

10005

Integrering av 3D teknologi for brukertilpasset gips ved Ålesund Sykehus

Bacheloroppgave i Produkt- og Systemdesign

Veileder: Paul Steffen Kleppe

Mai 2020

10005

Integrering av 3D teknologi for brukertilpasset gips ved Ålesund Sykehus

Bacheloroppgave i Produkt- og Systemdesign
Veileder: Paul Steffen Kleppe
Mai 2020

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



Kunnskap for en bedre verden

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 2019, og videre formulert i slutten av januar.

Prosjektet bygger videre på to tidligere bacheloroppgaver av Magnar Gya og Anders Dahle Thorsen i 2018 og Denis Sjøstad, Vegard André Justsen Alvestad og Oscar Hatlo Nedrelid i 2019.

Jeg ønsker å takke veiledere Paul Steffen Kleppe og Webjørn Rekdalsbakken ved NTNU Ålesund og faglig kontaktperson Andreas Fagerhaug Dalen ved Ålesund sykehus. Videre vil jeg også takke lærling Markus Gutvik Lyngstad og automasjonsstudent Magnus Kvendseth Øye, samt studentene som utførte de tidligere oppgaver og dermed gjorde denne mulig.

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

Prosjektet har pågått i perioden 13. januar 2020 til innlevering 20. mai 2020.



Stine Romundstad

Sammendrag

Rapporten tar for seg arbeidsprosessen rundt analyse av tidligere arbeid og forbedring med grunnlag i ny teknologi fra start til slutt. Målet med oppgaven er å utvikle et konsept med bruk av 3D-teknologi som 3D-skanning, -modellering og -printing for å forbedre dagens behandlingsmetode for enkle håndleddsbrudd med et endelig mål om en automatisert prosess. Fremgangsmåten som blir brukt for å komme til det endelige resultatet er beskrevet, samt beslutninger og vurderinger som er tatt underveis.

To prototyper ble utviklet, en manuell skanner for testing av utstyr og tilgjengelig teknologi og en motorisert skanner for å iverksette automatisering.

Innholdet i rapporten inkluderer en litteraturstudie for kartlegging av tidligere arbeid og utvikling innenfor relevant teknologi, arbeidsprosess og vurdering av diverse metoder, resultater og funn fra oppgavens forløp, analyse av dagens prosess med grunnlag i lean manufacturing og diskusjon rundt arbeidet som er gjort.

Resultatet er en 3D-skanner-prototype som øker kvalitet av skann og brukervennlighet i sammenlikning med håndholdt skanning, og et konsept på en motorisert skanner som ikke har en ferdigstilt prototype. Arbeid med 3D-modellering viste at modelleringsverktøyet som ble tatt i bruk kan være et hinder for automatisering av prosessen. Videre finner oppgaven at teknologien innenfor 3D-skanning har nådd et rimelig nivå med programvare og maskinvare som produserer punktsky av høy kvalitet. Til slutt er oppgaven den første i rekken til å produsere detaljerte skann med tilstrekkelig kvalitet til generering av protese.

Abstract

The rapport undertakes the workflow of analyzing previous work and improving it based on new technology from start to finish. The purpose of the thesis is to develop a concept, using 3D technology like 3D scanning, -modelling and -printing to improve today's method of treatment for simple wrist fractures with the final goal of an automated process. The steps undertaken to reach the results are described, along with decisions and assessments taken throughout the process.

Two prototypes have been developed, a manual scanner to test equipment and the available technology and a motorized scanner to implement automation.

Content in the rapport include a literature study to map out previous work and development within relevant technology, the work process and assessments of various methods, results and findings from the course of the assignment, analysis of the current process with a basis in lean manufacturing and discussion regarding the work done.

The result is a 3D scanner prototype that increases the quality of the scan and user friendliness compared to handheld scanning, and the concept of a motorized scanner in which the prototype has not been completed. Work on 3D-modelling showed that the modelling tool used in the thesis could be a hinder for automation of the process. In addition, the rapport concludes that 3D technology has reached an affordable level with software and hardware that produce point clouds of high quality. Furthermore, the rapport is the first in line to produce detailed scans with sufficient quality to generate prosthetics.

Oppgaven

Det vanligste bruddet observert ved Ålesund sykehus er håndleddsbrudd. Å legge gips krever mye tid og presisjon, og den må byttes ut etter noen dager etter redusert hevelse og dermed endret passform på gipsen. Sykehuset ønsker derfor å effektivisere prosessen ved implementering av 3D teknologi, nærmere bestemt 3D- skanning, -modellering og -printing. Denne oppgaven utgjør den tredje i rekken av hovedprosjekt med samme problemstilling, og det er gjort store fremskritt mot en løsning hvert år. Parallelt med arbeidet på oppgaven har industrien utviklet seg mye, som muliggjør nye løsninger på problemstillingen.

Oppgaven tar grunnlag i tidligere hovedoppgaver vedrørende samme problemstilling. Tidligere arbeid viser at teknologien har potensialet til å forbedre prosessen med hensyn til kostnader, tid og kvalitet. Dersom det hele kan være en del av en autonom prosess som krever lite tilsyn av helsearbeiderne vil det frigjøre sykehusets ressurser. Målet ved denne oppgaven vil derfor være å undersøke hvordan prosessen kan utformes fra start til slutt, hvilke programvarer som skal tas i bruk og hvordan de enkelte prosessene skal tilnærmes. I tidligere oppgave ble en fungerende 3D-skanner produsert, men grunnet lav kvalitet holdt den ikke kravene til kunden. Det er også gjort mye godt arbeid med modellering av gipsen, men ettersom programvaren oppdateres stadig vil det være behov for å sette seg inn i nye endringer og eventuelt oppdatere modellerings-prosessen dersom den kan effektiviseres. Det samme gjelder for testing av materiale, hvor det er gjort fysiske tester for å kunne sammenlikne mekaniske egenskaper for gips, PLA og andre printe-materialer. Over de siste årene har 3D teknologi kommet langt, og løsninger på tidligere problemer håpes besvart ved implementering av disse.

Oppgaveformulering

1. En litteraturstudie for å gjøre rede for tidligere utført arbeid og kartlegge videre arbeid med dette og ny teknologi som har kommet på markedet som grunnlag
2. Utvikle en 3D-skanner for testing av teknologi
3. Beskrive en universal 'oppskrift' for 3D-modellering av gips, vurdere nye verktøy for modellering med punktsky, bestemme dataverktøy og utforme gips med lavest bruk av materialet uten at det påvirker styrken på gipsen
4. Klargjøre modellen til produksjon og teste flyt fra modell til print
5. Beskrive utformingen av den digitale verdikjeden og identifisere sløsing i henhold til lean prinsipper.

Veiledere ved NTNU i Ålesund er Paul Steffen Kleppe og Webjørn Rekdalsbakken, og kontaktperson/ faglig veileder ved Ålesund Sykehus er Andreas Fagerhaug Dalen.

Innhold

Forord.....	1
Sammendrag	2
Abstract.....	3
Oppgaven	4
Figuroversikt.....	7
Tabelloversikt	9
Terminologi.....	10
1 Innledning	11
1.1 Bakgrunn.....	11
1.2 Formål.....	11
1.3 Kravspesifikasjoner.....	11
1.4 Rapportens innhold	12
2 Litteraturstudie.....	12
2.1 Fordeler og ulemper ved å bytte til 3D-printet protese	12
2.2 Tidligere arbeid.....	13
2.1.1 Hovedoppgave Vår 2018 av Anders Dahle Thorsen og Magnar Gya.....	13
2.1.2 Hovedoppgave Vår 2019 av Denis Sjøstad, Vegard André Justsen Alvestad og Oscar Hatlo Nedreliid.....	15
2.3 Utvikling i industrien	17
2.2.1 3D-skanning.....	17
2.2.2 3D-modellering	20
2.2.3 3D-printing.....	20
3 Arbeidsprosess	21
3.1 Utvikling av 3D-skanner.....	21
3.1.1 Fokusområder for utvikling av skanneren.....	21
3.1.2 Forslag til utforming	21
3.1.3 Positur av håndleddet under skanning	34
3.2 3D-skanning.....	34
3.2.1 Maskinvarer	35
3.2.2 Programvarer.....	36
3.2.3 Kvalitetstesting av skannemetoder.....	41
3.4 Utvikling av protese.....	43
3.4.1 Testing av 2019 gipsgenerator med skann	43
3.4.2 Generell «oppskrift»	44
3.4.3 utfordringer under modellering	50
3.4.4 Topologioptimalisering og styrkeberegning (FEM analyser)	54

4 Resultat	55
4.1 3D-skanner prototyper	55
4.1.1 Bordskanner	55
4.1.2 Motorisert skanner	59
4.2 3D-skanning	63
4.2.1 Skann - Håndholdt med iPhone	63
4.2.2 Skann - Manuell skanner med iPhone	64
4.2.3 Skann – Håndholdt med Intel RealSense	65
4.2.4 Skann – Manuell skanner med Intel RealSense	66
4.3 Modellering av protese	66
4.4 Den digitale verdikjeden	68
4.5 Analyse og forbedring av dagens prosess ved bruk av «Process Mapping»	68
4.5.1 «The 8 wastes of lean»	70
4.5.2 Kartlegging av sløsing i dagens gipsprosess	72
4.5.3 Process map ved implementering av 3D-teknologi	74
5 Diskusjon	76
6 Konklusjon	77
8 Vedlegg	82
8.1 Komplette stykkliste med leverandør, produsent og pris	82
8.2 Komponenter i Intel RealSense D435 dybdekamera	82

Figuroversikt

Figur 1 - Borrelåsløsning (hentet fra Thorsen & Gya [2017])	15
Figur 2 - CAD modell (hentet fra Thorsen & Gya [2017])	15
Figur 3 – Siste skann utført av 2019 prototype (Hentet fra Sjøstad, Alvestad & Nedreliid [2019])	16
Figur 4 - Gipsgenerator (Hentet fra Sjøstad, Alvestad og Nedreliid [2019])	17
Figur 5 - Økning av seertall vs. økning i opplastninger (hentet fra https://www.trackalytics.com/youtube/user/marquesbrownlee/)	20
Figur 6 - Manuell bordskanner (Eget bilde)	22
Figur 7 - Feste av sensor (blå) på skanner (Eget bilde hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)	23
Figur 8 - Justerbare aluminiumsprofiler (Eget bilde hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)	23
Figur 9 - Aluminium profil (Hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)	24
Figur 10 - Kulelager (Hentet fra https://no.rs-online.com)	24
Figur 11 - oDrive motor (Hentet fra https://odriverobotics.com)	24
Figur 12 - Motorhus (Hentet fra https://discourse.odriverobotics.com/t/nema-enclosures-for-d5065-and-d6374-motors/830)	25
Figur 13 - Driver (Eget bilde)	25
Figur 14 - Driverhus (Hentet fra https://www.thingiverse.com/thing:3486256)	25
Figur 15 - End caps (Hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)	26
Figur 16 - Aksel (Hentet fra egen modell)	26
Figur 17 - Enkoder (Hentet fra https://odriverobotics.com)	26
Figur 18 - Vinkelbraketter (Hentet fra no.rs-online.com)	26
Figur 19 - T-slot mutter og skrue (Hentet fra no.rs-online.com)	27
Figur 20 - Skall (Hentet fra egen modell)	27
Figur 21 - Lagerhus (Hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)	27
Figur 22 - Reim (Hentet fra egen modell)	28
Figur 23 - Reimfeste til aksel (Hentet fra egen modell)	28
Figur 24 - Reimfeste til motor (Hentet fra egen modell)	28
Figur 25 - Bord-feste (Hentet fra egen modell)	29
Figur 26 - Motorhus med forenklet motor (Hentet fra egen modell)	29
Figur 27 - Første modell av skall (Hentet fra egen modell)	30
Figur 28 - Feil mål i skallet (Hentet fra egen modell)	31
Figur 29 - Digital tvilling av motorisert skanner (Hentet fra egen modell)	31
Figur 30 - Forbedret skall til motorisert skanner (Hentet fra egen modell)	32
Figur 31 - Dimensjonering av skannerarm (Eget bilde)	33
Figur 32 - Sammenstilling av motorisert skanner med og uten topplate (Hentet fra egen modell)	34
Figur 33 – Positur håndflate (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])	34
Figur 34 – Positur håndledd (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])	34
Figur 35 – Positur tommel (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])	34
Figur 36 - Metacarpophalangeal-leddet (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])	34
Figur 37 - Intel RealSense Depth Camera D435 (Hentet fra https://intelrealsense.com)	35
Figur 38 - Maskinvare til Apple's TrueDepth kamerasystem (Hentet fra https://www.extremetech.com/mobile/255771-apple-iphone-x-truedepth-camera-works)	36
Figur 39 - Skann av mandarin ved bruk av LIPScan (Eget bilde)	36
Figur 40 - Skann av boks ved bruk av LIPScan (Eget bilde)	36
Figur 41 - RecFusion meny (Eget bilde)	37
Figur 42 - Skann 1 med Intel RealSense D435 og RecFusion (Egne bilder)	38
Figur 43 - Skann 2 med Intel RealSense D435 og RecFusion (Egne bilder)	38
Figur 44 - Skann 3 med Intel RealSense D435 og RecFusion	39
Figur 45 - Eksporteringsmuligheter til Scandy Pro (Eget bilde)	40
Figur 46 - Forskjellige gjengivelsesmoduser i Scandy Pro (Eget bilde)	40

Figur 47 – Ordinær skann fra Scandy Pro (Eget bilde).....	41
Figur 48 - Skann med referansepunkter fra Scandy Pro (Eget bilde)	42
Figur 49 - Skann med lav økning i lysstyrke fra Scandy Pro (Eget bilde).....	42
Figur 50 - Skann med sterk økning i lysstyrke i Scandy Pro (Eget bilde)	43
Figur 51 - Gipsgenerator med rå skann (Eget bilde).....	44
Figur 52 - Importering av STL-fil til NX (Eget bilde).....	44
Figur 53 - Mal for avgrensning av gipsområdet (Hentet fra Sjøstad, Alvestad & Nedreliid)	45
Figur 54 - Rå skann før og etter «Snip» (Egne bilder).....	46
Figur 55 - Skann ved bruk av funksjonen "Smooth" (Egne bilder)	47
Figur 56 - Alalyse og reparasjon av mesh-feil med "Cleanup facet body" (Egne bilder).....	48
Figur 57 - Før og etter bruk av funksjonen "Adjust minimum radius" (Egne bilder).....	48
Figur 58 - Før og etter bruk av funksjonen "offset" (Egne bilder).....	49
Figur 59 - Før og etter bruk av funksjonen "thicken" (Egne bilder)	50
Figur 60 - Kritisk område mellom tommel og pekefinger (Egne bilder)	51
Figur 61 - Gips uten kritisk område (Eget bilde)	51
Figur 62 - Bruk av funksjonen "fill hole" til hull og hakk (Egne bilder).....	52
Figur 63 - Bruk av "smooth facet body" på et konsentrert område (Egne bilder)	53
Figur 64 - Resultat av reparasjon på kritisk område (Eget bilde)	53
Figur 65 - Topologioptimalisering i Siemens NX (Hentet fra https://news.cision.com/inmema-kommunikasjon/r/siemens--latest-release-of-simcenter-3d-advances-computer-aided-engineering-and-simulation,c2373299).....	54
Figur 66 - Styrkeberegning i Siemens NX (Hentet fra https://www.nord-lock.com/globalassets/mediavalet/web-assets/pictures/insights/knowledge/nord-lock-group-uses-siemens-nx-cae-600x276.jpg)	55
Figur 67 - Montering av bordskanner (Egne bilder)	57
Figur 68 - Forbedret bord-feste (Eget bilde).....	57
Figur 69 - Standardisert skrue til kamerafeste (Hentet fra http://www.ocon.com/products/support-accessories/camera-screw-14-20-unc/)	58
Figur 70 - Tripod til Intel RealSense D435 (Eget bilde).....	58
Figur 71 - Montering av motorisert skanner (Egne bilder)	60
Figur 72 - Grafisk display for innstillinger av skanner (Hentet fra Magnus Kvendseth Øye).....	61
Figur 73 - 3D-printet reimdrift (Egne bilder).....	61
Figur 74 - Timing belt (Hentet fra https://no.rs-online.com/web/p/timing-belts/7785036/).....	62
Figur 75 - Timing Belt Pulley (Hentet fra https://no.rs-online.com/web/p/timing-belt-pulleys/7784831/)	62
Figur 76 - Rå håndholdt med iPhone (Egne bilder)	64
Figur 77 - Rå skann med manuell skanner og iPhone.....	65
Figur 78 - Rå håndholdt skann med Intel RealSense (Egne bilder).....	66
Figur 79 - Protese etter 3D-modellering (Egne bilder).....	67
Figur 80 - Den digitale verdikjeden (Egen figur).....	68
Figur 81 (Egen figur).....	69
Figur 82 – GEMBA hentet fra https://kanbanize.com/lean-management/improvement/gemba-walk/ 72	72
Figur 83 – Kartlagt sløsing med hensyn til ny teknologi (Egen figur)	73
Figur 84 - Gipsprosess med ny teknologi (Egen figur).....	75

Tabelloversikt

Tabell 1 - Tester utført på gips 2018.....	15
Tabell 2 - Stykkliste motorisert skanner	29
Tabell 3 - Kostnader for bordskanner prototype.....	59
Tabell 4 - Kostnader for motorisert skanner prototype.....	63
Tabell 5 - Process mapping symboler	69
Tabell 6 - Fargekoder.....	72
Tabell 7 – Tidsberegninger	75

Terminologi

Begrep	Definisjon
Støy	Avvik av datapunkter i en punkttsky
GPU (Graphic Processing Unit)	En GPU er en databrikke som utfører raske matematiske beregninger, for det meste for å gjengi bilder (Rouse, Ferguson, & Steele, 2019).
Rec FPS (Recording Frames Per Second)	FPS er en enhet som måler hvor mange påfølgende bilder som vises hvert sekund på fullskjerm (Christensson, TechTerms, 2015). I denne sammenhengen er det hvor mange påfølgende bilder som vises hvert sekund på fullskjerm under skanning.
LiDAR (Light Detection and Ranging)	Teknologi som sender pulseringer av laser-ståler og måler hvor lang tid det tar før den komme tilbake for å avgjøre avstand (GIS Geography, 2020).
RGB Sensor	RGB står for «red», «green» og «blue», og er en fargemodell brukt til elektroniske system. En RGB-sensor plukker opp farger og forbedrer bildet tatt opp fra et kamera (Christensson, TechTerms, 2019).
AR (Augmented Reality)	«En forbedret versjon av virkeligheten skapt av bruk av teknologi for å legge over digital informasjon til et bilde av noe som blir sett gjennom en enhet» (Merriam-Webster, 2020).
VR (Virtual Reality)	«Et kunstig miljø som oppleves gjennom sansestimuleringer (for eksempel severdigheter og lyder) levert av en datamaskin og der ens handlinger delvis avgjør hva som skjer i miljøet» (Merriam-Webster, 2020).
Voxel	«Hvilket som helst av de diskrete elementene som omfatter en tredimensjonal enhet (for eksempel et bilde produsert av magnetisk resonansavbildning)» (Merriam-Webster, 2020)
PLA (Polylactic Acid)	En type termoplast, ofte derivert fra maisstivelse, som brukes til additiv tilvirkning (Sculpteo, 2020).
TPU (Thermoplastic Polyurethane)	Termoplast (nærmere bestemt «thermoplastic elastomer») brukt til å lage blant annet elastisk filament til additiv tilvirkning (3DNet, 2020).
Facet body	En «facet body» er en geometrisk form satt sammen av mange små flater.
Convergent body	En tilstand i Siemens NX som tillater bruk av konvensjonelle verktøy på en «facet body».
STL-fil (.stl)	En STL («stereolithography») fil beskriver overflategeometrien av en tredimensjonell figur (Chakravorty, 2019).

1 Innledning

1.1 Bakgrunn

Bruk av gips for å bidra til å lege et brudd kan spores helt tilbake til det gamle Egypt, for rundt 3000 år siden (Oster, 2012). Materialene som ble brukt varierte over tid, men lite skjedde før på begynnelsen av 1800 tallet, da noen sykehus i Paris begynte å bruke gips. Metoden utviklet seg til en som fortsatt brukes i dag; den såkalte kalkgipsen (noen ganger omtalt som «plaster of Paris»). I dag er det flere tilgjengelige metoder for å gipse benbrudd, alle med sine positive og negative egenskaper, men i forhold til antallet mennesker som har brukket ben de siste 3000 årene har ikke utviklingen kommet langt fra gamle Egypts metoder.

Med over 15 000 tilfeller i året er håndleddsbrudd er et av de vanligste bruddene observert ved sykehus i Norge (Bryhn, 2019). Ettersom det ofte er behov for to helsemedarbeidere er det kostbart og tidkrevende, med små marginer for feil. En rekke komplikasjoner kan oppstå under påføring av gipsen, blant annet trykk på nerver, trykksår og feilstillinger som vil ha en innvirkning på behandlingen (Universitetet i Oslo). Ved innføring av 3D-skanning, -printing, og -modellering kan komplikasjonene utryddes, og prosessen effektiviseres.

