

Vegard Dale Bjørkedal
Henrik Døsvik

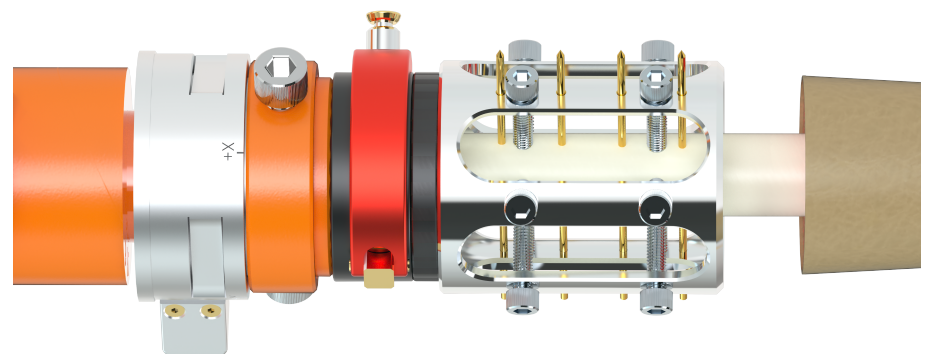
Testjigg for Biomekanisk Knetesting

Bacheloroppgave i Produkt- og Systemdesign

Veileder: Paul Steffen Kleppe

Medveileder: Øystein Bjelland

Mai 2021



Vegard Dale Bjørkedal
Henrik Døsvik

Testjigg for Biomekanisk Knetesting

Bacheloroppgave i Produkt- og Systemdesign
Veileder: Paul Steffen Kleppe
Medveileder: Øystein Bjelland
Mai 2021

Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet
Fakultet for ingeniørvitenskap
Institutt for havromsoperasjoner og byggteknikk

Forord

Dette er en teknisk rapport som besvarer det avsluttende prosjektet for Produkt- og Systemdesign ved NTNU i Ålesund. Oppgaven ble presentert og bestemt i begynnelsen av desember 2020, og videre formulert i slutten av januar 2021.

Prosjektet gikk ut på å forbedre festemetoden av kadaver som brukes ved den tekniske biomekaniske laben hos Ålesund sykehus. Laben forsker på nye kirurgiske behandlingsmetoder og ønsker å bli et ledende forskningslaboratorium i Skandinavia.

Vi vil gjøre oppmerksom på at denne oppgaven ble påvirket negativt av Covid-19 pandemien. Tilgang på lab og verksted ble begrenset, noe som førte til at en viktig del av oppgaven ikke kunne bli gjennomført slik som det var planlagt.

Vi ønsker å takke veiledere Paul Steffen Kleppe og Øystein Bjelland ved NTNU Ålesund, samt faglig kontaktperson Andreas Fagerhaug Dalen ved Ålesund sykehus.

Takk til NTNU Ålesund for å ha stilt med lokaler, utstyr og materiell til disposisjon.

Prosjektet har pågått i perioden 13. Januar 2021 til innlevering 20. Mai 2021.



Vegard Dale Bjørkedal



Henrik Døsvik

Sammendrag

Rapporten tar for seg arbeidsprosessen av forbedring av testjiggen til Ålesund biomekaniske lab med grunnlag i ny teknologi. Målet med oppgaven er å utvikle et bedre konsept for festing av kne-kadaver, samt utvikle et nytt oppsett av en testjigg, ved bruk av teknologi som 3D-modellering, 3D-printing og bygging av en funksjonell prototype. Fremgangsmåten som blir brukt for å nå det endelige resultatet, samt beslutninger og vurderinger som er tatt underveis, er beskrevet.

I samarbeid med forskerne utviklet vi flere skisser, konsepter og 3D-printede prototyper. Til slutt produserte vi også en fungerende prototype i metall.

Innholdet i rapporten inkluderer litteraturstudiet for hva biomekaniske tester går ut på, forskningen ved den biomekaniske laben i Ålesund, samt kartlegging av lignende arbeid, relevant teknologi og arbeidsprosessen. I tillegg er vurdering av diverse konsept, resultater, analyse av dagens prosess med grunnlag i *lean manufacturing* og diskusjon rundt arbeidet beskrevet.

Resultatet er et nytt oppsett for testjiggen til Ålesund biomekaniske lab, som baserer seg på utstyret de allerede bruker, en sylindere av aluminium med spisse bolter og gjennomgående låsepinner samt et kuleledd.

Abstract

The rapport undertakes the workflow of analyzing previous work and improving it based on new technology. The purpose of the thesis is to develop a new and better concept for attaching a knee-cadaver, using 3D-modelling, 3D-printing, and then building a functional prototype. The steps undertaken to reach the results are described, along with decisions and assessments taken throughout the process.

We accomplished several promising concepts and developed a prototype of the most promising.

The contents of this report include a literature study of what biomechanical testing is, the work done at Ålesund biomechanical lab, mapping of similar work, relevant technologies, and work process. In addition, assessment of diverse methods, results, and an analyze of today's process based on *lean manufacturing* and discussion regarding the work done.

The results are a new setup for the test-rig at Ålesund biomechanical lab, which is based on a cylinder with pointy bolts, piercing steel rods and a ball joint.

Oppgaven:

Ålesund sykehus ønsker å bli ledende innen forskning på ledd og har siden 2017 jobbet med å bygge opp en biomekanisk lab i samarbeid med NTNU Ålesund. Laben har to doktorgradsstipendiater, i tillegg til forskningsansatte. Laben er unik i Skandinavia og man har tidligere vært nødt til å reise til bl.a Hannover i Tyskland for å gjennomføre liknende ortopediske og biomekaniske tester. Ved hjelp av ingeniører fra NTNU er målet å gjennomføre presise forsøk ved å bruke både kopier av ledd og ekte ledd for å finne nye teknikker og behandlinger.

I dag har de en avansert industrirobot som tester ulike ledd som knær og skuldre. For øyeblikket støpes beinene fast til en sylinder-kobling som igjen festes til roboten. De ønsker en bedre metode for innfesting av bein, slik at prosessen blir raskere og mer lik for hvert enkelt testobjekt. Dette vil føre til mer pålitelige forskningsresultater, og vil forenkle hele prosessen.

I samarbeid med Ålesund sykehus skal det gjennomføres litteraturstudie for å gjøre rede for tidligere, lignende forskning. Det skal utvikles en testjigg for knær med enkel innfesting. Testjiggen bør også enkelt kunne tilpasses andre ledd som for eksempel albue og skuldre. Prototypen skal 3D-modelleres og bør kunne bygges i et prototypeverksted. Det skal være mulig for Ålesund sykehus å printe ut reservedeler selv, eller bestille hos Manulab ved NTNU Ålesund.

Prosjektet består av:

- Planlegge prosjektet. Sette opp prosjektplan for gjennomføring av prosjektet og koordinering av aktiviteter mellom prosjektteamene.
- Brukerinteraksjon - Snakke med brukere og fagpersoner for å identifisere behov ønsker og muligheter for utforming av testjigg.
- Litteraturstudiet
- Tidlig prototype
- Designe og bygge testjigg
- I oppgaven skal det brukes moderne designverktøy som Teamcenter/NX/Virtual Reality

Veiledere ved NTNU i Ålesund er Paul Steffen Kleppe og Øystein Bjelland. Faglig veileder ved Ålesund Sykehus er Andreas Fagerhaug Dalen. Studentene kaller inn til statusmøter for prosjektet hver 14. dag.

Besvarelsen redigeres som en teknisk rapport, med et sammendrag både på norsk og engelsk, konklusjon, litteraturliste, innholdsfortegnelse etc. Ved utarbeidelsen av teksten skal kandidaten legge vekt på å gjøre teksten oversiktlig og velskrevet. Med henblikk på lesning av besvarelsen er det viktig at de nødvendige henvisninger for korresponderende steder i tekst, tabeller og figurer anføres på begge steder. Ved bedømmelsen legges det stor vekt på at resultatene er grundig bearbeidet, at de oppstilles tabellarisk og/eller grafisk på en oversiktlig måte og diskuteres utførlig.

Innholdsfortegnelse

| | |
|--------------------------------------------------------------------|-------------|
| FORORD | I |
| SAMMENDRAG | II |
| ABSTRACT | III |
| OPPGAVEN: | IV |
| FIGUROVERSIKT | VIII |
| TABELLOVERSIKT | X |
| TERMINOLOGI | XI |
| 1. INNLEDNING | 1 |
| 1.1. Bakgrunn..... | 1 |
| 1.2. Formål | 1 |
| 1.3. Dagens lab-oppsett..... | 2 |
| 1.4. Dagens festemetode | 5 |
| 1.5. Kravspesifikasjoner..... | 7 |
| 1.6. Rapportens innhold | 7 |
| 2. TEKNOLOGI- OG BEHOVSANALYSE | 8 |
| 2.1. Historie..... | 8 |
| 2.2. Biomekanisk testing ved Ålesund Sykehus | 9 |
| 2.3. Fordeler og ulemper med å bytte fra støping | 14 |
| 2.4. Tidligere arbeid | 15 |
| 2.5. Utstyr som benyttes ved den biomekaniske laben i Ålesund..... | 16 |
| 2.6. Hurtigkoblinger..... | 20 |
| 2.7. Stage-gate modellen..... | 20 |
| 2.8. Multi-site team based engineering | 21 |
| 2.9. Rapid prototyping | 28 |
| 2.10. Styrkeberegning og topologioptimalisering..... | 29 |
| 3. ARBEIDSPROSESS | 30 |
| 3.1. Idémyldring..... | 30 |
| 3.2. Konseptfase 1 | 31 |
| 3.3. Konseptfase 2..... | 35 |
| 3.4. Valgt Konsept | 41 |

| | | |
|-----------|-----------------------------------------------|-----------|
| 3.5. | Nytt oppsett for testjiggen..... | 42 |
| 3.6. | Styrketest av produktet | 50 |
| 3.7. | Styrkeberegning | 52 |
| 3.8. | Topologioptimalisering..... | 54 |
| 4. | RESULTAT | 55 |
| 4.1. | Ferdig produkt..... | 55 |
| 4.2. | Montering..... | 57 |
| 4.3. | Mulighet for flere bruksområder..... | 58 |
| 4.4. | Nedbøying..... | 59 |
| 4.5. | Vektredusering | 59 |
| 5. | LEAN | 61 |
| 5.1. | Nåværende verdikjede | 61 |
| 5.2. | The 8 wastes of lean..... | 64 |
| 5.3. | Kartlegging av sløsing i dagens prosess | 66 |
| 5.4. | Prosesskart med vår nye festemetode | 69 |
| 6. | DISKUSJON | 71 |
| 6.1. | Produkt- og brukerkrav | 71 |
| 6.2. | Vanskeligheter | 72 |
| 6.3. | Forslag til videre forbedring | 73 |
| 7. | KONKLUSJON | 74 |
| 8. | BIBLIOGRAFI | 75 |

Figuroversikt

| | |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGUR 1: NÅVÆRENDE TESTOPPSETT FOR SKULDER VED ÅLESUND BIOMEKANISK LAB (EGET BILDE) | 2 |
| FIGUR 2: KOPI AV DAGENS FESTE MELLOM ROBOT OG TESTOBJEKT (EGET BILDE) | 3 |
| FIGUR 3: KOPI AV DAGENS FESTE MELLOM TESTOBJEKT OG FASTMONTERT STOLPE (EGET BILDE) | 3 |
| FIGUR 4: EKSEMPEL PÅ TESTOPPSETT I DAG (EGET BILDE) | 4 |
| FIGUR 5: ANATOMI KNE (MEDICAL NEWS TODAY, 2017) | 5 |
| FIGUR 6: EKSEMPEL PÅ STØPING (HENTET FRA ØYSTEIN BJELLAND) | 6 |
| FIGUR 7: «DE MOTO ANIMALIUM» (MILLER, 2016) | 8 |
| FIGUR 8: ANATOMI SKULDEREN (PETTERSEN, 2019) | 9 |
| FIGUR 9: ARTROSKOPISK BEHANDLINGSMETODE (VONDT.NET, 2021) | 10 |
| FIGUR 10: LATARJET PROCEDURE (SMITH, 2018) | 11 |
| FIGUR 11: ANATOMISK BILDE AV KNEET (LINE.17, 2021) | 12 |
| FIGUR 12: ANATOMI ANKEL (MEDICALSTOCKS, 2021) | 13 |
| FIGUR 13: TESTOPPSETT FOR FORSKNING PÅ KNÆR I HANNOVER (FERLE, 2020, S. 37) | 15 |
| FIGUR 14: KUKA KR6 (KUKA, 2020) | 16 |
| FIGUR 15: NYTTELAST-DIAGRAM KUKA KR6 (KUKA, 2020) | 17 |
| FIGUR 16: MASKINTEGNING ATI GAMMA (ATI INDUSTRIAL AUTOMATION, 2021) | 18 |
| FIGUR 17: MONTERING AV ATI GAMMA (EGET BILDE) | 18 |
| FIGUR 18: RØNTGENBILDE AV TESTOBJEKT FRA FIGUR 1 (EGET BILDE) | 19 |
| FIGUR 19: COOPERS "STAGE-GATE» MODELL (EGET BILDE) | 20 |
| FIGUR 20: EKSEMPEL PÅ FELLES MAPPE I TEAMCENTER (EGET BILDE) | 21 |
| FIGUR 21: EKSEMPEL PÅ MICROSOFT TEAMS (EGET BILDE) | 22 |
| FIGUR 22: EKSEMPEL PÅ ONEDRIVE (EGET BILDE) | 23 |
| FIGUR 23: EKSEMPEL PÅ SAMTALE I DISCORD MED DELING AV SKJERM (EGET BILDE) | 23 |
| FIGUR 24: EKSEMPEL PÅ SERVER I DISCORD (EGET BILDE) | 24 |
| FIGUR 25: ZOOM KONFERANSE MED VEILEDER (EGET BILDE) | 25 |
| FIGUR 26: EKSEMPEL PÅ FIGUR TEGNET I PAINT (EGET BILDE) | 26 |
| FIGUR 27: VR BILDE AV KONSEPT TIL TESTJIGG (EGET BILDE) | 27 |
| FIGUR 28: KONSEPTBILDE AV HYDRAULIKK (EGET BILDE) | 31 |
| FIGUR 29: KONSEPT AV UNIVERSALKLEMME MED SPISSE (EGET BILDE) | 32 |
| FIGUR 30: KONSEPTBILDE AV GJENGE BOLT SYSTEM (EGET BILDE) | 33 |
| FIGUR 31: BOLT MED PIGGPLATE V1 (EGET BILDE) | 33 |
| FIGUR 32: PROTOTYPE GJENGE BOLT SYSTEM V2 (EGET BILDE) | 34 |
| FIGUR 33: PROTOTYPE GJENGE BOLT SYSTEM V1 (EGET BILDE) | 34 |
| FIGUR 34: BOLT MED PIGGPLATE V2 (EGET BILDE) | 34 |
| FIGUR 35: MODELL AV BOLT MED NÅLESPISS (EGET BILDE) | 35 |
| FIGUR 36: BEINSTRUKTUR AV EN RØRKNOKKEL (BD EDITORS, 2017) | 35 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGUR 37: TAYLOR SPATIAL FRAME (FECAD, 2020) | 36 |
| FIGUR 38: EKSEMPEL PÅ KIRURGISK LÅSEPINNE SOM BRUKES I TAYLOR SPATIAL FRAME (EGET BILDE) | 37 |
| FIGUR 39: PROTOTYPE AV SYLINDER MED KIRURGISKE LÅSEPINNER (EGET BILDE) | 37 |
| FIGUR 40: TEST MED KIRURGISKE LÅSEPINNER I 3D-PRINTET PROTOTYPE (EGET BILDE) | 38 |
| FIGUR 41: TEST AV NÅLESPISSBOLTER I PROTOTYPE PRODUSERT I ALUMINIUM (EGET BILDE) | 38 |
| FIGUR 42: MASKINTEGNING MGW063 (GRIP, 2021) | 39 |
| FIGUR 43: MONTERING AV MGW063 (EGET BILDE) | 39 |
| FIGUR 44: ROTASJONSFESTE (EGET BILDE) | 40 |
| FIGUR 45: MONTERING AV MGW063 MED ROTASJONSKOBLING (EGET BILDE) | 40 |
| FIGUR 46: KONSEPTBILDER AV VALGT KONSEPT (EGET BILDE) | 41 |
| FIGUR 47: ILLUSTRASJON AV HVORDAN EN RØRKNOKKEL VIL FESTES I SYLINDEREN (EGET BILDE)..... | 41 |
| FIGUR 48: BILDE AV ROBOTFESTET TIL TESTJIGGEN: EKSPLODERT (EGET BILDE)..... | 42 |
| FIGUR 49: VEGGFESTE SETT FRA SIDEN (EGET BILDE)..... | 45 |
| FIGUR 50: EKSPLODERT BILDE AV VEGGFESTE (EGET BILDE) | 46 |
| FIGUR 51: ROBOTIQ FORCE TORQUE SENSOR FT 300 (ROBOTIQ, 2021)..... | 50 |
| FIGUR 52: OMRON TM12 (OMRON, 2021)..... | 50 |
| FIGUR 53: EKSEMPEL PÅ PROGRAMMERING AV ROBOT I OMRON TMFLOW | 51 |
| FIGUR 54: 1 MM MESH (EGET BILDE)..... | 52 |
| FIGUR 55: DEFORMASJON AV TESTOPPSETT. MAKSIMAL DEFORMASJON 0.006 MM (EGET BILDE)..... | 53 |
| FIGUR 56: DEFORMASJON AV SYLINDER FØR TOPOLOGIOPTIMALISERING (EGET BILDE)..... | 54 |
| FIGUR 57: DEFORMASJON AV SYLINDER ETTER TOPOLOGIOPTIMALISERING (EGET BILDE) | 54 |
| FIGUR 58: VEGGFESTE (EGET BILDE)..... | 55 |
| FIGUR 59: ROBOTFESTE (EGET BILDE) | 56 |
| FIGUR 60: NYTT TESTOPPSETT TIL ÅLESUND BIOMEKANISKE LAB (EGET BILDE) | 56 |
| FIGUR 61: STEDER PÅ MENNESKEKROPPEN HVOR VÅR INNFESTING KAN BENYTTES | 58 |
| FIGUR 62: TOPOLOGIOPTIMALISERT SYLINDER (EGET BILDE) | 59 |
| FIGUR 63: NÅVÆRENDE VERDIKJEDE AV DAGENS TESTPROSESS (EGET BILDE) | 61 |
| FIGUR 64: PROSESSKART AV DAGENS PROSESS (EGET BILDE)..... | 63 |
| FIGUR 65: PROSESSKART AV DAGENS PROSESS MED FARGEKODER (EGET BILDE) | 67 |
| FIGUR 66: PROSESSKART AV DEN NYE PROSESSEN (EGET BILDE) | 69 |

Tabelloversikt

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|------|
| TABELL 1 – TERMINOLOGI | XIII |
| TABELL 2: BRUKER- OG PRODUKTKRAV | 7 |
| TABELL 3 - RAPPORTENS INNHOLD | 7 |
| TABELL 4: STYKKLISTE TIL ROBOTFESTET | 44 |
| TABELL 5: STYKKLISTE FOR VEGGFESTET | 49 |
| TABELL 6: OVERSIKT FIGUR 54: 1 MM MESH (EGET BILDE) | 52 |
| TABELL 7: OVERSIKT OVER HVILKE LEDD SOM KAN MONTERES MED VÅRT PRODUKT | 58 |
| TABELL 8: RESULTATER FRA TOPOLOGIOPTIMALISERING | 59 |
| TABELL 9: OVERSIKT OVER VEKT TIL DE ULIKE KOMPONENTENE I ROBOTFESTET | 60 |
| TABELL 10: PROSESSKART SYMBOLER | 62 |
| TABELL 11: FARGEKODER FOR PROSESSKART | 66 |
| TABELL 12: TIDSANALYSE | 70 |

Terminologi

| Begrep | Definisjon |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3D-slicer | Et program som konverterer 3D-modeller til printeinstruksjoner for en gitt 3D-printer i form av G-kode (Additive, 2016). |
| Artroplastikk | Operasjon for å bedre et ledds funksjon, eventuelt ved at man setter inn en protese (Kåss, Artroplastikk, 2019). |
| Artrose | «Slitasjeykik» kommer av slitasje på brusk i ledd (Kåss, 2020). |
| Astrokopisk | «Kikkehulls-operasjon» foregår ved at man fører inn et stålrør med kamera på enden inn i leddet (Reikerås, artroskopi, 2021). |
| Biomekanikk | Læren om mekaniske prinsipper som virker på biologiske systemer (Reikerås, 2020). |
| CAD / Computer Aided Design | Dataskapt design i to eller tre dimensjoner (All3DP, 2021). |
| Cortex / Det kortikale beinet | Det ytterste laget av det kompakte beinvevet i et skjelettbein (Hem, 2021). |
| Disseksjon | Skjære opp strukturer som vev eller organer i forbindelse med anatomiske undersøkelser (Schlichting, Disseksjon, 2020) . |
| FEM / Finite Element Method | Matematisk simulering av krefter som virker på en 3D-modell (English, 2019). |
| Femur | Lårbeinet (Holck, Beinet, 2021). |
| Fibrose | Økt bindevevsmengde i et organ. Gir uttrykk for reparasjon av skade (Farstad, 2020). |
| Fibula | Det tynne, laterale leggbeinet (Holck, Beinet, 2021). |
| Fotorealistisk | Datagenererte bilder som oppfattes som ekte. |

| | |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| G-kode | Standardisert programspråk for automatiske maskiner som styres av en datamaskin. Koden angir bevegelse i alle retninger, samt styring av diverse verktøy (Dejan, 2021). |
| Iterasjon | Repetisjon av en prosess. Fører ofte til et bedre resultat. |
| Kadaver | Det menneskelige legemet etter døden. |
| Kirurgi | Undersøkelse, vurdering, behandling og oppfølging av sykdommer og skader hvor operative inngrep kan bli aktuelt. (Schlichting, 2018). |
| Kneleddet / Articulatio Genus | Leddforbindelsen mellom femur og tibia (Holck, Kneet, 2020). |
| Konservativ behandling | Behandling av skader uten bruk av operasjon. Ofte styrkeøvelser og tøying. |
| LEAN | Metodikk for å minke sløsing, basert på «The Toyota Way». |
| Ligament | Ligament også kalt leddbånd er strenger eller plater av fast, stramt bindevev som binder sammen ulike deler av menneskekroppen som blant annet knokler og bånd (Holck, 2020). |
| Luksere / luksasjon | Ledd-ender har blitt forskjøvet i forhold til hverandre «Gått ut av ledd» (Reikerås, 2018). |
| Mesh | CAD modell som er brutt opp i mindre geometrier for styrkeberegning (Siemens, 2021). |
| Part / .prt | Filbetegnelse som brukes av Siemens NX. |
| Patella | Kneskål (Holck, 2021). |
| PLA / Polyactic Acid | En type Bioplast som ofte brukes ved 3D-printing (Simplify3D, 2021). |
| Placebo-effekt | Virkingen av et stoff eller en behandling som skyldes forventning om et heldig resultat (Øye, 2020). |

| | |
|------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| PLM / Product Lifecycle Management | Et program som håndterer livssyklusen til et produkt gjennom hele design og produksjonsfasen (Oracle, 2021). |
| Ray Tracing | En render-teknikk hvor fotorealistiske bilder blir produsert ved å spore lysstråler som piksler, og videre simulerer effekter som forekommer ved møte av virtuelle objekt (Thomas, 2020). |
| Rørknokkel | Et bein formet som er mer eller mindre formet som et rør (Holck, 2020). |
| Siemens NX | Avansert CAD/CAM/CAE software. |
| Slyngemetoden | Nytt kirurgisk inngrep utviklet ved Ålesund sykehus som baserer seg på bankart og latarjet metoden. |
| STL-fil / .stl | Standard filtype for 3D-modeller, beskriver overflategeometrien av en tredimensjonal figur (Chakravorty, 2019). |
| Teamcenter | Product Lifecycle Management programvare for enkel fildeling mellom teammedlemmer (Siemens, 2021). |
| Tibia | Skinnebeinet (Holck, 2019). |
| VoIP / Voice over Internet Protocol / IP-Telefoni | En metode å føre samtaler over internett, fremfor det tradisjonelle telefonnettet (Federal Communications Commission, 2021). |

Tabell 1 – Terminologi

1. Innledning

1.1. Bakgrunn

Etter Joseph Lister oppdaget viktigheten av å sterilisere kirurgiske instrumenter og sår på 1800-tallet, har man kunnet behandle menneskekroppen i langt større grad enn tidligere (Newsom, 2003). Mye av kunnskapen og behandlingsmetodene man har i dag kommer fra erfaring, hvor resultat har blitt målt gjennom kliniske undersøkelser.

En klinisk undersøkelse gjennomføres ved at kirurger, fysioterapeuter og helsepersonell evaluerer pasientens opplevelse og funksjon etter en behandling (Braut, 2021). Den vanligste metoden for evaluering av en behandling er gullstandard (Romundstad, 2021). Dette er prospektive, randomiserte studier der man måler forskjellige behandlingsmetoder. Dette gjøres ofte ved å sette opp studier der pasienter blir tilfeldig plassert i to ulike grupper, hvor den ene gruppen får en ny type behandling, og den andre gruppen får en kontrollbehandling eller eventuelt en *placebo-behandling*. Deretter måler man resultatet. Både pasienten og de som tester resultatet skal være blindet. Dette kalles dobbeltblindet testing, og det er ingen som vet ikke hvilken behandling som har blitt gjort på de ulike pasientene. Slike tester er gode verktøy for å teste behandlinger som allerede er i bruk.

For å finne *nye* kirurgiske behandlinger, må man gå frem annerledes. Tidligere ble nye inngrep testet på levende mennesker. Dette måtte gjøres slik at man kunne avgjøre om inngrepet fungerte eller ikke ved å få tilbakemelding fra pasienten. I dagens samfunn er det mye høyere krav til kvalitet enn det var tidligere. Samtidig er det også etisk vanskelig å forsvare det å bruke en pasient som «forsøkskanin» for å tilegne seg ny kunnskap med all den teknologien vi har tilgjengelig. Ved utvikling av nye kirurgiske inngrep i dag, gjennomfører man derfor biomekanisk testing på *kadaver* (Zdero, 2017). Her måles bevegelighet og styrke i ledd før og etter inngrep for å verifisere ønsket biomekanisk effekt.

1.2. Formål

Formålet med oppgaven er å forenkle innfestingen av knær, samt lage et nytt oppsett av testjiggen som brukes ved den biomekaniske laben ved Ålesund Sykehus. Vårt mål er å lage en prototype som er enklere å bruke og like rigid som dagens festemetode: støping.

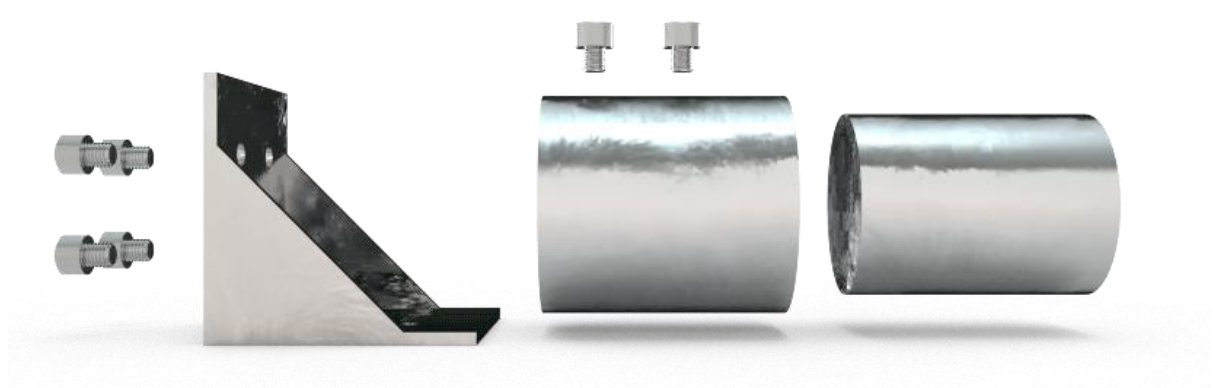
1.3. Dagens lab-oppsett

Oppsettet på den biomekaniske laben består av én industrirobot, én kraftsensor, et testobjekt, én røntgenmaskin, og én fastmontert stolpe, se Figur 1. Testobjektene er ekte kadaver, som blir importert i frossen tilstand fra USA og Tyskland. Vår oppgave er å forbedre innfestingen mellom robot, testobjekt og stolpe.



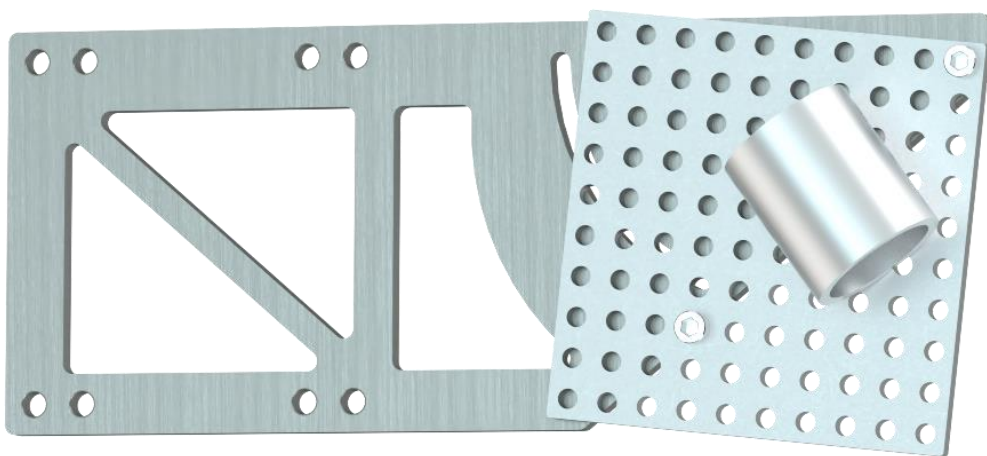
Figur 1: Nåværende testoppsett for skulder ved Ålesund Biomekanisk lab (eget bilde)

Festet som brukes i dag mellom robot og testobjekt består av to sylindre og en brakett. Braketten monteres direkte i kraftsensoren, videre blir den største sylindren montert i braketten. Deretter blir den minste sylindren, med faststøpt testobjekt, skjøvet inn i den andre, og det hele låses fast med et par skruer. Fordelen med å bruke to sylindre er at det tillater rotering, og det fungerer som en slags hurtigkobling for å raskt kunne koble testobjektet av testjiggen. Ulempen er at det er vanskelig å montere sylindren i samme vinkel hver gang det kobles av og på testjiggen.

