



Høgskulen på Vestlandet

MAS352 - Bacheloroppgave

MAS352

Predefinert informasjon

Startdato:	01-05-2022 09:00	Termin:	2022 VÅR
Slutt dato:	30-05-2022 14:00	Vurderingsform:	Norsk 6-trinns skala (A-F)
Eksamensform:	Bacheloroppgave		
Flowkode:	203 MAS352 1 O 2022 VÅR		
Intern sensor:	(Anonymisert)		

Deltaker

Kandidatnr.:	410
---------------------	-----

Informasjon fra deltaker

Antall ord *:	10043
----------------------	-------

Sett hake dersom Ja
besvarelsen kan brukes
som eksempel i
undervisning?:

Egenerklæring *: Ja
Jeg bekrefter at jeg har Ja
registrert
oppgavetittelen på
norsk og engelsk i
StudentWeb og vet at
denne vil stå på
vitnemålet mitt *:

Gruppe

Gruppenavn:	(Anonymisert)
Gruppenummer:	3
Andre medlemmer i gruppen:	402

Jeg godkjenner autalen om publisering av bacheloroppgaven min *

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? *

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? *

Ja, DeepOcean AS

FRIKSJONSTESTING AV KONTAKTMATERIALER I SUBSEA CLAMPS

LYNN VO
BÅRD AUSTARÅ

Bacheloroppgave i Maskiningeniør
Haugesund, Norge 2022



Høgskulen
på Vestlandet

Friksjonstesting av kontaktmaterialer i subsea clamps

Lynn Vo
Bård Austarå

Institutt for Maskin- og Marinfag
Høgskulen på Vestlandet
NO-5528 Haugesund, Norge

Høgskulen på Vestlandet
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitskap
Institutt for maskin- og marinfag
Bjørnsonsgate 45
NO-5528 Haugesund, Norge

Omslag fotografi © Norbert Lümmen

English title: Friction testing of contact materials in subsea clamps

Forfattere, studentnummer: Lynn Vo h585074
Bård Austarå h585151

Studieprogram: Maskiningeniør
Dato: Juni 2022
Rapportnummer: IMM 2022-M21
Veileder ved HVL: Zhenhiu Liu
Andrés Franklin Olivares Lopez
Oppdragsgiver: DeepOcean AS
Oppdragsgivers referanse: Anders Vikebø

Antall filer levert digitalt: 1

Forord

Bacheloroppgaven *Friksjonstesting av kontaktmaterialer i subsea clamps* omhandler teori og utførelse, og markerer avslutningen på en treårig utdanning i maskiningeniørfaget ved Institutt for Maskin- og Marinfag (IMM) ved Høgskulen på Vestlandet (HVL) våren 2022. Oppgaven består av en skriftlig rapport, EXPO-plakat og en muntlig presentasjon. Til sammen utgjør dette 20 studiepoeng og er en obligatorisk del av emnet.

Oppgaven er skrevet i samarbeid med DeepOcean AS, avdeling Haugesund. Den går ut på å finne og undersøke friksjonskoeffisienter for ulike kontaktmaterialer som blir hyppig brukt i subsea clamps.

Vi ønsker å rette en stor takk til HVL for økonomisk støtte til oppgaven.

Vi ønsker å takke:

Zhenhui Liu

Førsteamanuensis, intern veileder ved IMM for veiledning under prosjektet.

Andrés Franklin Olivares Lopez

Assisterende Instituttleder, intern veileder ved IMM for veiledning under prosjektet og lån av utstyr.

Anders Vikebø

Technical Manager, ekstern veileder ved DeepOcean for veiledning under prosjektet.

Geir Halleraker

Senior Project Engineer, DeepOcean, utdeling av oppgaven og veiledning.

PDS Mecan v/Frode Gismarvik

Head of Machining & Mechanical, produksjon av design og veiledning.



Bård Austarå

Lynn Vo

Sammendrag

Denne oppgaven konsentrerer seg om å undersøke friksjonskoeffisienter i materialer som er hyppig brukt i subsea clamps. For å finne friksjonskoeffisientene ble det brukt et testoppsett som ble designet av gruppen. Testoppsettet benyttet bolter for skape normalkraft og en verkstedpresse for å skape forflytning mellom materialene. Materialene som ble testet i denne oppgaven var S355 stål og polyoxymetylen (POM-C). Disse to materialene ble friksjonstestet mot fire ulike overflateruheter av S355 stål. Dette skjedde under like kontaktforhold med hensyn til kontaktareal, flatetrykk og overflatekarakteristikk. Det ble utført både våte og tørre tester av materialene.

For å logge testresultatene ble det brukt lastceller i kombinasjon med en analog-digital omformer. Det ble også brukt mikroskop og mikroskopkamera til å dokumentere eventuelle endringer i overflaten til testmaterialene.

Resultatene indikerer at designoppsettet er et nyttig instrument for å evaluere og sammenligne friksjonen mellom stålplate og ulike materialer. Resultatene viser liten spredning, noe som indikerer at prosessen er stabil og repeterbar. Testmetoden tillater sammenligning av ulike overflateruheter og -behandlinger når det gjelder friksjon. Denne oppgaven vurderer fire forskjellige overflateruheter: 1.6, 3.2, 6.3 og 12.3 μm Ra. Overflateruheten ble funnet å ha en signifikant effekt på friksjonskoeffisienten.

Abstract

This thesis concentrates on examining the coefficients of friction in materials commonly used in subsea clamps. To find the coefficients of friction, a test setup was designed by the group. The test setup utilizes bolts to generate normal force and a hydraulic press to generate movement between the materials. The materials that were tested in this thesis are S355 steel and polyoxymethylene (POM-C). These two materials were friction tested against different surface roughnesses of S355 steel. This was carried out under similar contact conditions with regards to contact area, surface stress and surface characteristics. Both wet and dry tests were done.

To log the data, load cells were used in combination with an analog-to-digital converter. Microscopes and microscope cameras were also used to document any changes in the surface of the test materials.

The results indicate that the designed test setup is a useful instrument to evaluate and compare the friction between steel plates and different materials. The results show little spread, which indicates that the process is stable and repeatable. The test method allows comparing of different surface roughnesses and -treatments in regards to friction. This thesis examines four different surface roughnesses: 1.6, 3.2, 6.3 and 12.3 μm Ra. The surface roughness was found to have a significant effect on the coefficient of friction.

Innhold

Forord.....	V
Sammendrag.....	VII
Abstract.....	IX
Nomenklatur.....	XIII
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Mål og motivasjon.....	1
2. Teoretisk fremgangsmåte.....	3
2.1 Friksjon.....	3
2.1.1 Faktorer for friksjon.....	4
2.2 Eksisterende løsninger.....	7
2.2.1 Kolsky Tension Bar.....	7
2.2.2 The Flat Strip Drawing Test.....	8
2.3 Lastceller.....	10
2.3.1 Lastcelle-prinsipp.....	10
2.3.2 Omregning fra elektrisk spenning til kraft.....	11
2.3.3 Typer lastceller.....	11
3. Eksperimentoppsett.....	13
3.1 Kravliste.....	13
3.2 Materialer som ønskes testet.....	13
3.3 Design av testoppsett.....	14
3.4 Beregninger.....	16
3.4.1 Knekking.....	16
3.4.2 Bolter.....	17
3.4.3 Lastceller.....	19
3.4.4 Friksjonskoeffisient og standardavvik.....	20
3.5 Utstyrliste.....	21
3.6 LabVIEW.....	22
3.7 Testmaterialer.....	26

3.8	Hardhet	34
3.9	Ruhet.....	36
3.10	Testprosedyre	38
4.	Tiltrekkingsmoment	39
5.	Resultat tørre tester	40
5.1	Stål mot Stål	41
5.2	Stål mot POM-C.....	45
6.	Resultat våte tester	48
6.1	Kommentar til våte tester.....	48
6.2	Stål mot stål.....	50
6.3	Stål mot POM-C.....	52
7.	Diskusjon.....	54
7.1	Kommentar til resultater	54
7.2	Feilkilder.....	56
7.2.1	Konstruksjon	56
7.2.2	Lastcellene.....	56
7.2.3	Logging	57
8.	Konklusjon og videre arbeid.....	58
	Referanser	60
	Vedlegg A – Proof of Concept	65
	Vedlegg B - Produksjonstegninger	70
	Vedlegg C - Alternative design	79
	Vedlegg D - Beregninger	83
	Vedlegg E - Diverse MATLAB script	89

Nomenklatur

ϵ_1	=	Friksjonsvinkelen	[-]
μ_d	=	Dynamisk friksjonskoeffisient	[-]
μ_s	=	Statisk friksjonskoeffisient	[-]
σ_{bolt}	=	Strekkspenning i bolt	[Pa]
σ_{jf}	=	Jevnføringspenningen	[Pa]
τ_T	=	Torsjonspenning	[Pa]
A_s	=	Spenningsareal	[m ²]
F_1	=	Beregnet last på bolt	[N]
F_a	=	Maksimal strekkbelastning på bolt	[N]
F_f	=	Friksjonskraft	[N]
F_i	=	Forspenningskraften	[N]
M_s	=	Moment for å overvinne bolthodefriksjon	[N*m]
M_v	=	Moment for å overvinne gjengefriksjon	[N*m]
P_{max}	=	Maksimal last	[N]
R_e	=	Strekkefasthet	[Pa]
V_0	=	Signalspenning fra Wheatstone-bro	[V]
V_{inn}	=	Spenning inn på lastcelle	[V]
$V_{ut,max}$	=	Signalspenning fra lastcelle ved maksimal last	[V]
W_p	=	Boltverrsnittets polare motstandsmoment	[m ³]
d_1	=	Innerdiameter for skruegjenge	[m]
d_2	=	Middeldiameter for skruegjenge	[m]
d_3	=	Ytterdiameter for skrugjenge	[m]
d_h	=	Bolthulldiameter	[m]
$d_{mikroskop}$	=	Diameter målt på mikroskopskjerm til hardhetstester	[m]
r_m	=	Skruegjengens middelradius	[m]
r'_m	=	Radius for arealet i kontakt med bolthodet og overflate	[m]
\bar{x}	=	Gjennomsnitt av elementer i sett	Enhet varierer
γ_m	=	Sikkerhetsfaktor	[-]
λ_c	=	«Cut off length» i forbindelse med ruhetstesting	[m]
μ'	=	Friksjonskoeffisient for kontakt mellom bolthode og overflate	[-]
α	=	Gjengevinkel	[-]
φ	=	Gjengens stigningsvinkel	[-]
D	=	Diameter til kule for Brinell test	[m]

E	=	Elastisitetsmodul	[Pa]
G	=	Tyngdekraft	[N]
HBW	=	Brinell hardhet	[N/mm ²]
I	=	Arealtreghetsmoment	[m ⁴]
K	=	Effektiv-lengdefaktor	[-]
L	=	Lengde	[m]
N	=	Normalkraft	[N]
S	=	Sensitivitet	[mV/V]
V	=	Spenning	[V]
d	=	Diameter til fordypningen i Brinell test	[m]
g	=	Tyngdeakselerasjon	[m/s ²]
i	=	Indeks	[-]
k	=	Faktor for forspenning	[-]
n	=	Antall elementer	[-]
p	=	Gjengestigning	[m]
s	=	Nøkkelvidde	[m]
x	=	Element i sett	Enhet varierer
β	=	Faktor for last på lastcelle	[-]
μ	=	Friksjonskoeffisient	[-]
ς	=	Forhold mellom diameter gjennom mikroskop og faktisk diameter	[-]
ψ	=	Helningsvinkel for friksjonstesting ved hjelp av skråplan	[-]

1. Innledning

1.1 Bakgrunn

Subsea clamps er en spesialisert form for utstyr som brukes i olje- og gasskonstruksjon, samt vedlikeholds operasjoner. Deres primære rolle er å etablere en sikker og pålitelig forbindelse, og skape høy nok friksjon med overflaten på komponenten som festes, som typisk er et stålrør eller en kabel. Dette sikrer undervannsklemmen til overflaten og forhindrer at den forskyves av havstrømmer eller andre faktorer. Det er mange forskjellige subsea clamps basert på geometri som alle tjener samme formål, som er å klemme rundt et objekt. Et eksempel på en subsea clamp er vist i Figur 1 og Figur 2.

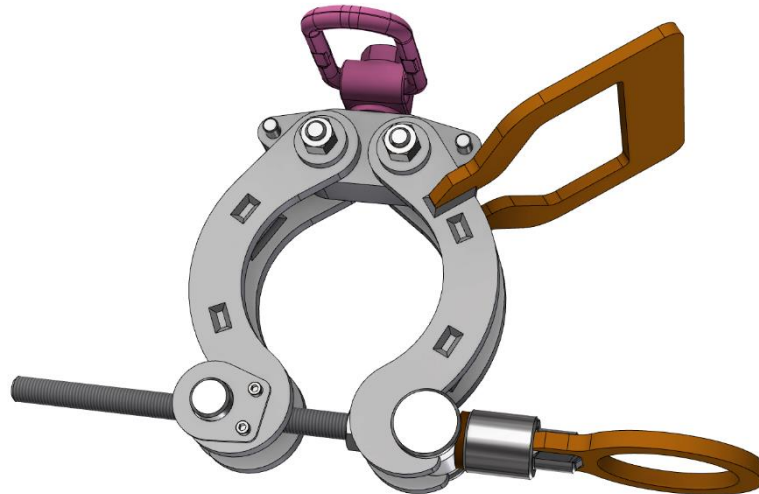
Et problem ved stramming av subsea clamps er at det er noen usikkerheter knyttet til dette. Det er lite data på friksjonskoeffisienter mellom materialer under vann, samt mellom skruens gjenger og mutter og mellom skruens hode og overflaten. En løsning er å stramme skruen til man er sikker på at klemmen klemmer med et stort nok trykk. Dette er mulig i noen situasjoner, men i tilfeller der man klemmer rundt ømfintlige objekter, for eksempel fleksible risere, er det en fare for å ødelegge objektet man klemmer rundt. Man blir derfor satt i en vanskelig situasjon og må gjerne treffe innenfor et lite spekter av spenninger. Trykket man påfører med klemmen må altså være større enn det nødvendige flatetrykket for å holde klemmen på plass, samtidig som det ikke overskrider spenningskapasiteten til objektet det klemmer rundt.

1.2 Mål og motivasjon

Målet med oppgaven blir å utføre tester mellom flere materialer for å finne statiske friksjonskoeffisienter og sammenligne friksjonsmekanismer. Her kan det allerede antas at det blir en viss spredning av resultatene. Datasettet som oppnås ut ifra tester, vil prosjektgruppen lage grafer og tabeller med friksjonskoeffisienter og deres respektive standardavvik. Mange materialpar ved høye kontaktrykk har få gyldige friksjonskoeffisientverdier dokumentert i litteraturen. Som et sekundært formål vil oppgaven tilby data om friksjonskoeffisienten for noen materialpar i ulike kontaktrykk som kan være nyttige i innspenningsprosessen mellom en subsea clamp og objektet som blir klemt. Derfor skal gruppen i samarbeid med DeepOcean utvikle en testmetode for testing av friksjon i hyppig brukte materialer i subsea clamps og finne friksjonskoeffisienter for disse. Resultatene skal være en god løsning på problemstillingen og skal kunne forhåpentligvis være til nytte i industrien.

For dette prosjektet har gruppen flere motivasjoner for å nå målet. I tillegg skal det gi gruppen muligheten til å dokumentere faglige kunnskaper og ta i bruk teorier som har blitt lært for å løse problemer. Videre undersøkelser består av å finne eksisterende løsninger som allerede blitt utført for friksjonstesting under høy belastning. Med inspirasjon fra dette skal det bli designet et eksperimentoppsett med hensyn til kriteriene, konstruering og beregninger.

Det kan allerede antas at på grunn av oppgavens bredde vil tidsbruk være en viktig begrensning. Det er derfor viktig å være så realistiske som mulig i forhold til designets kompleksitet og antall materialer som kan testes. Det må også antas at det blir begrenset med økonomisk støtte, og det gjerne må velges mer økonomisk fordelaktige løsninger fremfor mer optimale, dyrere utstyr.



Figur 1: Eksempel på subsea clamp



Figur 2: Eksempel subsea clamp, i bruk

2. Teoretisk fremgangsmåte

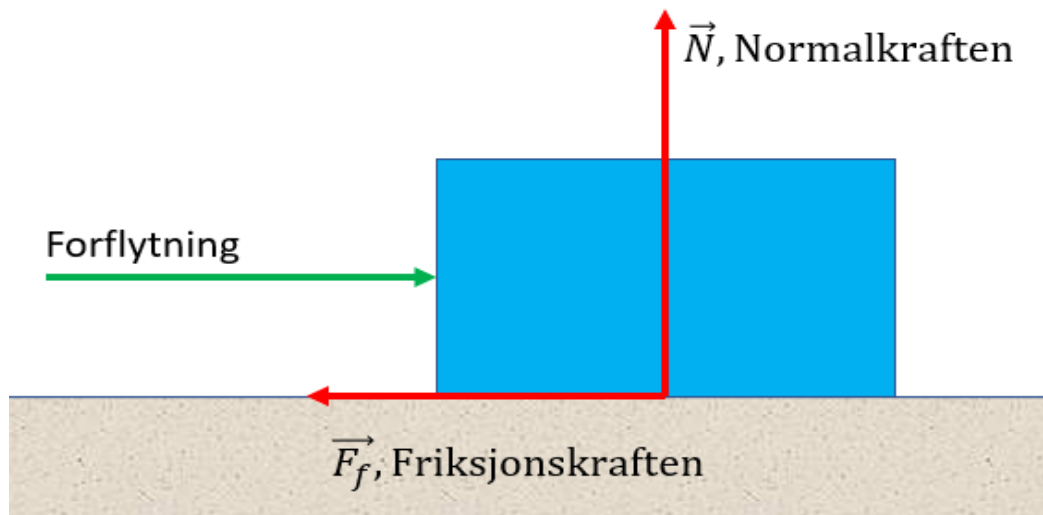
2.1 Friksjon

Friksjon er definert som kraften som motsetter bevegelse [1]. Amontons-Coulomb [2] loven beskriver at friksjonskraften, F_f , er direkte proporsjonal med normalkraften, N ,

$$F_f = \mu N \quad (1)$$

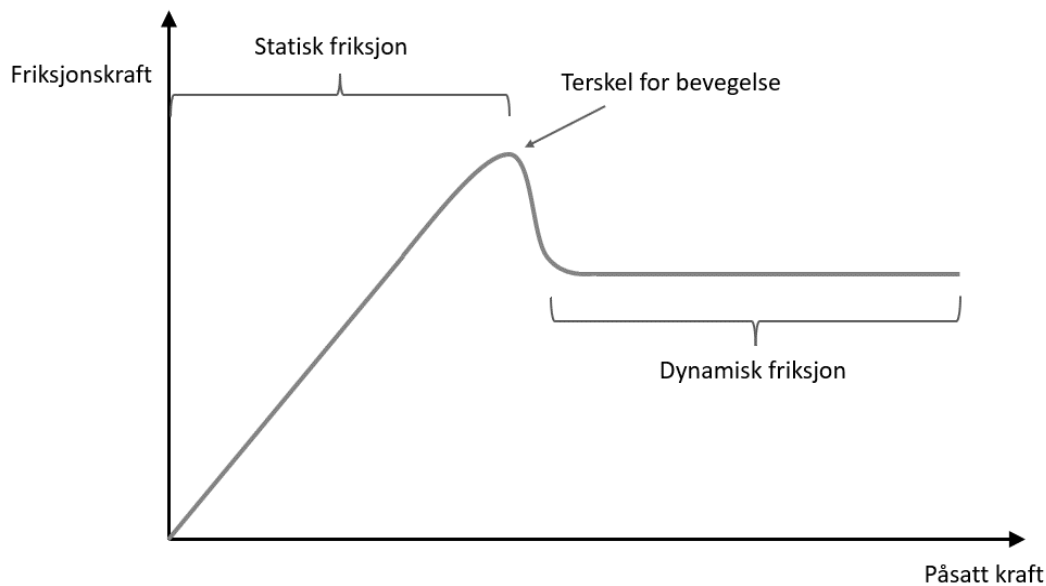
hvor μ er en proporsjonalitetskonstant kjent som friksjonskoeffisient ifølge formel (1) er friksjonskoeffisienten for dynamisk friksjon, μ_d , normalt relativt mindre enn for statisk friksjon, μ_s . Mellom friksjonskraften og det nominelle kontaktområdet er det ingen sammenheng som vil bety at uavhengig av deres fysiske størrelse, har to legemer samme friksjonskoeffisient [3].

For å definere statiske og dynamiske friksjoner, er det illustrert en blokk med masse som blir presset av en tangentiell kraft, Forflytningen, i Figur 3. Det oppstår et statisk kraftlikevekt mellom forflytningen og friksjonskraftens [3]. Når objektet kommer i kontakt med bakken, vil den oppleve en reaksjonskraft fra bakken som er den tangentielle friksjonskraften, F_f , og normalkraften, N . På et tidspunkt vil den



Figur 3: Friksjonskraft (\vec{F}_f) og normalkraft (\vec{N}) ved kontaktpunktet mellom en blokk og bakken.

påførte kraften vokse tilstrekkelig stor til å overvinne friksjonskraften, noe som får blokken til å bevege seg fremover [1]. Med andre ord, for å bryte statisk likevekt mellom to legemer og starte relativ bevegelse, må den resulterende kraften som virker på en av legemene være større enn den begrensende friksjonskraften. Det gir dermed sammenheng mellom friksjonskraften og den normale reaksjonskraften som oppstår frem til punktet "glidning" mellom overflatene. Når en ekstern kraft påføres, øker den statiske friksjonen lineært til den når en maksimal verdi (Figur 4).



Figur 4: Skjematisk av en typisk friksjonskoeffisient som viser statisk og dynamisk friksjon.

Motsatt har dynamisk friksjon en konstant natur og endres ikke med kraften som utøves. Det er vanligvis riktig å si at kinetisk friksjon - også kjent som friksjon mellom objekter i bevegelse - beskriver friksjon mellom to objekter som er proporsjonal med normalkraften mellom dem. Som et resultat brukes statisk friksjon når det ikke er noen relativ bevegelse mellom objektene, og kinetisk friksjon brukes når det er relativ bevegelse [3].

2.1.1 Faktorer for friksjon

I ingeniørapplikasjoner er det viktig å kunne måle hvordan to materialer gnir mot hverandre slik at du kan forstå hvordan de reagerer i normale og unormale mekaniske miljøer. Dette vil hjelpe deg med å lage bedre design basert på resultatene av numeriske simuleringer.

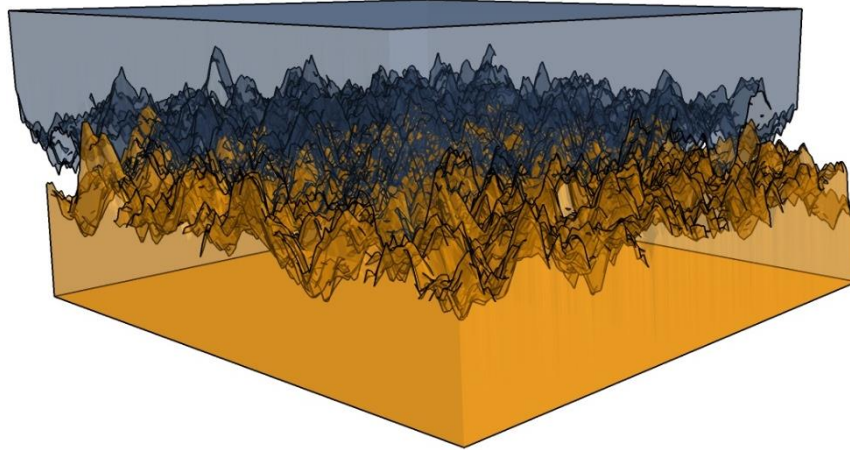
Adhesjon

Adhesjon er forbindelsen eller tiltrekningen mellom flater med tett avstand. Hver gang to flater kommer i kontakt; adhesjon oppstår til en viss grad. Under andre omstendigheter er virkningene av adhesjon mindre, og dette gjelder spesielt for ekstremt ru og uforenlige overflater.

Basert på en eksperimentell studie ga Tomlinson [5] en sammenheng mellom friksjonskoeffisienten og de elastiske egenskapene til det involverte materialet. Kaldsveisekryss dannes på grunn av molekylær tiltrekning mellom metaller, ifølge Tomlinson. Generelt bæres belastningen på bærende overflater av noen få punkter; som et resultat blir disse punktene utsatt for høyt enhetstrykk og vil sannsynligvis sveises sammen [6].

Overflateruhet

Ruhet til kontaktflatene mellom to objekter, er en av årsaker til friksjon. Overflateruhet er definert av ujevnheter på overflatene eller høyden på de små uregelmessighetene [7]. Realistisk og rent praktisk er ingen overflate helt glatt, og det varierer ved at noen vil ha større uregelmessigheter enn andre. Uansett hvor glatt en overflate kan se ut, har overflatene høye og lave punkter. Figur 5 er det et mikroskopisk nivå mellom to metallers overflater. Overflatene har en viss likhet med små og ujevne tagger. Når to faste stoffer kommer i kontakt, vil den øvre overflaten støttes av toppene av begge overflatenes



Figur 5: Illustrasjon av friksjon [33].

uregelmessigheter, og et stort område av overflaten vil bli adskilt med en stor avstand, sammenlignet med det molekylære virkningsområdet. Dette betyr at friksjonen er forårsaket av at overflatetopper griper sammen [8]. To solide kropper støttes på de høyeste uregelmessighetsbakkene, noe som resulterer i et veldig lite område med berøringskontakt. Som et resultat er kontaktområdet uavhengig av overflatearealet og bestemmes av belastningen. Påføring av kraft på kontaktpunktene forårsaker plastisk deformasjon og flyt, noe som kan øke området for faktisk kontakt mellom faste stoffer betydelig. Plastisk flyt og deformasjon fortsetter til kontaktområdet er stort nok til å støtte lasten [9].

For å sikre at overflaten har de nødvendige egenskapene, må parameterne for overflateruhet bestemmes og kontrolleres [10]. Overflateruhet bestemmes ved å beregne R_a og R_z . Mens R_a gir gjennomsnittlig overflateruhet, kan R_z gi informasjon for alle porer, hull eller overflatedeformasjoner som er skadelige for styrken [11]. R_a er det gjennomsnittlige vertikale avviket fra senterlinjen, og det er den mest brukte verdien i Europa.

Normalkraft og flatetrykk

Friksjonskraften som begrenser kroppens bevegelse påvirkes også av normalkraften som virker på legemene. Jo større massen eller vekten til objektet er, desto større blir reaksjonen eller normalkraften som frembringes. Ettersom styrken og størrelsen på normalkraft øker, øker også styrken og størrelsen på friksjonskraften. Normalkrefter har ansvaret for å bestemme mengden kraft som kreves for å få kontakt mellom to overflater. Mengden normalkraft som er nødvendig for å få kontakt mellom to overflater er proporsjonal med overflatearealet deres. Normalkraften multiplisert med arealet av kontaktflatene gir den nødvendige kontaktkraften [12].

Mange flere kontakter vil kallsveises hvis de to overflatene presses mer sammen. Nå, for at overflatene skal bevege seg i forhold til hverandre, kreves det en større påført kraft: den statiske friksjonskraften har en større maksimal verdi. Fordi det er mange flere steder for kort kallsveising når overflatene glir, øker

den kinetiske friksjonskraften i størrelse [3]. Kaldsveising oppstår når overflater i nærkontakt utsettes for trykk og belastninger.

Deformasjon

Deformasjonen i områdene øker når belastningen mellom to faste overflater i kontakt øker, først elastisk og deretter plastisk, inntil lasten støttes. Når overflatene først kommer i kontakt med lett belastning og ingen bevegelse, er deformasjonen elastisk. Overflaten deformeres litt, og overflatebinding kan forekomme. Når belastningen fjernes, opplever systemet elastisk gjenoppbygging og overflatene går tilbake til sin opprinnelige tilstand [13]. Dette sees i noen som inneholder materialer med høy elastisitetsmodul [14].

Påføring av en belastning på de fleste praktiske metaller forårsaker imidlertid en viss plastisk deformasjon ved skjevhetene. Plastisk deformasjon imøtekommes ved dannelse i ujevnheter på den faste overflaten. I toppkontakt med plastisk deformasjon oppstår dislokasjonsgenerering langs glidelinjer, noe som kan resultere i dannelse av nye overflater i selve kontaktsonen [5]. Med elastisk deformasjon kan den opprinnelige overflatetopografien gjenvinnes. I motsetning til plastisk deformasjon har det imidlertid skjedd en permanent endring i overflatetopografien, som kan påvirke grensesnittfriksjonsadferden. På et tidspunkt oppnås en likevektssituasjon der den påførte belastningen støttes av det virkelige kontaktområdet som skapes av deformasjon i kontaktskårene [7]. Friksjonskraften er da proporsjonal med mengden materiale i faststoffkontakt ved grensesnittet. Det krever mer kraft å flytte en overflate over en annen hvis det virkelige kontaktområdet er større enn det ser ut til. Jo større påført belastning, desto større er friksjonskraften mellom de to flatene i faststoffkontakt.

Smøring

I et fullt hydrodynamisk scenario holder smøremiddelbelegget overflatene fra hverandre. Friksjon er forårsaket av viskøs spredning i smøremiddelet, ikke kontaktmaterialene. Når de to overflatene trekker seg nærmere hverandre, berører skjevhetene og "grensesmøringen" begynner. Tørr- og væskefriksjon er de to vanligste typene friksjon som oppstår. Tørr friksjon, også kjent som "Coulomb"-friksjon, karakteriserer den tangentielle komponenten av kontaktkraften som oppstår når to tørre overflater beveger seg eller har en tendens til å bevege seg i forhold til hverandre, som navnet tilsier. Væskefriksjon er den tangentielle komponenten av kontaktkraften som eksisterer mellom påfølgende lag i et fluid som strømmer med forskjellige hastigheter i forhold til hverandre, for eksempel i en væske eller gass mellom flater [8].

2.2 Eksisterende løsninger

Friksjonsmålingsanordningen må kunne gi relativ bevegelse mellom to prøver, påføre en målbar normal belastning og måle den tangentielle motstanden mot bevegelse. Det er mange tilgjengelige metoder, og det endelige valget vil bli bestemt av de nøyaktige forholdene for kontaktmaterialene som undersøkes. Resultatene av disse tiltakene avhenger imidlertid av overflatenes type og renhet, samt til en viss grad av måleutstyrets ulike egenskaper. Dette forholdet viser at friksjonskoeffisienten ikke er en unik, klart definert materialattributt [4]. I tillegg er flertallet av statiske friksjonsmålinger beskrevet i den vitenskapelige litteraturen avledet fra studier utført ved eksepsjonelt lave normalbelastninger, som kanskje ikke er aktuelt for høytrykkskarakteristikken [15].

Måling av helningsvinkelen som et legeme som hviler på et skråplan begynner å gli, er den enkleste og nesten alltid realiserbare eksperimentelle tilnærmingen for å bestemme friksjonskoeffisienten. Denne vinkelen er kjent som friksjonsvinkelen [16]. Ved å nå friksjonsvinkelen når den statiske kraften er på sitt maksimale verdi, vil det følger at tangenten til friksjonsvinkelen, ψ , er lik koeffisienten for statisk friksjon, μ_s , slik som vist i formel (2)

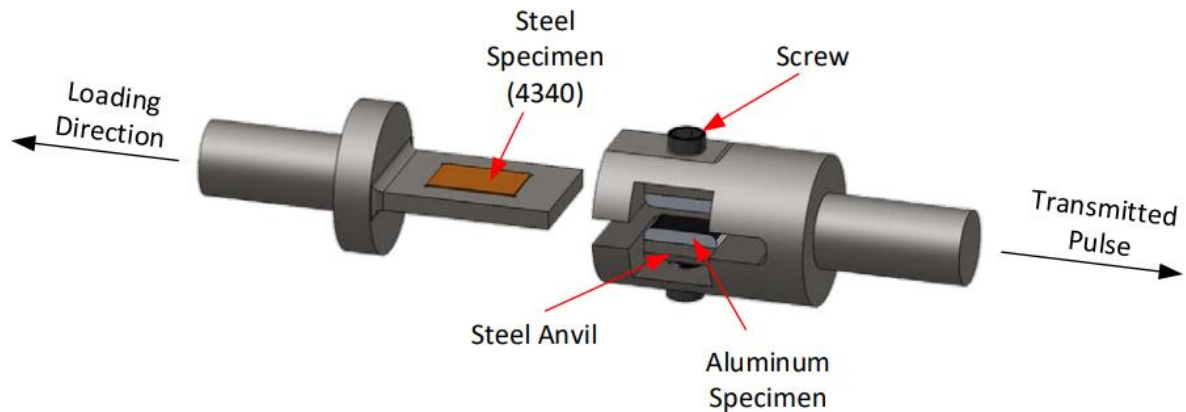
$$\mu_s = \tan \psi \quad (2)$$

På markedet eksisterer flere tribometer som måler tribologiske egenskaper mellom to kontaktoverflater. En tribotester er en generell betegnelse for en maskin eller enhet som utfører slitasje-, friksjons- og smøretester. Tribotestere er ofte ekstremt spesifikke i funksjon og er laget av produsenter som ønsker å teste og analysere den langsiktige ytelsen til produktene deres [5].

Følgende underkapitler diskuterer eksisterende løsninger som er ideelle for dette prosjektet. Disse forsøkene ble ikke utført for testing under våte forhold.