1.2 Formål

Formålet med oppgaven er å utforme en prosess for utvikling av persontilpasset protese ved hjelp av 3D-teknologi. Oppgaven tar utgangspunkt i tidligere arbeid som er gjort og implementerer nye teknologier og fremgangsmetoder. Ved å løse tidligere kjente utfordringer og jobbe videre med innovasjon som har skjedd innenfor fagfeltet, vil fokuset være å jobbe seg nærmere målet om en automatisert prosess som ender i en pasienttilpasset protese for håndleddsbrudd. Rapporten skal avbilde arbeidet som er gjort for å løse oppgaven, diverse avgjørelser som er gjort underveis og det endelige resultatet.

1.3 Kravspesifikasjoner

- Rask printing (under 30 min)
- Komfort
- Styrke/stivhet
- Mindre ressurskrevende
- Miljøgevinst

Kirurg ved ortopedisk avdeling på Ålesund Sykehus, Andreas Fagerhaug Dalen, diskuterte utforming av en eventuell skanner med kandidatene som skrev hovedoppgave ved dette temaet våren 2019.

Dalen la vekt på å utvikle en skanner som er portabel og har mulighet til å oppta mindre plass når den ikke er i bruk (Sjåstad, Alvestad, & Nedrelid, 2019). Videre uttrykte han at skanner og printer skulle

være separate, slik at flere gipser kunne skrives ut samtidig. Denne løsningen vil også være gunstig i henhold til det portable aspektet av skanneren.

1.4 Rapportens innhold

Kapittel 1	Innledning
Kapittel 2	Litteraturstudie
Kapittel 3	Arbeidsprosess
Kapittel 4	Resultat
Kapittel 5	Diskusjon
Kapittel 6	Konklusjon
Kapittel 7	Bibliografi

2 Litteraturstudie

2.1 Fordeler og ulemper ved å bytte til 3D-printet protese

Modernisering av prosessen har både positive og negative aspekter. Arbeidsprosesser videre må maksimere fordelene og minske konsekvensene eller finne løsninger for ulempene, hvordan begge er skissert nedenfor.

Fordeler:

- 1. Lavere kostnader** - Oppgaven fra 2019 viste at ved å bytte fra dagens gipsprosess til 3D-printede proteser ville kostnadsbesparelsene ligge på mellom 121 og 360 kroner per gips (Sjåstad, Alvestad, & Nedrelid, 2019).
- 2. Bedre utnyttelse av ressurser** - Automatisering av prosessen vil frigjøre tid for helsepersonell til å gjøre andre oppgaver som krever deres ekspertise.
- 3. Miljøvennlighet** - Muligheten for resirkulering av printematerialet senker utslipp som resultat av prosessen, som gjør 3D-printet proteser til et mer miljøbevisst alternativ. Videre er *PLA* (Polylactic Acid) ofte derivert fra naturlige stoffer som maisstivelse eller sukkerrør, som gir materialet dens evne til å nedbrytes (Rogers, 2015).
- 4. Økt komfort** - I motsetning til den tradisjonelle gipsen, gir 3D-printet protese mulighet for åpne områder som minsker behovet for kløing, en vanlig negativ konsekvens av gipsen.
- 5. Økt hygiene** – Ettersom den tradisjonelle gipsen er tett og ikke tillater pasienten å dusje samler det seg bakterier i gipsen, som er en av grunnene til at gipsen kan begynne å klø etter hvert. En 3D-printet protese, derimot, tillater pasienten å dusje, som resulterer i økt hygiene. Dette kan være spesielt viktig dersom pasienten jobber i en sektor hvor de er i kontakt med mennesker med nedsatt immunforsvar.

6. **Lavere sjanse for trykksår** – Ved manuell påføring av gips kan det oppstå trykksår, en komplikasjon som elimineres ved 3D-printing.
7. **Kan lett files ned ved irritasjon** – Dersom det er områder på protesen som er irriterende for brukeren, kan plastikken lett files ned for økt komfort.

Ulemper:

1. **Fortsatt ganske tidkrevende** – Selv om utvikling innen 3D-teknologi konstant fører industrien videre, er det fortsatt grenser for hvor fort en 3D-printer kan ferdigstille et produkt.
2. **Avvik kan skape forsinkelser** – Tradisjonell metode var helt manuelt, som betydde at behandling alltid kunne gis. Ved implementering av mer avansert teknologi vil eventuelle avvik kunne ha behov for innleiing av spesialist for å løse problemer.
3. **Allergier** – Det er alltid mulig at noen er allergisk for plastikken brukt i protesen. Vanligvis er PLA derivert fra mais, men under prosessen hvor PLA utvinnes blir stoffene allergikere kan reagere mot bryt ned (Rogers, 2015). Bruk av støttestrømpe under protesen kan hjelpe, men i verste fall vil ikke behandlingen være en forsvarlig behandlingsmetode.

2.2 Tidligere arbeid

For å kunne løse oppgaven på best mulig måte, må tidligere arbeid gjennomgås. Kartlegging av utfordrende og vellykkede aspekter i tidligere arbeid vil føre til bedre forståelse av områder som vil trenge en annen tilnærming eller innføring av ny teknologi. Arbeid som omfatter tilgjengelig teknologi (3D-modellering, 3D-skanning og 3D-printing) og prototyper er spesielt viktig for arbeidet videre.

2.1.1 Hovedoppgave Vår 2018 av Anders Dahle Thorsen og Magnar Gya

Arbeid utført under denne oppgavens forløp dannet grunnlaget for videre arbeid som har skjedd rundt prosjektet siden. På den tiden var 3D-skanning relativt nytt ved NTNU Ålesund, og heller ikke så utbredt i industrien. Ved innføring av ny teknologi er det mange usikkerheter som medfører en bratt læringskurve. Dette resulterte i erfaringer og observasjoner som vil være viktig å ta med under utvikling av 3D-skanneren. Modellering og 3D-printing var et mer kjent område, og arbeidet beskrevet under er høyt relevant.

3D-skanning

Når den første oppgaven ble skrevet var det få 3D-skannere på markedet, og det var mye liknende tilnærming i h.h.t. teknologien de forskjellige skannerne benyttet seg av. For det meste var det håndholdte laserskannere som var tilegnet større objekt, som for eksempel hele rom. En skanner utviklet for en litt større skala ble derfor benyttet for å teste og evaluere skannerteknologien.

Under skanning ble en rekke utfordringer oppdaget:

- Det er utfordrende å holde armen i ro i tidsperioden det tar å skanne, så det er behov for støtte av armen
- Det er vanskelig å vite om håndleddet er i riktig positur under skanning
- Skanneren gav best skann ved en viss avstand fra objektet, men ettersom den var håndholdt var det vanskelig å holde den i dette området
- Dersom skanneren mister oversikt over hvor den eller hvor objektet befinner seg er det vanskelig å hente seg inn for å fortsette skanningen, dette kan skje som et resultat av en rask bevegelse eller dersom man er ute av det ideelle skanneområdet
- Overførsel av punktsky til 3D-modelleringsprogram er en prosess som krever erfaring

3D-modellering

Geomagic Design X av 3DSystems ble tatt i bruk for å forbedre punktskyen fra skanneren og gjøre det om til egnet filformat for videre bruk i Siemens NX, som ble brukt som modelleringsverktøyet (Thorsen & Gya, 2017). Geomagic Design X ble brukt for å fjerne *støy* og andre unødvendige målinger som skanneren plukket opp. Ettersom skanneren er ment for større objekter var det mindre nøyaktighet på nært hold. For å generere en jevn overflate krevde modellen derfor mye bearbeiding.

Ettersom dette var den første oppgaven som ble gjort, var det usikkerheter rundt gjennomførbarheten til prosjektet. Formålet under denne oppgaven var derfor rettet mer mot muligheten om implementering, og ikke de praktiske aspektene ved å bruke konseptet ved et sykehus. Oppgaven beviste at dette ikke bare var en mulighet, men at det ville være en god utvikling i henhold til kvalitet og kostnad. En konsekvens av tilnærmingen til oppgaven er at måten protesen ble modellert på ikke er utført med tanke på repeterbarhet og automasjon.

3D-printing

Ultimaker 2+ ble brukt for å utføre diverse tester, som beskrevet nedenfor, ettersom det var denne type printer som var tilgjengelige på skolen på det tidspunktet.

Diverse tester og prototyper ble utviklet for å sette konseptet på prøve. Tabellen under viser en oversikt over disse, samt resultatene.

Beskrivelse	Hensikt	Resultat
Hulltest	Se hvilken utforming av åpninger som er best egnet til 3D-printing.	Dråpeformet og oval.
Vanntest	Teste hvordan PLA påvirkes av vann over tid.	Lite endring i materiale annet enn litt misfarging.

Materialtest	Sammenlikning av styrken til PLA, plastgips og kalkgips.	Fra høyest styrke til lavest styrke: PLA, plastgips, kalkgips. Videre viste testene at deler skrevet ut med horisontal «fiberretning» er dobbelt så sterke som de skrevet ut med vertikal «fiberretning» ved en tykkelse på 4mm.
Protese feste (sammenlikning av prototyper)	Bestemmelse av hvilket feste av protesen som vil være mest hensiktsmessig	Bruk av borrelås (eller liknende) med delvis dekkende protese.  <p><i>Figur 1 - Borrelåsløsning (hentet fra Thorsen & Gya [2017])</i></p>

Tabell 1 - Tester utført på gips 2018

Hovedoppgaven skrevet våren 2018 resulterte i et konsept som benyttet ny teknologi for å oppdatere måten håndleddsbrudd kan behandles på. Bruk av laserskanner viste seg å bli for unøyaktig, og i modelleringsfasen var det behov for mye bearbeiding for å få komme til en brukbar 3D-modell (se figur 2). Arbeidet rundt utseende og funksjonalitet førte til gode retningslinjer som vil benyttes senere. Konklusjonene beskrevet kort ovenfor vil derfor være grunnlaget til videre utvikling av konseptet.



Figur 2 - CAD modell (hentet fra Thorsen & Gya [2017])

2.1.2 Hovedoppgave Vår 2019 av Denis Sjøstad, Vegard André Justsen Alvestad og Oscar Hatlo Nedrelid

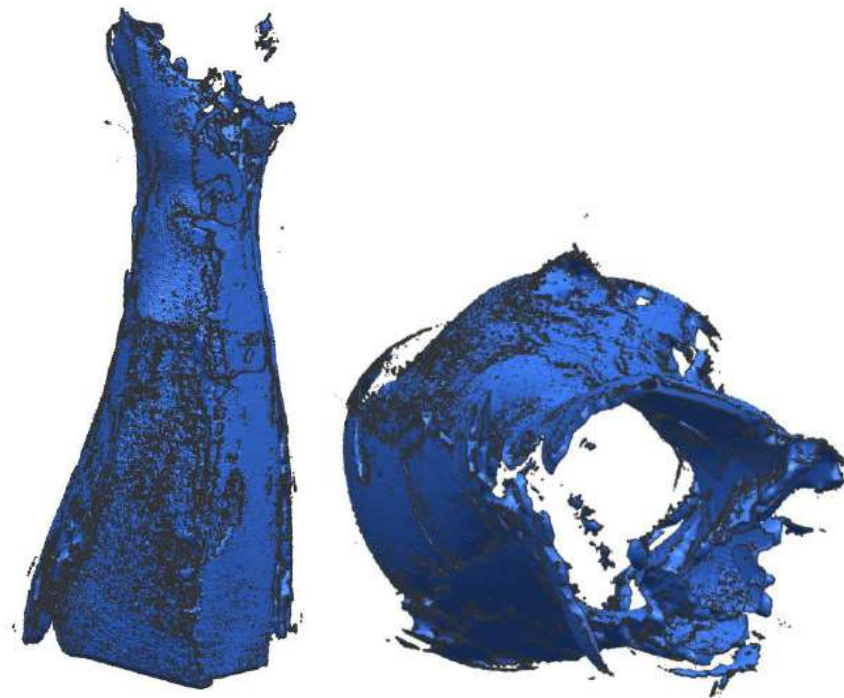
Opgaven utført i 2019 produserte en prototype til en 3D-skanner. Dette var et stort skritt mot det endelige målet om å utvikle et produkt til bruk ved Ålesund sykehus.

3D-skanning

Basert på sammenlikning av fotogrammetri og laserskanning valgte gruppen å benytte fotogrammetri i utviklingen av 3D-skanner fordi det er hurtigere, koster mindre og gir relativt god kvalitet. Dette

gjorde de via Raspberry Pi og Raspberry Camera hvor gruppen fra automasjon utførte programmeringen og sammensetning av bilder for fotogrammetri. Konseptet var å ha en ring med kameraer i en trommel som tok bilde av hånden samtidig, også brukte fotogrammetri-programvaren bildene til å produsere en punkttsky.

Prototypen som ble utviklet bestod av et høyt antall 3D-printede deler som var tidkrevende og ressurskrevende å lage. Det er mest hensiktsmessig å bruke 3D-printing til deler som er for komplekse for maskinering. En fordel ved at gruppen tok i bruk 3D-printing som hovedverktøy er at de kunne utvikle deler som var egnet til 3D-skanning. Designet på skanneren ville ha vært vanskelig å produsere med andre materialer og metoder. Ulempen ved bruk av 3D-printing til dette derimot er at eventuelle problemer med skanneren var vanskelig å rette opp dersom de ikke ble funnet før printing. Problemer med utforming eller design som blir klart under testing av prototypen ville ikke kunne rettes opp uten å endre design og printe delene på nytt. Figur 3 avbilder den siste skannen som ble utført av skanner-prototypen.

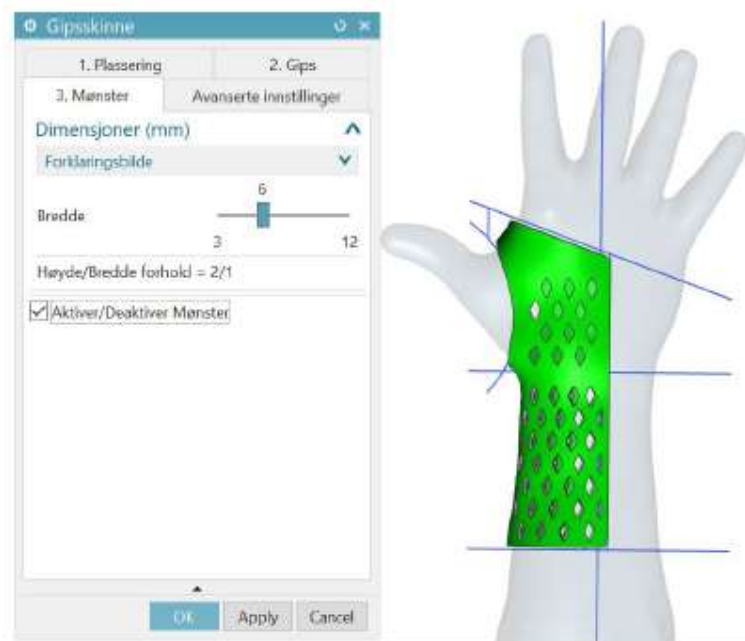


Figur 3 – Siste skann utført av 2019 prototype (Hentet fra Sjøstad, Alvestad & Nedrelid [2019])

Testing viste også at fotogrammetri-programvaren ikke klarte å skille mellom bar hud og omgivelser, men den klarte det dersom det var en sokk over hånden. Det var også problemer med overlapping av bildene som ble tatt av kameraene. Til å konkludere var ikke kvaliteten på skannet tilstrekkelig til å danne en gips via modelleringsverktøy.

3D-modellering

Siden skannen fra prototypen ikke gav et resultat som kunne brukes til å utvikle en protese, ble en generisk modell utnyttet. Resultatet fra modelleringen er en gipsgenerator som tar i bruk en PTS-meny i Siemens NX til å danne en protese (se figur 4).



Figur 4 - Gipsgenerator (Hentet fra Sjøstad, Alvestad og Nedrelid [2019])

3D-printing

Prototypen utviklet av gruppen bestod for det meste av 3D-printede deler, så oppgaven utdyper godt om forskjellige utfordringer som kan oppstå under 3D-printing og ulike teknikker knyttet til printing. Det ble også utført en sammenlikning av materialstyrke mellom PLA og SLA, hvor SLA har høyere strekkfasthet, forlengelse ved brudd og bøyestyrke i forhold til PLA. Mer informasjon finnes i den relevante rapporten.

2.3 Utvikling i industrien

2.2.1 3D-skanning

I oppgaven utført i 2019 ble *LiDAR* (Light Detection and Ranging) ikke vurdert for bruk i skanneren fordi teknologien på den tiden var utviklet for større skala. I dag blir teknologien tatt i bruk for skanning på nærmere hold, blant annet i den nylige lanserte iPad Pro (Apple Inc., 2020). Med forbedret mulighet til 3D-skanning gjennom apple produkter kommer også applikasjoner med programvare av varierende kvalitet og pris som støtter ny maskinvare. Senere lanserte versjoner av Apple's smartefone iPhone (nærmere bestemt iPhone X og nyere) har også dybdesensor, som gjør de gode kandidater for 3D-skanning på hobby-nivå.

Laser triangulering

Starten på 3D-skanning, som kan spores til National Research Council Canada i 1978, baserte seg på teknikken 'laser triangulering' (3Dnatives, 2017). Det går ut på at et kamera, en laser og objektet som ønskes skannet former en trekant. Det brukes vanligvis 'halvledende lasere', som er en diode-laser med halvledende materiale (Gihleengen, Thoresen, & Grimsrud, 2007). En rekke parameter brukes for å finne koordinatene til objektet; vinkelen mellom kameraet og laserstrålen, avstanden fra kameraet til objektet og avstanden mellom laserkilden og objektet.

Hovedfordelen ved å bruke laser triangulering er den lave kostnaden, som etter lang utvikling er en av de billigste løsningene på markedet for øyeblikket (3Dnatives, 2017). En ulempe ved laser triangulering er at det er problematisk å skanne transparente eller reflekterende overflater.

Forskjellige teknologier brukt til 3D-skanning

1. Fotogrammetri
2. Lys-basert skanning
3. Kontaktskanning
4. Laserskanning

Ved skanning er det noen faktorer som vil påvirke resultatet. Viktigheten av faktorene varierer basert på hvilken teknologi som blir brukt til skanningen, men forblir ganske likt over spekteret (Flynt, 3DInsider, 2019).

- Transparente og reflekterende overflater
- Lyskvalitet

ToF sensor

En *ToF sensor* (Time-of-Flight) bruker infrarødt lys for å måle avstand. Sensoren sender ut infrarødt lys som treffer objekter og returnerer til sensoren, som måler hvor lang tid det tok, og avgjør hvor langt unna objektet er deretter (Tilman, 2020). ToF er derfor anhengig av å vite den eksakte hastigheten på laserstrålen (3Dnatives, 2019). Konseptet ligner seismikk, men på en liten skala og ved bruk av lysbølger. ToF teknologi er mindre kostbart enn strukturert lys kameraer, og krever i tillegg mindre av prosessoren. Dette gjør teknologien egnet for brukt til skanning av rom. En fordel med ToF er at lys ikke har stor innvirkning på innhenting av data grunnet bruk av infrarødt lys. En ulempe ved ToF er at nøyaktigheten ikke er like høy som for eksempel laser skanning eller strukturert lys-skanning.

«Structured light» skanning

Strukturert lys-skanning er en måte å skanne objekter ved hjelp av lys og kamera (Flynt, 3Dinsider, 2020). Skjønnheten ved teknikken ligger i hvor enkel teknologien er. En lyskilde projiserer linjer med lys i kalibrerte mønster som spores av en eller flere kamera. Mønsteret på lyslinjene kan genereres via

en digital lysmodulator eller ved at to laserstrålefronter møtes. Det er ikke ny teknologi, men har blitt utviklet fra stort og dyrt utstyr til en mer brukervennlig teknikk.

Sammenlignet med andre metoder for 3D-skanning, er strukturert lys-skanning ingen klar vinner eller taper. I henhold til nøyaktighet ligger strukturert lys-skanning over ToF sensorer, og det er raskere enn laserskanning. En ulempe ligger i at metoden er spesielt sensitivt til lysforholdene og overflaten på objektet som skannes.

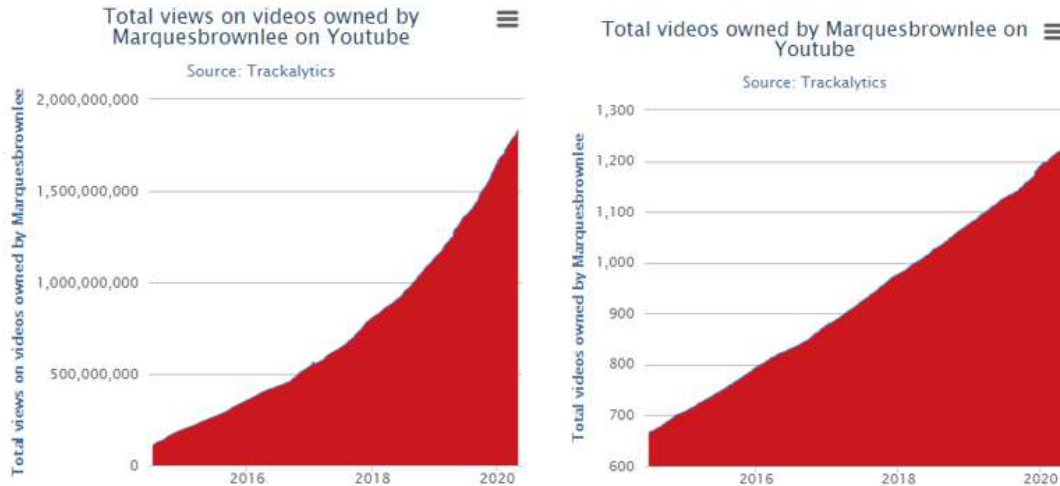
LiDAR

LiDAR er teknologi som har vært i utvikling siden 1960 tallet, og har siden blitt brukt i diverse industrier som skanning av topografi til kart, kartlegging av månen i regi av NASA, arkeologi, og senere som et viktig verktøy i utviklingen av selvkjørende biler (Blakemore, 2019). Hovedforskjellen på LiDAR og ToF er at LiDAR utnytter en radar som måler lengde og overvåker omgivelser (Knight, 2020). Som ToF bruker LiDAR infrarød laser for å måle tiden det tar for bølgene å treffe objektet og komme tilbake.

