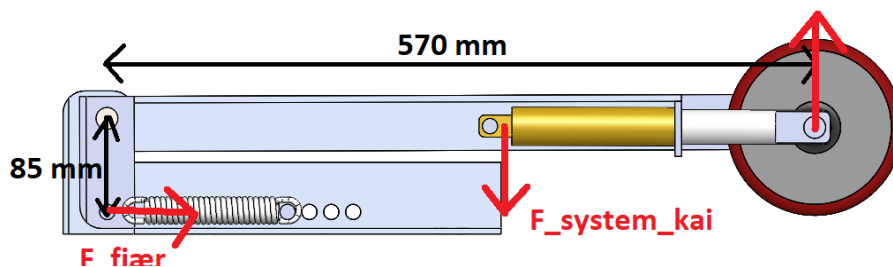
$$\text{utbøyning} = \frac{F_{\text{ferge}}}{EI} \cdot \frac{L^3}{48} \quad (14)$$

E = elastisitetsmodulen, I = annet arealmoment ($\frac{\pi}{64} \cdot d^4$, massiv aksel) og L er lengden til akselen. Utbøyningen blir dermed:

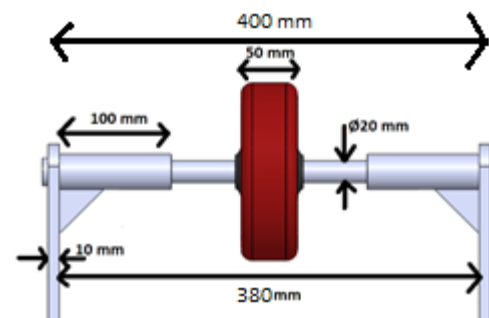
$$\frac{3465\text{ N}}{200000 \cdot \left(\frac{\pi \cdot (20\text{mm})^4}{64}\right)} \cdot \frac{(400\text{mm})^3}{48} = 2,94\text{ mm}$$

7.3.3 Fjæropplagring

For at låsemekanismen til dokkingsystemet skal kunne fungere, må armen hjulet er festet på bli fjæret sterkt nok til at hjulet lett kan gå opp fra kroken når lemmen løftes opp. Kraften fjæren må trekke med blir beregnet ved å regne ut momentet rundt akselopplagringen. Her er vekten til armen estimert til 7 kg. Det må presiseres at dette kun er et estimat, som inneholder to U-profiler, to støtdempere og to hjul. Kraften hjulene må gå opp fra kroken med er estimert til 98,1 N (tilsvarer 10 kg). Videre er tyngdepunktet satt til 350 mm ut fra rotasjonsaksen, ettersom vekten til hjulet og eventuelt støtdemperne flytter tyngdepunktet utover fra akselopplagringen.



Figur 53 – Krefter system kai



Figur 52 – Krefter hjulaksel

F_{Hjul} er kraften hjulet skal presse opp med fra kroken. I beregningene blir F_{Hjul} satt til negativ, ettersom systemet skal være i likevekt. Å sette på denne kraften fører til at kraften fjæren leverer blir tilsvarende større og vil presse hjulet opp med en kraft med 98,1 N når F_{Hjul} fjernes. I disse beregningen er det ikke tatt med noe lastfaktor, da en lastfaktor vil gjøre dimensjoneringen upresis.

For å beregne hvilken kraft fjærene må ha, har det blitt tatt utgangspunkt i at systemet skulle være i likevekt. Det vil si at momentet om akselen må være null.

$$\Sigma M_{aksel} = 0 \quad (15)$$

$$F_{fjær} \cdot 85 \text{ mm} - F_G \cdot 350 \text{ mm} - F_{hj\ddot{u}l} \cdot 570 \text{ mm} = 0$$

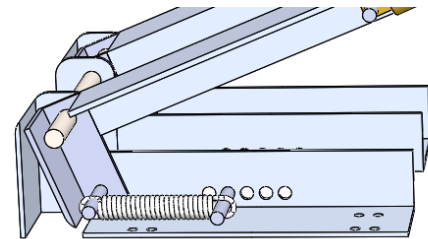
$$F_{fjær} = \frac{F_G \cdot 350 \text{ mm} + F_{hj\ddot{u}l} \cdot 570 \text{ mm}}{85 \text{ mm}}$$

$$F_{fjær} = \frac{(7 \text{ kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}) \cdot 350 \text{ mm} + (10 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2) \cdot 570 \text{ mm}}{85 \text{ mm}} = 940,8 \text{ N}$$

Videre blir denne kraften fordelt over to fjærer. Kraften per fjær blir derfor:

$$F_{fjær}/per = \frac{F_{fjær}}{2} = \frac{940,8 \text{ N}}{2} = 470 \text{ N} \quad (16)$$

For å kunne velge riktig fjær, må vandringsen og fjærstivheten finnes. Fra CAD-modellen ble det estimert at armen hjulet er lagret med måtte stå med en vinkel på 12 grader i forhold til bryggen (her kan det nevnes at fjærfestet på systemet på bryggen kan flyttes, slik at armen kan stå med en høyere vinkel).

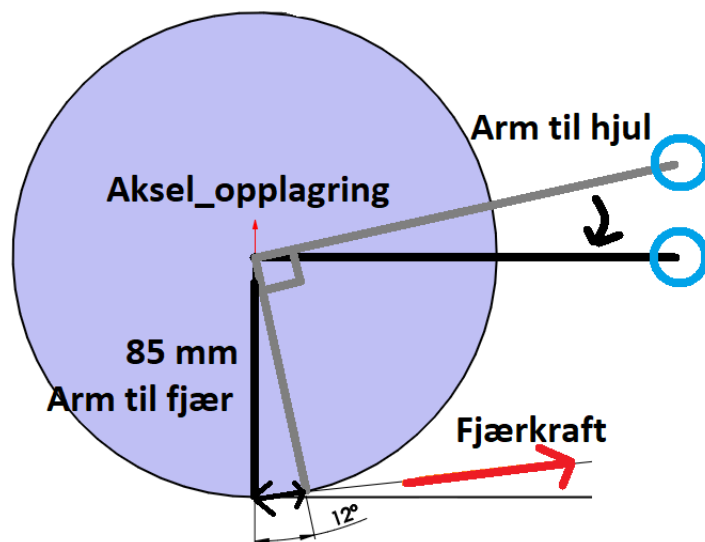


Figur 54 – Fjæropplagring

For å kunne finne riktig fjær, måtte avstanden som fjærene blir strukket med funnet. Ved å bruke cosinussetningen kan vandringsen til fjæren bli funnet:

$$R_{radius} = 85 \text{ mm}$$

$$V_{vinkel} = 12^\circ$$



Figur 55 – Bevegelsesbanen til aksel

Cosinussetningen gir:

$$Sn = \sqrt{R_{radius}^2 + R_{radius}^2 - 2 \cdot R_{radius} \cdot R_{radius} \cdot \cos(V_{vinkel})} \quad (17)$$

Som gir:

$$Sn = \sqrt{85\text{mm}^2 + 85\text{mm}^2 - 2 \cdot 85\text{mm} \cdot 85\text{mm} \cdot \cos(12)} = 17,8 \text{ mm}$$

Fjærens stivhetskoeffisient blir videre beregnet til:

$$K_{fjærstivhet} = \frac{479,4\text{N}}{17,8 \text{ mm}} = 26,93 \text{ N/mm} \quad (18)$$

Utrekningene er basert på hva som kreves for finne riktig dimensjon av fjærene hos ulike fjærprodusenter.

7.4 Oppsummering av beregningene

Tabell 11 – Oppsummering av beregningene

Hva	Kraft
F_aktuator, dynamisk løftekapasitet	2 546,5 N
Belastning på krok	1 4513 N
Akselutbøyning	2,94 mm
Fergestøt	6 930 N
Fjærvandring [Sn]	17,8 mm
Fjærstivhet [K]	26,93 N/mm

Tabellen viser en oppsummering over de viktigste kreftene og dataene som prosjektgruppen har brukt i dimensjoneringen av det endelige designet. For enkelte av beregningene har prosjektgruppen vært nødt til å ta antagelser. Disse er beskrevet tidligere i kapittelet.

8 Simulering og sammenligning

I dette kapitlet har det blitt gjort analyser og simuleringer av designet i SolidWorks. Disse vil bli sammenlignet med håndberegningene fra kapittel 7 Beregning og dimensjonering. For å få så reelle simuleringer som mulig har materialegenskapene til materialene blitt hentet fra Smith Stål og lagt inn i SolidWorks.

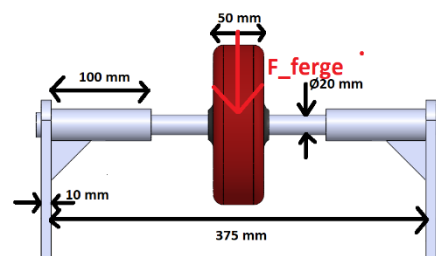
Simuleringene er utført statisk og tar ikke hensyn til utmatting, sprekkdannelse og er kun for få dypere innsikt på hvor store spenninger som opptrer på deler av designet. Flere av simuleringene har blitt gjort etter at deler av den endelige designet ble bygget.

8.1 Simuleringer

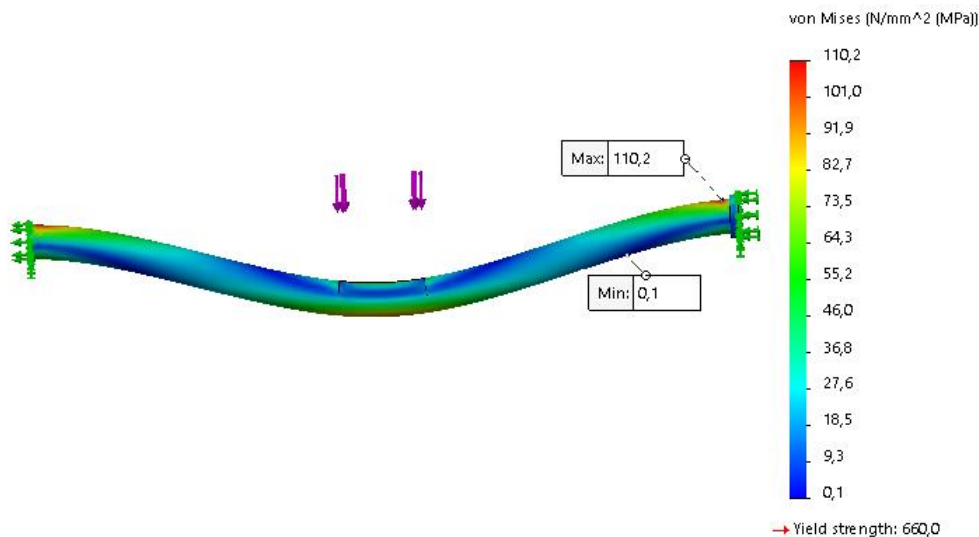
Aksel til hjulet

I denne simuleringen har prosjektgruppen analysert for hvis fergen støter til bryggen med en kraft på 6 930 N. Hver av de to systemene på bryggen vil derfor ta opp en kraft på $\frac{6\,930\text{ N}}{2} = 3\,465\text{ N}$ hver.

Simuleringen er utført kun på akselen og ikke på forlenger/avstiver. Akselen har blitt lagret opp i begge ender, mens kraften angriper midt på akselen over en lengde på 50 mm (bredden til ett hjul).



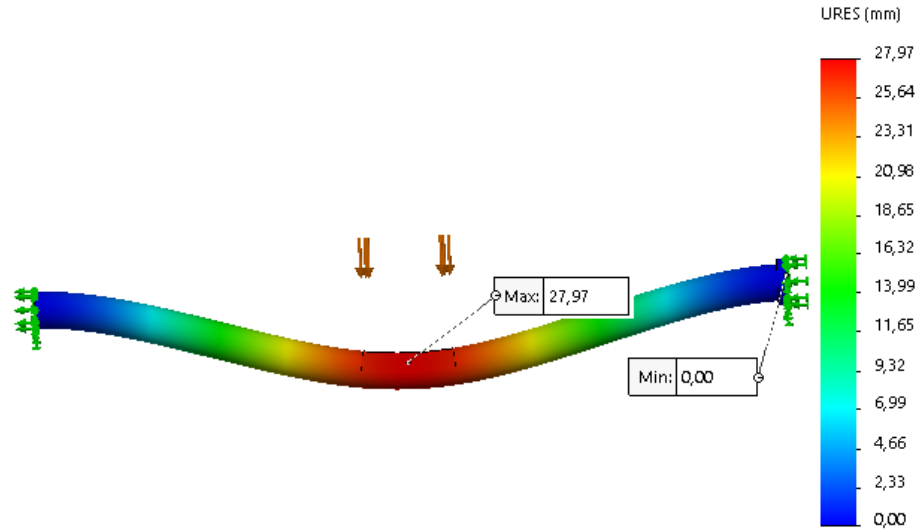
Figur 57 – Hjulopplagring



Figur 56 – Spenningsanalyse på aksel

Figuren viser en maks spenning på 110,2 N/mm², som er godt under flytegrensen til akselen. Dette betyr at akselen tåler kraften fergen støter med. Det må nevnes at i simuleringen er de

største spenningene ved opplagringen, disse er i realiteten mindre, da akselen har to forsterkere som vil redusere denne spenningen, se Figur 57.

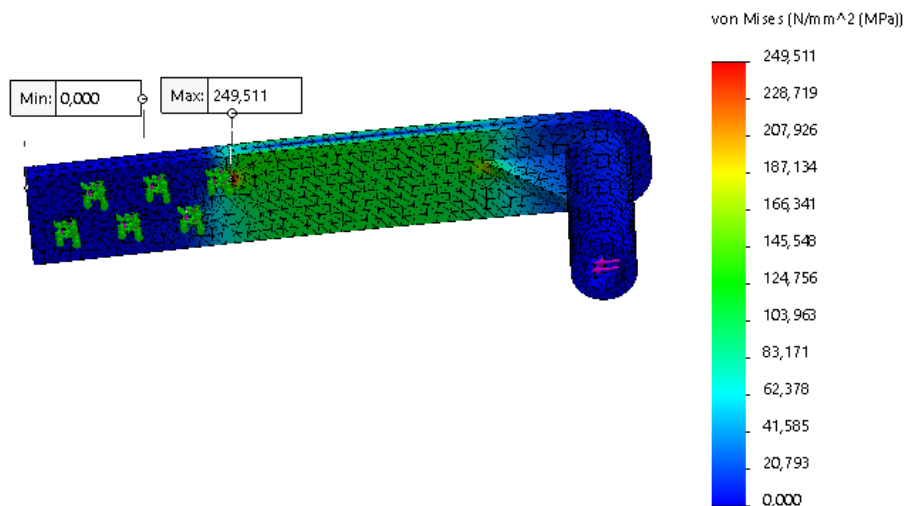


Figur 58 – Analyse av utbøyning på aksel

Fra simuleringen fikk akselen en maksimal utbøyning på 27,97 mm. Dette på en aksel med lengde 400 mm. Ettersom utbøyningen foregår under flytegrensen, kan det derfor antas at akselen vil gå tilbake til sin vanlige posisjon uten noen varig deformasjon.