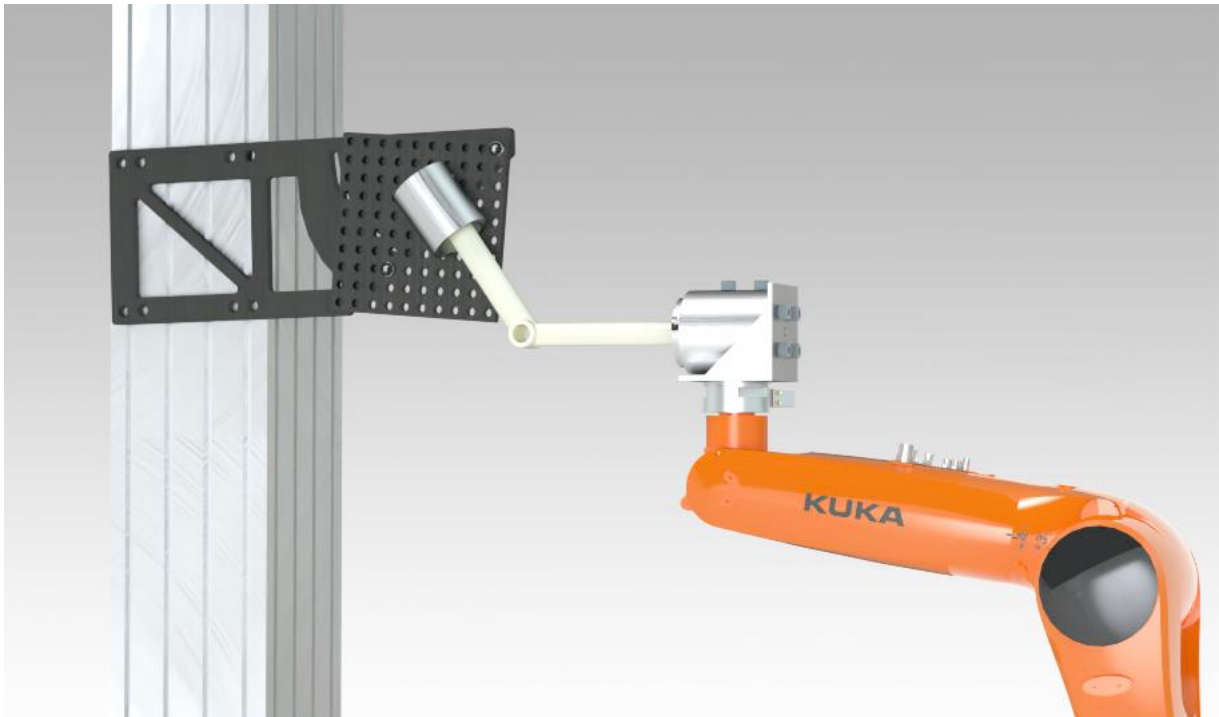


Figur 2: Kopi av dagens feste mellom robot og testobjekt (eget bilde)

På den andre siden blir testobjektet festet i en fastmontert stolpe. Denne siden av testjiggen har flere løsninger. På Figur 3 kan man se et eksempel på en av disse. Dette oppsettet består av to stålbraketter og en sylinder. Testobjektet støpes inn i sylindren, deretter monteres sylindren på den ene stålbraketten. Denne braketten festes videre på den andre stålbraketten, slik at man kan velge vinkel. Videre festes det hele på en fastmontert stolpe i ønsket høyde.



Figur 3: Kopi av dagens feste mellom testobjekt og fastmontert stolpe (eget bilde)

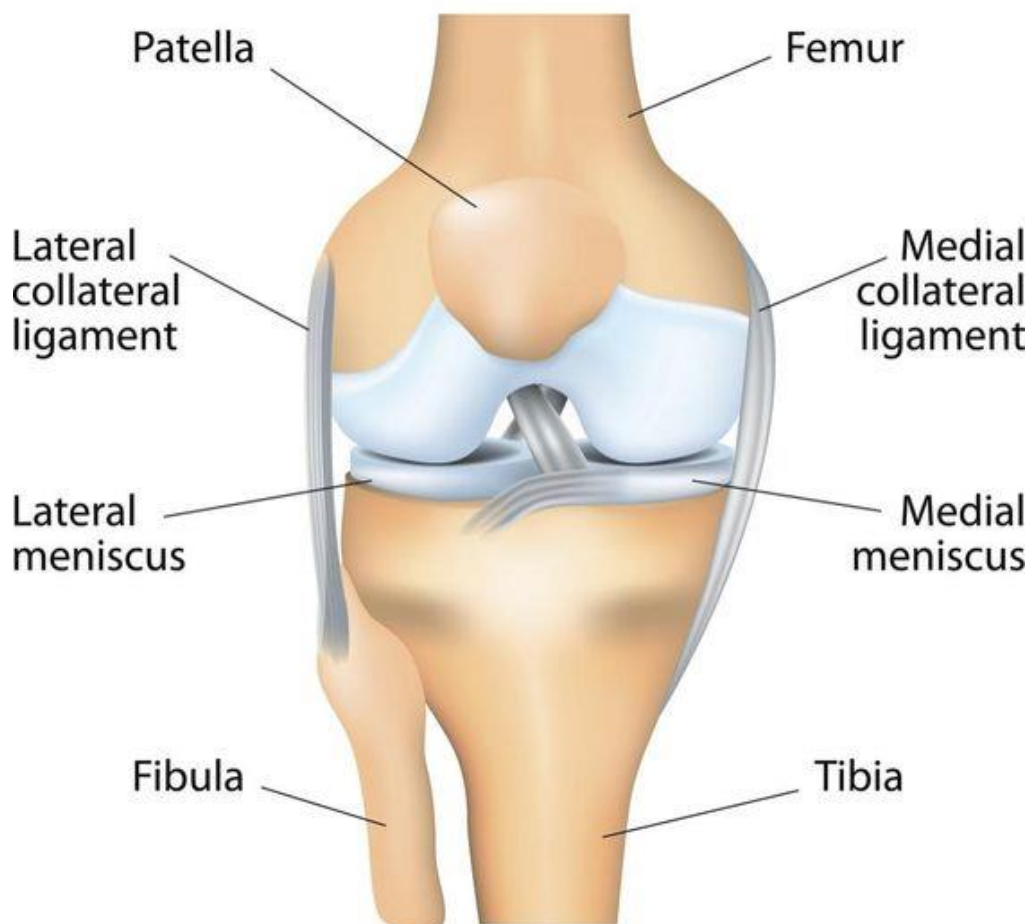


Figur 4: Eksempel på testoppsett i dag (eget bilde)

1.4. Dagens festemetode

Dagens metode baserer seg på støping. Ålesund sykehus bestiller testobjekter av den kroppsdelene de ønsker å forske på. Disse testobjektene er ekte kadaver, som kommer fra donor kropper. For å kunne feste kadaveret til en testjigg må man koble via skjelettet, da dette er den mest rigide delen av kroppen. For å få til dette må kadaveret renses, og hud, sener og muskler fjernes på endene slik at man får direkte kontakt med skjelettet. Resten av kadaveret må være intakt, slik at leddet forblir funksjonelt.

THE HUMAN KNEE



Figur 5: Anatomi kne (Medical News Today, 2017)

Som Figur 5 viser er det tre bein som går til kneet for et menneske. Femur går opp gjennom låret, og tibia og fibula strekker seg ned gjennom leggen. Disse beinene må festes i en rigid kobling for å kunne gjennomføre gode biomekaniske tester.

Ved støping senkes hver sin ende av kadaveret ned i en sylinder, slik at skjellettbeinene støpes fast. På Figur 6 kan man se eksempel på hvordan et bein blir festet i dag. Her brukes det et trekomponents lim, hvor et av komponentene er aluminium klorid. Dette stoffet er etsende og kan være svært skadelig ved innånding (New Jersey Department of Health, 2008). Selve støpingen tar ca. én time, og det støpes ofte flere testobjekter på en gang. Det sitter godt, men det er en ressurskrevende prosess. Vårt mål er å eliminere støpingen, og feste beinene enkelt i løpet av få minutter.



Figur 6: Eksempel på støping (Hentet fra Øystein Bjelland)

1.5. Kravspesifikasjoner

| Brukerkrav | Produktkrav |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Ingen støping | Tåle 100 sykluser |
| Raskere enn dagens metode | Tåle 50 N i alle retninger |
| Mindre ressurskrevende | Gjenbrukbar |
| Muligheter for rotasjon i koblingen | Veier under 3 kg |
| Enkelt å sterilisere | Minst like solid feste som dagens metode |
| Hurtigkobling for rask montering/demontering av testobjekt | |

Tabell 2: Bruker- og produktkrav

Sammen med kirurg Andreas Fagerhaug Dalen ved ortopedisk avdeling på Ålesund sykehus, og veiledere Øystein Bjelland og Paul Steffen Kleppe ble utforming og kravspesifikasjoner for ny innfesting til testjiggen diskutert. Dalen la vekt på å utvikle en festemetode som var svært solid, da testobjektene skal bli testet flere ganger, ofte over flere dager. Kleppe foreslo også å inkludere en hurtigkobling da testobjektene blir montert og demontert fra testjiggen minst tre ganger.

1.6. Rapportens innhold

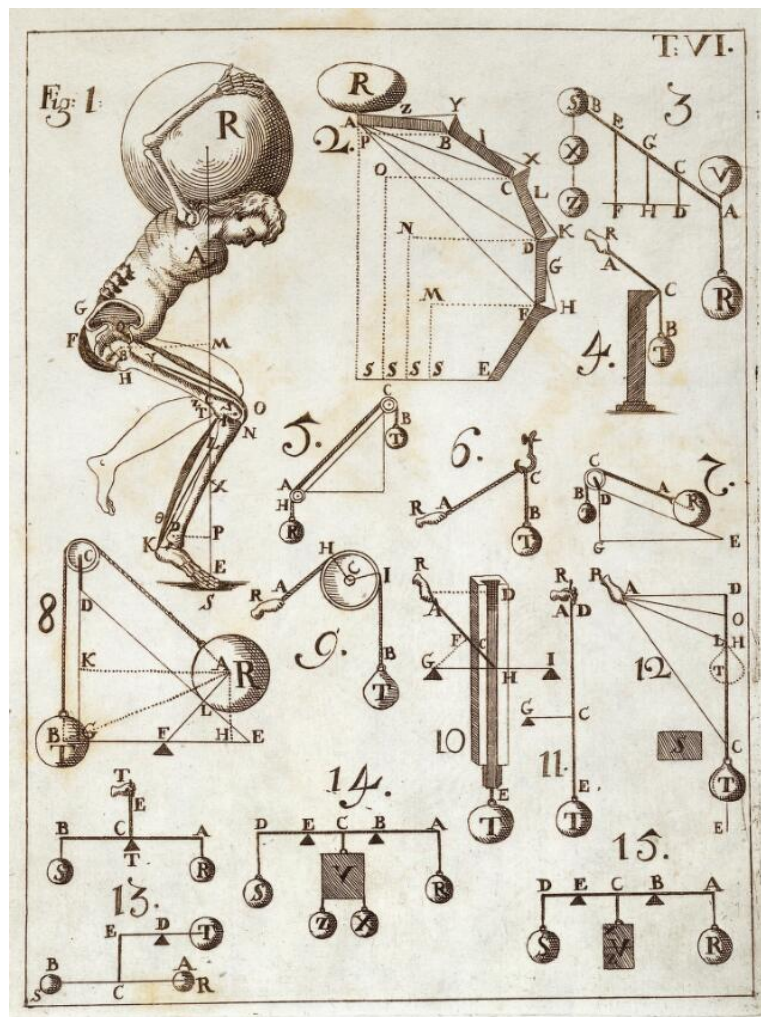
| | |
|-------------------|------------------|
| <i>Kapittel 1</i> | Innledning |
| <i>Kapittel 2</i> | Litteraturstudie |
| <i>Kapittel 3</i> | Arbeidsprosess |
| <i>Kapittel 4</i> | Resultat |
| <i>Kapittel 5</i> | Lean |
| <i>Kapittel 6</i> | Diskusjon |
| <i>Kapittel 7</i> | Konklusjon |
| <i>Kapittel 8</i> | Bibliografi |

Tabell 3 - Rapportens innhold

2. Teknologi- og behovsanalyse

2.1. Historie

Selv om utviklingen av biomekanisk forskning i hovedsak har blitt gjennomført i løpet av det 20. århundre, kan man spore røttene tilbake til 1500-tallet. Leonardo Da Vinci studerte anatomi ved *disseksjon*, og var spesielt interessert i mekanikken til menneskekroppen (Innocenti, 2018). På Figur 7 kan man se Leonardo Da Vinci sine egne tegninger på hvordan han ønsket å teste biomekaniske egenskaper hos mennesker.



Figur 7: «De Moto Animalium» (Miller, 2016)

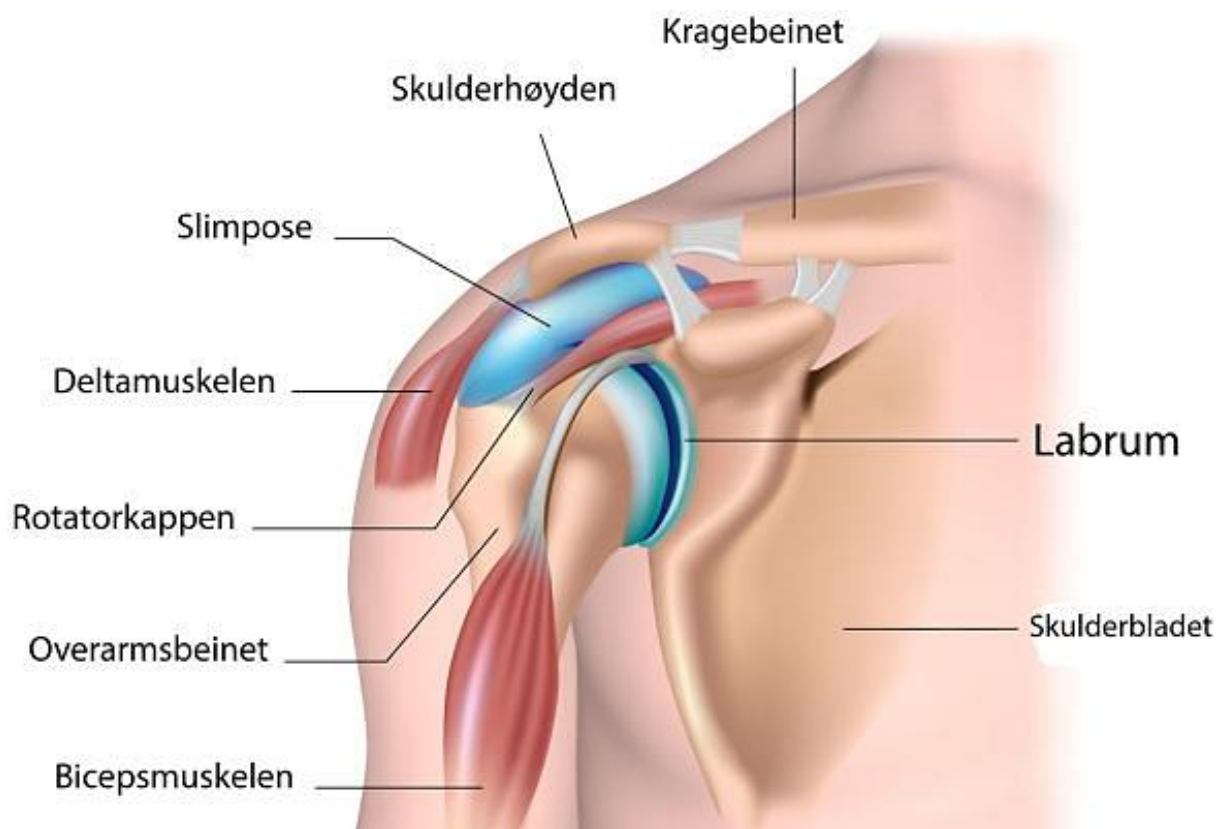
De tidlige biomekaniske testene har vært unøyaktige da de har vært begrenset av den teknologiske utviklingen på sin tid. Slik som med all annen teknologi, er medisinsk teknologi stadig i utvikling, og i de senere årene har biomekaniske tester blitt svært nøyaktige. Dette er takket være industrielle roboter, kraftsensorer og røntgenmaskiner. Ved bruk av disse har man mulighet til å se nærmere på kroppens ledd og dens funksjoner på en mer pålitelig måte enn tidligere.

2.2. Biomekanisk testing ved Ålesund Sykehus

Forskere ved den Biomekaniske laben ved Ålesund sykehus jobber for tiden med behandlingsmetoder for skulder, knær og ankler. Ved utvikling av nye kirurgiske behandlinger, gjennomfører de biomekanisk testing på kadaver. Testene består av et fastmontert kadaver, røntgenmaskin og en robotarm som måler bevegelighet og styrke i ledd før og etter inngrep for å verifisere ønsket biomekanisk effekt. Likevel er det ikke gitt at et inngrep som fungerer på kadaver vil fungerer på et levende menneske. Men testene gir tall som kan hjelpe i vurderingen om behandlingen kan testes ut på et menneske eller bør forkastes.

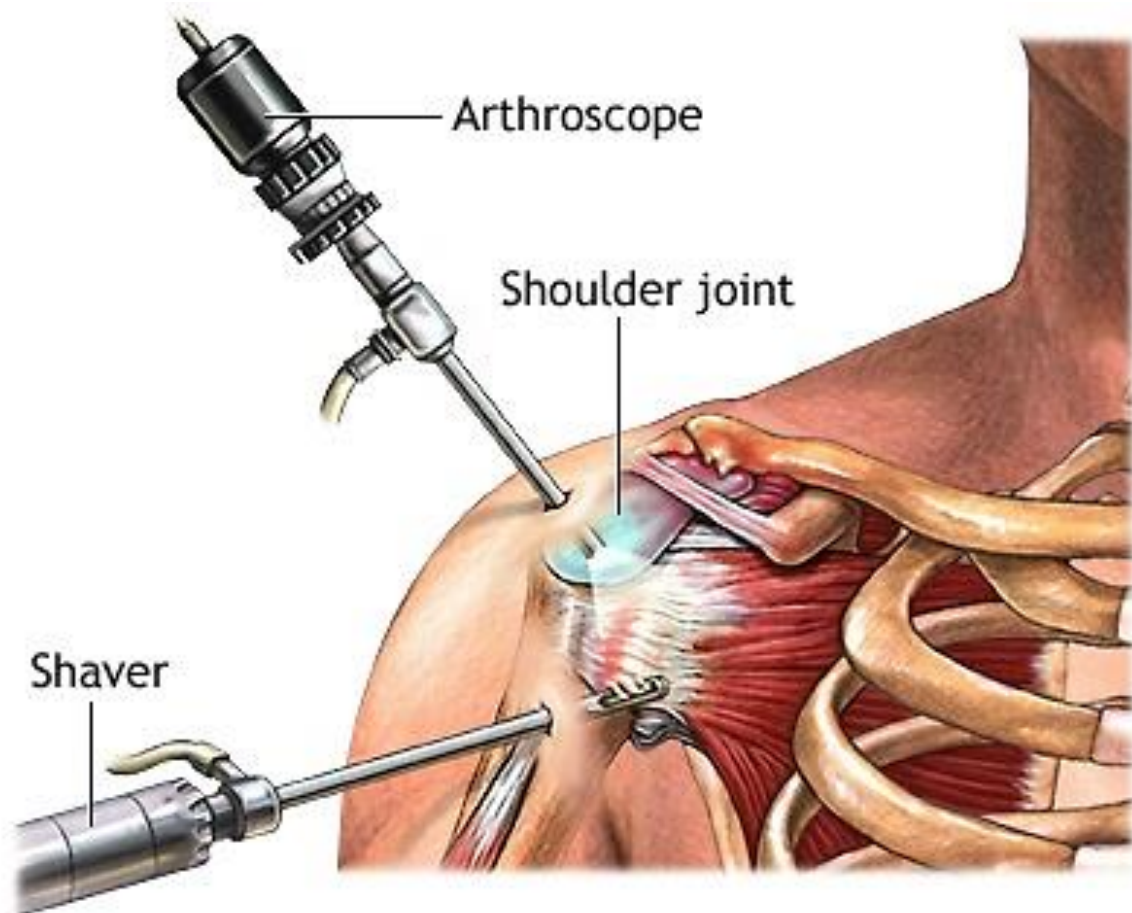
2.2.1. Skulder

Det er økt sannsynlighet for at skulderen kan gå ut av ledd, hvis den først har gjort det en gang (Haukland Universitetssykehus, 2021). Dette er fordi skulderleppa, *labrum*, blir slitt eller ødelagt, noe som fører til en kronisk ustabil skulder. De fleste sliter med fremover-glidning av leddhodet i leddskålen.



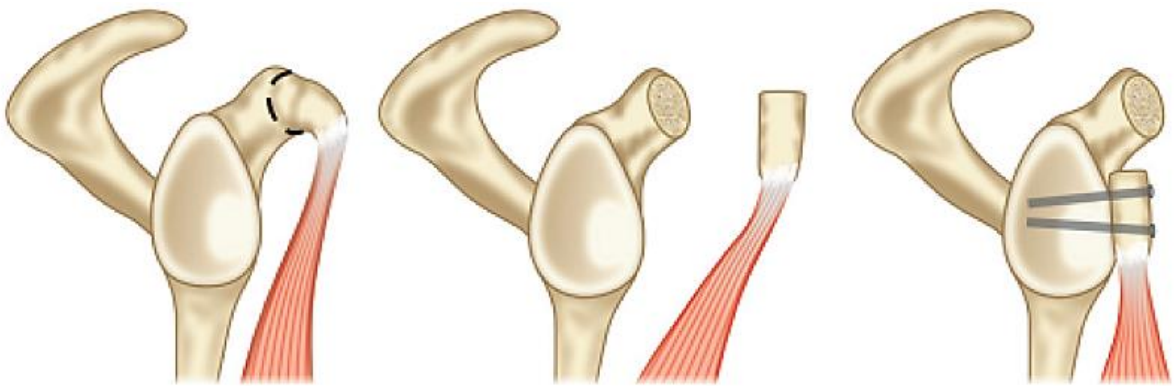
Figur 8: Anatomi skulderen (Pettersen, 2019)

Det brukes i hovedsakelig to forskjellige metoder for å reparere instabile skuldre. Den første metoden man bruker kalles *Bankart* (Austad, 2017). Denne behandlingen kan gjennomføres *artroskopisk*, noe som vil si at man slipper å åpne leddet, og som fordel kan pasienten reise hjem samme dag som behandlingen (Randsborg, Artroskopi, 2021). Inngrepet er lite omfattende og Bankart er derfor ofte det første man prøver på en instabil skulder. Ved Bankart metoden reparerer man leddleppa ved å sy. Problemet med denne behandling er at mange ikke får god nok stabilitet og får nye *skulderluksasjoner*. Hos enkelte er leddleppa helt ødelagt eller borte, noe som fører til at metoden ikke kan gjennomføres.



Figur 9: Artroskopisk behandlingsmetode (Vondt.net, 2021)

Den andre metoden som brukes for å reparere ustabile skuldre kalles *Latarjet*. Dette er en mer omfattende operasjon, men til fordel gir den ofte en stabil skulder (McHale, 2017). Problemet med denne behandlingen er at den kan medføre en del smerter, stivhet, nerveskader og på sikt *artrose*. En annen ulempe med denne operasjonen er at anatomien i skulderen forandres delvis, ved at man flytter en beinblokk med alt av sener og muskelfester, fra et sted til et annet som vist på Figur 10. Dette betyr at man ikke kan reversere operasjonen når den først er blitt gjennomført.

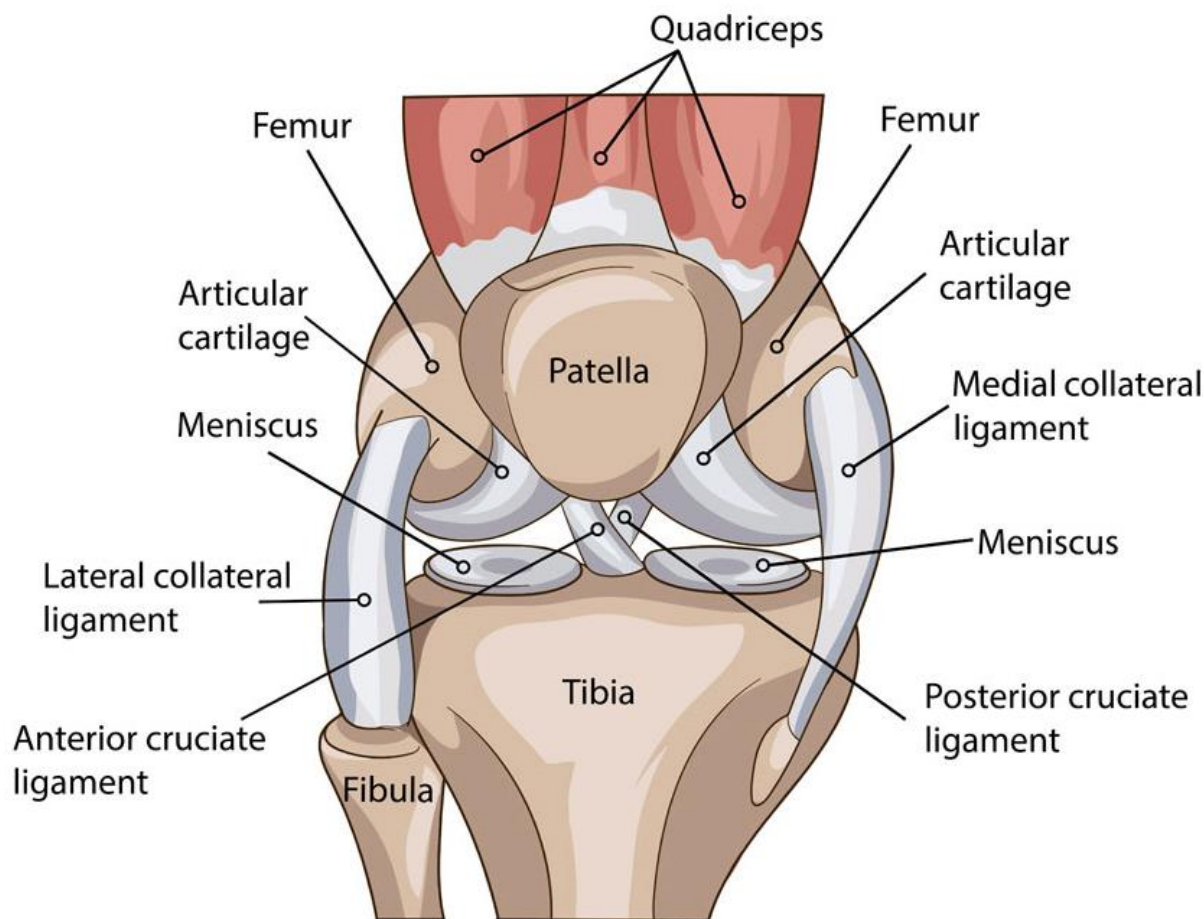


Figur 10: Latarjet Procedure (Smith, 2018)

Hos den Biomekaniske laben ved Ålesund sykehus forskes det nå på en mellomting mellom de nevnte metodene. Den nye metoden kalt *slyngemetoden* stabiliserer skulderen mer enn Bankart, uten å forandre anatomien i samme grad som ved Latarjet. Metoden ble utviklet ved å gjennomføre biomekaniske tester, og resultatet ble så godt at metoden har i dag blitt testet på 15 pasienter ved Ålesund sykehus. Videre jobbes det med forbedring av slyngemetoden, samt teste den ut på skuldre med forskjellig grad av instabilitet.

2.2.2. Kne

Kneet er et av de mer kompliserte, og belastede leddene i menneskekroppen. Kneet består av tre bein, *femur*, *tibia* og *fibula*, samt en rekke *ligamenter*, sener og bruskk-strukturer (Holck, Kneet, 2020).

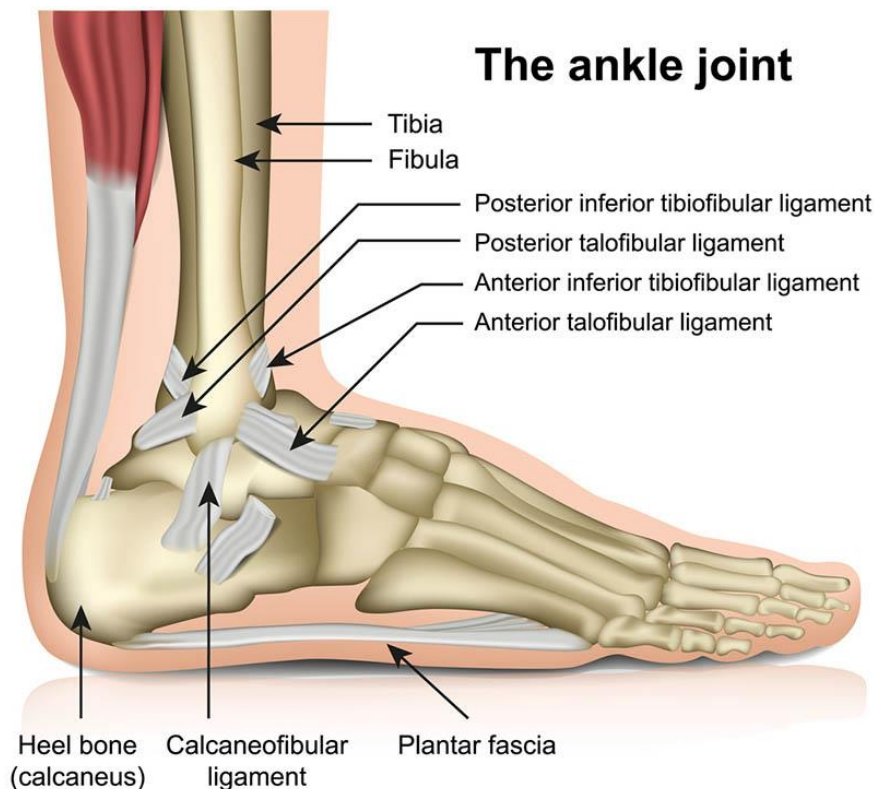


Figur 11: Anatomisk bilde av kneet (Line.17, 2021)

En vanlig skade på kneleddet er korsbåndruptur (Munk, 2021). I dag finnes det operasjoner for å reparere slike skader. Problemet er at behandlingene som brukes som regel fører til et stabilt kne med redusert bevegelighet, eller et ustabil kne med god bevegelighet. Selv om det har blitt forsket på ved andre forskningsinstitutt, mangler man fremdeles mye grunnleggende informasjon om de biomekaniske egenskapene til kneleddet. Kirurger og forskere kommer stadig opp med nye idéer, og dette må da testes i praktisk med biomekaniske tester, før man går videre til behandling på pasienter.