Dybdesensor i smarttelefoner

Smarttelefoner som har truffet markedet de siste årene fra både Android og Apple har hatt ToF sensorer med hovedformålet å forbedre fotografi. Ved god bruk av programvare kan ToF kameraer blant annet hjelpe med dybdeskarphet og gjøre bakgrunnen på portrettbilder uklare. Videre er det også et viktig verktøy for *AR* (Augmented Reality), som er raskt utviklende teknologi hvor mange følger med på fremgangen. *AR* blir brukt til å se 3D-modeller i en reel skala, en kan for eksempel dra møbler inn i rommet for å se hvordan det passer inn. *VR* (Virtual Reality) bygger omgivelsene fra bunnen av. En bonus ved implementering av dybdesensor-maskinvare er muligheten til å utvikle programvare til 3D-skanning. Tredjeparti-utviklere har i den sammenhengen utviklet sofistikerte applikasjoner/program som bruker maskinvare tilgjengelig på smarttelefonen til å danne detaljerte punktskyer som kan videreutvikles i modelleringsverktøy. Videre har Apple nylig lansert en versjon av deres iPad Pro som er utstyrt med en LiDAR skanner.

Dersom leverandørene velger å tilføye dybdesensorer som et resultat av forespørsel for maskinvare til bedre bilder, 3D-skanning og *AR* (Augmented Reality) eller motsatt er usikkert, men veksten på markedet viser at det er interesse for avansert teknologi i privat sektor. For eksempel har medieplattformen YouTube de siste årene opplevd sterk økning i seertall for skapere med søkelys på å vurdere og analysere ny teknologi som treffer markedet. Figur 5 viser sterk økning i seertall hos den populære skaperen Marquesbrownlee når opplastninger i samme periode har vært ganske konstant.



Figur 5 - Økning av seertall vs. økning i opplastninger (hentet fra <https://www.trackalytics.com/youtube/user/marquesbrownlee/>)

2.2.2 3D-modellering

Siemens NX er modelleringsverktøyet som har blitt brukt i både denne og tidligere oppgaver, ettersom det er den studentene blir kjent med på studiet. Programvaren oppdateres jevnlig, i gjennomsnitt en gang i året. Med hver oppdatering utvikles nye funksjoner, og det gjelder å holde seg oppdatert på disse for å få så mye ut av plattformen som mulig.

2.2.3 3D-printing

3D-printing er en form for additiv tilvirkning, en tilvirkningsmetode som blir sett på som fremtidens produksjonsmetode. Industrien vokser hyppig, med integrering av flere og flere industrier som ser verdi i additiv tilvirkning. Den mest utbredte 3D-printing metoden heter 'material extrusion', og teknikken innebærer at filament, ofte PLA, varmes opp i en dyse som plasserer det nå myke materialet lagvis for å lage danne et 3D-objekt (Siemens Industry Software Inc.). Dette er metoden som vil brukes videre ettersom det er en rimelig og effektiv løsning.

Utvikling innen 3D-printing skjer i et høyt tempo, og medier som holder et øye med industrien går sjeldent en dag uten oppdateringer. De siste årene har det vært mest utvikling innen 3D-printing av metall og andre materialer. Disse prosessene er ofte mer komplekse, men tilbyr et bredt bruksområde. Utvikling som skjer med bruk av filament som PLA, material extrusion, har derfor ikke sett like stor utvikling de siste årene.

3 Arbeidsprosess

3.1 Utvikling av 3D-skanner

En stor del av oppgaven er å utvikle og konstruere en 3D-skanner. Videre beskrives forløpet, samt avgjørelser tatt under prosessen.

3.1.1 Fokusområder for utvikling av skanneren

Etter avgjørelsen om å utvikle en prototype ble en rekke fokusområder lagt frem som retningslinjer rundt designet og skannerens funksjoner:

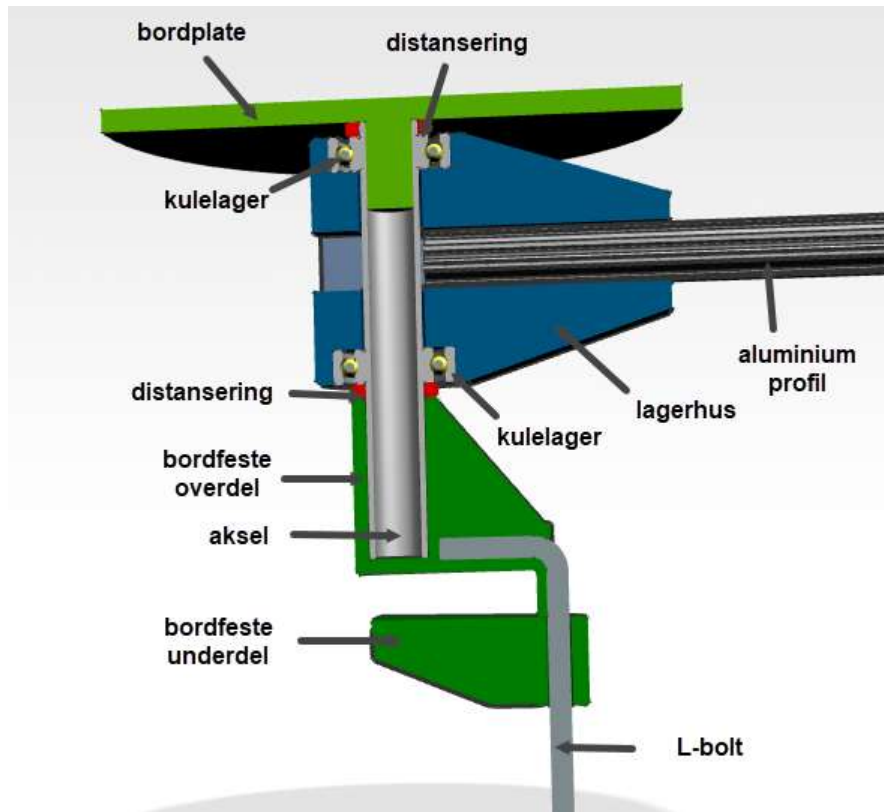
1. **Mobilitet:** Ettersom pasienter kan bli behandlet både på ortopedisk avdeling og på legevakten er det viktig at skanneren kan forflyttes til det relevante området av sykehuset etter behov. Det betyr at vekten må holdes lav, og at dimensjonen til skanneren er håndterbar for en ansatt.
2. **Brukervennlighet:** For å unngå behovet for avansert opplæring av ansatte ved sykehuset må skanneren være brukervennlig og enkel å bruke. Dette kan oppnås ved å programmere skanneren til jobben som skal gjøres på forhånd, for eksempel ved bruk av data fra testing.
3. **Rom for endring:** Trommel-skanneren som ble bygd i 2019 var en kompleks prototype med mange deler. Dette førte til at små endringer i design ville ha store konsekvenser for ferdigstillingen av prototypen. Skanneren bestod primært av uniforme 3D-printede deler, så dersom det for eksempel hadde vært behov for en større trommel ville det være nødvendig å skrive ut de fleste delene på nytt. Lærdom som kan tas fra denne oppgaven er viktigheten av mulighet til endring i utformingsfasen av produktutviklingen. Ved utvikling av den nye skanneren står derfor rom for endring i fokus som en av kravene til skanneren.
4. **Minimalistisk:** Det er lett å la seg rive med i avanserte produksjonsmetoder og design, men for denne prototypen skal designet være så enkelt som mulig for å fremheve eventuelle problemer og gi mulighet til videre utvikling.

3.1.2 Forslag til utforming

Med fokusområdene ovenfor i tankene ble forslag til skanneren tegnet. Det kom frem tidlig at den enkleste og mest effektive løsningen på skanneren var en roterende arm med 90 grader vinkel. For bruk ved sykehuset er det viktig at prosessen krever minst mulig menneskelig intervensjon for å unngå behov for opplæring av helsepersonell. Dette oppnås ved å utvikle en motorisert skannerarm med forhåndsbestemte parametere som er optimalisert under prototypetesting.

Bordskanner:

For å utføre enkel testing av utstyr og teknologi ble det først utviklet en manuell bordskanner. Funksjonen ved skanneren var å kunne teste ulike sensorer til skanning, og generelt se hvilke løsninger som fungerte. Etter brainstorming av design som passet parameterne og fokusområdene, ble en 3D-modell utviklet av Paul Steffen Kleppe, med deler beskrevet i figuren nedenfor.



Figur 6 - Manuell bordskanner (Eget bilde)

Kobling mellom rund aksling og firkantprofil

Lagerhuset (blått) i figur 6 viser løsningen på kobling mellom en rund aksling og en firkantprofil. Dette er et eksempel på hvordan implementering av 3D-teknologi i produksjon kan tilby elegante løsninger hvor tradisjonell maskinering hadde vært tidkrevende og mer komplekst. Konsultasjon med overingeniør André Tranvåg fastslo en mulig måte å produsere koblingen via maskinering, men utvikling av delen med 3D-modellering og -printing resulterte i rask produksjon og lav vekt, samt mulighet for endring av dimensjoner senere.

Bord-feste

Ettersom det var tungt fokus på mobilitet og minimalistiske løsninger var festemetode en utfordring. For å holde skanneren mobil, er det hensiktsmessig å holde vekten så lav som mulig. Samtidig skaper armen et moment som bord-festet må tåle. Løsningen ble å hente inspirasjon fra feste til kontor-lamper og baserer seg på å kunne festes i en bordkant. Ettersom de fleste bordhøyder allerede er tilpasset en sittestilling vil denne løsningen være ideell ved skanning av arm også.

Kulelager

To kulelager er lagt inn som en del av koblingen som fester aluminiumsprofilen og akslingen. Kulelagrene tar opp radielle og aksielle krefter som resultat av armen. Med fokus på vekt velges plastikklager ovenfor lager av metall, ettersom de har substansiell styrke.

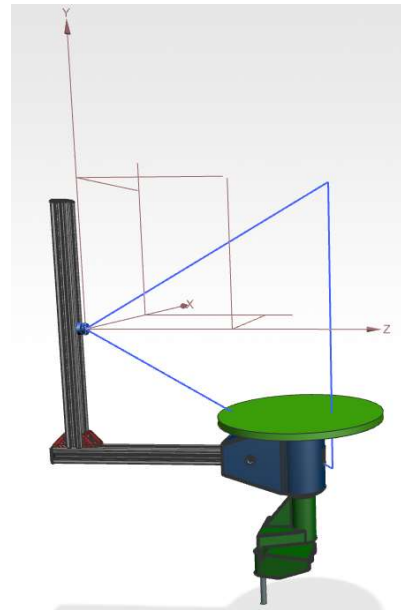
Justerbar aluminiumsprofil

Vinkelbraketter kobler de to aluminiumsprofilene sammen, og tillater justering av radius produsert under skanning. Ideell avstand mellom skannerobjektet og sensoren, som er festet til vinkelrett aluminiumsprofil (se figur 7), varierer avhengig av sensoren. For å produsere punktskyer av høy kvalitet må det derfor være mulighet til å justere på denne avstanden slik at sensoren kan bli satt i korrekt posisjon.

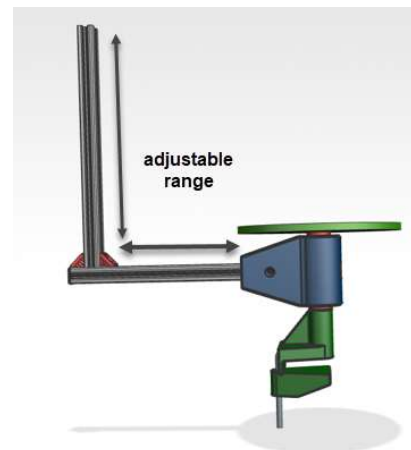
Aluminiumsprofilene er utformet med spor på alle fire sider for enkel montering av utstyr (se figur 9). Dette muliggjør også justering av høyde på sensor, avhengig av hva som kreves av objektet som skal skannes (se figur 8). Etter testing av prototypen kan den endelige skanneren tilpasses aluminiumsprofiler med riktig lengde i permanente posisjoner.

Motorisert skanner


Videre utvikling av bordskanneren leder til en motorisert skanner. Her brukes en motor og reimdrift for å drive skannearmen rundt i 360 grader. Tabell 2 nedenfor viser stykke liste for den motoriserte skanneren. For mer detaljer som pris, leverandør og produsent se vedlegg 8.1.

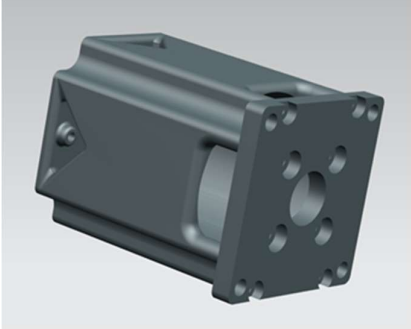
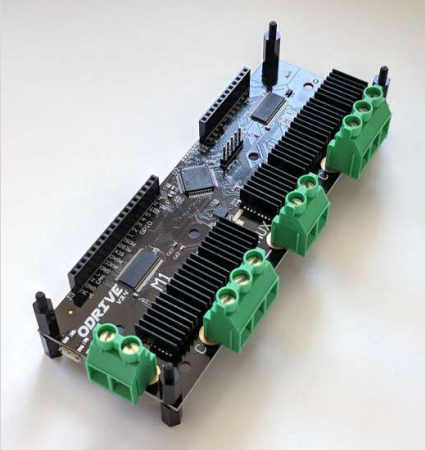
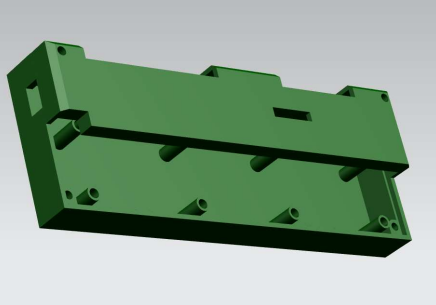


Figur 7 - Feste av sensor (blå) på skanner
(Eget bilde hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)



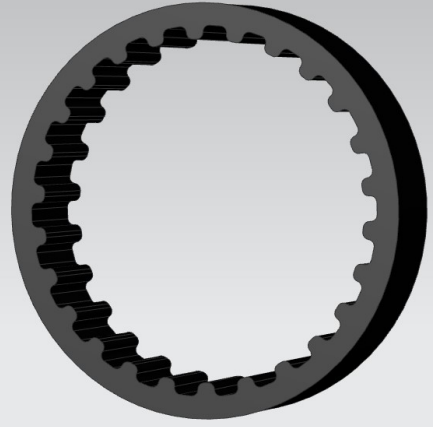
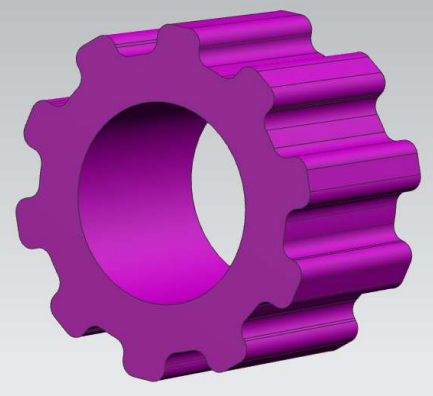
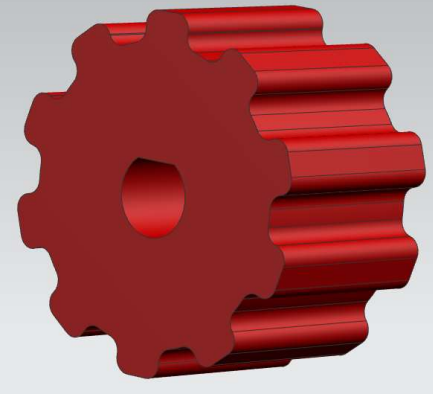
Figur 8 - Justerbare aluminiumsprofiler
(Eget bilde hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)

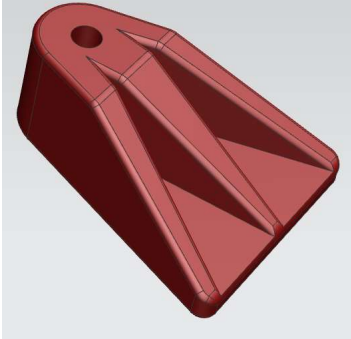
Antall	Beskrivelse	Navn	Bilde
1	Alu. profil	Bosch Rexroth Aluminium Strut 20 x 20 mm, 6mm Groove, 3000mm Length	 <p><i>Figur 9 - Aluminium profil (Hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)</i></p>
4	Kulelager, plastikk	20mm Radial Ball Bearing 42 mm O.D.	 <p><i>Figur 10 - Kulelager (Hentet fra https://no.rs-online.com)</i></p>
1	Motor	ODrive Dual Shart Motor - D5065 270kV	 <p><i>Figur 11 - oDrive motor (Hentet fra https://odriverobotics.com)</i></p>

1	Motorhus	3D-printes fra tilgjengelig modell	 <p>Figur 12 - Motorhus (Hentet fra https://discourse.odriverobotics.com/t/nema-enclosures-for-d5065-and-d6374-motors/830)</p>
1	Driver	ODrive V3.6	 <p>Figur 13 - Driver (Eget bilde)</p>
1	Driverhus	3D-printes fra tilgjengelig modell	 <p>Figur 14 - Driverhus (Hentet fra https://www.thingiverse.com/thing:3486256)</p>

2	End caps	Tegnes og 3D-printes	 <p><i>Figur 15 - End caps (Hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)</i></p>
1	Aksel	RS PRO Stainless Steel Round Tube, 150mm Length, Dia. 20mm	 <p><i>Figur 16 - Aksel (Hentet fra egen modell)</i></p>
1	Encoder	ODrive (følger med motor)	 <p><i>Figur 17 - Enkoder (Hentet fra https://odriverobotics.com)</i></p>
2	Vinkelbraketter	Bosch Rexroth Strut Profile Angle Bracket, strut profile 20mm, 40 mm Groove Size 6 mm	 <p><i>Figur 18 - Vinkelbraketter (Hentet fra no.rs-online.com)</i></p>

1	T-slot muttere og skruer	Bosch Rexroth Strut Profile Sliding Element, strut profile 20 mm, Groove Size 6mm	 <p><i>Figur 19 - T-slot mutter og skrue (Hentet fra no.rs-online.com)</i></p>
1	Hus til reimdrift, motor og driver	Tegnes og 3D-printes	 <p><i>Figur 20 - Skall (Hentet fra egen modell)</i></p>
1	Kobling mellom aksling og alu. profil (lagerhus)	Tegnes og 3D-printes	 <p><i>Figur 21 - Lagerhus (Hentet fra modell av Paul Steffen Kleppe)</i></p>

1	Reim	Tegnes og 3D-printes	 <p data-bbox="1084 632 1463 659"><i>Figur 22 - Reim (Hentet fra egen modell)</i></p>
1	Reimfeste aksel	Tegnes og 3D-printes	 <p data-bbox="1062 1115 1482 1182"><i>Figur 23 - Reimfeste til aksel (Hentet fra egen modell)</i></p>
1	Reimfeste motor	Tegnes og 3D-printes	 <p data-bbox="1062 1640 1482 1707"><i>Figur 24 - Reimfeste til motor (Hentet fra egen modell)</i></p>

1	Bord-feste	Tegnes og 3D-printes	 Figur 25 - Bord-feste (Hentet fra egen modell)
---	------------	----------------------	---

Tabell 2 - Stykkeliste motorisert skanner

Utvikling av deler som skal modelleres

Som stykkelisten viser ble det bestemt at det var mest hensiktsmessig å modellere og printe noen av delene til skanneren. Nedenfor beskrives utformingen av disse og hvorfor de ble modellert i motsetning til å bestille standardkomponenter.

Motorhus

Motorhuset printes fra 3D-modell tilgjengelig gjennom oDrives ressurser på nett. Ettersom modellen har blitt brukt av en rekke brukere tidligere har den blitt tilpasset i henhold til toleranser og det vil være lavere risiko for feilprint. Motorhuset har en flens på en side for å kunne feste motoren. Flensen festes via skruer, som det er planlagt for gjennom hull på både flens og motorhusets hoveddel. Figur 26 nedenfor viser hvordan motorhuset vil se ut når motoren er plassert.