Forlenger/avstiver

Videre blir akselen lagret opp av en forlenger/avstiver på hver side. Denne overfører kraften fra støttet til U-profilen på systemet på bryggen. Denne blir festet med seks skruer på U-profilen. I



Figur 59 – Spenningsanalyse på forlenger/avstiver

denne simuleringen er delen lagret opp i skruene, mens kraften angriper fra akselen. Det er lagt til «mesh-kontroll» rundt skruehullene, for å få bedre nøyaktighet.

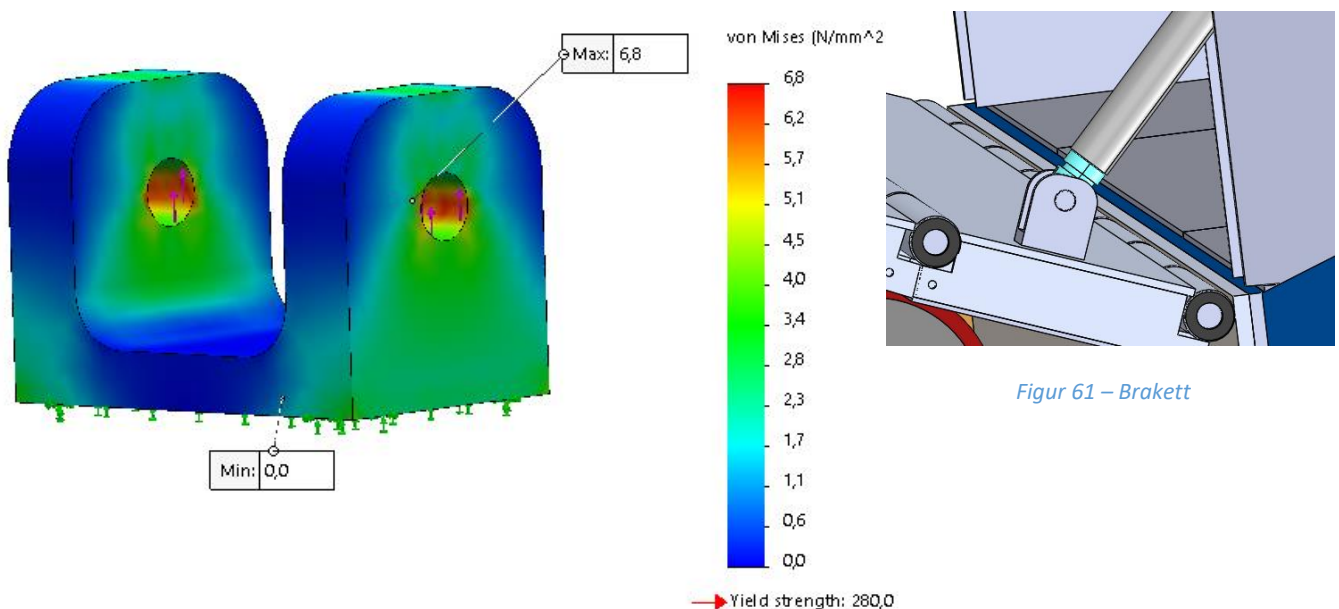
Fra simuleringen kan det ses at høyeste spenning opptrer ved første skruefeste. Denne er på 249,5 N/mm² og like under flytegrensen på 255 N/mm².

Brakett til lineæraktuatoren

Aktuatorerne er festet til lemmen gjennom en brakett, og er dimensjonert til å kunne tåle kraften aktuatorerne trekker med.

For braketten ble det brukt løftekapasiteten til en lineæraktuator med en lastfaktor på 1,6.

$$F_{dimensjonerende} = F_{statisk} \cdot 1,6 = 2200 \cdot \sin 48,5 \cdot 1,6 = 2636,3 \text{ N.}$$



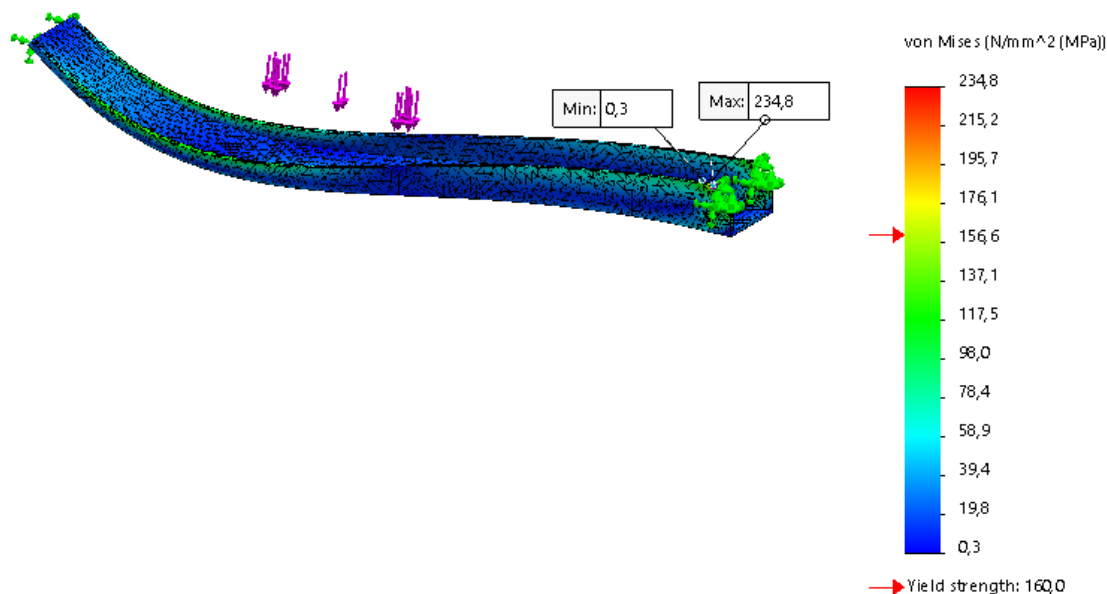
Figur 60 – Spenningsanalyse av brakett

Simuleringen viser at spenningene er langt under flytegrensen til braketten, $6,8 < 280$.

Utbøying av avstiverne til lemmen

I konstruksjonen av lemmen blir det brukt seks avstivere og som i verste tilfelle skal kunne bære seks personer, da dette er maks kapasitet av passasjerer for fergen. I denne simuleringen er avstiveren lagret opp i begge ender, der tanken er at ene siden vil hvile på bryggen, mens den andre vil være sveiset sammen med hengselet til den indre leddet av lemmen. Videre er det tenkt at en person vil stå omtrent midt på avstiveren. Det antas at profilen er svakest i ene enden, så

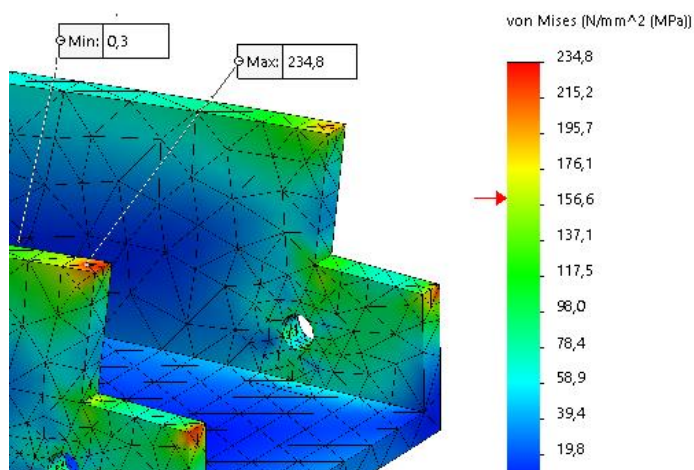
kraften er plassert noe mot denne enden (der lemmer er tynnere). Kraften som brukes er $F = 80 \text{ kg} \cdot 9,81 \cdot 1,6 = 1255,7 \text{ N}$ (m/lastfaktor 1,6).



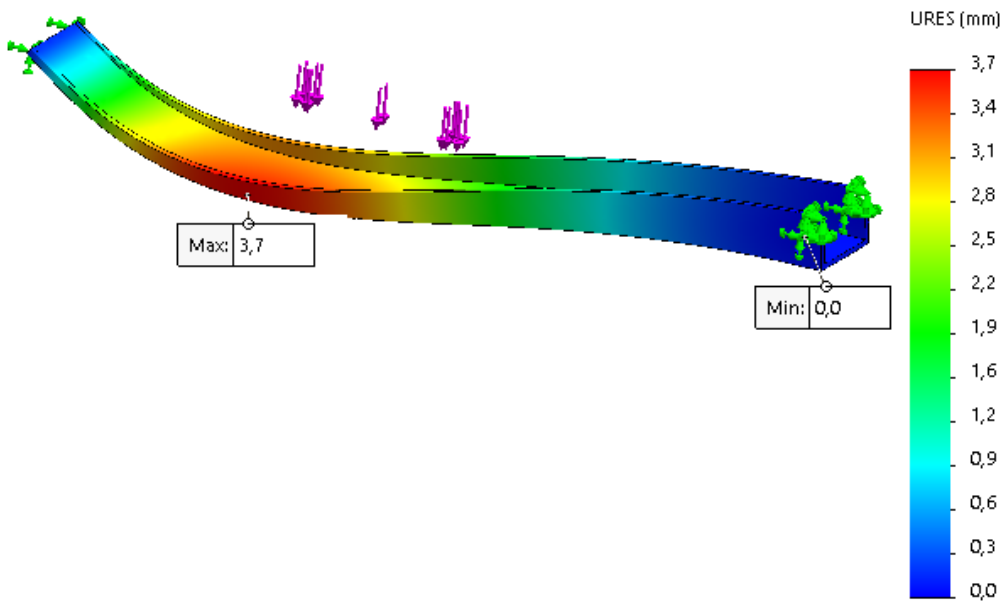
Figur 62 – Spenningsanalyse på avstiver lem

Fra simuleringen kan det ses at maks spenning blir $234,8 \text{ N/mm}^2$, som er mye høyere enn flytegrensen på 160 N/mm^2 . Disse spenningene opptrer ved ene enden som blir sveiset sammen med hengselet. I teorien betyr dette at materialet vil begynne å flyte i disse regionene. I praksis er avstiveren sveist til en aluminiumsplate, som også hengslet er sveist til. Spenningene kan derfor antas å være mer fordelt utover i avstiveren. Simuleringen gir likevel en innsikt i kapasitetene til profilen.

Figur 63 viser et detaljert bilde av hvor høyeste spenning opptrer. I simuleringen kan det ses at spenningene er høyest ved kanten av profilen.



Figur 63 – Detalj over høyeste spenning



Figur 64 – Analyse av utbøyning på avstiver lem

Videre estimeres maks utbøyningen til å være 3,7 mm. Maks utbøyning skjer i området hvor spenningen er under flytegrensen. På de seks avstiverne vil det stå en tynnplate på oversiden som vil hindre at spenningene og deformasjonene vil bli så høye som i denne simuleringen. Grunnet kompleks simulering ble ikke tynnplaten tatt med her.

8.2 Resultater fra simulering

Ved beregning av spenninger som kan oppstå i konstruksjonen, har det blitt lagt inn en materialfaktor på $\gamma_m = 1,15$ på de ulike materialene designet består av (Dørum, 2016). I simuleringene kunne det ses at noen av komponentene var under flytegrensen til materialet, men ved å legge til en sikkerhetsfaktor, får derfor noen av komponentene for høy spenning.

Tillatt spenning for de ulike komponentene blir derfor:

$$\sigma_{tillat, S165M, akselstål} = \frac{f_{S165M}}{\gamma_m} = \frac{660 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 573,9 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{ tillatt spenning}$$

$$\sigma_{tillat, AL-6082-T6, forlenger} = \frac{f_{AL-6082-T6}}{\gamma_m} = \frac{255 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 221,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{ tillatt spenning}$$

$$\sigma_{tillat, AL-6082-T6, brakett} = \frac{f_{AL-6082-T6}}{\gamma_m} = \frac{255 \text{ N/mm}^2}{1,15} = 221,7 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}, \text{ tillatt spenning}$$

$$\sigma_{tillat,6060-T6,avstiver\ lem} = \frac{f_{AL-6060-T6}}{\gamma_m} = \frac{160\ N/mm^2}{1,15} = 139,1\ \frac{N}{mm^2},\ \text{tillatt spenning}$$

Tabell 12 – Resultater fra simulering

	Dimensjonert kraft	Resultater fra simuleringene	Tillatt spenning	Kapasitet
Aksel (S165M)	3 750 N	110 N/mm ²	573,9 N/mm ²	19,2 %
Forlenger/avstiver system kai (A1-6082-T6)	1 875 N	249,5 N/mm ²	221,7 N/mm ²	112,5 %
Brakett (6082-T6)	1 272,2 N	6,8 N/mm ²	221,7 N/mm ²	3,1 %
Avstiver lem (6060-T6)	1 255,7 N	234,8 N/mm ²	139,1 N/mm ²	168,7 %

8.3 Refleksjon mellom håndberegninger og simulering

I håndberegningene ble det regnet ut hvilke maks krefter som konstruksjonen kan få. Disse har blitt forsøkt simulert i SolidWorks over de ulike delene konstruksjonen består av. Det må nevnes at Finite Element Analysis, FEM-analysen i SolidWorks kan gi noe varierende resultat ettersom SolidWorks deler opp delen i mindre elementer (Mesh). Videre er simuleringene utført statisk, som betyr at SolidWorks ikke tar hensyn til at delene kan gi etter, som kan gi et annet utslag på spenningene.

Fra simuleringene kan man se at for flere av delene at de høyeste opptredende spenningene er høyere enn maks tillatte spenning. Dette betyr at delene kan antas å være underdimensjonerte. Delene må enten designes annerledes eller det må brukes et annet materiale som er tilstrekkelig sterkt nok til at geometrien kan brukes.

Videre må det nevnes at disse beregningene er gjort på bakgrunn av ekstremtilfeller for fergen for å undersøke hvor sterkt systemet er teoretisk, for tilfeller hvor fergen støter til bryggen med en fart på 3 m/s og er fullastet, eller hvis alle passasjerene går om bord samtidig.

9 Resultater fra produksjon

I dette kapittelet blir resultatet av byggingen av noen av delene til det endelige designet presentert og hvilke komponenter som ikke fungerte så optimalt. For øvrig henvises de resterende resultatene til de tidligere kapitlene.

9.1 Det produserte systemet

Skapene som skulle stå på fergen ble laget tidlig i prosjektet og installert om bord i milliAmpere. Videre ble det påvist at milliAmpere ikke var helt nøyaktig i byggingen, slik at når skapene skulle monteres, ble det noen avvik fra den ene siden til den andre siden av fergen. Dette kom av at baug og akterende ikke var helt likt i konstruksjonen.

Når skapene ble sveist på fergen slo skapene seg noe, slik at det ene skapet ble stående noe skjevt. For to av de andre skapene ble åpningen for lineæraktuatorene mindre enn toleransen for å få inn lineæraktuatorene (dette ble løst ved å presse ut åpning til tilstrekkelig klaring for aktuatorene). Ettersom det ene skapet ble stående litt skjevt, måtte prosjektgruppen endre planlagt størrelse på lemmen, slik at lemmen likevel kunne dekke hele fronten av fergen.