2.2.1 Kolsky Tension Bar

Denne forskningen presenterer en eksperimentell metode for å bestemme den dynamiske friksjonskoeffisienten mellom to metaller som bruker en Kolsky-koblingsstang og et spesialdesignet friksjonsanker (Figur 6). Som et resultat er den dynamiske friksjonskoeffisienten det primære fokuset, selv om den statiske verdien også er notert. En PVDF-kraftsensor ble brukt for å måle normalkraften, som kan genereres av lufttrykk fra stempler eller vekter, mens en Kolsky-strekkstangmetode ble brukt for å kvantifisere friksjonskraften. Normal- og friksjonskrefter brukes til å beregne friksjonskoeffisienten. Materialeegenskaper kan måles ved høye tøyningshastigheter ved å bruke en Kolsky-stang, også kjent som den delte Hopkinson-stangen.



Figur 6: Friksjonstestfeste for bestemmelse av dynamisk friksjonskoeffisient [23]

I dette eksperimentet ble Kolsky-stangen modifisert med forskjellige prøver og beslag for å teste friksjonsinteraksjonen mellom to materialer. For eksperimentet ble friksjonskoeffisienten mellom 4340 stål og 7075-T6 aluminium testet ved omtrent 4, 8 og 11 $\frac{m}{s}$ slag hastighet.

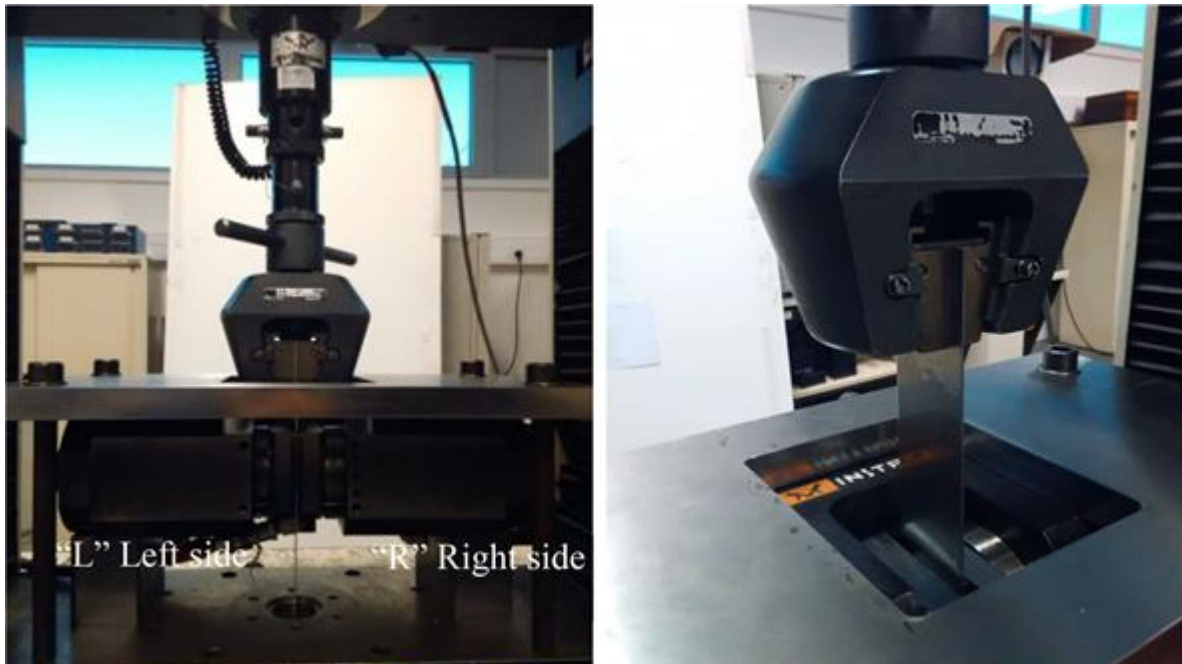
Ved en konstant glidehastighet på 4 m/s gikk både den statiske friksjonskoeffisienten og den kinetiske friksjonskoeffisienten opp ettersom ruheten gikk fra ruhet på 1 μm til ruhet på 60 μm . For ruhet på 12 μm og ruhet på 60 μm par var de statiske og kinetiske friksjonskoeffisientene stort sett de samme for hastigheter mellom 4 og 11 m/s. Når normalkraften ble endret fra ca. 2000 N til 10.000 N mens hastigheten holdt seg den samme, gikk både den statiske og den kinetiske friksjonskoeffisienten ned etter hvert som normalkraften gikk opp [17].

2.2.2 The Flat Strip Drawing Test

Friksjonsmålinger ble utført av en modifisert utviklet tribotester (Figur 7) i forbindelse med «Flat-strip»-tegning. For å beregne friksjonskoeffisienten mellom verktøyoverflatene og stålplate HSLA 380, ble fire forskjellige verktøyoverflater testet under lignende kontaktforhold.

Den påførte normallasten varierte fra 10 til 49 kN, og glidehastigheten varierte fra 60 til 240 mm/min. Den modifiserte "Flat-strip" tribometeren viste seg å være et ekstremt verdifullt instrument for å oppdage friksjon i studiene. Under eksperimentelle simuleringer kan enheten justere den påførte normalkraften og trekraften nøyaktig. I tillegg til presis kontroll over bevegelsen til platen og verktøyet, gir dette alternativet nøyaktige målinger av last og trekraft

Resultatene viste at 80-90 % av glidelengden typisk ble brukt for å bestemme gjennomsnittlig friksjon på grunn av stabiliteten. På grunn av de mer ustabile glideforholdene kan imidlertid bare 25-30 % av



Figur 7: Verktøyplatesett av den modifiserte stripetegnings-tribotesteren (L—betyr venstre side av verktøyplatene, når man ser på forsiden; R—betyr høyre side av verktøyplatene) [14].

glidelengden brukes på overflater som er bråkjølt eller herdet. Gyldige friksjonsdata er også svært viktige som inputparametere for simuleringsmodeller for å produsere nøyaktige resultater; testmetoden tillater sammenligning av forskjellige verktøyoverflater og smøremidler når det gjelder friksjon under ekte plateformingsinnstillinger. For å redusere variasjonsområdet i friksjonskoeffisienter, reduserer smøring retningsevnen til verktøyoverflatens topografi til å redusere friksjonsadferden.

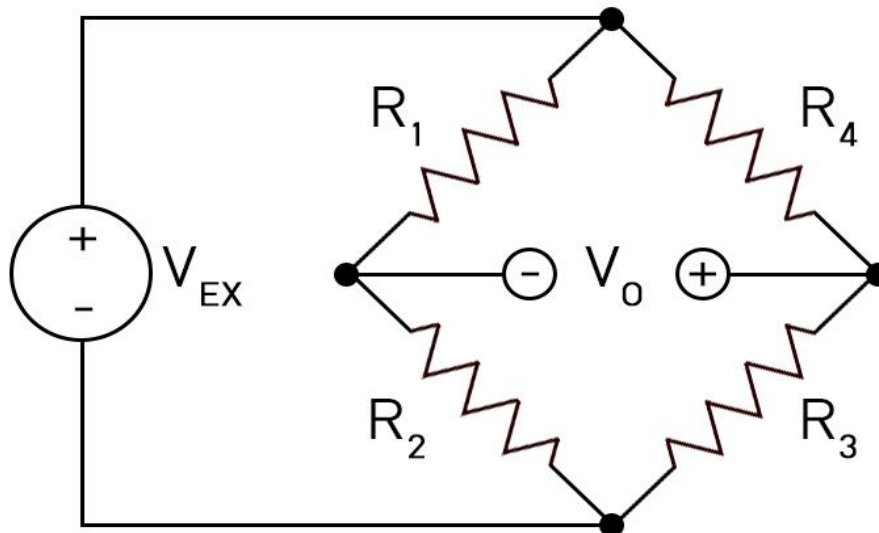
Kun i en "tørr" atmosfære og med smøring har denne forskningen blitt utført og testet med smøring (Renoform EMP). Muligheten er mange flere, ettersom evnen til å kontrollere påført normal belastning og hastighet som funksjon av tid skaper store muligheter for å forbedre denne typen testing ved å redusere antall tester [14].

2.3 Lastceller

Lastceller er transduser, også kjent som kraftsensor, som brukes til å måle mengden belastning eller kraft som påføres et objekt. De brukes i et bredt spekter av områder [18]. Lastceller arbeider etter «tøyningsmålings-prinsippet», som betyr at de oppdager når en gjenstand forårsaker en endring i mengden kraft som kreves for å holde en bestemt mengde kraft på gjenstanden. Denne kraftendringen frembringer elektrisk strøm, som kan måles for å estimere mengden kraft som leveres. I denne forbindelse konverterer de en mekanisk kraft for "input" og produserer et elektrisk "output"-signal, som typisk måles i volt [V] [19].

2.3.1 Lastcelle-prinsipp

Strain gauge er primært ansvarlig for hvordan lastceller fungerer. Denne strekkfølsomme og motstandsdyktige enheten blir brukt til å måle mekanisk belastning og fester seg normalt til en overflate. Når strain gauge blir utsatt for belastning vil det bli påvist variasjoner i motstand med ulike effekter, avhengig av oppsettet. Når kraft (strekk eller kompresjon) påføres, fungerer kroppen som en "fjær" og deformeres noe før den går tilbake til sin opprinnelige form, med mindre den er overbelastet.



Figur 8: Wheatstone-bro [34]

Strekkmåleren endrer form og elektrisk motstand når den deformeres, og fører til i en differensiell spenningsvariasjon via en Wheatstone-bro krets [20]. Resultatet er endring i spenning proporsjonal med bøyningens fysiske kraft. Derfor kan Wheatstone-bro brukes til å bestemme verdien av en ukjent motstand ved å sammenligne den med en kjent motstand. Dette gjør at svært lave motstandsverdier i milli-Ohms (m)-området kan måles.

Ved å bruke to motstander og en variabel strømkilde, produserer Wheatstone-broen en utgangsspenning som er proporsjonal med inngangsspenningen [21]. Forskjellen mellom spenningene mellom de to motstandene er det som forårsaker utgangsspenningen. Utgangsstrømmen er imidlertid utledet fra kombinasjonen av spenning over motstander og strøm gjennom strømkilden. Siden Wheatstone-broen er proporsjonal, rask og rimelig, gjør dette den til et bra verktøy for spenningsmåling. I en lastcelle vil altså en eller flere av motstandene i Wheatstone-broen være en strain gauge. Når broen er balansert, altså ingen last på lastcellen, vil spenningen V_0 være 0 [V].

2.3.2 Omregning fra elektrisk spenning til kraft

I databladet til lastcellene skal det stå oppført sensitivitet med enheten mV/V. Dette betyr at for maksimal last vil utgangsspenningen være sensitiviteten S multiplisert med strømmen inn på lastcellen, slik som vist i følgende formel (1).

$$V_{ut,max} = SV_{inn} \quad (1)$$

Dersom det antas at lastcellens spenning ut er proporsjonal med belastningen den opplever, vil faktoren derfor multiplisere spenningen med for å få kraft bli den maksimale lasten dividert på den maksimale spenningen ut av lastcellen.

$$\beta = \frac{P_{max}}{V_{ut,max}} \quad (2)$$

I formel (2) er det mulig å bruke Newton eller kilogram-kraft som P_{max} , avhengig av hvilken enhet det ønskes å måle i.

2.3.3 Typer lastceller

Lastcellene nevnt under er kun en av mange forskjellige lastcellene som eksisterer på markedet. De kommer i en rekke former og størrelser, men alle tjener samme formål. Selv om det finnes ulike metoder for å måle kraft, vil denne oppgaven konsentrere seg om lastcellene som er tilgjengelig gjennom HVL.

S-Type lastcelle

S-type lastcelle får navnet fra formen til bokstaven «S», og er en strekk- og kompresjonslastcelle med innvendige gjenger for feste. S-type lastcellen er visualisert i Figur 9. Slike kan variere med kapasitet på 25 kg og opp til rundt 30 tonn med hovedsakelig bruk av strain gauge teknologi. Det er mange ulike former



Figur 9: S-type lastcelle

S-type lastceller, både legert og rustfritt stål, og tilgjengelig i imperiale kapasiteter og dimensjoner. Fordelen med S-type lastceller er at de gir en god nøyaktighet og har kompakte designfunksjoner. Med installasjon av stenger eller belastningsknapper kan lastcellene gir utmerket ytelse i både strekk- og kompresjonsapplikasjoner [22].

Miniatyr komprimeringslastceller

Disse lastcellene består av en enkelt flat, hevet overflate i disse kraftsensorene. De er praktiske for deres lavprofildesign. Videre er de kjent for sin robusthet og brukes i mange applikasjoner til tross for deres lille størrelse. Brukes vanligvis i industrielle prosessmaskiner, men vil fungere like godt i forsknings- eller utviklingsprosjekter. Miniatyrlastceller er laget for applikasjoner som krever lite plass, men krever



Figur 10: Button lastcelle

høy kapasitetsbelastning. Om det er mangel på tilgjengelig installasjons plass, er disse den beste måleløsningen. Strekkmålerne med høy ytelse sikrer overlegen linearitet og stabilitet, noe som resulterer i nøyaktige målinger [23], [24]. Lastcellen vist i Figur 10 er i dette tilfellet innenfor kategorien og er vanligvis kalt for en knappstype lastcelle, på engelsk Button Type Load Cell.

Pancake lastcelle

Denne lastcellen med gjennomgående hull, også kjent som en skivelastcelle, har en jevn, ikke-gjenget indre diameter som brukes til å måle trykkspenninger, belastninger i strekk eller kompresjon. Figur 11 viser denne typen lastcellen. De er en av de mest populære designene for kraftmålingsapplikasjoner på



Figur 11: Pancake lastcelle

grunn av deres lave profil, som gjør at de kan plasseres på trange steder. Måling av boltbelastning er en av de vanligste bruksområdene for denne sensortypen [25].

3. Eksperimentoppsett

På grunn av at eksisterende løsninger er såpass dyre som de er, må gruppen designe et eget testoppsett. Tegning har blitt gjort i Autodesk Inventor Professional 2019 [26].

3.1 Kravliste

Før gruppen kunne begynne å designe testoppsettet er det viktig å forstå kravene testoppsettet må oppfylle.

- Resultatene må være så konsekvente som mulig, med få feilkilder.
- Kan produseres i løpet av kort tid.
- Må ikke være for dyrt å produsere
- Må kunne tåle vann
- Må kunne måle krefter nøyaktig.

3.2 Materialer som ønskes testet

Materialene under er materialer som blir brukt i forbindelse med subsea clamps.

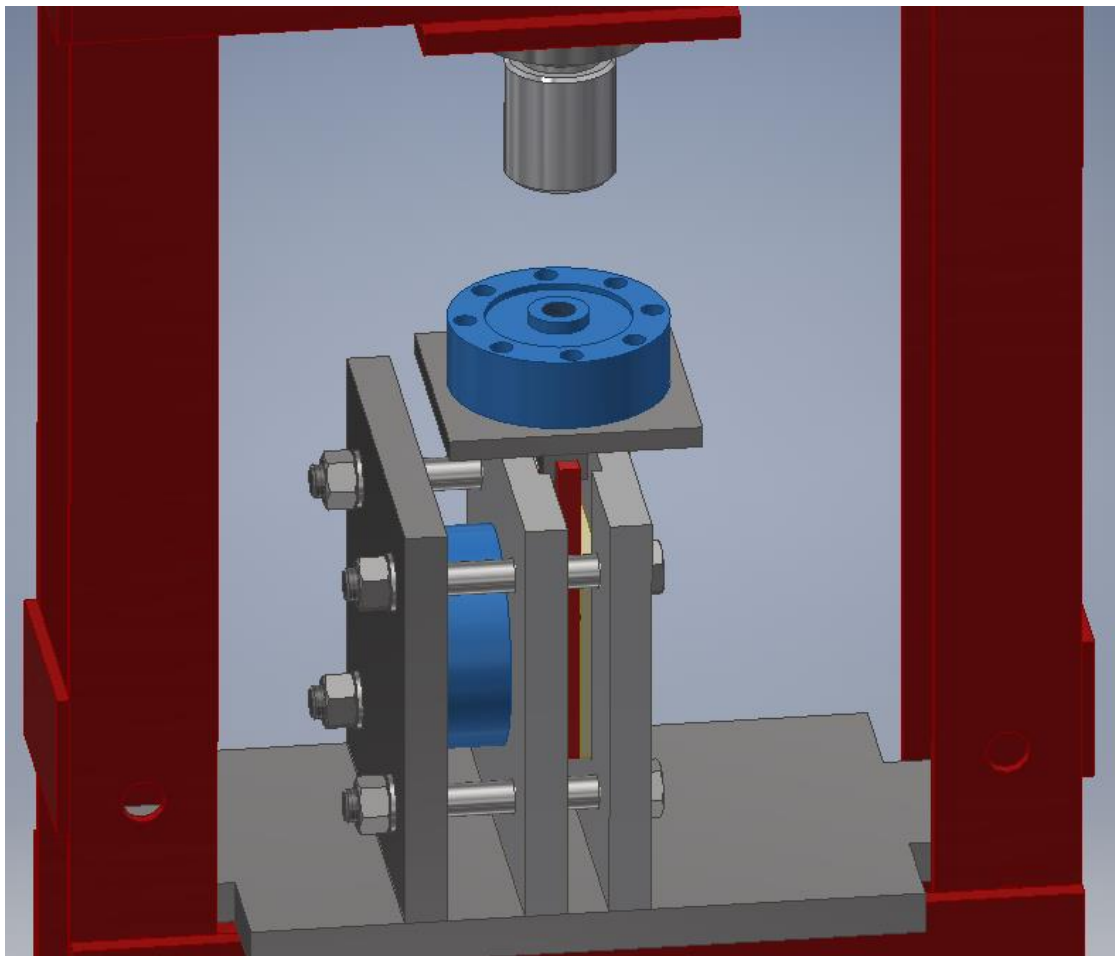
- EN AW 6082-T6 (Aluminium)
- Polyamid 6 (Ofte kalt nylon 6 eller PA 6)
- Polyoxymethylene - Sustarin C (Plast, ofte bare kalt POM - C)
- CR Neoprene Rubber (syntetisk, shore 65/70)
- EPDM gummi (syntetisk, shore 70)
- NR (Naturlig gummi, shore 65-80)
- Hardox 450/500 (Slitestål)
- PEHD 1000 (Plast karakterisert av lav friksjon)
- Norden 701 (Kompositt)

«Shore» er en måleenhet for hardhet av gummi og plast, hvor lav shore er myk og høy shore er hard. Materialene som blir hyppig brukt er gummi og POM-C. Det er derfor å prioritere å teste en av disse. På grunn av tid og budsjett er gruppen klar over at ikke alle materialene kan testes.

3.3 Design av testoppsett

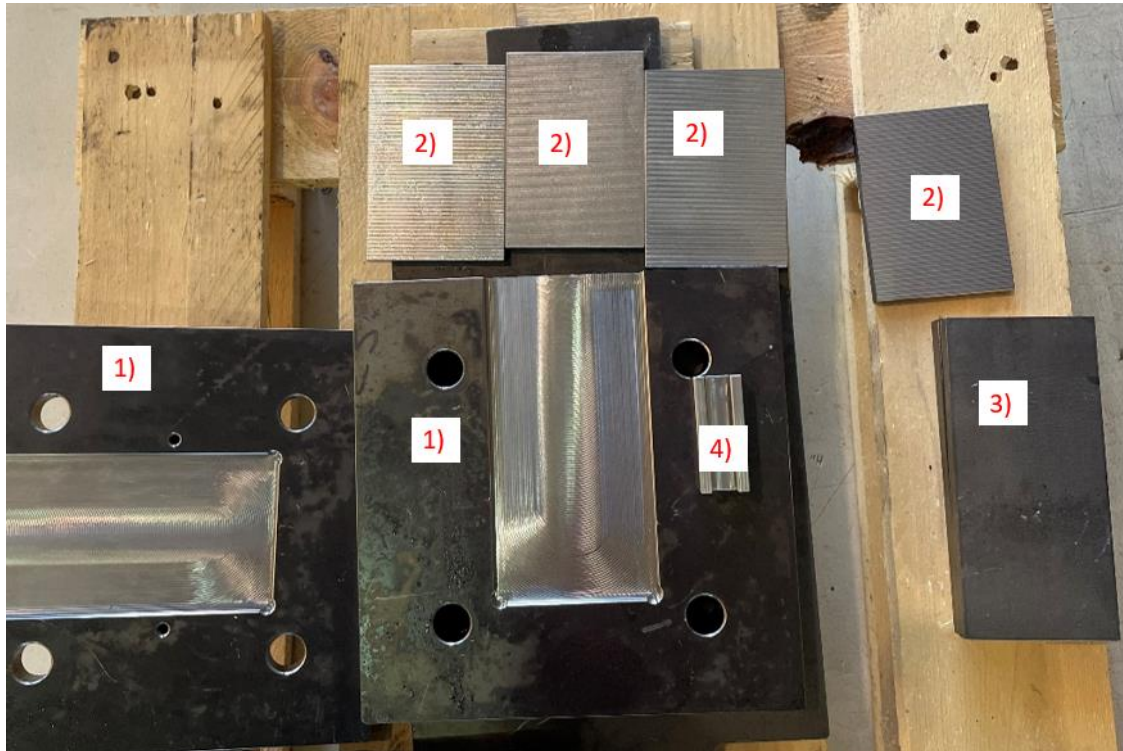
Gruppen bestemte tidlig at overflatene som skulle testes skulle være flate plater, og ikke bøyde plater som blir brukt i subsea clamps. Denne avgjørelsen ble gjort på grunnlag av at det er enklere og billigere å teste flate kontakter. En bekymring var at en bøyde plate gjerne ville ta opp noe av normalkraftene den ble utsatt for gjennom elastisk deformasjon, noe som ville gjøre resultatene unøyaktige.

Etter flere revisjoner kom gruppen frem til det som skulle bli testoppsettet (Figur 12). I dette oppsettet er friksjonskraften i vertikal retning, og den blir skapt ved hjelp av «dytting» i en verkstedpresse i stedet for å dra. Normalkraften er i horisontal retning, og den blir skapt ved å påføre moment på fire bolter. For å få nøyaktige målinger av normalkraften og friksjonskraften ble det brukt pancake lastceller. Grunnen til at gruppen valgte å gå med pancake type var at denne typen lastceller tar mye mindre plass (i høyderetning) og samtidig kan måle større krefter relativt til sin høyde enn en S-type lastcelle kan.



Figur 12: Modell av design i Inventor

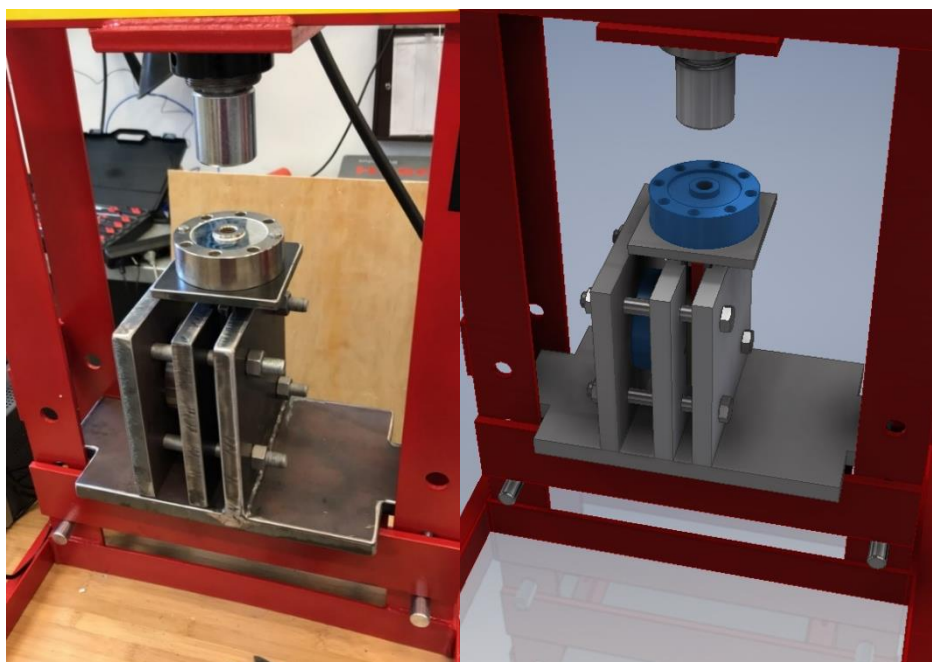
For å skape friksjonskraften brukte gruppen en 10 tons verkstedpresse som HVL gikk til innkjøp av (Tabell 1). Denne ble montert av gruppen, og det ble tatt mål av verkstedpressen slik at den kunne tegnes opp i Inventor. Dette ble veldig hjelpsomt, da det gjorde det enklere å visualisere hvordan testoppsettet skulle se ut i sin helhet. På dette tidspunktet hadde gruppen brukt så mye tid på design at det var ytterst viktig at alt passet når det ble levert, slik at det ikke ble flere forsinkelser.



Figur 13: Design under produksjon hvor 1) er støtteplatene som holder testmaterialene, 2) er testmaterialene som er statiske under testing og 3) er testmaterialene som blir utsatt for bevegelse. 4) sørger for at 3) beveger seg mer kontrollert under forsøket. (Kan bli sett over den røde platen i Figur 12.)

Det ble utført kapasitetsberegninger opp til 5 tonn. Det ble utført beregninger på knekking, bolter, bøyestress og skjærstress. Se vedlegg B.2 for produksjonstegninger. Tegningene ble sendt til PDS Mecan for produksjon (Figur 13).

27. april 2022 var designet ferdigprodusert og gruppen hentet det hos PDS Mecan. Før testing kunne begynne, var det viktig at alt var produsert som forventet og at alt passet som tenkt. Som Figur 14 viser, var det ingen problemer med å sette sammen oppsettet. Boltene er på bildet til venstre feil vei, og ble snudd før forsøkene ble gjennomført.



Figur 14: Levert design sammenlignet med tegnet design

3.4 Beregninger

Dette delkapitlet omhandler alle beregninger i forbindelse med designet, og henviser også til vedlegg D hvor komplette beregninger vises.

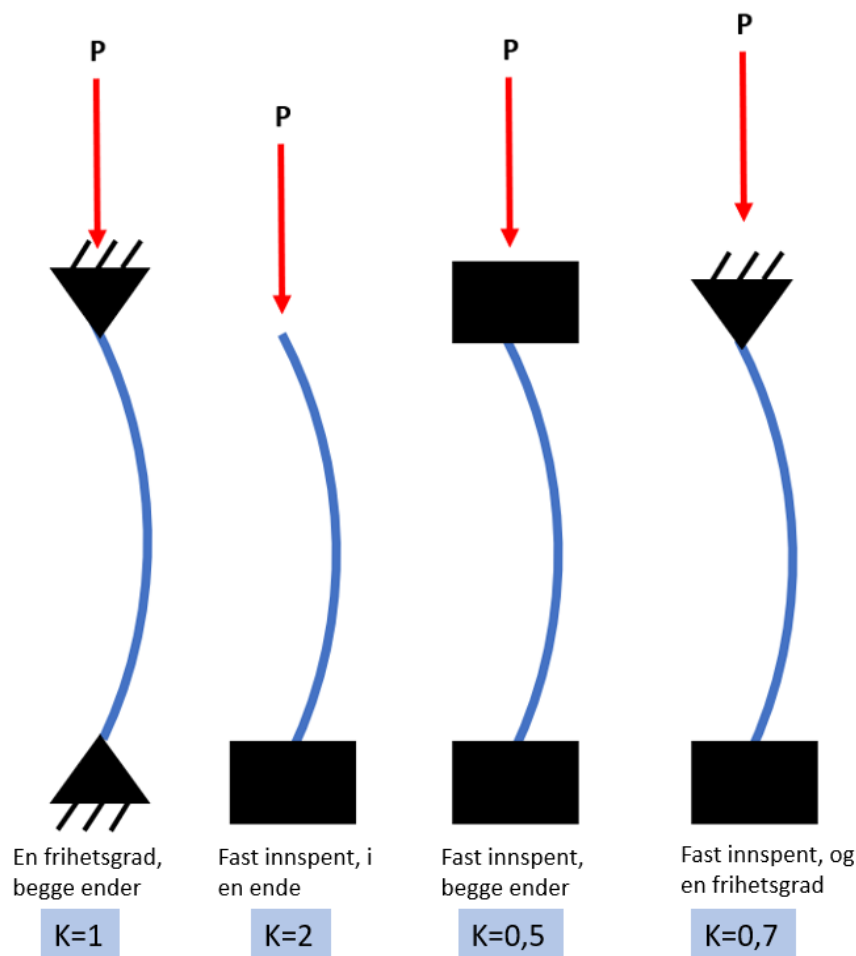
3.4.1 Knekking

Det fremkommer av Figur 12 at platen markert i rødt har en signifikant frittstående lengde. Derfor er det nødvendig å undersøke om det er fare for knekking. Det som er viktig å vite i forbindelse med knekking er lasten som trengs før knekking oppstår.

For knekking gjelder Eulers formel [27]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{(KL)^2} \quad (3)$$

Hvor E er materialets elastisitetsmodul, I er det minste arealtreghetsmoment til tverrsnittet, K er den effektive-lengdefaktoren, og L er den frittstående lengden til objektet. K blir bestemt ut fra opplagringen til endene av objektet, da opplagringen spiller inn på stabiliteten til lengden (Figur 15). P_{cr} er da den kritiske lasten der knekking kan oppstå. Dersom P_{cr} er større enn påsatt last, P , vil det altså ikke oppstå knekking.



Figur 15: Effektiv-lengdefaktor

3.4.2 Bolter

For å være sikre på at boltene som blir brukt tåler kreftene de blir utsatt for og at gruppen klarer å stramme dem for hånd, må det gjøres styrkeberegninger. Alle formler tilknyttet boltkapasitet er hentet fra [28].

På grunn av at bolter er elastiske i lengderetning, er det nødvendig å forspenne dem. Det vil si at boltene strammer litt hardere enn lasten de skal holde. På denne måten unngås slakk i forbindelsen mellom objektene som boltes sammen, og oppnår ønsket klemkraft.

Den nødvendige forspenningskraften til bolten kan beskrives ved

$$F_i = kF_1 \quad (4)$$

der k er faktor for forspenning og F_1 er lasten bolten blir påsatt i lengderetning. k settes lik 1,5 for statisk belastede bolter, noe som er tilfelle for gruppens design.

Den maksimale belastningen i lengderetning blir allikevel ikke lik summen av forspenningskraften og kreftene som bolten blir belastet med:

$$F_a \approx 1,8F_1 \quad (5)$$

Strekkspenningen i bolten blir da:

$$\sigma_{bolt} = \frac{F_a}{A_s} \quad (6)$$

der A_s er spenningsarealet til bolten og kan finnes i tabell eller beregnes ved

$$A_s = \frac{\pi}{4} \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 \quad (7)$$

Tiltrekkingsmomentet for å overvinne friksjon i gjengene blir

$$M_v = F_i r_m \tan(\epsilon_1 + \varphi) \quad (8)$$

hvor r_m er gjengens middeleradius

Og ϵ_1 og φ henholdsvis er friksjonsvinkelen og gjengens stigningsvinkel:

$$\tan \epsilon_1 = \frac{\mu}{\cos \alpha} \quad (9)$$

$$\tan \varphi = \frac{p}{\pi d_2}$$

Der α er gjengevinkelen, 30° for metriske gjenger. Det er viktig å notere seg at beregningene ikke vil være helt korrekte på bakgrunn av at man ikke kan være sikker på friksjonskoeffisienten. Denne må altså antas ut fra tabeller.

Momentet for å overvinne friksjonen mellom bolthodet og overflaten det hviler mot er

$$M_S = \mu' F_i r'_m \quad (10)$$

hvor

$$r'_m = \frac{s + d_h}{2} \quad (11)$$

der d_h er bolthulldiameteren.

Det totale tiltrekkingsmomentet blir da

$$M = M_v + M_S \quad (12)$$

Det er viktig å vite hvor stort det totale tiltrekkingsmomentet blir, for å sikre på at det er mulig å stramme boltene til ønsket normalkraft på testoppsettet oppnås.