2.2.3. Ankel

Ankelbrudd har blitt forsket lite på, da det har vært vanskelig å utvikle en god testjigg. Med lite teoretisk grunnlag har det ført til mye synsing og meninger om hvordan ulike brudd bør behandles. Dette har ført til at behandlingen en pasient får tilbud om, kan variere stort fra en kirurg, til en annen.



Figur 12: Anatomi ankel (Medicalstocks, 2021)

Forskerne ved den Biomekaniske laben ved Ålesund sykehus har utviklet en egen testjigg for ankel, og har etter testing en teori om at det finnes et ligament på innsiden av ankelen som er fundamentalt for stabiliteten i leddet. Forskningen deres viser at når man ligger med slapp fot, vil ikke dette ligamentet strammes, og som følger vil ankelen se ustabil ut. Dette betyr i praksis at metoden man tar røntgen på i dag er beklagelig da man ligger på en sykeseng med slapp fot i det bildet blir tatt. Dette er pågående forskning, og testjiggen er opprettet for å forske på om dette ligamentet stabiliserer leddet dersom ankelen bøyes slik som når man står på den. Dersom teorien stemmer kan det bety at enkelte ganger er kirurgiske inngrep unødvendig og man vil ikke oppnå bedre stabilitet. Unødvendige inngrep har også potensiale til å utsette pasienten for mulige komplikasjoner. Dette er noe som må forskes videre på.

2.3. Fordeler og ulemper med å bytte fra støping

Som nevnt tidligere i oppgaven, bruker forskerne ved den biomekaniske laben støping for å feste kadaver. Dette er en tidkrevende prosess, og er noe de ønsker å gå vekk i fra. Endring i prosessen vil bringe både positive og negative sider. Det er viktig å analysere forholdene, maksimere fordelene og minske konsekvensene så langt det lar seg gjøre. Nedenfor er en oversikt over fordeler og ulemper:

2.3.1. Fordeler:

1. **Tidsbesparelse** – Støpe-prosessen tar lang tid, se kapittel 5, for analyse av dagens metode.
2. **Bedre utnyttelse av ressurser** – Ved å gjøre innfestingen lettere å ta i bruk, vil det frigjøre tid for helsepersonell, slik at de kan fokusere på andre oppgaver som krever deres ekspertise.
3. **Ingen helserisiko** – Ved å unngå støping slipper helsepersonell å benytte seg av de farlige kjemikaliene som inngår i støpe-prosessen. Disse stoffene kan føre til alvorlige konsekvenser som etseskader og *fibrose*.
4. **Miljøvennlighet** – Unngår støpe-materiale som både er farlig for miljøet og ikke er gjenbrukbart, og derfor kastes etter bruk.
5. **Mer rigid innfesting** – Skjelettbein er glatte, og ved store nok krefter er det ikke alltid at støping er godt nok. Ny innfesting vil sannsynligvis tåle større krefter enn ved støpe-metoden, og dermed skape en mer rigid kobling slik at man alltid er sikker på at testobjektet sitter skikkelig.
6. **Økt hygiene** – Ved dagens metode må støpe-materialet fjernes fra metallsylinderen det er støpt i. Dette er tidkrevende, og ettersom testobjektet har blitt testet i flere dager er det en sannsynlighet for biologisk avfall.

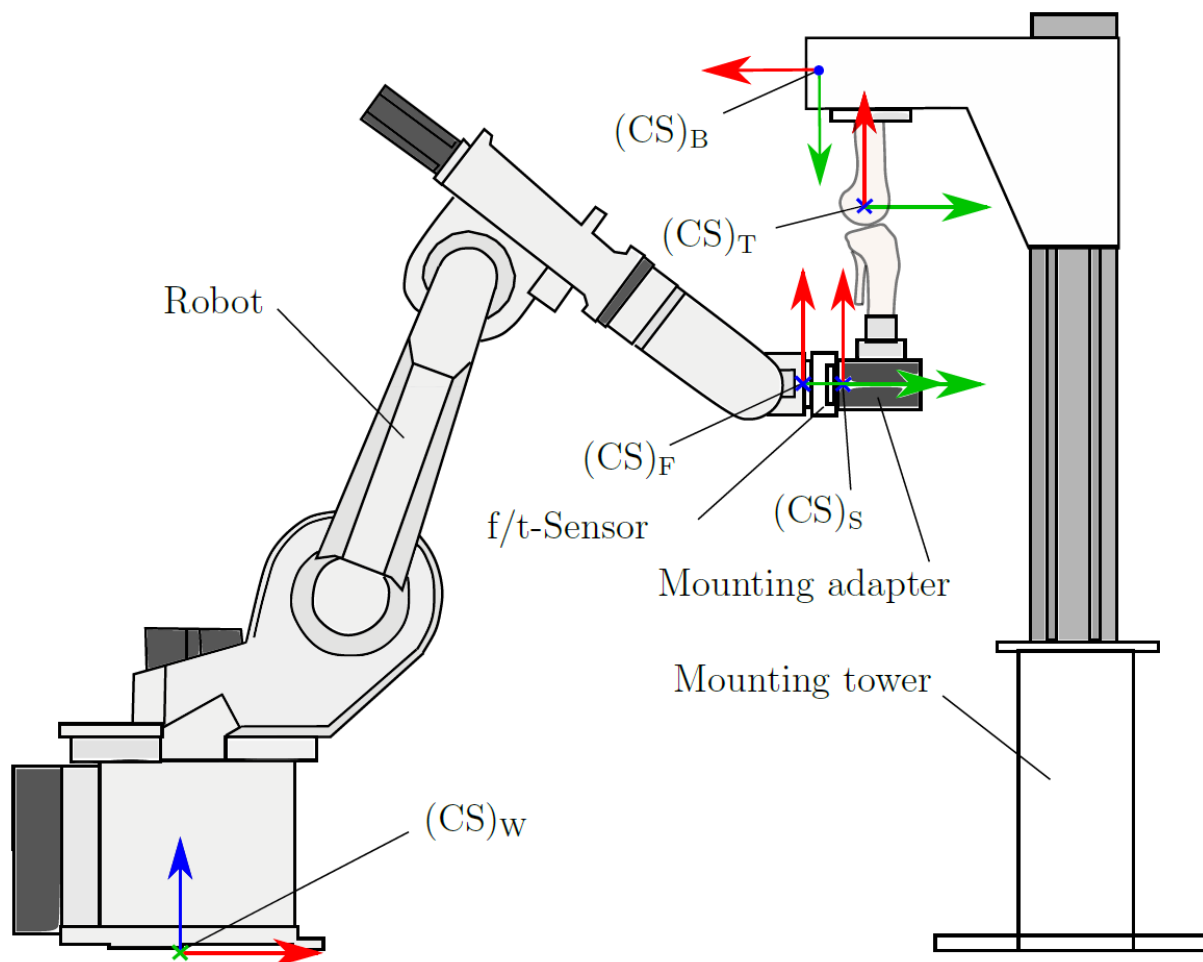
2.3.2. Ulemper:

1. **Økt kostnad** – Støping er en relativt billig prosess, og det er sannsynlig at en ny innfesting kan bli dyrere.
2. **Nye rutiner** – Den nye innfestingen vil være annerledes enn dagens metode, noe som fører til at de ansatte ved den biomekaniske laben må endre vaner og rutiner.

2.4. Tidligere arbeid

Som nevnt tidligere har norske forskere reist til ulike forskningslaboratorium i Tyskland for å utføre biomekaniske tester. Dette er fordi det eksisterer få slike labor i verden, noe som gjør den Biomekaniske laben i Ålesund særegen.

Forskerne i Ålesund har fokusert mest på skulder og ankler hittil, og har derfor ikke noe bestemt testoppsettet for knær. Her er det flere muligheter, med blant annet vertikal eller horisontal femur. Ved universitetet i Hannover forskes det mye på biomekaniske egenskaper, og de har blant annet forsket på *artroplastikk* i knær (Ferle, 2020). Her har de brukt et oppsett hvor femur henger vertikalt fra innfestingen. De har fått gode resultater med dette oppsettet, og det vil sannsynligvis fungere godt ved forskning hos Ålesund biomekaniske lab.

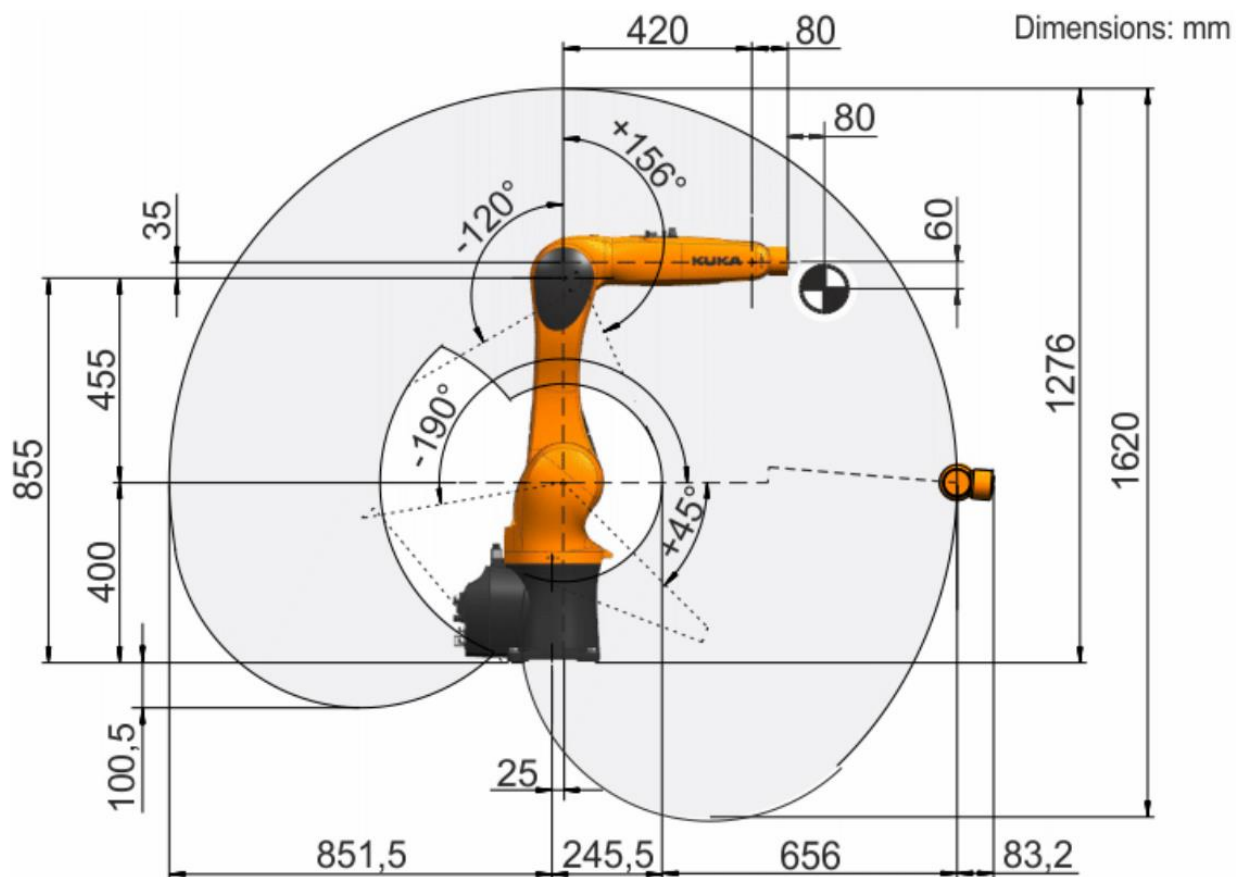


Figur 13: Testoppsett for forskning på knær i Hannover (Ferle, 2020, s. 37)

2.5. Utstyr som benyttes ved den biomekaniske laben i Ålesund

2.5.1. KUKA KR6

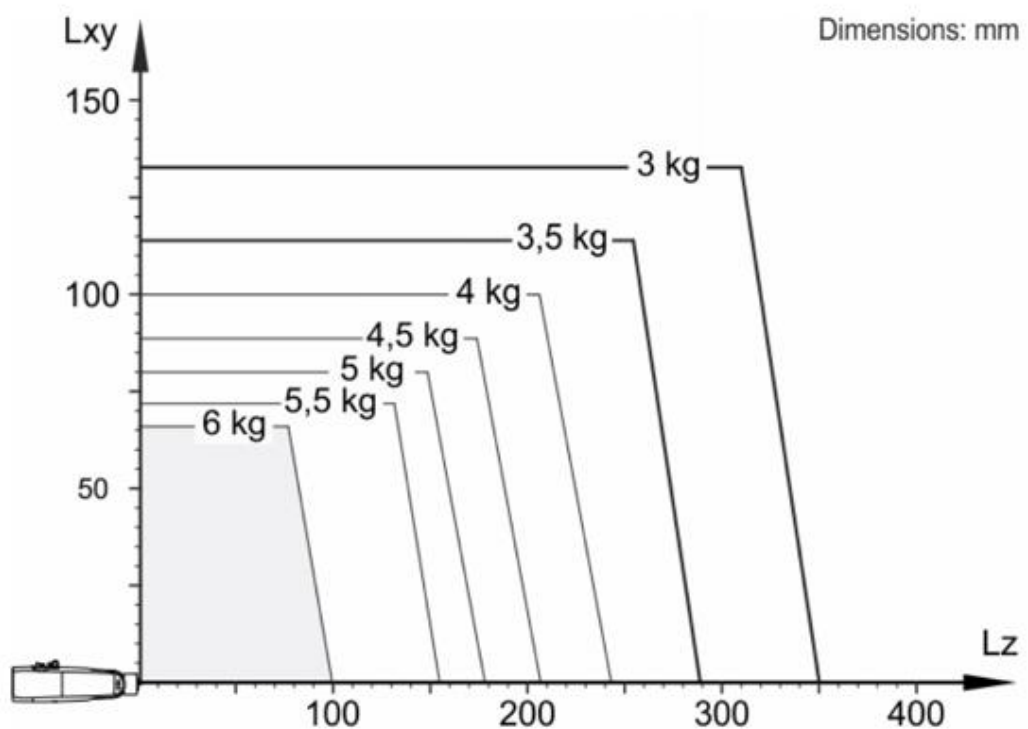
Utviklingen i industrien har ført til lavere kostnad for industri-roboter. I tillegg har brukervennligheten blitt langt bedre, med mange forskjellige programmer, sensorer og verktøy. Alt dette har ført til at flere har muligheten til å ta i bruk disse verktøyene, slik som blant annet den biomekaniske laben ved sykehuset i Ålesund. Som nevnt innledningsvis har biomekaniske tester tidligere vært svært begrenset av teknologien på sin tid, og man har blant annet vært nødt til å lage en testjigg per bevegelse man ønsket å teste på et testobjekt. Ved bruk av industri-roboter har man mulighet til å kjøre alle bevegelser man ønsker. Kombinert med en kraftsensor og røntgenmaskin kan man også raskt måle forskjeller før og etter eventuelle kirurgiske inngrep med svært høy presisjon.



Figur 14: KUKA KR6 (KUKA, 2020)

Den biomekaniske laben i Ålesund bruker *KUKA KR6*, se Figur 14. Dette er en industriell robot med fast base og fri bevegelse i 6 akser (KUKA, 2020). Maksimal strekk lengde er 901,5 mm og maksimal nyttelast er 6 kg, derav modellnavnet KR6. På Figur 15 kan man se et nyttelast-diagram for roboten. Selv om roboten har kapasitet til å løfte 6 kg er den anbefalte nyttelasten 3 kg. Dette er basert på den dynamiske ytelsen av roboten, og dersom man følger diagrammet er man garantert at bevegelsen blir lik for hver test. Alt utstyret som festes på roboten må derfor veie under 3 kg sammenlagt, noe som betyr at vårt produkt må være lettest mulig.

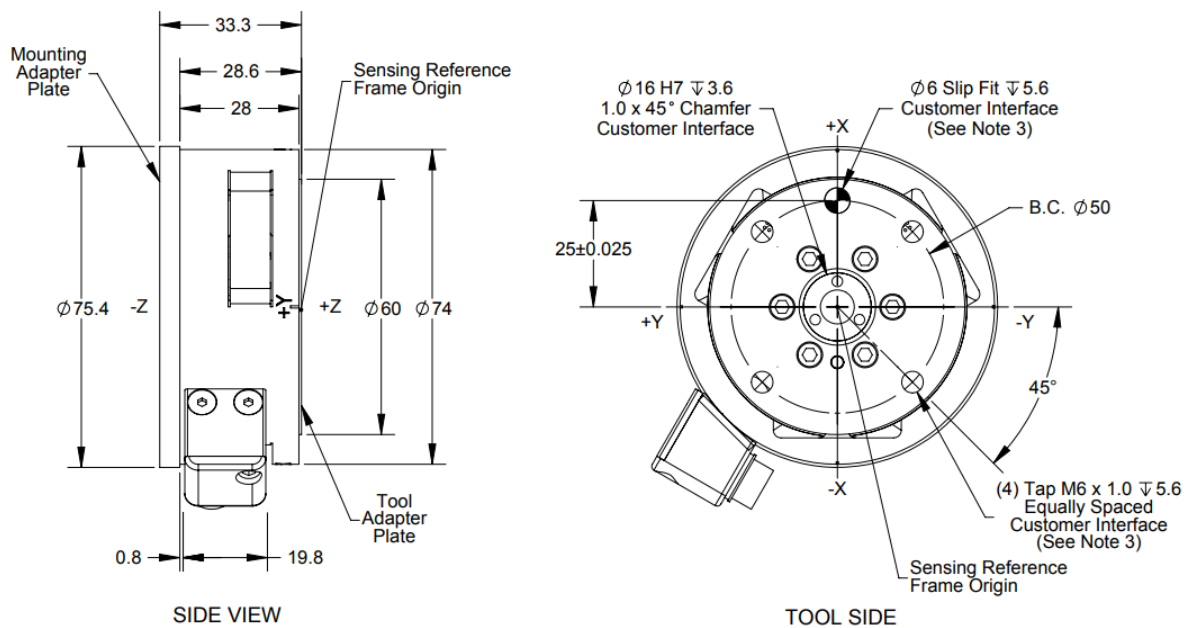
Payload diagram



Figur 15: Nyttelast-diagram KUKA KR6 (KUKA, 2020)

2.5.2. ATI GAMMA

For å måle motstanden i testobjektene, brukes kraftsensoren *ATI Gamma* (ATI Industrial Automation, 2021). Sensoren kan måle radielle krefter opptil 1200 N, aksielle krefter opptil 4100 N, og er dimensjonert for høy styrke med lav egenvekt. Sensoren monteres ytterst på robotarmen, slik som illustrert på Figur 17. Fordelen med denne sensoren er lav egenvekt på kun 255 gram, og nøyaktig måling helt ned til 0.01 N. Dette fører til svært presise forskningsforsøk, og sikrer gode resultater.



Figur 16: Maskintegning ATI Gamma (ATI Industrial Automation, 2021)



Figur 17: Montering av ATI Gamma (eget bilde)

2.5.3. Røntgenmaskin

Røntgenmaskinen blir flittig brukt ved biomekanisk testing ved Ålesund sykehus. Ved bruk av røntgenmaskin har man mulighet til å ta bilder av kadavrene under testing. Dette er et fint verktøy for å verifisere de målingene de får fra kraftsensoren. Dette er en fordel da man blant annet kan se om den nye «slyngemetoden» hindrer nye skulderluksasjoner, eller om det skjulte ligamentet i ankelen stabiliserer leddet slik forskerne tror. Slikt er vanskelig å bevise uten noen form for maskin som kan ta bilder. På Figur 18 kan man se eksempel på et røntgenbilde.



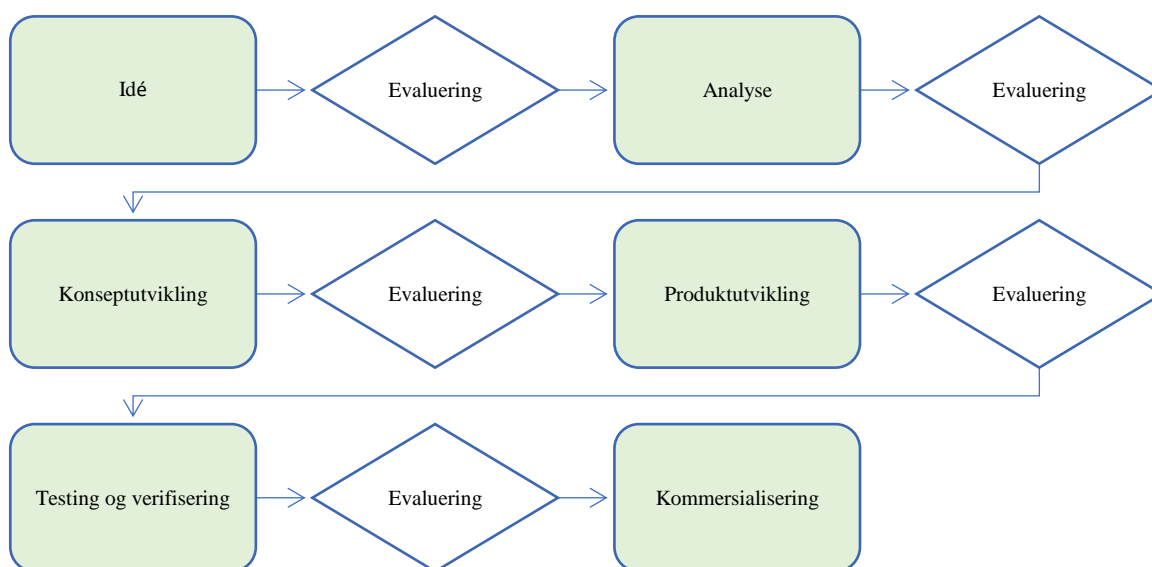
Figur 18: Røntgenbilde av testobjekt fra figur 1 (eget bilde)

2.6. Hurtigkoblinger

Industri-roboter kan brukes til mye, og det finnes derfor mange ulike verktøy man kan koble på. Dette kan være alt fra sveiseapparat til en gripende arm. Slike verktøy blir som regel fastmontert på roboten, noe som gjør bytting av verktøy til en tidkrevende prosess. For å gjøre bytting av verktøy raskere finnes det hurtigkoblinger. Som nevnt tidligere kobles testobjektene av og på testjiggen 2-3 ganger i løpet av en test. I dag bruker forskerne ved den biomekaniske laben tusjmerker for å se om testobjektet sitter likt i sylinderekoblingen for hver gang det kobles av og på. Ved å bruke hurtigkobling fjernes usikkerheten om testobjektet sitter likt, noe vil føre til mer nøyaktige testresultater og raskere montering i testjiggen. I tillegg vil en hurtigkobling spare mye tid for forskerne, slik at fokuset kan være på andre utfordringer forskningen byr på.

2.7. Stage-gate modellen

De fleste produkter som når markedet og oppnår suksess, har gått gjennom flere utviklingsfaser. Eksempler på slike faser er konseptutvikling og produktutvikling. Det å følge formelle modeller for produktutvikling har ifølge Biemans en positiv effekt på utfallet av et utviklingsprosjekt (Biemans, 2018, ss. 45-52). Et eksempel på en slik modell er Coopers «Stage-gate» modell. Dette er en kjent aktivitetsmodell som har innført evalueringssjekk mellom hvert steg i prosessen. Dette gjør det mulig å avbryte mislykkede prosjekter så tidlig som mulig, slik at man unngår og bruke unødvendige ressurser.



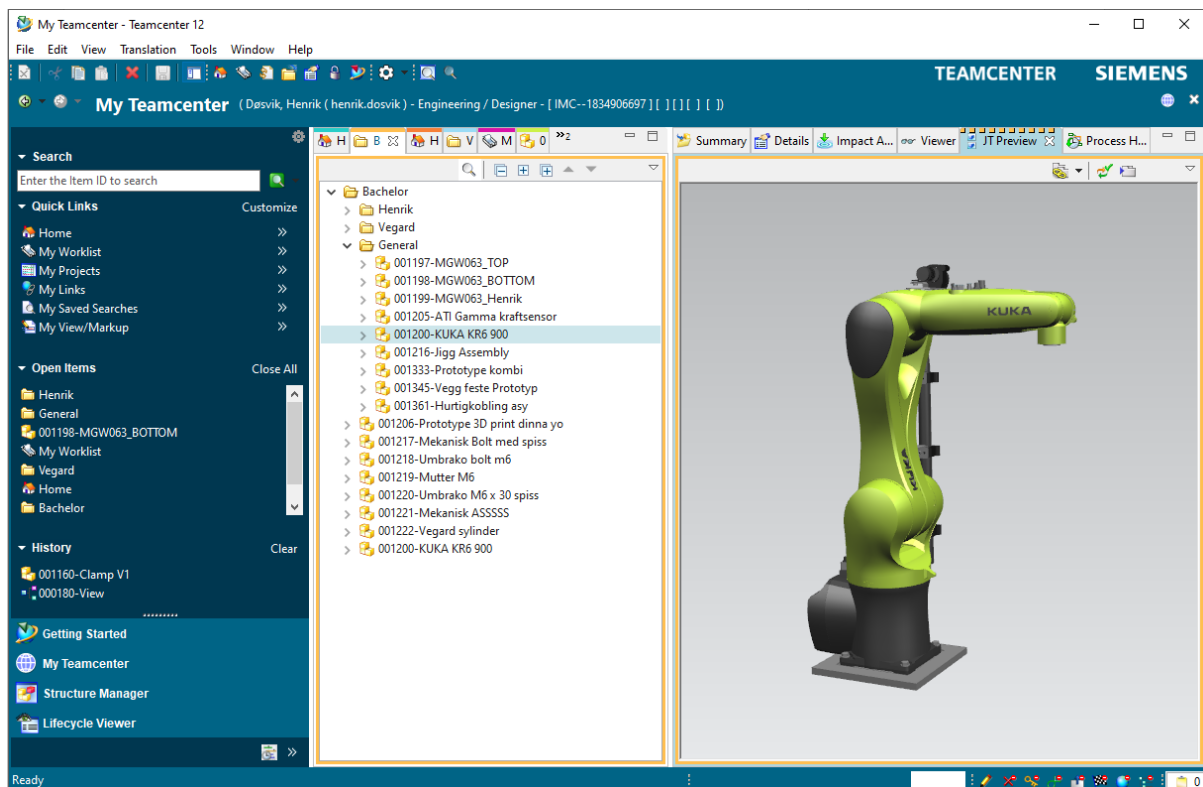
Figur 19: Coopers «Stage-gate» modell (eget bilde)

2.8. Multi-site team based engineering

Grunnet Covid-19 pandemien har vi fått beskjed om å benytte hjemmekontor. Vi har derfor tatt i bruk mange ulike verktøy for å gjøre samarbeidet i denne oppgaven lettere. I denne delen av oppgaven blir de ulike verktøyene presentert, og det vil bli beskrevet hvordan de har hjulpet til i utviklingen av det ferdige produktet.

2.8.1. Teamcenter

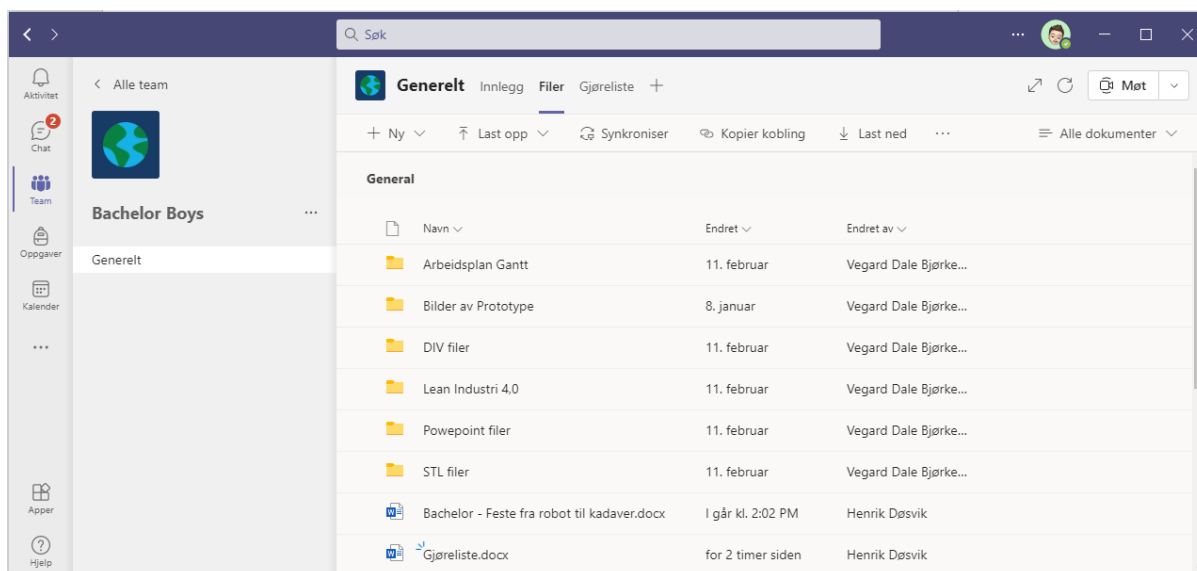
Teamcenter er Siemens egen PLM-løsning (Siemens, 2021), og fungerer som en avansert fildelingstjeneste. Programmet virker direkte med Siemens NX, noe som har gjort samarbeidet i produktutviklingen av våre konsept lettvin. Ved å opprette en mappe på Teamcenter, vil alle på teamet til enhver tid ha tilgang på alle modeller som har blitt laget i forbindelse med et prosjekt. En PLM-løsning er en stor fordel, da man ofte går inn og gjør små endringer på 3D-modeller gjennom utviklingen. Alternativet er å sende filer via e-post eller andre fildelingstjenester. Dette er mulig, men vil føre til mye unødvendig venting og man blir mer avhengig av de andre teammedlemmene. På Figur 20 kan man se eksempel på vår felles mappe i Teamcenter for bachelorprosjektet.