Lemmen ble senere produsert av verkstedet. Byggingen av lemmen gikk fint med et godt resultat, men tok noe lenger tid enn først planlagt. Leddene har lav friksjon og lemmen er meget stiv i alle retninger med unntak av i endene på hengslene som gir litt etter.

Platen som passasjerene skal gå på, har fått noen merker, men disse ville ikke synes, da det skal være ett sklifritt belegg på overflaten som skal hindre at passasjerer glir hvis det er vått.



Figur 65 – Produsert skap



Figur 66 – Produsert lem oppreist



Figur 67 – Prousert lem utslagsvinkel



Figur 68 – Produisert lem liggende

Systemet som skulle stå på bryggen ble ikke ferdig, da komponentene som fjærer, støtdempere og hjul ikke kom i tide til produksjon.

9.2 utfordringer under produksjon

Under produksjonen av den endelige løsningen dukket det opp noen problemer:

- Foringen på lemmen ble laget av materialet POM. Foringen måtte dreies til riktig dimensjon og under dreining brakk noen deler av foringen av. Dette kommer av at POM var noe mer porøst enn først antatt. Dette gjaldt for noen av foringene. Dette førte til at verkstedet måtte bruke tid på å lage flere.
- For leddmekanismen på lemmen ble det synlig at hvis lemmen knakk sammen for mye, så ville fjærene som skulle plasseres i U-profilene bli ødelagte. I tillegg var målene til festepunktene til fjærene plassert et par millimeter for lavt for å kunne få inn store nok fjærer.
- Toleranser på ledd. Under produksjonen hadde prosjektgruppen ikke lagt med toleransene for de ulike leddene på lemmen på maskintegningene, så verkstedet måtte legge til toleranser underveis i produksjonen.



Figur 69 – Skade på foring

10 Analyse og diskusjon

I dette kapittelet blir den valgte løsningen analysert og diskutert på bakgrunn av kravspesifikasjonene, styrkeberegningene, simuleringene og det endelige resultatet. Til slutt vil det bli gitt anbefalinger for videre utvikling.

I starten av prosjektet brukte prosjektgruppen tid på å undersøke ulike måter på hvordan en liten passasjerferge kunne låses og hva som var viktig for et låsesystem. Dette innebar å undersøke hvordan fergen beveget seg når den gikk inn til dokk og når den lå i dokk. Dette ble ansett som to forskjellige situasjoner som låsesystemet måtte ta hensyn til. Metodene ble satt sammen til idéer og konsepter, der én idé ble valgt ut for detaljdesign og produksjon.

I det fergen går i dokk er det viktig for fergen å kunne treffe låsesystemet enkelt, da fergen blir påvirket av ulike krefter. Det ble sett på som en nødvendighet for fergen at låsesystemet var fleksibelt og at dokkingsystemet hadde en viss margin for fergen for å ikke trenge å være helt presis. For den andre situasjonen gjaldt det for når fergen var i lås. Når fergen er i lås vil fergen bli utsatt for krefter fra passerende bølger og av passasjerer under ombordstigning som presser fergen ned og bryggen opp eller omvendt. Det var derfor viktig at låsesystemet var fleksibelt både for når fergen gikk inn til dokk og når det befant seg i dokk. Dette kombinert med at systemet skulle kunne tåle å bli brukt for å bli testet av en ferge som på sikt skal bli autonom.

Som grunnlag for diskusjonen må det nevnes at forholdene et dokkingsystem måtte ta hensyn til ikke var diskutert tidligere for milliAmpere, da det ikke fantes data for hvor presist fergen kan dokke og hvordan fergen beveger seg ved en ombordstigning.

10.1 Diskusjon av konsept og løsning

Den endelige løsningen som prosjektgruppen har designet er en løsning som gruppen mener tilfredstiller de fleste utfordringene et slikt dokkingsystem har. Likevel er det en del svakheter i designet og konstruksjonen. Disse blir gått gjennom nærmere i 10.2.1 Forbedringer på nåværende design. Prosjektgruppen har gjennom teorien om hvordan fergen beveger seg, som blir beskrevet i teorikapittelet og gjennom kravspesifikasjonene, undersøkt hva som har måtte ligge til grunn for dokkingsystemet. Dette har blitt brukt til å bygge deler av det endelige designet.

Med fokus på driftssikkerhet mener prosjektgruppen at det endelige designet skal kunne gå i lås fra ulike posisjoner som tar hensyn til om fergen er tungt lastet eller ikke. I horisontal retning vil den endelige løsningen ha en toleranse på 16 cm som kroken på fergen må gripe. Dette anses som tilstrekkelig for en prototype og forutsetter at fergen blir posisjonert riktig av bryggen. I vertikal retning vil fergen ha en toleranse på 9,9 cm, men kan være større eller mindre og avhenger av hvilken høyde låsesystemet blir plassert i forhold til fergen. Denne toleransen skal videre kunne justeres mer ved å strekke opp fjæringen og justere hvilken høyde armen til systemet på bryggen

står i. Disse toleransene anser prosjektgruppen som tilstrekkelige for når fergen går inn i dokk og er i lås, men er kun estimater og må testes for i praksis.

For at brukeropplevelsen av dokkingsystemet skal kunne oppleves som god er det viktig for passasjerene at systemet oppleves som solid og at dokkingprosessen foregår kontrollert. På bakgrunn av at dette har prosjektgruppen forsøkt å lage et så stivt system som mulig som ikke gir etter når passasjerer går om bord. For å absorbere et potensielt støt fra fergen har prosjektgruppen lagt inn støtdempere på systemet på bryggen for å kunne teste om en støtdemper kan dempe bevegelsen til fergen når den legger til bryggen.

I designet har dokkingsystemet krevd en lem som passasjerer kan gå over på. Denne lemmen er essensiell i låsesystemet, da det er lemmen som tar imot hjulene og presser hjulene ned i krokene på fergen. Videre har lemmen blitt designet slik at den kan bli løftet av elektriske aktuatorer som ble valgt ut tidlig i prosjektet. Det at aktuatorene ble valgt ut tidlig, førte til at det senere ble klart at disse ble valgt for svake og hadde for kort slaglengde. Dette har gjort at prosjektgruppen måtte idémyldre en del for å designe en lem som var lett nok til å kunne bli løftet opp, og at det ikke ble for stor belastning på aktuatorene når lemmen står nede på bryggen. Som en konsekvens av dette kom prosjektgruppen opp med idéen om å gjøre lemmen leddet. Denne idéen er noe prosjektgruppen anser som sentral for at den endelige løsningen skulle kunne fungere med elektriske aktuatorer. Å gjøre lemmen leddet, gjør at det indre leddet på lemmen kan låse hjulet, mens det ytre leddet kan hvile på bryggen, slik at fergen og bryggen kan bevege seg i forhold til hverandre.

En utfordring med å velge elektriske lineæraktuatorer var at lemmen ble låst til en bestemt posisjon, slik at det kunne bli for store krefter på aktuatoren når fergen var dokket. Prosjektgruppen anbefalte i utgangspunktet å bruke hydrauliske aktuatorer på bakgrunn av at et hydraulisk system enklere kan settes opp slik at lemmen kan gi etter når passasjerer går om bord. Ved å gjøre lemmen leddet har det blitt mulig å bruke elektriske lineæraktuatorer. Det må nevnes at fra styrkeberegningene at kreften som lemmen vil presse på hjulet i et ekstremt tilfelle kan bli høy og at det kan tenkes at hjulene kan bli noe presset sammen, slik at kraften som hjulene skal ta blir mindre, slik at det blir aktuatorene som må ta denne belastningen. Dette må det testes for. Aktuatorene som ble valgt tidlig i semesteret anses av prosjektgruppen å være for svake (da det er for lav sikkerhetsmargin) og har en for kort slaglengde, slik at aktuatorfestet til lemmen ikke er festet langt nok ut fra rotaksjonsaksen til lemmen.

Utover i prosjektet ble det også sett på hvordan den endelige løsningen ville oppta et støt fra fergen, dersom styringssystemet på fergen sviktet. Disse betraktningene ble gjort sent i prosjektet, og på bakgrunn av dette kan man se fra styrkeberegningene og simuleringene at noen komponenter som allerede hadde blitt valgt ikke er tilstrekkelig dimensjonert for ekstremtilfellene. Ekstremtilfellene var et støt fra fergen med en fart på 3 m/s og når det er seks passasjerer på lem samtidig.

Ettersom systemet består av mange komponenter som har måtte blitt spesialdesignet, har gruppen ikke hatt tid å gå i dybden på alle komponentene når disse skulle velges, med tanke på materialvalg. Av materialer som har blitt valgt er prosjektgruppen fornøyd med valget av aluminium på store deler av konstruksjonen, men på komponentnivå har det i ettertid vist å ha blitt valgt for svake aluminiumlegeringer på noen av komponentene. Dette på bakgrunn av det som er produsert og styrkeberegningene. Sett i ettertid burde prosjektgruppen ha brukt mer tid på å analysere kreftene og gjort mer presise beregninger på hvor store de ulike kreftene i dokkingsystemet kan bli og slik velge materialer på grunnlag av dette.

Endelige resultater av det som er bygget viser at deler av designet fungerer fysisk. Lem og skap er bygget, mens systemet på bryggen ble ikke ferdig i tide, da levering av komponenter og materialer til dette systemet tok lenger tid enn først antatt. Prosjektgruppen har derfor ikke hatt anledning til å teste om hele designet fungerer sammen i praksis. Av konstruksjonen oppleves lemme som stiv og lett av prosjektgruppen. Hengslene går med lav motstand og har det utslaget det ble simulert for i SolidWorks. En liten designfeil; er at det ene pianohengselet har blitt plassert feil, slik at lemme gir noe etter på den ene siden. Hvor stort problem dette er i praksis er usikkert, men som en prototype synes det å ikke være et problem.

Da dette har vært en svært praktisk rettet oppgave har det også krevd en praktisk tilnærming fra prosjektgruppen. Ved å benytte seg av designtenkning som produktutviklingsmetode førte dette at gruppen kunne jobbe mer effektivt og målrettet, som igjen førte til et bedre resultat. En annen praktisk tilnærming gruppen gjorde var å tegne idéer tidlig i utviklingsfasen i SolidWorks. Ved å tegne opp idéer fra start ga dette prosjektgruppen gode tilbakemeldinger på hvilke idéer som ikke fungerte og hvilke som var aktuelle for videre arbeid.

Oppsummert, dekker det endelige designet de aller fleste av kravspesifikasjonene som prosjektgruppen satte i starten av prosjektet, men gjennom prosjektet har det dukket opp nye krav som bør tas med videre for et nytt design. Samlet anser prosjektgruppen det endelige designet i prosjektet som et fungerende design, som er tilstrekkelig dimensjonert for enkel testing, men det bør gjøres mer utvikling på designet.

10.2 Videre utvikling

Videre arbeid for å ferdigstille dokkingsystemet er å få bygget systemet som skal være på bryggen. Når hele dokkingsystemet er produsert ferdig er det nødvendig å få testet hele systemet på land. Her vil man få svar på om mekanismene fungerer, om delene er riktig dimensjonert og om systemet tåler belastningene. Etter at dette er gjennomført må lem monteres på fergen og det må bygges en hesteskoformet flytebrygge slik at det kan gjøres mer omfattende testing av dokkingsystemet.

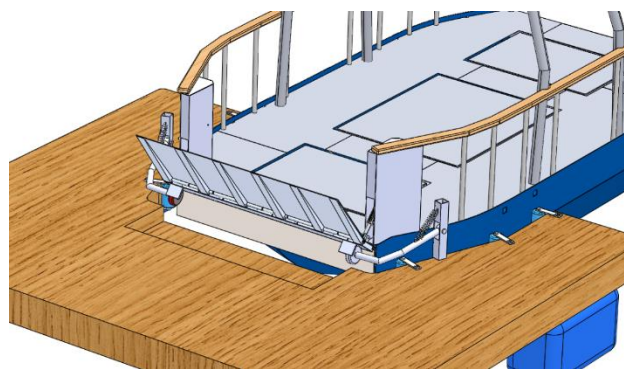
10.2.1 Forbedringer på nåværende design

På nåværende design har prosjektgruppen flere forslag til forbedringer:

- I stedet for å bruke POM som foringsmateriale i akslingene på lem, bør det heller brukes nylon eller messing. Nylon fordi det anses som et lettere materiale å maskinere. Messing fordi det lar seg bedre maskinere og gir en mer solid finish.
- Bruke lineæraktoatorer med lengre slaglengde, slik at aktuatorfestet kan festes lengre ut på lemmen. Dette gjør at kraftutnyttelsen blir bedre og at lineæraktuatorene vil kunne tåle større krefter.
- Bruke hydrauliske aktuatorer istedenfor elektriske aktuatorer, fordi hydrauliske aktuatorer har bedre evne til å gi etter, med tanke på når lemmen står nede og passasjerer skal gå om bord.
- Bruke kulelager ved akslingen, for lavere friksjon og mindre slitasje.
- Videre bør noen av materialene som er valgt i designet byttes ut. Et konkret eksempel på dette er aluminiumsplatene som passasjerene vil gå over på. I ettertid av produksjonen ble det oppdaget at denne var av en plate med en lav hardhet. Dette gjør at platen er bøyes lett og er mindre stiv. Her kunne det med fordel brukes dørkplater, ettersom disse har en høyere hardhet og sporene gjør dørkplaten stivere.

10.3 Forslag til ny løsning

Etter hvert som modningsfasen og forståelsen av oppgaven ble større utover i prosjektet har prosjektgruppen fått en ny idé til en løsning basert på løsning 3: Krokodillegap og den endelige løsningen. Det må nevnes at denne idéen ble laget helt mot slutten av prosjektet og denne blir nøyere forklart i vedlegg 1.



Figur 70 – Nytt forslag

11 Konklusjon

Resultatet av denne oppgaven er flere løsninger på hvordan et dokkingsystem kan utformes for en mindre urban autonom passasjerferge. Den endelige løsningen har blitt designet for å kunne fungere på fergen, milliAmpere. Løsningen kan videre deles opp i to delsystemer:

System på kai har en toleranse på 16 cm i horisontal retning for når fergen skal gå inn for dokking. Videre er hjulet som skal sprette opp fra kroken på fergen dimensjonert for å sprette opp med en tyngde på 10 kg. Systemet er designet slik at det kan testes ut for å bruke støtdempere for å avlaste systemet. Låsesystemet gjør at fergen vil kunne gå i lås dersom fergen kommer inn med ulike høyder ut ifra hvor tungt den er lastet og bølgebevegelser. Videre er systemet designet slik at vinkelen til armene kan justeres ved å stramme opp fjærene. Gjennom evalueringen av designet fant prosjektgruppen ut at under store belastninger er ikke det foreløpige designet tilstrekkelig dimensjonert til å kunne tåle et støt fra fergen om den kommer inn med en hastighet på 3 m/s mot dokkingsystemet.