Og torsjonsspenningen i boltene blir

$$\tau_T = \frac{M_v}{W_p} \quad (13)$$

Jevnføringspenningen i boltene blir da

$$\sigma_{jfr} = \sqrt{\sigma_n^2 + 3\tau_T^2} \quad (14)$$

Den tillatte spenningen settes lik

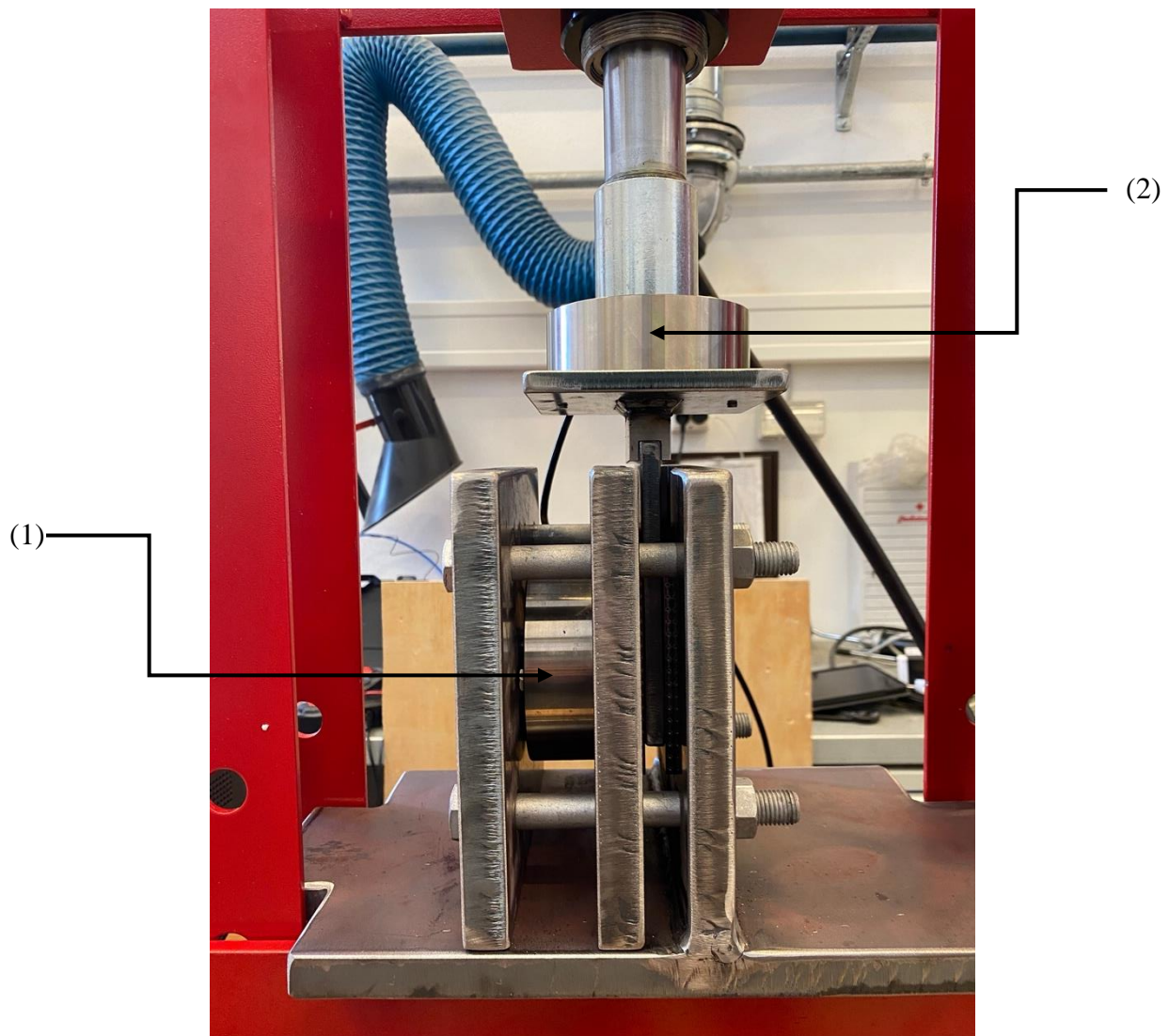
$$\sigma_{tillatt} = \frac{R_e}{\gamma_m} \quad (15)$$

Der γ_m er sikkerhetsfaktor

Så lenge den tillatte spenningen er større enn jevnføringspenningen vil boltene kunne brukes.

3.4.3 Lastceller

Da lastcellene ble levert, brukte gruppen god tid på å bli kjent med lastcellene for å bli komfortable med dem opp mot testing (Figur 16). Beregninger til lastceller kan finnes vedlegg D.3. Programvaren og maskinvare til logging av lastcelldata som ble brukt var LabVIEW [29]. Etersom gruppen ikke hadde erfaring med bruk av hverken lastceller eller LabVIEW fra før ble dette en utfordring med mye å lære. LabVIEW tilbyr eksempelprogrammer som kan lastes ned på sine nettsider, og det var et av disse programmene som ble modifisert til gruppens bruk. Videre ble lastcellene koblet til ADC (Analog to Digital Converter, norsk: analog-digital omformer) som igjen var koblet til en bærbar PC som kjørte LabVIEW. Til forsyningspenning til lastcellene ble det brukt to spenningsforsyninger på 10 V. Med maksimal last på lastcellene ble da forventet avlest måling fra lastcellene 20 mV.



Figur 16: Testoppsett som består av to pancake lastceller, en for normalkraft (1) og den andre for skyvekraft (2).

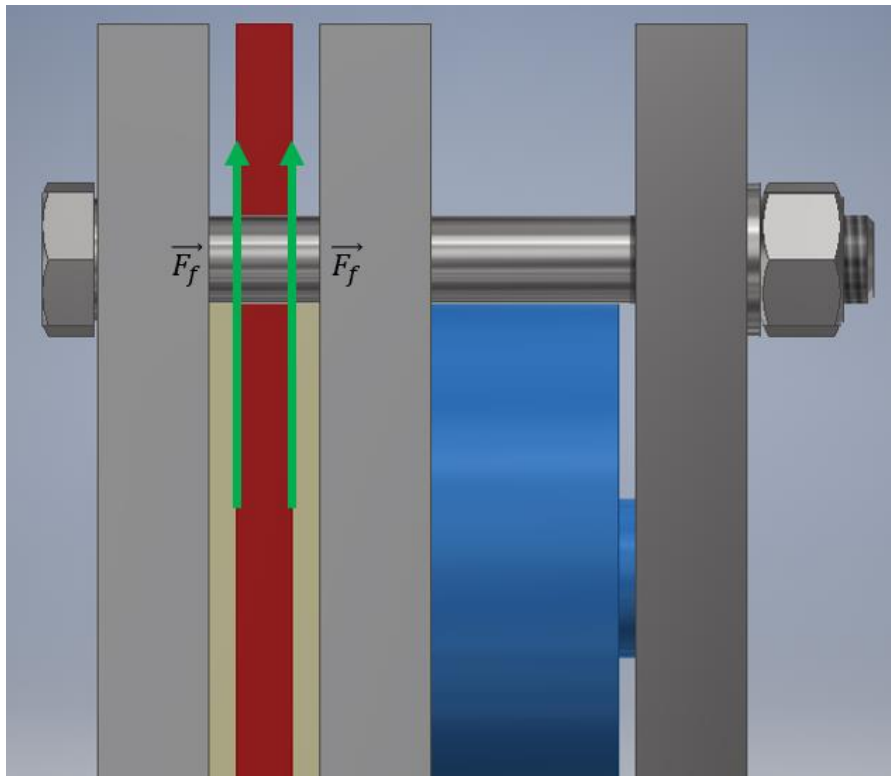
Lastcellene ble testet ut, og med litt testing klarte gruppen å lese av data. På grunn av feilmarginen til lastcellene måtte de kalibreres. Dette ble gjort ved å bruke fire 25 kg vekter som ble lagt på lastcellene. Ut fra målt verdi kunne gruppen trekke fra eller legge til en korleksjon i programvaren.

3.4.4 Friksjonskoeffisient og standardavvik

Kontaktområdet mellom platene er rektangulært, og begge sider har kontakt med hverandre. På grunn av designets utforming i Figur 17 vil det være «dobbel» friksjon. Dersom man ser på formel (1) blir formelen for friksjonskoeffisient i dette tilfelle (16):

$$\mu = \frac{F_f}{2N} \quad (16)$$

hvor F_f er den høyeste friksjonskraften som registreres, fordi etterspørselen er basert på den statiske friksjonskoeffisienten.



Figur 17: Friksjonskreftene i gruppens design. Design sett fra siden.

For å få et mål på spredningen til resultatene vil gruppen også regne ut standardavviket. Standardavvik er verdienes gjennomsnittlige avstand fra gjennomsnittet og blir regnet ut ved:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (17)$$

Hvor n er antall verdier i settet og \bar{x} er gjennomsnittsverdien i settet.

Ved å bruke (16) og (17) i kombinasjon er det mulig å plote grafene med feilmargin og se om noen av variablene i forsøket påvirker resultatene.

Det er også tatt med flatetrykket i resultatene. Se vedlegg D.5 for beregninger.

3.5 Utstyrliste

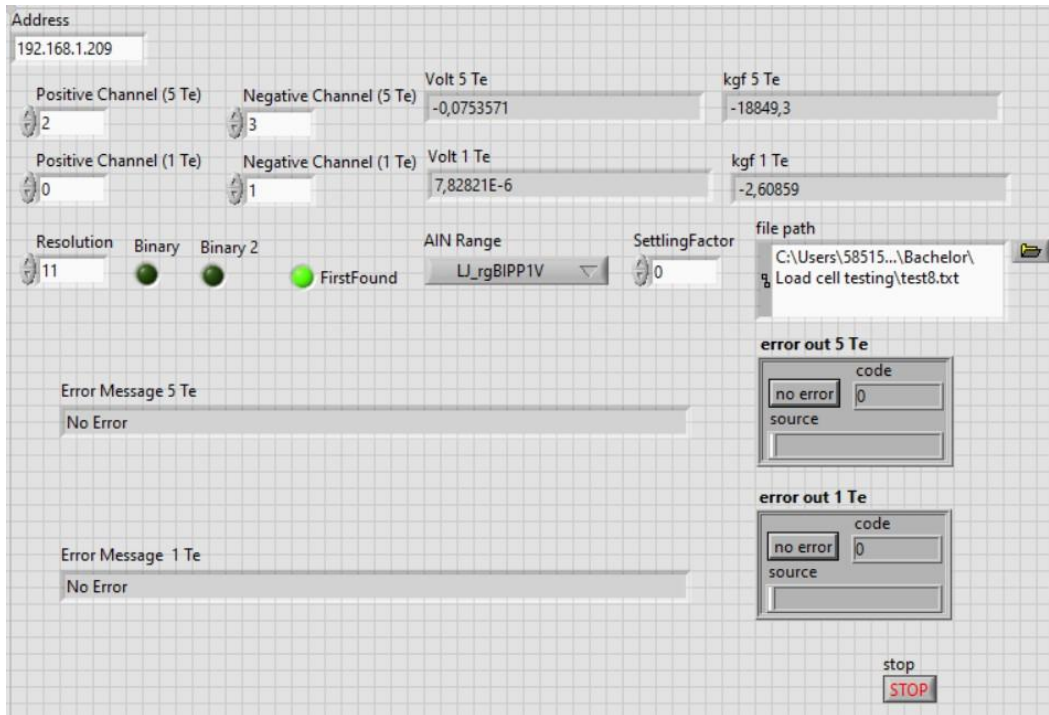
For å ha troverdige resultater er det viktig med riktig utstyr. Utstyret som ble brukt i eksperimentet var:

Utstyr	Modell	Produsent	S/N	Beskrivelse
Analog-digital omformer	U6-Pro	LabJack	360016725	ADC (Analog-to-digital converter)
Hardhetstester	TYP 300	GNEHM Swissmax	5/14	
Kaldavfetting	Art.nr. 36-10	Biltema		
Laboratorium PC	HP 250 G7 Notebook	Hewlett-Packard	00328-10000- 00001-AA900	Intel Pentium Silver N5000 8GB RAM
LabVIEW	2017 (32-bit)	National Instruments	N/A	Grafisk Programmerings- program
Lastcelle 1 tonn	DYLF-102	Walfront	2201667	Pancake Type
Lastcelle 5 tonn	DYLF-102	Walfront	2201843	Pancake Type
MATLAB	2021a	MathWorks	N/A	Databehandlingsprogra m
Mikroskop	Optishot	Nikon	Okular: 512356 Hus: 273854	10x, 40x, 60x forstørring
Mikroskop	80-serie	Swift	8625464	Steromikroskop
Mikroskopkamera	TC 20 PLUS	VWR Visicam	V2000049	Med wifi- og Bluetooth tilkobling
Momentmåler	Art.nr. 10- 258	Biltema	2000056	Momentadapter
Multimeter	Art.nr. 15- 133	Biltema	170221887	Digitalt
Ruhetsmåler	SJ-210	Mitutoyo	612221907	
Strømforsyning	Type 719	Mascot Electronic	N/A	2A/30V
Strømforsyning	GPR-3030	Good Will Instruments	M0690645	3A/30V
Terminal Board	CB37	LabJack	N/A	Brett med flere inputs
Verkstedpresse	TY10003	Jula/Hamron	2250117 2021 0052	10 tonn med manometer

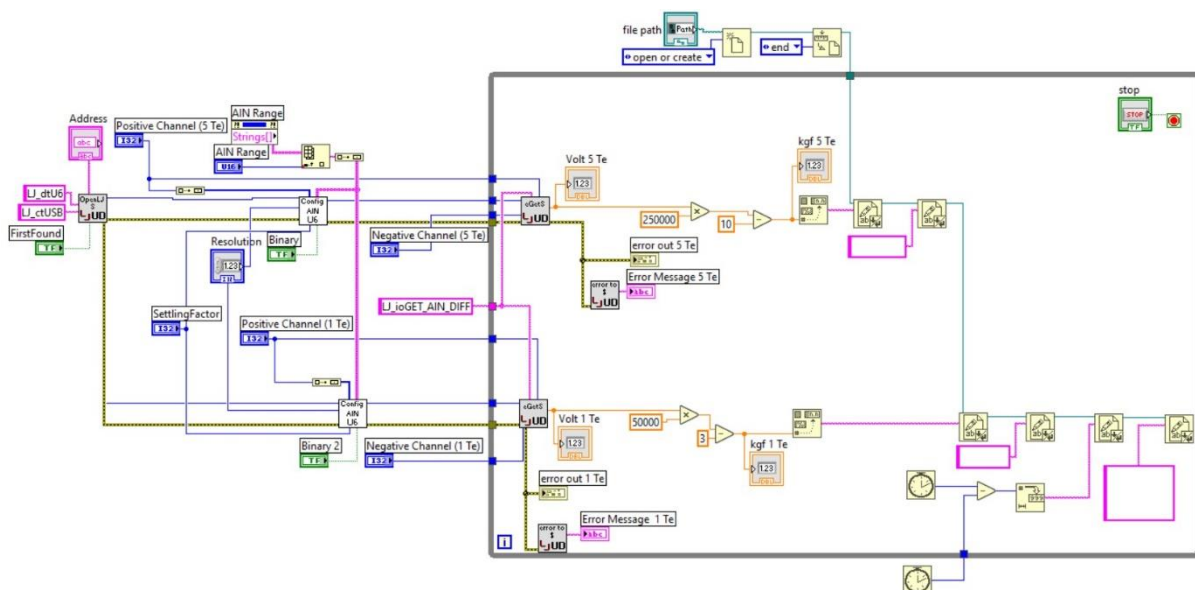
Tabell 1: Utstyr til eksperiment

3.6 LabVIEW

Før eksperimentet kunne begynne, var det viktig å ha et godt kjennskap til utstyret og eventuell programvare. HVL har lisens på programvaren LabVIEW som gruppen benyttet seg av. LabVIEW tilbyr eksempelprogram på sine nettsider som gruppen lastet ned og prøvde ut [30]. Dette gjorde at gruppen ble fort kjent med programvaren og kunne raskt lage eget program (Figur 18 og Figur 19).

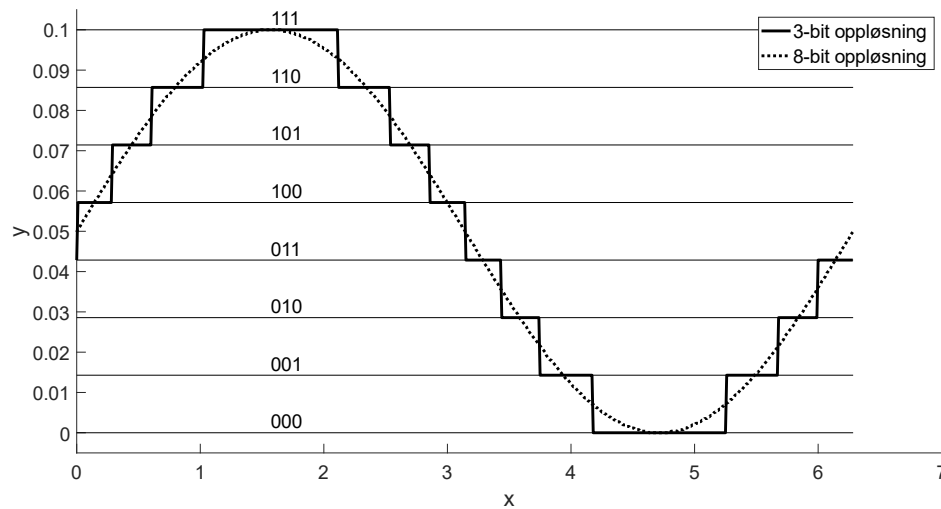


Figur 18: LabVIEW dataloggingsprogram, front end



Figur 19: LabVIEW dataloggingsprogram, back end

Programmet tar inn to par av negative og positive kanaler gjennom LabJack analog-digital omformeren og dens terminalbrett (Tabell 1). Hvert par av kanaler er koblet til sin egen lastcelle. «Resolution Index» angir oppløsning på resultatene, altså hvor mange steg over valgt område resultatene blir logget med (se Figur 20).



Figur 20: 3-bit oppløsning vs. 8-bit oppløsning

Flere bits gir et mer nøyaktig resultat, men det tar lengre tid å logge. Det er derfor viktig å finne en god middelvei mellom nøyaktighet og samplingrate. «AIN Range» angir området spenningen skal måles, og er satt til 0,1 V (maksimal spenning ut er 0,02 V). «Settling Factor» er en faktor som angir en forsinkelse mellom målingene for å unngå feilkilder på grunn av strømforsyningen og motstandene i input-kanalene. Gruppen har «Settling factor» satt til 0, og LabVIEW finner da automatisk forsinkelsen det må være for å unngå disse feilkildene. Mer om de ulike parameterne kan leses om i databladet til LabJack U6 [31].

Programmet finner spenningsforskjellen mellom de positive og negative kanalene og multipliserer med en faktor for å få kraft i kg. Denne kraften, i kg, blir så limt inn i et .txt dokument etterfulgt av tidspunktet målingen ble tatt. Når eksperimentet er ferdig, trykkes det på stoppknappen og programmet stoppes. Resultatene blir da radvis, hvor den første og andre kolonnen er kreftene til henholdsvis 5 tonn og 1 tonn lastcellen og den tredje kolonnen er tiden fra måling startet. Et eksempel på rådata i .txt format er vist i Tabell 2:

1963,351941	26,090960	32
1942,786713	38,090731	166
1932,405553	58,758201	304
1967,013525	59,347010	442
1992,740078	53,321565	578
2024,111444	30,972661	716
2025,611185	17,313629	854
1989,746756	34,216658	991

1953,719112	53,365294	1127
1935,595965	59,800320	1265
1940,067471	54,848405	1401
1947,205865	58,075157	1543
2005,868195	35,641258	1679
1991,107917	18,631061	1815
1972,818475	23,114884	1958
1964,509852	24,924427	2098
1947,381400	32,763111	2239
1936,793910	41,270673	2380
1932,728905	49,557124	2522
1958,313799	54,663632	2662
2009,979393	33,444307	2800
2029,599201	17,126393	2936
1987,270799	27,362814	3072
1936,935569	53,782265	3208
1952,216292	56,726314	3344
2010,388974	32,718766	3480
2029,054120	17,021072	3616
1990,630587	29,037473	3752
1938,573889	53,144183	3888
1952,016121	66,123866	4024
2011,072633	177,334390	4160
2028,903222	211,972541	4296
1985,826490	200,615780	4432
1936,849342	224,662747	4568
1945,376613	230,420272	4705
1996,731173	207,030481	4841

2028,890904	188,394898	4977
2012,070407	268,034500	5113
1958,353833	522,496407	5251
1932,987587	796,076771	5387
1977,209912	930,171423	5523
2023,141386	872,786490	5659
2009,388120	868,160392	5795
1951,083018	890,723016	5931
1929,704788	905,557819	6067
1967,845003	895,489542	6204
2021,444555	873,813828	6340
2012,051930	895,935460	6476
1951,631177	1079,612085	6612
1928,688537	1229,066912	6748
1977,477833	1311,936961	6884
2017,225572	1394,440544	7020

Tabell 2: Eksempel rådata

Etter logging er ferdig, lastes .txt filene opp i OneDrive, og importert i MATLAB. Gruppen har skrevet et MATLAB script som regner ut friksjonskoeffisientene, standardavvik og plotter grafene. (Vedlegg E.2)

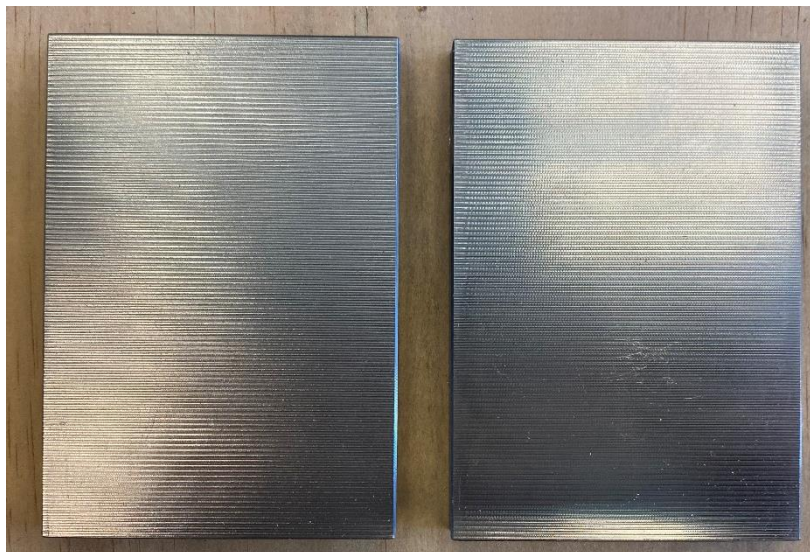
3.7 Testmaterialer

Etter å ha sjekket at selve testoppsettet passet i verkstedpressen som tenkt, sjekket gruppen materialene som ble levert og som skulle testes. Materialene som ble levert var:

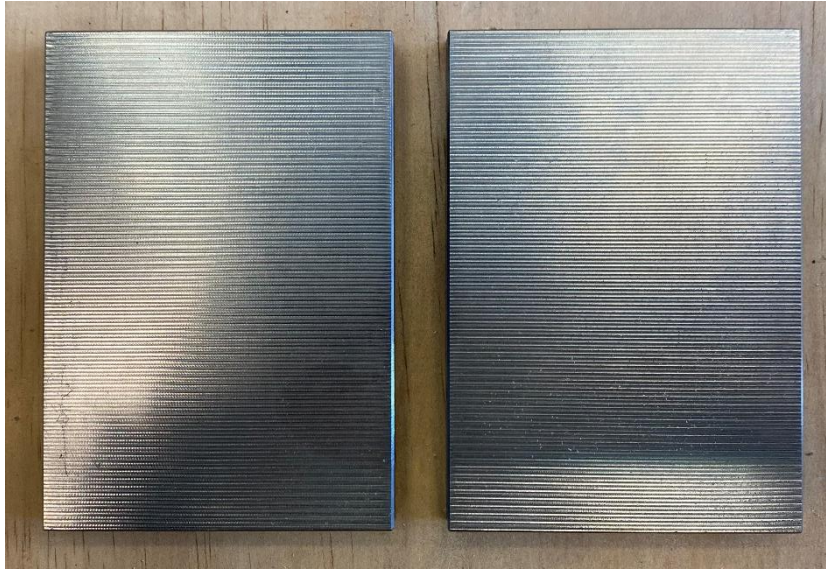
Materiale	Overflate (Ra [μm])	Antall
S355 Stål	1,6	2
S355 Stål	3,2	2
S355 Stål	6,3	2
S355 Stål	12,3	2
S355 Stål	Ubehandlet	2
POM-C	Ubehandlet	1

Tabell 3: Levert testmaterialer

Der POM-C og den ubehandlede stålplaten er platene i bevegelse. Platene med oppgitt ruhet har blitt planfrest for å oppnå ønsket ruhetsverdi. Figur 21 til Figur 26 viser hvordan testmaterialene så ut ved mottak.



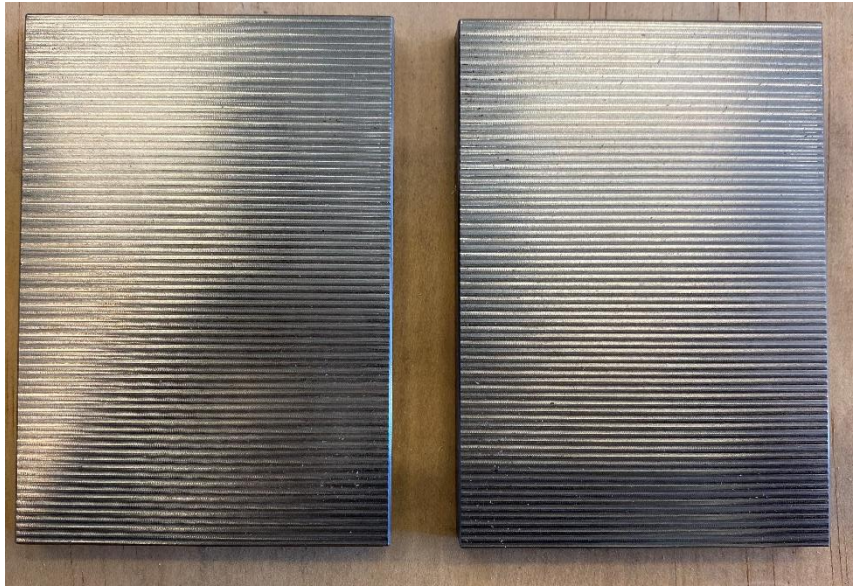
Figur 21: Testplate, Ra = 1,6 μm



Figur 22: Testplate, Ra = 3,2 μm



Figur 23: Testplate, Ra = 6,3 μm



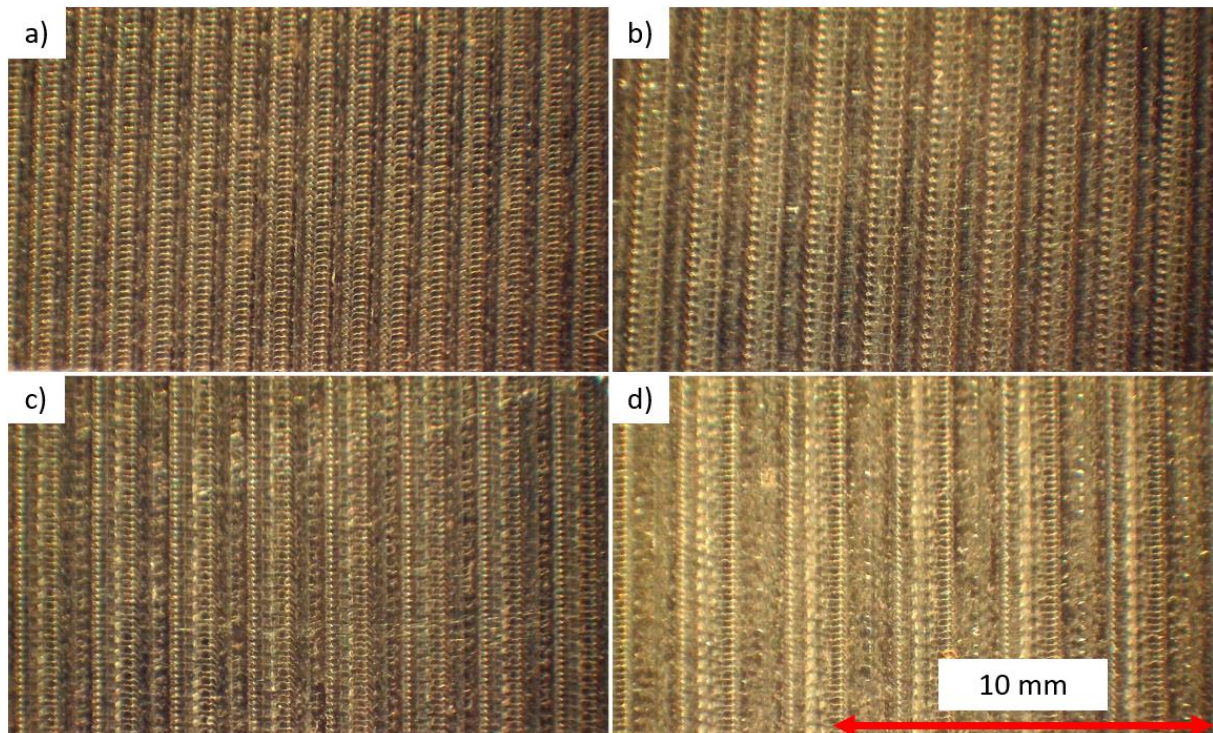
Figur 24: Testplate, Ra 12,3 μm



Figur 25: Testplate, ubehandlet stål



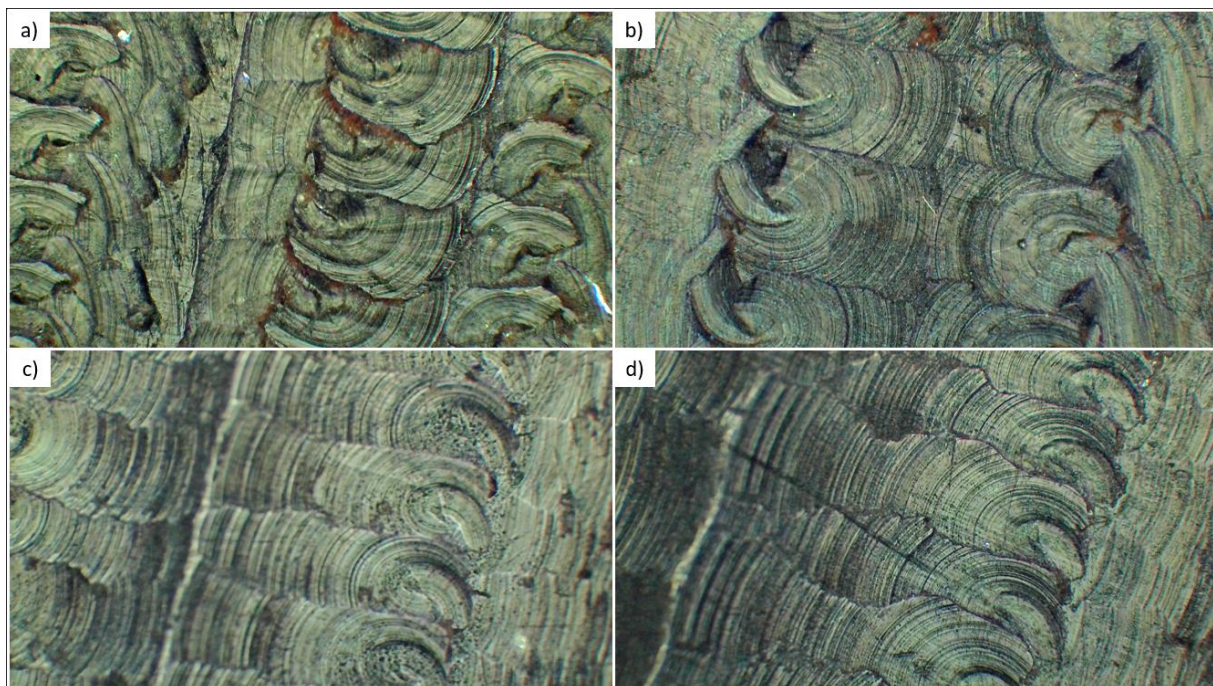
Figur 26: Testplate, POM-C



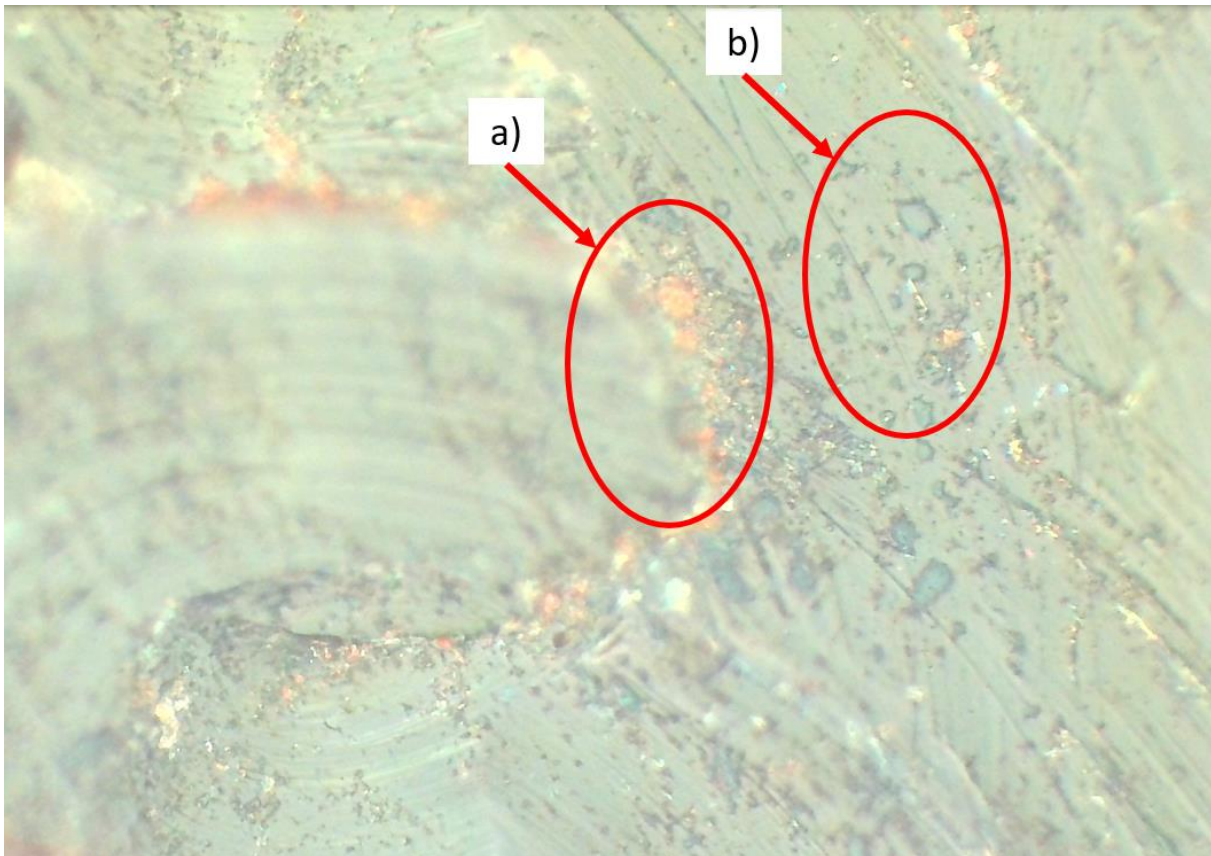
Figur 27: Testoverflater gjennom mikroskop før testing, stereomikroskop.
a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm

For å kunne dokumentere en eventuell endring i overflaten tok gruppen bilde av overflatene også gjennom mikroskop med HVL sin mikroskopkamera (se Tabell 1). Figur 27 viser overflatene gjennom stereomikroskop.