Figur 26 - Motorhus med forenklet motor (Hentet fra egen modell)

Driverhus

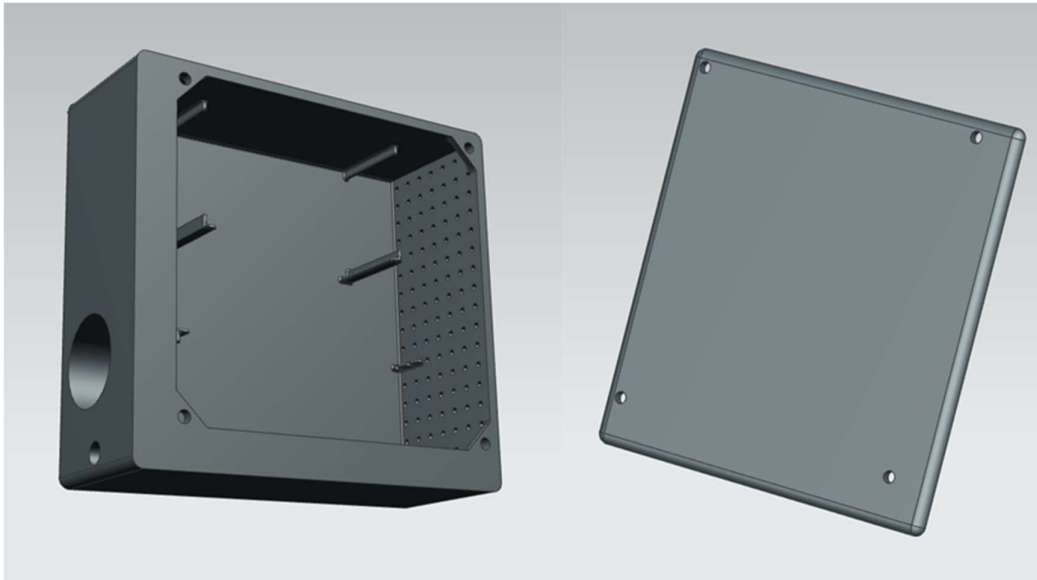
Driverhuset hentes også fra en tilgjengelig modell på nettet. I motsetning til motorhuset derimot, er driverhuset hentet fra thingiverse, som er en side hvor hvem som helst kan laste opp prosjektene sine. Denne modellen er derfor ikke støttet av oDrive, så det er høyere risiko for at modellen ikke passer like godt som motorhuset. Funksjonen med driverhuset er å holde driveren på plass og passe på at vitale komponenter ikke blir skadd. Driverhuset har hull som tillater sikkert feste til skallet.

Endedeksel

For å unngå skader på de skarpe aluminiumskantene, modelleres *end caps* som passer til hullet i midten av aluminiumsprofilene. I tillegg til sikkerheten, tilfører de også til skannerens estetiske aspekt samt sikkerhet, ettersom kantene er skarpe.

Skall – Hus til reimdrift, motor og driver

For å holde de ikke-bevegelige gjenstandene på plass under omdreining, modelleres et skall. Skallet må kartlegge hvor de forskjellige delene skal ligge, integrere løsninger som fester komponentene til skallet og være sterkt nok til å fungere som både bord-feste og holde igjen kreftene fra motoren. Figur 27 viser den første modellen som ble utviklet ut ifra målsetningene beskrevet ovenfor.

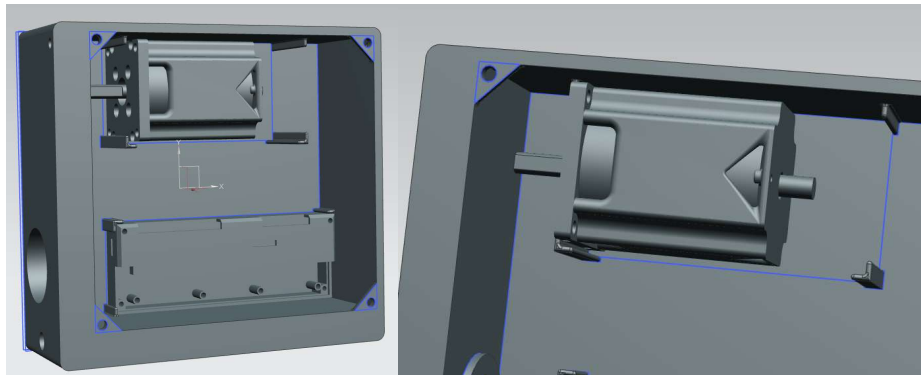


Figur 27 - Første modell av skall (Hentet fra egen modell)

Etter konsultasjon med veileder ble en rekke endringer foreslått:

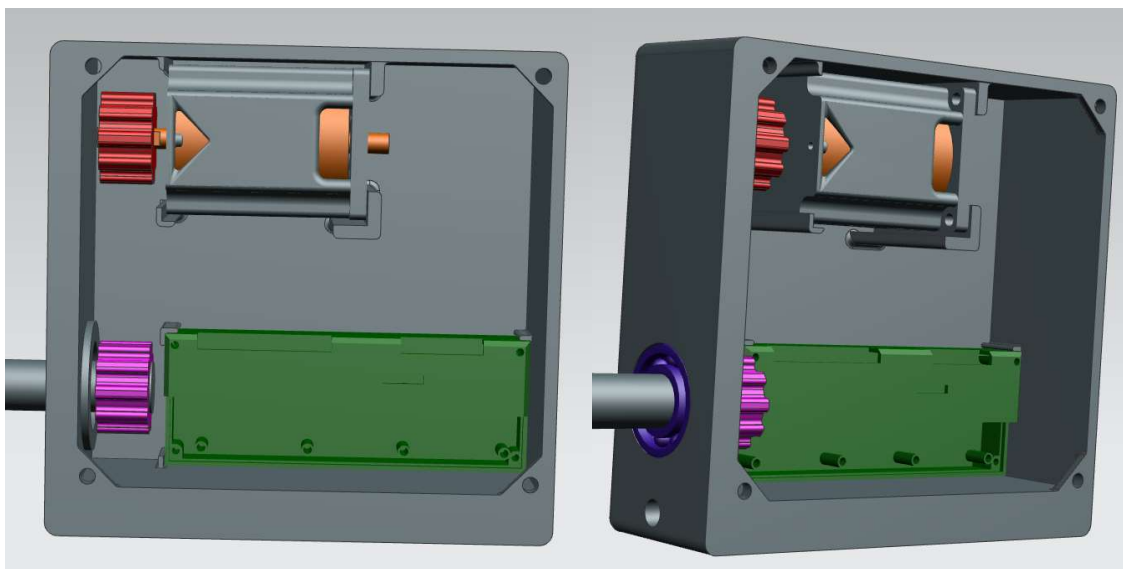
1. Modellen er stor med lang ventetid, så områder som ikke er essensielle for styrke eller andre formål burde kuttes ut
2. Legge inne modeller av komponentene som skal inn i skallet for å sjekke at målene stemmer
3. Feste: Det er ingenting som holder delene på plass horisontalt i skallet

Forslagene avdekket en rekke feil av målene i skallet, blant annet dimensjonene til motor og motorhus, som avbildet i figur 28 nedenfor.



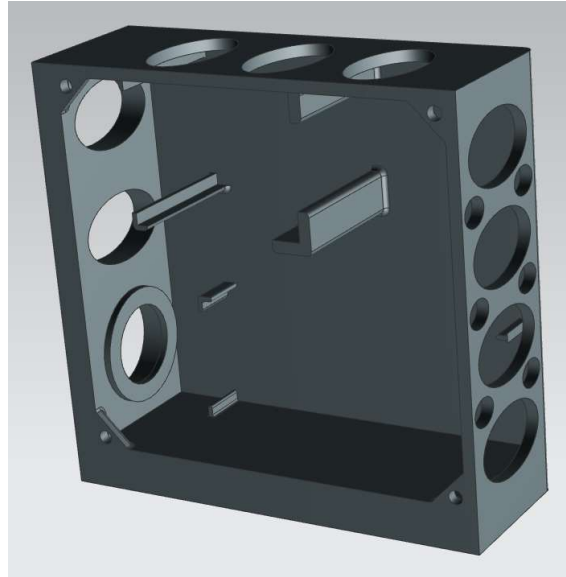
Figur 28 - Feil mål i skallet (Hentet fra egen modell)

Videre gav sammenstilling av modellen et tydeligere bilde av detaljer som måtte endres eller justeres. Som i andre prosjekt resulterte den digitale tvillingen i bedre oversikt og senket risiko for feilprint (se figur 29).



Figur 29 - Digital tvilling av motorisert skanner (Hentet fra egen modell)

Til slutt måtte modellen effektiviseres i henhold til bruk av materiale. Figur 27 viser at den første modellen hadde en rekke mindre hull i den ene vegg. Hovedformålet med disse var lufting til komponentene ettersom konsultasjon med automasjonsstudenten Magnus Kvendseth Øye fastslo at det ikke var behov for vifter i driverhuset på grunn av lav sjanse for overoppheting, og at lufting i skallet ville være tilstrekkelig. Under møte med veileder Paul Steffen Kleppe ble det foreslått å forstørre hullene og implementere de på flere vegger for å minske bruk av materiale. Figur 30 nedenfor avbilder forbedret skall.



Figur 30 - Forbedret skall til motorisert skanner (Hentet fra egen modell)

Kobling mellom aksling og alu. profil (lagerhus)

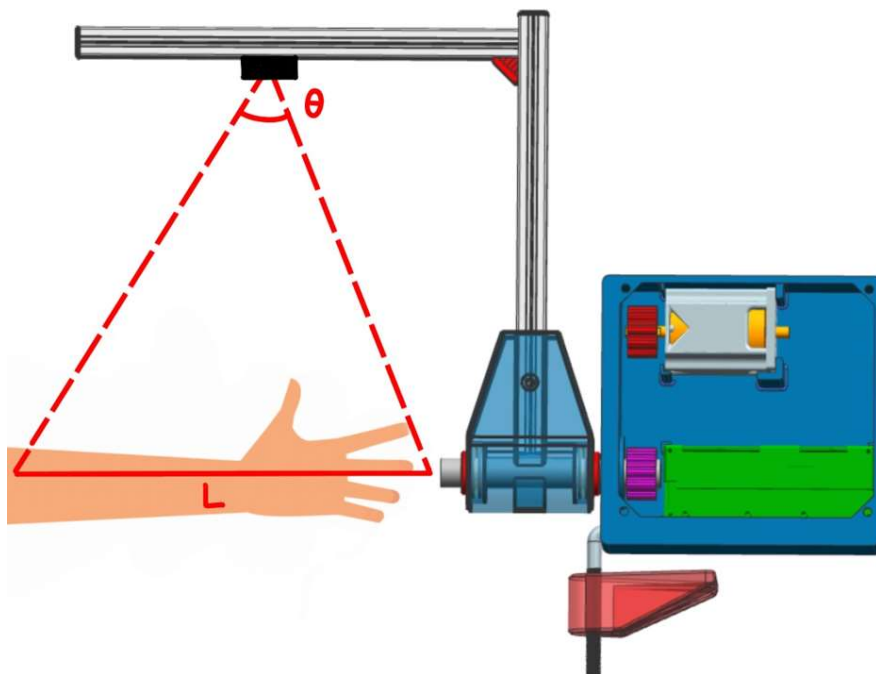
Koblingen er den samme som ble brukt i utviklingen av bordskanneren. Etersom armen er av samme dimensjoner, trenger ikke koblingen å dimensjoneres om igjen.

Reim, reimfeste aksel og reimfeste motor

Komponenter til reimdrift er tilgjengelig og rimelig, men reime og reimfeste 3D-printes som et forsøk på produksjon av reimdrift kun ved hjelp av additiv tilvirkning. Tidligere har additiv tilvirkning vært mest brukt for hurtig prototyping på grunn av ryktet om at produktene har lav styrke, men industrien har beveget seg forbi prototyping og tilvirkningsmetoden blir hyppigere brukt som et produksjonsalternativ. For reimen brukes et elastisk TPU filament og for festene blir PLA brukt. Tennene på reimen blir relativt store i forhold til hva som er vanlig på slike drivreimer fordi det er usikkert hvordan 3D-printeren vil håndtere mindre profiler, samt hvor mye elastisitet som vil være riktig for de relevante dimensjonene. Reimen skrives ut i en sirkel for å oppnå et mer isotropisk produkt.

Dimensjonering av skannerarm

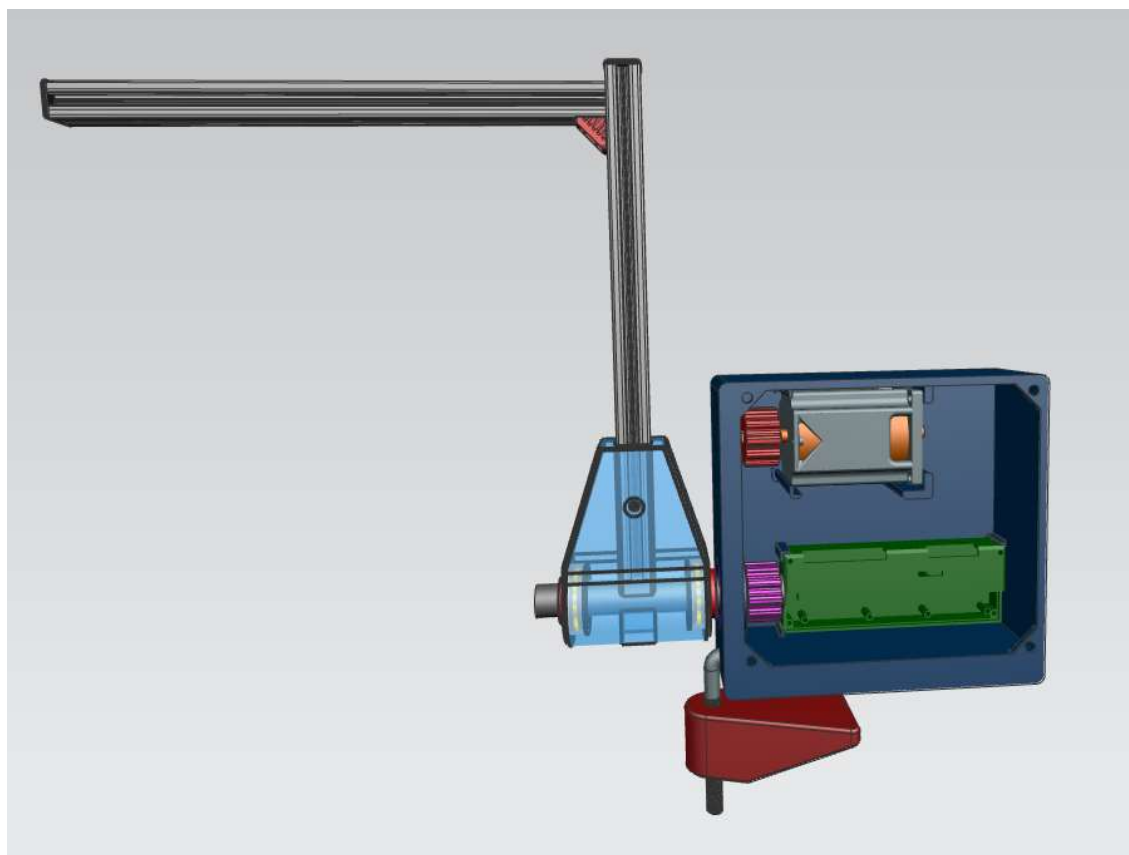
For å bestemme dimensjonene på skannerarmen ble gjennomsnittshøyden i Norge brukt, som ligger på rundt 175 cm. Det er et matematisk lineært forhold mellom lengden på ulna/radius hos et menneske, og den personens høyde (Celbis & Agritmis, 2006). En høyde på 175 cm tilsier ulna/radius lengde på ca. 30 cm. Etersom halve denne lengden ikke vil bli brukt, men heller hånden og fingrene er mer relevante kan en anta at et område på 30 cm som innhenter data vil være tilstrekkelig.



Figur 31 - Dimensjonering av skannerarm (Eget bilde)

Sammenstilling av motorisert skanner

Figur 32 viser det endelige konseptet av den motoriserte skanneren.

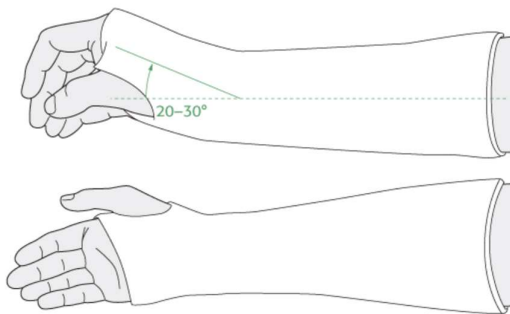


Figur 32 - Sammenstilling av motorisert skanner med og uten topplate (Hentet fra egen modell)

3.1.3 Positur av håndleddet under skanning

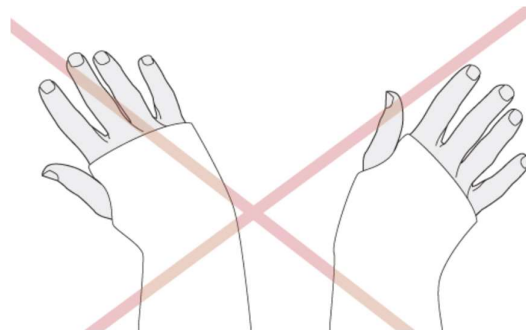
I oppgaven utarbeidet av Thorsen og Gya er det satt en rekke krav til hvordan et håndleddsbrudd skal posisjoneres for best og raskest legning. Ettersom det stilles krav til posituren av håndleddet i protesen er det viktig at skanneren tilrettelegger for at disse kravene blir møtt. For referanse og videre forståelse av oppgavens videre arbeid beskrives de samme kravene nedenfor.

1. Håndflaten skal ha en 20-30 grader vinkel for best legning



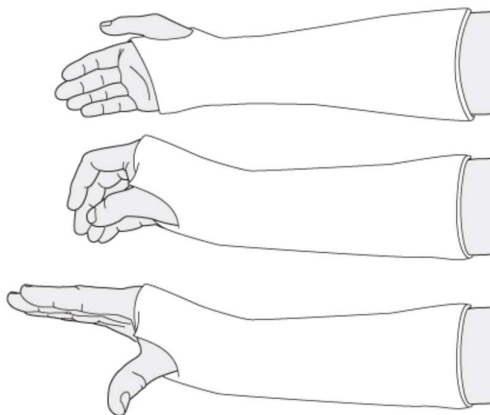
Figur 33 – Positur håndflate (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])

2. Håndleddet skal være rett



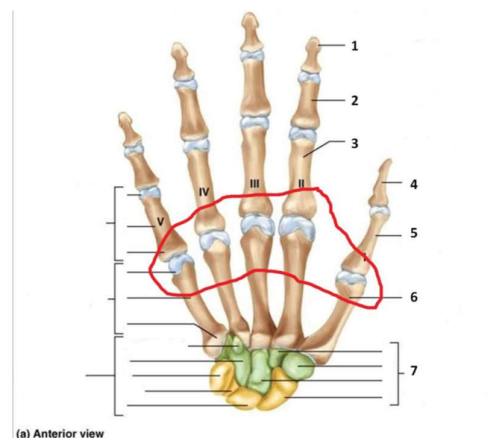
Figur 34 – Positur håndledd (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])

3. Tommelen skal ha fri bevegelse



Figur 35 – Positur tommel (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])

4. Ingen gips etter metacarpophalangeal-leddet for bevegelse av fingrene



Figur 36 - Metacarpophalangeal-leddet (Hentet fra Thorsen & Gya [2018])

3.2 3D-skanning

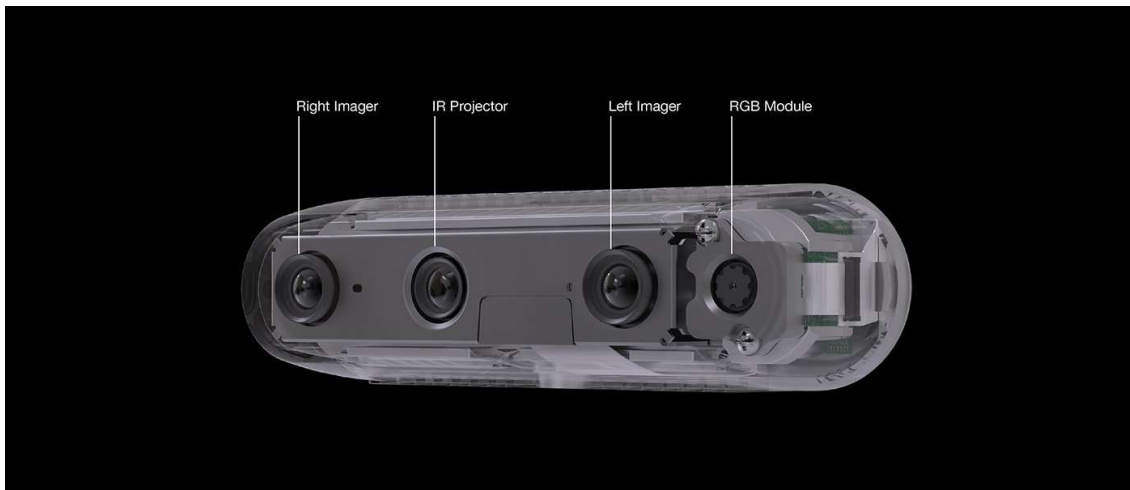
For å se hvordan teknologien ligger an i henhold til skanning i praksis sammenliknes produkter til både profesjonelt og personlig bruk. For maskinvare fra den profesjonelle siden har kameraet RealSense D435 fra Intel blitt valgt ut med grunnlag i tidligere kjennskap til produktet fra personell

ved universitetet, og en kamerasystemet Apple TrueDepth, tilgjengelig på modeller fra og med iPhone X, har blitt valgt som produktet som representerer personlig bruk.