System lem er designet til å gi tilstrekkelig plass for at seks passasjerer skal kunne gå om bord samtidig og bli løftet opp av elektriske aktuatorer. Lemmen er designet med ledd for å kunne avlaste aktuatorene når fergen er dokket. Ved å gjøre dette kan det indre leddet på lemmen låse hjulet, mens det ytre leddet kan hvile på bryggen, slik at fergen og bryggen har mulighet til å bevege seg i forhold til hverandre. Videre er lemmen designet med avstivere i underkant for å gjøre konstruksjonen sterkere. Gjennom evalueringen anses lemmen som ikke tilstrekkelig dimensjonert til å tåle at alle de seks passasjerene går om bord samtidig, men sterk nok til å ta færre passasjerer og brukes i testsammenheng.

Det er blitt utført styrkeberegninger for hånd og simuleringer i SolidWorks for dokkingsystemet. Deler av dokkingsystemet har blitt bygget, der mekanismene fungerer og kan bli testes for. På bakgrunn av resultatet mener prosjektgruppen at dokkingsystemet er tilstrekkelig dimensjonert til å brukes til testing av designet for milliAmpere i Autoferry-prosjektet til NTNU.

Dokkingsystemet krever mer utvikling for å kunne fungere helt optimalt, og må dimensjoneres opp for å kunne fungere på en større passasjerferge. Konkrete forbedringer er gitt i rapporten.

Gjennom prosjektet har gruppen fått god erfaring med det å jobbe på et større prosjekt og sette designtenkning, konstruksjonsteknikk og produksjon i system. På bakgrunn av disse kunnskapene mener prosjektgruppen at de har designet et fungerende dokkingsystem for en mindre autonom passasjerferge.

12 Referanser og kilder

- ABB. (2018, Desember 4). *ABB*. Hentet fra ABB enables groundbreaking trial of remotely operated passenger ferry: <https://new.abb.com/news/detail/11632/abb-enables-groundbreaking-trial-of-remotely-operated-passenger-ferry>
- Astrup. (2019, Mai 16). *Astrup*. Hentet fra POM: <https://astrup.no/Materialer-Produkter/Materialer/Plast-Teknisk/PA-POM-PET>
- Budimir, M. (2019). *Motioncontrol tips*. Hentet fra What are proximity sensors?: <https://www.motioncontroltips.com/what-are-proximity-sensors/>
- Christensen, N., & Almar, N. (2019, April 11). *Stål*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/st%C3%A5l>
- Dørum, A. (2016). *Maskindeler 1*. Trondheim: Akademika.
- Fuse, M. R. (2019). *MoorGuard Rope Fuse*. Hentet fra Safety Statistics: http://moorguard.com/?page_id=469
- Grøndalen, Ø. (2002). *Materiallære*. Fagbokforlaget.
- Havdal, G., Heggelund, T. C., & Larssen, H. C. (2017). *Design of a Small Autonomous Passenger Ferry*. Trondheim.
- Johansen, H. (2008). *Komposittmaterialer*. Hentet fra Høgskolen i Gjøvik: <http://www.ansatt.hig.no/henningj/materialteknologi/Materiallare/arbeidsplan/kompositter/Materiallaere-kompositter-kompendium.pdf>
- Jørgensen, F., & Solvoll, G. (2019, Februar 2). *Samferdsel*. Hentet fra El-ferjer kan utkonkurrere tunneler og bruer: <https://samferdsel.toi.no/hjem/el-ferjer-kan-utkonkurrere-tunneler-og-bruer-article34122-98.html>
- Keyence. (2019). *Keyence*. Hentet fra What is an Ultrasonic Sensor?: <https://www.keyence.com/ss/products/sensor/sensorbasics/ultrasonic/info/>
- Kongsberg Maritime. (2017). *Kongsberg*. Hentet fra News Archive: <https://www.kongsberg.com/maritime/about-us/news-and-media/news-archive/2017/new-electric-ferry-project-expands-kongsbergs-autonomous-vessel-newbuild/>
- NFAS. (2017). Hentet fra Definitions for Autonomous Merchant Ships: <http://nfas.autonomous-ship.org/resources/autonom-defs.pdf>
- Ormestad, H. (2014, August 28). *elastisitetsmodul*. Hentet fra Store Norsk Leksikon: <https://snl.no/elastisitetsmodul>
- Pedersen, B. (2018). *Aluminium*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/aluminium>

Pedersen, B. (2019). *Magnesium*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/magnesium>

Pedersen, B. (2019, Februar). *Titan*. Hentet fra Store Norske Leksikon: <https://snl.no/titan>

Sawers, P. (2018, December 3). *Venturebeat*. Hentet fra <https://venturebeat.com/2018/12/03/rolls-royce-demonstrates-fully-autonomous-passenger-ferry-in-finland/>

Trelleborg. (2019). *AutoMoor*. Hentet fra Trelleborg: <https://www.trelleborg.com/en/marine-and-infrastructure/products--solutions--and--services/marine/docking--and--mooring/automated--mooring--systems/automoor>

TTS. (2006, September 20). *ttsgroup*. Hentet fra TTS installs the world's largest automatic mooring system: <http://www.ttsgroup.com/print.aspx?pageID=1130>

Ullman, D. (2018). *The Mechanical Design Process*. New York: McCraw-Hill.

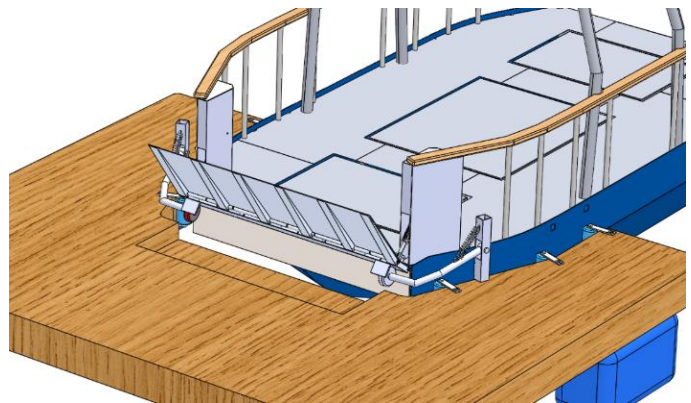
WÄRTSILÄ. (2018, April 27). *WÄRTSILÄ*. Hentet fra Look, Ma, No Hands! Auto-docking ferry successfully tested in Norway: <https://www.wartsila.com/twentyfour7/innovation/look-ma-no-hands-auto-docking-ferry-successfully-tested-in-norway>

Vedleggsliste

Vedlegg	Type vedlegg	Side
Vedlegg A	Forslag til ny løsning	I
Vedlegg B	Maskintegninger	II
Vedlegg C	Materialeegenskaper for spesifikke materialer	XIX
Vedlegg D	Bestillingsliste	XX

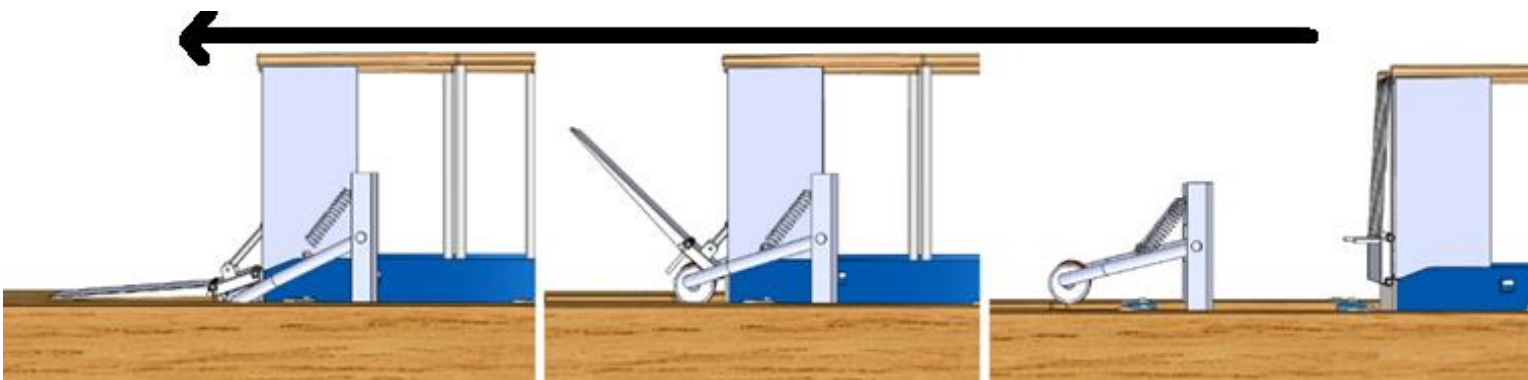
Vedlegg A: Forslag til ny løsning

Etter hvert som modning og forståelsen av oppgaven ble større utover i prosjektet ble det laget et nytt forslag som prosjektgruppen mener kan være en enklere løsning for hvordan fergen blir låst. Det må nevnes at denne idéen ble laget helt mot slutten av prosjektet og er en idé for videre utforskning.



Figur 71 – Nytt forslag

Idéen henter inspirasjon fra den endelige løsningen og fra løsning 3: Krokodillegap. Løsningen går kort ut på at fergen blir fanget opp av to armer med hjul i enden, der lemmen låser hjulet med en flapp som går ned på ene siden av hjulet. Idéen tenkes å gi en større høydetoleranse ved dokking, men også være sterkere for å tåle eventuelle laterale krefter.



Figur 72 – Dokkingprosessen sett fra siden. Går fra høyre mot venstre

Det smarte med løsningen er at det er en enkel mekanisme som låser fergen smidig til bryggen. Lemmen trenger bare å gå ned og presse hjulet inn i et «inngrep». Hjulet vil ikke kunne gå ut av lås, da fjæren holder hjulet på plass i inngrepet. Med løsningen har fergen muligheten til å kunne bevege seg når den ligger fortoyed.