Gjennom 10x forstørring la gruppen merke til de rødbrune flekkene på overflatene (Figur 28). Dette kunne være interessant å se nærmere på, derfor ble det tatt bilde også gjennom 40x forstørring (Figur 29).



Figur 28: Testoverflater gjennom mikroskop, 10x forstørring, før testing.
a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm

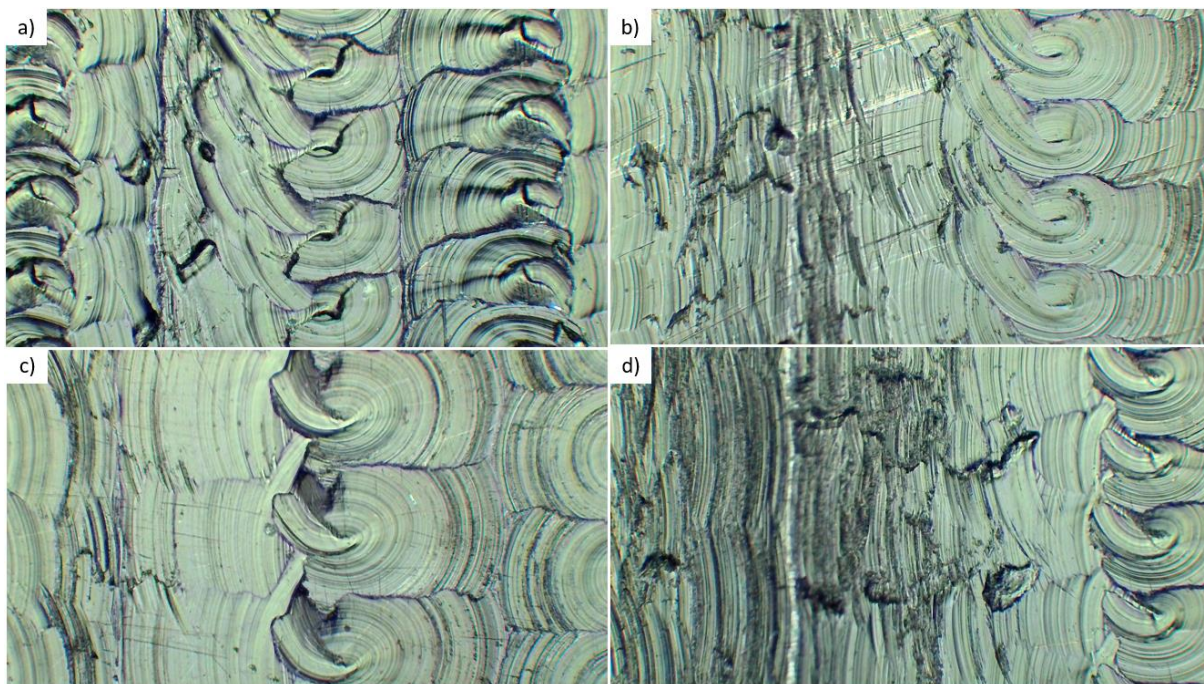


Figur 29: Testoverflater før testing, 40x forstørring.

a) Rødbrun flekk som gruppen antar er rust, b) Små «pytter» som gruppen antar er rester etter maskineringsprosess

I tillegg til det som så ut som rust, la gruppen også merke til det som så ut som små pytter på overflaten til testmaterialene. Gruppen antok da at dette kunne være rester etter maskineringsprosessen. Det vil si olje- og kjølevæskerester. Gruppen antok at dette kunne virke som smøremiddel og bidra til en lavere friksjonskoeffisient. Selv om det opprinnelige målet var å først teste tørt og rent stål, fant gruppen ut at det kunne være lurt å teste materialene rett fra produsenten, slik at en eventuell effekt av slike rester kunne dokumenteres. Disse «pyttene» kunne også sees overalt på overflaten.

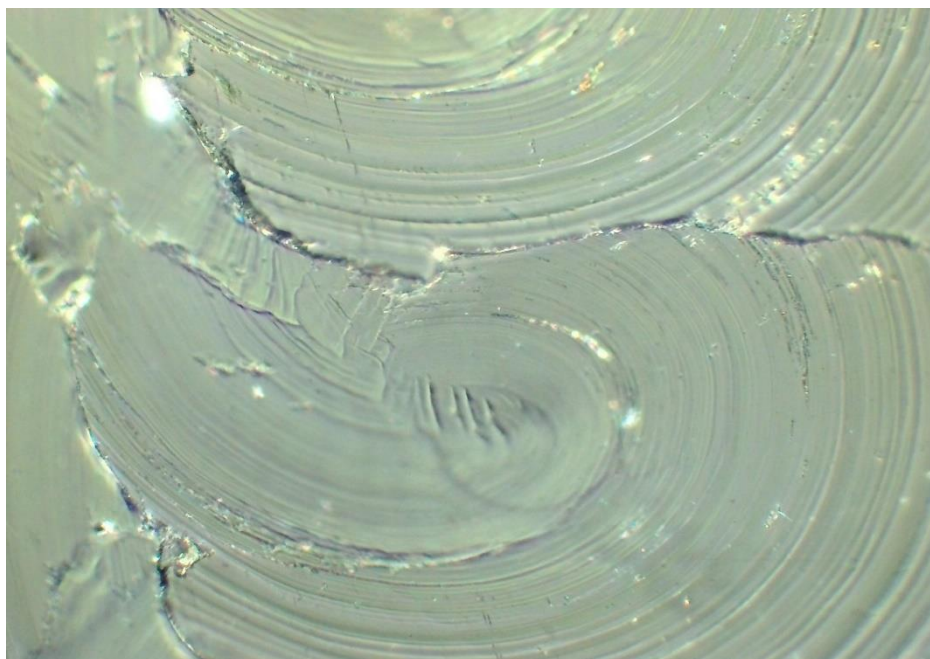
Platene ble deretter behandlet med avfetting. Dette skjedde i tråd med bruksanvisningen på avfettingsbeholderen. Etter at testmaterialene ble lagt under mikroskop, så gruppen en merkbar forskjell på overflaten (Figur 30).



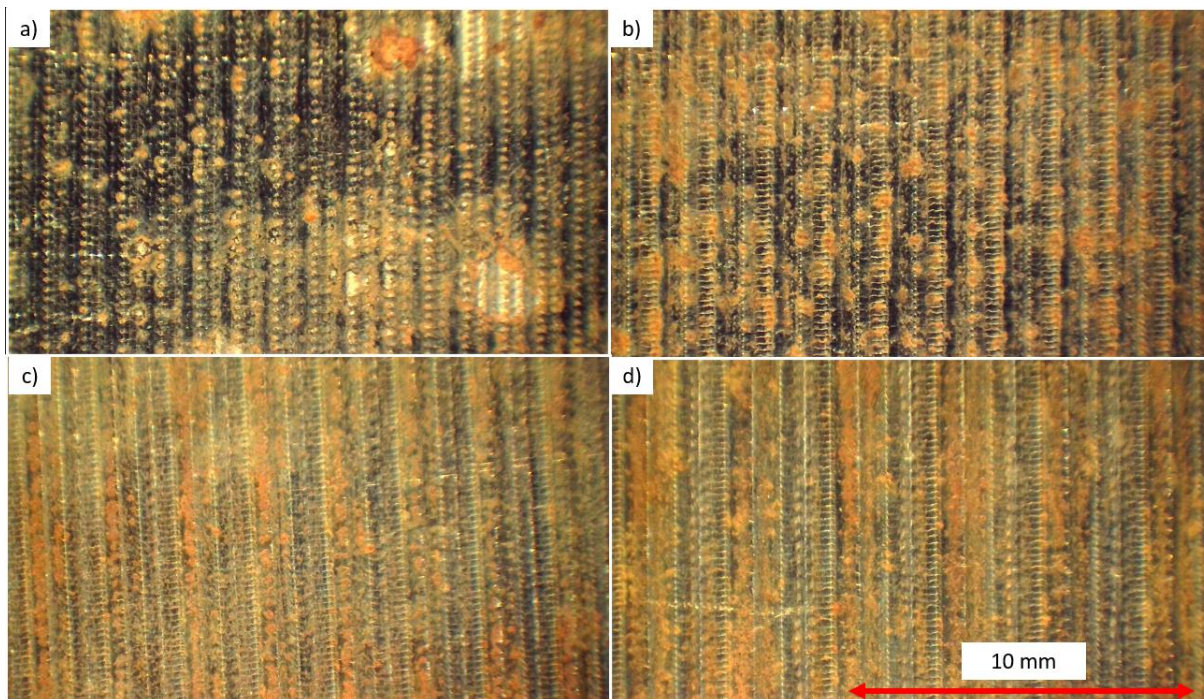
Figur 30: Testoverflater etter avfetting og tørr testing, 10x forstørring.
a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm

På overflatene var det begynt å danne seg riper. Det var ikke over hele overflaten, platene ble plassert under mikroskopet med hensikt å vise ripene. Det ble også kontrollert med ruhetsmålinger, men disse viste ingen avvik av betydning. Gruppen la også merke til hvor mye renere overflaten så ut. Hele overflaten var nå en mer «glinsete» blågrønn farge.

For å se om «pyttene» som gruppen la merke til før avfetting var forsvunnet, tok gruppen også bilde under 40x forstørring (Figur 31). Man kan tydelig se at overflaten er mye renere, det var nå ingen av disse «pyttene» som gruppen la merke til. Når man dro fingrene over overflaten kunne man også kjenne at fingrene hang igjen mer enn før avfettingen.

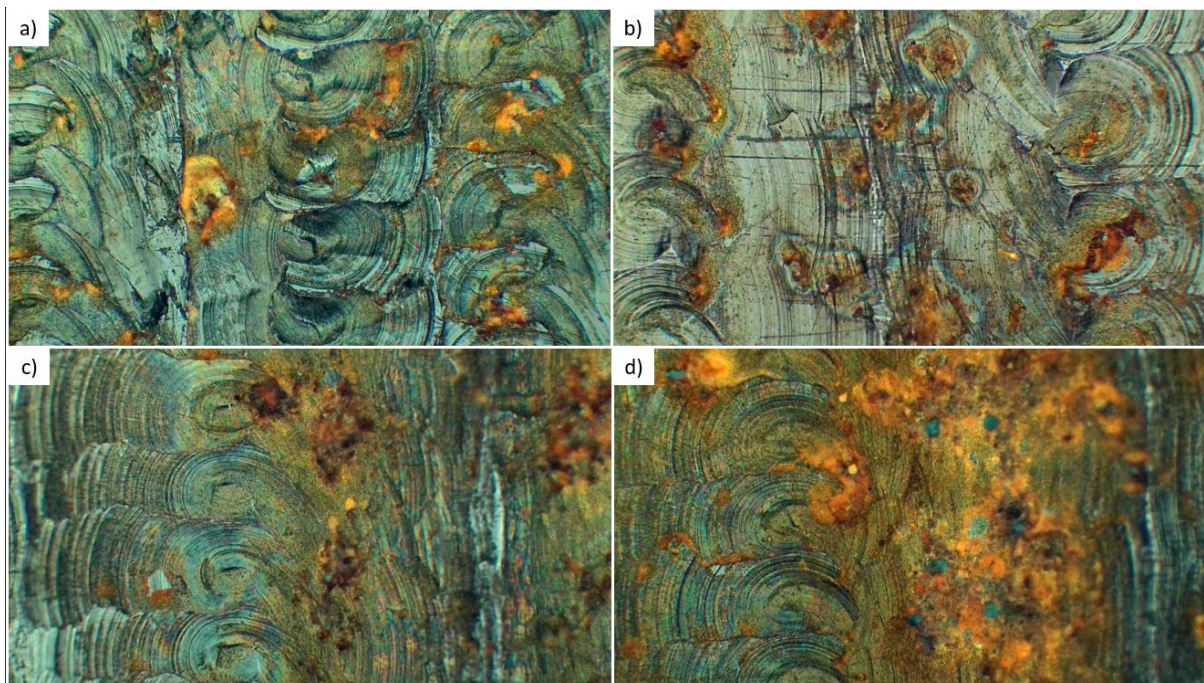


Figur 31: Testmateriale etter avfetting, 40x forstørring



Figur 32: Testmaterialer etter våt test, stereomikroskop
a) $Ra = 1,6 \mu\text{m}$ b) $Ra = 3,2 \mu\text{m}$ c) $Ra = 6,3 \mu\text{m}$ d) $Ra = 12,3 \mu\text{m}$

Etter testing under vann var testmaterialene allerede begynt å ruste (Figur 32 og Figur 33). I tillegg til rust er det også synlig at overflaten på testmaterialene har begynt å få en del riper. Ruheten ble også testet på ny, men den var tilnærmet uendret.



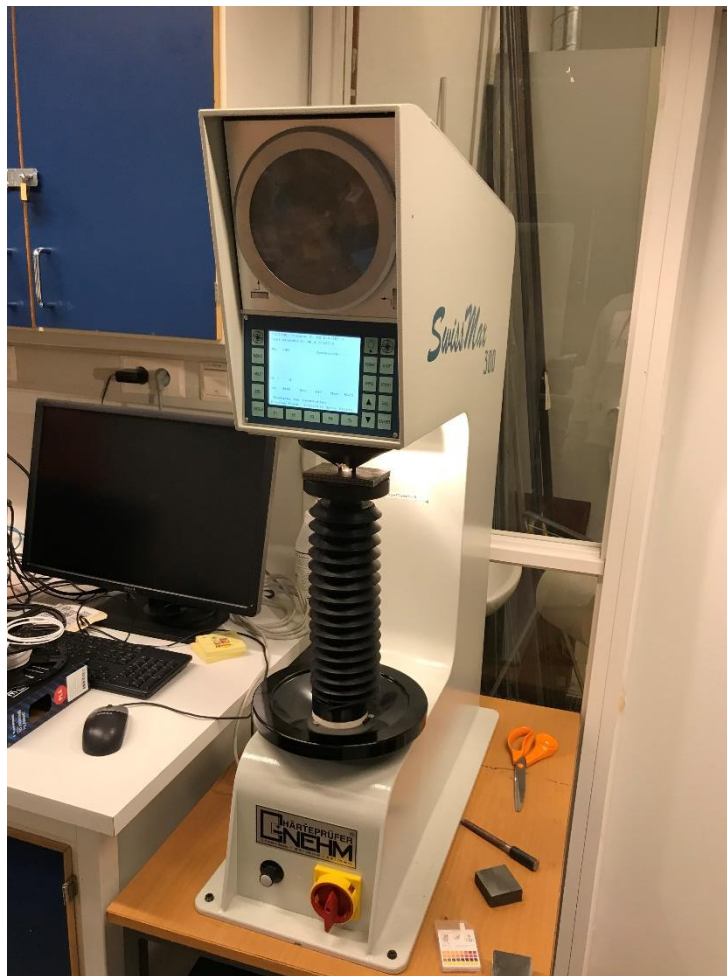
Figur 33: Testmaterialer etter våt test, 10x forstørring
a) $Ra = 1,6 \mu\text{m}$ b) $Ra = 3,2 \mu\text{m}$ c) $Ra = 6,3 \mu\text{m}$ d) $Ra = 12,3 \mu\text{m}$

3.8 Hardhet

For å få dokumentert mest mulig om materialegenskapene målte gruppen hardheten til stålet også, da denne kan variere. Dette ble gjort etter at forsøkene var ferdig, da en hardhetstest deformerer overflaten til materialet. Gruppen brukte HVL sin GNEHM Swissmax TYP 300 (Tabell 1, Figur 34) som testet med Brinell hardhet (18).

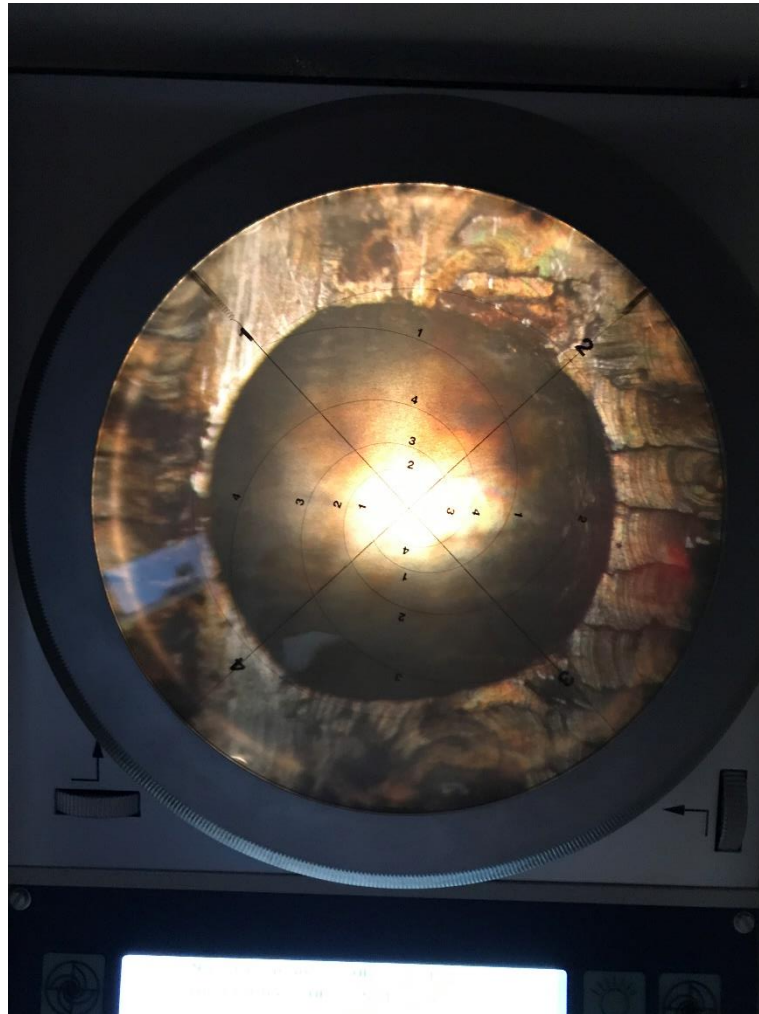
$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (18)$$

Hvor D er diameteren til kula som lager fordypningen og d er diameteren til fordypningen som blir dannet.



Figur 34: Hardhetstester GNEHM Swissmax TYP 300

Hardhetstesteren har et stereomikroskop som forstørrer bilde av fordypningen som blir dannet (Figur 35), og operatøren markerer punkter ut fra manualen til maskinen. Gruppen prøvde dette, men resultatene ble veldig feil, og måtte da bruke en annen metode.



Figur 35: Hardhetstesterens mikroskop

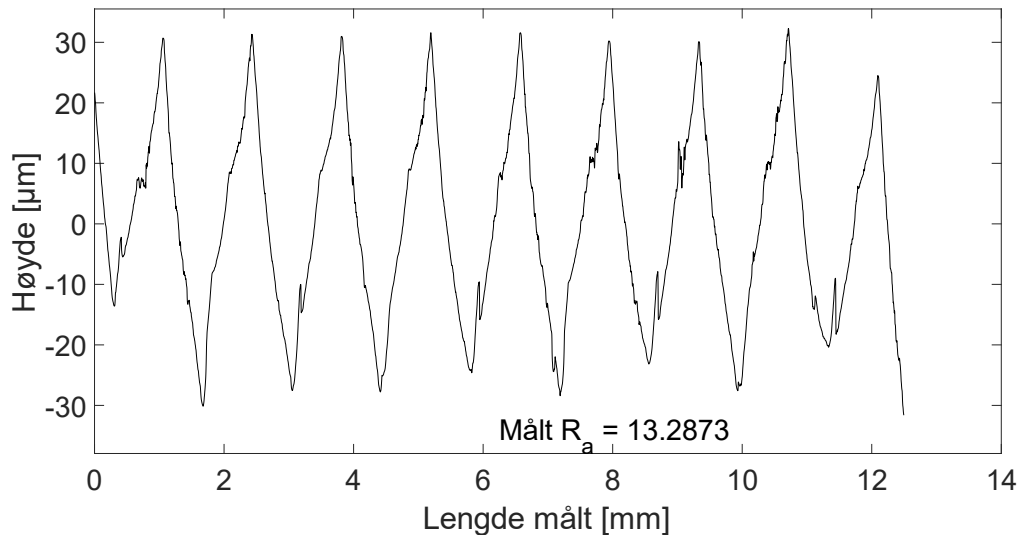
Først ble en stålplate til bruk for kalibrering målt. Denne hadde en hardhet på 194 ved HBW 2,5/187,5 hvor 2,5 angir kulens diameter og 187,5 angir påsatt kraft i kg. Etter at målingen ble tatt, målte gruppen diameteren av fordypningen gjennom skjermen på maskinen, $d_{mikroskop}$. På grunn av at denne platen hadde en kjent hardhet, kunne gruppen også regne seg frem til diameteren til fordypningen på platen, d . Gruppen kunne da regne ut forholdet mellom diameteren på bildet og på selve platen og bruke dette forholdet til å regne ut den faktiske diameteren på fordypningen på et materiale med ukjent hardhet (19).

$$\zeta = \frac{d_{mikroskop}}{d} \quad (19)$$

Ved å løse (19) for d og sette inn i (18), fant gruppen at hardheten til stålplatene var 169 N/mm². Dette gjaldt for alle stålplatene.

3.9 Ruhet

For å dokumentere en eventuell endring i ruheten på materialene brukte gruppen en Mitutoyo SJ-210 ruhetsmåler (Tabell 1). Gruppen tok tre målinger av hver kontaktoverflate for å få nøyaktige resultater. Etter hver måling ble ruhetsprofilen eksportert til PC for å lagre resultatene. Et eksempel på en ruhetsprofil ser slik ut (Figur 36):



Figur 36: Eksempel på ruhetsmåling

Dette var en plate som ble levert med ruhet $R_a = 12,3 \mu\text{m}$. Platene har altså blitt målt før gruppen mottok dem, og med tanke på at gruppen ikke har mye erfaring med ruhetstesting er det ruheten fra leverandør som gruppen anser som riktig. Hovedpoenget med å ta ruhetsmålinger var altså for å se om det var noen endring før og etter testing. På grunn av sin begrensede skarphet kan ikke pekepennspissen vise veldig fine detaljer og har en tendens til å forvrengte enkelte design. Som et resultat ser daler i overflaten ut til å være mindre og topper ser ut til å være større enn de egentlig er. I tillegg, fordi bare et lite område av overflaten kan måles nøyaktig, er profilometerresultater ikke absolutte verdier og bør kun brukes til sammenligningsformål.

Etter testing ble det tatt ruhetsmålinger på ny, disse viste ingen endring fra opprinnelige verdier (utenom målinger som gikk over skadde områder). Resultatene fra gruppens ruhetsmålinger var ellers:

Levert ruhet (Ra, μm)	Målt ruhet (Ra, μm)	λ_c , [mm]
1,6	2,5	2,5
1,6	3,2	2,5
3,2	4,0	2,5
3,2	5,2	2,5
6,3	4,3	2,5
6,3	4,5	2,5
12,3	13,3	2,5
12,3	12,6	2,5
Ubehandlet	1,7	0,8
Ubehandlet	1,8	0,8
POM-C	0,05	0,08
POM-C	0,07	0,08

Tabell 4: Resultater ruhetstesting

Hvor λ_c er “cut off length”. Stålplatene er planfrest med en periodisk gjentakende profil, og det er avstanden mellom disse toppene som avgjør λ_c . Bestemmelse av λ_c blir gjort etter ISO 4288-1996 [32].

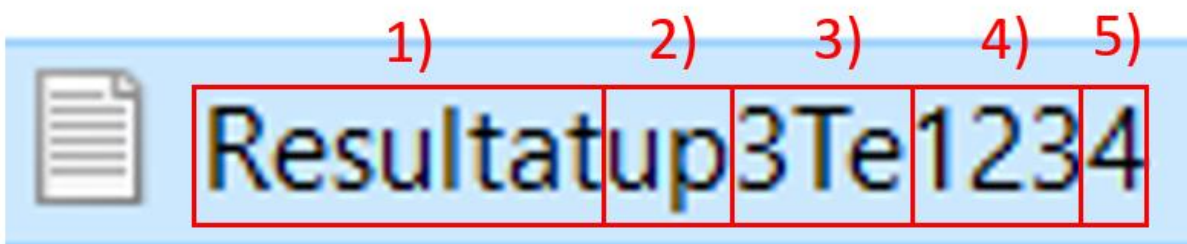
3.10 Testprosedyre

For å sikre at resultatene er mest mulig konstante lagde gruppen en testprosedyre i forhånd til testing.

1. Lastceller er koblet til strøm.
 - a. Spenning er korrekt.
 - b. Kontakt med alle ledninger.
2. Loggingsprogram logger til et tomt dokument med rett tittelformat.
3. Testmaterialer er riktig plassert.
4. Sjøvann dekker testflatene. (Dersom det utføres våt test)
5. Skruer strammes til likt moment.
6. Start logging av data.
7. Last kan settes på fra verkstedpresse.
8. Når det er observert bevegelse stanses logging.
9. Gå til punkt 6 og gjenta til 13 forsøk er utført.
10. Utfør ruhetsmåling og noter eventuell endring.

I tillegg førte gruppen loggbok på hva som ble gjort, hvilke tester som ble utført, hvor stort moment boltene ble strammet til med, og skrev ned eventuelle uventede ting som oppsto. Dette ble gjort for å ha god kontroll på forsøkene, og for å kunne gå tilbake i tid for å sammenligne med tidligere opplevelser.

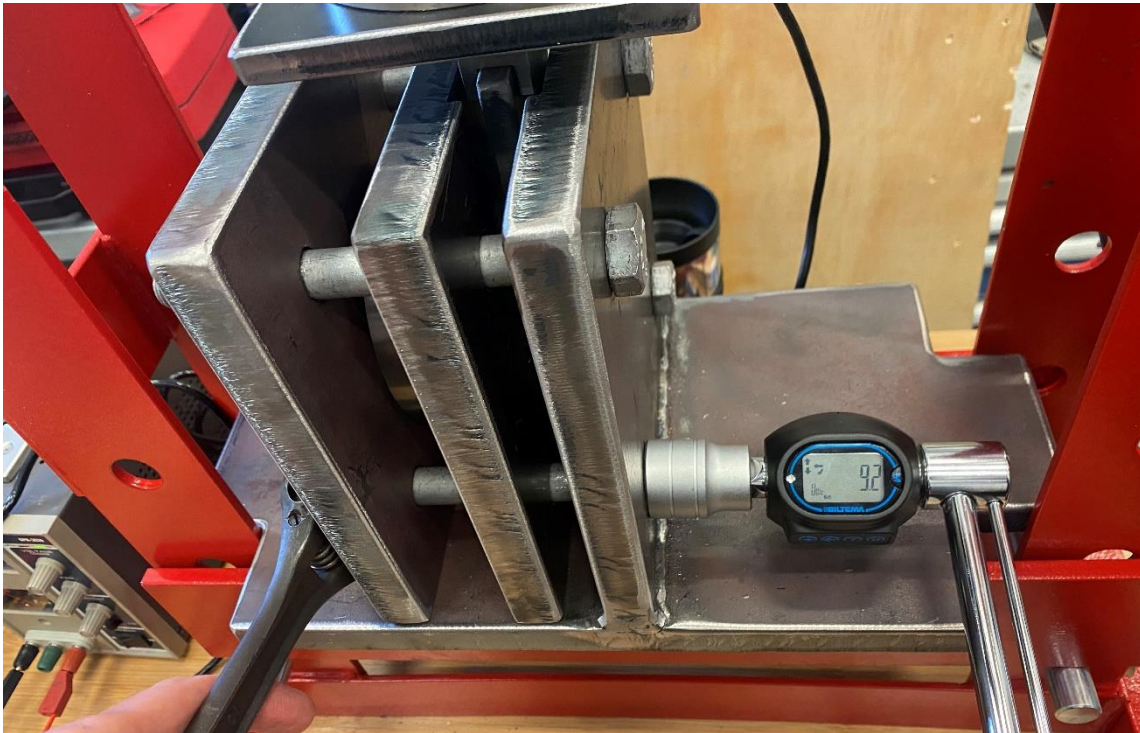
Organisering av resultatene er viktig når det utføres så mange forsøk. Alle forsøkene ble logget til samme mappe, da gruppen mente det gjorde det enklere med tanke på databehandling. For å skille de ulike typene forsøk ble tittelformatet viktig. Formatet som ble brukt er vist i Figur 37.



Figur 37: Tittelformat hvor 1) angir om det er resultat eller testfil, 2) angir overflatene som testes, 3) angir normalkraften som blir benyttet, og 5) angir forsøk-nummer.

4. Tiltrekkingsmoment

Gruppen noterte ned momentene som var nødvendig å påsette hver av boltene for å oppnå ønsket normalkraft.



Figur 38: Utførelse av stramming av bolt

Da dette ikke er hovedformålet med oppgaven er ikke dette verdier som har blitt nøye logget og målt, og verdiene som er vist er typiske. Avviket var relativt lite, maksimalt 10%. Resultatene er vist i Tabell 5.

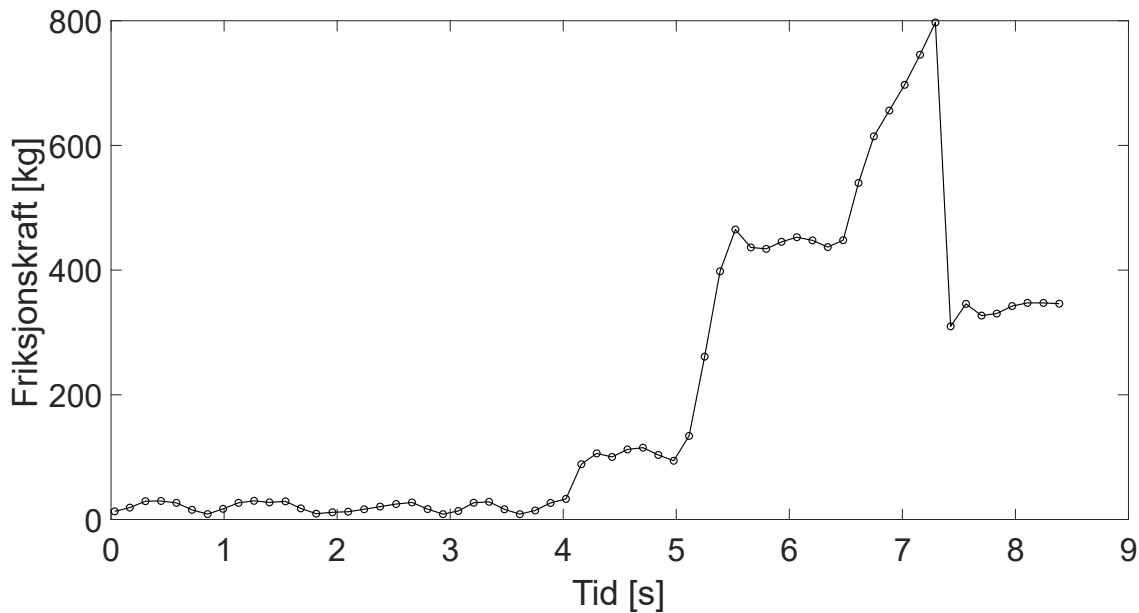
Normalkraft [Tonn]	Moment [Nm]
0,5	11
0,75	15
1	21
2	34
3	55

Tabell 5: Tiltrekkingsmomenter for resulterende normalkrefter

5. Resultat tørre tester

Kapittel 5 og 6 tar for seg målte resultater av friksjonstesting for kontaktmaterialer i form av grafer og tabeller. Friksjonskoeffisientene er kommet fram til og beregnet ved bruk av formel (16).