Figur 20: Eksempel på Felles mappe i Teamcenter (eget bilde)

2.8.2. Microsoft Teams

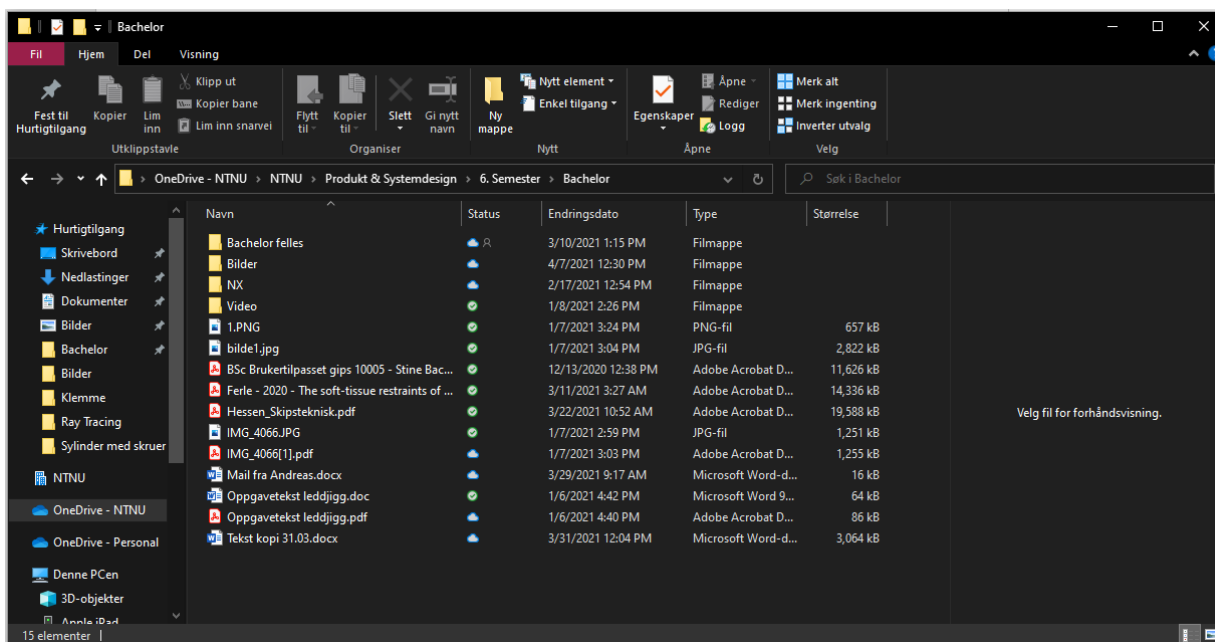
Microsoft Teams er en kommunikasjons- og samarbeidsplattform utviklet av Microsoft, og er en del av tjenesten Microsoft 365 (Microsoft, 2021). Programmet kombinerer videomøter, chatter og fillagring, og er tett integrert med Microsofts egne applikasjoner som Word, Excel og PowerPoint. Vi valgte å skrive oppgaven i Word, noe som førte til at Teams ble et naturlig sted å dele filen, da man enkelt kan jobbe på samme fil samtidig.



Figur 21: Eksempel på Microsoft Teams (eget bilde)

2.8.3. Microsoft OneDrive

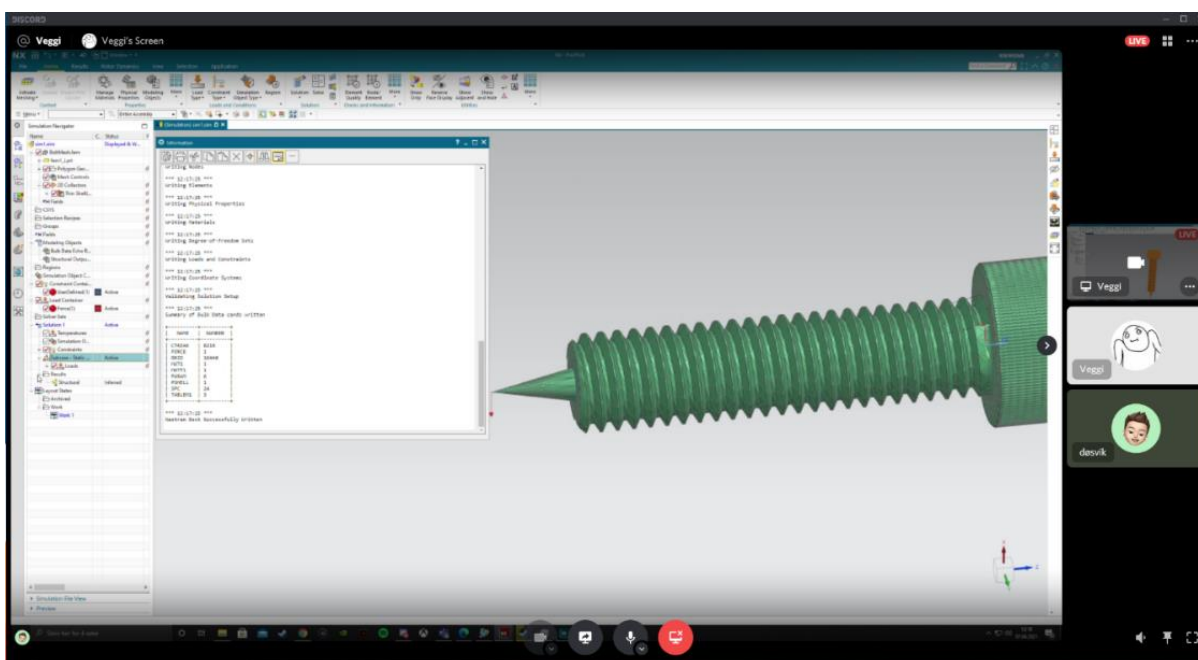
OneDrive er en sky-basert lagringsløsning og synkroniseringstjeneste utviklet av Microsoft (Microsoft, 2021). Tjenesten gjør det enkelt å synkronisere filer over flere enheter. Fordelen med OneDrive er at programmet integreres direkte i filutforskeren, noe som gjør at man kan lagre filer slik man er vant til. Deretter synkroniseres de automatisk til alle enheter man har innlogget, eller andre brukere man har delt mappe med. Programmet er tilgjengelig på de fleste plattformer, som blant annet Windows, MacOS, iOS og Android. I denne oppgaven ble OneDrive hovedsakelig brukt som et sted hvor vi lagret bilder, STL-filer og *G-koder* slik at begge medlemmer hadde tilgang. En annen fordel ved bruk av OneDrive er at alle studenter ved NTNU har lisenser via student-e-post som gir oss én TB gratis lagring.



Figur 22: Eksempel på Onedrive (eget bilde)

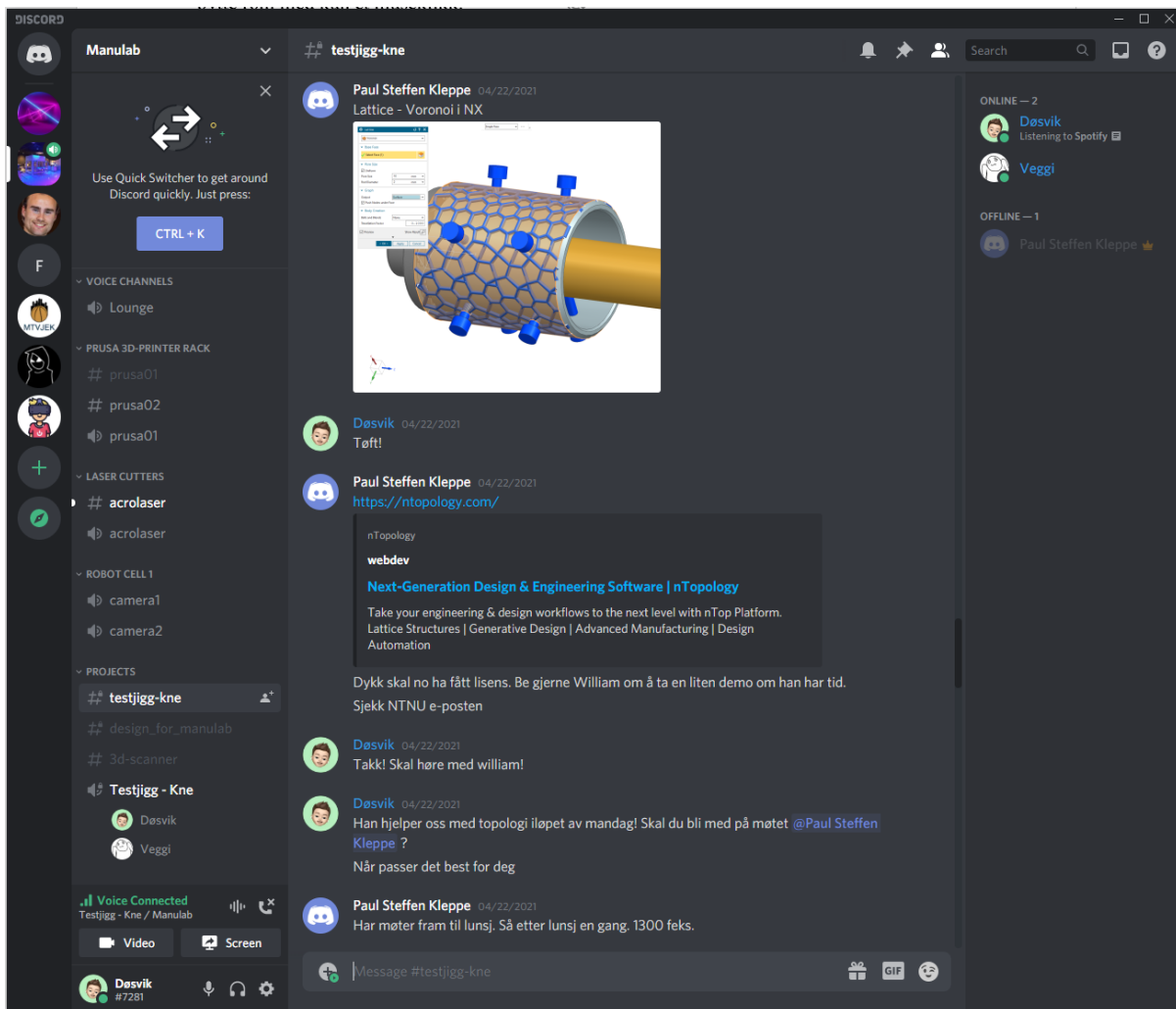
2.8.4. Discord

Discord er et gratis VoIP-program og en digital distribusjonsplattform (Discord, 2021). Discord Inc spesialiserte seg på kommunikasjon mellom brukere, og er kjent for sine chatkanaler, og muligheten for å skape samfunn på nett. Man kan kommunisere via lyd, tekst, bilde og video, noe som gjør det enkelt å dele skjerm. I tillegg har programmet innebygd AI-lyddemping noe som kan være en fordel. Det finnes mange alternative programmer med slike funksjoner, men Discord ble brukt i samarbeidet av denne oppgaven da teammedlemmene var brukere av programmet fra før.



Figur 23: Eksempel på samtale i Discord med deling av skjerm (eget bilde)

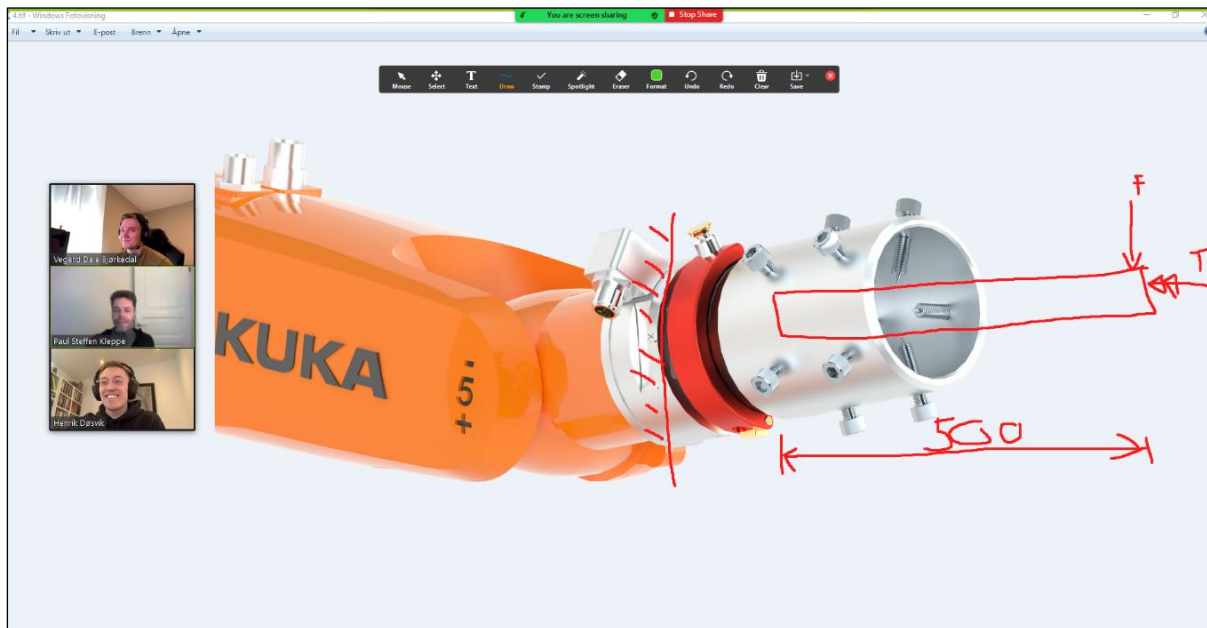
En fordel med Discord er muligheten til å opprette en egen server hvor man kan etablere flere chatterom. Dette kan være svært nyttig for bedrifter som har vært nødt til å ta i bruk hjemmekontor under pandemien. Et eksempel på bruk av denne funksjonen kan være en server med ett møterom designert til teamleder, ett rom for hvert enkelt team, og i tillegg noen diverse grupperom. Man kan alltid se hvem som er i de diverse grupperommene, og man kan enkelt bytte rom med kun et museklikk.



Figur 24: Eksempel på server i Discord (eget bilde)

2.8.5. Zoom

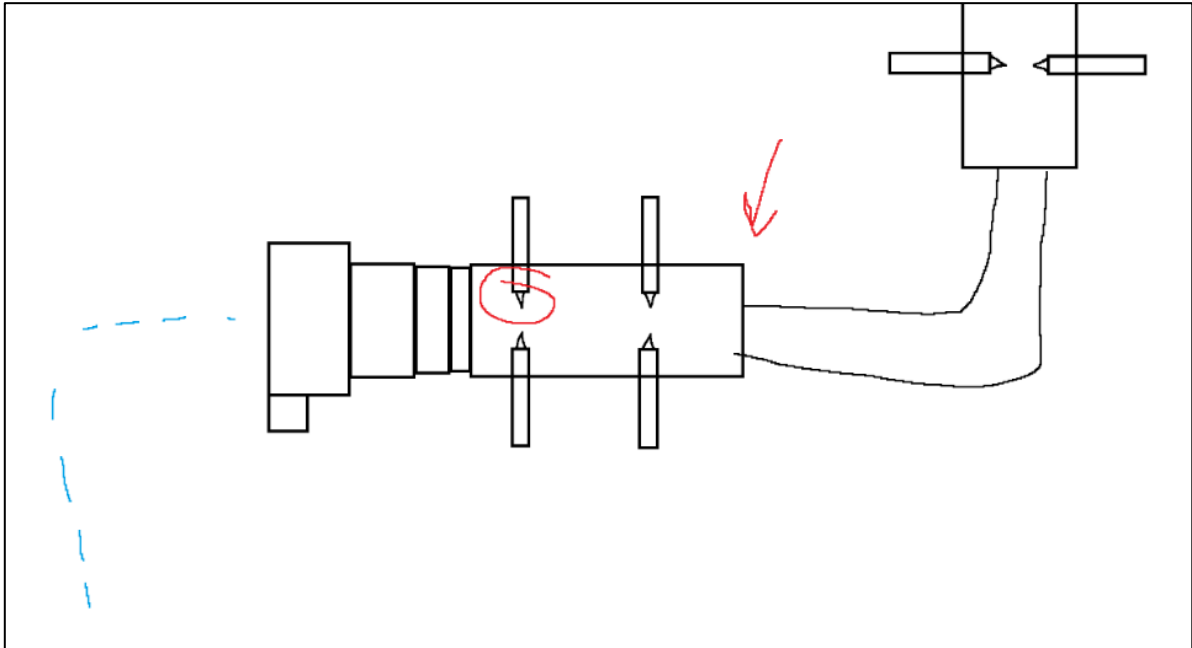
Selv om Discord har blitt brukt daglig mellom team-medlemmene i oppgaven, har *Zoom* blitt brukt som standard kommunikasjonsverktøy mellom team og veiledere. Det finnes mange gode alternativ til videosamtaler, men da Zoom er noe de fleste har tatt i bruk under pandemien ble dette et naturlig valg. Gjennom Zoom har det blitt holdt ukentlige video-møter med veileder, hvor fremgang har blitt vist frem og videre planlegging har blitt gjennomført. En fordel med Zoom er en funksjon kalt «remote controll» (Zoom Inc, 2021). Denne funksjonen gjør det mulig for en person i samtalen å ta over datamaskinen til en annen, med bekreftelse. Dette har vært et fantastisk verktøy å bruke når vi har hatt problemer med diverse funksjoner i Siemens NX og andre verktøy. En annen nyttig funksjon er «Annotation». Denne funksjonen gjør det mulig for alle deltakere å tegne på skjermen til den som deler.



Figur 25: Zoom konferanse med veileder (eget bilde)

2.8.6. Paint

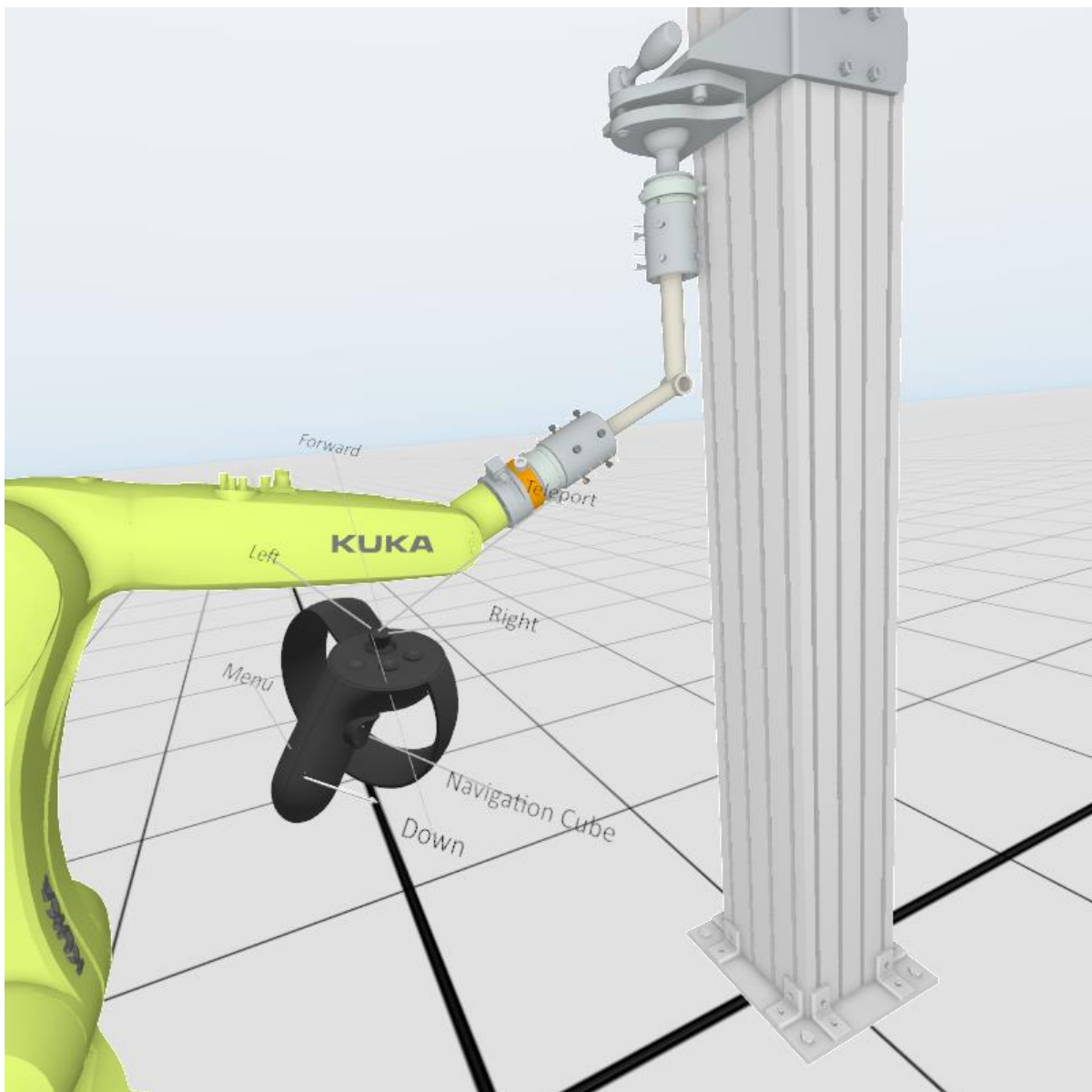
Selv med tilgang til avanserte CAD-programmer er det ofte lettere å forklare med enkel tegning. *Paint*, gratisprogrammet som blir levert ferdig installert på Windows (Microsoft, 2021), har blitt flittig brukt i konseptfasene av dette prosjektet. Paint har gitt oss muligheten til å lage raske sketsjer, noe som har gjort utvikling av konseptene lettere.



Figur 26: Eksempel på figur tegnet i Paint (eget bilde)

2.8.7. Oculus Quest 2 – Virtual Reality

Når et produkt vises til kunder i form av bilder og 3D-modeller, kan det være vanskelig for kunden å se for seg produktet i den virkelige verden. Virtual reality er en teknologi som skaper en virkelighet som man opplever gjennom et virtual reality headset (Yu, 2011). Ved å benytte virtual reality briller i utviklingen av 3D-modeller, kan utviklere og kunder se produktet i full skala, og man har i tillegg muligheten til å gå rundt objektet. Dette gjør det lettere å oppdage feil, eller se hvor det kan gjøres eventuelle forbedringer. NTNU Ålesund har kjøpt inn *Oculus Quest 2* for å kunne visualisere ulike prosjekt som blant annet testjiggen i dette prosjektet.



Figur 27: VR bilde av konsept til testjigg (eget bilde)

Oculus quest har en funksjon som gjør det mulig å benytte headsettet uten en datamaskin (Facebook Inc, 2021). Dette gjør det svært brukervennlig for utviklere og kunder å se på 3D-modeller. Bruken av denne teknologien har vært hjelpsom, da tilgang til 3D-printere ble begrenset midt i prosessen på grunn av den pågående pandemien.

2.9. Rapid prototyping

2.9.1. 3D-modellering

For utviklingen av våre konsepter har vi benyttet oss av *Siemens NX* i denne oppgaven. Dette er et avansert CAD-program (Siemens, 2021) som gir svært stor frihet når det kommer til 3D-modellering. Her har 3D-modeller av alle våre konsepter blitt laget, som vi videre har plassert inn i en digital tvilling av testjiggen som vi har studert i virtual reality. Dette har gitt oss et visuelt overblikk, noe som har vært til stor hjelp ved valg av konsept. Vi har også benyttet *NX Ray Traced Studio* til å produsere fotorealistiske bilder.

2.9.2. 3D-printing

Etter å ha sett på ulike konsepter visuelt på en skjerm, har vi benyttet oss av 3D-printere på Manulaben ved NTNU for å produsere prototyper. Dette er gode verktøy for å raskt kunne avgjøre om et konsept vil fungere i praksis. Dette har gitt oss god innsikt i hva som fungerer og ikke fungerer ved de ulike konseptene. For å printe ut en 3D-modell, konverterer man partifilen fra Siemens NX til en STL-fil. Deretter legges filen inn i et *3D-slicer* program. I vårt tilfelle Prusa Slicer. I dette programmet kan man blant annet velge tykkelse på materialet og hvor mye fyll man ønsker på modellen. Lite fyll og stor tykkelse fører til en raskere print. Senere i utviklingen benyttet vi tynnere materiale og mer fyll da dette gir et sterkere produkt, som kan brukes til eventuelle tester.

2.9.3. Manulab

Studenter ved NTNU i Ålesund har tilgang til en Manufacturing lab. Her er alt man trenger for utvikling av gode prototyper tilgjengelig (Kleppe, 2021). Det er også ulike roboter til disposisjon som vi kan bruke til eventuelle tester. Da det har vært stor pågang på den biomekaniske laben ved Ålesund sykehus, har vi med fordel benyttet oss av Manulaben for utvikling av prototyper og for å gjennomføre en styrketest av det ferdige produktet.

2.9.4. Verksted

Selv om plast er sterkt nok til å benytte i testjiggen, er det flere egenskaper ved en 3D-print som gjør den vanskelig å bruke. Siden det brukes ekte kadaver som testobjekter, er det fare for blod og annet bioavfall. Av den grunn må alle deler som har vært i direkte kontakt med kadaveret desinfiseres i en industriell maskin, eller eventuelt kastes etter testing. Plasten som brukes i 3D-printerne ved NTNU kan ikke desinfiseres i en slik maskin på grunn av høy varme. I tillegg vil det være unødvendig bruk av plast, dersom man skal printe ny innfesting til hvert testobjekt. Det kan derfor være en fordel å se på prototyper laget av metall. Ved NTNU har vi tilgang på verksted med alt vi trenger av utstyr for å produsere en slik prototype.

2.10. Styrkeberegning og topologioptimalisering

Siden nyttelast-diagrammet til KUKA KR6 anbefaler en maksimal last på 3 kg er det viktig at sluttproduktet har lav egenvekt. Vi ønsker derfor å benytte oss av styrkeberegning og topologioptimalisering for å finne måter å gjøre det ferdige produktet lettere. Det finnes mange forskjellige program som blant annet Siemens NX, Ansys og nTopology (nTopology, 2021). Målet med styrkeberegningen er å kunne spare vekt og materiale uten at det påvirker styrken til produktet.

3. Arbeidsprosess

3.1. Idémyldring

For å komme frem til et nytt alternativ for innfesting i testjiggen er det viktig å se på hva som fungerer, og eventuelt ikke fungerer ved dagens metode. Som nevnt tidligere støper de skjelettet fra kadaver i en sylinder, som videre kobles på en robot. Fordelen ved denne metoden er at det fungerer, og etter herding er det mulig å teste med relative store krefter uten at beinet løsner. Dette gir et godt utgangspunkt for kunne kjøre repetitiv testing med gode resultater. Likevel er det flere ulemper med støpe-metoden. Ved støping brukes det Aluminium klorid for å fremskynde herdingen. Dette er svært giftig, noe som fører til at herdingen må skje i et lukket kabinett. I tillegg tar prosessen lang tid, og det kreves flere helsepersonell for å forsikre at støpen blir rett i forhold til sylindere. Etter støping settes den lille sylindere inn i den store sylindere som er fastmontert på roboten. Fordelen med dette er at de kan montere beinet i den vinkelen de ønsker. Ulempen med denne metoden er at det er ingenting som passer på at beinet sitter likt neste gang det skal kobles på roboten. Plassering og vinkel blir markert med tusj, noe som fungerer, men kan føre til unøyaktige tester.

Vi ønsker å utvikle et produkt hvor testobjektene vil sitte like godt som ved støping, og samtidig vil være raskere å montere. I tillegg ønsker vi å implementere en hurtigkobling slik at kadavrene monteres helt likt hver gang de kobles på testjiggen.

I denne delen av oppgaven kommer vi til å følge Stage-gate modellen og kravspesifikasjonene nevnt tidligere, for å evaluere hvert konsept og produkt før vi går videre i prosessen. Dette hjelper oss til å unngå å bruke unødvendige ressurser på konsept som ikke vil være mulig å bruke i testjiggen.

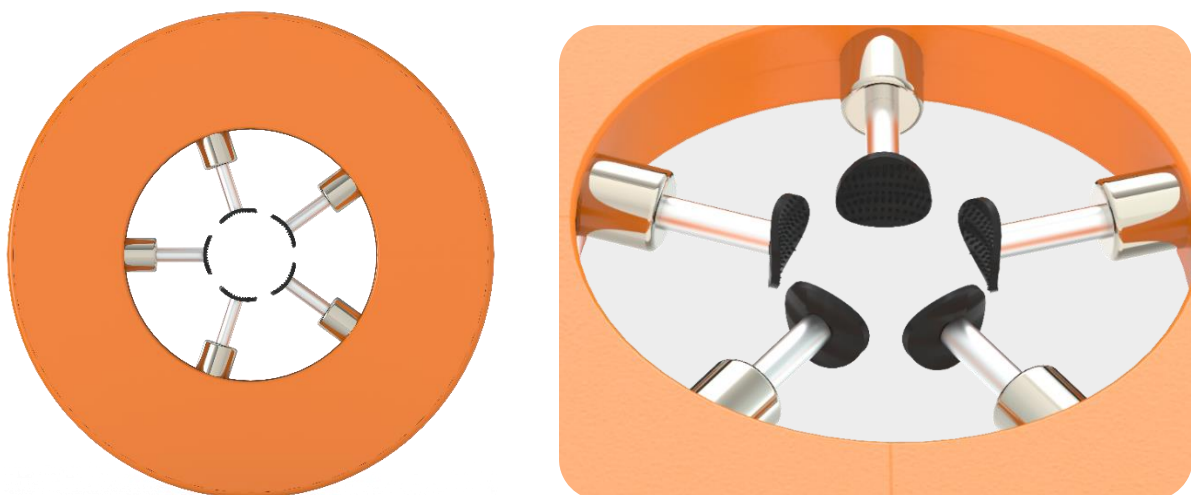
3.2. Konseptfase 1

Ved konseptfase 1, skrev vi ned og skisserte flere mulige konsept. Mange ulike forslag ble diskutert, og vi hadde stort fokus på at montering av testobjekt skulle være raskt og enkelt. Vi startet med tre ulike teknikker for innfesting:

1. Hydraulikk
2. Universalklemme
3. Gjenge bolt system

3.2.1. Hydraulisk

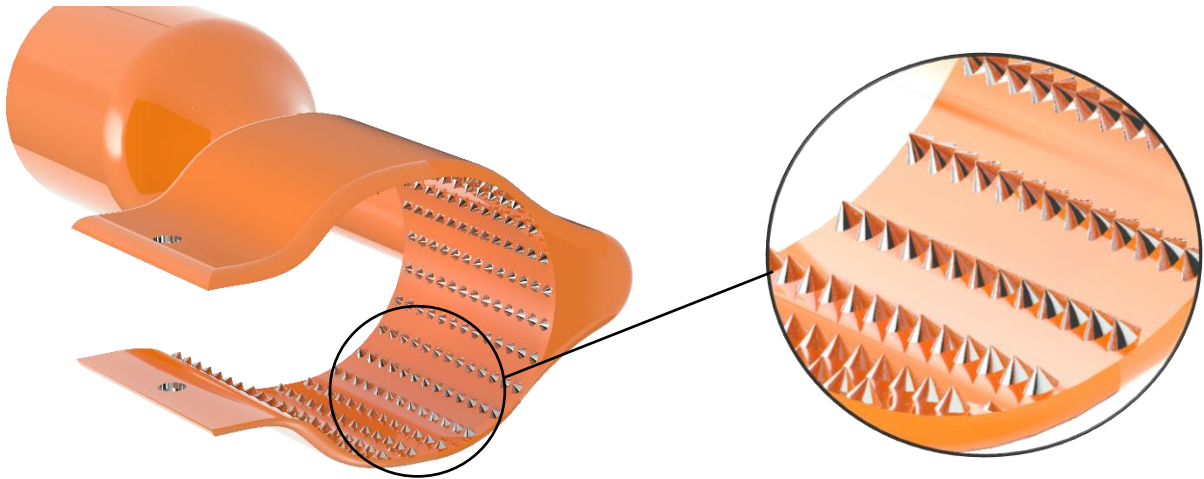
Det første konseptet vi kom frem til er en innfestning med hydraulisk/pneumatisk stempler (Figur 28). Tanken bak dette konseptet er at det vil være raskt og brukervennlig. Ved bruk av fem til ti stempler drevet av olje eller luft vil trykket fordeles likt over alle stemplene. Dette er en stor fordel da skjelettbein er ujevne og dette konseptet vil gjøre monteringen lett. Skjelettbein er glatte, og for å holde fast beinet må man ha en overflate som gir godt grep. Vår løsning er å bruke stempel med små pigger. Disse piggene vil sikre at beinet ikke glir. En ulempe med dette konseptet er at det vil kreve en oljepumpe eller luft-kompressor for å drive stemplene, noe som kan føre til høy vekt. Videre består den av mange små deler, noe som gjør den vanskelig å sterilisere. I tillegg ville det blitt vanskelig å feste både tibia og fibula, da et slikt konsept passer bedre til å holde kun ett bein.