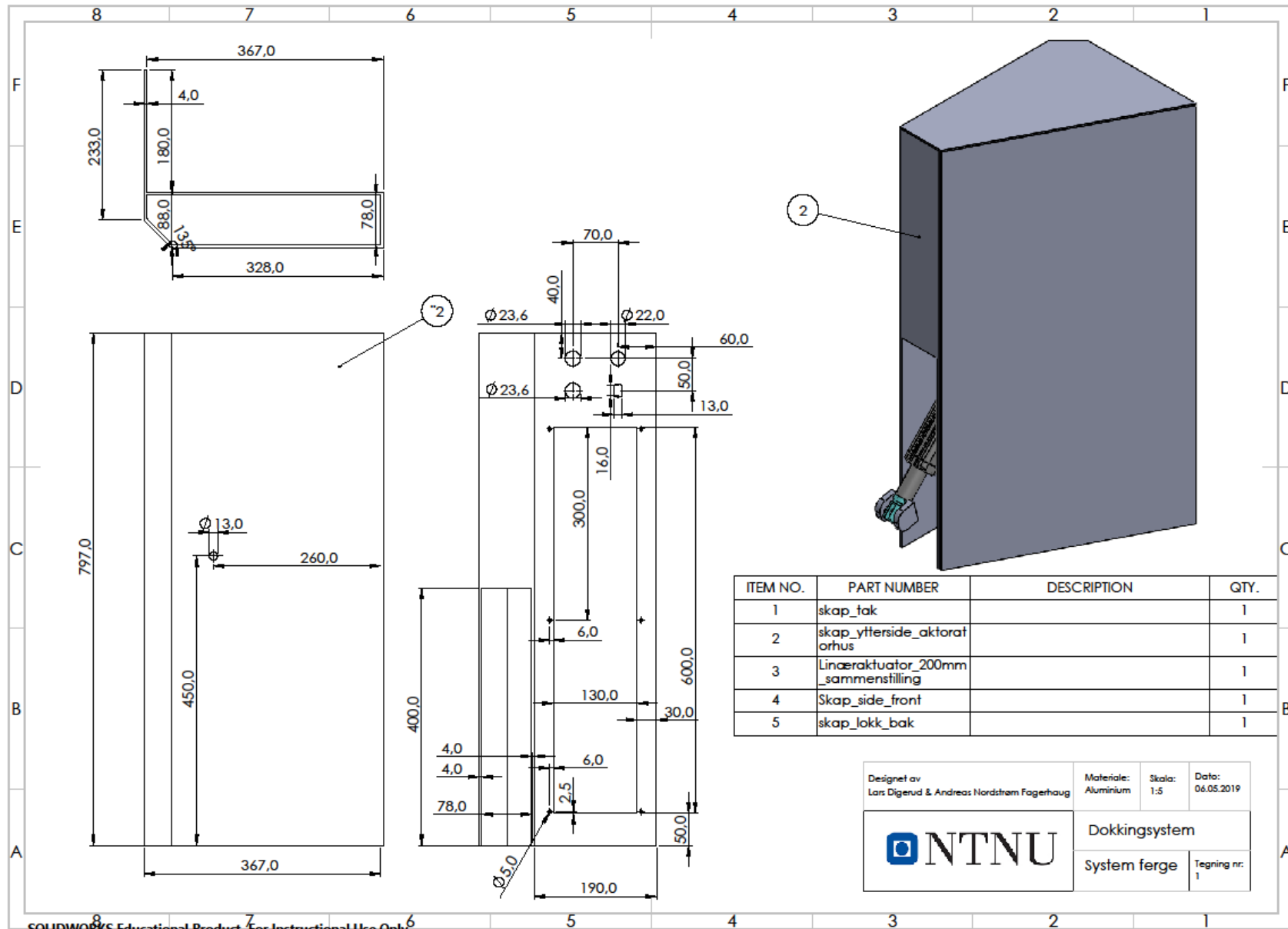


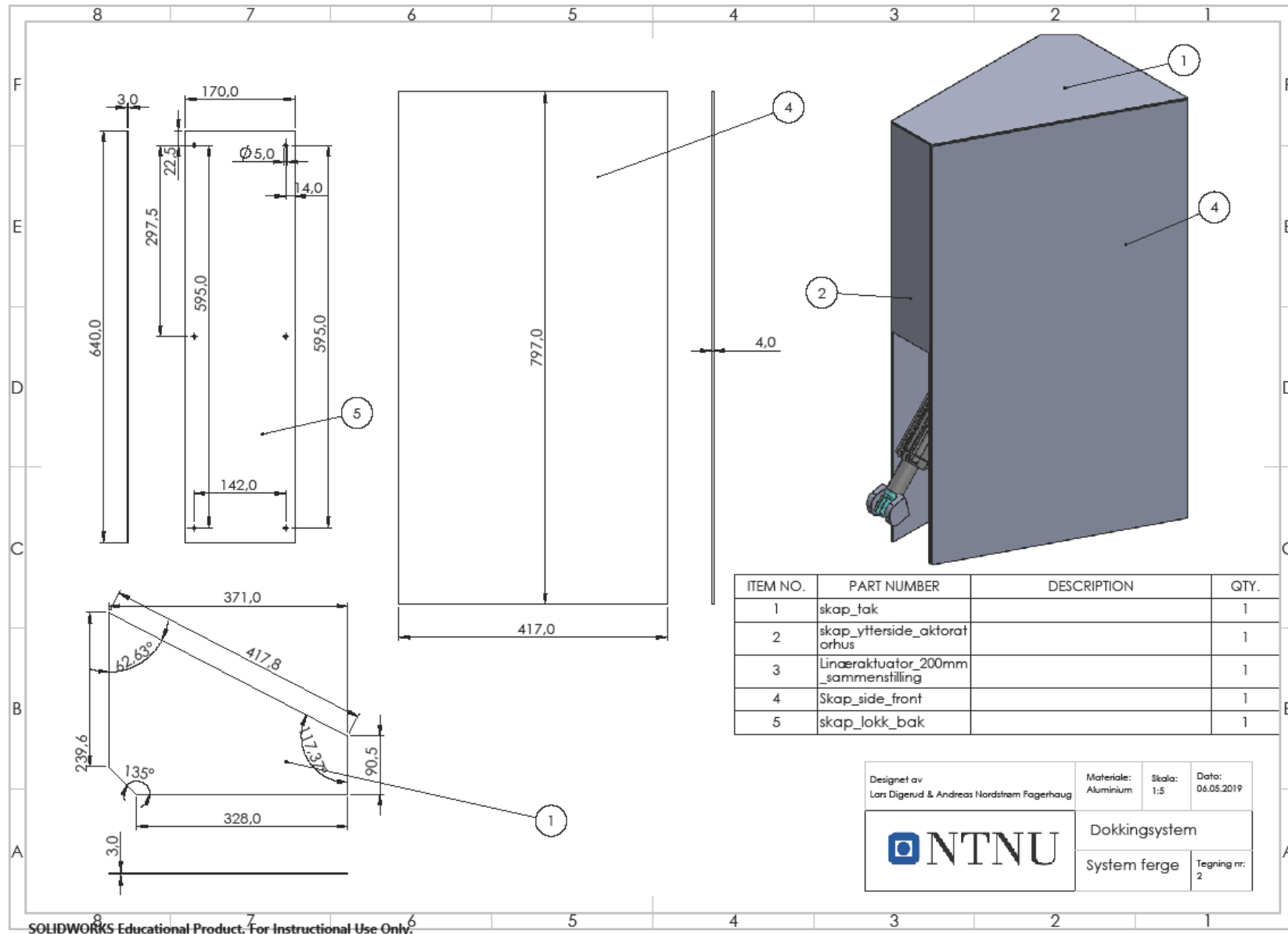
Figur 73 – Nytt forslag illustrert

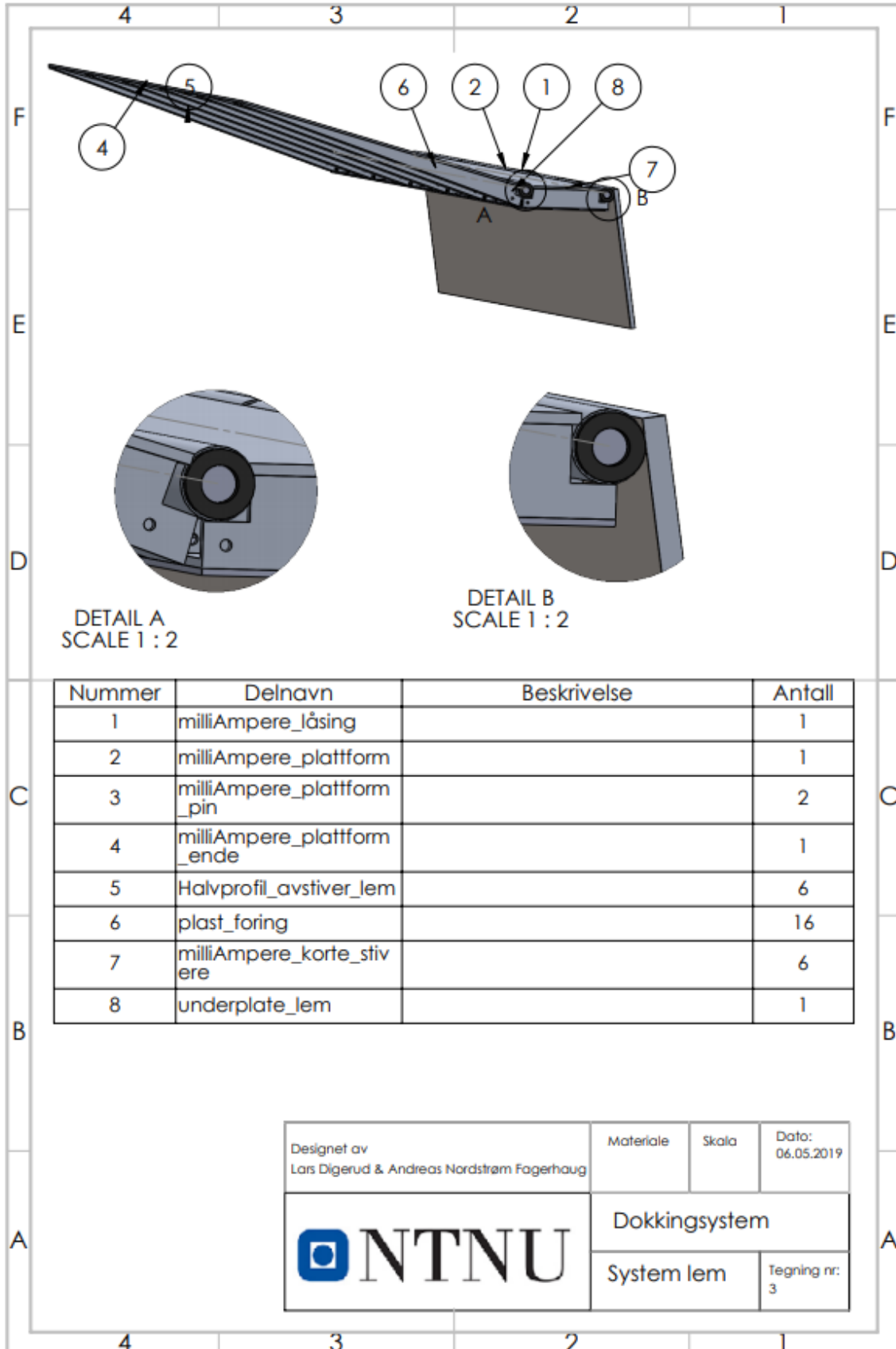
Videre anses løsningen som enkel å produsere og dimensjonere, men i motsetning til den endelige løsningen, vil aktuatorene måtte bære all kraft fra det indre leddet, da hjulet ikke hviler på en krok.

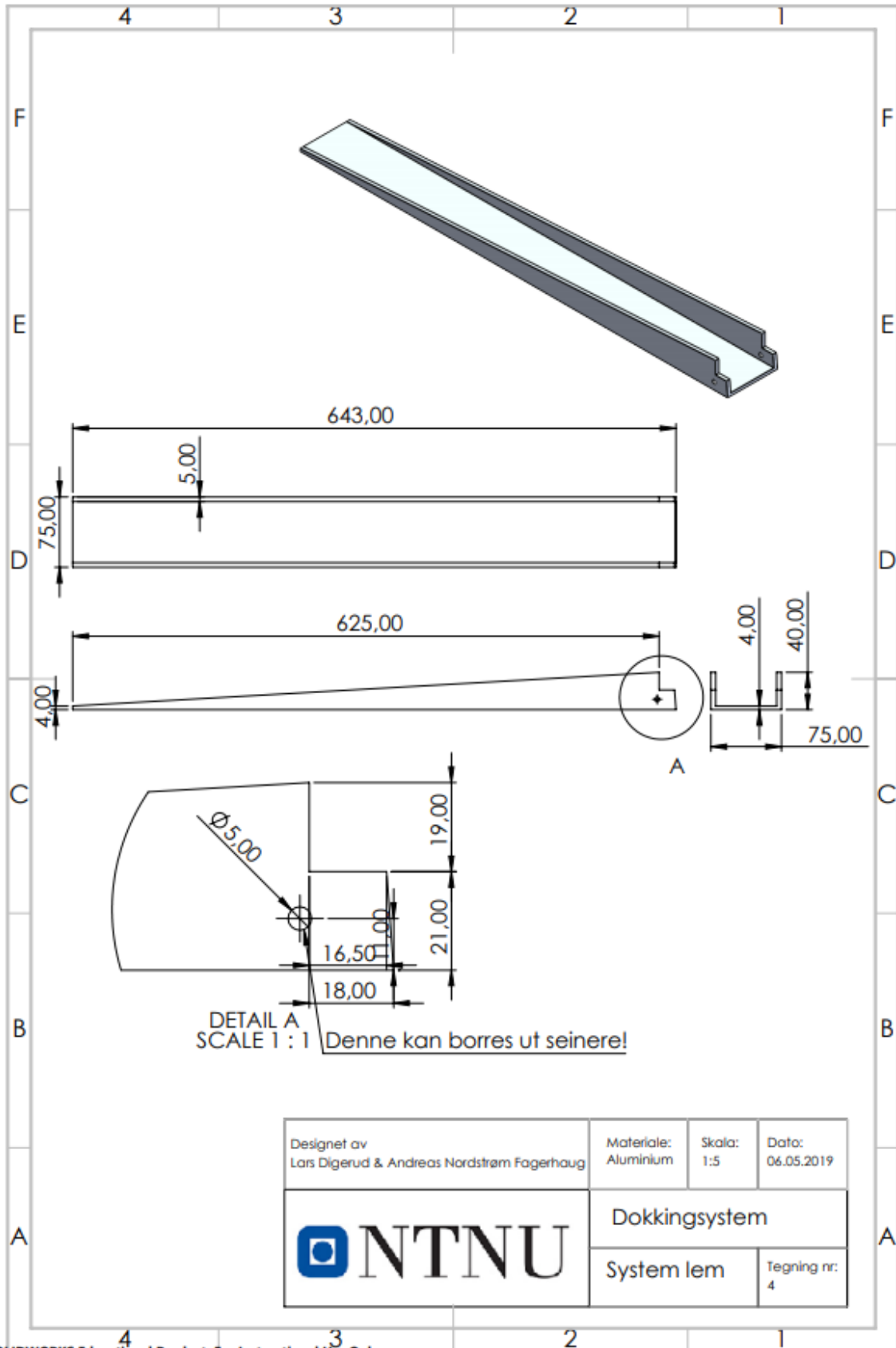
Vedlegg B: Maskintegninger

Tegningens navn	Tegningens nummer	Sidetall
Skap ferge 1/2	1	III
Skap ferge 2/2	2	IV
Lem oversikt	3	V
Lang avstiver	4	VI
Kort avstiver	5	VII
Festeplate	6	VIII
Lem indre ledd	7	IV
Lem ytre ledd	8	X
Plastforing	9	XI
System brygge oversikt	10	XII
Underprofil brygge	11	XIII
Overprofil brygge	12	XIV
Forsterker/forlenger	13	XV
Krok oversikt	14	XVI
Krok deler	15	XVII
Brakett	16	XVIII