Hvert av datapunktene i grafene i delkapitlene er sammensatt av 13 målinger. Av disse målingene blir de 10 med minst avvik valgt ut. Dette har gruppen valgt å gjøre for å utelukke eventuelle feil. Et eksempel på en enkel måling ser slik ut (Figur 39):



Figur 39: Eksempel loggdata, graf

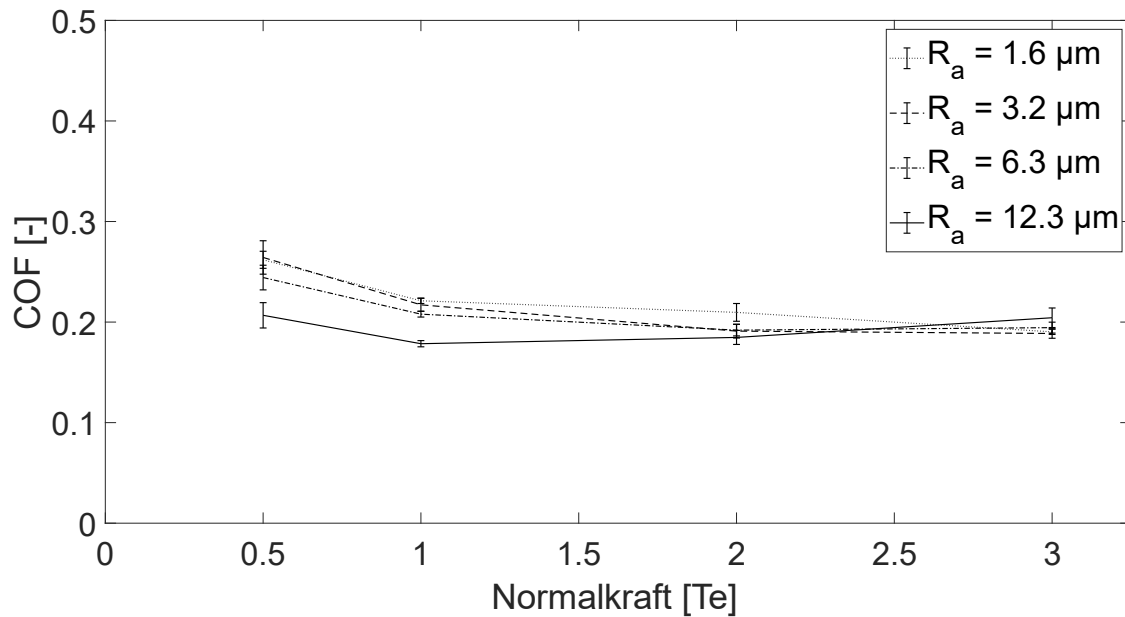
Totalt ble det logget 1 027 tester.

Den statiske friksjonskoeffisienten oppnås i et øyeblikk når et objekt begynner å bevege seg. På Figur 39 ser man tre topper. Den første og andre toppen er punkter der pumpen på verkstedpressen må tilbake til startposisjon. Den tredje toppen er den maksimale kraften før friksjonen går over til dynamisk. Fra rundt 7,3 sekunder ser man tydelig det dynamiske området.

For noen av resultatene er det bare vist 3 ulike ruheter. Dette er fordi platene med ruhet $R_a = 1,6 \mu\text{m}$ ble skadet, og kan leses mer om i 5.1.

5.1 Stål mot Stål

Figur 40 viser resultater fra testene for stål mot stål før avfetting. Da ble det testet fire ruheter og fire normalkrefter.



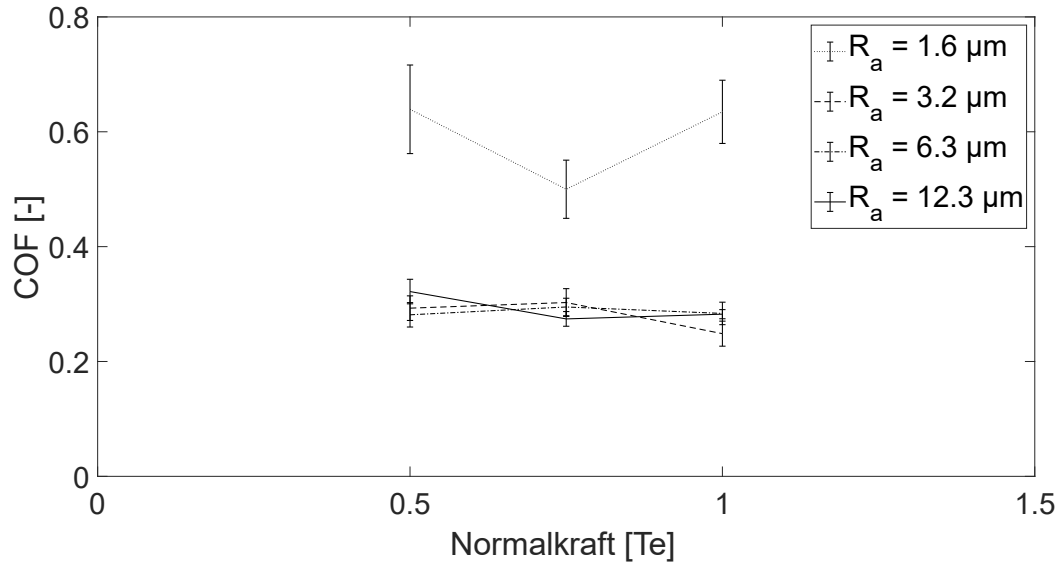
Figur 40: Stål mot stål før avfetting

Ut fra grafen er det lagt merke til at friksjonskoeffisienten avhenger av både normalkraften og overflatens natur. I dette forsøket ble overflatene testet rett fra produksjon. Det vil si at gruppen ikke vasket disse eller utførte noen form for rensing av overflaten før testen. Som beskrevet i 3.7 var det altså her det gruppen antar var rester fra maskineringsprosessen på overflaten.

Ruhet, Ra [μm]	Normalkraft [Tonn]	Flatetrykk [MPa]	Friksjonskoeffisient \pmStandardavvik
1,6	0,50	0,70	0,262 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,221 \pm 0,003
	2,00	2,80	0,210 \pm 0,009
	3,00	4,20	0,190 \pm 0,003
3,2	0,50	0,70	0,264 \pm 0,017
	1,00	1,40	0,217 \pm 0,006
	2,00	2,80	0,191 \pm 0,007
	3,00	4,20	0,189 \pm 0,005
6,3	0,50	0,70	0,244 \pm 0,012
	1,00	1,40	0,208 \pm 0,003
	2,00	2,80	0,192 \pm 0,006
	3,00	4,20	0,195 \pm 0,005
12,3	0,50	0,70	0,207 \pm 0,013
	1,00	1,40	0,179 \pm 0,003
	2,00	2,80	0,185 \pm 0,007
	3,00	4,20	0,204 \pm 0,010

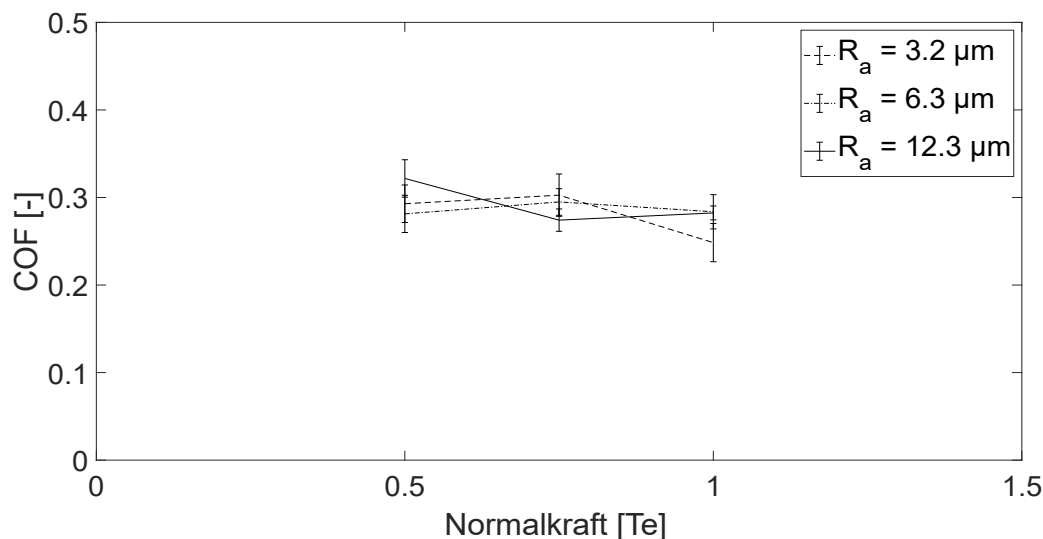
Tabell 6: Stål mot stål før avfetting

Resultatene fra Figur 40 indikerer at større normalkraft og større ruhet gir lavere friksjonskoeffisient. Smøring blir brukt for å redusere den totale friksjonskoeffisienten ved å skille overflatene med smøremiddellaget. Friksjonskoeffisienten endrer seg etter avfetting når ved sammenligning av Figur 40 og Figur 41.



Figur 41: Stål mot stål etter avfetting

Det aller første som skiller seg ut med Figur 41 er at dens ruhet $1,6 \mu\text{m}$ skiller seg fra andre ruheter. Under testingen av denne ruheten ble friksjonskreftene veldig store, og gruppen la merke til «smell» eller dunking som kom fra platene. Etter forsøket var det tydelig plastisk deformasjon på overflaten til platene. Gruppen bestemte seg derfor for å ikke bruke disse platene mer, da de andre platene også hadde blitt ødelagt som et resultat. Gruppen bestemte seg også for å ikke overstige 1 tonn normalkraft for resten av testen for stål mot stål, da det også her kunne begynne å høre samme type smell og dunking som på overflate $1,6 \mu\text{m}$. Som en følge av at ruhet $1,6 \mu\text{m}$ skiller seg såpass fra de andre ruhetene, er det å foretrekke at dette ikke tas i betraktning. De gyldige resultatene er vist i Figur 42.



Figur 42: Stål mot stål etter avfetting, justert

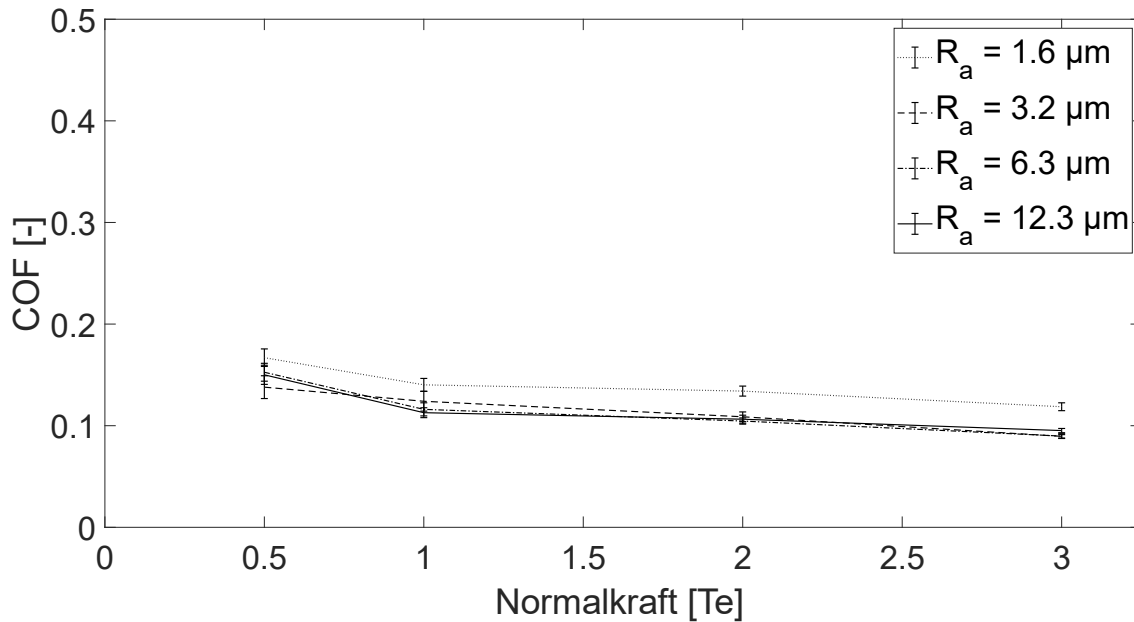
Imidlertid kan det sees ut fra Figur 42 at friksjonskoeffisientene går opp fra omtrent 0,2-0,27 til 0,25-0,32. Standardavviket gikk samtidig opp, noe som var uventet. En faktor som kan påvirke dette er mindre skader på kontaktoverflatene. Ettersom stålplatene har blitt brukt mange ganger, har det ført til at det oppstår synlige slitte plater. Ruheten er ellers uendret, men det har oppstått riper og «sår» på overflaten.

Ruhet, Ra [μm]	Normalkraft [Tonn]	Flatetrykk [MPa]	Friksjonskoeffisient \pm Standardavvik
1,6	0,50	0,70	0,639 \pm 0,077
	0,75	1,05	0,500 \pm 0,051
	1,00	1,40	0,635 \pm 0,055
3,2	0,50	0,70	0,293 \pm 0,021
	0,75	1,05	0,303 \pm 0,024
	1,00	1,40	0,249 \pm 0,022
6,3	0,50	0,70	0,281 \pm 0,021
	0,75	1,05	0,295 \pm 0,015
	1,00	1,40	0,284 \pm 0,020
12,3	0,50	0,70	0,322 \pm 0,021
	0,75	1,05	0,274 \pm 0,013
	1,00	1,40	0,282 \pm 0,008

Tabell 7: Stål mot stål etter avfetting

5.2 Stål mot POM-C

Funnene er konsistente og gir en sammenheng i forhold til hverandre. Grafene i Figur 43 er mer eller mindre lineære og beveger seg langs høyre ned mot x-aksen. Resultatene viser en lavere friksjonskoeffisient når ruheten til overflaten og normalkraften øker. De viser også at friksjonskoeffisienten er mellom 0,09 til 0,18. Sammenlignet med stål mot stål, følger disse resultatene samme trend, og er i tillegg mer konsistente.

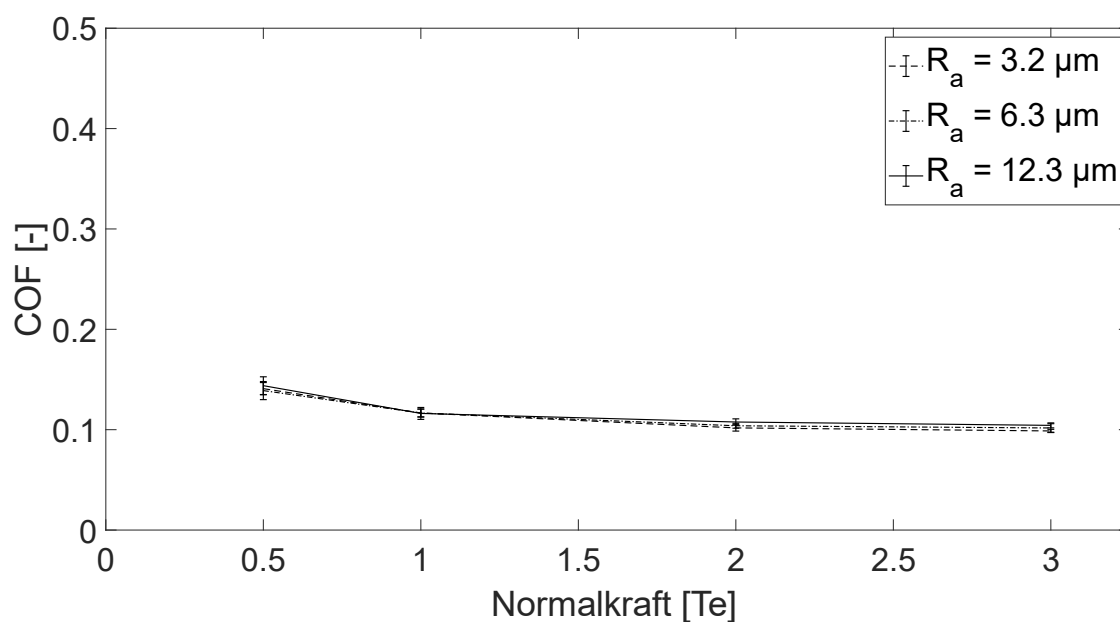


Figur 43: Stål mot POM-C før avfetting

Ruhet, Ra [μm]	Normalkraft [Tonn]	Flatetrykk [MPa]	Friksjonskoeffisient \pmStandardavvik
1,6	0,50	0,70	0,167 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,140 \pm 0,006
	2,00	2,80	0,134 \pm 0,005
	3,00	4,20	0,119 \pm 0,004
3,2	0,50	0,70	0,138 \pm 0,011
	1,00	1,40	0,124 \pm 0,010
	2,00	2,80	0,101 \pm 0,005
	3,00	4,20	0,090 \pm 0,002
6,3	0,50	0,70	0,153 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,116 \pm 0,007
	2,00	2,80	0,105 \pm 0,003
	3,00	4,20	0,090 \pm 0,002
12,3	0,50	0,70	0,150 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,113 \pm 0,005
	2,00	2,80	0,106 \pm 0,004
	3,00	4,20	0,095 \pm 0,002

Tabell 8: Stål mot POM-C før avfetting

Som Figur 44 viser, overlapper resultatene for avfettet stål mot POM-C ganske mye. Trenden er fortsatt den samme, men resultatene har mindre avvik i forhold til hverandre, og standardavvikene overlapper overalt. Man kan derfor anta at ruheten ikke spiller noen stor rolle for avfettet stål mot POM-C.



Figur 44: Stål mot POM-C etter avfetting

Ruhet, Ra [μm]	Normalkraft [Tonn]	Flatetrykk [MPa]	Friksjonskoeffisient \pm Standardavvik
3,2	0,50	0,70	0,141 \pm 0,006
	1,00	1,40	0,117 \pm 0,004
	2,00	2,80	0,102 \pm 0,003
	3,00	4,20	0,099 \pm 0,002
6,3	0,50	0,70	0,139 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,117 \pm 0,004
	2,00	2,80	0,104 \pm 0,002
	3,00	4,20	0,102 \pm 0,004
12,3	0,50	0,70	0,144 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,116 \pm 0,006
	2,00	2,80	0,108 \pm 0,003
	3,00	4,20	0,104 \pm 0,003

Tabell 9: Stål mot POM-C etter avfetting

6. Resultat våte tester

6.1 Kommentar til våte tester

For å simulere et subsea-miljø best mulig var den opprinnelige planen å senke hele testoppsettet i saltvann (Figur 45). Saltvannet var blandet med grovt havsalt og vanlig springvann for å få lik konsentrasjon av salt som i sjøvann (3,5 %). Gruppen forstår at det er flere salter enn natriumklorid i sjøvann, men antok at de andre saltene ikke spiller noen stor rolle med tanke på friksjon. Den beste løsningen hadde vært å bruke ekte sjøvann, men å frakte så mange liter blir fort veldig upraktisk.

Før gruppen kunne senke lastcellene i vann var det viktig å finne ut om disse tålte vann. Det ble opplyst fra leverandør at lastcellene hadde en IP54 klassifisering, altså sprutsikker. Det vil si at lastcellene ikke er vanntette, og må dekkes til.



Figur 45: Testoppsett nedsenket i vann

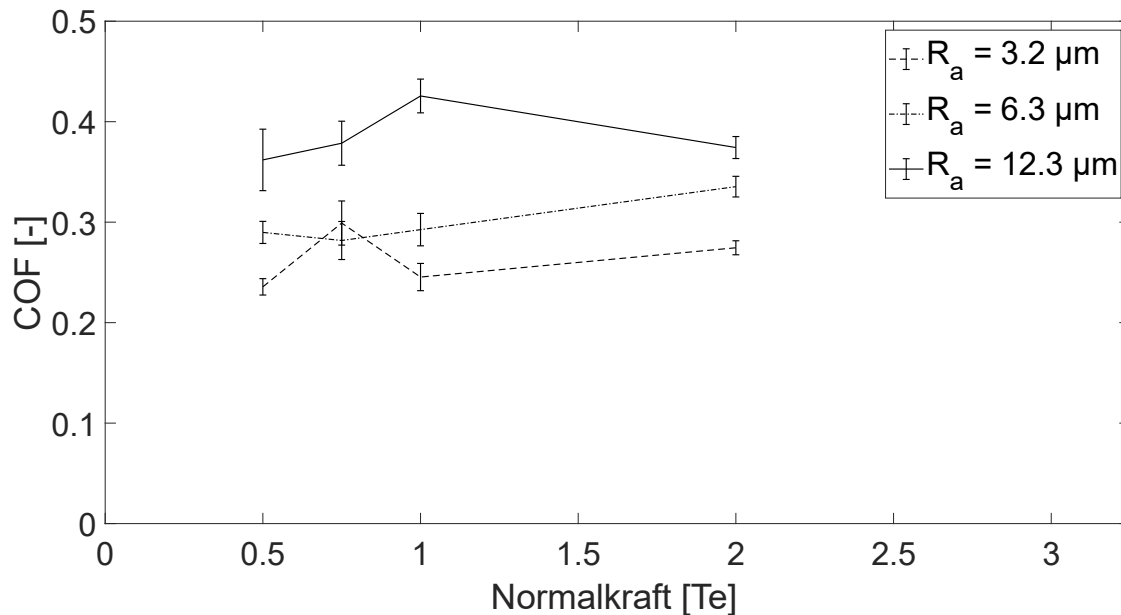
Gruppen prøvde å gjøre lastcellen vanntett ved en improvisert løsning med en plastsekk, men dette fungerte altså ikke. Det ble derfor bestemt at den tryggeste løsningen var å dyppe testmateriale i vann før de ble satt sammen, for så å helle vann over etterpå (Figur 46). Gruppen opplevde at overflaten var fortsatt våt etter at forsøket ble gjennomført og at dette altså var en fungerende metode.



Figur 46: Resulterende testoppsett for våt test

6.2 Stål mot stål

Overflatene ble testet vått (Figur 47, Tabell 10). Fra figuren kan er det forskjell mellom de ulike friksjonskoeffisientene for ulike ruheter øker. Det største avviket i forhold til de andre resultatene er at trenden er motsatt. Under våt test steg friksjonskoeffisienten når ruheten ble større. Det samme gjorde det for normalkraft. Dette er altså det motsatte av det som resultatene under de tørre testene viste. I tillegg var friksjonskoeffisientene høyere for våte tester enn for tørre. Friksjonskoeffisienten mellom overflaten av metallplatene beregnes i henhold til Coulombs friksjonslov, som referert til i ligning (1) og (16).



Figur 47: Koeffisient for statisk friksjon kontra normal belastning; Stål mot stål, våt test

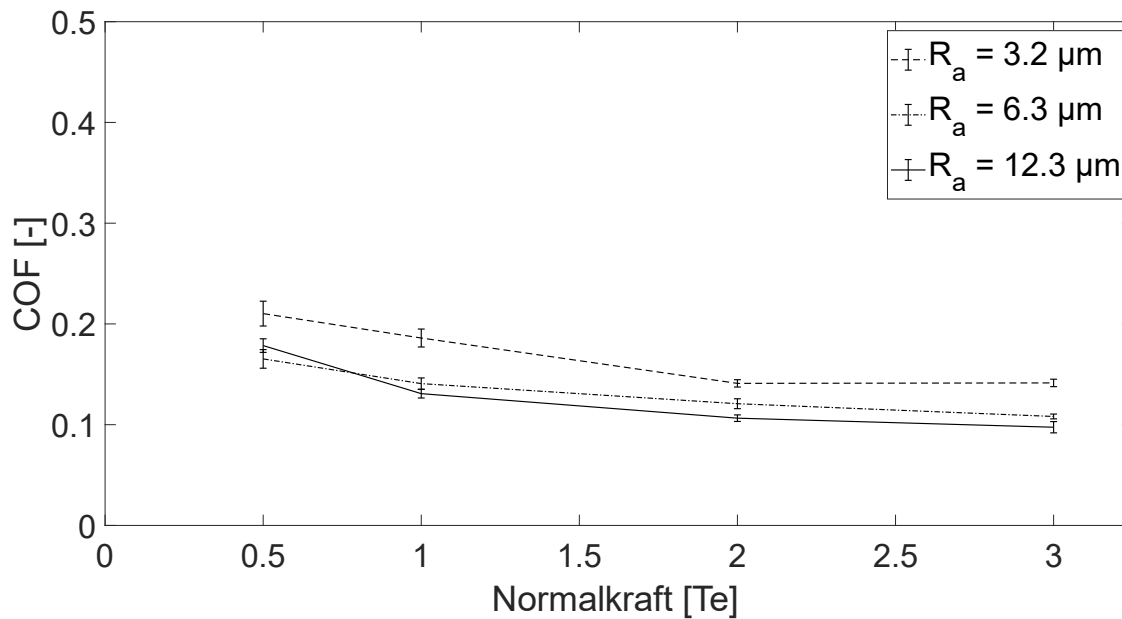
Spredningen av resultatene er også større her, noe som kan være på grunn av det våte miljøet, men også på grunn av at kontaktoverflatene begynte å bli utslitt.

Ruhet, Ra [μm]	Normalkraft [Tonn]	Flatetrykk [MPa]	Friksjonskoeffisient \pmStandardavvik
3,2	0,50	0,70	0,236 \pm 0,008
	1,00	1,40	0,299 \pm 0,022
	2,00	2,80	0,245 \pm 0,014
	3,00	4,20	0,275 \pm 0,007
6,3	0,50	0,70	0,290 \pm 0,011
	1,00	1,40	0,282 \pm 0,019
	2,00	2,80	0,293 \pm 0,016
	3,00	4,20	0,335 \pm 0,010
12,3	0,50	0,70	0,362 \pm 0,031
	1,00	1,40	0,379 \pm 0,022
	2,00	2,80	0,426 \pm 0,017
	3,00	4,20	0,374 \pm 0,011

Tabell 10: Stål mot stål, våt test

6.3 Stål mot POM-C

Figur 48 og Tabell 11 viser friksjonskoeffisientene for våte tester mellom stål og POM-C. Friksjonskoeffisientene var marginalt større enn for tørre tester. Dette kan skyldes at vannet hadde en påvirkning, men det kan også skyldes at platene begynte å bli utslitt. Gruppen velger derfor å si at det ikke kan trekkes noen konkret konklusjon for innvirkningen miljø har på friksjonskoeffisienten til plast. Trenden som blir klar ut fra figuren er at større overflateruhet og normalkraft gir lavere friksjonskoeffisient. Dette er noe som går igjen i resultatene.



Figur 48: Stål mot POM-C, våt test

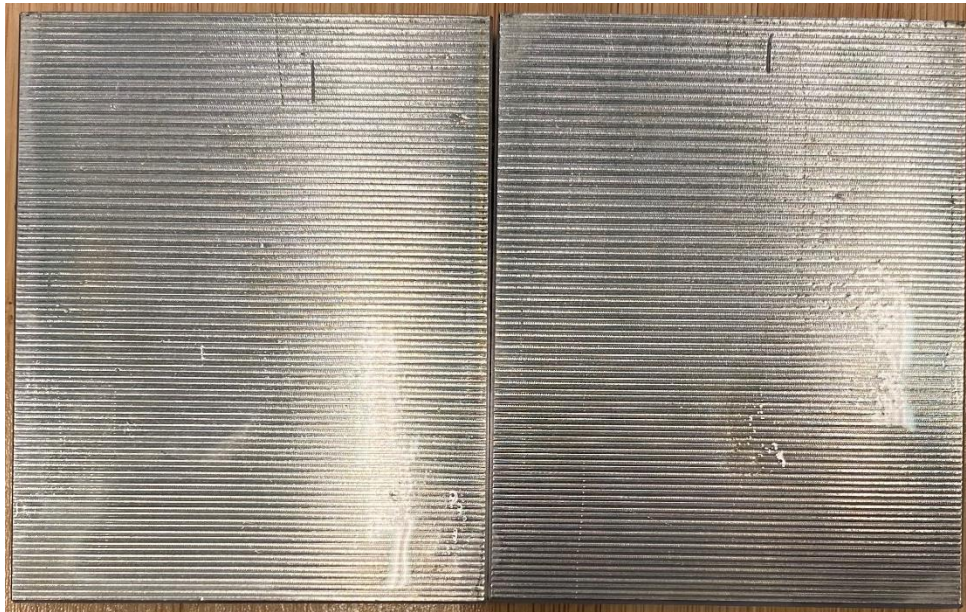
Ruhet, Ra [μm]	Normalkraft [Tonn]	Flatetrykk [MPa]	Friksjonskoeffisient \pmStandardavvik
3,2	0,50	0,70	0,210 \pm 0,012
	1,00	1,40	0,186 \pm 0,009
	2,00	2,80	0,141 \pm 0,004
	3,00	4,20	0,142 \pm 0,004
6,3	0,50	0,70	0,165 \pm 0,009
	1,00	1,40	0,140 \pm 0,006
	2,00	2,80	0,121 \pm 0,005
	3,00	4,20	0,108 \pm 0,002
12,3	0,50	0,70	0,179 \pm 0,007
	1,00	1,40	0,131 \pm 0,004
	2,00	2,80	0,107 \pm 0,003
	3,00	4,20	0,098 \pm 0,006

Tabell 11: Stål mot POM-C, våt test

7. Diskusjon

7.1 Kommentar til resultater

Som nevnt tidligere dannet det seg etter hvert «sår» og riper på overflaten til testmaterialene som vist på Figur 50 og Figur 49. Disse skadene oppstod jevnlig gjennom testingen, men gruppen opplevde det særlig etter avfetting og ved høy last. Det er uvisst hvor stor innvirkning skadene hadde på resultatene, men det er viktig å ha med seg videre. Optimalt ville gruppen hatt flere sett av hver testoverflate slik at disse kunne byttes ut ved behov. Allikevel mener gruppen at testingen er vellykket, og at resultatene kan stoles på ettersom verdiene forholdt seg stabilt. Det er også viktig å merke seg at disse resultatene gjelder for planfreste overflater, og de kan variere ved bruk av andre maskineringsmetoder.



Figur 50: Skader på testplate med ruhet $R_a = 1,6 \mu\text{m}$



Figur 49: Skader på testplate uten overflatebehandling

Dersom gruppen hadde hatt mulighet, ville en strekkprøvemaskin blitt brukt for å utføre friksjonstesting. Se Flat Strip Drawing Test, Figur 7. På denne måten kunne gruppen testet for høyere verdier og ikke trengt å bruke lastcelle for å måle friksjonskraften. Gruppen mener resultatene kunne da vært enda mer presise, men dessverre var ikke strekkprøvemaskinen tilgjengelig.

I tillegg burde resultatene vært plottet med tanke på avstand forflyttet i stedet for tid, men på grunn av tid og utstyr var ikke dette et reelt alternativ. Forflytningshastigheten ble holdt så konstant som mulig, for at dette ikke skulle påvirke resultatene.

Selv om det er vanskelig å foreta en direkte sammenligning på grunn av forskjellene i materialtypene og overflateforberedelsen, ble friksjonskoeffisientene som ble oppnådd i denne oppgaven sammenlignet med det som blir brukt i industrien. I industrien er det vanlig å bruke 0,1-0,2 som friksjonskoeffisient for stål mot stål og 0,09 for stål mot POM-C (våte kontaktflater). Gruppens vurdering ut fra dette er at resultatene våre stemmer godt overens med praksis i industri, og at gruppens resultater kan bidra noe med å øke forståelsen mellom friksjonskoeffisient, overflateruhet og flatetrykk.

7.2 Feilkilder

Det er flere feilkilder som må tas hensyn til. Disse vil påvirke resultatene i ulik grad.

7.2.1 Konstruksjon

Konstruksjonen vil aldri være helt perfekt i forhold til teorien og tegningene. Det vil alltid være vinkler som ikke er slik som de skal være, noe som påvirker hvordan kreftene virker på konstruksjonen. Spesielt de vertikale platene i testoppsettet er utsatt for dette. Dersom platene ikke står helt vertikalt, vil den ene kontaktflaten ta opp mer av friksjonskraften enn den andre, noe som igjen kan gi «falske resultater»

Et annet problem med tanke på konstruksjonen er at boltene ikke blir strammet likt. Selv om det blir brukt momentnøkkel, vil det være forskjell i hvor mye friksjon hver av boltene opplever. Dersom boltene blir strammet ulikt, kan platene stå skeivt på hverandre. Lastcellen som måler normalkraften, kan også måle feil dersom den tar opp krefter i radiell retning som følge av dette.

Etter konstruksjon er det mulig at det ligger rester av olje eller andre stoffer som kan påvirke overflateegenskapene til materialene. Selv om delene ser rene ut, er dette noe som må tas med i betraktning uansett.

7.2.2 Lastcellene

Lastcellene som blir brukt har en feilmargen på $\pm 3\%$ ved full last, noe som tilsvarer 30 kg og 150 kg til henholdsvis 1 tonn og 5 tonn lastcellene. Dette er noe som ikke går an å omgå og som må aksepteres. Sertifikater medfulgte lastcellene, så de skal være etter spesifikasjon, men det er alltid ting som kan skje i transport som kan påvirke dette.

Da lastcellene ble testet første gang, ble det lagt merke til at de ikke viste reell verdi. Gruppen måtte derfor kalibrere dem. Dette ble gjort ved å legge 4 x 25 kg vekter på lastcellene. Disse vektene ble veid på forhånd og det ble merket at alle var på $25 \text{ kg} \pm 0,1 \text{ kg}$. Etter at vektene ble lagt på, logget gruppen data og brukte gjennomsnittet av målingene til å finne verdien som måtte trekkes fra eller legges til for at lastcellene skulle måle 100 kg. Måling av korreksjon kan sees på Figur 51 og var -3 kg og -10 kg for henholdsvis 1 tonn og 5 tonn lastcellen.



Figur 51: Måling av korreksjon av lastceller

7.2.3 Logging

Ved logging følger det med et kompromiss mellom samplingrate og presisjon. Samplingraten blir begrenset på grunn av hastigheten til analog-to-digital konverteren og til datamaskinen som kjører dataloggingsprogrammet.

Gain/Range: 100/±0,1V			
Resolution Index	Effective Resolution [bits]	Effective Resolution [μV]	AIN sample time [ms]
1	13.3	21	1.04
2	14.2	11	2.04
3	14.7	7.8	5.08
4	15.2	5.5	5.12
5	15.7	3.9	5.20
6	16.3	2.6	10.3
7	16.7	1.9	10.6
8	17.2	1.4	11.3
9	18.3	0.6	3.58
10	19.1	0.4	13.5
11	19.6	0.3	66.5
12	19.7	0.2	159

Tabell 12: Resolution Index versus sample time, Kilde: LabJack U6-Pro datasheet (LabJack.com)

Fra seksjon 3.1 i databladet til LabJack U6-Pro er det vist fremgangsmåte til utregning av kommando/responstid [31]. Gruppen logger med en «range» på 0,1 V og en «Resolution index» på 11. Det er to analoge inputs som blir lest av, noe som gir en samplingtid på $CRT = 4\text{ ms} + (2 * 66,5\text{ ms}) = 137\text{ ms}$. (Verdier hentet fra Tabell 12) Dette stemmer bra med praksis, der samplingtiden ligger på rundt 139 ms.