Videre er det også viktig å velge gode programvarer som skal bearbeide data fra maskinvaren og danne en punktsky. For å supplere kameraet fra Intel var det en rekke programvarer som var reelle. Disse inkluderte LIPScan, 3Dot og RecFusion, hvorav alle ble nevnt spesifikt for 3D-skanning på Intel sine hjemmesider. For skanning via iPhone kameraet var det også flere applikasjoner som var tilgjengelige fra tredjeparti-utviklere på AppStore. Per dags dato, 11.05.20, er det 9 tilgjengelige applikasjoner til 3D-skanning, hvorav alle er gratis. Applikasjonen med høyest vurdering fra brukere er Scandy Pro 3D Skanner.

3.2.1 Maskinvare

Intel RealSense Depth Camera D435



Figur 37 - Intel RealSense Depth Camera D435 (Hentet fra <https://intelrealsense.com>)

Dybdekameraet fra Intel bruker flere kamera og sensorer for å skape en *stereo* effekt. Enheten inkluderer to kamera, en *infrarød sensor* for dybdemåling og en *RGB-sensor* for å fange opp fargeprofilene i omgivelsene beskrevet av kameraene (Intel Corporation). RealSense D435 er en sofistikert ToF sensor ettersom den benytter infrarøde lysbølger for å kartlegge dybde. Se vedlegg 8.2 mer detaljert oversikt av komponentene i dybdekameraet.

Apple TrueDepth

Apple Inc. har innført dybdekamera i sine nyere smarttelefoner, med et komplekst sensorsystem som erstatter fingeravtrykksensor. Firmaet mener at ansiktsgjenkjenning med TrueDepth (kalt Face ID) er sikrere enn fingeravtrykksmåleren, og benytter systemet til godkjenning via Apple Pay for betaling (Cardinal, 2017). Figur 38 viser maskinvaren som utgjør TrueDepth kamerasystemet.



Figur 38 - Maskinvare til Apple's TrueDepth kamerasystem (Hentet fra <https://www.extremetech.com/mobile/255771-apple-iphone-x-truedepth-camera-works>)

3.2.2 Programvarer

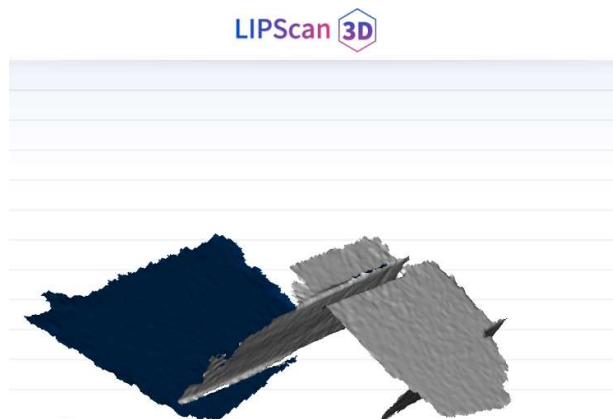
LIPScan

To skanner ble utført med denne programvaren; en skann av en boks og en skann av en mandarin. Resultatet varierte, programmet hadde spesielt mye problemer med å hente inn data om hjørnene av boksen, som resulterte i et system av flater uten mye systematikk (se figur 40).

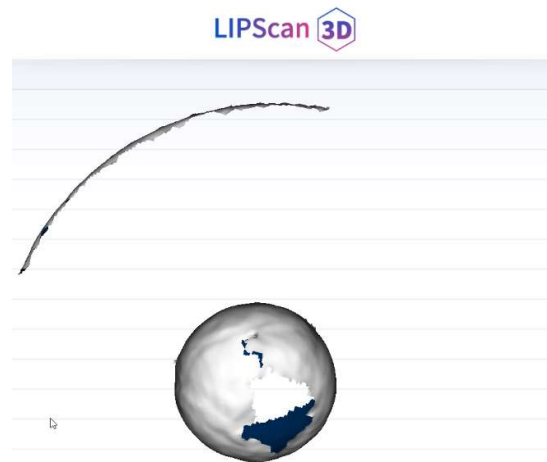
Skanning av en mandarin gav bedre resultater, og førte til en mer komplett punktsky. Punktskyen ble relativt detaljert i de fleste områdene, men som vist i figur 39 var det fortsatt mangler ved skannen.

RecFusion

Den andre programvaren som gav resultater ved skanning, var RecFusion. Programvaren har mange innstillinger for optimalisering av skann, men etter omfattende testing kom det frem at skanning ikke kunne utføres nærmere enn 1 meter. Intel hevder at RealSense D435 har en rekkevidde som kan skanne fra 0.1 meter til 10 meter (Intel Corporation), men det var ikke tilfelle med denne programvaren. Det er usikkert om det er kameraet, programvaren eller en kombinasjon som resulterte i få muligheter for rekkevidde.



Figur 40 - Skann av boks ved bruk av LIPScan (Eget bilde)



Figur 39 - Skann av mandarin ved bruk av LIPScan (Eget bilde)

Utfordringen ved å benytte RecFusion er optimalisering av funksjonene som settes i forkant av skanning. For å produsere et godt skann burde *Rec FPS* være over 10 (ImFusion GmbH). Denne verdien baseres på PC-ens *GPU*, som betyr at PC-en må ha et grafikkort. Under testing ble skanning prøvd på en PC uten grafikkort, som resulterte i en *rec FPS* på mellom 2.3 og 2.7. Ved testing på PC med grafikkortet lå *rec FPS* på rundt 20. For å kunne skanner måtte også en driver lastes ned. Videre betyr det at PC-en brukt til skanning på sykehuset ved bruk av Intel RealSense kamera vil ha kapasitetskrav.

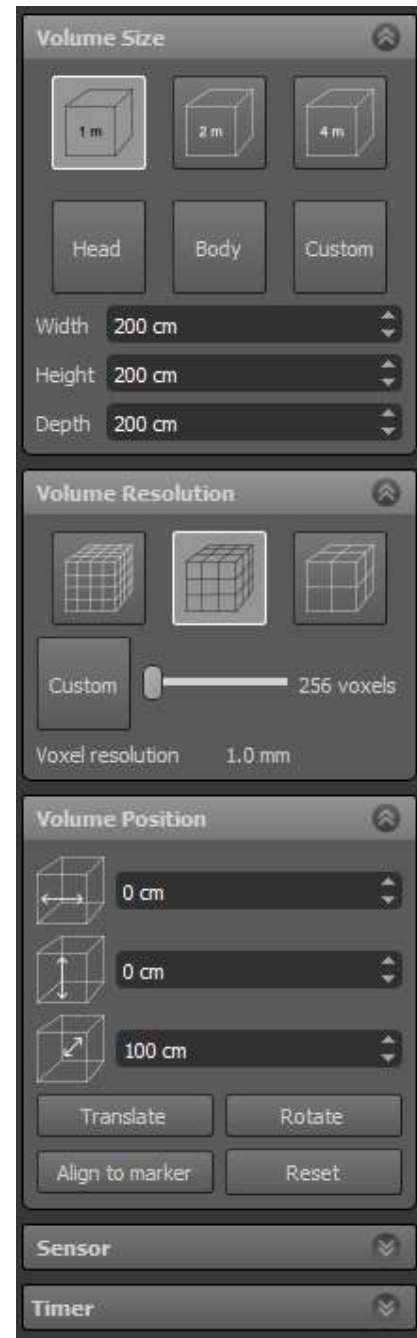
RecFusion er ikke en gratis programvare, og selv om det går an å laste ned programmet og teste skanning, må programvaren kjøpes for å kunne lagre filene. Testing ble utført for å evaluere programvarens funksjonalitet, men videre utvikling av modellene ble ikke gjort.

Figur 41 til høyre viser diverse innstillinger tilgjengelig i menyen til RecFusion. Menyene muliggjør minskning av støy og uønskede datapunkter ved å lage en ramme for dybde og høyde (Volume Position) hvor objektet som skal skannes ligger inni. Testing derimot viste at selv om prinsippet av denne boksen var lurt, var det en viss avstand som gav best skannedata, og boksen var derfor triviell til en viss grad. Videre er det også mulig å endre oppløsningen på skannet (Volume Resolution), som vil minske volum av data og prosesseringstid, men senke detaljnivået. Dette er bare noen få av innstillingene som er tilgjengelig og nødvendig å benytte for å skanne, som gjøre programmet til et mindre brukervennlig alternativ.

De forskjellige innstillingene ble utforsket i en rekke skanner, med endringer i antall *voxler* for å se hvordan dette påvirket kvaliteten på punktskyen.

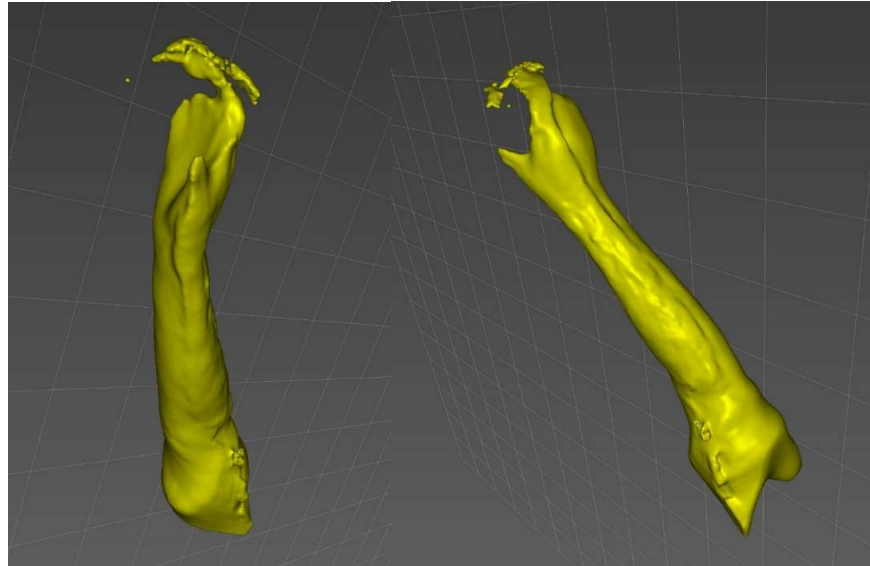
Skann 1 – 512 voxler

Figur 42 viser resultatet fra skann med Intel RealSense D435 og RecFusion med 512 voxler. Det er mulig å velge mellom 64 og 768 voxler. Denne skannen er derfor av høyere kvalitet. Den fysiske skanneren var rundt 2 meter unna hånden som ble skannet ettersom programvaren viste, via et



Figur 41 - RecFusion meny (Eget bilde)

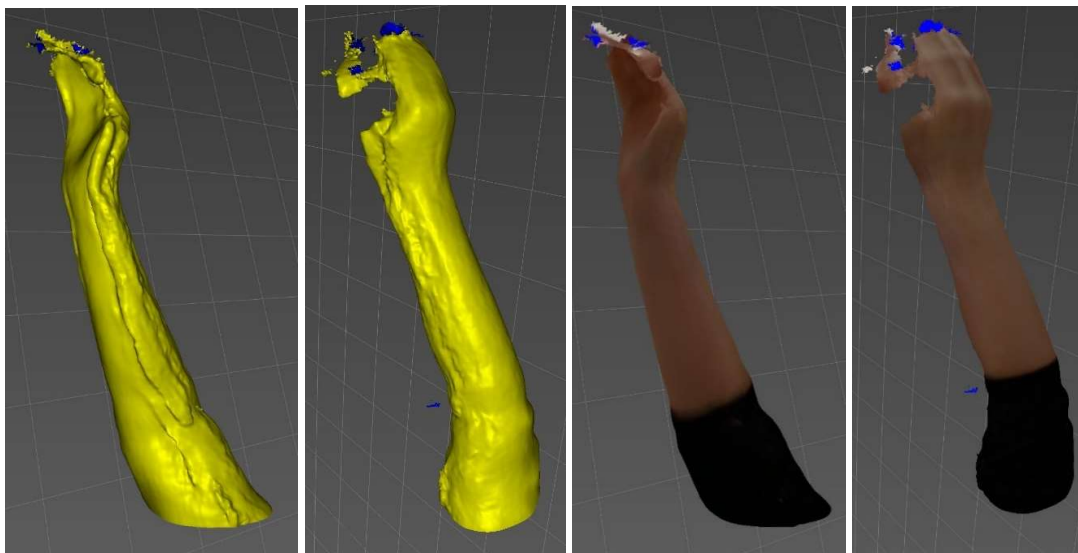
sanntids fargekart, at denne distansen gav best detaljer. Som figuren viser er det områder på armen som ikke er konsekvente med kurvene på en arm.



Figur 42 - Skann 1 med Intel RealSense D435 og RecFusion (Egne bilder)

Skann 2 – 704 voxler

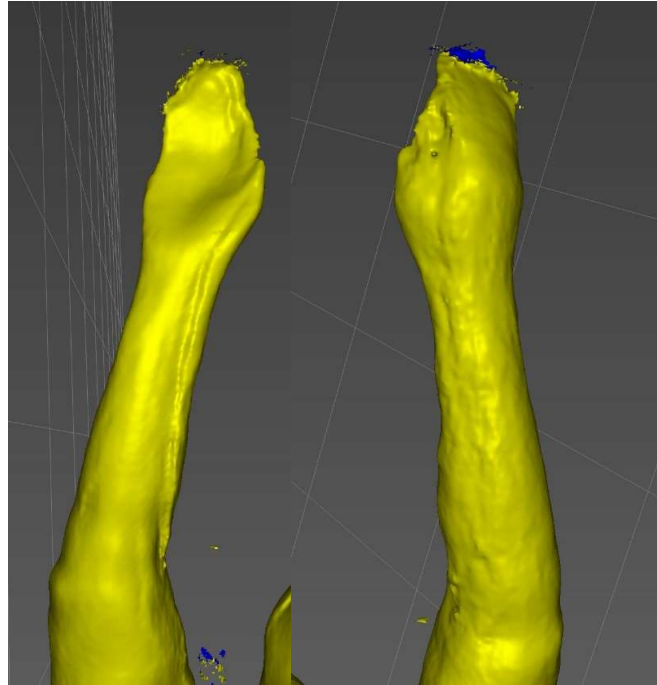
Ettersom høyere oppløsning krever mer prosesseringskapasitet var det ikke mulig å utføre et skann med 768 voxler på PC-en som ble brukt. Det høyeste antallet voxler for skanning ble funnet til å være 704, med resultatet vist i figur 43. Figuren viser to forskjellige gjengivelsesmoduser; til venstre er punktskyen med en enkelt farge for fremhevning av konturer, og til høyre er modellen avbildet med fargene kameraet og RGB sensoren har plukket opp.



Figur 43 - Skann 2 med Intel RealSense D435 og RecFusion (Egne bilder)

Skann 3 – 704 piksler (Fokus på lav bevegelse)

En siste skann ble utført med fokus på lite bevegelse i hånden under rotering. Figur 44 viser hvordan dette forbedret nøyaktigheten til skannet. Topografien langs armen er mer dempet og ligner en mer naturlig kurve.



Figur 44 - Skann 3 med Intel RealSense D435 og RecFusion

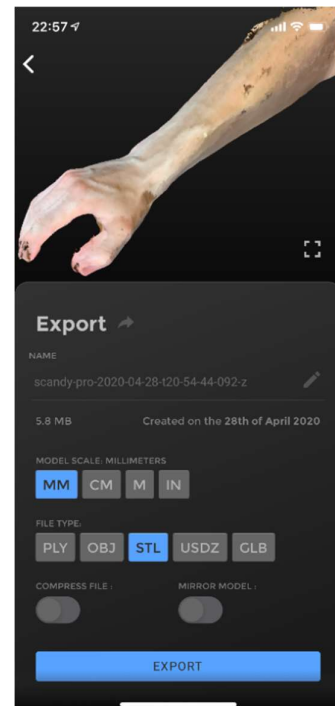
Totalt sett ser en ikke stor forskjell mellom et skann med 512 voxler og et med 704 voxler. Skann 2 har mer detaljerte konturer, men siden begge resulterte i skanner med tendenser til unaturlige konturer er denne nøyaktigheten triviell i det store bildet. En mer bemerkelsesverdig forskjell ser vi når det er fokus på holde armen stille. Videre kan dette peke til en mulig forbedring i kvaliteten på skannet dersom hånden hadde vært statisk under skanning og det var kameraet som ble forflyttet rundt hånden.

En viktig deviasjon i skanner med Intel RealSense D435 kamera og RecFusion er mangelen på en definert tommel. Ingen av forsøkene produserte en tommel av tilstrekkelig kvalitet. Dette er viktig fordi protesen skal gå mellom tommelen og pekefingeren, så dette området må kartlegges under skanning.

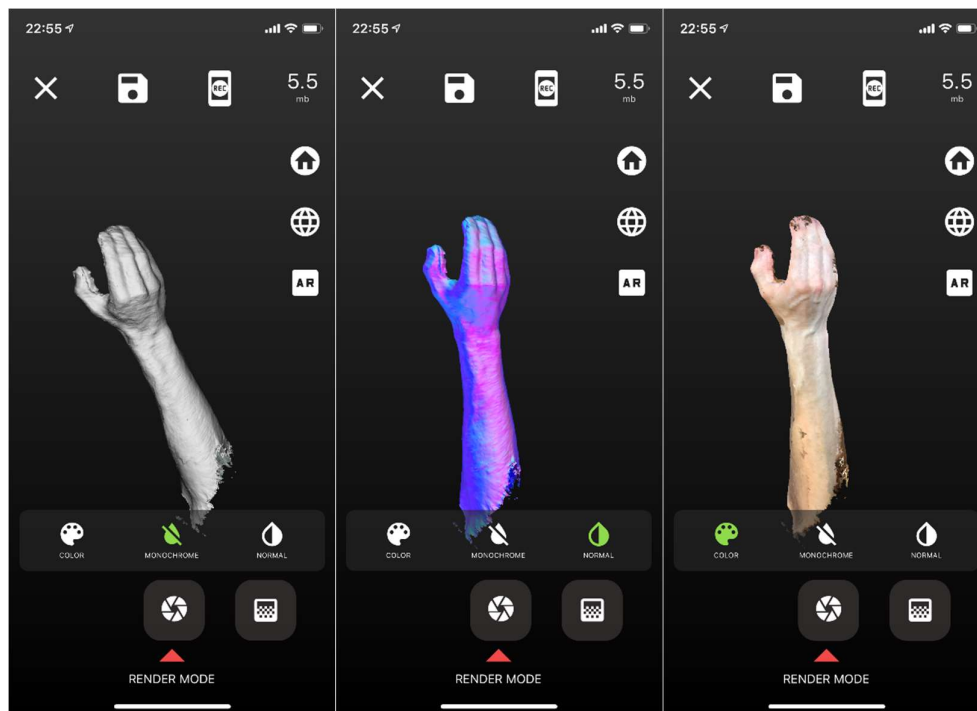
Scandy Pro 3D Skanner

Applikasjonen Scandy Pro 3D Skanner («Scandy Pro») brukes med iPhone til å produsere punkttskyer. Fordeler med applikasjonen inkluderer funksjonen «clean up», som er et effektivt verktøy for å fjerne støy i punkttskyen. Videre er det også en enkel prosess å sende punkttskyen i et ønsket filformat (Se figur 45) via et variert utvalg av plattformer (For eksempel e-post, OneDrive, Dropbox). Programvaren har også ulike gjengivelsesmoduser, som RecFusion, inkludert «monochrome» (svart-hvitt), «normal» (farger som uthever konturer) og «color» (farger som er plukket opp fra kameraet), se figur 46 for å se hvordan disse ser ut. Alle gjengivelsesmodusene viser ulike avvik i skannen som hjelper med å analysere kvaliteten av den gitte skannen.

Figurene 45 og 46 avbilder nøyaktigheten av skanner tatt via Scandy Pro. Skann tatt med iPhone og nevnt programvare resulterer i nøyaktige punkttskyer med konturer fra både muskler og blodårer. Området mellom tommel og pekefinger er også med i detalj. Grunnet den høye kvaliteten på scannet vil denne kombinasjonen bli brukt videre for bruk ved 3D-modellering av protese.