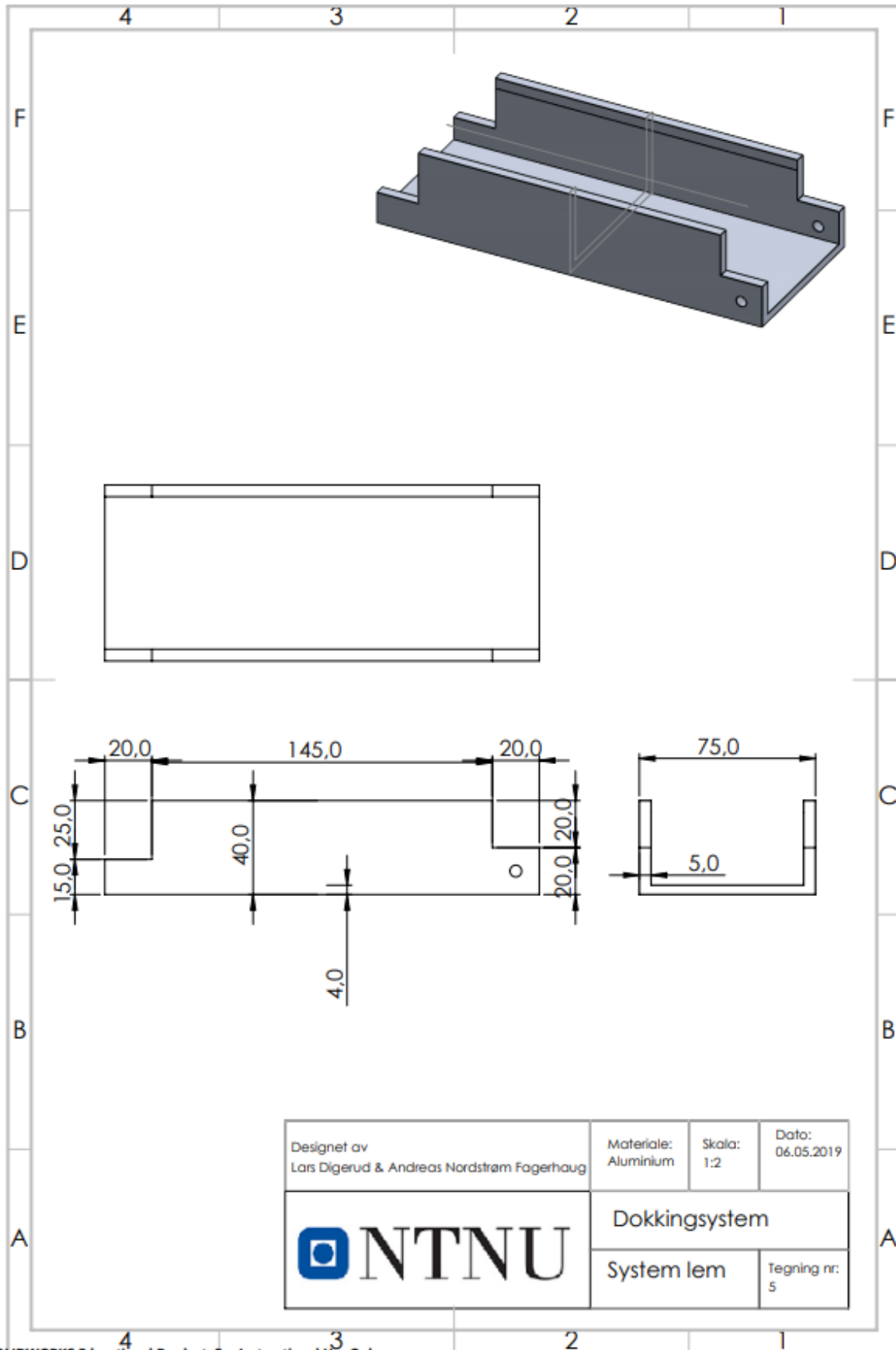




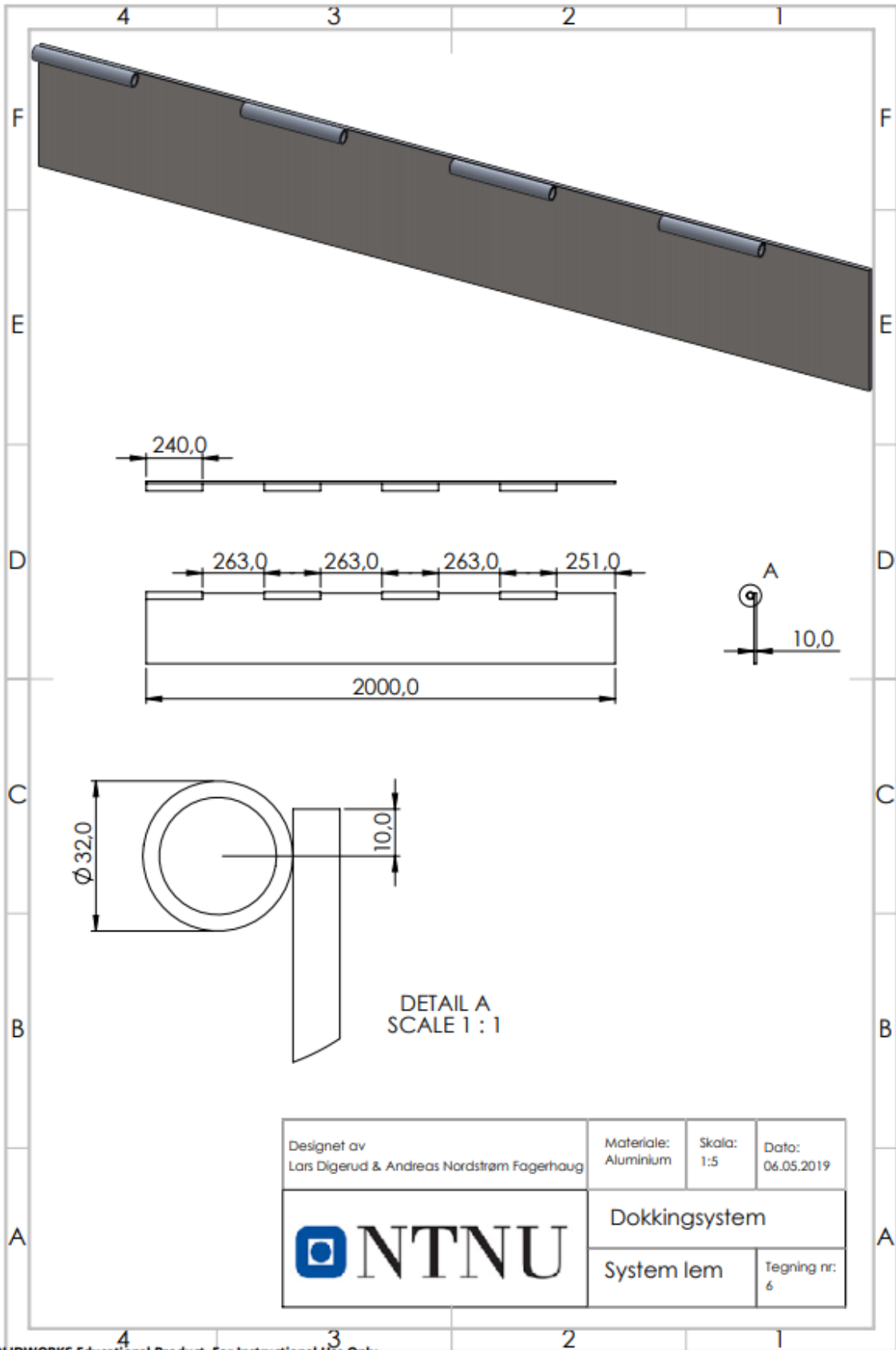




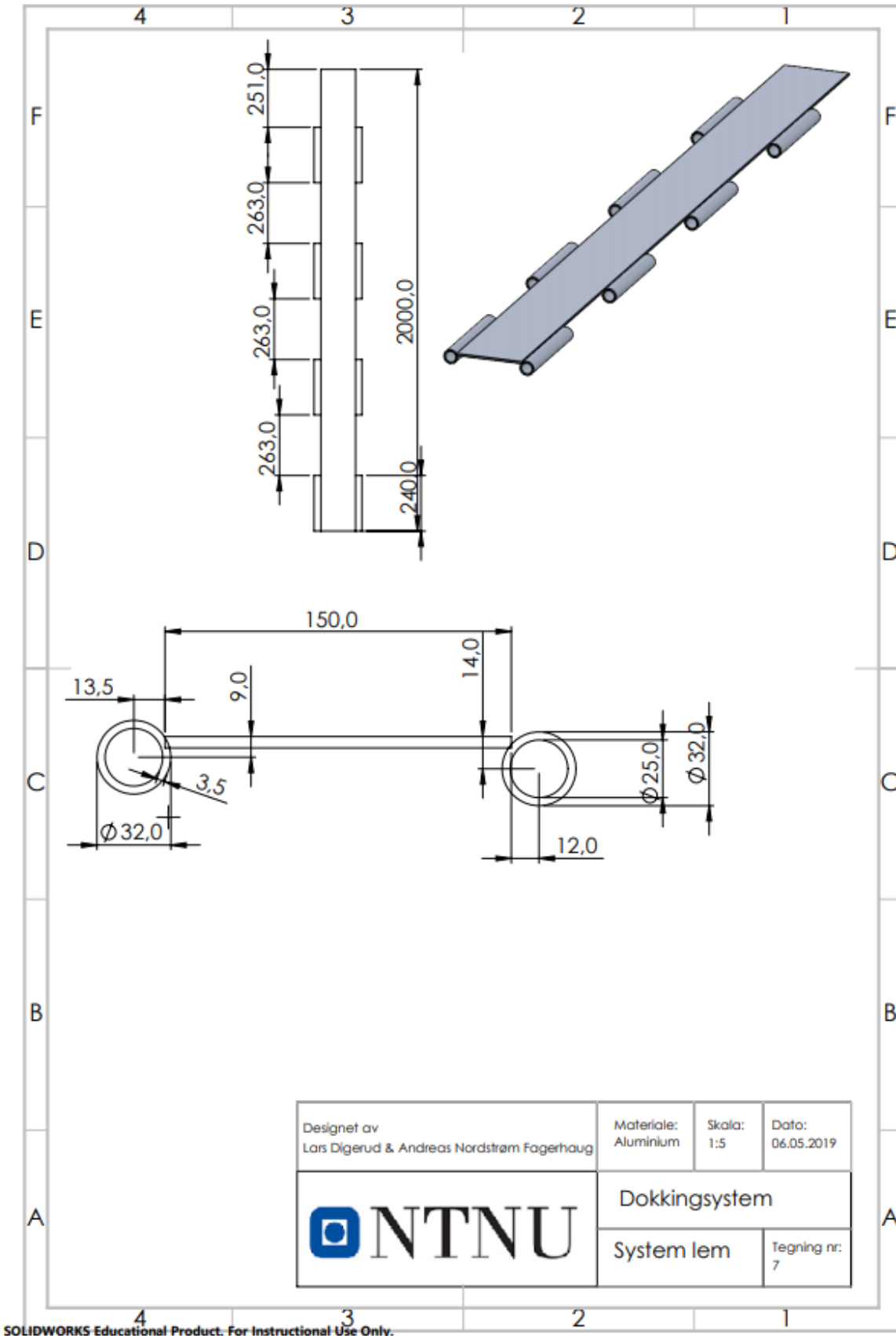
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



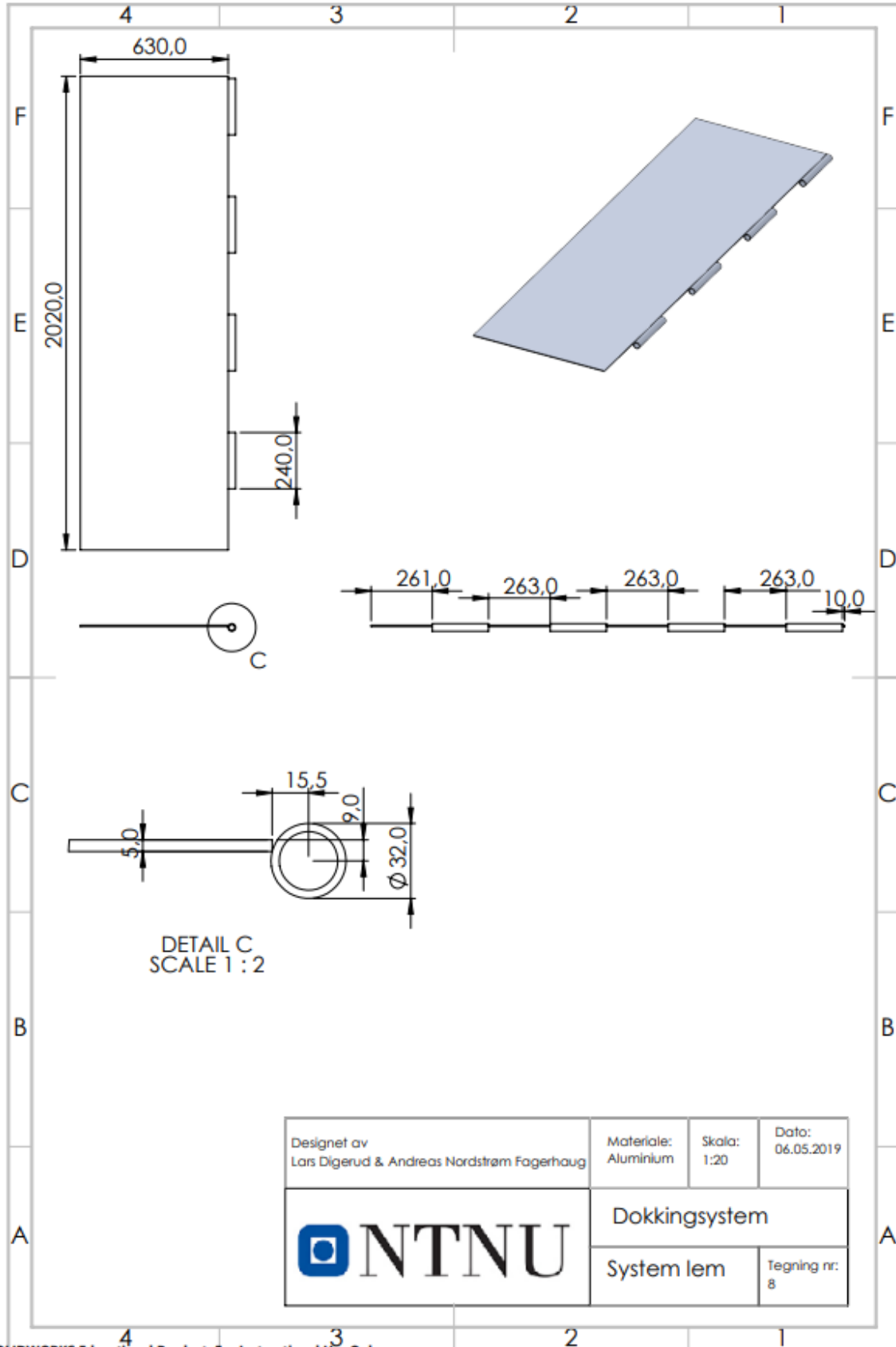
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



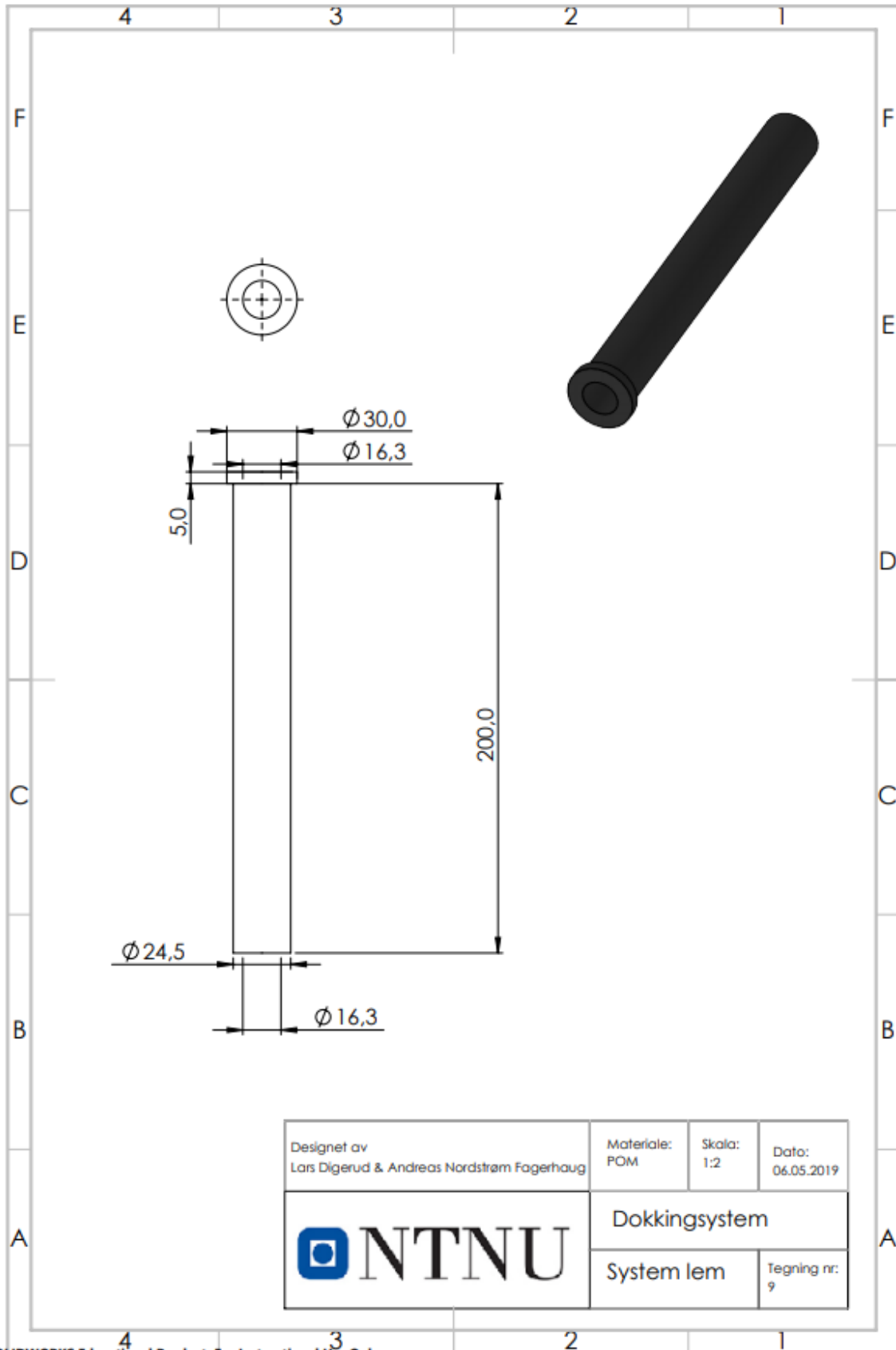
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