8. Konklusjon og videre arbeid

Dette prosjektet har tatt for seg friksjonsmålinger i ulike miljøer, med fokus på friksjon i «sjøvannsmiljøet». Det ble designet og produsert et testoppsett, og med dette oppsettet ble det utført totalt 1 027 forsøk. Hvert av disse forsøkene ble logget og behandlet ved hjelp av programvare.

Resultatene gruppen har kommet frem til vil forhåpentligvis bli relevante til beregninger i forbindelse med subsea clamps, og gjerne andre situasjoner. Materialene som ble testet var S355 stål mot S355 stål og S355 stål mot polymeren POM-C. Materialene består av fire sett «inserts» i S355 stål som ble planfrest for å oppnå ønsket ruhet. Disse fire settene hadde ruheter på 1.6, 3.2, 6.3 og 12.3 $\mu\text{m Ra}$. Disse ble så trykket mot S355 og POM-C som ikke hadde gått gjennom noen maskineringsprosess av overflaten. Normalkreftene som platene ble trykket mot hverandre med varierte mellom 0.5 og 3 tonn. Testingen ble utført med bruk av en verkstedpresse. For å simulere «sjøvann-miljø» ble platene nedsenket i vann før de ble satt sammen. Det ble også helt vann over platene under testingen. Dette er ikke ideelt, men gruppen la merke til at overflatene fortsatt var våte etter forsøkene.

De påførte kreftene (trykkraft og normalkraft) ble registrert av lastceller, og data ble videre bearbeidet for å bestemme friksjonskoeffisientene. Resultatene ble illustrert som grafer med friksjonskoeffisient på y-aksen og normalkraft på x-aksen. Resultatene viser at normalkraft og overflateruhet har en varierende effekt på friksjonskoeffisienten. Trenden som gruppen noterte seg, og som resultatene viser, er at høyere normalkraft og høyere ruhet gir lavere friksjonskoeffisient. Unntaket var for vått stål mot stål, da trenden var den motsatte. Ulike tester gir ulike resultater for friksjonskoeffisienten. Dette viser at de kinematiske forholdene i prosessen avhenger sterkt av parametere som er direkte relatert til hvordan friksjonsprosessen fungerer.

Gruppens resultater viste at for våte tester var friksjonskoeffisientene henholdsvis fra 0,236-0,426 for S355 (Tabell 13) og fra 0,098-0,210 for POM-C (Tabell 14):

Ruhet, Ra [μm]	Friksjonskoeffisient
3,2	0,236-0,299
6,3	0,275-0,335
12,3	0,362-0,426

Tabell 13: Sammendrag resultater stål mot stål, våte tester

Ruhet, Ra [μm]	Friksjonskoeffisient
3,2	0,141-0,210
6,3	0,108-0,165
12,3	0,098-0,179

Tabell 14: Sammendrag resultater stål mot POM-C, våt test

For tørre tester var friksjonskoeffisientene henholdsvis fra 0,179-0,264 for S355 (Tabell 15) og fra 0,090-0,167 for POM-C (Tabell 16):

Ruhet, Ra [μm]	Friksjonskoeffisient
1,6	0,190-0,262
3,2	0,189-0,264
6,3	0,192-0,244
12,3	0,179-0,207

Tabell 15: Sammendrag resultater stål mot stål, tørre tester

Ruhet, Ra [μm]	Friksjonskoeffisient
1,6	0,119-0,167
3,2	0,090-0,138
6,3	0,090-0,153
12,3	0,095-0,150

Tabell 16: Sammendrag resultater stål mot POM-C, tørre tester

Denne oppgaven er et bidrag til industrien for å forhåpentligvis hjelpe med bestemmelse av friksjonskoeffisienter. Det er fortsatt mye som gjenstår innenfor friksjonstesting, og fremtidig forskning vil forhåpentligvis sette søkelys på eksperimentell validering av oppnådde resultater for ulike materialpar. I tillegg bør påvirkningen av de andre relevante elementene temperatur og fuktighet studeres. Videre bør flere materialer testes enn det som har vært så langt. I subsea clamps er spesielt mange varianter av gummi mye brukt. I tillegg vil det være fordelaktig å utføre flere tester i forbindelse med bolter og deres friksjonskoeffisienter. Her kan det være interessant å teste en rekke smøremidler, forspenningskrefter og bolter for å finne ut hvordan de endrer friksjonskoeffisienten i gjengene og boltehodet. Forspenninger og friksjonskoeffisienter for bolter spiller en viktig rolle i beregninger knyttet til subsea clamps.

Referanser

- [1] D. Morin, *Introduction to Classical Mechanics: with Problems and Solutions*. Cambridge, UK ; New York: Cambridge University Press, 2008.
- [2] J. Takadoum, *Materials and Surface Engineering in Tribology*. London : Hoboken, NJ: ISTE ; Wiley, 2008.
- [3] J. Walker, R. Resnick, og D. Halliday, *Fundamentals of Physics*, 10. utg. Hoboken, NJ: Wiley, 2014.
- [4] ASM International, Red., *ASM handbook*, 10th editon. Materials Park, Ohio: ASM International, 1990.
- [5] H. Hirani, *Fundamentals of Engineering Tribology with Applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. doi: 10.1017/CBO9781107479975.
- [6] V. L. Popov og J. A. T. Gray, “Prandtl-Tomlinson model: History and applications in friction, plasticity, and nanotechnologies”, *ZAMM - J. Appl. Math. Mech. Z. Für Angew. Math. Mech.*, bd. 92, nr. 9, s. 683–708, sep. 2012, doi: 10.1002/zamm.201200097.
- [7] K. C. Ludema og L. Ajayi, *Friction, Wear, Lubrication: A Textbook in Tribology*, 2. utg. Boca Raton: Taylor & Francis, CRC Press, 2019.
- [8] B. Bhushan, *Introduction to Tribology*, Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [9] S. Gorb, Red., “Friction and adhesion: fundamentals”, i *Attachment Devices of Insect Cuticle*, Dordrecht: Springer Netherlands, 2001, s. 1–8. doi: 10.1007/0-306-47515-4_1.
- [10] N. Bulaha, “Calculations of surface roughness 3D parameters for surfaces with irregular roughness”, presentert på 17th International Scientific Conference Engineering for Rural Development, mai 2018. doi: 10.22616/ERDev2018.17.N256.
- [11] S. Hashmi, G. Ferreira Batalha, C. J. Van Tyne, og B. S. Yilbas, *Comprehensive materials processing*. Oxford Walltham, MA: Elsevier, 2014.
- [12] Natarajan Jeyaprakash, “Friction, Lubrication, and Wear”, i *Tribology in Materials and Manufacturing*, Rijeka: IntechOpen, 2021, s. Ch. 10. doi: 10.5772/intechopen.93796.
- [13] B. Bhushan, *Introduction to Tribology*, 2. utg. Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc, 2013.
- [14] A. Makhkamov, “Determination of the Friction Coefficient in the Flat Strip Drawing Test”, *Engineering*, bd. 13, nr. 11, s. 595–604, 2021.
- [15] J. Garcia, J. Lumkes, B. Heckaman, og A. Martini, “Viscosity Dependence of Static Friction in Lubricated Metallic Line Contacts”, *Tribol. Trans.*, bd. 54, nr. 3, s. 333–340, mar. 2011, doi: 10.1080/10402004.2010.542278.
- [16] J. Diego og A. Fernández, “EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE FRICTION COEFFICIENT USING A TILTED PLANE”, 2015, Åpnet: 23. april 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.3851.2161>
- [17] B. Sanborn, B. Song, og E. Nishida, “Development of a New Method to Investigate Dynamic Friction Behavior of Metallic Materials Using a Kolsky Tension Bar”, SAND--2017-11985, 1596207, 658217, nov. 2017. doi: 10.2172/1596207.
- [18] T. L. Schmitz, J. E. Action, J. C. Ziegert, og W. G. Sawyer, “The Difficulty of Measuring Low Friction: Uncertainty Analysis for Friction Coefficient Measurement”, *J. Tribol.*, bd. 127, nr. 3, s. 673–678, jul. 2005.

- [19] A. Takezawa, S. Nishiwaki, M. Kitamura, og E. C. N. Silva, “Topology optimization for designing strain-gauge load cells”, *Struct. Multidiscip. Optim.*, bd. 42, nr. 3, s. 387–402, sep. 2010, doi: 10.1007/s00158-010-0491-0.
- [20] T. B. Greenslade, “Wheatstone’s Bridge”, *Phys. Teach.*, bd. 43, nr. 1, s. 18–20, jan. 2005, doi: 10.1119/1.1845984.
- [21] G. Weiss, “Wheatstone Bridge Sensitivity”, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, bd. 18, nr. 1, s. 2–6, 1969, doi: 10.1109/TIM.1969.4313752.
- [22] V. Kamble, V. shinde, og J. Kittur, “Review on optimization of load cells”, okt. 2021, Åpnet: 3. februar 2022. [Online]. Tilgjengelig på: https://www.researchgate.net/publication/355370535_Review_on_optimization_of_load_cells
- [23] “Miniature Load Cells | Althen Sensors”. <https://www.althensensors.com/sensors/weighing-sensors-load-cells/miniature-load-cells/> (åpnet 4. juni 2022).
- [24] Flintec, “Button Load Cells”, *Flintec*. <https://www.flintec.com/weight-sensors/load-cells/button> (åpnet 3. februar 2022).
- [25] FUTEK, “Pancake Load Cells”. <https://www.futek.com/store/load-cells/universal-pancake-load-cells> (åpnet 2. mai 2022).
- [26] *Autodesk Inventor Professional 2019*. Autodesk.
- [27] R. C. Hibbeler, “Buckling of Columns”, i *Statics and Mechanics of Materials*, 5 (SI)., Harlow, Essex, Storbritannia: Pearson Education Limited, 2019, s. 794–827.
- [28] Ø. Husø, “Maskinkomponenter”, i *Mekanisk konstruksjon og teknisk design*, 1. utg., Oslo, Norge: Gyldendal Norsk Forlag AS, 2010, s. 101–136.
- [29] *LabVIEW 2017*. National Instruments.
- [30] “LabVIEW Eksempelprogrammer”. <https://labjack.com/support/software/examples/ud/labview> (åpnet 26. april 2022).
- [31] “U6 Datasheet | LabJack”. <https://labjack.com/support/datasheets/u6> (åpnet 27. mai 2022).
- [32] “NS-EN ISO 4288:1997”. <https://www.standard.no/no/nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=144888> (åpnet 12. juni 2022).
- [33] “Friksjon illustrasjon”, *Wikipedia*. 11. mai 2022. Åpnet: 30. mai 2022. [Online]. Tilgjengelig på: <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Friction&oldid=1087313814>
- [34] “Wheatstone bridge.jpg – Wikipedia”. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wheatstone_bridge.jpg (åpnet 31. mai 2022).

Liste over Figurer

Figur 1: Eksempel på subsea clamp.....	2
Figur 2: Eksempel subsea clamp, i bruk	2
Figur 3: Friksjonskraft (F_f) og normalkraft (N) ved kontaktpunktet mellom en blokk og bakken.	3
Figur 4: Skjematisk av en typisk friksjonskoeffisient som viser statisk og dynamisk friksjon.	4
Figur 5: Illustrasjon av friksjon [1].....	5
Figur 6: Friksjonstestfeste for bestemmelse av dynamisk friksjonskoeffisient [23].....	8
Figur 7: Verktøyplatesett av den modifiserte stripetegnings-tribotesteren (L—betyr venstre side av verktøyplatene, når man ser på forsiden; R—betyr høyre side av verktøyplatene) [14].	9
Figur 8: Wheatstone-bro [2]	10
Figur 9: S-type lastcelle	11
Figur 10: Button lastcelle	12
Figur 11: Pancake lastcelle.....	12
Figur 12: Modell av design i Inventor	14
Figur 13: Design under produksjon hvor 1) er støtteplatene som holder testmaterialene, 2) er testmaterialene som er statiske under testing og 3) er testmaterialene som blir utsatt for bevegelse. 4) sørger for at 3) beveger seg mer kontrollert under forsøket. (Kan bli sett over den røde platen i Figur 12.).....	15
Figur 14: Levert design sammenlignet med tegnet design.....	15
Figur 15: Effektiv-lengdefaktor.....	16
Figur 16: Testoppsett som består av to pancake lastceller, en for normalkraft (1) og den andre for skyvekraft (2).....	19
Figur 17: Friksjonskreftene i gruppens design. Design sett fra siden.	20
Figur 18: LabVIEW dataloggingsprogram, front end.....	22
Figur 19: LabVIEW dataloggingsprogram, back end	22
Figur 20: 3-bit oppløsning vs. 8-bit oppløsning	23
Figur 21: Testplate, $R_a = 1,6 \mu\text{m}$	26
Figur 22: Testplate, $R_a = 6,3 \mu\text{m}$	27
Figur 23: Testplate, $R_a = 3,2 \mu\text{m}$	27
Figur 24: Testplate, $R_a 12,3 \mu\text{m}$	28
Figur 25: Testplate, ubehandlet stål.....	28
Figur 26: Testplate, POM-C.....	29

Figur 27: Testoverflater gjennom mikroskop før testing, stereomikroskop. a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm.....	30
Figur 28: Testoverflater gjennom mikroskop, 10x forstørring, før testing. a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm.....	30
Figur 29: Testoverflater før testing, 40x forstørring. a) Rødbrun flekk som gruppen antar er rust, b) Små «pytter» som gruppen antar er rester etter maskineringsprosess.....	31
Figur 30: Testoverflater etter avfetting og tørr testing, 10x forstørring. a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm.....	32
Figur 31: Testmateriale etter avfetting, 40x forstørring.....	32
Figur 32: Testmaterialer etter våt test, stereomikroskop a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm.....	33
Figur 33: Testmaterialer etter våt test, 10x forstørring a) Ra = 1,6 µm b) Ra = 3,2 µm c) Ra = 6,3 µm d) Ra = 12,3 µm.....	33
Figur 34: Hardhetstester GNEHM Swissmax TYP 300.....	34
Figur 35: Hardhetstesterens mikroskop.....	35
Figur 36: Eksempel på ruhetsmåling.....	36
Figur 37: Tittelformat hvor 1) angir om det er resultat eller testfil, 2) angir overflatene som testes, 3) angir normalkraften som blir benyttet, og 5) angir forsøk-nummer.....	38
Figur 38: Utførelse av stramming av bolt.....	39
Figur 39: Eksempel loggdata, graf.....	40
Figur 40: Stål mot stål før avfetting.....	41
Figur 41: Stål mot stål etter avfetting.....	43
Figur 42: Stål mot stål etter avfetting, justert.....	44
Figur 43: Stål mot POM-C før avfetting.....	45
Figur 44: Stål mot POM-C etter avfetting.....	47
Figur 45: Testoppsett nedsenket i vann.....	48
Figur 46: Resulterende testoppsett for våt test.....	49
Figur 47: Koeffisient for statisk friksjon kontra normal belastning; Stål mot stål, våt test.....	50
Figur 48: Stål mot POM-C, våt test.....	52
Figur 49: Skader på testplate uten overflatebehandling.....	54
Figur 50: Skader på testplate med ruhet Ra = 1,6 µm.....	54
Figur 51: Måling av korreksjon av lastceller.....	56

Liste over Tabeller

Tabell 1: Utstyr til eksperiment	21
Tabell 2: Eksempel rådata	25
Tabell 3: Levert testmaterialer	26
Tabell 4: Resultater ruhetstesting	37
Tabell 5: Tiltrekkingsmomenter for resulterende normalkrefter	39
Tabell 6: Stål mot stål før avfetting	42
Tabell 7: Stål mot stål etter avfetting	44
Tabell 8: Stål mot POM-C før avfetting	46
Tabell 9: Stål mot POM-C etter avfetting	47
Tabell 10: Stål mot stål, våt test	51
Tabell 11: Stål mot POM-C, våt test	53
Tabell 12: Resolution Index versus sample time, Kilde: LabJack U6-Pro datasheet (LabJack.com)....	57
Tabell 13: Sammendrag resultater stål mot stål, våte tester	58
Tabell 14: Sammendrag resultater stål mot POM-C, våt test	58
Tabell 15: Sammendrag resultater stål mot stål, tørre tester	59
Tabell 16: Sammendrag resultater stål mot POM-C, tørre tester	59

Vedlegg A – Proof of Concept

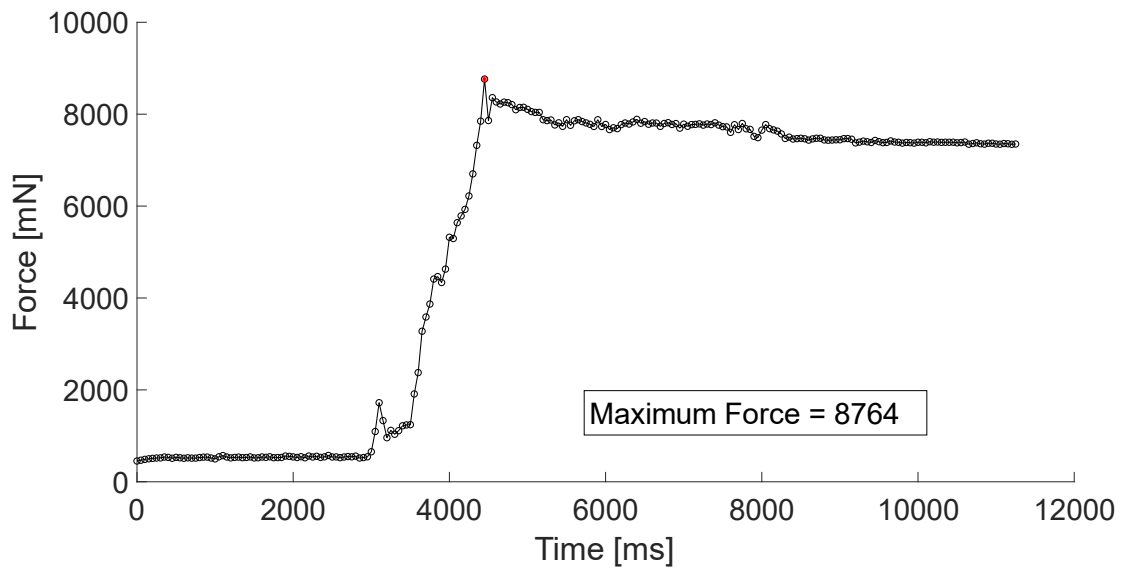
Vedlegg A.1 - MATLAB script alle grafer

```

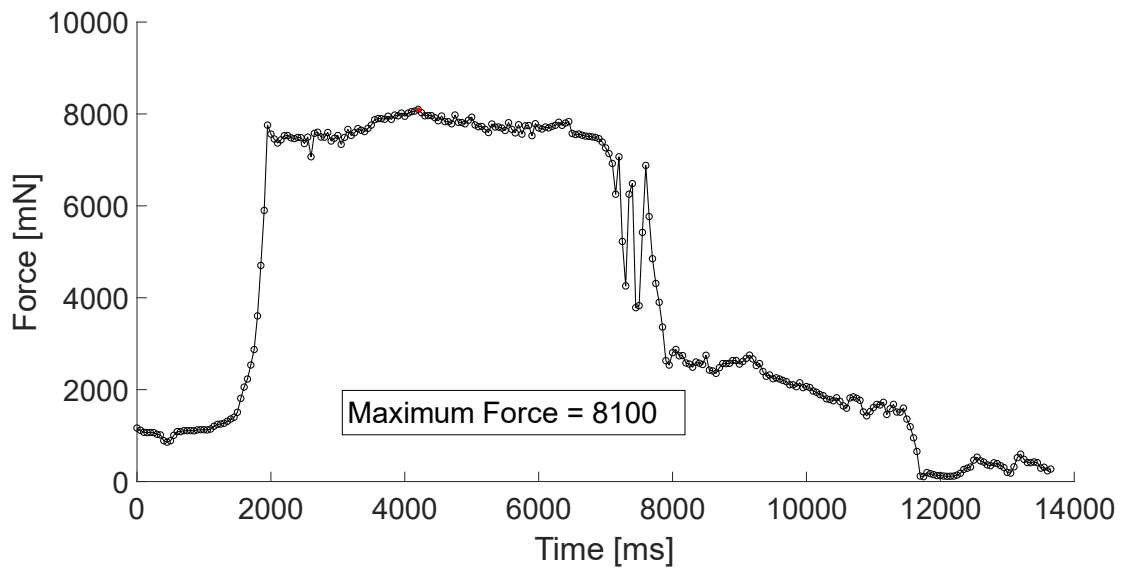
r = "Run"; %Alle datasettene heter 'Runx' der x er mellom 1 og 10
mxi = zeros(1,10); %Vektor til å lagre maksverdier
mass = 4390; %Masse til testobjekt [g]
fs = 28; %Tekststørrelse i figur
ls = 1; %Linjetykkelse til figur
for i = 1:10
    name = r + string(i); %Lager navn på datasett
    fig = figure('Name',name); %Navngir de enkelte figurvindue
    hold on %Vi vil ha både makspunkt og graf
    load(name); %Last inn testdata
    curr = eval(name); %Midlertidig variabelnavn som kan brukes
direkte
    if i ~= 1 %Et av datasettene ble eksportert i skalert
format.
        curr = curr.*1000; %Skalerer også de andre datasett
    end
    plot(curr(:,1),curr(:,2),'-ok','LineWidth',ls) %Plotter hele grafen
    [M,I] = max(curr(:,2)); %Finner makspunkt der M er maksimal kraft og I
er indeks
    plot(curr(I,1),curr(I,2),'r*') %Plotter makspunkt
    mx = string(M); %Lagrer maksimal kraft som string
    mxi(i) = M; %Lagrer maksimal kraft som integer i vektor
    if i ~= 2 %For det andre må tekstboksen justeres
        annotation('textbox', [0.5, 0.2, 0.1, 0.1], 'String', 'Maximum
Force = ' + mx,'FontSize',fs)
    else
        annotation('textbox', [0.3, 0.2, 0.1, 0.1], 'String', 'Maximum
Force = ' + mx,'FontSize',fs)
    end
    %{
    Legger inn maksimal kraft i figurvindu. Vektoren angir størrelse og
    plassering til tekstboksen.
    %}
    xlabel('Time [ms]','FontSize',fs) %Navn på x-akse
    ylabel('Force [mN]','FontSize',fs) %Navn på y-akse
    set(gca,'FontSize',fs) %Endrer tekststørrelse på aksenummer
    fig.WindowState = 'maximized'; %Maksimerer figur
    saveas(gcf,name + '.svg') %Lagrer som vektorbasert bilde
end