Figur 45 - Eksporteringsmuligheter til Scandy Pro (Eget bilde)



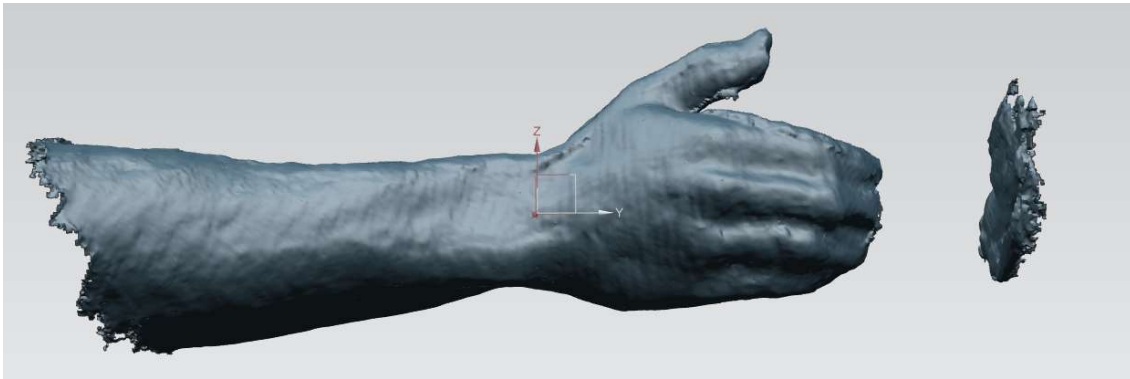
Figur 46 - Forskjellige gjengivelsesmoduser i Scandy Pro (Eget bilde)

3.2.3 Kvalitetstesting av skannemetoder

For å se hvordan innhenting av data varierer med henhold til referansepunkter og belysning ble en rekke tester gjort. Teorien tilsier at belysning er spesielt viktig ved bruk av fotogrammetri og strukturert lysskanning. Kerasystemene fra Intel og Apple bruker begge infrarøde ståler for å bestemme dybde, men er fortsatt avhengige av synlig lys for å danne punkttskyene. Testene vil avgjøre til hvilken grad lys påvirker kvaliteten på et skann. For utførelse av skanningen ble bordskanneren brukt ved manuell rotasjon rundt armen.

Ordinær

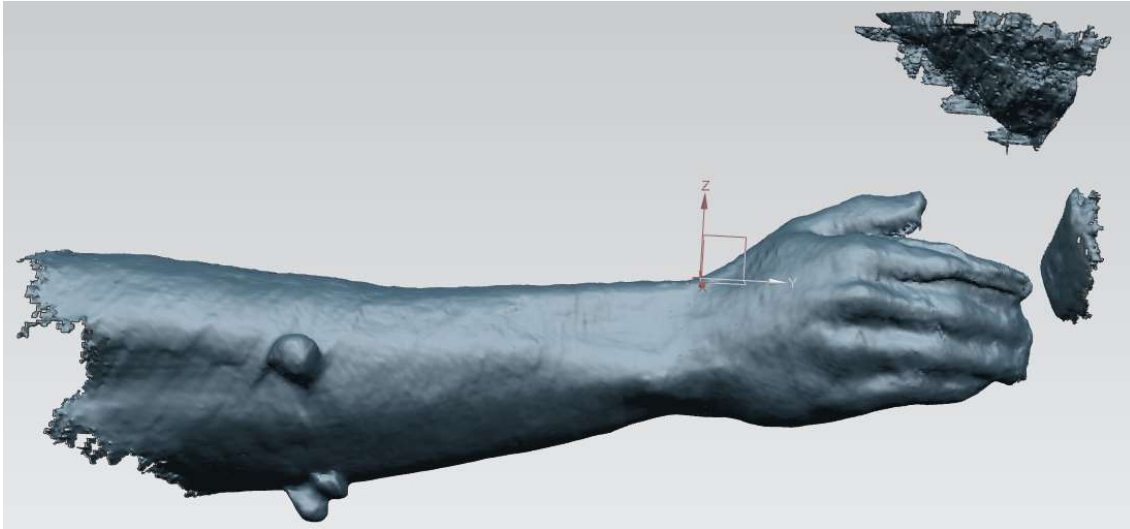
For å kunne sammenlikne hvordan de forskjellige faktorene påvirker skanningen ble et ordinært skann produsert først. Her ble det ikke brukt referansepunkter eller ekstra lys. Omgivelsene hadde relativt lite belysning uten noe naturlig lys. Figur 47 viser resultatet av den ordinære skannen.



Figur 47 – Ordinær skann fra Scandy Pro (Eget bilde)

Skann med referansepunkter

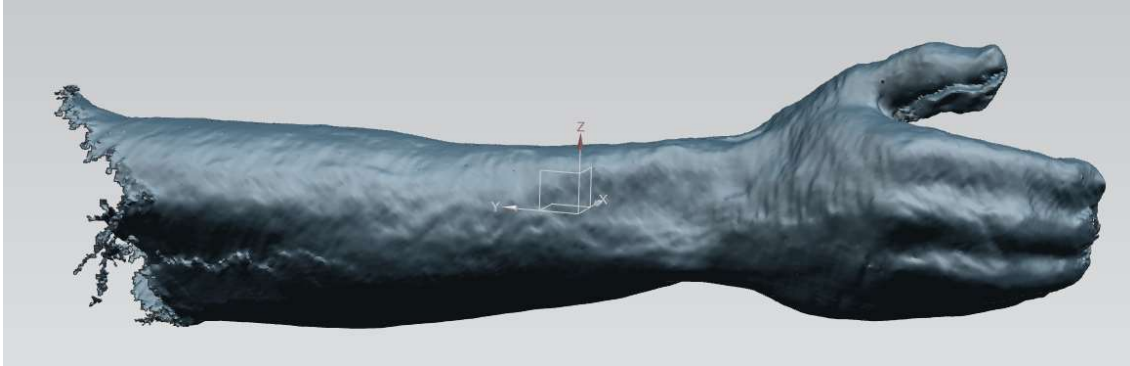
Historisk sett har bruk av referansepunkter vært svært utbredt i 3D-skanning. Dette kommer av at programvaren noen ganger har problemer med å vite hvor skanneren er i forhold til objektet, og for å kunne fortsette å hente inn data til riktig plass brukes derfor referansepunkter for at skanneren skal hente seg inn dersom den mister plasseringen sin. Referansepunkter må være tredimensjonale, og fungerer best dersom det til enhver tid er tre synlige referansepunkter som plukkes opp av skanneren (B3D S.C.). Referansepunktene i dette tilfelle er sammenrullet teip for feste og volum. Figur 48 viser resultatet av skann med referansepunkter. Referansepunktene var ikke plassert slik at tre var synlig til et hvert tidspunkt, men under skanning var det tydelig at den mistet posisjonen sin minder, og det var derfor mulig å fullføre skanningen hurtigere enn ved den ordinære skannen. Dersom referansepunkter skal implementeres som en del av prosedyren må de ikke plasseres i et område hvor protesen skal legges, ettersom dette vil påvirke utforming av protesen ved at den antar formene som en del av armen.



Figur 48 - Skann med referansepunkter fra Scandy Pro (Eget bilde)

Skann med lav økning i lysstyrke

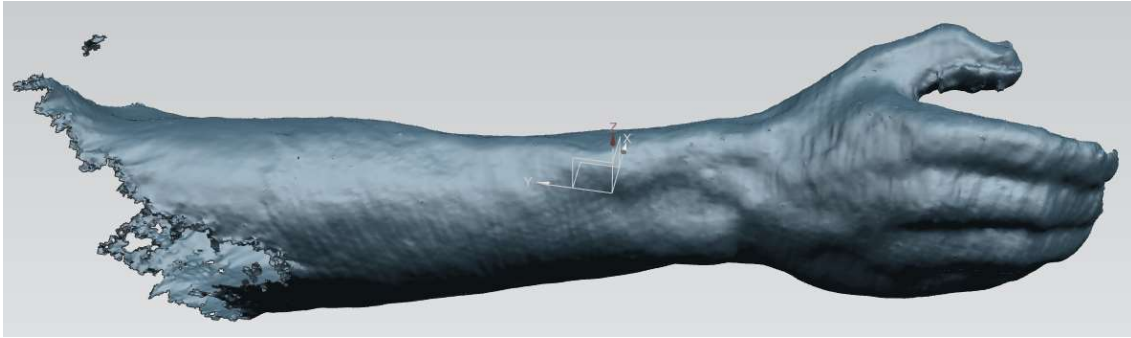
For å teste hvordan belysning påvirket resultatet ble en smarttelefon med justerbar blits festet ved siden av den eksisterende telefonen som skannet armen. I dette tilfellet var blitsen på den laveste styrken. Figur 49 nedenfor viser resultatet. Det er tilsynelatende lite forskjell mellom denne skannen og den ordinære skannen.



Figur 49 - Skann med lav økning i lysstyrke fra Scandy Pro (Eget bilde)

Skann med sterk økning i lysstyrke

Her ble blitsen satt til den sterkeste innstillingen. Figur 50 avbilder resultatet, som viser lite endring i kvalitet.



Figur 50 - Skann med sterk økning i lysstyrke i Scandy Pro (Eget bilde)

Totalt sett er det små endringer i resultatene. Tidsbesparinger ved implementering av referansepunkter er tapt i tiden det tar å sette på og ta av punktene, og kvaliteten er ikke nødvendigvis bedre eller verre enn den ordinære. I skann med sterk belysning og den ordinære skannen er konturer rundt blodårer mer synlig, men dette kan komme av plassering av armen.

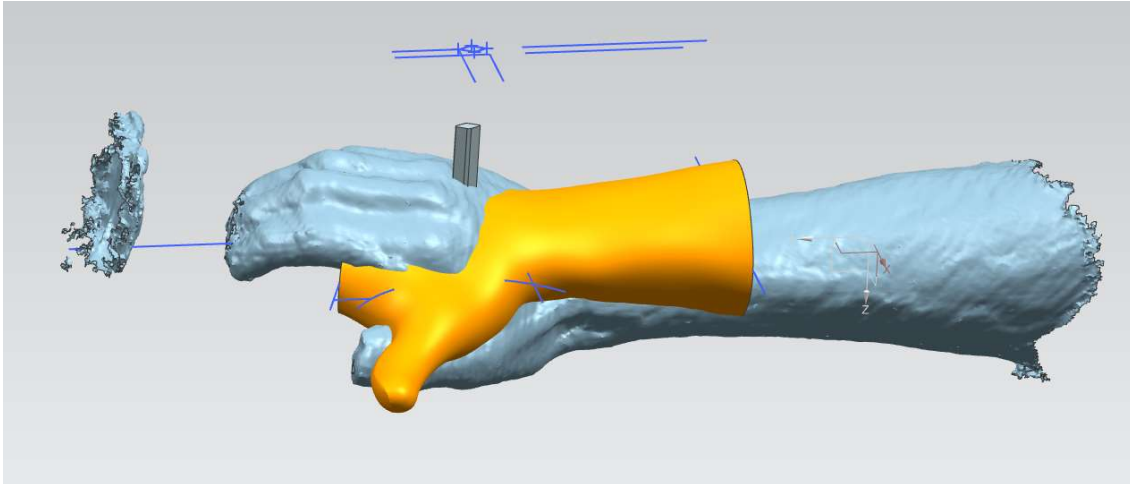
3.4 Utvikling av protese

For å utvikle protesen blir resultatet fra den ordinære skannen med Scandy Pro, vist i figur 47, brukt videre. Modelleringsprosessen må innebære en rekke kommandoer som kan brukes universalt uavhengig av størrelsen og utformingen på hånden som blir skannet, med andre ord på det utvikles en oppskrift til å skape protesen.

3.4.1 Testing av 2019 gipsgenerator med skann

Oppgaven som ble utført i 2019 produserte en gipsgenerator som skulle skape protese ved å legge inn et skann av en hånd. Kandidatene hadde ikke en skanner tilgjengelig som kunne produsere et resultat av god nok kvalitet, så generatoren tar utgangspunkt i en generisk modell.

I år har flere skanner av høy kvalitet blitt produsert gjennom dette prosjektet, og det er derfor mulig å teste generatoren. Figur 51 nedenfor viser hvordan generatoren ser ut med innlagt skann.



Figur 51 - Gipsgenerator med rå skann (Eget bilde)

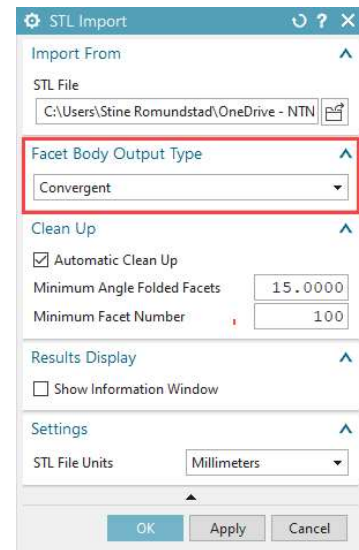
Hovedproblemet med generatoren er en mangel på positur. Generatoren er tilpasset modellen de selv brukte, som ikke tilfredsstillter kravene til positur, og den tillater ikke skann med annen positur. Dersom generatoren hadde vært tilpasset en bedre positur vil den ikke være fleksibel til et spekter av diverse utforminger. Pasienter med behov for protese vil være både små barn og eldre mennesker, og prosessen som skaper protesen må være sensitiv til dette og tilby en løsning som passer like godt til alle. Det vil derfor være behov for å finne en ny løsning på hvordan protesen skal genereres.

3.4.2 Generell «oppskrift»

Det er en rekke funksjoner som må gjennomgås for å skape protesen. Nedenfor er den generelle fremgangsmåten beskrevet i kronologisk rekkefølge.

1. Omgjøring fra *facet body* til *convergent body*

Funksjoner til bruk ved en «facet body» finnes under fanen «polygon modeling», og inkluderer en funksjon som heter «convert facet body». Her kan modellen gjøres om til en «convergent body», som muliggjør bruk av flere funksjoner i programvaren. Fra applikasjonen Scandy Pro blir filen sendt som en *STL-fil (.stl)*, og ved importering av en STL-fil kan man velge at modellen skal gjøres om til «convergent body» direkte (se figur 52) som muliggjør bruk av flere funksjoner i programmet. Som en



Figur 52 - Importering av STL-fil til NX (Eget bilde)

«convergent body» er modellen en sammensetning av trekanter, som på fagspråket blir kalt en «mesh».

2. Isolere området hvor protesen skal ligge

Dette gjøres ved å tegne plan, her tas det utgangspunkt i metoden fra fjorårets hovedoppgave (se figur 53).

Etter disse planene er lagt på plass kan funksjonen «slice» (under polygon modeling) benyttes, som deler opp modellen i snittene laget av planene, og delene som ligger utenfor området kan nå lett slettes. Det som står igjen da et plan med lik geometri som overflaten på hånden som er skannet.

3. Legge tykkelse på overflaten

Det eneste som gjenstår nå er å legge på tykkelse på overflaten.

Dette utføres med funksjonen «thicken». Her er det to ting som er viktig å passe på; at tykkelsen legges utover, så den minste radiusen forblir lik, og at det ikke er områder hvor radius overgår tykkelsen.

Dersom det oppstår en feilmelding som sier at det finnes områder hvor radius er større enn tykkelsen, kan det gjøres et feilsøk ved å dele opp modellen med funksjonen «slice», og prøve å legge på tykkelse til en kommer til det området hvor problemet gjenoppstår.

Essensielle funksjoner i modelleringsverktøyet

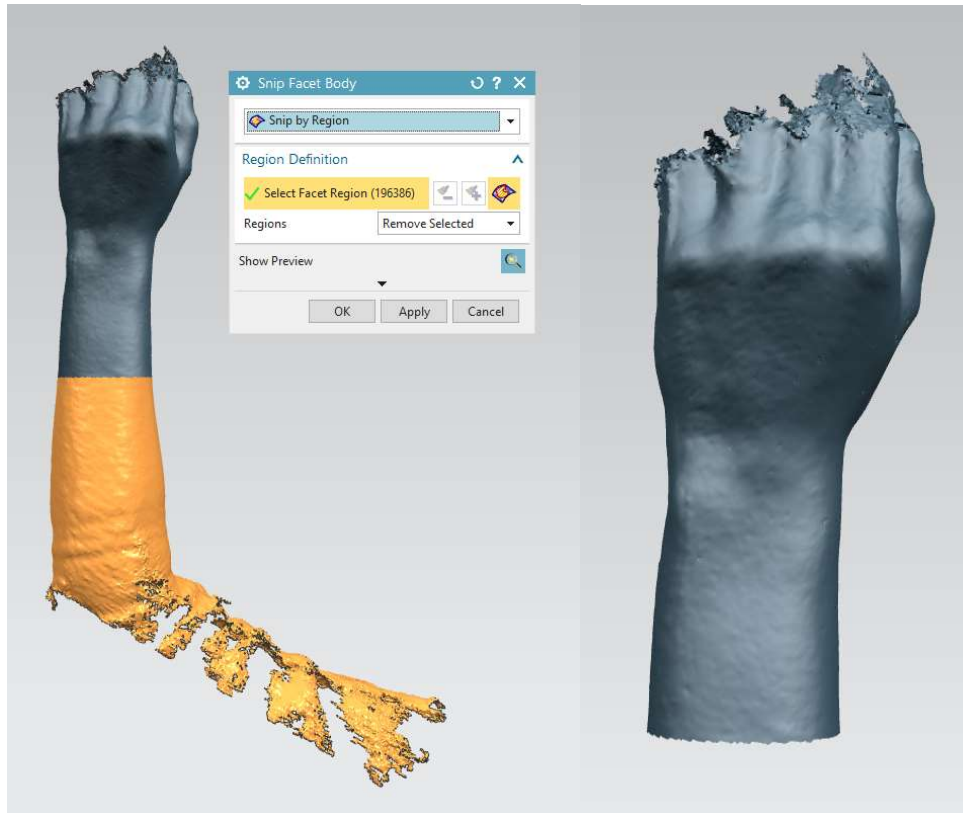
Ettersom skannet inneholder unik geometri med et høyt antall kurver er det få funksjoner i modelleringsverktøyet, Siemens NX, som kan brukes effektivt for å skape en protese med grunnlag i skannet. Menyene som de respektive funksjonene ligger under står i parentes bak navnet på, og de som ligger under Polygon Modeling er funksjoner som ikke legges inn i historietreet, og er derfor irreversible dersom modellen blir lagret.



Figur 53 - Mal for avgrensning av gipsområdet (Hentet fra Sjøstad, Alvestad & Nedrelid)

«Snip» (Cleanup and prepare, polygon modeling)

Snip er et nyttig verktøy for fjerning av uønskede deler. Det er mulig å bruke denne ved blant annet å markere området eller å bruke et plan. For å produsere en protese kan funksjonen brukes for å isolere området hvor protesen skal ligge. Figur 54 viser en rå skann før og etter bruk av snip-funksjonen.



Figur 54 - Rå skann før og etter «Snip» (Egne bilder)

«Smooth» (Cleanup and prepare, polygon modeling)

Denne funksjonen kan brukes til både modellens flater og kanter for å minske defekter og avvik i modellen ved å jevne ut modellen. Ettersom et skann kan være veldig detaljert vil denne funksjonen beholde den viktigste geometrien, men gjøre det enklere for 3D-printeren å lage et godt produkt. Ved bruk av funksjonen snip, som forklart over, vil kantene rundt det avskårne området være ujevnt der trekantene (fra mesh) har blitt fjernet, og bruk av smoothing funksjonen vil disse kantene jevnes ut. Figur 55 viser områdene på et skann som vil jevnes ut med vektøyet (venstre), og hvordan resultatet etter smoothing ser ut (høyre).

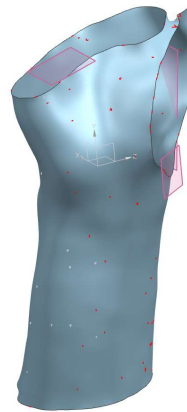
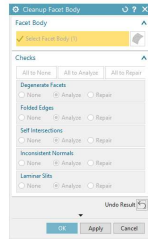


Figur 55 - Skann ved bruk av funksjonen "Smooth" (Egne bilder)

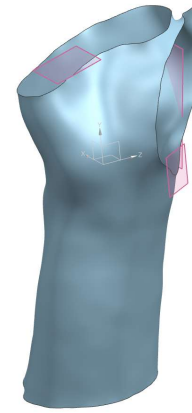
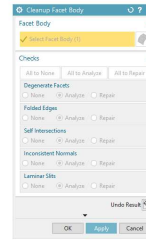
«Cleanup facet body» (Cleanup and prepare, polygon modeling)

For analyse og reparasjon av eventuelle mesh-feil kan funksjonen «cleanup facet body» brukes. Antall feil, samt hvilken type feil det er telles opp for god oversikt, og reparasjonen kan i noen tilfelle kreve flere omganger med reparasjoner, hvor antallet omganger avhenger av skannet. Figur 56 viser hvordan analyse via «cleanup facet body» lokaliserer og uthevet feil (venstre) og hvordan resultatet blir etter reparasjon (høyre).