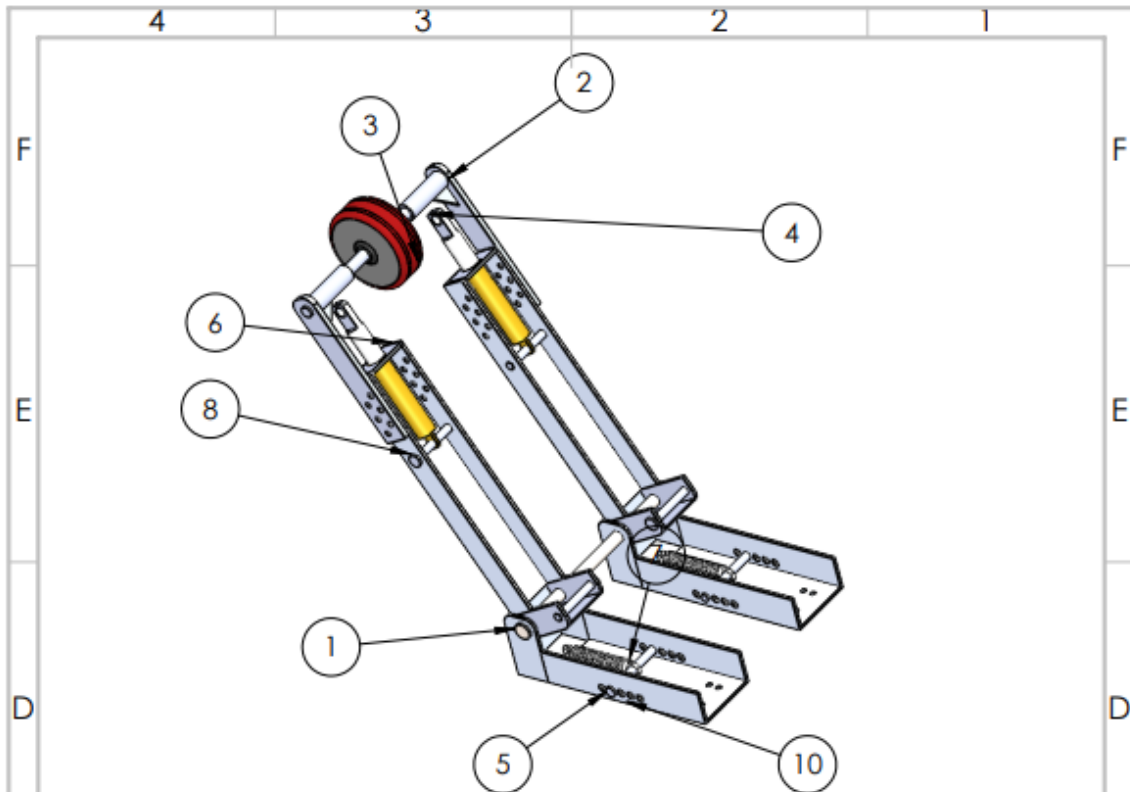
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

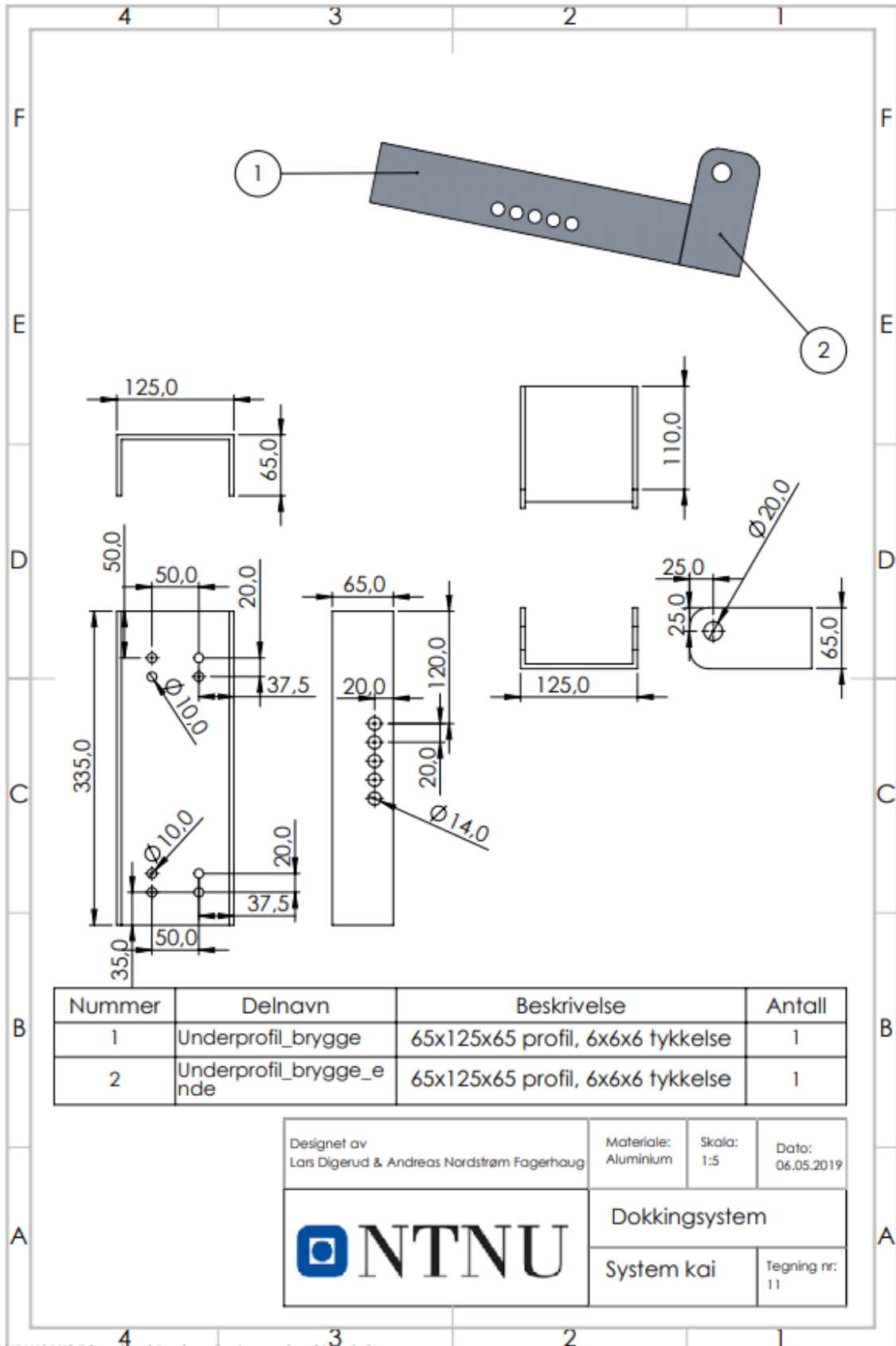


SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

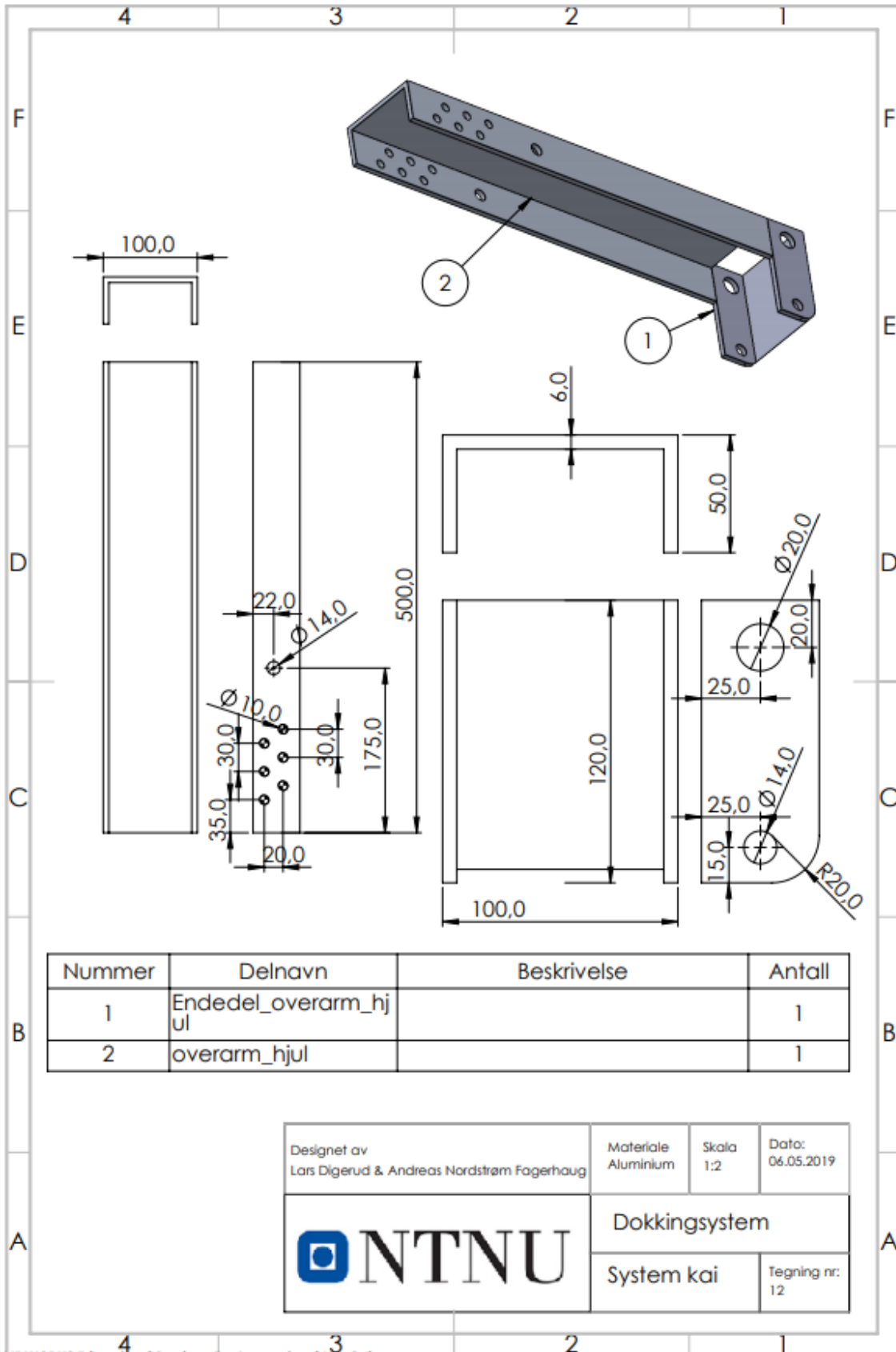


Nummer	Delnavn	Tillegg	Antall
1	Aksel	Ø20	1
2	Aksel_hjul	Ø20	1
3	Hjul		2
4	Støtdemper		2
5	Pin til strekfjær	Ø14	2
6	StøtDemper_brakett		2
7	Fjær		2
8	pin	Ø14	4
9	Overarm_hjul_sammenstilling	Lages først	2
10	Underprofil_brygge_sammenstilling	Lages først	2
13	MirrorFesteplate_hjul_lem		1

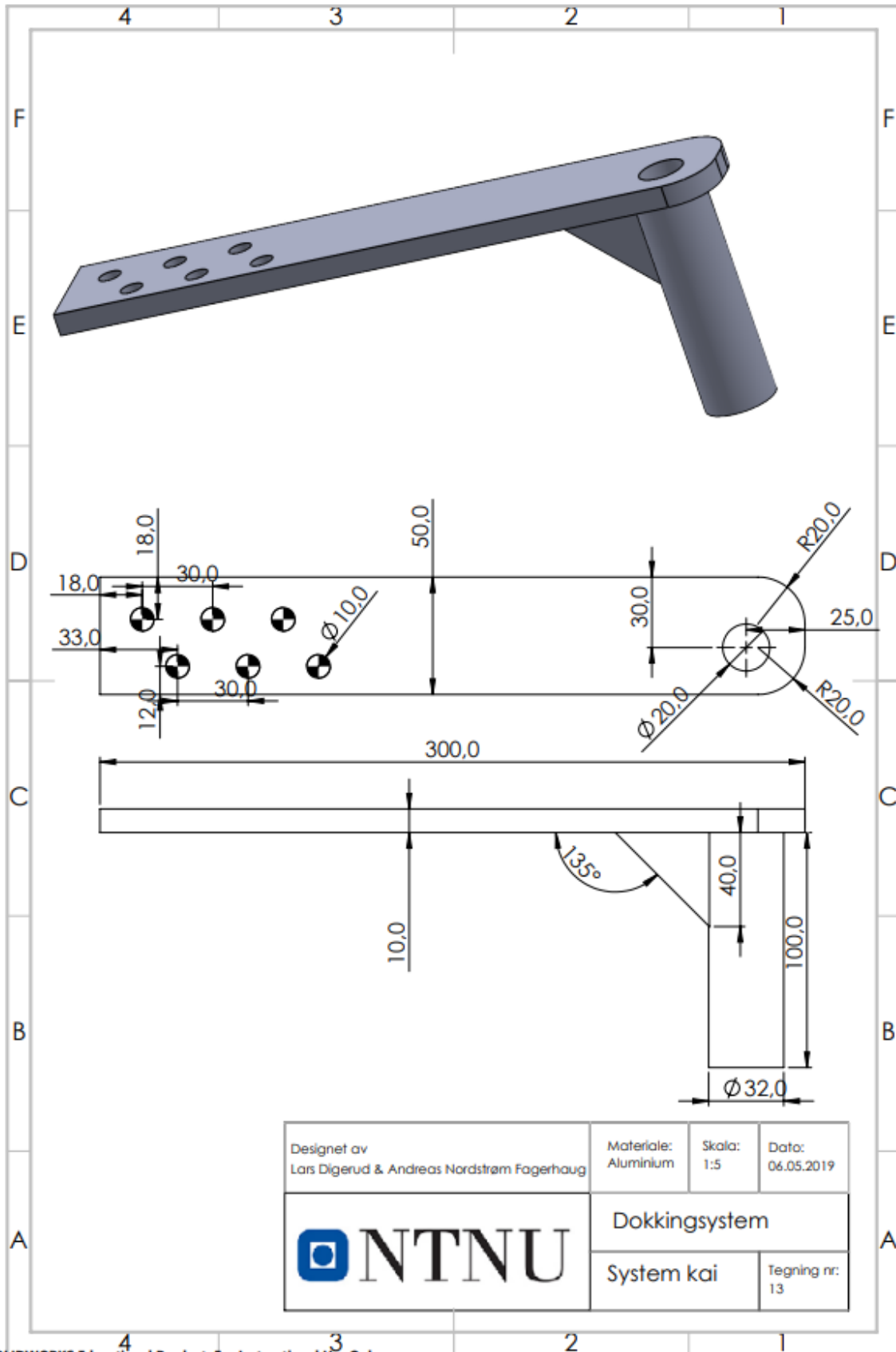
Designet av Lars Digerud & Andreas Nordstrøm Fagerhaug	Materiale	Skala: 1:10	Dato: 06.05.2019
	 NTNU		Dokkingsystem System kai Tegning nr: 10