```

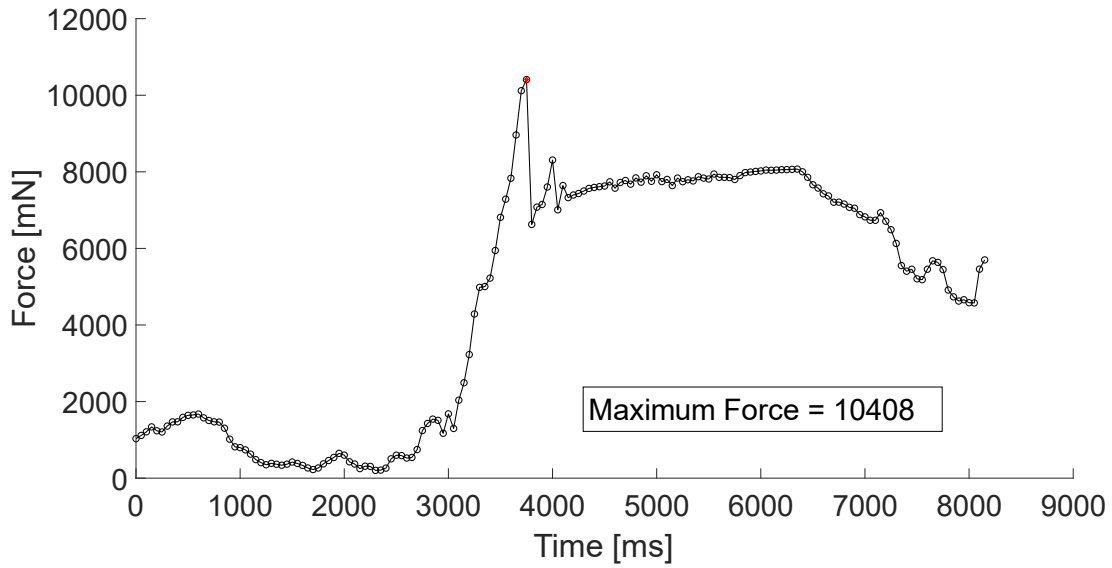
Vedlegg A.2 - Proof of Concept Data



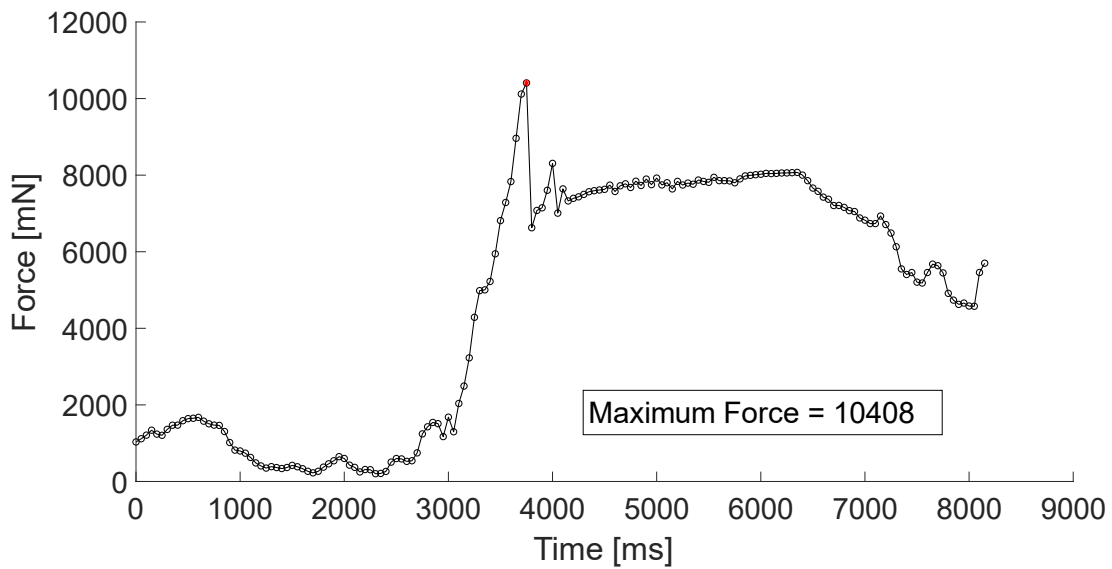
Figur A. 1: Forsøk 1



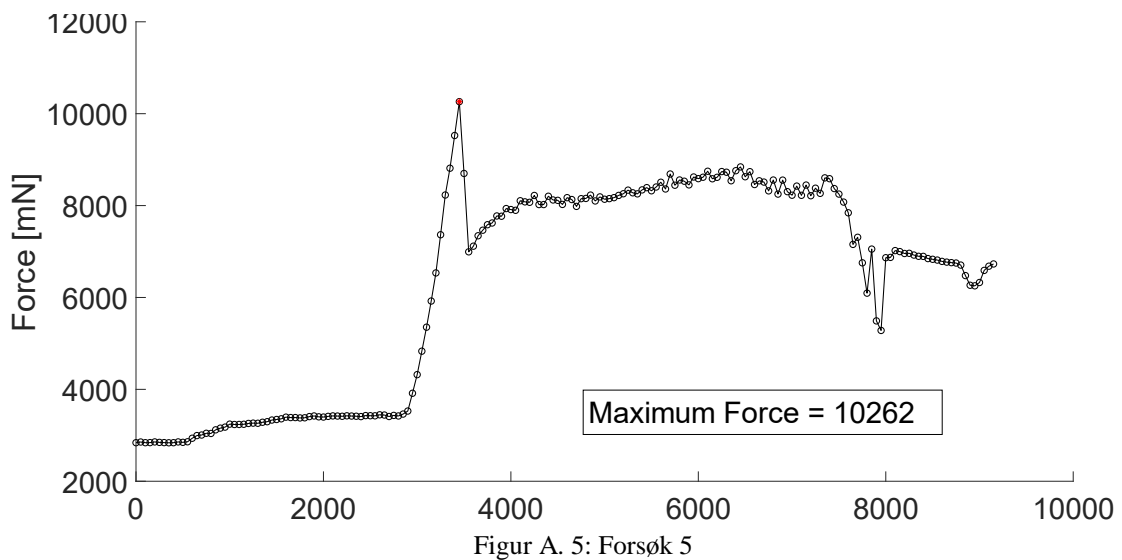
Figur A. 2: Forsøk 2



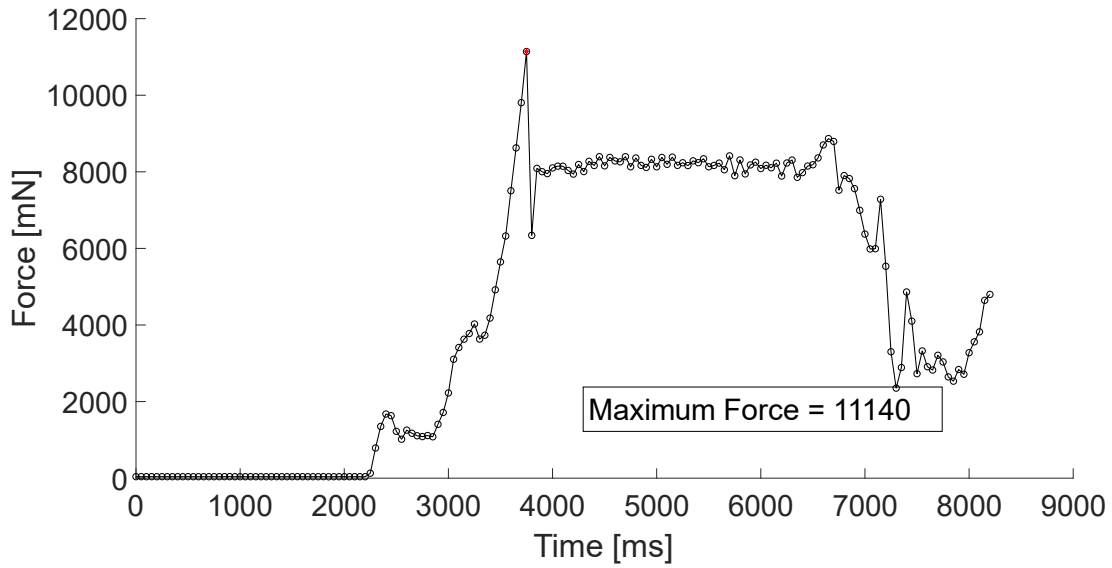
Figur A. 4: Forsøk 3



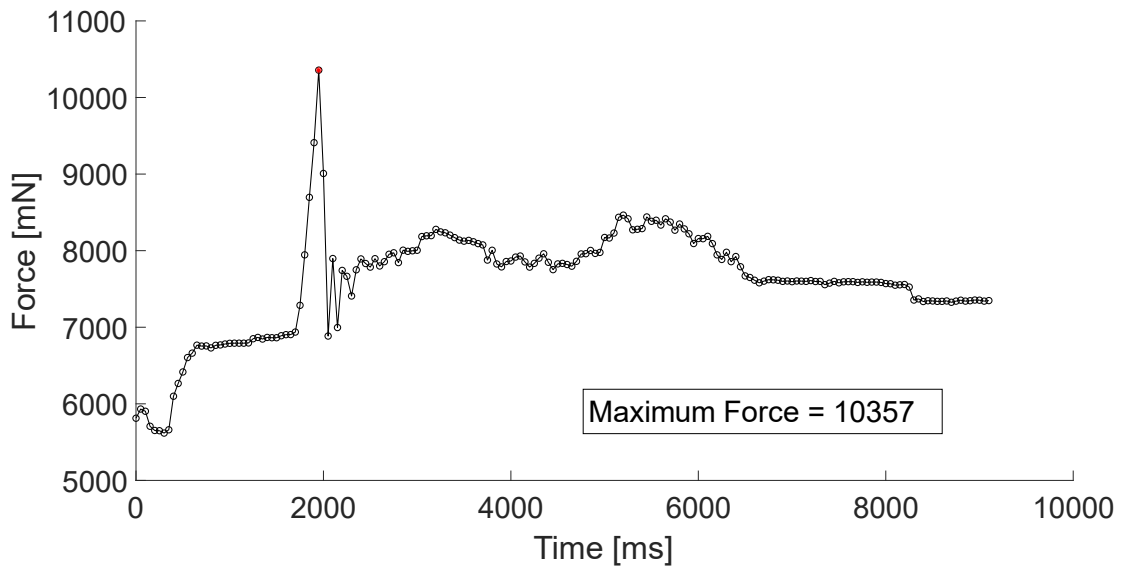
Figur A. 3: Forsøk 4



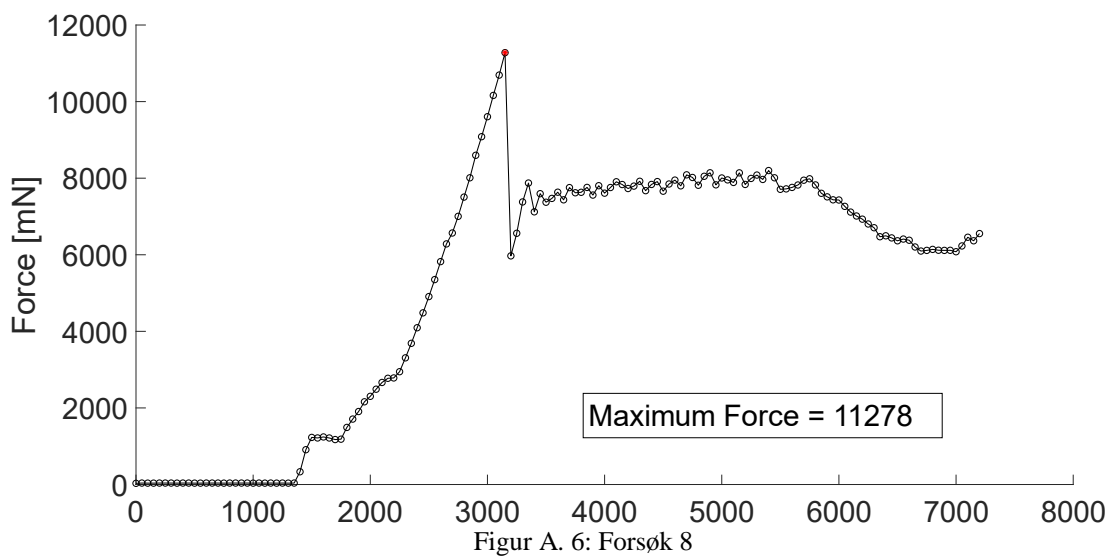
Figur A. 5: Forsøk 5



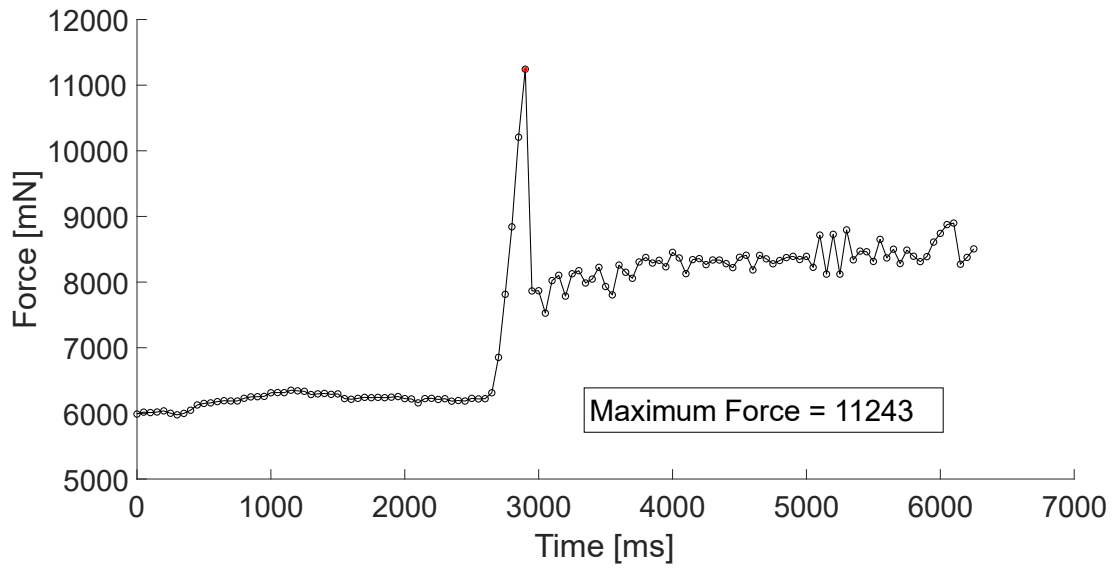
Figur A. 8: Forsøk 6



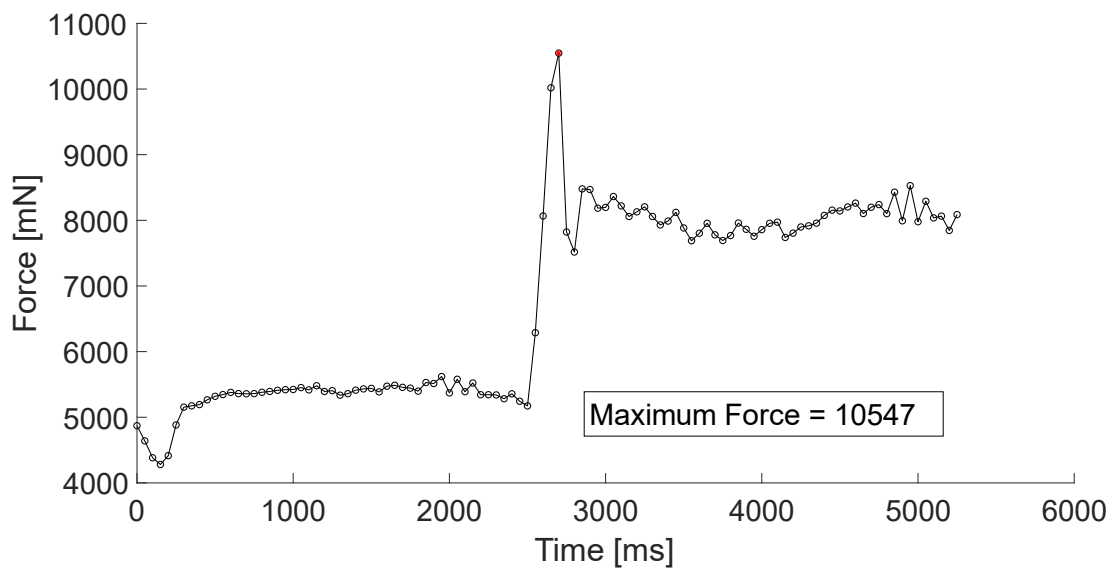
Figur A. 7: Forsøk 7



Figur A. 6: Forsøk 8



Figur A. 10: Forsøk 9

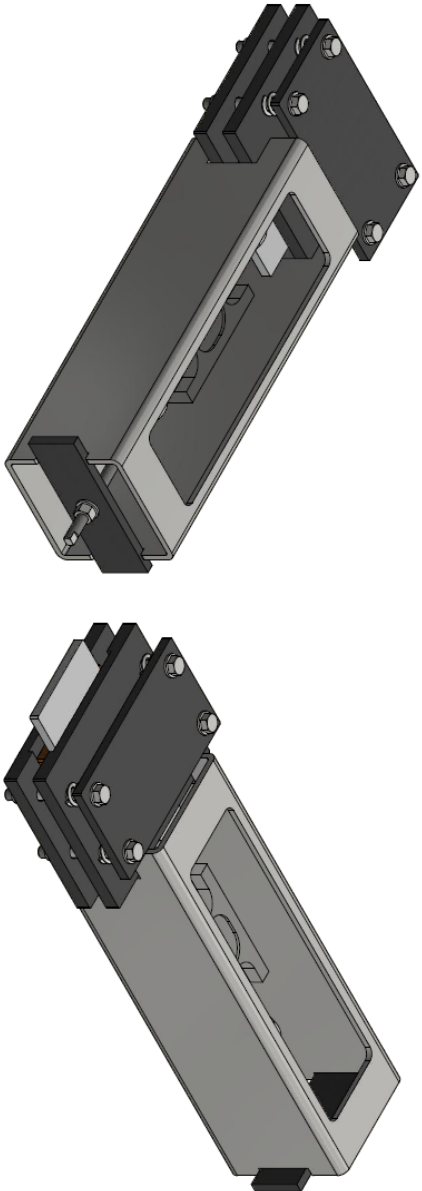


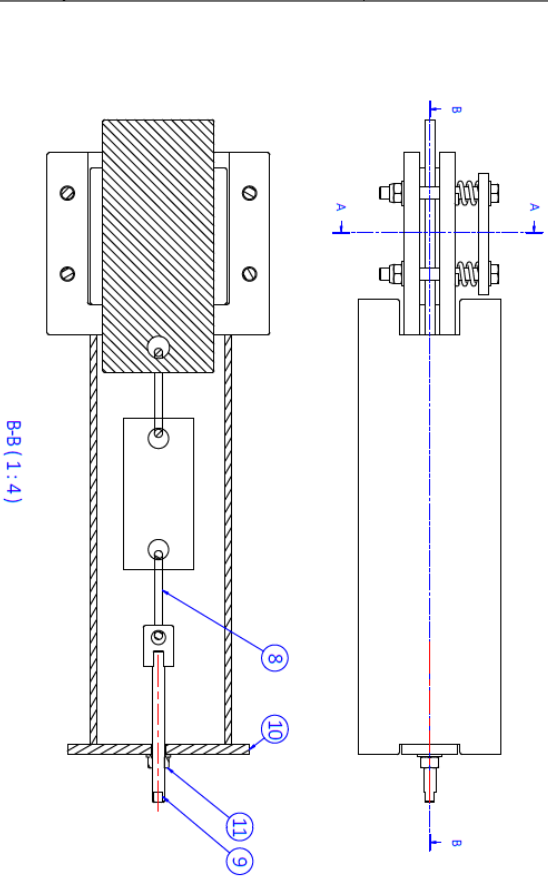
Figur A. 9: Forsøk 10

Vedlegg B - Produksjonstegninger

Vedlegg B.1 - Forslag fra DeepOcean

NOT ISSUED FOR USE





Item/Qty	Description	Drawing nr.	Rev.	Material	Item no.
1	2. R1.5.1230.480	0396544	1	Steel S355	78
2	R1.10.1154.115	0396545	1	Steel S355	23
3	R1.10.1250.110	0396537	1	Aluminium	07
4	R1.10.1230.110	0396539	1	Steel S355	20
5	Col. spring	0396541	1	Steel S355	01
6	Hex.Bolt.M20x120/6x104.Nut.M12	0396546	1	8.8	046
7	Hex.Washer.M20x120/6x104	0396548	1	Steel	97
8	Conical tool	0396552	1	Steel S355	02
9	Round bar d12 l=175	0396544	1	8.8	02
10	R1.10.1150.155	0396555	1	Steel S355	08
11	Hex.Washer.M12/6x Washer - ISO 4032	0396556	1	8.8	010

Rev: 1 Date: 10.01.2022 Approved by: [Signature] Drawn by: 18.01.2022

DEEPOCEAN

Drawing title: Testoppsett - Frikjonsstesting

Client: [Blank]

Project title: [Blank]

Drawing no.: Testoppsett - Frikjonsstesting

Projection: [Blank]

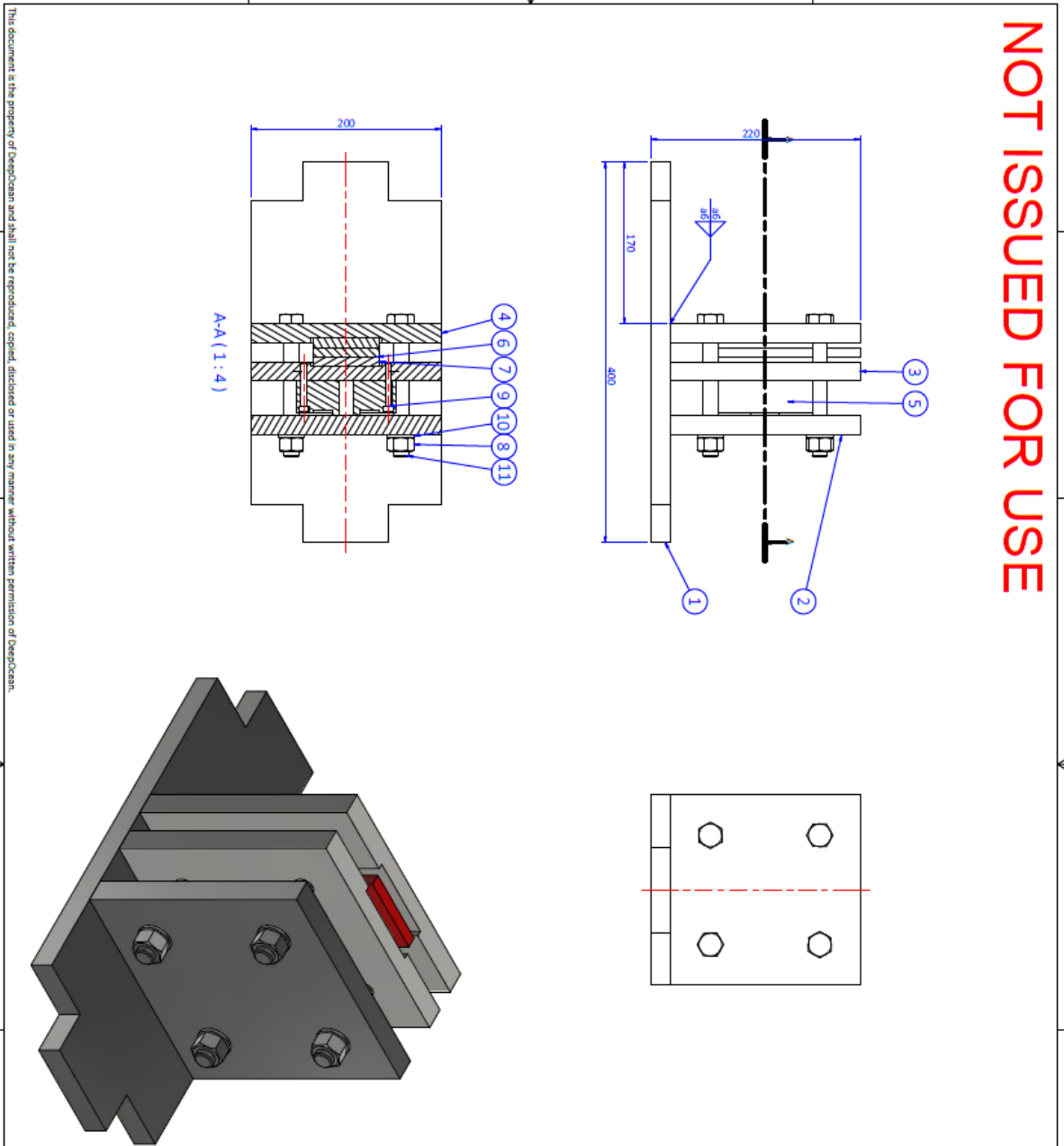
Sheet: 1 of 1

This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.

Gen. Tol. - NS-ISO 2768 U.S.O. - m Gen. Welding - Gen. Machined surface - NS-ISO 2768 U.S.O. - m Tol. NSE/EN ISO 1920 U.S.O. - B roughness U.S.O. - 4.3

Vedlegg B.2 - Endelig testoppsett

NOT ISSUED FOR USE



Gen. Tol. - Gen. Welding - Gen. Machined surface -
 MPE:0.2758 U.S.O.: m Tol. MPE:EN ISO 11258 U.S.O.: B Equipment U.S.O.: 6.3
 NOTES:
 1. Break sharp edges.
 2. All welds to be sealed

Total weight: 33,0 kg

Item	Qty	Description	Weight per item	Material	Material	Material
1	1	Suspending ballroom frame	Material: 200	Steel - S355	Steel - S355	210
2	1		Steel plate	Steel - S355	Steel - S355	6.1
3	1		Steel - S355	Steel - S355	Steel - S355	5.8
4	1		Steel - S355	Steel - S355	Steel - S355	5.8
5	1	Lead Oil - To be provided by NVL	Lead Oil	Steel - S355	Steel - S355	2.1
6	1	PL110/20/10	Material: 100	Steel - S355	Steel - S355	0.8
7	2	PL100/20/10	Material: 200	Steel - S355	Steel - S355	0.2
8	4	Testing Material A	Material: 400	Steel - S355	Steel - S355	0.2
9	2	Testing Material B	Material: 200	Steel - S355	Steel - S355	0.0
10	4		Material: 400	Steel - S355	Steel - S355	0.0
11	4		Material: 400	Steel - S355	Steel - S355	1.0

Rev.: 1 Date: 06.02.2022 Approved by: B. Auzan
 Drawn by: B. Auzan

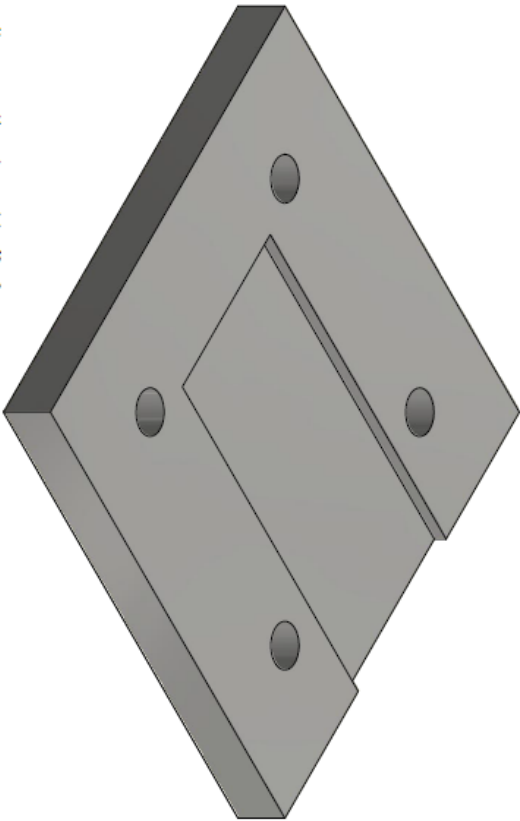
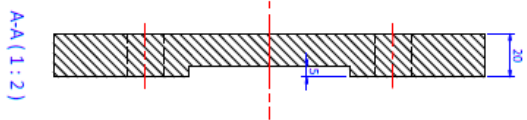
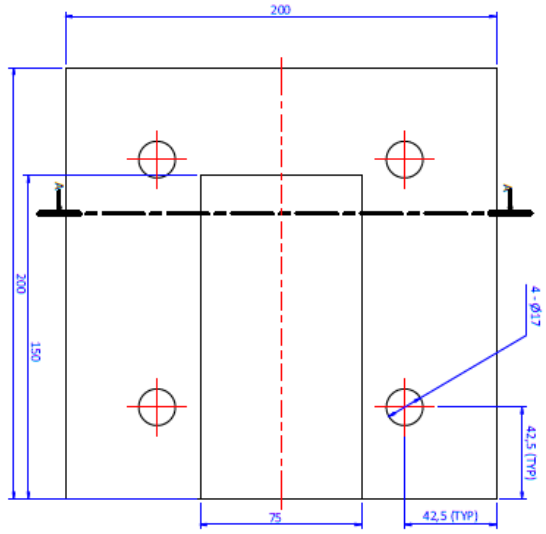
DEEPOCEAN

Drawing title: _____
 Project title: _____
 Client: _____
 Drawing no.: T egning
 Sheet: 1 of 7

This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.

NOT ISSUED FOR USE

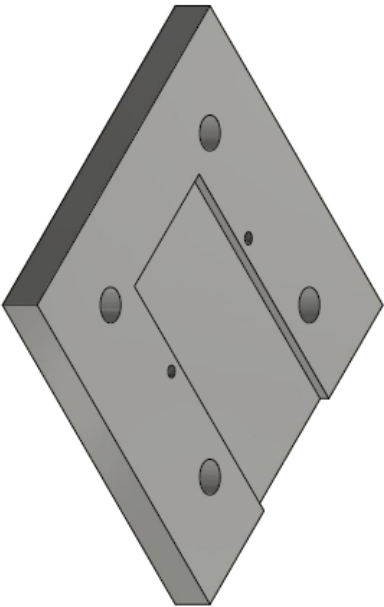
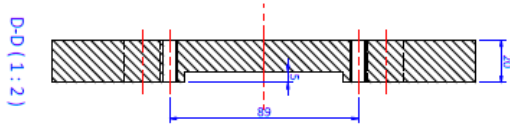
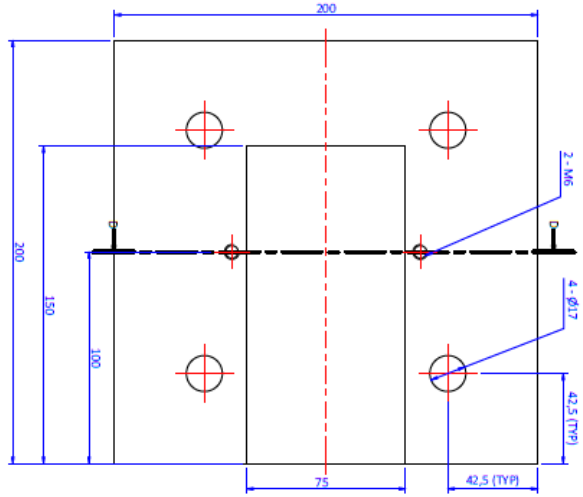
This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.



State:	Rev:	Date:	Approved by:	Checked by:	Drawn by:	Projection:
	1	06.02.2022	B. Aursnes	B. Aursnes		1st Angle
Drawing title						
DEEPOCEAN						
Project title						
Client						
Drawing no. Tegning						
						Sheet
						2 of 7

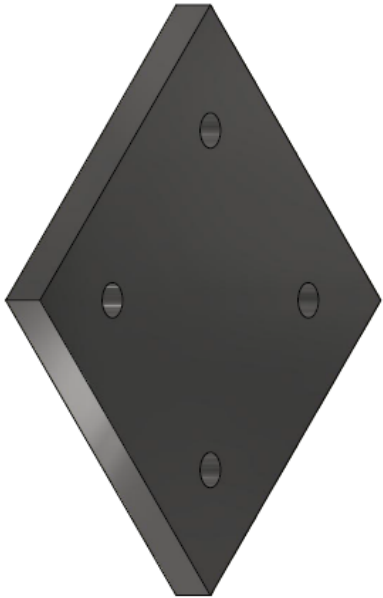
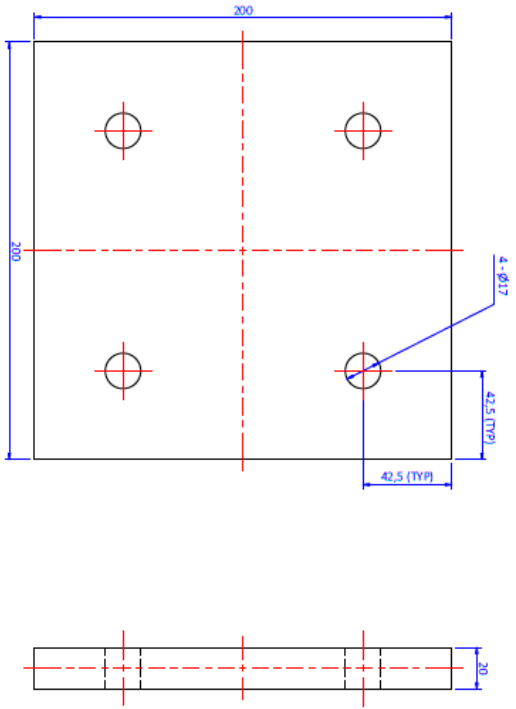
NOT ISSUED FOR USE

This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.



Status:	Rev.:	Date:	Approved By:	Checked By:	Drawn By:	Projection:
	1	06.02.2022	B. Austvik			1st Angle
Drawing title						
DEEPOCEAN						
Project title						
Client						
Drawing no.						
1 egning						
Sheet						3 of 7

NOT ISSUED FOR USE

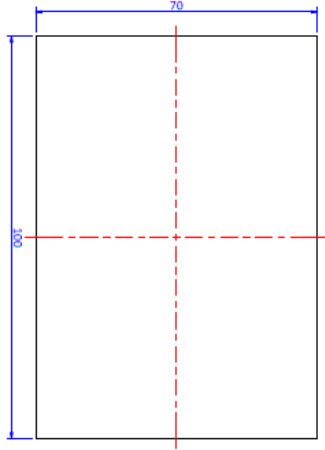
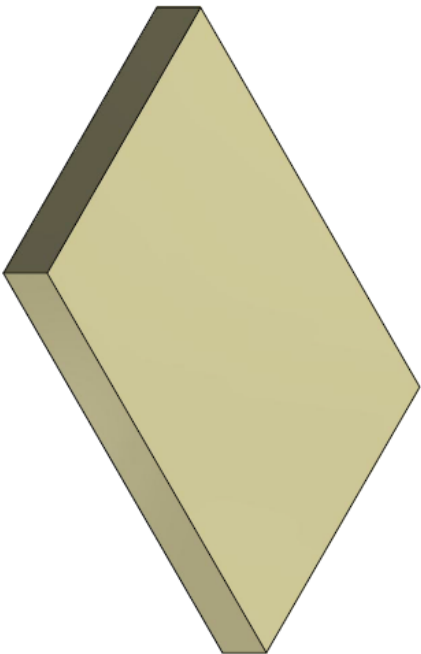


This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.

Status:			
Rev.:	Date:	Approved by:	
1	06.02.2023	Checked by:	
		Drawn by:	S. Aunstad
DEEPOCEAN			
Drawing title			
Project title			
Client			
Drawing no.		Revision	
Tegning		4 of 7	

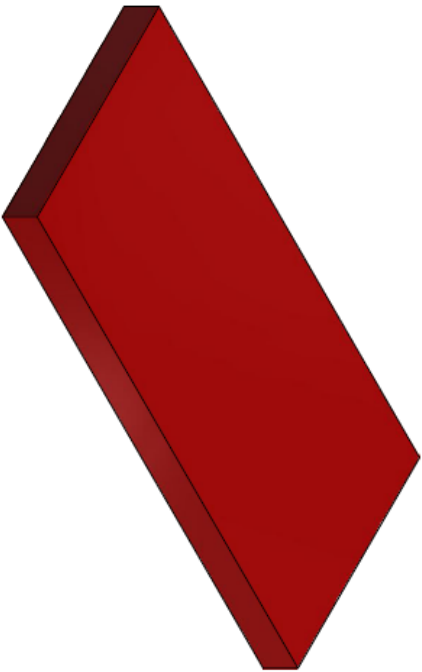
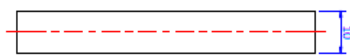
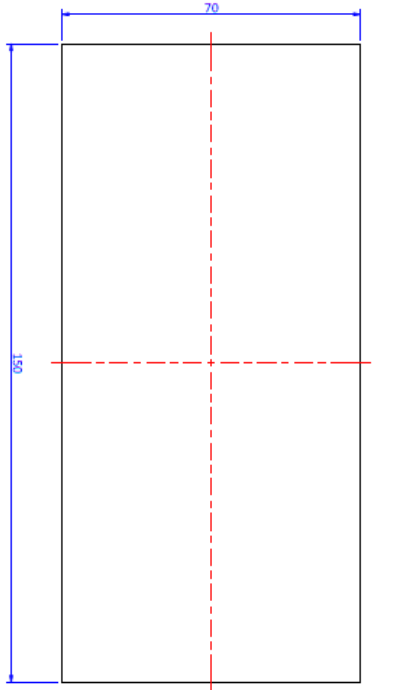
NOT ISSUED FOR USE

This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.



Status:		Approved By: S. Aune	
Rev: 1	Date: 05.02.2022	Created By: S. Aune	Drawn By:
DEEPOCEAN			
Drawing title			
Project title			
Client:		Projection:	
Drawing no. Tegning		Sheet 6 of 7	

NOT ISSUED FOR USE

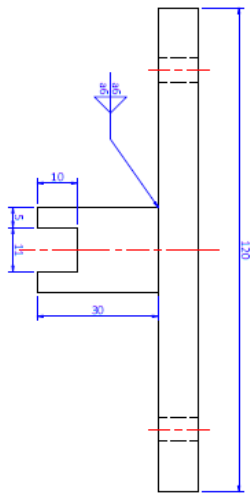
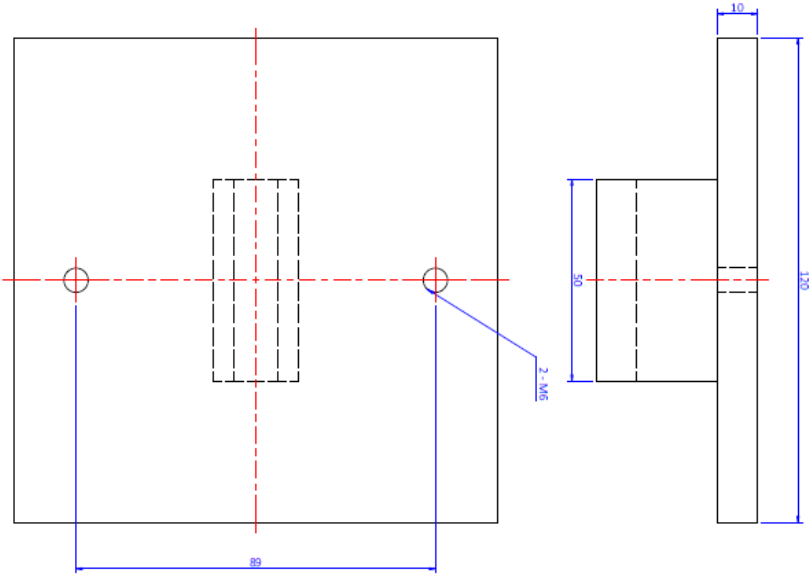


This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.

Status:	Rev:	Date:	Approved by:
	1	06.02.2023	B. Aurskål
DEEPOCEAN			
Drawing title			
Project title			
Client			
Drawing no. Tagning			
Projection:			Sheet
			6 of 7

NOT ISSUED FOR USE

This document is the property of DeepOcean and shall not be reproduced, copied, disclosed or used in any manner without written permission of DeepOcean.



Gen. Tol. :
 NS-EN 10204 3.1
 Gen. Weiting :
 NS-EN 10204 3.1
 Gen. Machined surface:
 NS-EN 10204 3.1
 Gen. Roughness:
 NS-EN 10204 3.1

NOTES:
 1. Material certificate according to NS-EN 10204 3.1
 2. Break sharp edges.

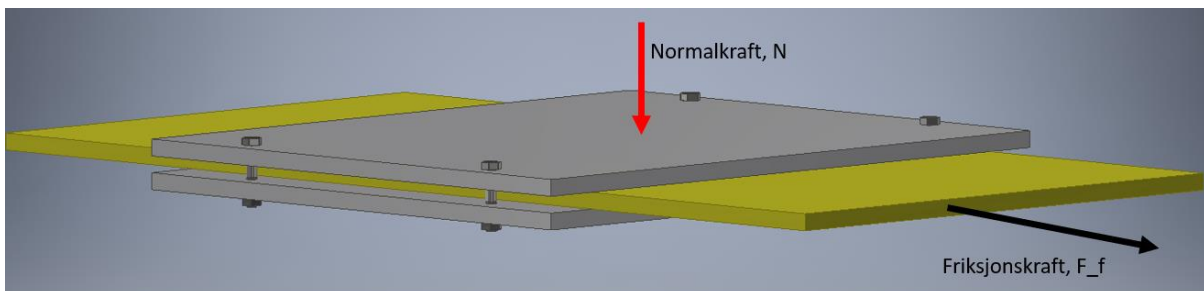
Rev.:	Date:	Approved by:	Checked by:	Drawn by:
1		B. Auzad		
DEEPOCEAN				
Drawing title				
Project title				
Client				
Drawing no.				
Top_assembly				
Projection:				Sheet
				1 of 1

Vedlegg C - Alternative design

Gruppen hadde flere forslag til design. De tre neste delkapitlene omhandler disse og hvorfor de ikke ble valgt.

Vedlegg C.1 - Første skisse

Den første skissen (Figur C. 1) som gruppen tegnet viste enkle prinsipp, men den viste også noen av problemene som ble viktige for utviklingen av den endelige løsningen.