Figur 28: Konseptbilde av hydraulisk (eget bilde)

3.2.2. Universalklemme

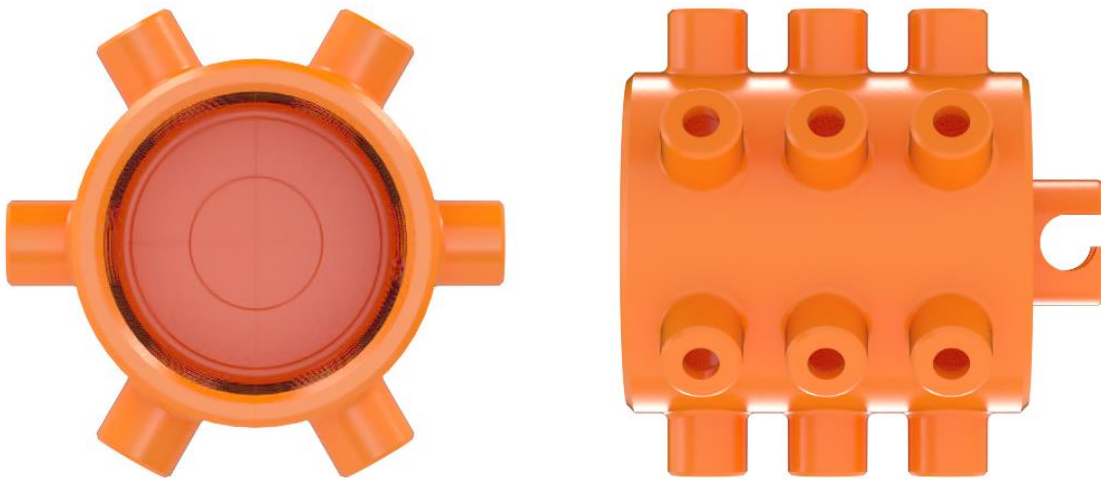
Et annet konsept vi kom frem til var en universalklemme slik som på Figur 29. Fordelen med dette konseptet er lav egenvekt og simpelt design. Siden benene er glatte benyttes pigger for å gjøre festet bedre. Dette ville vært svært brukervennlig. Ulempen med dette konseptet er at det antagelig vil bli vanskelig å feste både tibia og fibula. Det er også usikkert om dette konseptet håndterer de kreftene som påføres under testing.



Figur 29: Konsept av universalklemme med spisser (eget bilde)

3.2.3. Gjenge bolt system

I dette konseptet blir det brukt bolter for å stramme kadaveret fast. Her strammes hver bolt fast til kadaveret slik at det sitter sentrert i en sylinder. Dette er en forenklet versjon av det hydrauliske konseptet. Slik som ved de andre konseptene trengs det noe for å få grep på det glatte beinet. For å løse dette er en mulighet å 3D-printe hetter med pigger som kan tres på boltene (Figur 31). En ulempe med gjengebolt-systemet er at sentrering av kadaveret vil være en utfordring da skruene strammes manuelt. Dette kan løses ved å implementere en styrepinne på bunnen av sylindren som man kan presse inn i beinmargen.



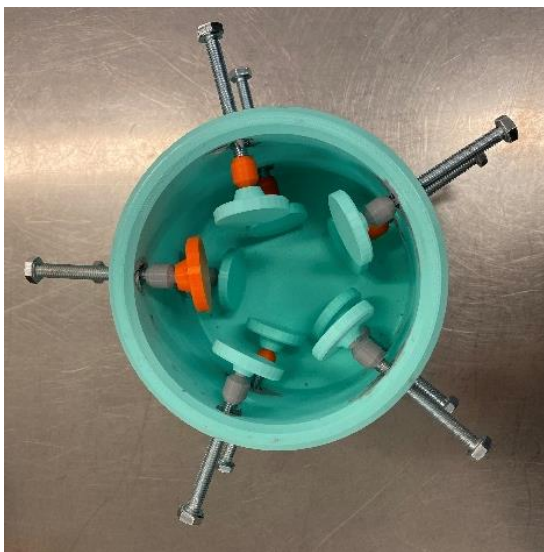
Figur 30: Konseptbilde av gjenge bolt system (eget bilde)



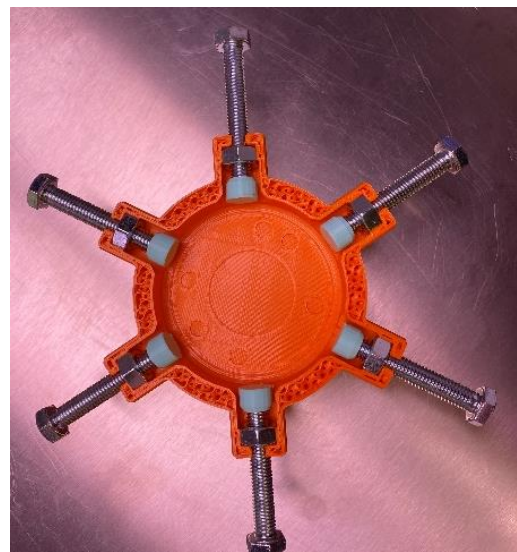
Figur 31: Bolt med piggplate v1 (eget bilde)

3.2.4. Testing

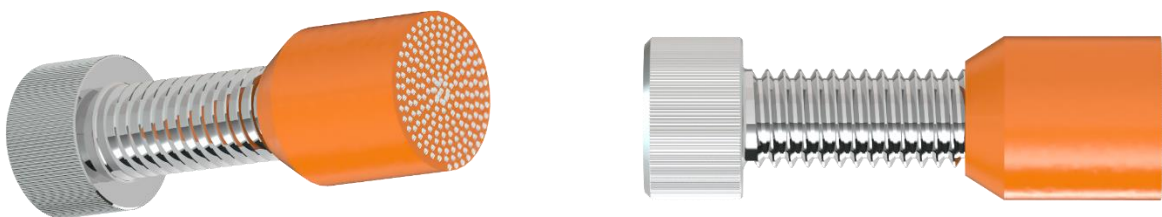
Av de tre konseptene ble gjenge-bolt systemet valgt. Dette var klart det beste alternativet med tanke på lav egenvekt, sterilisering og mulighet for innfesting av både tibia og fibula. På Figur 33 og Figur 32 vises prototyper av gjengebolt systemet. Vi valgte å 3D-printe prototyper da dette går raskt og vi får testet hva som fungerer og ikke fungerer fortløpende. Det ble besluttet at platene på Figur 31 var for store. Vi valgte derfor å lage en ny versjon med små plater slik som Figur 34. En test med innspenning av et kosteskraft viste likevel at de 3D-printede hettene med små pigger rett og slett ble for svake, og vi så det var behov for videreutvikling.



Figur 33: Prototype gjengebolt system v1 (eget bilde)



Figur 32: Prototype gjengebolt system v2 (eget bilde)

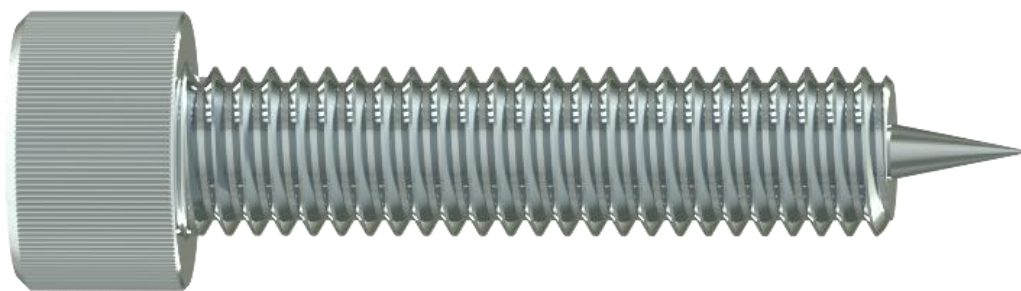


Figur 34: Bolt med piggplate v2 (eget bilde)

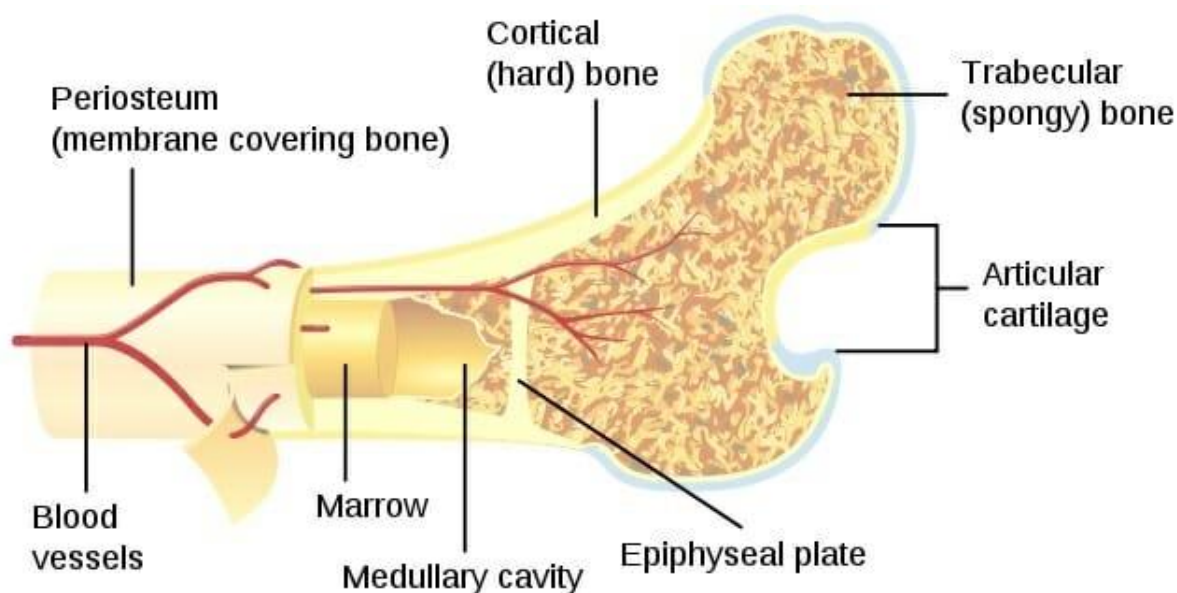
3.3. Konseptfase 2

3.3.1. Bolter med spiss

Etter testing i konseptfase 1, viste det seg at bolter med 3D-printet hette ikke fungerte slik vi ønsket. Det var behov for noe sterkere, og ønsket derfor å teste maskinerte bolter med spiss. På Figur 35 kan man se eksempel på en bolt med maskinert spiss. Som man kan se på Figur 36 består en *rørknokkel* av beinmarg, blodårer og knokkelvev. Styrken og sammensetningen av knokkelvevet varierer. Den hardeste delen av en knokkel er «Cortical Bone», også kalt *cortex*. Dette er det ytterste laget av beinet. Ved å ha en kort, smal spiss, får vi muligheten til å penetrere cortex i tillegg til at bolt-veggen legger press på utsiden av rørknokkelen. På dette viset skaper vi en rigid kobling, samtidig som vi unngår å skape sprekker i beinet. En ulempe med dette er at boltene må maskineres siden dette ikke er en vare som kan bestilles.



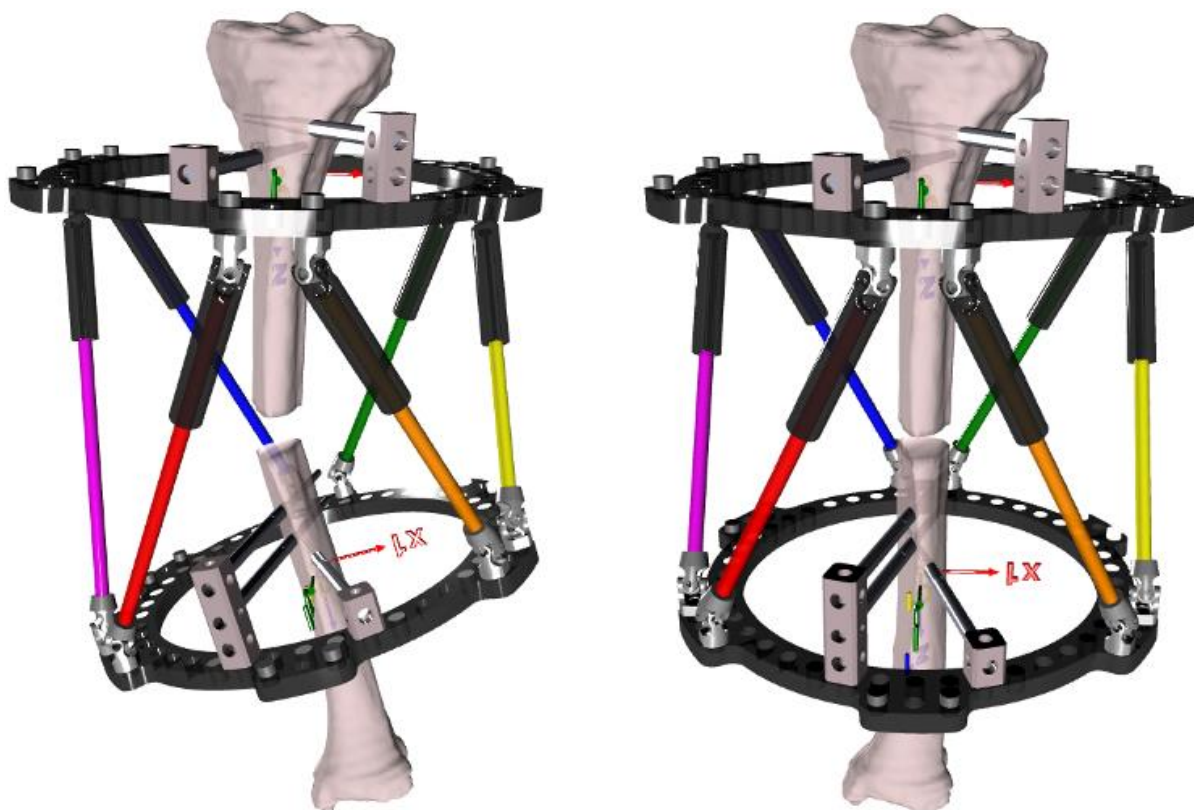
Figur 35: Modell av bolt med nålespiss (eget bilde)



Figur 36: Beinstruktur av en rørknokkel (BD Editors, 2017)

Etter konsultasjon med faglig veileder Andreas Fagerhaug Dalen ble det klart at det var enkelte usikkerheter med bolt-metoden. Det største problemet var usikkerheten om hvor godt spissene ville sitte i lengden, med tanke på svakhet i beinet. Et testobjekt testes som regel 3 ganger, og det er viktig for testresultatene at beinet ikke løsner.

Etter videre diskusjon med Dalen, ble det forklart at under enkelte kirurgiske inngrep bruker de noe kalt «Taylor Spatial Frame» (Figur 37). Denne rammen brukes for rette opp i komplekse brudd, ved å borre kirurgiske pinner av metall gjennom beinet. Metallpinnene blir deretter fastmontert i Taylor-rammen noe som gjør det umulig for pasienten å bevege det som er fastspent, slik at bruddet holdes stabilt mens det gror. Sammen ble vi enige om å teste noe lignende, basert på vårt gjenge bolt system.



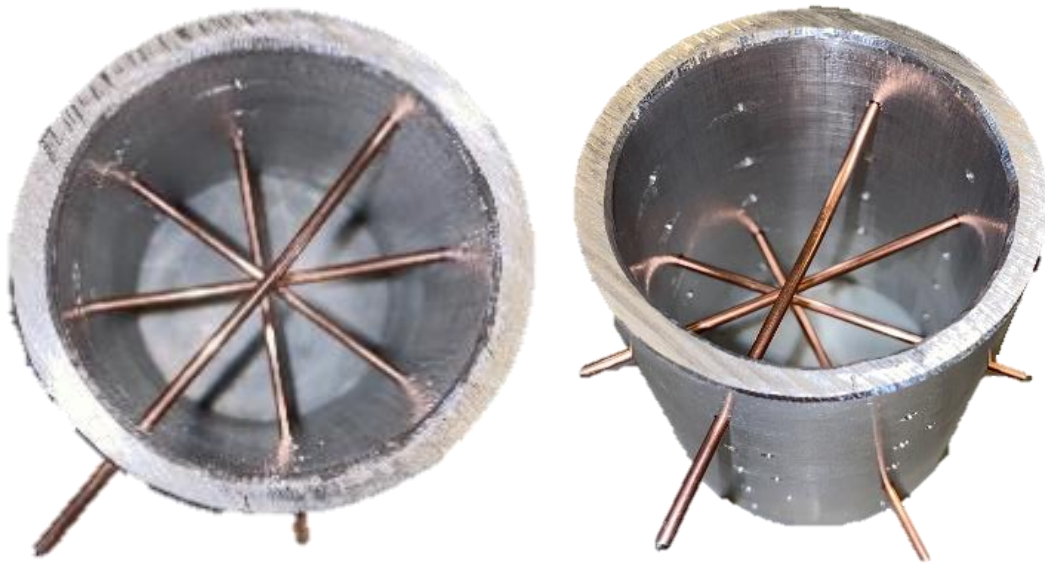
Figur 37: Taylor Spatial Frame (Fecad, 2020)

3.3.2. *Sylinder med stålpinner*

På Figur 38 vises et eksempel på en kirurgisk låsepinne som brukes i en «Taylor spatial frame». Ved å bore gjennom beinet vil det sannsynligvis sitte godt. I tillegg har man også muligheter til å låse fast pinnene ved å bøye de på utsiden av røret. Kirurgiske låsepinner vil være sikrere enn bolt metoden, men det vil sannsynligvis ta lengre tid å feste beinet. Vi ønsker derfor å teste begge metodene. Vi har derfor produsert prototype i aluminium for begge konseptene på verkstedet til NTNU Ålesund for å se hva som fungerer best.



Figur 38: Eksempel på kirurgisk låsepinne som brukes i Taylor Spatial Frame (eget bilde)



Figur 39: Prototype av sylinder med kirurgiske låsepinner (eget bilde)

3.3.3. Manuell test på griseknokkel

Ved testing av nålespiss boltene var det enkelt å sentrere rørknokkelen. I tillegg satt det godt etter vi fikk spent inn alle boltene. Likevel er det en usikkerhet om hvor godt de korte spissene vil sitte i knokkelen etter flere tester. Dersom beinet løsner under en test vil det være vanskelig å feste det nøyaktig slik det sto tidligere, noe som vil føre til usikkerheter i testresultatene.

Ved test av kirurgiske låsepinner var det vanskelig å sentrere knokkelen samtidig som vi skulle penetrere cortex. I tillegg var det problematisk å treffe hullet på den andre siden av sylindren da den tynne låsepinnen ble ført til siden av ujevnhetene i beinet. Av den grunn benyttet vi en prototype i plast, da vi enkelt kunne bore låsepinnene gjennom plasten. Fordelen med låsepinnene var at når vi fikk festet et par gjennom griseknokkelen, satt det godt, og det er liten sannsynlighet for at det løsner over tid.

Ved å kombinere begge metodene vil vi få alle fordelene og samtidig eliminere ulempene ved begge metodene. Begge metodene viste seg å holde beinet svært godt, og vi hadde ikke mulighet til å bevege knokkelen med håndkraft ved noen av tilfellene. Vi ønsker derfor å gå videre med begge konseptene. På figur 40 og 41 kan man se bilder av testing med nålespiss bolter og kirurgiske låsepinner.



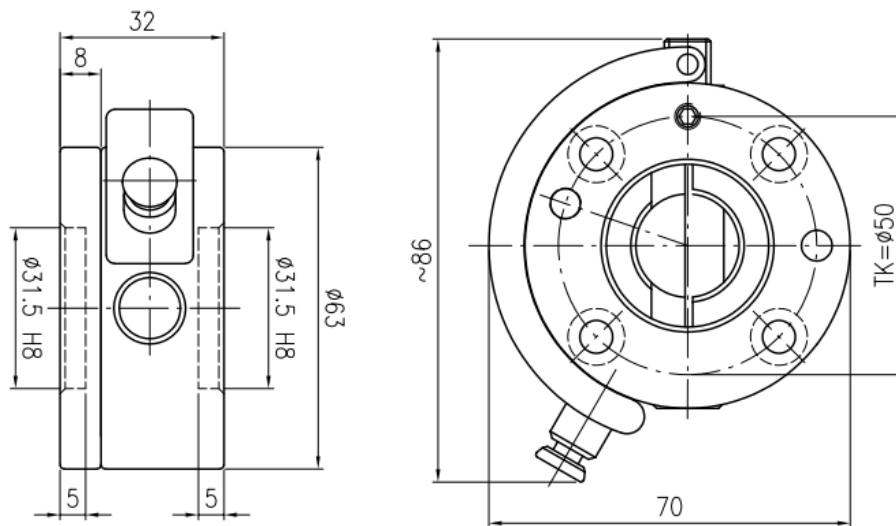
Figur 40: Test med kirurgiske låsepinner i 3D-printet prototype (eget bilde)



Figur 41: Test av nålespissbolter i prototype produsert i aluminium (eget bilde)

3.3.4. GRIP MGW063

For å sikre at testobjektet sitter likt i roboten hver gang det kobles av og på testjiggen, har vi valgt å bruke en hurtigkobling av typen *GRIP MGW063* (GRIP, 2021). Denne er produsert av det tyske selskapet «Grip» som er et markedsledende selskap innenfor hurtigkoblinger til industri-roboter. Koblingen fungerer ved at den ene delen senkes inn i den andre, og deretter blir delene låst sammen ved hjelp av et håndtak som vrís og låses fast. Fordelen med en slik kobling er at den raskt og enkelt kan demonteres fra roboten. Hurtigkoblingen er produsert av aluminium og har derfor en lav egenvekt på 340 gram. I tillegg er det brukt lave toleranser, noe som fører til solid innfesting (Figur 42). Det er også oppgitt en maks last på 16 kg, noe som er innenfor som det som brukes under testing hos Ålesund biomekaniske lab.



Figur 42: Maskintegning MGW063 (GRIP, 2021)



Figur 43: Montering av MGW063 (eget bilde)

3.3.5. Rotasjonskobling

Det kan oppstå utfordringer ved montering av kadaver, og forskerne ønsket derfor muligheten for fri rotering i hurtigkoblingen mellom robot og testobjekt. Det er dessverre ingen produkter i Grip sitt sortiment som tillater fri rotasjon. Vi har derfor utviklet vårt eget rotasjonsfeste, se Figur 44. Dette festet består av to smale sylindere, og fungerer ved at den minste sylindren senkes inn i den andre, hvor den kan rotere fritt. For å stoppe roteringen er det to gjengehull på den store sylindren hvor to M10x20 bolter strammes og låser rotasjonen. Ved å montere rotasjonskoblingen før hurtigkoblingen, vil testobjektene fremdeles kunne kobles raskt av og på testjiggen med riktig vinkel.



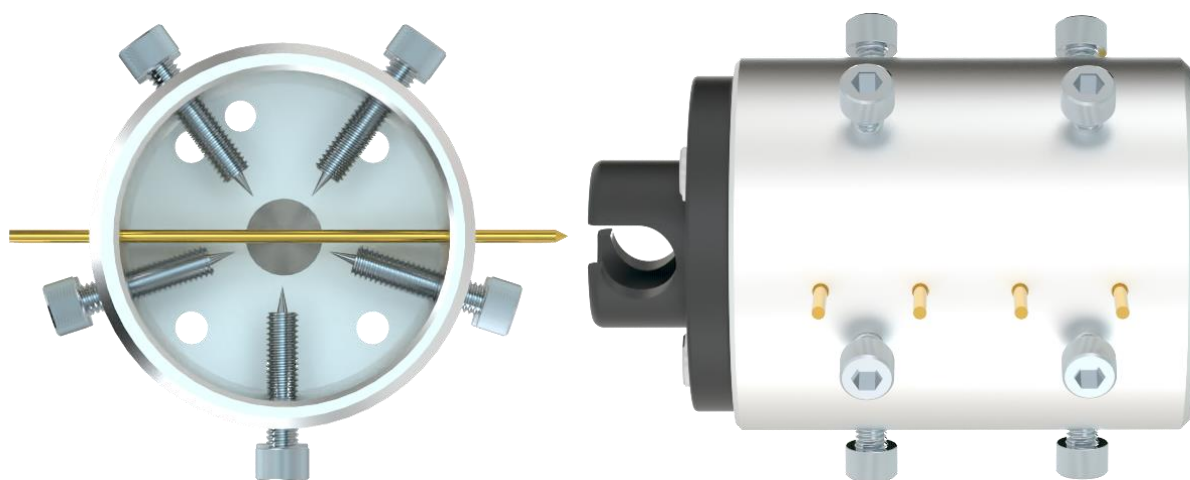
Figur 44: Rotasjonsfeste (eget bilde)



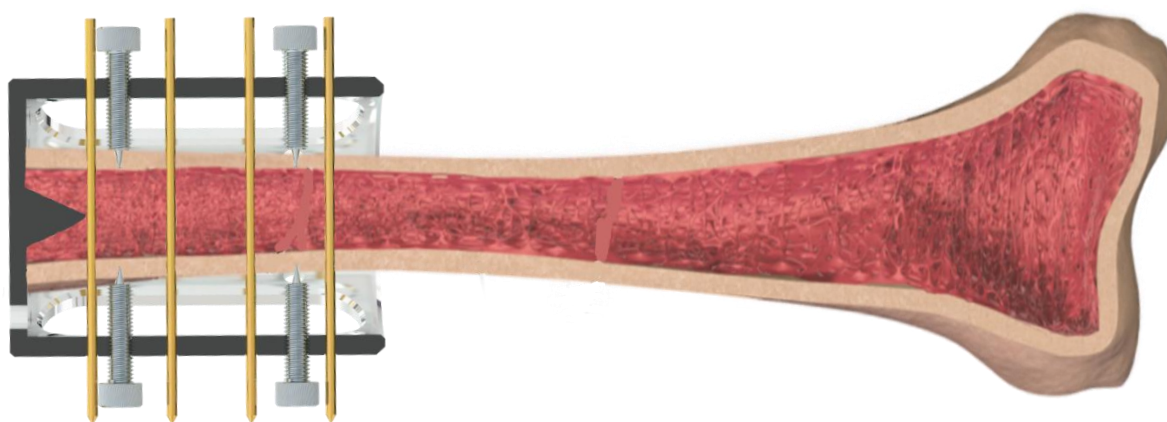
Figur 45: Montering av MGW063 med rotasjonskobling (eget bilde)

3.4. Valgt Konsept

Etter testing med kirurgiske låsepinner og nålespiss bolter på griseknokkel viste det seg at egenskapene til begge metodene var gode, og vi har derfor valgt å kombinere de til ett konsept. Vårt valgte konsept består derfor av en sylinder i metall, med 12 maskinerte nålespiss bolter, fire gjennomtrengende låsepinner og en innebygget styrepinne på bunnen for å enkelt kunne sentrere testobjektene (Figur 46). Ved å montere rørknokkelen med boltene først, løser vi problemet med at den første låsepinnen var vanskelig å borre gjennom cortex. Boltene som brukes har innvendig sekskant, slik at de enkelt kan strammes med en skrumaskin. Låsepinnene borres gjennom ved hjelp av et spesialverktøy de har tilgjengelig på den biomekaniske laben. Sylinderen er laget for å passe direkte med hurtigkoblingen GRIP MGW063. Alle hull i sylinderen er gjenget, slik at man slipper bruk av muttere. På Figur 47 kan man se en illustrasjon av hvordan en rørknokkel skal festes.



Figur 46: Konseptbilder av valgt konsept (eget bilde)



Figur 47: Illustrasjon av hvordan en rørknokkel vil festes i sylinderen (eget bilde)

3.5. Nytt oppsett for testjiggen

Vi har utviklet et fullt oppsett for den biomekaniske laben i Ålesund som baserer seg på vårt valgte konsept. Som nevnt tidligere i oppgaven benyttet forskerne støping for både robotfestet og veggfestet. Siden et kne består av rørknokler på begge sider av leddet, ønsker vi å benytte vårt nye konsept på begge sider av testjiggen.






3.5.1. Robotfeste

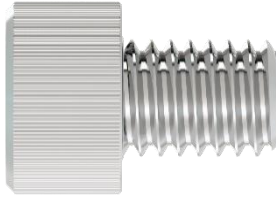


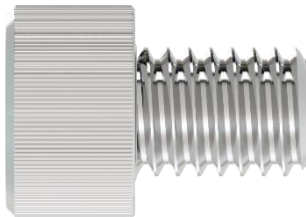
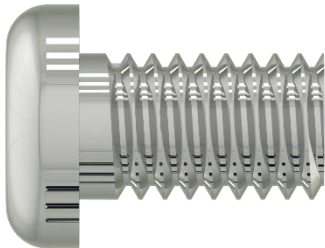
Vårt konsept for robotfestet består hovedsakelig av en sylinder kombinert med en hurtigkobling og en roteringskobling. Hurtigkoblingen gjør det mulig å koble testobjektet av og på testjiggen raskt. Roteringskoblingen gjør det lett å få riktig vinkel på testobjektet, uten å reprogrammere roboten. På Figur 48 kan man se det nye robotfestet. Alle deler er spesifisert i vedlagt stykkliste, Tabell 4.