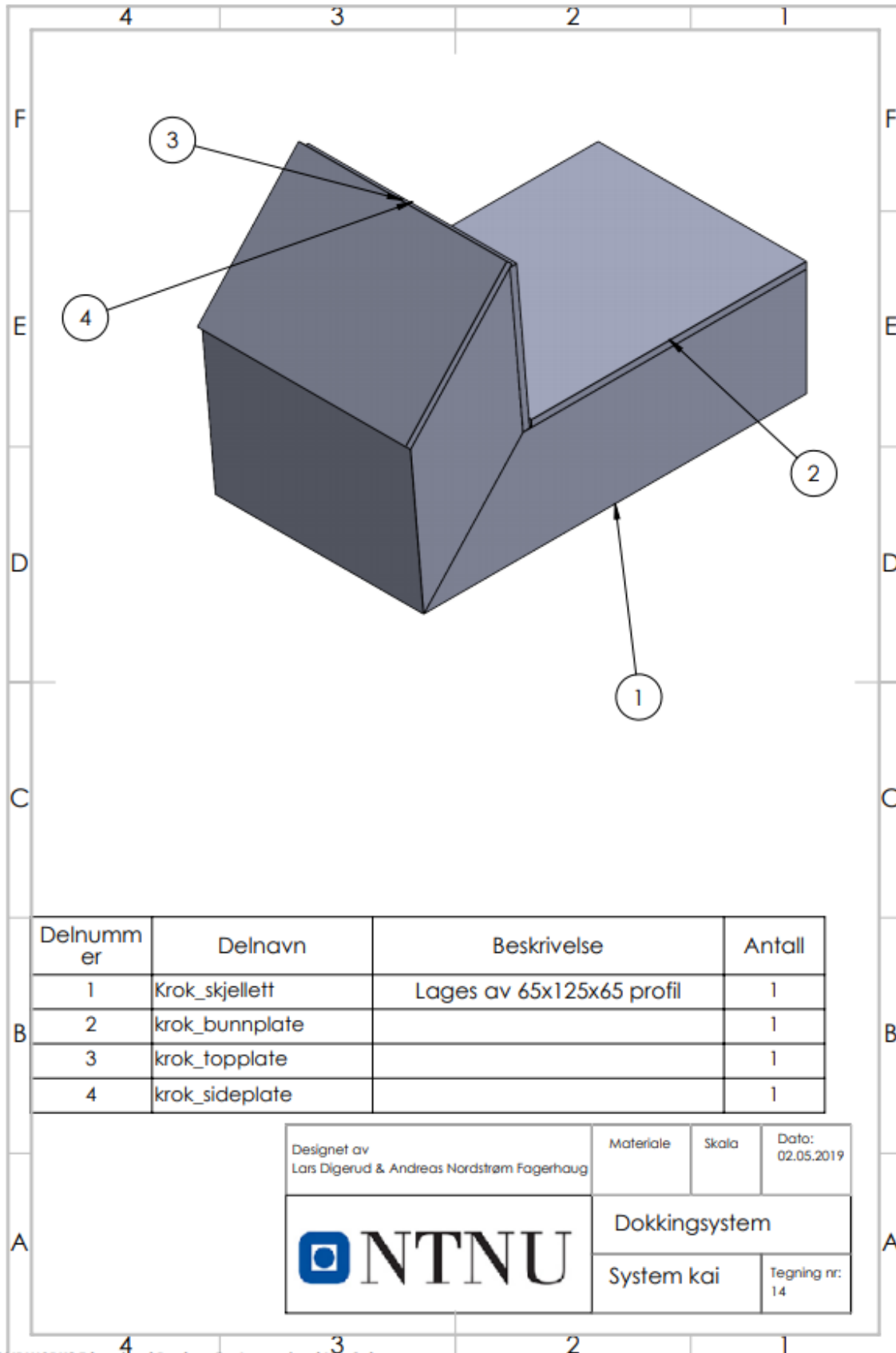
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



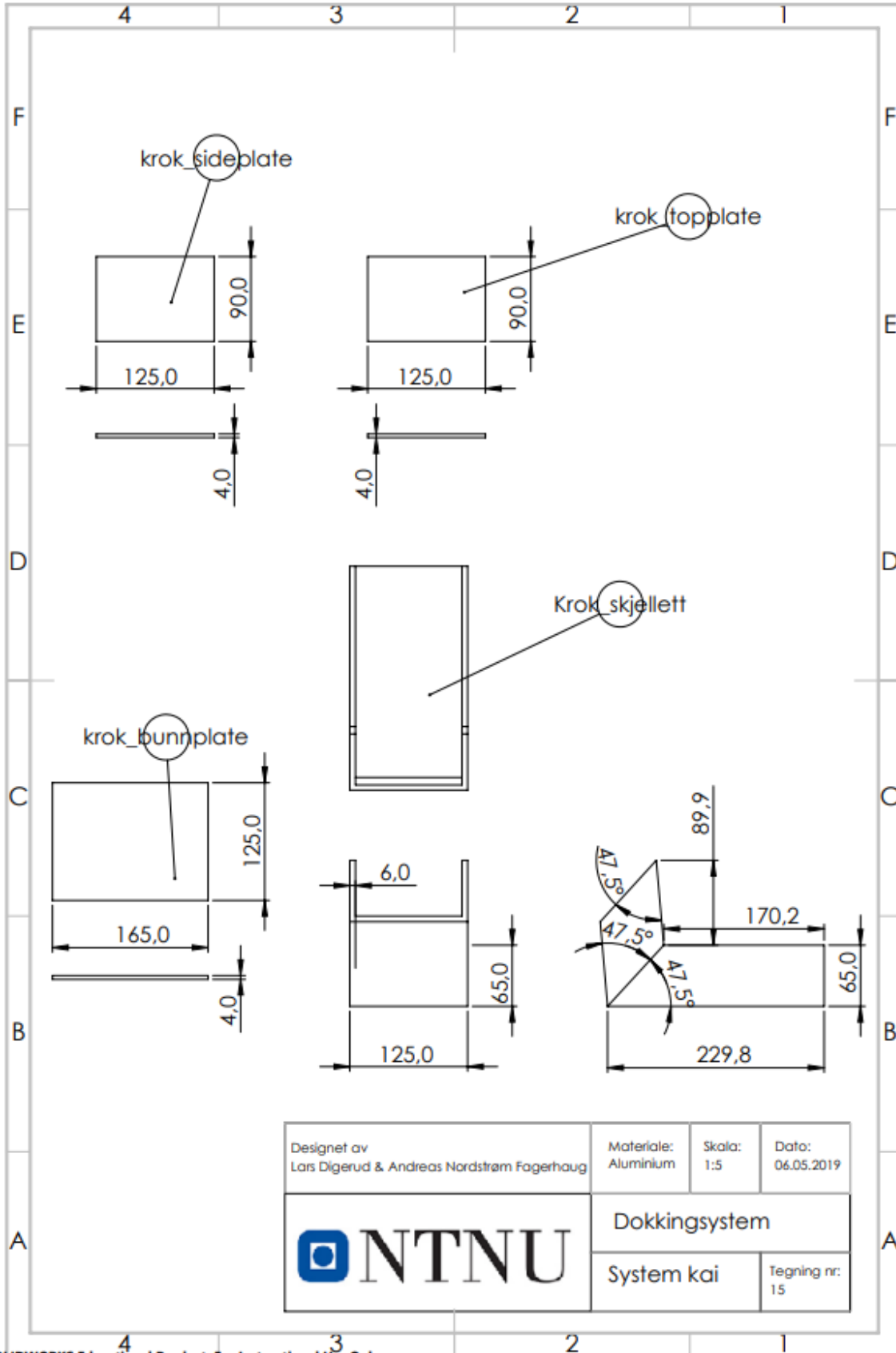
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



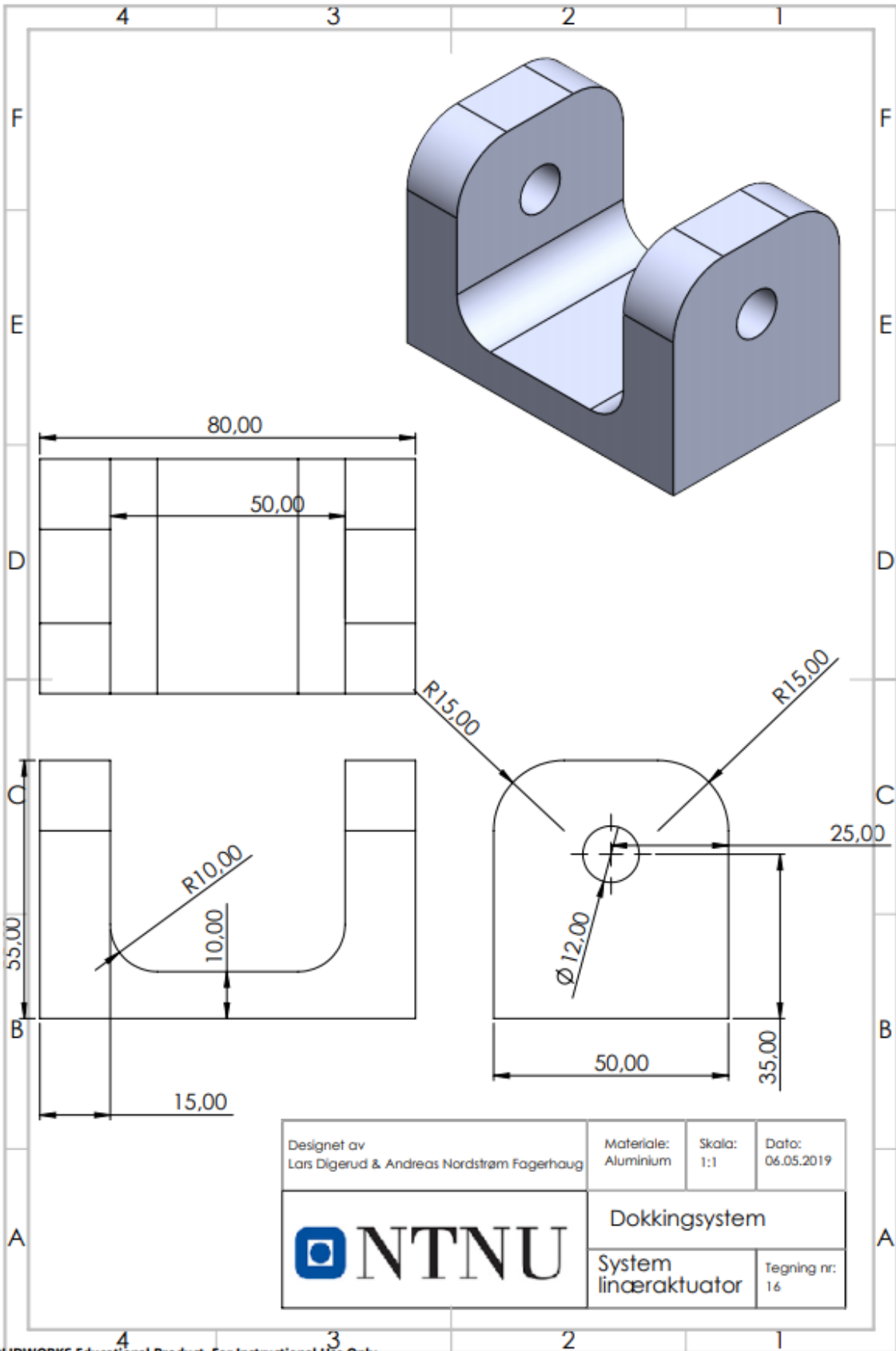
SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

Vedlegg C: Materialegenskaper for spesifikke materialer

Materialegenskaper for SolidWorks

Materiale	Aluminium 6060-T6	Akselstål (S165M)	Aluminiumsplate (5754)	Brakett aktuatorene (6082-T6)
Massetetthet [g/cm^3]	2,7		2,66	2,7
Strekfasthet [N/mm^2]	215	890-1050		255
Flytegrense [N/mm^2]	160	660	80	260
Bruddgrense [N/mm^2]				
Elastisitettsmodul (Youngs modul)	69000	20000	70000	69000
Brinell hardhet (HB)		270-320		95
Vickers Hardhet (HV)	73			84

Kilde: Smiths stål

Vedlegg D: Bestillingsliste

Bestillingsliste Maskin

Beskrivelse	Stk	Pris/stk	Total	Vare NR	Kommentar	Link
Annet						
Hjul IEP - ELASTISK GUMMI PÅ ALUMINIUMSFELG (160x50)	4			IEP 160	IEP - ELASTISK GUMMI PÅ ALUM	http://www.landgraff.no/2015-Katalogen/2015-Kapittel7.pdf
Støtdemper, IMCA	4	kr 395	kr 1 580	1042270		https://www.kjell-berg.no/rammedeler/stotdempere/stotdemper-imca-1
Strekkfjær, serie A & B rustfritt	4	kr 248	kr 992	43280		http://www.fjaer.net/nettbutikk/strekkfjaerer/serie-a-b-rustfritt-traad
Strekkfjær, serie A & B rustfritt	8	kr 45	kr 360	E02400411000S		http://www.fjaer.net/nettbutikk/strekkfjaerer/serie-a-b-rustfritt-traad
Smith Stål						
ALUMINIUM U-PROFIL 6060-T6 (65x125x65mm, 6x6x6)	1			23400		https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
ALUMINIUM VINKEL 6082-T6 (75x40x5mm)	1			23350		https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
ALUMINIUM U-PROFIL 6060-T6 (50x100x50mm)	1			23400		https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
Lemplate 2500x1250x5mm	1			24090	Hovedplate lem	https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
RF RUNDSTÅL AISI 30 Ø16x6000mm	1		kr -	20025	Bolt til pianohengsel	https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
Aluminiumsplate 1020x2020x10mm	1			24090	Plate som skal boltes på ferga	https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
Aluminiumsplate perforert 1000x2000x3mm (BxLxT)	1			24300	Underplate til lem	https://www.smithstal.no/SmithStaal/Produkter/lagerkatalog-smithstal.no.pdf
Rodin.no						
SKRUE 931 8.8 FZ 14X240	4			FOR100114240		https://www.rodin.no/6kt-skrue-931-8-8-fz-14x240.html
SKRUE 931 8.8 FZ 14X160	4			FOR100114160		https://www.rodin.no/6kt-skrue-931-8-8-fz-14x160.html
KAROSSERI-SKIVE FZ 14X30	8			FOR23311430		https://www.rodin.no/karosseri-skive-fz-14x30.html
MUTTER 934-8 FZ M 14	4			FOR200114		https://www.rodin.no/6kt-mutter-934-8-fz-m-14.html
Astrup AS						
Al.rør 32x3,5x6000mm	1		kr -	1060037201	Rør til pianohengsel	https://kundeportal.astrup.no/aluminium/alu-r%C3%B8r-runde
POM C bolt sort 30mm (std 3m)	2		kr -		Foring for pianohengsel	https://kundeportal.astrup.no/plast/pom/bolt-rund-sort
Al U-prof 6082-T6 40x75x40/5x4x5mm a 6000mm	1		kr -		Brukes som avstivere	https://kundeportal.astrup.no/aluminium/alu-u-profil