Figur C. 1: Første skisse

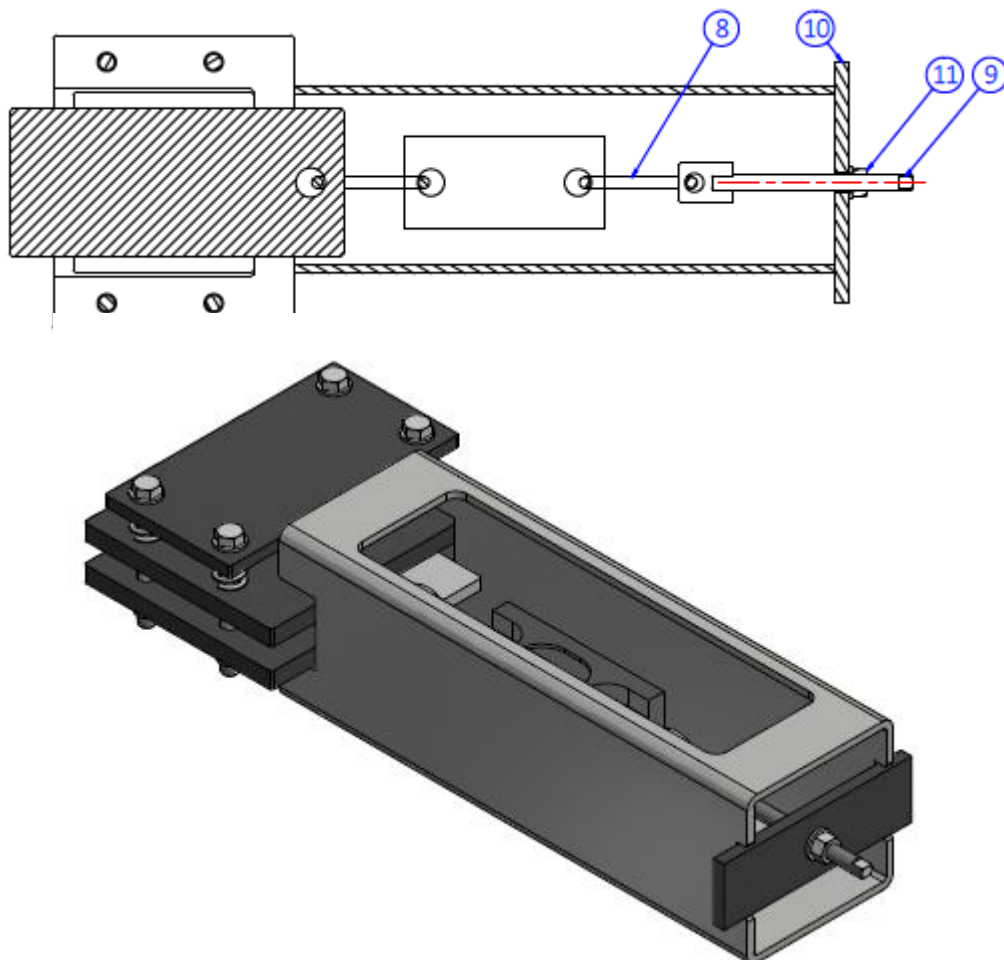
1. Orientering av testoppsettet: Horisontalt eller vertikalt. Dersom oppsettet ble plassert slik at friksjonskreftene pekte vertikalt, unngikk vi å måtte ta hensyn til oppsettes vekt når vi skulle regne ut normalkraften.
2. En eller to kontaktflater: Dersom vi kun benyttet oss av en kontaktflate, kunne vi ha hatt en høyere normalkraft, da vi kun hadde fått en friksjonskraft. Nedsiden med én kontaktflate er at det er vanskeligere i designfasen. Med to kontaktflater slipper vi også å tenke på at oppsettet er i forflytning, noe som er et problem med hensyn på måling av kreftene.
3. Hvordan skape normalkraften: Er bolter den beste løsningen? Bolter kan gi god stabilitet og forhindrer forflytning, men det kan også være vanskelig å få nøyaktige normalkrefter. I tillegg er det lett å få en ubalansert fordeling av normalkreftene på overflaten.
4. Hvordan skape forflytning/friksjonskreftene? Skal det brukes en annen bolt og skape en slags «skrustikke» eller skal vi dytte platene i stedet?
5. Hvordan inkludere lastceller eller andre sensorer? Skissen viser ingen løsning for dette.

Vedlegg C.2 - Første Design

Etter å ha sendt skissen til DeepOcean, fikk gruppen tilbake et opptegnet forslag. Konseptet gikk ut på å stramme fire bolter og deretter måle forskyvningen av fjærene og så bruke fjærkonstanten til å finne normalkraften. Deretter strammes mutteren på gjengestangen for å skape forflytning og det blir målt av friksjonskraft på en vekt eller lastcelle koblet til gjengestangen. En av de store fordelene med dette oppsettet er at det er veldig kompakt og det tar ikke lang tid å maskinere. Det var noen problemer som gruppen i samråd med veilederne identifiserte og utbedret. Punktene som måtte forbedres var:

1. Ikke nøyaktige nok målinger ved å måle forskyvning av fjærer.
2. Mulig med ujevn fordeling av last med fire skruer.
3. Kapasitet til SHS-profil.
4. Kreftene det ønskes å påsette er gjerne større enn hva oppsettet tåler.
5. Torsjon i lastcelle/vekt til friksjonskraften må unngås for å forhindre feilkilder og/eller skade av utstyret.

Forslaget ga ellers et godt utgangspunkt til utvikling av konseptet.

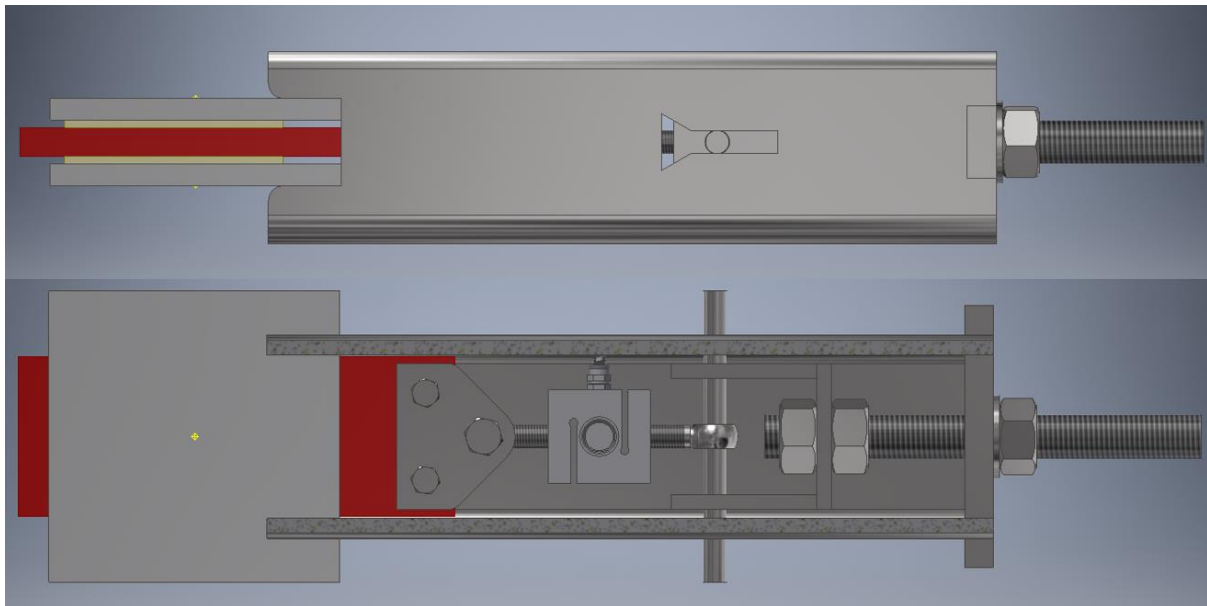


Figur C. 2: Forslag fra DeepOcean

Vedlegg C.3 - Andre design

Etter flere versjoner kom gruppen frem til dette forslaget (Figur C. 3). Tanken var å bruke en 10 tonns presse til å skape normalkraften og måle denne med en pancake-type lastcelle. For friksjonskraften var tanken å bruke en S-type lastcelle. For å motvirke torsjon i systemet skulle en stang gå i en spor i SHS-profilen. Det ble gjort beregninger for tiltrekkingsmoment, boltkapasiteter og kapasiteten til SHS-profilen.

Gruppen kom frem til at dette oppsettet mest sannsynlig hadde fungert, men at det kom til å bli dyrt å produsere. Det er også mange små deler, og derfor er det større sannsynlighet for at noe uforutsett ødelegges. Dette prinsippet ble derfor skrapet og gruppen valgte en annen tilnærming til løsningen.



Figur C. 3: Forbedret testoppsett

Vedlegg C.4 - Proof of Concept

I samråd med veiledere oppdaget gruppen noen problemer med forslaget til testoppsettet i C.3. Et av problemene var at det kunne være vanskelig å ha kontroll på hastigheten og avstanden boltene forflytter seg når vi skrur på mutteren, og derfor kunne det være vanskelig å få en lesbar graf.

Gruppen ville teste dette på lab før vi eventuelt produserte det fullstendige oppsettet. Gruppen benyttet seg av en skrustikke for å frembringe kraften. Lastcellen som ble brukt var en PASCO PASPORT Force Sensor PS-2104 50N lastcelle i kombinasjon med Pasco Capstone (Figur C. 4). Overflaten som her ble testet var malt stål/aluminium. For å få mer nøyaktige resultater valgte gruppen å legge til mer masse. Den totale massen endte på 4390 [g]. Den enkle prosedyren som ble fulgt var:

1. Kontakt mellom testmateriale, lastcelle og skrustikke for å forhindre støt.
2. Start logging av data.
3. Vri om skrustikke med moderat/lav hastighet til testmateriale er i bevegelse.
4. Etter noen sekunder med bevegelse, skru av logging og eksporter data.
5. Nullstill testoppsettet til startposisjon.



Figur C. 4: Testoppsett "Proof of Concept"

Gruppen utførte 10 forsøk med samme startparametere og logget data. Dataene ble deretter eksportert i .txt-format før de ble importert i MATLAB og analysert (Vedlegg A.1). Grafene viste tydelig både statisk og dynamisk område for friksjonskraften (Vedlegg A.2).

Gruppen testet også aluminium mot aluminium friksjon, men det var ut i fra grafen vanskelig å se hvilket område som var statisk og dynamisk. Etter lab var utført lagde gruppen en hypotese om at den dynamiske og statiske friksjonskoeffisienten til aluminium/aluminium er ganske like, og at dette var grunnen til at grafen var vanskelig å tyde.

Ut i fra resultatene fra lab konkluderte gruppen med at konseptet var gyldig og gjennomførbart.

Vedlegg D - Beregninger

Vedlegg D.1 - Knekking

Knekking:	
E-modul:	$E := 210 \text{ GPa}$
Effektiv-lengdefaktor:	$K := 2$
Frittstående lengde:	$L := 50 \text{ mm}$
Platebredde:	$W := 70 \text{ mm}$
Platetykkelse:	$t := 10 \text{ mm}$
Første arealtregningsmoment:	$I_1 := \frac{t \cdot W^3}{12} = 285833.333 \text{ mm}^4$
Andre arealtregningsmoment:	$I_2 := \frac{t^3 \cdot W}{12} = 5833.333 \text{ mm}^4$
Minste arealtregningsmoment:	$I := \min(I_1, I_2) = 5833.333 \text{ mm}^4$
Kritisk knekkraft:	$P_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{(K \cdot L)^2} = 123.286 \text{ tonnef}$

The diagram illustrates the geometry of the plate. The top view shows a rectangular plate with a central red strip of thickness t . The total width of the plate is W and the length is L . The side view shows the plate's profile with width W and length L .

Vedlegg D.2 - Bolter

Flatetrykk og krefter		
BOLT PARAMETERS		
D_{table} (mm)	p_{table} (mm)	s_{table} (mm)
10	1.5	16
12	1.75	18
14	2	21
16	2	24
20	2.5	30
24	3	36
30	3.5	46
36	4	55

Normalkraft:	$N := 5 \text{ tonnef}$
Boltdiameter:	$d := 16 \text{ mm}$
Antall bolter:	$n := 4$
Gjengestigning:	$p := \text{lookup}(d, D_{table}, p_{table}) = [2] \text{ mm}$
Bolt Middeldiameter	$d_2 := d - 0.6495 \cdot p = [14.701] \text{ mm}$
Bolt Middelradius:	$r_m := \frac{d_2}{2} = 7.351 \text{ mm}$
Bolt Innerdiameter:	$d_3 := d - 1.2269 \cdot p = 13.546 \text{ mm}$
Bolt Hulldiameter:	$d_h := d + 1 \text{ mm} = 17 \text{ mm}$
Bolt Strekkareal:	$A_s := \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{d_2 + d_3}{2} \right)^2 = 156.668 \text{ mm}^2$
Nøkkelvidde:	$s := \text{lookup}(d, D_{table}, s_{table}) = [24] \text{ mm}$
Flytspenning bolt:	$f_y := 640 \text{ MPa}$
Sikkerhetsfaktor:	$SF := 2$
Tillatt spenning:	$\sigma_{allowed} := \frac{f_y}{SF} = 320 \text{ MPa}$
Friksjonskoeffisient gjenger:	$\mu_t := \begin{bmatrix} 0.18 \\ 0.35 \end{bmatrix}$
Friksjonskoeffisient bolthode mot overflate:	$\mu_h := \begin{bmatrix} 0.19 \\ 0.35 \end{bmatrix}$

Gjengevinkel:	$\alpha := 30 \text{ deg}$
Radius for arealet i kontakt med bolthodet og overflate:	$r_m' := \frac{d_h + s_0}{2} = 20.5 \text{ mm}$
Last på hver bolt:	$F_1 := \frac{N}{n} = 1.25 \text{ tonnef}$
Maksimal last på bolt:	$F_a := 1.8 \cdot F_1 = 2.25 \text{ tonnef}$
Forspenning kraft:	$F_i := 1.5 \cdot F_1 = 1.875 \text{ tonnef}$
Moment for å overvinne friksjon i gjengene:	$M_v := F_i \cdot r_m \cdot \tan \left(\operatorname{atan} \left(\frac{\mu_t}{\cos(\alpha)} \right) + \operatorname{atan} \left(\frac{P_0}{\pi \cdot d_{20}} \right) \right) = \begin{bmatrix} 34.253 \\ 61.553 \end{bmatrix} \text{ N} \cdot \text{m}$
Moment for å overvinne friksjon mellom bolthodet og overflaten:	$M_s := F_i \cdot \mu_h \cdot r_m' = \begin{bmatrix} 71.619 \\ 131.93 \end{bmatrix} \text{ N} \cdot \text{m}$
Totalt spenningsmoment:	$M := M_v + M_s = \begin{bmatrix} 105.872 \\ 193.483 \end{bmatrix} \text{ N} \cdot \text{m}$ $M = \begin{bmatrix} 10.796 \\ 19.73 \end{bmatrix} \text{ kgf} \cdot \text{m}$
Strekkspenning bolt:	$\sigma_{bolt} := \frac{F_a}{A_s} = 140.839 \text{ MPa}$
Skjærspenning bolt:	$\tau_{bolt} := \frac{M_v}{\left(\frac{\pi \cdot d_3^3}{16} \right)} = \begin{bmatrix} 70.181 \\ 126.116 \end{bmatrix} \text{ MPa}$
Ekvivalent spenning:	$\sigma_{eq} := \sqrt{\sigma_{bolt}^2 + 3 \cdot \tau_{bolt}^2} = \begin{bmatrix} 186.042 \\ 259.906 \end{bmatrix} \text{ MPa}$
Bolt utnyttelse:	$\eta := \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_{allowed}} = \begin{bmatrix} 0.581 \\ 0.812 \end{bmatrix}$

Vedlegg D.3 - Lastceller

Lastcelledata:	
Max kapasitet:	$F_{max} := \begin{bmatrix} 5 \text{ tonnef} \\ 1 \text{ tonnef} \end{bmatrix}$
Sensitivitet:	$s := 2 \frac{mV}{V}$
Spenningskilde:	$V_{supply} := 10 \text{ V}$
Maksimalt signal ut:	$V_{out} := V_{supply} \cdot s = 20 \text{ mV}$
Kraft per spenning:	$\alpha := \frac{F_{max}}{V_{out}} = \begin{bmatrix} 250000 \\ 50000 \end{bmatrix} \frac{kgf}{V}$

Vedlegg D.4 - Hardhet

Hardhet

$$HBW_{kalibrert} := 194 \frac{N}{mm^2}$$

$$F := 187.5 \text{ kgf} = 1838.747 \text{ N}$$

$$HBW = 0.102 \frac{2F}{\pi D \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right)}$$

$$D := 2.5 \text{ mm}$$

$$d_{kalibrert} := \sqrt{D^2 - \left(D - \frac{0.102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot HBW_{kalibrert}} \right)^2} = 1.082 \text{ mm}$$

$$D_{mikroskop} := 91 \text{ mm}$$

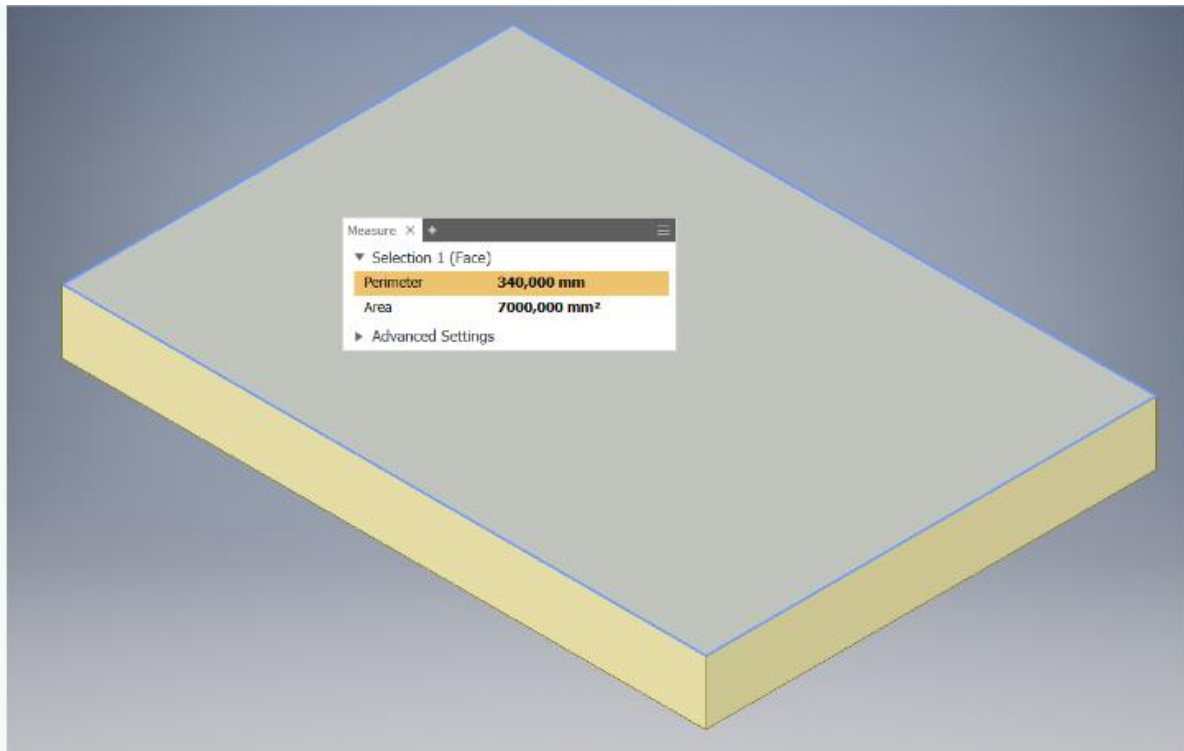
$$\alpha := \frac{D_{mikroskop}}{d_{kalibrert}} = 84.118$$

$$D_{material_mikroskop} := 97 \text{ mm}$$

$$d_{material} := \frac{D_{material_mikroskop}}{\alpha} = 1.153 \text{ mm}$$

$$HBW_{material} := 0.102 \cdot \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_{material}^2} \right)} = 169.462 \frac{N}{mm^2}$$

Vedlegg D.5 - Flatetrykk



$$A := 7000 \text{ mm}^2$$

$$N := \begin{bmatrix} 0.5 \\ 0.75 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} \text{ tonnef} \quad + \quad \sigma := \frac{N}{A} = \begin{bmatrix} 0.7 \\ 1.051 \\ 1.401 \\ 2.802 \\ 4.203 \end{bmatrix} \text{ MPa}$$

Vedlegg E - Diverse MATLAB script

Vedlegg E.1 - Ruhet

```
forsok = ["0" "plast" "16" "32" "63" "123"]; %De ulike platene som testes
for j = 1:length(forsok)
    if j < 3 %Kun en plate for plast og ikke-frest stålplate
        k = 3;
    else
        k = 6;
    end
    for i = 1:k
        %Setter sammen tittel til forsøket for automasjon
        doc = 'Ruhet' + forsok(j) + string(i);
        %Henter data fra importert data
        val = xlsread('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Ruhetsmåling\' + doc,2,'E:F');
        R_a = sum(abs(val(:,2)))/length(val(:,2)); %Regner ut Ra
        plt = figure();
        plt.WindowState = 'maximized';
        plot(val(:,1),val(:,2),'k'); %Plotter data
        %Setter inn ruhet i figuren
        text(val(end,1)./2,min(val(:,2))-abs(min(val(:,2)))*0.1,'Målt R_a
= ' + string(R_a), 'FontSize',28);
        xlabel('Lengde målt [mm]', 'FontSize',28) %Navn på x-akse
        ylabel('Høyde [µm]', 'FontSize',28) %Navn på y-akse
        set(gca, 'FontSize',28) %Endrer skriftstørrelsen på aksenummer
        %Setter y-område til figuren
        ylim([min(val(:,2))-abs(min(val(:,2)))*0.2 max(val(:,2))*1.1])
        %Lagrer som vektorbasert bilde
        saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Ruhetsmåling\' + doc + '.svg');
        %Lukker figuren for å ikke overstige minne til PC. Mye data.
        close(plt);
        clear val
    end
end
```

Vedlegg E.2 - Friksjonsdata

```

%Setter like grenser for alle figurene for enkle sammenligninger
ygrense = [0 0.5];
xgrense = [0 3.25];
%Normalkreftene
normalkrafttekst = ["_5" "1" "2" "3"];
normalkraftf = [0.5 1 2 3];
%Overflatene som testes
overflate = ["16" "32" "63" "123"];
%Formattering av grafer og skriftstørrelser
ls = [":" "--" "-." "-"];
linjetykkelse = 1;
fs = 28;

%Stål mot stål
for j = 1:length(overflate)
    %Tomme matriser til lagring av standardavvik og friksjonskoeffisient
    std = [];
    mean_COF = [];
    for i = 1:length(normalkrafttekst)
        k = true;
        l = 1;
        COF = [];
        while k == true
            doc = 'Resultat' + normalkrafttekst(i) + 'Te' + overflate(j) +
string(l);
            if isfile('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt') == false
                k = false;
            else
                %Importerer data og regner ut friksjonskoeffisient
                current = importdata('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt', ' ');
                friksjonskraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,2),',','.')) ./2;
                normalkraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,1),',','.'));
                COF(l) = max(friksjonskraft) ./ mean(normalkraft);
                l = l + 1;
            end
        end
        %Regner ut gjennomsnittlig friksjonskoeffisient
        COF = fjernverst(COF);
        mean_COF(i) = mean(COF);
        avvik = (COF - mean_COF(i)).^2;
        %Regner ut standardavvik
        std(i) = sqrt(mean(avvik));
    end
    if j == 1
        staal = figure('Name','Stål');
    end
    %Plotter med standardavvik
    plt = errorbar(normalkraftf,mean_COF,std);
    plt.LineStyle = ls(j);
    plt.Color = 'k';
    plt.LineWidth = linjetykkelse;
    hold on
end
%Setter inn grafetiketter
legend('R_a = ' + string(str2double(overflate) ./10) + ' μm', 'FontSize', fs)

```

```

xlabel('Normalkraft [Te]', 'FontSize', fs) %Navn på x-akse
ylabel('COF [-]', 'FontSize', fs) %Navn på y-akse
set(gca, 'FontSize', fs) %Endrer skriftstørrelsen til aksenummer
xlim(xgrense) %Endrer x-grensene til figuren
ylim(ygrense) %Endrer y-grensene til figuren
staal.WindowState = 'maximized'; %Maksimerer vindu
%Lagrer som vektorbasert bilde
saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Bilder\Grafer\stal_mot_stål_origo2.svg')

%Plast
for j = 1:length(overflate)
    std = [];
    mean_COF = [];
    for i = 1:length(normalkrafttekst)
        k = true;
        l = 1;
        COF = [];
        while k == true
            doc = 'Resultatp' + normalkrafttekst(i) + 'Te' + overflate(j) +
string(l);
            if isfile('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt') == false
                k = false;
            else
                current = importdata('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt', ' ');
                friksjonskraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,2), ',', '.')) ./2;
                normalkraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,1), ',', '.'));
                COF(l) = max(friksjonskraft) ./mean(normalkraft);
                l = l + 1;
            end
        end
        COF = fjernverst(COF);
        mean_COF(i) = mean(COF);
        avvik = (COF - mean_COF(i)).^2;
        std(i) = sqrt(mean(avvik));
    end
    if j == 1
        plast = figure('Name', 'plast');
    end
    plt = errorbar(normalkraftf, mean_COF, std);
    plt.LineStyle = ls(j);
    plt.Color = 'k';
    plt.LineWidth = linjetykkelse;
    hold on
end
legend('R_a = ' + string(str2double(overflate) ./10) + ' µm', 'FontSize', fs)
xlabel('Normalkraft [Te]', 'FontSize', fs)
ylabel('COF [-]', 'FontSize', fs)
set(gca, 'FontSize', fs)
xlim(xgrense)
ylim(ygrense)
plast.WindowState = 'maximized';
saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Bilder\Grafer\stal_mot_plast_origo2.svg')

```

```

%Plast mot avfettet stål
overflate = ["32" "63" "123"];
ls = ls(2:end);
for j = 1:length(overflate)
    std = [];
    mean_COF = [];
    for i = 1:length(normalkrafttekst)
        k = true;
        l = 1;
        COF = [];
        while k == true
            doc = 'Resultatop' + normalekrafttekst(i) + 'Te' + overflate(j) +
string(l);
            if isfile('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt') == false
                k = false;
            else
                current = importdata('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt', ' ');
                friksjonskraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,2), ',', '.')) ./ 2;
                normalekraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,1), ',', '.'));
                COF(l) = max(friksjonskraft) ./ mean(normalkraft);
                l = l + 1;
            end
        end
        COF = fjernverst(COF);
        mean_COF(i) = mean(COF);
        avvik = (COF - mean_COF(i)).^2;
        std(i) = sqrt(mean(avvik));
    end
    if j == 1
        plastastal = figure('Name', 'plastastal');
    end
    plt = errorbar(normalkraftf, mean_COF, std);
    plt.LineStyle = ls(j);
    plt.Color = 'k';
    plt.LineWidth = linjetykkelse;
    hold on
end
legend('R_a = ' + string(str2double(overflate) ./ 10) + ' µm', 'FontSize', fs)
xlabel('Normalkraft [Te]', 'FontSize', fs)
ylabel('COF [-]', 'FontSize', fs)
set(gca, 'FontSize', fs)
xlim(xgrense)
ylim(ygrense)
plastastal.WindowState = 'maximized';
saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Bilder\Grafer\avfettet_stal_mot_plast_origo2.svg')

%Avfettet stål
%overflate = ["16" "32" "63" "123"];
overflate = ["32" "63" "123"];
%ls = [":" "--" "-." "-"];
ls = ["--" "-." "-"];
normalkrafttekst = ["_5" "_75" "1"];
normalkraftf = [0.5 0.75 1];
for j = 1:length(overflate)
    std = [];

```

```

mean_COF = [];
for i = 1:length(normalkrafttekst)
    k = true;
    l = 1;
    COF = [];
    while k == true
        doc = 'Resultata' + normalkrafttekst(i) + 'Te' + overflate(j) +
string(l);
        if isfile('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt') == false
            k = false;
        else
            current = importdata('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt', ' ');
            friksjonskraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,2), ',', '.')) ./ 2;
            normalkraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,1), ',', '.'));
            COF(l) = max(friksjonskraft) ./ mean(normalkraft);
            l = l + 1;
        end
    end
    COF = fjernverst(COF);
    mean_COF(i) = mean(COF);
    avvik = (COF - mean_COF(i)).^2;
    std(i) = sqrt(mean(avvik));
end
if j == 1
    astaal = figure('Name', 'astaal');
end
plt = errorbar(normalkraftf, mean_COF, std);
plt.LineStyle = ls(j);
plt.Color = 'k';
plt.LineWidth = linjetykkelse;
hold on
end
legend('R_a = ' + string(str2double(overflate) ./ 10) + ' μm', 'FontSize', fs)
xlabel('Normalkraft [Te]', 'FontSize', fs)
ylabel('COF [-]', 'FontSize', fs)
set(gca, 'FontSize', fs)
xlim(xgrense)
ylim(ygrense)
%ylim([0 0.8])
astaal.WindowState = 'maximized';
saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Bilder\Grafer\astal_mot_stal_origo2.svg')

%Stål Under vann
overflate = ["32" "63" "123"];
ls = ["--" "-." "--"];
normalkrafttekst = ["_5" "_75" "1" "2"];
normalkraftf = [0.5 0.75 1 2];
for j = 1:length(overflate)
    std = [];
    mean_COF = [];
    for i = 1:length(normalkrafttekst)
        k = true;
        l = 1;
        COF = [];
        while k == true

```

```

        doc = 'Resultatu' + normalkrafttekst(i) + 'Te' + overflate(j) +
string(l);
        if isfile('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt') == false
            k = false;
        else
            current = importdata('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt', ' ');
            friksjonskraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,2), ',', '.')) ./2;
            normalkraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,1), ',', '.'));
            COF(l) = max(friksjonskraft) ./ mean(normalkraft);
            l = l + 1;
        end
    end
    COF = fjernverst(COF);
    mean_COF(i) = mean(COF);
    avvik = (COF - mean_COF(i)).^2;
    std(i) = sqrt(mean(avvik));
end
if j == 1
    ustaal = figure('Name', 'ustaal');
end
plt = errorbar(normalkraftf, mean_COF, std);
plt.LineStyle = ls(j);
plt.Color = 'k';
plt.LineWidth = linjetykkelse;
hold on
end
legend('R_a = ' + string(str2double(overflate) ./10) + ' μm', 'FontSize', fs)
xlabel('Normalkraft [Te]', 'FontSize', fs)
ylabel('COF [-]', 'FontSize', fs)
set(gca, 'FontSize', fs)
xlim(xgrense)
ylim(ygrense)
ustaal.WindowState = 'maximized';
saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Bilder\Grafer\ustal_mot_origo2.svg')

%Stål mot plast Under vann
overflate = ["32" "63" "123"];
ls = ["--" "-." "-"];
normalkrafttekst = ["_5" "1" "2" "3"];
normalkraftf = [0.5 1 2 3];
for j = 1:length(overflate)
    std = [];
    mean_COF = [];
    for i = 1:length(normalkrafttekst)
        k = true;
        l = 1;
        COF = [];
        while k == true
            doc = 'Resultatup' + normalkrafttekst(i) + 'Te' + overflate(j) +
string(l);
            if isfile('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt') == false
                k = false;
            else
                current = importdata('C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Resultater\' + doc + '.txt', ' ');

```

```

        friksjonskraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,2),',','.')) ./2;
        normalkraft =
str2double(strrep(current.textdata(:,1),',','.'));
        COF(1) = max(friksjonskraft) ./mean(normalkraft);
        l = l + 1;
    end
end
COF = fjernverst(COF);
mean_COF(i) = mean(COF);
avvik = (COF - mean_COF(i)).^2;
std(i) = sqrt(mean(avvik));
end
if j == 1
    uplast = figure('Name','uplast');
end
plt = errorbar(normalkraftf,mean_COF,std);
plt.LineStyle = ls(j);
plt.Color = 'k';
plt.LineWidth = linjetykkelse;
hold on
end
legend('R_a = ' +string(str2double(overflate) ./10) + ' μm', 'FontSize',fs)
xlabel('Normalkraft [Te]', 'FontSize',fs)
ylabel('COF [-]', 'FontSize',fs)
set(gca, 'FontSize',fs)
xlim(xgrense)
ylim(ygrense)
uplast.WindowState = 'maximized';
saveas(gcf, 'C:\Users\baard\OneDrive - Høgskulen på
Vestlandet\Bachelor\Bilder\Grafer\ustal_mot_plast_origo2.svg')

```


Vedlegg E.3 - Fjernverst – egen MATLAB funksjon

```
function a = fjernverst(vektor)
    med = median(vektor);
    k = true;
    while k == true
        if length(vektor) > 10
            di = abs(vektor - med);
            [M,I] = max(di);
            vektor(I) = [];
        else
            k = false;
        end
    end
    a = vektor;
end
```

Vedlegg E.4 - Oppløsning eksempel

```

syms X
lowresbit = 3;
highresbit = 8;
yrange = 0.1;
lowresystep = linspace(0,yrange,2^lowresbit);
highresystep = linspace(0,yrange,2^highresbit);
eqn = 0.05*sin(X)+0.05
x = [0:0.01:2*pi];
val = zeros(1,length(x));
lowresval = zeros(1,length(x));
highresval = zeros(1,length(x));
for i = 1:length(x)
    val(i) = double(subs(eqn,X,x(i)));
    for j = 1:length(lowresystep)
        diff = abs(lowresystep(j) - val(i));
        if j == 1
            diff1 = diff;
            lowresval(i) = lowresystep(j);
        elseif diff < diff1
            diff1 = diff;
            lowresval(i) = lowresystep(j);
        end
    end
    for k = 1:length(highresystep)
        diff = abs(highresystep(k) - val(i));
        if k == 1
            diff1 = diff;
            highresval(i) = highresystep(k);
        elseif diff < diff1
            diff1 = diff;
            highresval(i) = highresystep(k);
        end
    end
end
end
plt = figure()
hold on
plot(x,lowresval,'LineWidth',3)
plot(x,highresval,'LineWidth',3)
plot([0 2*pi], [lowresystep(1) lowresystep(1)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(2) lowresystep(2)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(3) lowresystep(3)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(4) lowresystep(4)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(5) lowresystep(5)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(6) lowresystep(6)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(7) lowresystep(7)], 'k')
plot([0 2*pi], [lowresystep(8) lowresystep(8)], 'k')
text(pi/2,lowresystep(1)+0.003,'000','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(2)+0.003,'001','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(3)+0.003,'010','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(4)+0.003,'011','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(5)+0.003,'100','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(6)+0.003,'101','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(7)+0.003,'110','FontSize',20)
text(pi/2,lowresystep(8)+0.003,'111','FontSize',20)
legend(string(lowresbit) + '-bit oppløsning',string(highresbit) + '-bit
oppløsning','FontSize',20)
xlabel('x','FontSize',20)
ylabel('y','FontSize',20)

```

```
title(string(lowresbit) + '-bit oppløsning vs. ' + string(highresbit) + '-  
bit oppløsning','FontSize',30)  
plt.WindowState = 'maximized';  
ylim([-0.005 0.1+0.005])  
saveas(gcf, 'D:\Matlabfolder\MATLAB\Results\resolutionexample.png')
```