Figur 48: Bilde av robotfestet til testjiggen: Eksplodert (eget bilde)

Stykkliste for robotfeste

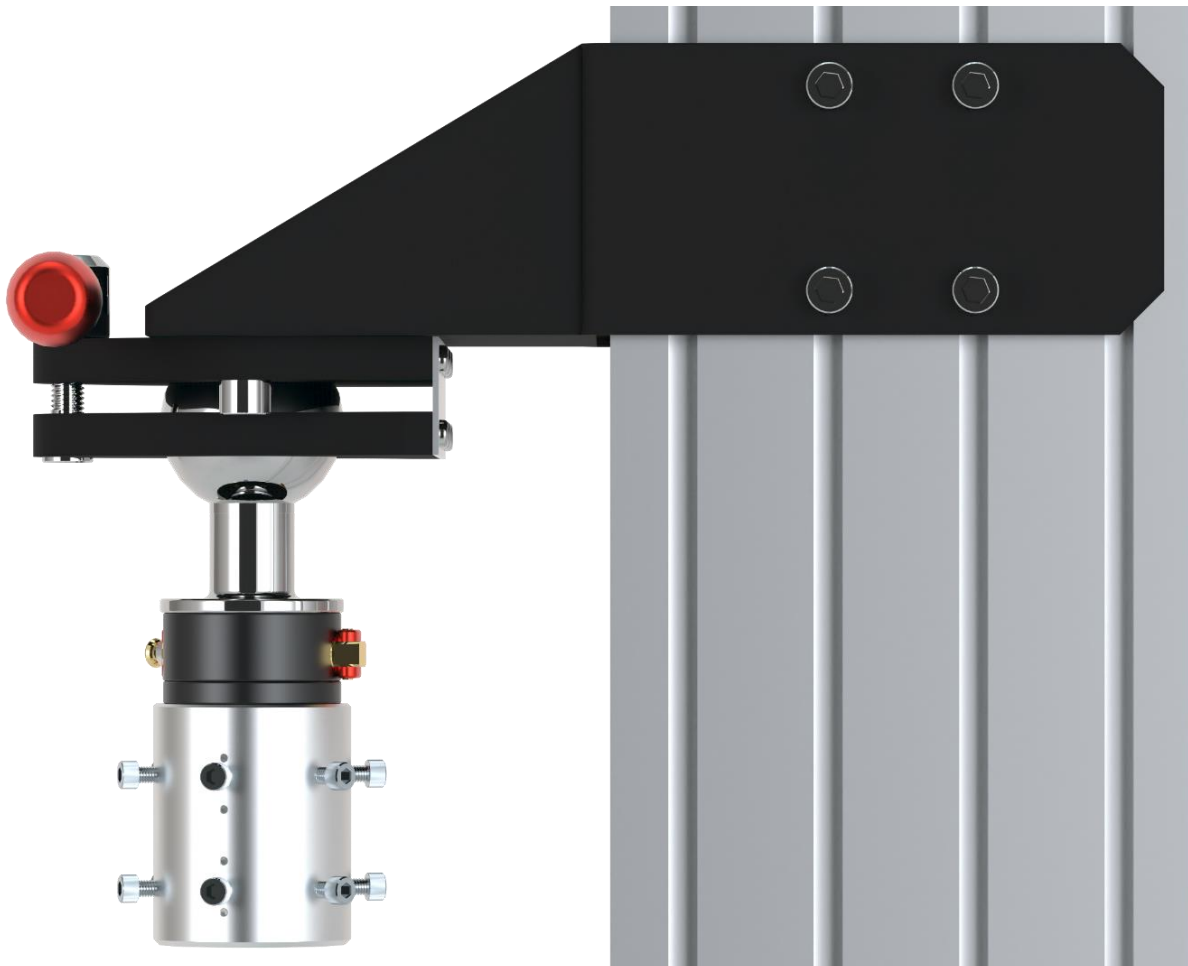
| Antall | Beskrivelse | Navn | Bilde (Egne bilder) |
|--------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Sylinder med gjengehull maskinert av et 70 mm rør med 5 mm gods. | Sylinder |  |
| 12 | M8x40 mm Bolter med maskinert nålespiss | Syrefast sylindrhodeskrue med innv sekskant M8x40 mm DIN 912 |  |
| 4 | Kirurgisk låsepinne | Kirurgisk låsepinne |  |
| 1 | Hurtigkobling topp del (GRIP, 2021) | MGW063 |  |
| 1 | Hurtigkobling bunn del (GRIP, 2021) | MGW063 |  |

| | | | |
|---|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 4 | Bolt for kobling mellom hurtigkobling toppdel og sylinter | Sylinderhodeskrue med innv. sekskant M6x4 DIN 912 |  |
| 1 | Rotasjonskobling topp | Rotasjonskobling |  |
| 1 | Rotasjonskobling bunn | Rotasjonskobling |  |
| 2 | Låsebolter til rotasjonskobling | Sylinderhodeskrue med innv. sekskant M10x20 DIN 912 |  |
| 8 | Bolter for montering mellom rotasjonskobling bunn, kraftsensor, hurtigkobling bunn og rotasjonskobling topp. | Linsehodeskrue med innv. sekskant M6x10 |  |

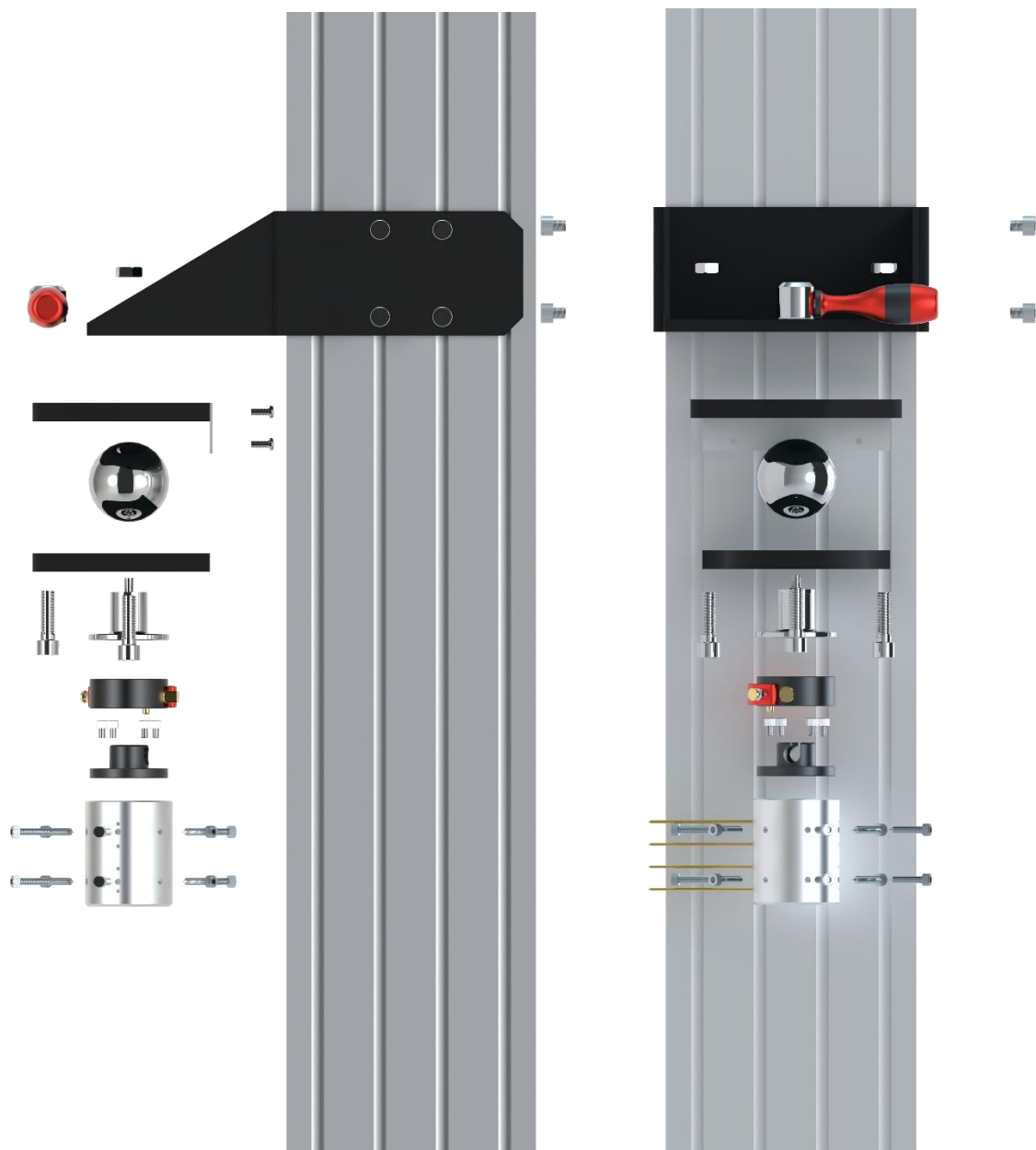
Tabell 4: Stykkliste til robotfestet

3.5.2. Veggfeste

Vårt konsept for veggfestet består hovedsakelig av et kuleledd, kombinert med vår nye festeanordning. Kuleleddet vil gjøre det mulig å rotere koblingen 360 grader om seg selv, samtidig som man kan ha en vinkel i x og y retning ut fra stolpen. Kuleledd er kjent for å skape sterke forbindelser, og fungerer ved at man har to plater på hver sin side av kulen som strammes sammen. Dette vil kunne låse posisjonen, uten fare for bevegelser. I tillegg kan man justere høyden slik man ønsker på den fastmonterte stolpen. I veggfestet vil det også være en hurtigkobling, slik at testobjektet enkelt kan demonteres fra testjiggen. På Figur 49 og Figur 50 kan man se det nye veggfestet. Alle deler er spesifisert i vedlagt stykklister, se Tabell 5.



Figur 49: Veggfeste sett fra siden (eget bilde)



Figur 50: Eksplodert bilde av veggfeste (eget bilde)

Stykkliste for veggfeste

| Antall | Beskrivelse | Navn | Bilde (Egne bilder) |
|--------|------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Stolpe for fastmontering av veggfestet. (RK ROSE KRIEGER, 2021) | Stålprofil 160x160 |  |
| 1 | Stålbrakett for montering på stolpe | Monteringsplate |  |
| 1 | Hurtigkobling nedre del (GRIP, 2021) | MGW063 |  |
| 1 | Hurtigkobling topp del (GRIP, 2021) | MGW063 |  |

| | | | |
|---|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | <p>Nedre del av kuleledd</p> <p>Maskinert i CNC maskin. Laget for å passe direkte med MGW063 hurtigkobling. Kuleleddet må være i to deler for å kunne montere det i stålbrakettene.</p> | Kuleledd bunn |  |
| 1 | <p>Øvre del av kuleledd (Easysteel, 2021)</p> | Kule i rustfritt stål m/ gjenge |  |
| 1 | <p>Stålbrakett til kuleledd, Toppdel</p> | Kulebrakett topp |  |
| 1 | <p>Stålbrakett til kuleledd, bunn</p> | Kulebrakett bunn |  |
| 1 | <p>Stålplate, for å koble stålbrakett topp og bunn sammen</p> | Bakplate |  |

| | | | |
|----|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| 1 | Håndtak for stramming av kuleledd | Håndtak |  |
| 8 | Bolt til festing av stålbrakett til stolpen | Sylinderhodeskrue med innv. sekskant M12x40 DIN 912 |  |
| 2 | Bolt til kuleledd topp og bunn | Sylinderhodeskrue med innv. sekskant M12x40 DIN 912 |  |
| 4 | Bolter til å feste prototype til hurtigkobling topp | Sylinderhodeskrue med innv. sekskant M6x4 mm DIN 912 |  |
| 10 | Bolter til kuleledd og hurtigkobling bunn | Sylinderhodeskrue med innv. sekskant M6x15 mm DIN 912 |  |
| 2 | Muttere for kuleledd | M12 mutter |  |

Tabell 5: Stykkliste for veggfestet

3.6. Styrketest av produktet

Da vår prototype skal brukes til medisinsk forskning er det en fordel å forsikre oss om at konseptet er pålitelig, og fungerer som ønsket. Som nevnt tidligere har vi mye utstyr tilgjengelig via Manulaben på NTNU, og vi har derfor rigget opp vår egen biomekaniske testjigg på Campus. Vi ønsker å gjennomføre en styrketest av vårt valgte konsept, for å bevise at det fungerer i praksis.

I denne testen skal vi simulere testjiggen ved den Biomekaniske laben ved Ålesund sykehus. Vi har ikke samme utstyr som sykehuset, noe som fører til at oppsettet blir litt annerledes, men testen vil likevel bevise om konseptet fungerer eller ikke. Vi har produsert både et bord-feste, og et robotfeste basert på vårt valgte konsept. Her vil en griseknokkel bli innspent i begge sider. På Manulaben har vi tilgang til en *OMRON TM12* (Omron, 2021) som brukes sammen med kraftsensor *Robotiq Force Torque Sensor FT 300* (Robotiq, 2021). Dette er tilsvarende utstyr som de bruker ved den biomekaniske laben, men kommer fra andre produsenter.



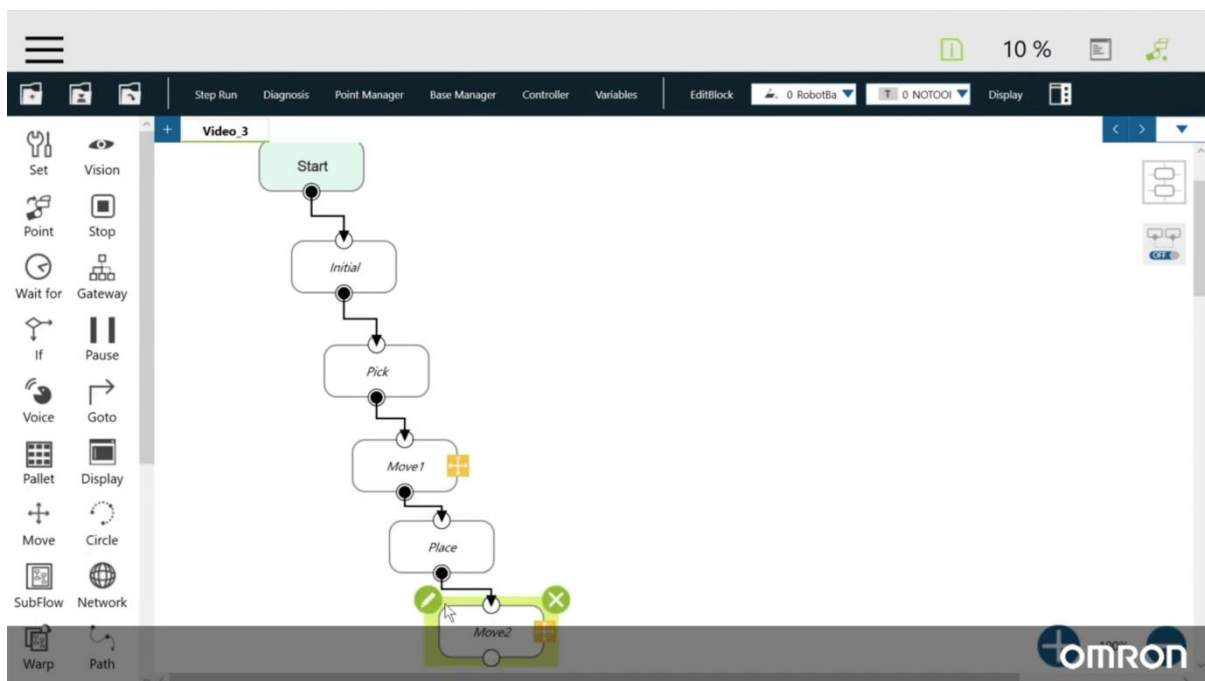
Figur 52: Omron TM12 (Omron, 2021)



Figur 51: Robotiq Force Torque Sensor FT 300 (Robotiq, 2021)

Testen går ut på å påføre repeterende bevegelser for å se om det er noen svakheter med innfestingen. Ved den biomekaniske laben blir testobjekter påført krefter opp imot 30 N i aksielle og radielle krefter, og 3 Nm i rotasjon. Vi har valgt en sikkerhet på 1,7 og ønsker derfor å teste griseknokkelen med 50 N aksielle og radielle krefter, og 5 Nm i rotasjon. For å simulere flere tester vil vi repetere bevegelser i ulike retninger gjentatte ganger over et lengre tidsrom.

Vi benytter oss av *OMRON Tmflow* for programmering av roboten. Dette er et svært intuitivt program, hvor bevegelser av roboten kan programmeres enkelt ved å flytte roboten for hånd. Deretter trykker man på en knapp som sender robotens posisjon som koordinater direkte til programmet, alt med kun ett tastetrykk. På denne måten får vi programmert bevegelsene vi ønsker raskt og enkelt. Deretter legger vi til begrensninger i forhold til kraftsensoren, og kjører en loop på programmet.

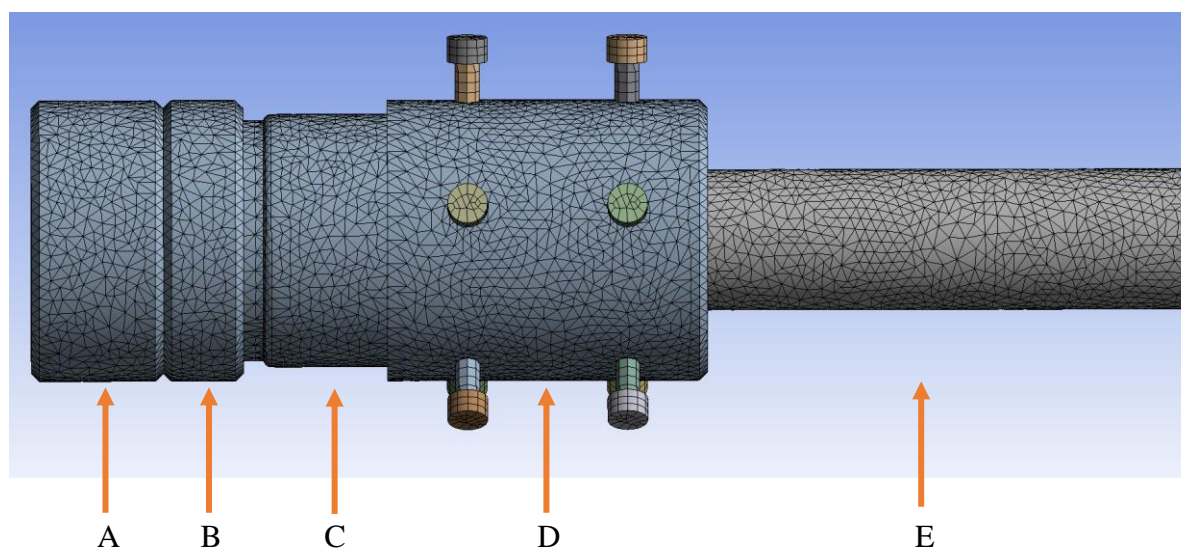


Figur 53: Eksempel på programmering av robot i OMRON Tmflow

3.7. Styrkeberegning

For å vite hvordan konseptet vil reagere på de forskjellige belastningene, er det viktig å analysere geometrien. Finite Element Method (FEM) er en numerisk teknikk for å utføre Finite Element Analysis som beregner styrken på 3D-modeller. I denne oppgaven har det blitt brukt *ANSYS Workbench* for beregningene (ANSYS, 2021).

En FEM analyse fungerer ved at det lages en mesh av CAD-modellen. En mesh er en oppdelt geometri av modellen, hvor utregningen av styrkeberegningen blir utført. Ved å ha en «grov» mesh med store element, vil man få en effektiv, men mindre nøyaktig analyse. Ved å ha en «fin» mesh, med små element, vil man få en mer nøyaktig analyse som er mer tidkrevende. Det beste er å finne en størrelse på elementene som gir en effektiv og samtidig god analyse. På Figur 54 kan man se eksempel på mesh på en forenklet modell av robotfestet. Vi har valgt elementer på 1 mm.



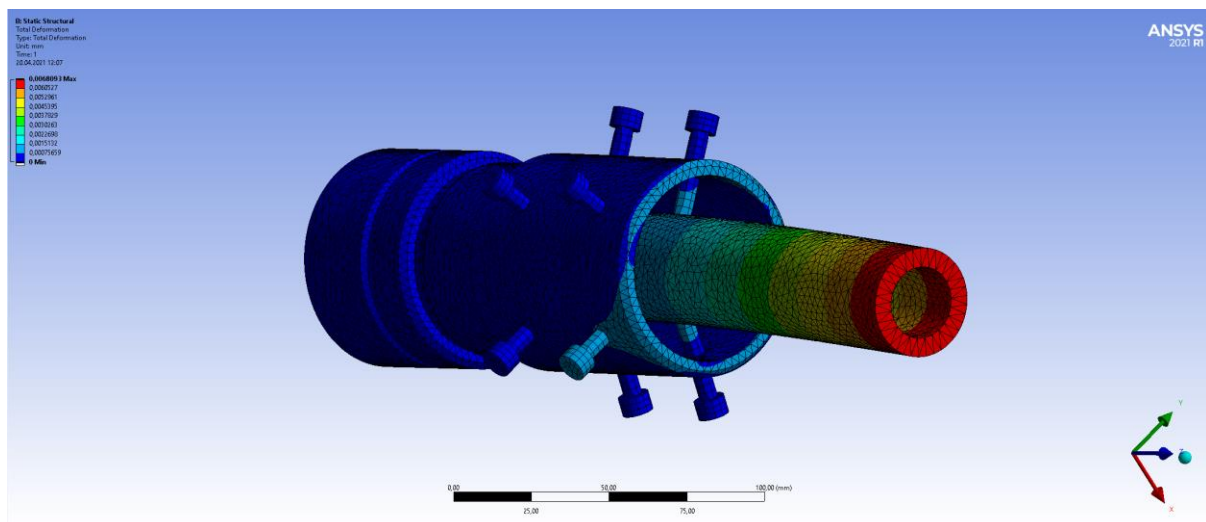
Figur 54: 1 mm mesh (eget bilde)

| <i>Index</i> | <i>Del</i> |
|--------------|------------------------------|
| A | Kraftsensor |
| B | Rotasjonskobling |
| C | Hurtigkobling |
| D | Sylinder med nålespissbolter |
| E | Bein-modell |

Tabell 6: Oversikt Figur 54: 1 mm mesh (eget bilde)

Siden vår innfesting består av flere deler, som blant annet roteringskobling og hurtigkobling, ønsker vi å analysere nedbøyningen. Dette er viktig da stor nedbøyning kan føre til uregelmessigheter i testresultatene. Siden vår innfesting strekker seg lengre ut fra robotarmen enn det som har vært i bruk på laben tidligere, er det stor sannsynlighet for at vi får en høyere nedbøyning. Vi ønsker derfor å se på nedbøyningen i konseptet vårt fra robotens koblingsplate til ytterst på rørknokkelen hvor kreftene blir påført.

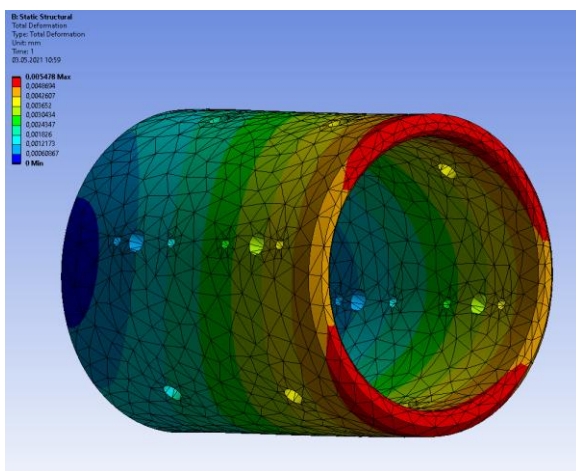
Etter mesh er opprettet, kan man gå videre med å påføre krefter og grense-betingelser. For å få en realistisk simulering er platen på del A, kraftsensor, låst fast i alle retninger. Deretter påføres en punktlast ytterst på røret. Vi har også angitt deler som er nærmere enn 1 mm skal ansees som fast kobling. Dette gjør at kreftene vil gå fra del E, gjennom boltene til del D, slik som det vil ved en reell test.



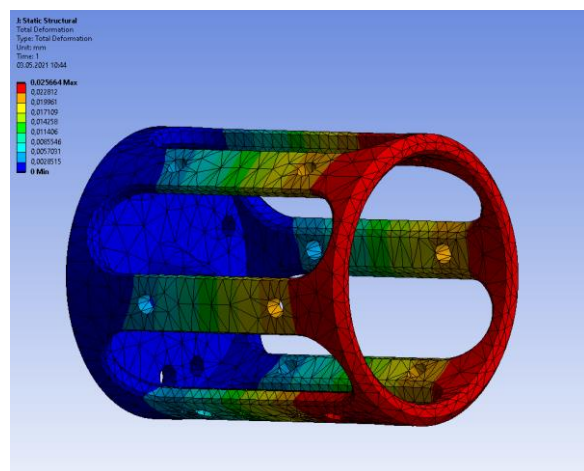
Figur 55: Deformasjon av testoppsett. Maksimal deformasjon 0.006 mm (eget bilde)

3.8. Topologioptimalisering

Topologioptimalisering er en matematisk metode for å optimalisere et produkt, ved å fjerne materiale uten å svekke styrken. Dette kan gjøres ved hjelp av et program som ANSYS Workbench eller manuelt. KUKA KR6 har en anbefalt nyttelast på 3 kg. Vårt konsept består av mange deler, og det er derfor viktig å redusere vekten der vi kan. Vi ønsker derfor å kjøre en manuell topologioptimalisering av sylindren. Ved manuell topologioptimalisering kjøres en FEM analyse, deretter fjernes materiale der det ønskes, også gjennomføres en ny analyse. Målet er å fjerne så mye materiale som mulig, uten at det går på bekostning av styrken.



Figur 56: Deformasjon av sylinder før topologioptimalisering (eget bilde)



Figur 57: Deformasjon av sylinder etter topologioptimalisering (eget bilde)

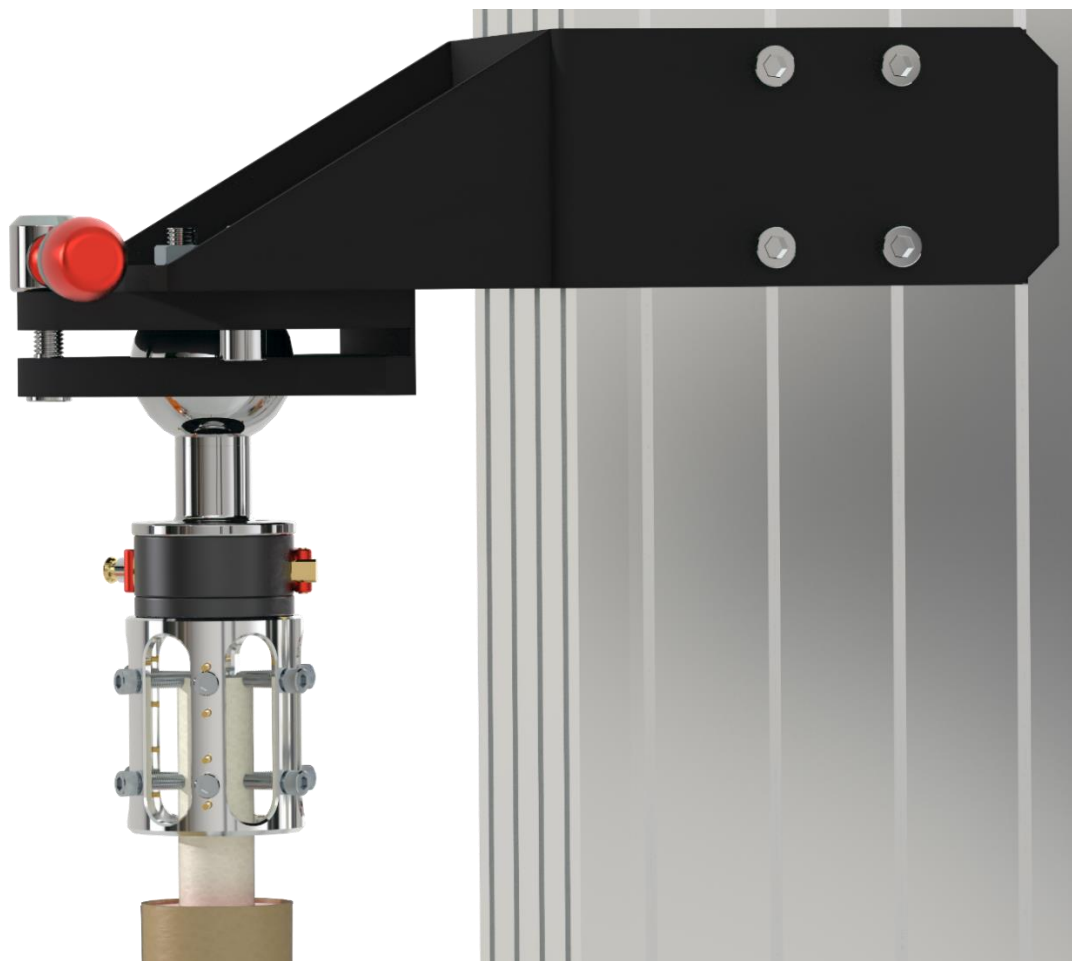
På Figur 56 og Figur 57 kan man se hvor vi har fjernet materiale. Vår innfesting består av en sylinder med 12 hull for nålespiss bolter, og 8 hull for låsepinner. Ved å fjerne materialet mellom hullene og utført flere FEM analyser, har vi gjennomført en manuell topologioptimalisering. Vi benyttet aluminium 6061 i ANSYS for beregning av vekt. Vekt før optimalisering var 0,26 kg. Vekt etter optimalisering var 0,13 kg.

4. Resultat

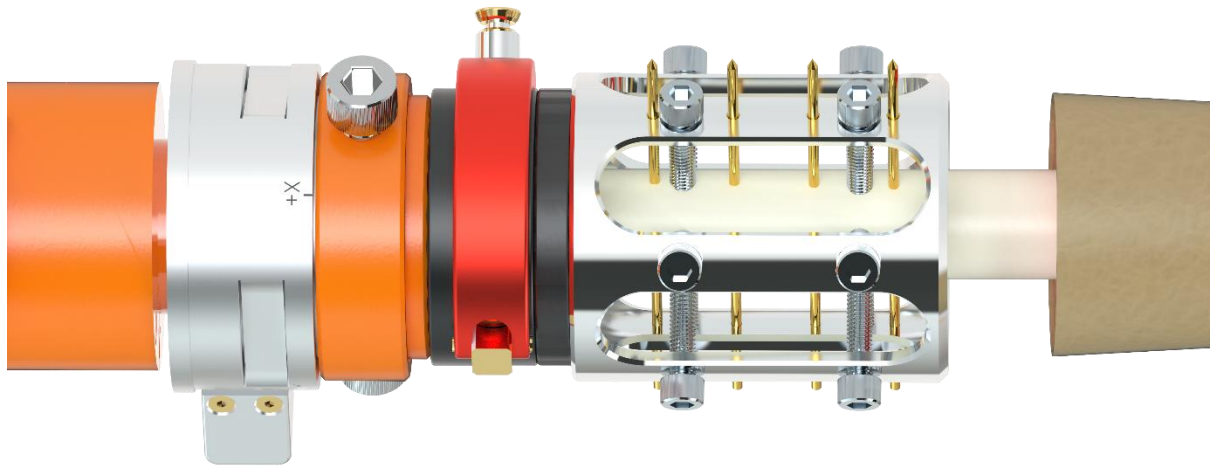
I dette kapittelet vil vi legge fram resultatet av denne oppgaven. Oppgavens mål var å forenkle innfestingen av knær, samt lage et nytt oppsett av testjiggen som brukes ved den biomekaniske laben ved Ålesund Sykehus. Dette inkluderer konsept, design, stykkelister, samt resultat av diverse tester.