95 Degenerate Facets
 0 Edges with Folded Facets
 0 Intersection Facets
 0 Inconsistent Normals
 0 Laminar Slits



0 Degenerate Facets
 0 Edges with Folded Facets
 0 Intersection Facets
 0 Inconsistent Normals
 0 Laminar Slits



Figur 56 - Analyse og reparasjon av mesh-feil med "Cleanup facet body" (Egne bilder)

«Adjust minimum radius» (Operations, polygon modeling)

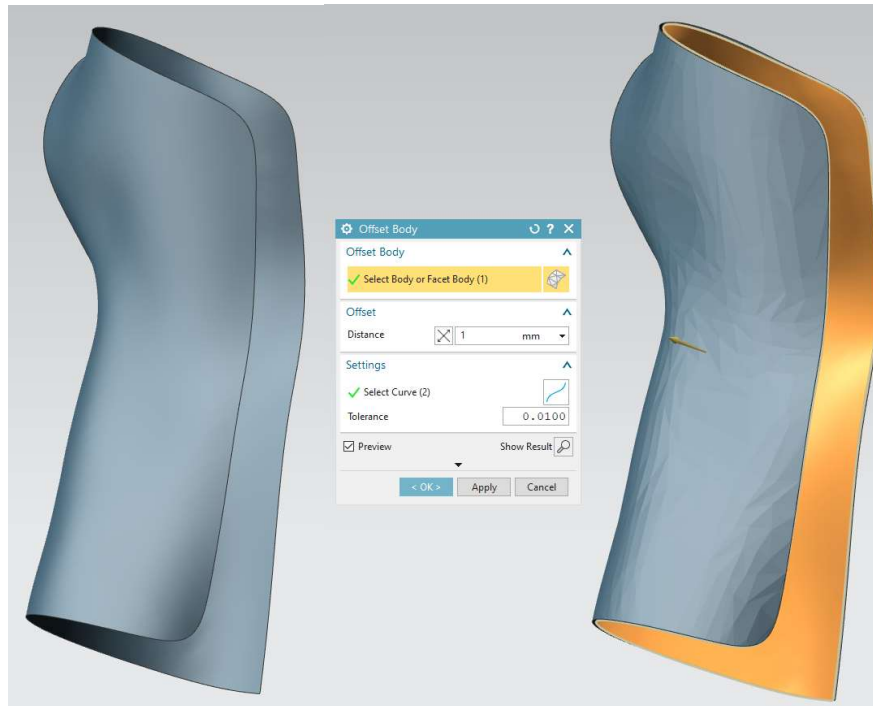
Etttersom posituren på hånden i noen tilfeller kan utheve visse blodårer eller sener, vil funksjonen «adjust minimum radius» kunne jevne ut disse områdene. Figur 57 viser hvordan modellen ser ut før (venstre) og etter (høyre) bruk av verktøyet.



Figur 57 - Før og etter bruk av funksjonen "Adjust minimum radius" (Egne bilder)

«Offset» (Operations, polygon modeling)

Gjennom dagen vil hånden og håndleddet endre størrelse på grunn av temperatur og vanninnhold i kroppen. Dette gir behov for en toleranse på størrelsen til protesen. Funksjonen «offset» kan brukes for å enkelt legge inn en toleranse ved å lage en ny modell ved en gitt avstand fra den første. Figur 58 viser hvordan den tidligere modellen (grå til venstre og oransje til høyre) er etterliknet av den nye modellen som ligger 1 mm utenfor den gamle (grå til høyre).



Figur 58 - Før og etter bruk av funksjonen "offset" (Egne bilder)

«Thicken» (Home, feature)

Denne funksjonen legger en tykkelse på modellen, som tidligere var et plan. Å legge tykkelse er et essensielt skritt som alle modellene må undergå. Figur 59 nedenfor viser hvordan modellen ser ut før (venstre) og etter (høyre) bruk av verktøyet.



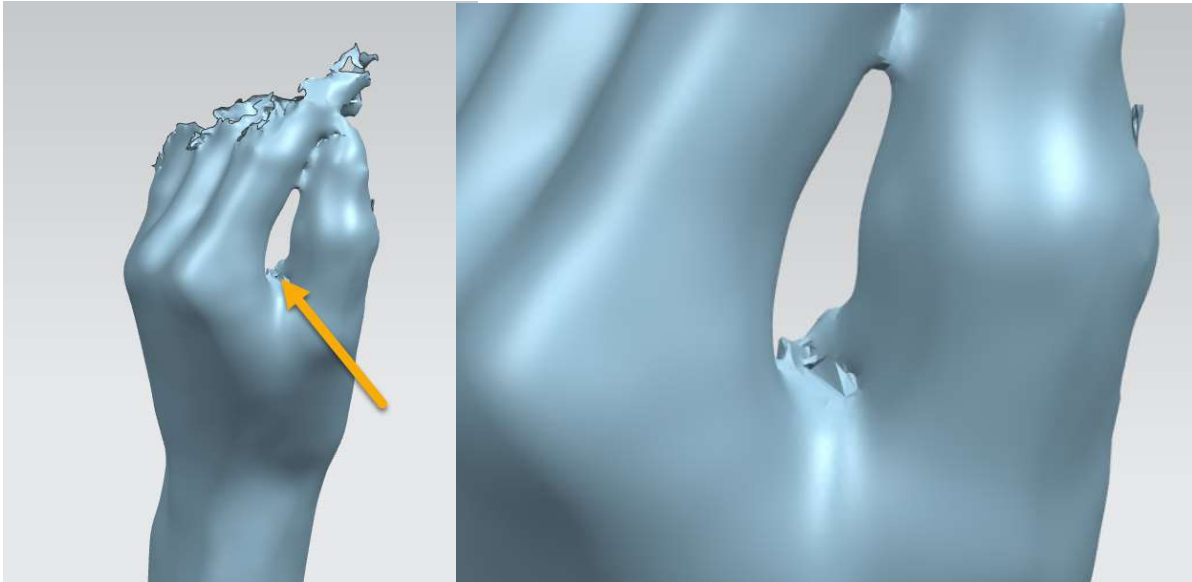
Figur 59 - Før og etter bruk av funksjonen "thicken" (Enge bilder)

3.4.3 utfordringer under modellering

Under modelleringsfasen oppstår det en rekke utfordringer knyttet til skannen. Avvik fra skann til skann er en kjent usikkerhet med grunnlag i at hver pasient har forskjellige utforminger. Avvik vil derfor være mer vanlig enn ikke. Virkningsgraden av prosessen vil derfor være avhengig av god avviks-håndtering.

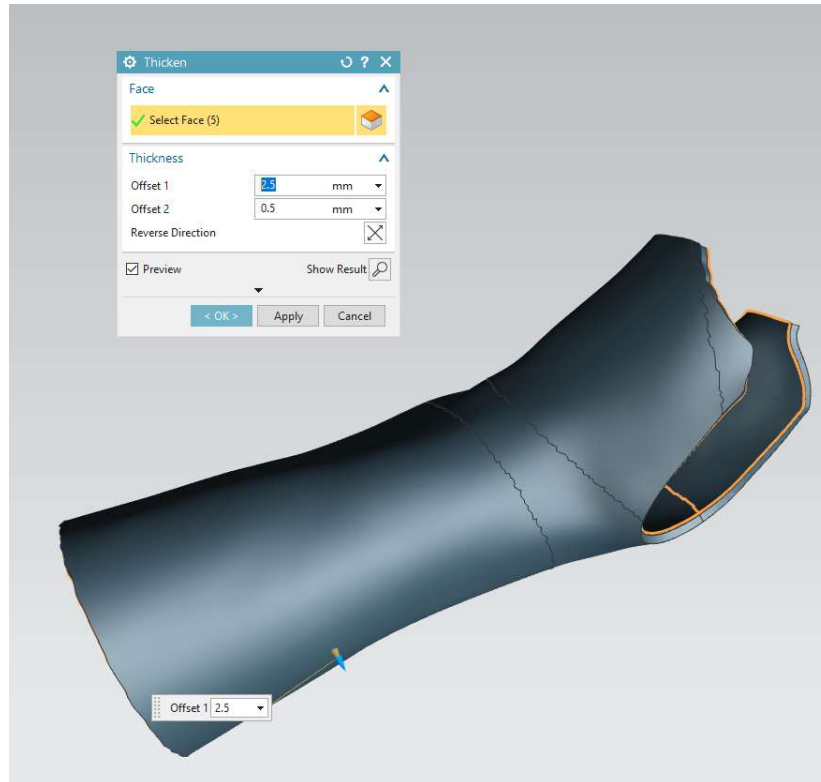
Kritiske områder

Skann av området mellom tommel og pekefinger var vanskelig å få i god kvalitet. Her er det vanskelig å komme til for å innhente data, siden tommelen er i veien. Behovet for bearbeiding av skannet avhenger helt av kvaliteten på dette området.



Figur 60 - Kritisk område mellom tommel og pekefinger (Egne bilder)

Figur 60 viser det kritiske området. Konsekvensen av for lite innhentet data i dette området er mye bearbeiding og i verste fall at det ikke går an å legge tykkelse på modellen med dette området. Figur 61 viser et skann hvor det bare var mulig å legge tykkelse på modellen etter fjerning av det kritiske området.



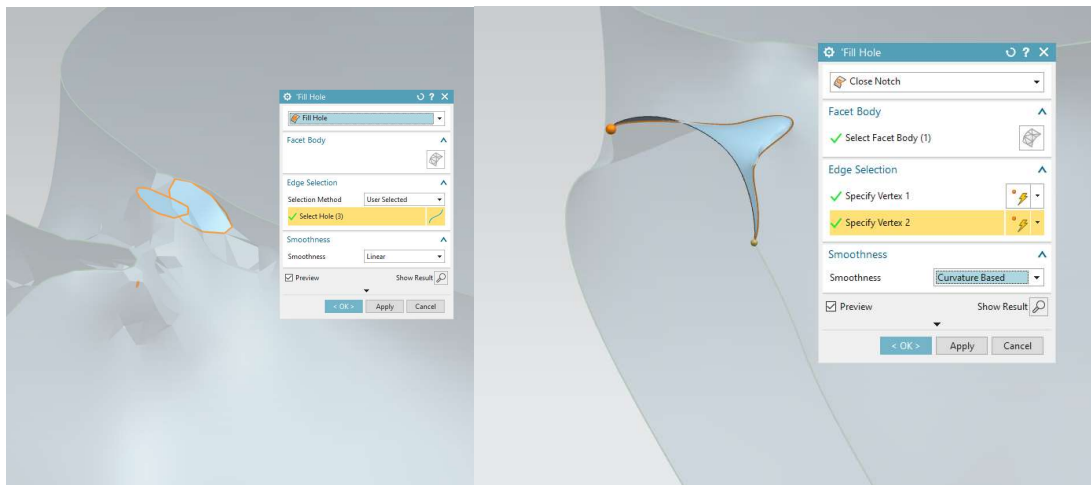
Figur 61 - Gips uten kritisk område (Eget bilde)

Reparasjon av det kritiske området

I tilfeller hvor skanneren ikke klarer å plukke opp data i det kritiske området vil det være behov for reparasjon av det respektive området. En mulighet kan være å utføre et nytt skann, men hos små barn for eksempel vil det være sannsynlig at disse områdene vil trenge reparasjon i modelleringsverktøyet i de fleste tilfellene. Denne reparasjonen vil ikke alltid være lik, men vil bruke en av funksjonene nedenfor i varierende omfang og rekkefølge.

«Fill Hole» (Polygon modeling, cleanup and prepare)

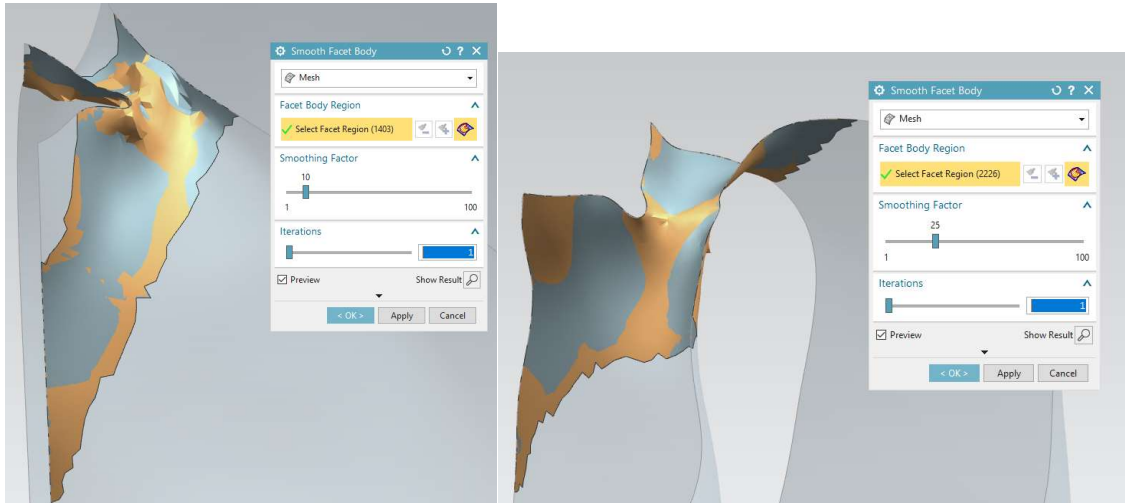
Dersom det kritiske området har hull, brukes funksjonen «fill hole», som vist i figur 62, og kan lukke fullstendige hull (venstre) eller hakk (høyre) som påvirker funksjonaliteten til protesen.



Figur 62 - Bruk av funksjonen "fill hole" til hull og hakk (Egne bilder)

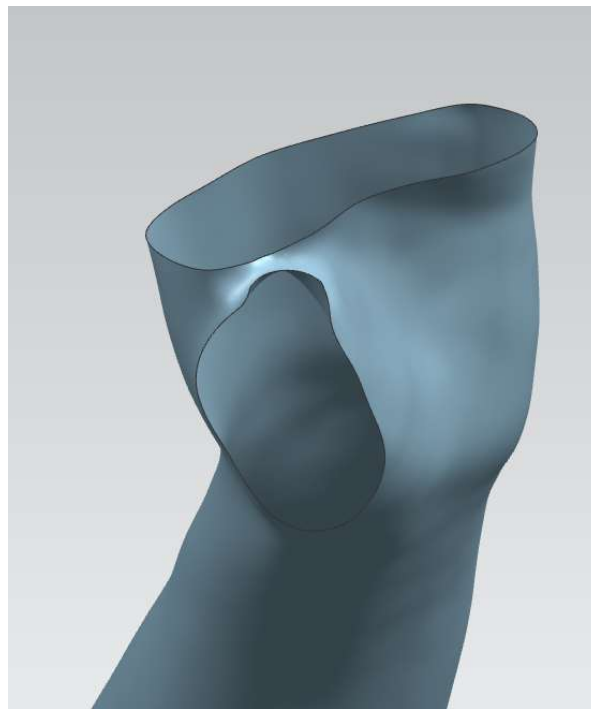
«Smooth Facet Body» (Polygon modeling, cleanup and prepare)

Som nevnt tidligere blir dette verktøyet også brukt på protesen i sin helhet, men det er også mulig å bruke det gjentatte ganger på et mer konsentrert område. Dette unngår for mye jevning av modellen, og vil forbedre geometrien i det kritiske området betraktelig, som vist i figur 63. Figuren viser både første (venstre) og andre (høyre) bruk av funksjonen.



Figur 63 - Bruk av "smooth facet body" på et konsentrert område (Egne bilder)

Et eksempel på en reparasjon med bruk av verktøyene beskrevet ovenfor avbildes i figur 64 nedenfor. Utgangspunktet vises i figur 60 i starten av delkapittelet.



Figur 64 - Resultat av reparasjon på kritisk område (Eget bilde)

Plassering av koordinatsystem

For å oppnå en automatisert modelleringsprosess er det behov for et koordinatsystem på en kjent plass i modellen. Dette vil gjøre det mulig å lage en meny i «PTS Author», en funksjon som forenkler produksjon og enkel tilpassing av en protese. Bruk av denne menyen, derimot, vil ikke være

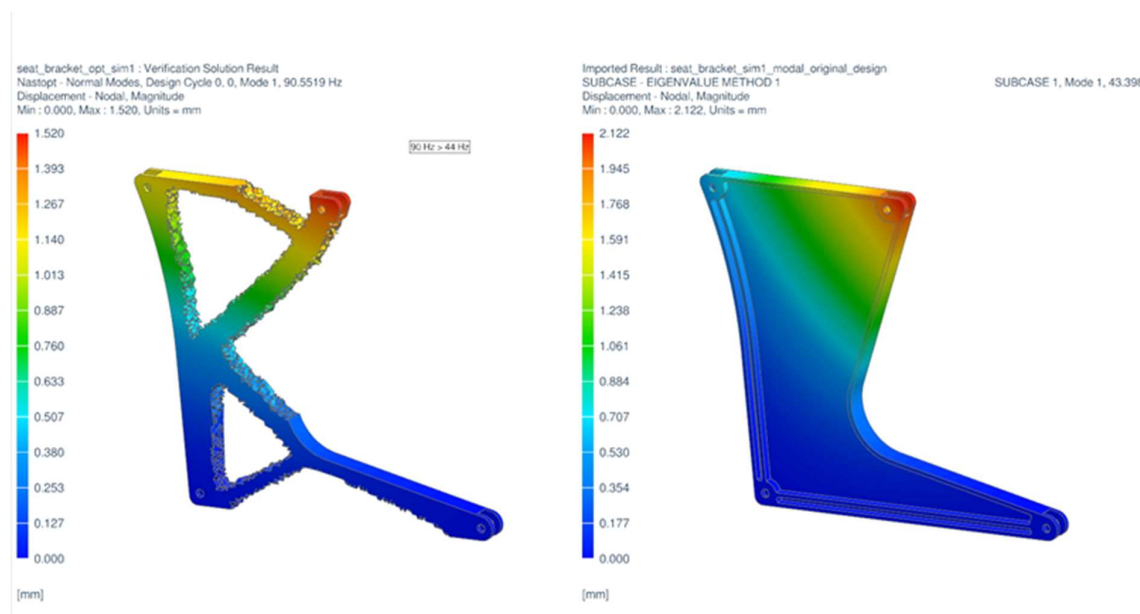
gjennomførbart med en rekke funksjoner beskrevet ovenfor. Funksjonene brukes ikke med grunnlag i et koordinatsystem, men heller med at operatøren merker det relevante området.

3.4.4 Topologioptimalisering og styrkeberegning (FEM analyser)

Geometrien som ble utviklet i delkapittelet 3.4.2 kan brukes videre til FEM analyse og topologioptimalisering, men grunnet mye tid mistet uten tilgang til laboratorier og omprioriteringer deretter utgår dette fra oppgaven.

Topologioptimalisering

Dette er en metode for å fjerne unødvendig materiale uten at det går på bekostning av styrken på gjenstanden som optimalisering. Det er en måte å benytte dataverktøy for å trekke ut de essensielle delene av et design og minske mengde materiale, produksjonstid og kostnader. Det er mulig å utføre topologioptimalisering med Siemens NX, modelleringsverktøyet som ble brukt for å skape geometrien til protesen. Figur 65 viser hvordan en modell ser ut før (høyre) og etter (venstre) optimalisering i programmet Siemens NX.



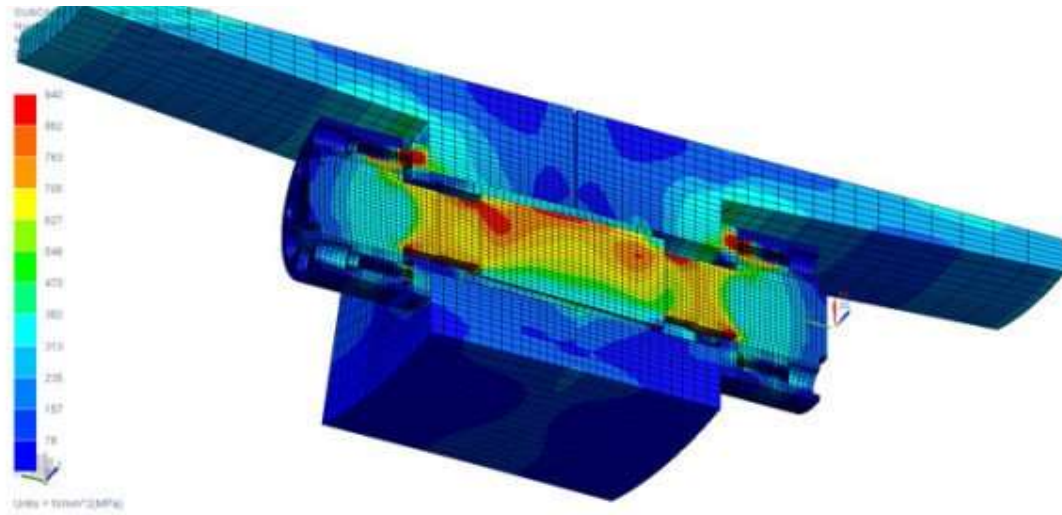
Figur 65 - Topologioptimalisering i Siemens NX (Hentet fra <https://news.cision.com/inmema-kommunikation/r/siemens--latest-release-of-simcenter-3d-advances-computer-aided-engineering-and-simulation.c2373299>)

Målet med å implementere topologioptimalisering er å forbedre utformingen av geometrien på protesen. Optimaliseringen vil senke materialbruk, som videre vil senke printetid.

Styrkeberegning (FEM analyser)

Analyse av geometrien som ble skapt i delkapittel 3.4.2 er viktig for å evaluere hvordan diverse tykkelser på gipsen vil reagere under forskjellige belastningsscenarioer. FEM (Finite Element Method) er en numerisk teknikk brukt til å utføre FEA (Finite Element Analysis), som styrkeberegner

et gitt objekt (Harish, 2020). Figur 66 viser hvordan en FEM analyse ser ut i verktøyet Siemens NX. Skalaen på venstre side viser fargekoden på hvilke områder som opplever hvilken belastning.