4.1. Ferdig produkt

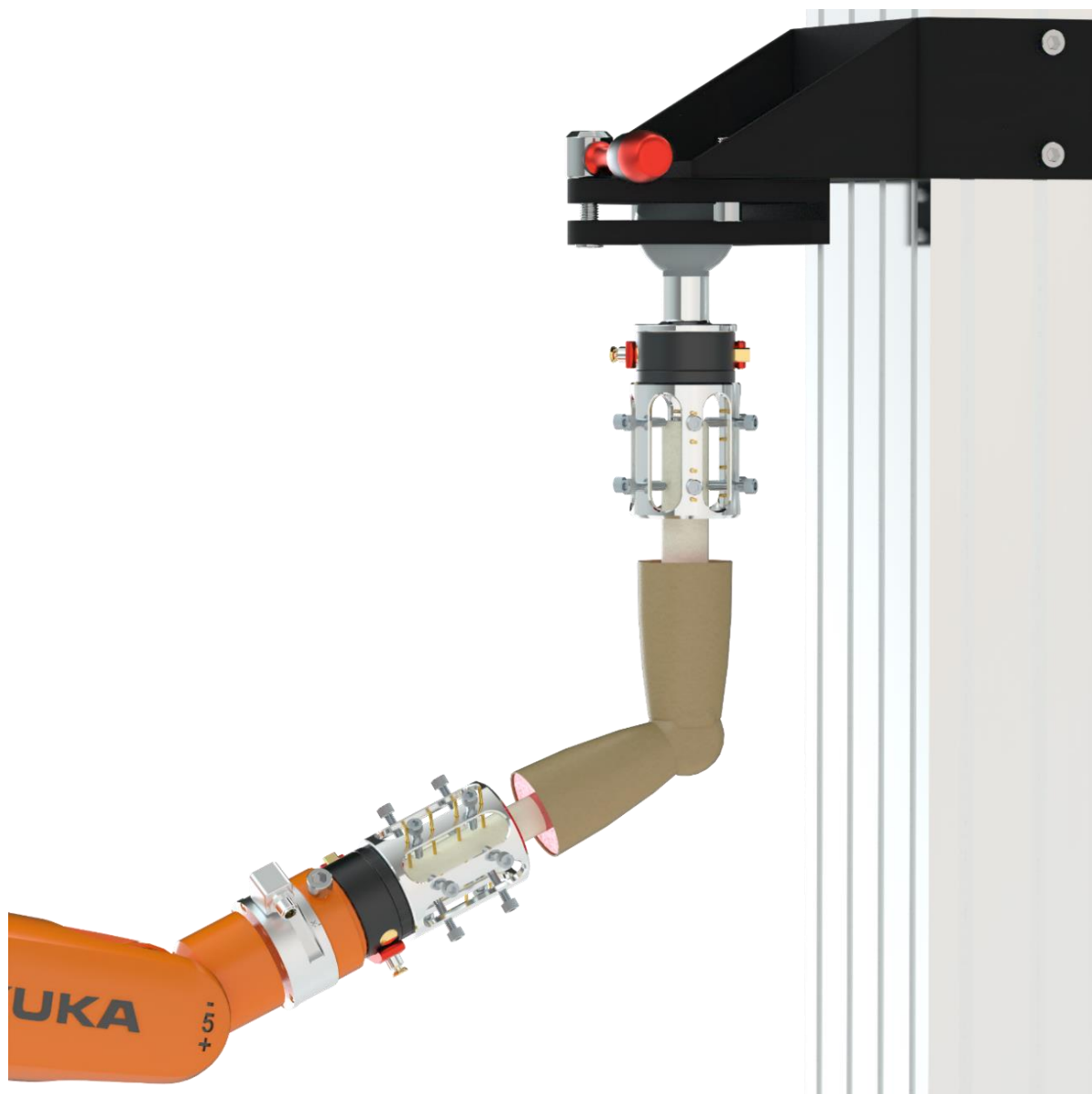
Etter å ha fulgt stage-gate modellen har vi kommet frem til et nytt testoppsett for knetesting til den biomekaniske laben ved Ålesund sykehus. Produktet er utviklet ut fra avtalte kravspesifikasjoner. Konseptet vi har kommet frem til krever ingen støping, vil være raskere i bruk og er derfor mindre ressurskrevende. I tillegg benyttes det både hurtigkobling og rotasjonskobling, noe som vil skape mer flyt i arbeidet ved Ålesund biomekaniske lab. Grunnet covid-19 pandemien fikk vi ikke gjennomført ønsket styrketest. Likevel har vi stor tro på at vårt produkt vil tåle påkjenningene som blir påført ved biomekanisk testing. På figur 58, 59 og 60 vises fotorealistiske bilder produsert i Siemens NX Ray Tracing av det endelige oppsettet.



Figur 58: Veggfeste (eget bilde)



Figur 59: Robotfeste (eget bilde)



Figur 60: Nytt testoppsett til Ålesund Biomekaniske Lab (eget bilde)

4.2. Montering

Montering av robotfestet

1. Monter ATI GAMMA kraftsensor til KUKA KR6.
2. Monter rotasjonskobling bunndel til Kraftsensor med fire lavprofils M6x10 mm bolter.
3. Tre inn rotasjonskobling toppdel inn i bunndel, lås fast med to stykk M10x20 mm bolter.
4. Monter hurtigkobling bunndel til rotasjonskobling med fire lavprofils M6x10 mm bolter.
5. Monter hurtigkobling toppdel til Sylinder med fire stykk M6x4 mm bolter.
6. Skru inn 12 stykk M6x40 mm nålespiss bolter inn i sylindren.
7. Før rørknokkel inn i sylinder, press styrepinnen inn i beinmargen, og stram til nålespiss-boltene. Deretter bor gjennom med kirurgiske låsepinner.
8. Koble hurtigkoblingene sammen.

Montering av veggfestet

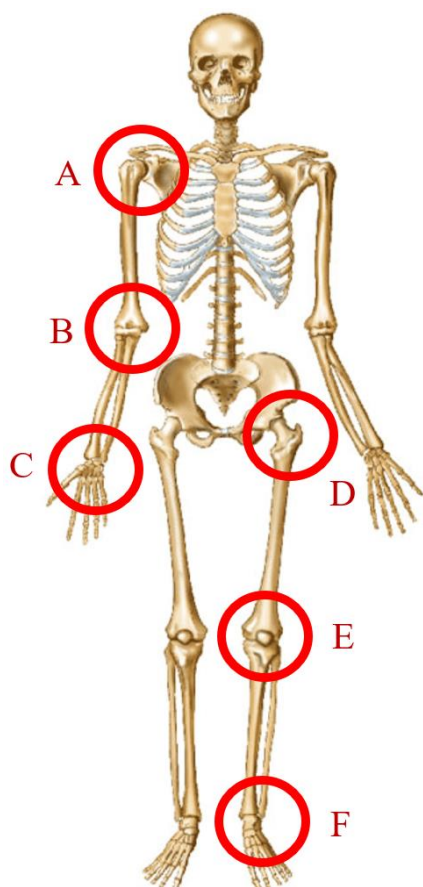
1. Montere monteringsplate til Stålprofil med 8 stykk M12x40 mm bolter.
2. Monter kulebrakett topp til monteringsplaten med to stykk M12x40 mm.
3. Montere kuleledd topp og bunndel gjennom kulebrakett bunn.
4. Montere kulebrakett bunn, med kuleledd, til kulebrakett topp for kobling av bakplate med 6 stykk M6x15 mm bolt.
5. Tre inn et stykk M12x40 mm bolt gjennom kulebrakett topp og bunn og skru på handtak for stramming.
6. Monter hurtigkobling bunndel på kuleledd med 4 stykk M6x15 mm bolter.
7. Monter hurtigkobling toppdel til Sylinder med fire stykk M6x4 mm bolter.
8. Skru inn 12 stykk M6x40 mm nålespiss bolter inn i sylindren.
9. Før rørknokkel inn i sylinder, press styrepinnen inn i beinmargen, og stram til nålespiss-boltene. Deretter bor gjennom med kirurgiske låsepinner.
10. Koble hurtigkoblingene sammen.

4.3. Mulighet for flere bruksområder

Siden vårt konsept baserer seg på en simpel sylinder, vil produktet med stor fordel kunne brukes som innfesting til alle rørknokler i menneskekroppen. Dette betyr at innfesting vil fungere til følgende:

| INDEX | LEDD | KOMMENTAR |
|-------|----------|---------------------------------------------------------------------------|
| A | Skulder | Mulighet for å feste overarm. Skulderblad må festes med en annen metode. |
| B | Albue | Fungerer for begge sider av leddet. |
| C | Håndledd | Mulighet for innfesting av forarm. Hånd må festes med en annen metode. |
| D | Hofte | Mulighet for innfesting av lårbein. Pelvis må festes med en annen metode. |
| E | Kne | Fungerer for begge sider av leddet. |
| F | Ankel | Mulighet for innfesting av leggbein. Fot må festes med en annen metode. |

Tabell 7: Oversikt over hvilke ledd som kan monteres med vårt produkt



Dette er en stor fordel med tanke på videre testing hos Ålesund Biomekaniske lab. Her har de som nevnt tidligere jobbet med skuldre og ankler. Det neste er knær, og i fremtiden ønsker de å teste andre ledd i kroppen. Ved å ta i bruk vårt konsept allerede nå, har vi stor tro på at de vil spare seg for en god del arbeid med tanke på støping. De må likevel fortsette å bruke støping eller andre metoder for innfesting av blant annet skulderblad og nedre del av ankel.

Figur 61: Steder på menneskekroppen hvor vår innfesting kan benyttes

4.4. Nedbøying

FEM-analyse av forenklet modell ble gjennomført, se Figur 55. Maksimal nedbøying var 0,006 mm. Dette tallet er så lavt at vi kan anta at koblingen er solid, og vil ikke føre til avvik til resultatene ved biomekanisk testing.

4.5. Vektredusering



Figur 62: Topologioptimalisert sylinder (eget bilde)

Ved å kjøre en manuell topologioptimalisering av sylindren har vi redusert vekten med 50%. På Tabell 8 er en oversikt over resultatene.

| <i>Komponent</i> | <i>Original sylinder</i> | <i>Optimalisert sylinder</i> |
|-----------------------------------|--------------------------|------------------------------|
| <i>Material</i> | Aluminium | Aluminium |
| <i>Vekt</i> | 0.26 kg | 0.13 kg |
| <i>Displacement</i> | 0.004 mm | 0.02 mm |
| <i>Max stress (Von Mises)</i> | 10,438 MPa | 11,447 MPa |

Tabell 8: Resultater fra Topologioptimalisering

Resultatet viser en økning i deformasjon på det nye designet med 500 %. Selv om dette virker høyt, er det i realiteten en forskyvning på kun 0,016 mm. Dette viser at det originale designet var overdimensjonert. Videre viser tabellen en økning i stress fra 10,4 MPa til 11,4 MPa. Resultatene viser en vellykket topologioptimalisering med halvering av vekt på komponenten, uten store endringer i styrken.

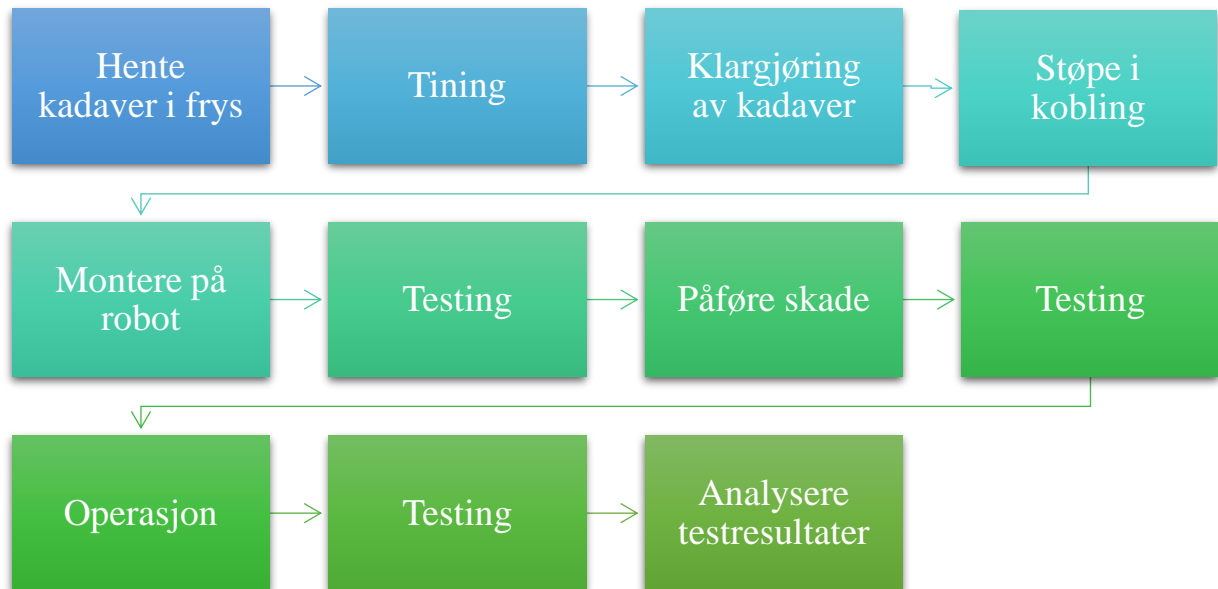
På Tabell 9 kan man se en oversikt over vekten til robotfestet. Totalvekten ble 1,225 kg. Testobjektet er ikke med i beregningen da de henger fra veggfeste, og kun en liten del av vekten holdes av roboten. Som nevnt i kapittel 2.5.1 har KUKA KR6 en anbefalt nyttelast på maksimalt 3 kg, se Figur 15: Nyttelast-diagram KUKA KR6 . Vi har ikke analysert vekten til veggfestet da dette er uinteressant.

| <i>Del</i> | <i>Vekt (kg)</i> |
|-------------------------------------|------------------|
| <i>ATI Gamma (Kraftsensor)</i> | 0,255 |
| <i>Roteringskobling</i> | 0,220 |
| <i>Grip MGW063 (Hurtigkobling)</i> | 0,340 |
| <i>Sylinder</i> | 0,130 |
| <i>12 x M8 nålespiss (Syrefast)</i> | 0,230 |
| <i>Kirurgiske låsepinner</i> | 0,050 |
| <i>Sum</i> | 1,225 |

Tabell 9: Oversikt over vekt til de ulike komponentene i robotfestet

5. Lean

5.1. Nåværende verdikjede



Figur 63: Nåværende verdikjede av dagens testprosess (eget bilde)

5.1.1. Analyse og forbedring av dagens prosess ved bruk av “Process Mapping”

Ved Ålesund Biomekaniske lab forskes det på nye operasjonsteknikker for ledd. Her benytter de seg av biomekanisk testing ved hjelp av avanserte verktøy som industri-roboter og kraftsensorer. Forskerne ved den biomekaniske laben ved Ålesund sykehus bestiller testobjekter av den kroppsdelen de ønsker å forske på. Disse testobjektene er ekte kadaver, som kommer i frossen tilstand fra USA og Tyskland. Vår oppgave er å lage en ny innfesting for testobjektene.

I forbindelse med faget Industri 4.0 skal vi benytte oss av “process-mapping”, også kalt prosesskartlegging. Dette er et verktøy hentet fra Toyotas lean-prinsipp, og er nyttig for å analysere produksjonsmetoder og videre eliminere sløsing i produksjonen. I denne delen vil vi se på kobling av testobjekt mot robot, fra forskerens perspektiv.

Selv om vår oppgave er å lage en ny innfesting, ønsker vi likevel å analysere hele testprosessen. Dette er for å hjelpe den biomekaniske laben i Ålesund med å nå målet sitt om å bli ledende på denne type forskning i Skandinavia.

Testprosessen starter med å hente et kadaver fra frys, som må tines. Samtidig som produktet tines, klargjøres støpe-materialet som brukes senere i prosessen. Etter kadaveret er tint, må det klargjøres. Da fjernes hud, sener og muskler, slik at man får et rent bein som er klar for støping.

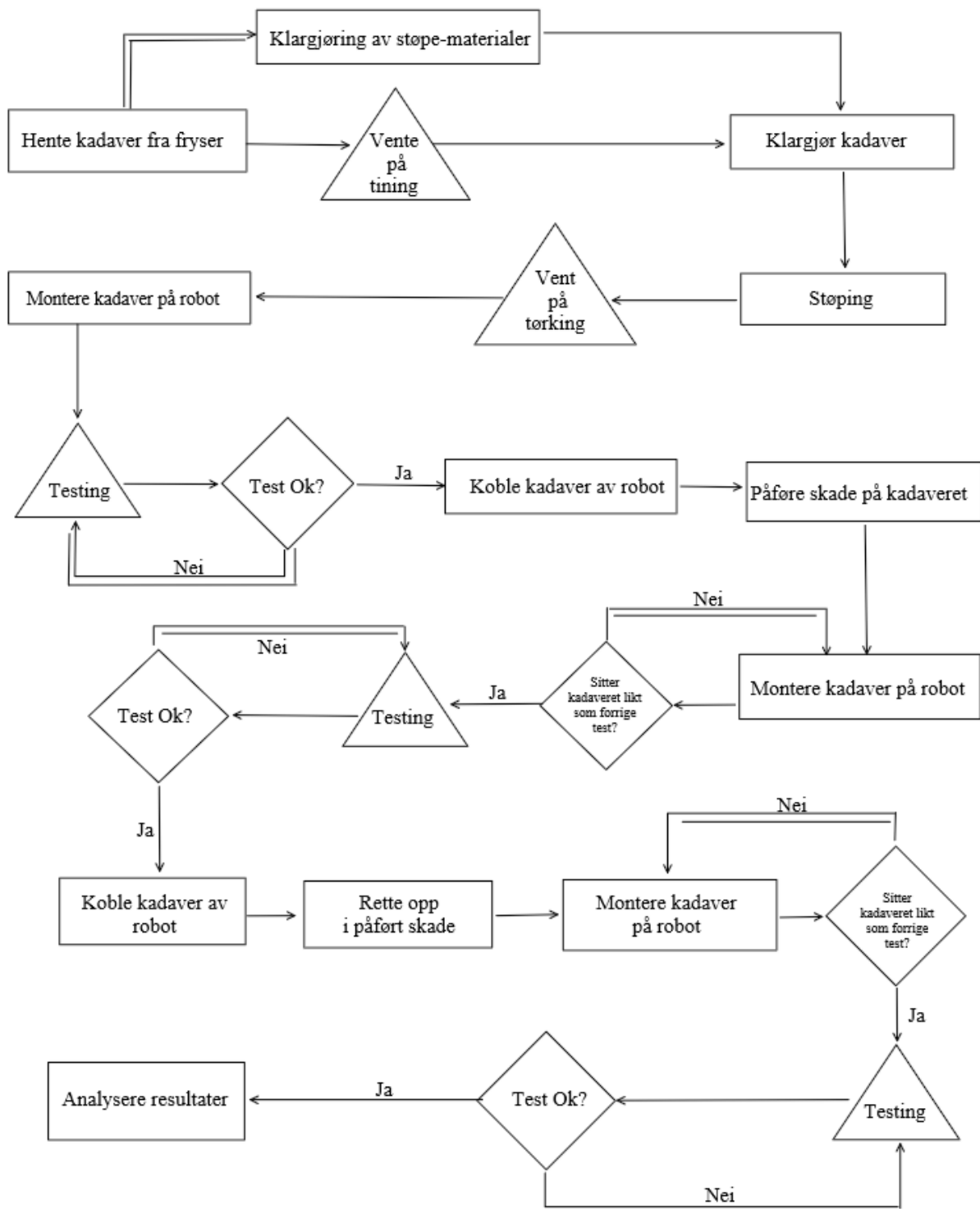
I dagens prosess støpes beinene fast i en sylinder som videre kobles på en automatisert robot. Støpe-materialet som brukes består av to hoved komponenter. I tillegg brukes et tredje stoff, kalt aluminium klorid, som fremskynder herdingen. Dette stoffet er giftig for mennesker, og som følger av dette utføres støpingen i et lukket kabinett med avsug. Under støpingen i kabinettet har forskeren kun innsikt via et vindu. Det er derfor vanskelig å se om rørknokkelen støpes beint. I tillegg kreves det flere helsepersonell for å forsikre at støpen blir rett i forhold til sylindere siden de må holde testobjektet for hånd. Denne prosessen tar 15-25 minutter. Ved denne metoden er det ingen rom for etter-justering. Støping er derfor noe forskerne ved den biomekaniske laben ønsker å unngå i fremtiden.

Etter beinet er støpt fast i sylindere, kan det monteres på roboten. Dette er en relativt rask prosess, da det benyttes en simpel kobling på roboten bestående av to sylindre. Når testobjektet er koblet på roboten kan testingen starte. Etter en rekke tester er kjørt, kobles testobjektet av roboten, og det påføres en skade. Deretter kobles den tilbake på roboten og testes på nytt. Fordelen med sylinderekoblingen som brukes i dag er at den kan monteres i den vinkelen man selv ønsker. Ulempen med dette er at det er vanskelig og montere testobjektet nøyaktig likt som ved første test. I dag bruker de tusj for å markere vinkelen. Dette fører til at det tar lengre tid å koble opp kadaveret på nytt. I tillegg er det vanskelig å få lik vinkel, noe som kan utgjøre vesentlige avvik i resultatene. Etter test nummer 2 forsøkes det å rette opp i den påførte skaden. Deretter testes kadaveret på nytt. Årsaken til denne testingen er for å finne bedre operasjonsteknikker enn det som brukes i dag.

På Figur 64 kan man se prosesskartet for dagens prosess ved testing av ledd. Tabell 10 nedenfor viser betydningen av de forskjellige figurene som blir brukt i prosesskartet.

| Figur | Betydning |
|-------------------|----------------------|
| Pil | Primær prosessflyt |
| Dobbel pil | Sekundær prosessflyt |
| Firkant | Oppgave |
| Trekant | Venting |
| Rombe | Beslutning |

Tabell 10: Prosesskart symboler



Figur 64: Prosesskart av dagens prosess (eget bilde)

5.2. The 8 wastes of lean

Prinsippet til lean er å eliminere unødvendig sløsing og minimere nødvendig sløsing. Ved å eliminere sløsing, vil det som står igjen være verdiskapende aktiviteter i prosessen. Dette vil øke flyten. Det er definert åtte områder som anses som sløsing. Disse er spesifisert nedenfor med betraktning for testjiggen for den biomekaniske laben ved Ålesund Sykehus.

5.2.1. Defekter

Defekte produkter inneholder mangler eller feil. Dette kan være tilfeller som sprekker i materialer eller at det mangler deler. Defekte produkter betyr sløsing av tid, materialer og ressurser.

Ved støpe-prosessen kan det oppstå en rekke feil. Støpingen må gjennomføres ved bruk av et lukket kabinett på grunn av farlige avgasser. Dette begrenser sikten noe som gjør det vanskelig å støpe beinet rett i forhold til sylindren. De har heller ingen jigg som kan holde kadaveret rolig ved støpingen. Helsepersonell må derfor holde det for hånd i 15-25 minutter. Etter dette er det ingen mulighet for etterjustering. Dersom beinet blir stående skjevt, må hele støpe-prosessen starte på nytt. Dette vil føre til sløsing av tid og ressurser.

5.2.2. Overproduksjon

Overproduksjon er når prosessen lager flere produkter enn det markedet eller oppgaven ønsker. Dersom det støpes for mange kadaver om gangen må sykehuset lagre produktet på en forsvarlig måte. Dette er som regel ikke et problem siden testobjektene kan tines og fryses flere ganger uten problem.

5.2.3. Venting

Dersom en del av produksjonen ligger foran andre prosesser, kan dette føre til at venting oppstår. Dette er en form for sløsing. Ved å eliminere venting, vil produktiviteten øke. I støpe-prosessen er det flere aktiviteter hvor det oppstår venting. For det første må kadaveret tines, dette er en aktivitet som ikke kan fremskyndes. Videre er det også venting når støpen av testobjektet skal herdes. Det vil også bli sløsing av tid når testobjektet blir montert på roboten, da det tar tid å sjekke om det sitter likt som ved forrige test. Vårt nye konsept vil eliminere to av tre tidkrevende aktiviteter.

5.2.4. Ikke-utnyttet talent

Ikke utnyttet talent kommer som en sløsing hvor kunnskap, talent eller ferdigheter ikke blir brukt til det fulle. Ved bruk av støpe-prosessen må det flere helsepersonell til for at støpingen blir korrekt utført. Dette er sløsing av ansattes tid som med fordel burde bruke ferdighetene sine på pasienter og annet relevant arbeid.

5.2.5. Transport

Dårlig planlegging med logistikken kan skape sløsing i transport. Dette kan også skape følgefeil som fører til venting og økning i kostnadene. Et tilfelle for dette kan være at lageret med fryste kadaver er langt unna laben.

Ved Ålesund Sykehus er kadaveret lagret i en fryser i kjelleren. Hver gang et nytt kadaver skal testes må det transporteres til laben. Ved å flytte lageret, eller eventuelt opprette et lite mellomlager i laben, kan sløsing reduseres.

5.2.6. Inventar

Med overproduksjon og innkjøp av materialer vil det oppstå behov for lagringsplass. Inventar er unødvendig og tilfører ingen verdi til prosessen. Det er vanlig å ha litt inventar, men det er viktig å analysere hva som blir brukt mest slik at det ikke blir overfylt av produkter som ikke er etterspurt. Overproduksjon, eller mer innkjøp enn nødvendig, er sløsing i prosessen og noe som bør unngås.

Den biomekaniske laben ved Ålesund sykehus bestiller kadaver i bulk fra Tyskland og USA. Selv om dette tar unødvendig lagringsplass, og er imot lean prinsipper, vil det i denne situasjonen være en fordel da bestilling av kadaver er en lang prosess.

5.2.7. Bevegelse

Det finnes også sløsing i form av bevegelse. Dette er når en ansatt eller robot må bevege seg for å fortsette prosessen. Dette kan være at personen må gå til andre siden av rommet for å hente et spesielt verktøy, for så å ta det med tilbake til arbeidsbenken. Personen må derfor forlate arbeidsområdet sitt for å hente verktøyet. Løsningen på dette kan være å flytte verktøyet nærmere arbeidsbenken. Da slipper personen å bevege seg unødvendig og vil derfor effektivisere produksjonen.

5.2.8. Ekstra prosessering

Ekstra prosessering handler om å ikke gjøre mer arbeid enn nødvendig. Et eksempel på dette kan være områder i prosessen hvor arbeidet ikke er verdiskapende for kunden. Dette er sløsing av både tid og ressurser. Dårlig utstyr fører også til sløsing ved ekstra prosessering. Et eksempel på dette kan være en automatisert CNC-maskin. Dette er en mye raskere metode og produsere deler på, fremfor å bruke en arbeider og en dreiebenk.

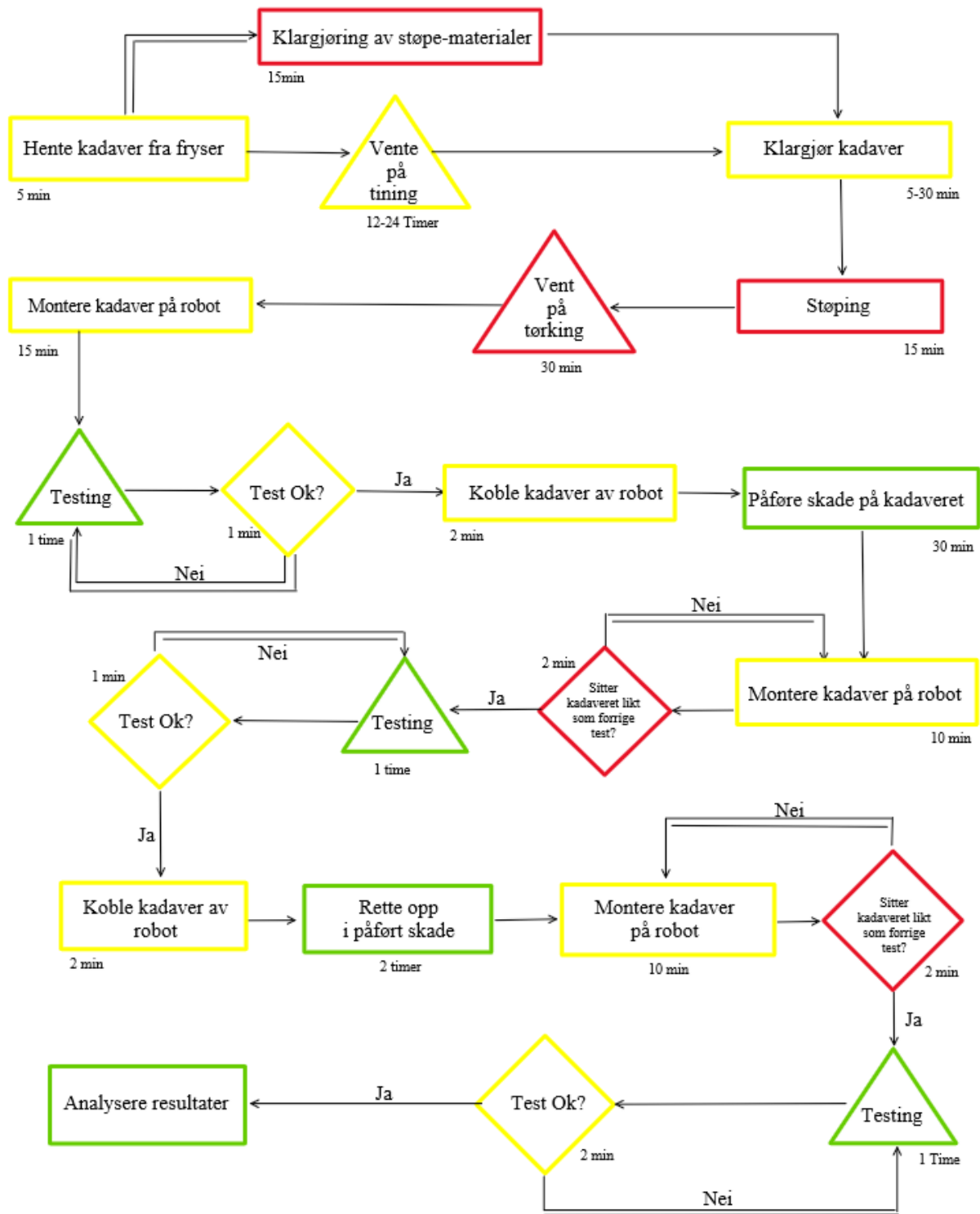
Ved støpe-prosessen kreves det flere ansatte for å passe på at støpingen av beinet er rett i forhold til sylindren. Ved å benytte vår nye innfesting er det kun nødvendig med en til to ansatte, samtidig som det er en mye kortere prosess. Det er også muligheter for etterjusteringer for å sikre at beinet blir festet korrekt.

5.3. Kartlegging av sløsing i dagens prosess

Figur 65 viser et prosesskart av dagens testprosess slik som tidligere i oppgaven. I tillegg har vi benyttet fargekoder fra Tabell 11 som viser delene av prosessen som er sløsing.

| Farge | Betydning |
|--------------|--------------------------------------------|
| Grønn | Aktiviteten er verdiskapende for prosessen |
| Gul | Aktiviteten er nødvendig sløsing |
| Rød | Aktiviteten er unødvendig sløsing |

Tabell 11: Fargekoder for prosesskart



Figur 65: Prosesskart av dagens prosess med fargekoder (eget bilde)

5.3.1 Verdiskapende aktiviteter

Prosesskartet av dagens metode inneholder følgende verdiskapende aktiviteter:

- Testing
- Test ok?
- Påføre skade på kadaveret
- Rette opp i påført skade
- Analysere resultater

5.3.2. Nødvendig sløsing

Aktiviteter som innebærer nødvendig sløsing, inkluderer:

- Hente kadaver fra frys
- Vente på tining
- Klargjøring av kadaver
- Montere kadaver på robot
- Koble kadaver av robot

Disse aktivitetene må gjennomføres og blir derfor sett på som nødvendig sløsing. De er altså ikke verdiskapende, men er en del av testprosessen og kan derfor ikke elimineres.

5.3.3. Unødvendig sløsing

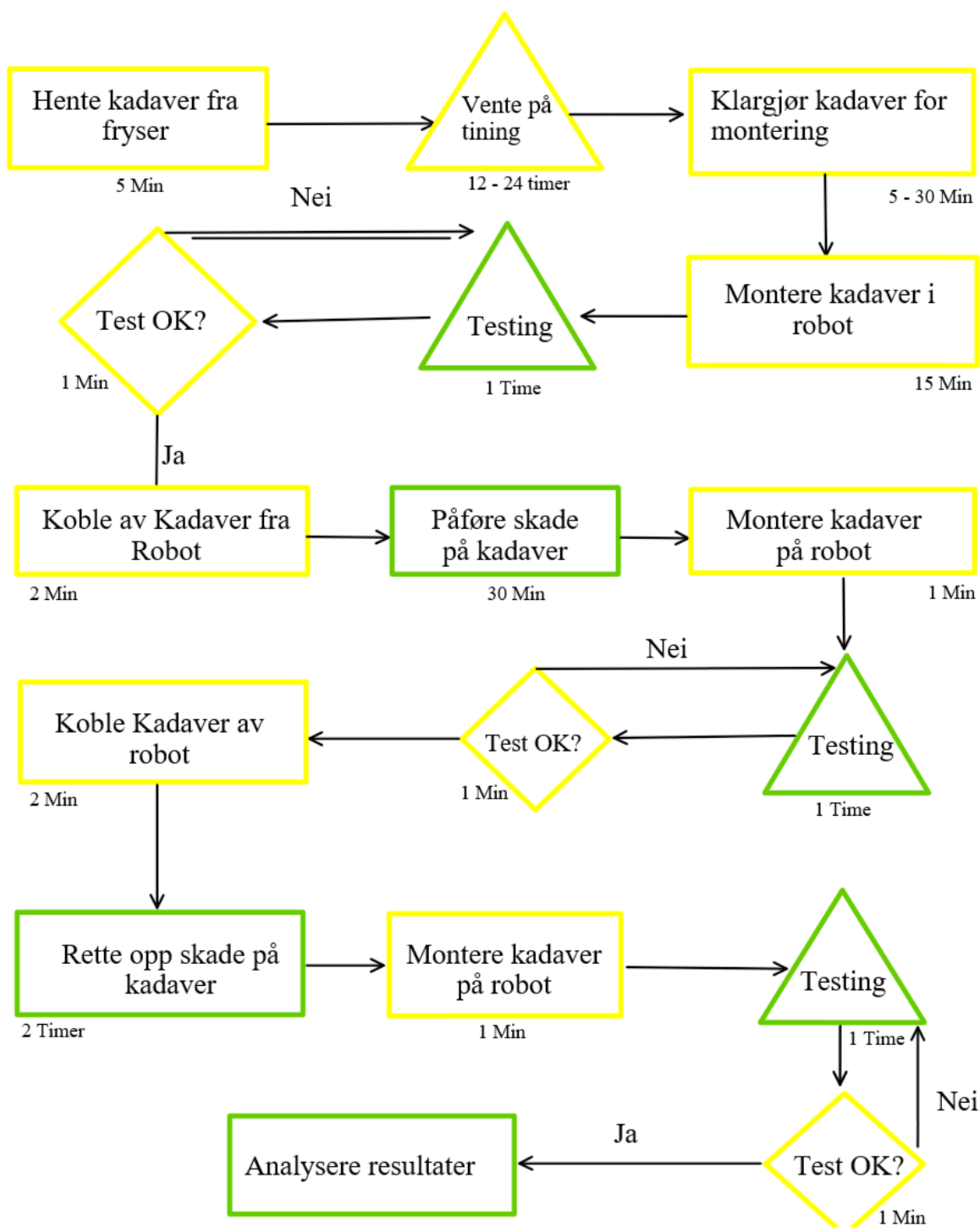
De fire følgende aktivitetene anses som unødvendig sløsing.

- Klargjøring av støpe-materialer
- Støping
- Vente på tørking
- Sitter kadaveret likt som forrige gang?

Som nevnt tidligere ønsker forskerne på den biomekaniske laben ved sykehuset i Ålesund å unngå støping i fremtiden. Basert på dette vil aktivitetene; «klargjøring av støpe-materialer», «støping» og «vente på tørking» være unødvendig sløsing i prosessen. Ved bruk av vårt produkt vil disse tre aktivitetene bli slått sammen til én enkel aktivitet; «klargjør kadaver for montering». Vårt produkt vil også inneholde en hurtigkobling, slik at aktiviteten «sitter kadaveret likt som forrige gang?» elimineres fullstendig.

5.4. Prosesskart med vår nye festemetode

Vi har utviklet en løsning for innfesting i testjiggen hvor bein kan monteres på roboten uten behov for støping. Vi har også implementert en hurtigkobling slik at vinkelen på testobjektet blir lik for hver test. Dette vil eliminere flere aktiviteter i dagens prosesskart. På Figur 66 vises et prosesskart over den nye prosessen hvor lean-prinsipper er iverksatt for å senke sløsing av tid og ressurser.



Figur 66: Prosesskart av den nye prosessen (eget bilde)

5.4.1. Tidsbesparing

Sammenlikning av de ulike metodene er en viktig faktor å se nærmere på. Tabell 12 viser hvordan tid benyttet av helsepersonell og tid benyttet av automasjonsteknikker varierer ved de forskjellige metodene. Tider vist i Figur 65 og Figur 66 er antatte tider basert på konsultasjon med faglig veileder Dalen. Støping av testobjekt tar ca. én time. Montering med det nye konseptet antas å ta 10 minutter. Ettersom noen av aktivitetene har varierende tider vises beste utfall for begge metodene.

| | <i>Tid benyttet av helsepersonell</i> | <i>Tid benyttet av automasjonsteknikker</i> | <i>Total tid</i> |
|-----------------------|---------------------------------------|---------------------------------------------|------------------|
| <i>Dagens prosess</i> | 185 minutter | 43 minutter | 228 minutter |
| <i>Vår prosess</i> | 155 minutter | 19 minutter | 174 minutter |
| <i>Forbedring</i> | 30 minutter | 24 minutter | 54 minutter |
| <i>Forbedring %</i> | 17 % | 56 % | 34% |

Tabell 12: Tidsanalyse

Beregninger viser at den nye prosessen vil redusere tid benyttet av helsepersonell i prosessen med 17 %, og tid benyttet av automasjonsteknikker med 56 %. Totalt sett vil den nye prosessen redusere den totale tiden med 34%. I beregningene har vi sett bort i fra tining, da dette er likt for begge prosessene.

5.4.2. Kostnadsbesparelser

Ved å eliminere støpe-metoden vil alle kostnader i forbindelse med støpe-materialet forsvinne. Ved bruk av vårt produkt skal det være mulig for en til to personer å montere kadaveret i koblingen, med muligheter for etterjustering. Dette vil føre til tidsbesparing ved bruk av færre helsepersonell, noe som vil redusere kostnadene. Selve etterjustering er også en fordel da beinet kan rettes opp dersom det blir festet skjevt og man slipper å starte prosessen på nytt, slik som ved støping.

5.4.3. Kontinuerlig forbedring

Forskning på ledd ved bruk av automatiserte roboter er relativt nytt, og det er derfor store rom for forbedringer. Den Biomekaniske laben i Ålesund ønsker å bli et ledende laboratorium i Skandinavia. Ved hjelp av samarbeidet med NTNU har de muligheten til å forbedre mange aspekter i prosessen og har et godt grunnlag for å nå målet sitt. Ved implementering av lean-prinsipper ser man også lettere hvilke områder som kan forbedres, noe som vil skape en kontinuerlig forbedring av laben.

6. Diskusjon

6.1. Produkt- og brukerkrav

I kapittel 1.5 presenterte vi kravspesifikasjoner for det ønskede produktet. I løpet av flere konseptfaser, tester, styrkeberegninger og topologioptimalisering har vi utviklet et produkt som oppfyller de ønskede spesifikasjonene.

6.1.1. Brukerkrav

Sylinderen vi har utviklet bruker nålespiss-bolter og gjennomtrengende kirurgiske låsepinner. Dette fører til at man slipper støping, som bevist sparer mye tid og er derfor mindre ressurskrevende. Ved å implementere hurtigkobling får forskerne også mulighet til å montere og demontere testobjektene raskt på testjiggen, noe som også sparer tid og skaper mer flyt i forskningen. Vår egen rotasjonskobling vil også skape mulighet for fri rotasjon i koblingen, slik at automasjonsteknikeren ved forskningslaben slipper å reprogrammere roboten for hvert testobjekt. Videre er det også tenkt at sluttproduktet skal produseres i et metall som tåler å bli vasket med høy temperatur. Dette vil gjøre sterilisering lett, da det kan vaskes i en industriell maskin sammen med resten av det medisinske utstyret som brukes på laben.

6.1.2. Produktkrav

Ved hjelp av topologioptimalisering veier sylinderen kun 0.130 kg dersom den produseres i aluminium. Dette fører til at robotkoblingen som helhet veier kun 1,255 kg, og er godt under kravet på 3 Kg. Vekten vil selvfølgelig variere i forhold til hvilket metall som velges. Ved å f.eks. benytte rustfritt stål vil sylinderen veie 0.390 kg. Dette har liten betydning på den totale vekten for robotkoblingen, og den vil fremdeles være under 3 kg. Ved å benytte metall, vil produktet også være gjenbrukbart, slik at forskerne ved den biomekaniske laben kan benytte det samme utstyret på flere forskjellige testobjekt. Dessverre fikk vi aldri gjennomført styrketesten, men etter manuell testing på griseknokkel har vi stor tro på at produktet svarer på kravspesifikasjonene, og vil tåle 100 sykluser og 50 N kraft i alle retninger, uten å miste grepet på testobjektet.

6.2. Vanskeligheter

6.2.1. Medisinsk teori

Ved linja Produkt og Systemdesign har vi lært om alt fra termodynamiske egenskaper hos ulike materialer, til beregning av sveiser. Læren om kroppens biomekaniske egenskaper var derfor et ukjent tema for oss. Denne oppgaven har derfor vært utfordrende, og det har vært mye teori å sette seg inn i. Selv om vår oppgave var å lage en enkel innfesting, så vi likevel verdien av å forstå hvordan dette faktisk skulle brukes, slik at vi kunne lage vårt produkt best mulig. Vi har derfor brukt mye tid på å lese om menneskekroppen, noe som er årsaken til at terminologilisten er så innholdsrik. Andreas Fagerli Dalen har vært til stor hjelp i denne delen av oppgaven.

6.2.2. Roboter ved NTNU

Manulaben ved NTNU i Ålesund er populær, og det mange som har pågående prosjekter der. Da vi ønsket å utføre en styrketest på vår prototype, fant vi ut sammen med veileder Kleppe at det kunne være en fordel å benytte oss av de eldre industri-robotene, universal robots, på rom L107. Disse sto tidligere på Manulaben, men ble byttet ut da NTNU inngikk et samarbeid med Omron Industries. Robotene på L107 er fastmontert på et solid bord, i tillegg til at en kraftsensor allerede var tilkoblet. Siden robotene har stått ubrukte over en lengre periode var programvaren utdatert. Oppdateringsprosessen var lang og tok flere arbeidsdager. Dessverre fant vi ut av det manglet en lisens for bruk av kraftsensoren da vi prøvde å programmere robotene. Lisensen ble ikke funnet, og vi måtte derfor benytte oss av Omron robotene på Manulaben.

6.2.3. Covid-19 Pandemien

Pandemien har pågått i over et år og 12.03.21 stengte de fleste fasiliteter i Ålesund ned grunnet utbrudd av muterte versjonen av SARS-CoV-2 viruset. Selv om vi hadde gjort en rekke tiltak for å unngå at vår oppgave ble påvirket av pandemien var det likevel en del ting, som blant annet bygging av prototype og styrketest, som måtte gjennomføres på campus. Prototype ble bygget tidlig, men økt smitte i Møre og Romsdal førte til stengte lokaler. Utfallet av dette ble at vi har ingen bilder av hverken den ferdige prototypen eller oppsettet til styrketesten. Vi fikk heller ikke gjennomført styrketesten.

6.2.4. Topologioptimalisering

Ved Topologioptimaliseringen var det mange forskjellige program som ble anbefalt. De fleste programmene var krevende, og vi innså raskt at det trengs mye tid for å få gjennomført en god topologioptimalisering. Vi valgte derfor å gjennomføre dette manuelt. Dette er ikke den optimale måten å gjøre topologioptimalisering, men fungerer likevel godt. Spesielt ved enkle modeller, slik som en sylinder.

6.3. Forslag til videre forbedring

6.3.1. Konsept

Selv om vi har stor tro på vårt konsept, er det rom for forbedringer. Et gjengebolt-system fører til at testobjektet sitter godt, men alle boltene må strammes hver for seg, noe som kan bli en ensformig prosess over tid. Et av de første konseptene i konseptfase 1 (kapittel 3.5.1) gikk ut på å benytte hydrauliske eller pneumatiske sylindere. Vi har fremdeles tro på at dette kan fungere godt. Videre er det også muligheter for reduksjon i vekt til resten av komponentene i robotkoblingen, som for eksempel rotasjonskoblingen. Det finnes også mange metaller med bedre egenskaper enn aluminium, som f.eks titan.

6.3.2. Bolter med nålespiss

Boltene som ble utviklet var tilfeldige, men viste seg å fungere godt. Det er mulig at det finnes bedre utforming av spissene som vil føre til bedre montering. Dette er noe som bør sees nærmere på. Siden vi ikke fikk testet prototypen er vi usikre på om boltene vil skru seg ut i løpet av testingen. Det kan derfor være et behov for å benytte muttere for å låse boltene fast. Det er også mulig å se på om det er nødvendig med 12 bolter og 4 låsepinner slik vi har i vårt konsept og prototype. Den manuelle testen på griseknokkel var svært lovende, og det er mulig antall innfestingspunkt kan halveres.

6.3.3. Kommunikasjonsverktøy

Vi har brukt fire ulike kommunikasjonsverktøy i løpet av dette prosjektet. Årsaken til dette er at de ulike veilederne vi har vært i kontakt med underveis har benyttet ulike verktøy. Dette har ikke vært et direkte problem, men det hadde vært en fordel om alle benyttet seg av det samme programmet. Forslag er å velge enten zoom eller discord.

7. Konklusjon

Oppgavens mål var å forenkle innfestingen av knær, samt lage et nytt oppsett av testjiggen som brukes ved den biomekaniske laben ved Ålesund Sykehus. I den innledende delen av denne oppgaven laget vi en liste med kravspesifikasjoner for å kunne bygge en fungerende prototype til innfesting for kne-kadaver. Ved hjelp av det vi har lært, i løpet av tre års studie ved NTNU Ålesund, har vi kommet frem til et konsept som dekker disse spesifikasjonene, og vi er fornøyde med resultatet. Inspirasjon av testoppsettet som brukes i Hannover har også vært nyttig for utvikling av nytt oppsett til testjiggen.

Mangel på tilgang til verksted og Manulab over en lengre periode satte en stopper for gjennomføring av styrketest, samt videre utvikling av prototype. Konseptet har derfor ikke blitt testet sammen med robot. Likevel viser tidlig manuell testing på griseknokkel at nålespissbolter, samt kirurgiske låsepinner, fungerer svært godt for å holde fast rørknokler.

Gjennom oppgavens forløp har det blitt benyttet mange verktøy for å gjøre samarbeidet fra hjemmekontor enklere. Flere av disse, som blant annet Teamcenter og Discord, har vært betydningsfull for utviklingen av de ulike konseptene. Videre har også Stage-gate modellen vært til stor hjelp for å effektivt avgjøre hvilke konsepter som var verdt å videreutvikle.

Ved implementering av lean prinsipper, prosess-kartlegging og vårt nye konsept for innfesting kan forskningen ved Ålesund biomekaniske lab effektiviseres med rundt 34% i henhold til tid. Som videre fører til mindre ressursbehov, og vil gi forskerne mer tid til forskning.

Slyngemetoden som er utviklet ved Ålesund biomekaniske lab er et godt eksempel på hvordan biomekanisk testing kan gi store implikasjoner på hvordan kirurger skal behandle pasienter videre. Det er både vanskelig og tidkrevende å utføre biomekaniske tester nøyaktig uten robot, noe som viser hvordan ny teknologi fører til bedre medisinske behandlinger. Videre testing med industrielle roboter, og vår nye innfesting i testjiggen, vil forhåpentligvis avsløre ny kunnskap om kneet og andre ledd i menneskekroppen, og vi håper dette vil hjelpe forskerne i Ålesund å komme opp med flere nye kirurgiske behandlingsmetoder.

8. Bibliografi

- Additive. (2016, juli 6). *What is Slicing Software, and what does it do?* Hentet mai 6, 2021 fra additive-x.com: <https://www.additive-x.com/blog/what-is-slicing-software-and-what-does-it-do/>
- All3DP. (2021). *What is CAD?* Hentet mai 6, 2021 fra all3dp.com: <https://all3dp.com/2/what-is-cad-design-simply-explained/>
- ANSYS. (2021, Mai 05). *Introduction to Ansys Workbench*. Hentet fra Ansys.com: <https://www.ansys.com/training-center/course-catalog/structures/introduction-to-ansys-workbench>
- ATI Industrial Automation. (2021). *F/T Sensor: Gamma*. Hentet mai 5, 2021 fra ati-ia.com: https://www.ati-ia.com/products/ft/ft_models.aspx?id=Gamma
- Austad, G. (2017, mai 28). *Bankart Operasjon*. Hentet mai 5, 2021 fra Helsesmart.no: <https://www.helsesmart.no/bankart-operasjon/>
- BD Editors. (2017, april 28). *Compact Bone Definition*. Hentet mai 5, 2021 fra <https://biologydictionary.net/compact-bone/>: <https://biologydictionary.net/compact-bone/>
- Biemans, W. (2018). *Managing Innovation Within Networks*. London: Taylor and Francis.
- Braut, G. S. (2021, mai 5). *Legeundersøkelse*. Hentet mai 5, 2021 fra Store medisinske leksikon: <https://sml.snl.no/legeunders%C3%B8kelse>
- Chakravorty, D. (2019, februar 14). *STL File Format (3D Printing) - Simply Explained*. Hentet mai 6, 2021 fra all3dp.com: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- Dejan. (2021). *G-code Explained*. Hentet mai 6, 2021 fra [howtomechatronics.com](https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/): <https://howtomechatronics.com/tutorials/g-code-explained-list-of-most-important-g-code-commands/>
- Discord. (2021, Mai 05). *Your place to talk*. Hentet fra Discord.com: <https://discord.com/>
- Easysteel. (2021, Mai 10). *Kule i rustfritt stål m/ gjenge*. Hentet fra Easysteel.no: <https://www.easysteel.no/shop/kule-i-rustfritt-10383p.html>

- English, T. (2019, november 07). *What is finite element analysis and how does it work?*
Hentet mai 6, 2021 fra interestingengineering.com:
<https://interestingengineering.com/what-is-finite-element-analysis-and-how-does-it-work>
- Facebook Inc. (2021, Mai 05). *Oculus Quest 2*. Hentet fra Oculus.com:
<https://www.oculus.com/quest-2/>
- Farstad, I. N. (2020, desember 23). *Fibrose*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/fibrose>
- Fecad. (2020). *Taylor Spatial Frame*. Hentet mai 5, 2021 fra fecad.com:
<https://www.fecad.com/>
- Federal Communications Commission. (2021, mai 6). *VoIP*. Hentet fra fcc.gov:
<https://www.fcc.gov/general/voice-over-internet-protocol-voip>
- Ferle, M. (2020). *The soft-tissue restraints of the knee and its balancing capacity in total knee arthroplasty procedures*. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität. Hentet mai 5, 2021 fra <https://www.repo.uni-hannover.de/handle/123456789/10035>
- GRIP. (2021, Mai 05). *MGW063*. Hentet fra grip-gmbh.com: <https://www.grip-gmbh.com/connect/mgw/mgw063>
- Haukland Universitetssjukehus. (2021, mai 05). *Instabilitet i skulderleddet*. Hentet fra helsebergen.no: <https://helsebergen.no/seksjon/Fysioterapi/Documents/Pasientinfo%20OT/Pasientskriv%20Instabilitet%202019.pdf>
- Hem, E. (2021, mars 31). *Kortikalt bein*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.no:
https://sml.no/kortikalt_bein
- Holck, P. (2019, juli 19). *tibia*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no: <https://sml.snl.no/tibia>
- Holck, P. (2020, november 16). *Kneet*. Hentet mai 5, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/kneet>
- Holck, P. (2020, oktober 9). *Ligament*. Hentet Mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/ligament>

- Holck, P. (2020, desember 9). *Rørknokel*. Hentet Mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/r%C3%B8rknokel>
- Holck, P. (2021, mars 30). *Beinet*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no: <https://sml.snl.no/beinet>
- Holck, P. (2021, mars 31). *patella*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl: <https://sml.snl.no/patella>
- Innocenti, B. (2018, april 16). *Biomechanics: a fundamental tool with a long history (and even longer future!)*. Hentet mai 5, 2021 fra
[https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5908324/#:~:text=Later%2C%20Leonardo%20da%20Vinci%20\(1452,insertions%20and%20studied%20joints%20function.](https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5908324/#:~:text=Later%2C%20Leonardo%20da%20Vinci%20(1452,insertions%20and%20studied%20joints%20function.)
- Kåss, E. (2019, september 6). *Artroplastikk*. Hentet Mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/artroplastikk>
- Kåss, E. (2020, november 12). *Artrose*. Hentet Mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/artrose>
- Katz, A. (2021). *Researchgate*. Hentet mai 5, 2021 fra Researchgate:
https://www.researchgate.net/figure/Human-skeleton_fig1_266872642
- Kleppe, P. S. (2021, Mai 10). *Manulab - NTNU Ålesund*. Hentet fra ntnu.no:
<https://www.ntnu.no/blogger/ihb/manulab/>
- KUKA. (2020). *KR 6 R900*. Hentet mai 5, 2021 fra Kuka.com: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000205456_en.pdf
- Line.17. (2021, mai 5). *Knee Joint Diafram HCSE PE (Page 1)*. Hentet fra line.17qq.com:
<https://line.17qq.com/articles/khhdlnccv.html>
- McHale, K. J. (2017, juni 19). *Latarjet Technique for Treatment of Anterior Shoulder Instability With Glenoid Bone Loss*. Hentet mai 5, 2021 fra nih.gov:
<https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5495908/>
- Medical News Today. (2017, august 18). *How to prevent and treat knee injuries*. Hentet mai 5, 2021 fra medicalnewstoday.com:
<https://www.medicalnewstoday.com/articles/299204>

Medicalstocks. (2021). *The ankle joint*. Hentet mai 5, 2021 fra istockphoto.com:

<https://www.istockphoto.com/vector/the-ankle-joint-tendons-of-the-ankle-joint-foot-anatomy-vector-illustration-gm1152470934-312684010>

Microsoft. (2021, Mai 05). *Åpne Microsoft Paint*. Hentet fra Microsoft.com:

<https://support.microsoft.com/nb-no/windows/%C3%A5pne-microsoft-paint-ead1dc5c-abc4-fd2c-d81e-ebb013fbc113>

Microsoft. (2021, mai 5). *Microsoft.com*. Hentet fra Microsoft Teams:

<https://www.microsoft.com/en-us/microsoft-teams/group-chat-software>

Microsoft. (2021, mai 5). *OneDrive personlig skylagring*. Hentet fra Microsoft.com:

<https://www.microsoft.com/nb-no/microsoft-365/onedrive/online-cloud-storage>

Miller, C. (2016, januar 19). *Leonardo and Borelli*. Hentet mai 5, 2021 fra uh.edu:

<https://uh.edu/engines/epi3040.htm>

Munk, R. (2021, Februar 21). *korsbåndskade*. Hentet Mai 10, 2021 fra sml.snl.no:

<https://sml.snl.no/korsb%C3%A5ndskade>

New Jersey Department of Health. (2008, juni 1). *Aluminium Chloride*. Hentet mai 5, 2021

fra nj.gov: <https://www.nj.gov/health/eoh/rtkweb/documents/fs/0057.pdf>

Newsom, S. W. (2003). *Pioneers in infection control - Joseph Lister*. National Library of

Medicine. Hentet mai 5, 2021 fra <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/14629967/>

nTopology. (2021, Mai 05). *Next feberation design & engineering software*. Hentet fra

[ntopology.com: https://ntopology.com/](https://ntopology.com/)

Omron. (2021, Mai 05). *Kollaborative roboter*. Hentet fra Omron:

<https://industrial.omron.no/no/products/collaborative-robots>

Oracle. (2021). *What is PLM*. Hentet mai 6, 2021 fra oracle.com:

<https://www.oracle.com/scm/product-lifecycle-management/what-is-plm/#:~:text=PLM%20software%20is%20a%20solution,change%20orders%2C%20and%20quality%20workflows.>

Øye, I. (2020, mai 20). *Placebo*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no: <https://sml.snl.no/placebo>

Pettersen, P. M. (2019, desember 17). *Skulderen*. Hentet mai 5, 2021 fra lommelegen.no:

<https://www.lommelegen.no/muskel-ledd-og-skjelett/artikkel/skulderen/71890879>

- Randsborg, P.-H. (2021, april 28). *Artroskopi*. Hentet mai 10, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/artroskopi>
- Randsborg, P.-H. (2021, april 30). *Seneruptur*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/seneruptur#:~:text=En%20sene%20kan%20ryke%2Fskades,er%20blitt%20delvis%20fliset%20opp.>
- Reikerås, O. (2018, desember 18). *luksasjon*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/luksasjon>
- Reikerås, O. (2020, desember 21). *Biomekanikk*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/biomekanikk>
- Reikerås, O. (2021, april 28). *artroskopi*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/artroskopi>
- RK ROSE KRIEGER. (2021). *Heavy duty profiles / size 160*. Hentet mai 10, 2021 fra rk-rose-krieger.com: https://www.rk-rose-krieger.com/fileadmin/catalogue/profiltechnik/bl_schwerlastprofile_en.pdf
- Robotiq. (2021, mai 05). *FT 300-S Force Torque Sensor*. Hentet fra Robotiq.com:
https://robotiq.com/products/ft-300-force-torque-sensor?ref=nav_product_new_button
- Romundstad, P. R. (2021, april 28). *Randomisert klinisk forsøk*. Hentet mai 5, 2021 fra Store medisinske leksikon: https://sml.snl.no/randomisert_klinisk_fors%C3%B8k
- Schlichting, E. (2018, november 19). *Kirurgi*. Hentet mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/kirurgi>
- Schlichting, E. (2020, desember 17). *Disseksjon*. Hentet Mai 6, 2021 fra sml.snl.no:
<https://sml.snl.no/disseksjon>
- Siemens. (2021, Mai 05). *Meshes*. Hentet fra docs.plm.automation.siemens.com:
<https://docs.plm.automation.siemens.com/tdoc/se/106/help/#goto:sesim:mesh1a>
- Siemens. (2021, Mai 05). *NX*. Hentet fra plm.automation.siemens.com:
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/nx/>
- Siemens. (2021, Mai 05). *Teamcenter*. Hentet fra Siemens.com:
<https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/products/teamcenter/>

Simplify3D. (2021). *PLA*. Hentet mai 6, 2021 fra [simplify3d.com](https://www.simplify3d.com):

<https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/pla/#:~:text=Overview,not%20require%20a%20heated%20bed>.

Smith, C. (2018). *HOW TO: BOUNCE BACK FROM INJURY WITHOUT EVER GOING TO REHAB!* Hentet mai 5, 2021 fra beachgrit.com:

<https://beachgrit.com/2018/10/revealed-chas-smith-is-surfigs-great-bellwether/>

Thomas, B. (2020). *What is ray tracing?* Hentet mai 6, 2021 fra [techradar.com](https://www.techradar.com):

<https://www.techradar.com/news/ray-tracing>

Vondt.net. (2021). *Vondt i skulderleddet*. Hentet mai 5, 2021 fra [vondt.net](https://www.vondt.net):

<https://www.vondt.net/hvor-har-du-vondt/vondt-i-skulderleddet/>

Yu, X. (2011). *Research and Practice on Application of Virtual Reality Technology in Virtual Estate Exhibition*. Changzhou: Elsevier Ltd. Hentet Mai 05, 2021 fra [Sciencedirect.com](https://www.sciencedirect.com):

https://www.researchgate.net/publication/271408950_Research_and_Practice_on_Application_of_Virtual_Reality_Technology_in_Virtual_Estate_Exhibition

Zdero, R. (2017). *What Is Orthopaedic Biomechanics? I Experimental Methods in Orthopaedic Biomechanics* (1. Utgave. utg., ss. 21-26). Cambridge: Academic Press.

Zoom Inc. (2021, Mai 05). Hentet fra [Zoom.us](https://zoom.us/): <https://zoom.us/>