Figur 66 - Styrkeberegning i Siemens NX (Hentet fra <https://www.nord-lock.com/globalassets/mediavalet/web-assets/pictures/insights/knowledge/nord-lock-group-uses-siemens-nx-cae-600x276.jpg>)

Ettersom protesen er mest til stedet for å holde håndleddet i riktig posisjon under legning, er det ikke høye krav til styrke. Et brudd er smertefullt, så en pasient vil under normale omstendigheter ikke bruke armen til mye. Likevel burde gipsen tåle en støyt, dersom pasienten ved et uhell for eksempel legger seg på armen når hun sover, burde gipsen ha tilstrekkelig styrke til å håndtere denne lasten.

Langsiktig kan integrert styrkeberegning i den helhetlige prosessen være et verdifullt tilskudd. Dersom en gitt sikkerhetsfaktor og vekten til pasienten oppgis, kan programmet beregne en ideell tykkelse på protesen, som videre minsker sløsing av materiale og gjør protesen enda bedre tilpasset pasienten.

4 Resultat

Fra tidligere erfaringer og undersøkning av ny teknologi i kapittel 2 og undersøkelse av kvalitet, metoder og effektivitet fra kapittel 3, har resultatene blitt samlet nedenfor.

4.1 3D-skanner prototyper

To prototyper ble utviklet under forløpet av oppgaven. En bordskanner som skulle bli brukt til testing, og en motorisert skanner for å ta konseptet nærmere en endelig løsning.

4.1.1 Bordskanner

Bordskanneren ble brukt mye under testing av skannerutstyr og sensorer. Brukstiden belyste områder med forbedringspotensialet, men også hvordan den enkle løsningen var en god løsning for skanning.

Montering

Under testing ble bordskanneren forflyttet fra sted til sted uten problemer, som understreker mobiliteten til prototypen. Sammenstilling av bordskanneren er enkelt og krever lite tid. Den kan monteres på rundt 30 sekunder og demonteres like lett.

Figur 67 viser hvordan skanneren monteres.

- 1. Fest basen til en bordkant og plasser aksel i designert åpning**



- 2. Plasser kulelager i lagerhuset og en distansering nederst på akslingen**



- 3. Plasser lagerhuset på akslingen og den siste distanseringen over**



- 4. Før skannerarmen på plass i den andre åpningen på lagerhuset**



- 5. Plasser bordplaten i den designerte åpningen i akselen over koblingen**



Figur 67 - Montering av bordskanner (Egne bilder)

Forbedringer

Flere muligheter til forbedring ble oppdaget under bruk. Til å begynne med var det behov for et bord-feste som gjorde det mulig å bytte mellom vertikal og horisontal skanning. Figur 68 viser en forbedret versjon. Her kan akselen festes ovenfra og fra siden.



Figur 68 - Forbedret bord-feste (Eget bilde)

Den største delen på skanneren er armen, som er satt sammen av to aluminiumsprofiler, satt på plass av to vinkelbraketter. En mulig forbedring av designet er bytte av det stive leddet mellom de to aluminiumsprofilene til en sammenleggbar løsning.

Feste av sensor til skanneren

Det var flere konsepter på hvordan skannersensoren burde festes til skannearmen. Intel RealSense har samme fest som mange speilreflekskamera: innvendige gjenger som passer en standardisert skrue (UNC 1/4"-20). En enkel løsning er derfor å bruke en skrue (se figur 69) med hode stort nok til å passe sporene i aluminiumsprofilene, og skru på sensoren ved ønsket område. Denne løsningen ble brukt under testing, og er ikke veldig brukervennlig uten verktøy for å holde skruen på plass. Figur 70 viser tripod som fulgte med Intel RealSense kameraet med utvendige gjenger til feste for bruk ved skanning.



Figur 69 - Standardisert skrue til kamerafeste (Hentet fra <http://www.ocon.com/products/support-accessories/camera-screw-14-20-unc/>)



Figur 70 - Tripod til Intel RealSense D435 (Eget bilde)

Kostnader

Totale kostnader for bordskanneren er lave. Noe av tanken bak prototypen var å lage en god løsning med billige og tilgjengelige deler. Kostnad per rull med PLA varierer basert på farge og produsent, men 1 kg koster rundt 325 NOK fra RS Components. Tabell 3 viser kostnadene assosiert med bordskanneren:

Delbeskrivelse	Antall/Mengde	Stykkpris [NOK]	Total pris [NOK]
Aluminiumsprofil 50 cm	2	89.25	178.50
Kulelager	2	23.22	46.44
Aksel 2 cm	1	36.17	36.17
Vinkelbraketter	2	50.54	101.08
T-slot mutter	4	20.93	83.72
Lagerhus (3D-print)	71 g	0.325/g	23.08
Distansering	3 g for 2	0.325/g	0.98
Bord-feste	42 g	0.325/g	13.65
Bordplate	95 g	0.325/g	30.88
Totalt			514.5

Tabell 3 - Kostnader for bordskanner prototype

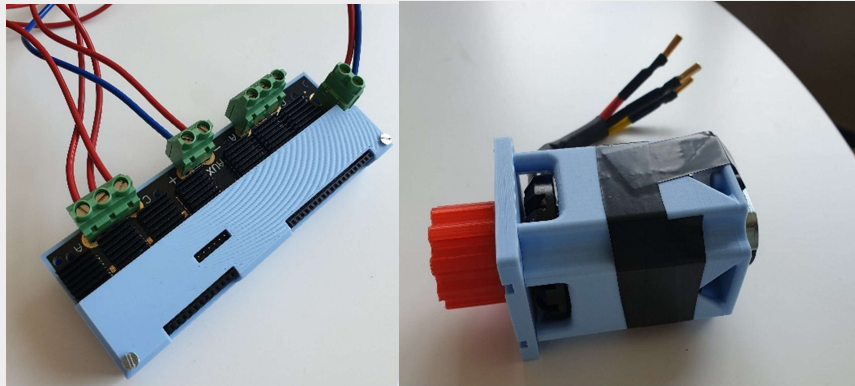
4.1.2 Motorisert skanner

For utvikling av den motoriserte skanneren er det deler av prosessen som krever bistand fra en automasjonsstudent. Magnus Kvendseth Øye har jobbet med programmering av enkoder, det grafiske displayet til skanneren, samt den elektriske delen av sammenstillingen. På grunn av omstendighetene var det utfordringer å fullføre samarbeidet, så den motoriserte skanneren har ikke blitt ferdigstilt med alle de elektriske komponentene.

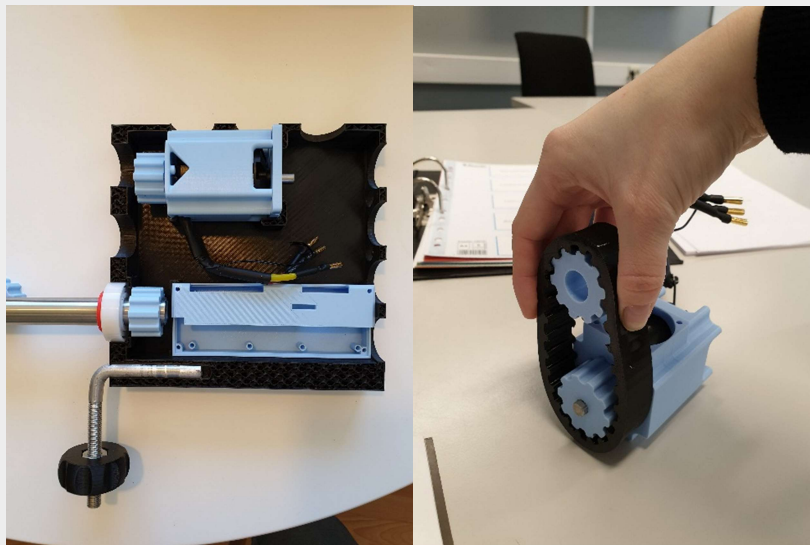
Montering

Den motoriserte skanneren har langt flere deler, og krever en mer kompleks sammenstilling, selv om konseptet fortsatt er enkelt. Figur 71 viser monteringsprosessen.

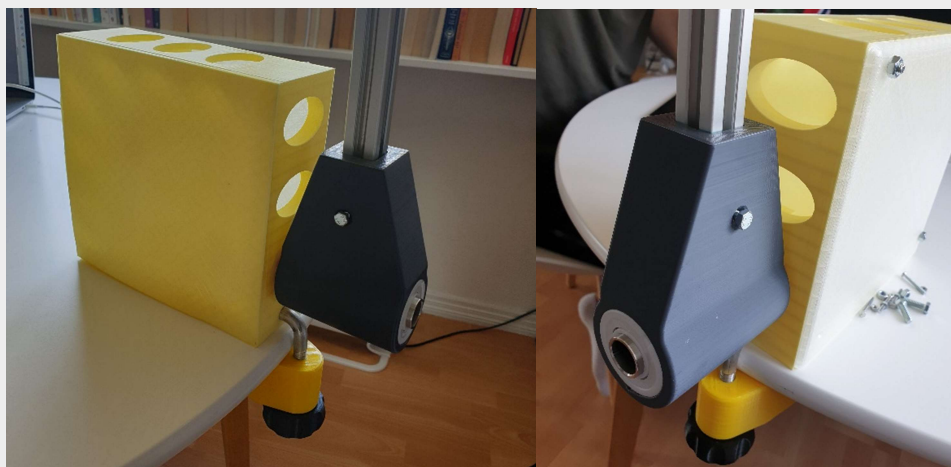
1. Plasser og fest motor og driver i motorhus og driverhus, respektivt



2. Plasser og fest innvendige komponenter i skallet



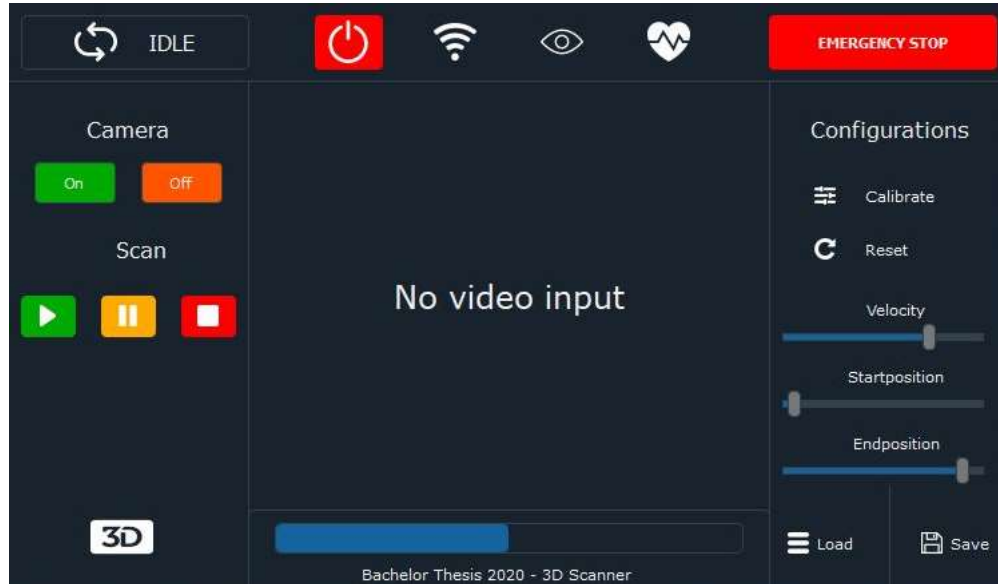
3. Sku på lokket på skallet og skannearm på aksel



Figur 71 - Montering av motorisert skanner (Egne bilder)

Grafisk display

Utforming av det grafiske displayet på skanneren er tilrettelagt både brukervennlighet og mulighet for justeringer ettersom de diverse innstillingene må testes. Etter finpussing av innstillinger på prototypen kan displayet forenkles. Figur 72 viser hvordan displayet er ut.



Figur 72 - Grafisk display for innstillinger av skanner (Hentet fra Magnus Kvendseth Øye)

Forbedringer

Under produksjon og montering av skanneren kom det frem aspekter av design og konsept med forbedringspotensialet. Et av disse var det 3D-printede reimsystemet. Som figur 71 viser (høyre), er reimen for infleksibel med nåværende geometri, slik at den hopper over et hakk i reimen ved plassering i reimfestet.



Figur 73 - 3D-printet reimdrift (Egne bilder)

Dette kommer mest sannsynlig av at taggene er for store, og dermed mindre fleksible. En løsning er å bruke en reim lik den avbildet i figur 74, med reimfestet lik den avbildet i figur 75.



Figur 74 - Timing belt (Hentet fra <https://no.rs-online.com/web/p/timing-belts/7785036/>)



Figur 75 - Timing Belt Pulley (Hentet fra <https://no.rs-online.com/web/p/timing-belt-pulleys/7784831/>)

Videre er ikke feste av lokket festet på en logisk måte, og det var lite brukervennlig å feste skrue og mutter på plass. Dersom det er behov for reparasjon, endringer eller sjekk av utstyr burde det være lettere å feste og løsne lokket. Selv om det så brukbart ut på tegningene, viste det seg å være ulogisk i praksis.

Kostnader

Den motoriserte skanneren endte også opp med å være relativt rimelig. Flere deler nedenfor ble hentet fra verkstedet eller ansatte med deler liggende. Tabell 4 viser oversikt over kostnadene relatert til den motoriserte skanneren. Deler som er lånt eller har blitt donert er ikke tatt med i betraktning, så totalprisen gjelder dersom prototypen skal produseres uten eksternt hjelp. Samme pris på PLA gjelder her som ved bordskanneren. Festemateriale (skrue, mutter og lim/epoksy) for skallet er ikke inkludert i kostnadene. På reimen ble et annet filament brukt, med en pris på 525 NOK per 0.5 kg.

Delbeskrivelse	Antall/Mengde	Stykkpris [NOK]	Total pris [NOK]
Aluminiumsprofil 50 cm	2	89.25	178.50
Kulelager	2	23.22	46.44
Aksel 2 cm	1	36.17	36.17
Vinkelbraketter	2	50.54	101.08
T-slot mutter	4	20.93	83.72
Lagerhus (3D-print)	71 g	0.325/g	23.08
Distansering	3 g for 2	0.325/g	0.98
Motor	1	695.7	695.7
Motorhus m/ flens	39 g	0.325/g	12.68
Driver	1	1245.40	1245.40
Driverhus	38 g	0.325/g	12.35
Reim	18 g	1.05/g	18.9
Reimfeste motor	6 g	0.325/	1.95
Reimfeste aksel	6 g	0.325/g	1.95
Skall	204 g	0.325/g	66.3
Bord-feste	37 g	0.325/g	12.3
Totalt			2538.22

Tabell 4 - Kostnader for motorisert skanner prototype

Et avvik fra de materiale kostnadene er strøm brukt av printerne under produksjon, samt engangskostnaden av printerne.

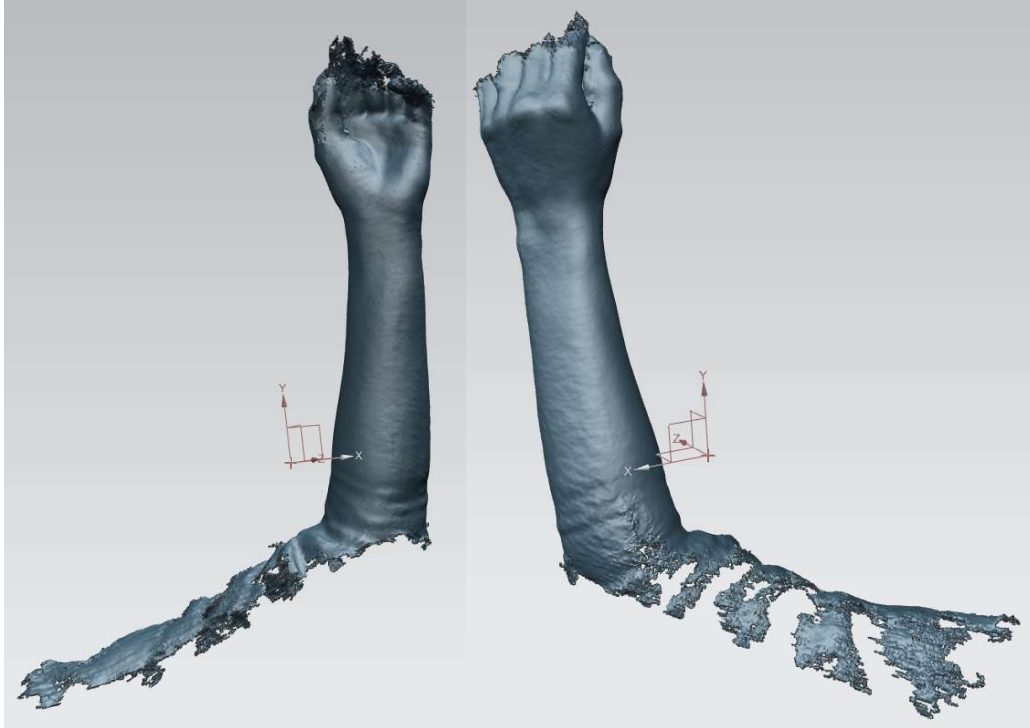
4.2 3D-skanning

Kvaliteten på skannet som produseres er viktig for videre prosessering, og legger grunnlaget for det endelige produktet. Nedenfor sammenliknes skanner som er tatt med ulike kombinasjoner av apparater, for å vurdere den beste metoden for skanning av håndledd gitt de tilgjengelige apparatene. Punktskyer hentet ved hjelp av iPhone er gjort via applikasjonen *Scandy Pro 3D Skanner*, og punktskyer fra Intel RealSense er hentet via *RecFusion*, da disse programvarene viste seg best egnet til de respektive maskinvarene, som vist i kapittel 3.

4.2.1 Skann - Håndholdt med iPhone

Figur 76 viser resultatet av et håndholdt skann med iPhone som apparat. Overflaten er detaljert, og området hvor protesen skal legges er av høy kvalitet, med unntak av det kritiske området mellom tommelen og pekefingeren. Under skanning var det litt problematisk at programvaren mistet posisjonen sin, noe som forlenget skannetiden. For å skanne måtte armen holdes opp over hodet på vedkommende som skulle skannes, og det var fortsatt problematisk for skanneoperatør å gå rundt. I en realistisk setting vil det være en smertefull posisjon som ikke vil gi mulighet til å sikre posituren til

håndleddet. Videre er det for lite data rundt fingrene, og for mye data rundt øvre arm, som kan vise til dårlig posisjonering av kameraet. Dette er ikke noe som vil påvirke protesen, da disse områdene ikke inngår der. Resultater er derfor av høy nok kvalitet til å anse kombinasjonen av apparat som godt nok for videre prosessering, men metoden har rom til forbedring.



Figur 76 - Rå håndholdt med iPhone (Egne bilder)

4.2.2 Skann - Manuell skanner med iPhone

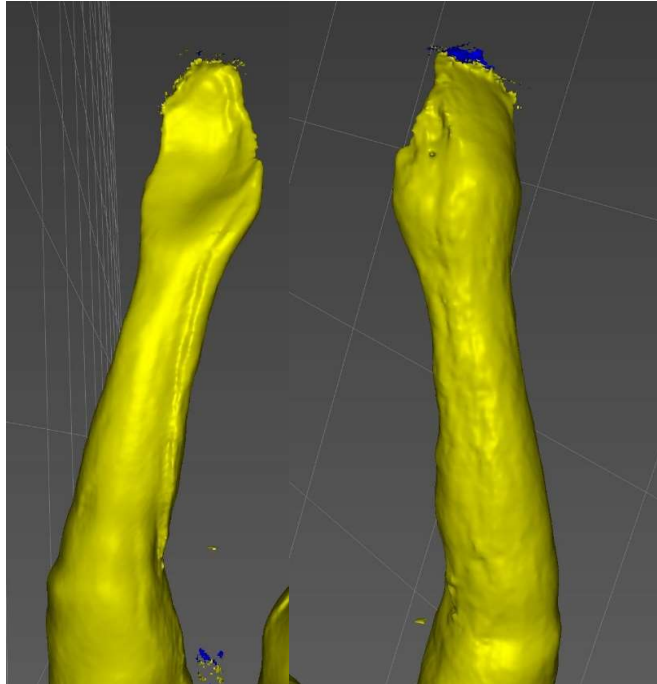
For dette skannet ble bordskanneren brukt, samt en montert iPhone. Under skanningen kommer det tydelig frem at denne metoden var langt enklere for operatør, som minsket skannetid. Posisjonen til kameraet forble det samme gjennom hele rotasjonen. Dette resulterte i mer detaljer rundt fingrene, i det kritiske området, og mindre data lenger opp på armen. En stasjonær skanner vil også muliggjøre en ideell avstand og posisjon av kameraet til armen, som videre vil effektivisere skanneprosessen. Vedkommende som ble skannet er ikke samme person som ved skann gjort ovenfor, for å se hvordan forskjellige detaljer ble plukket opp. Figur 77 viser derfor flere detaljer som sener og blodårer på grunn av utforming av vedkommende sin arm. Denne kombinasjonen av metode og apparat er et bedre alternativ enn ved håndholdt skanner, ettersom det tar mindre tid å utføre skannet og økt kvalitet.



Figur 77 - Rå skann med manuell skanner og iPhone

4.2.3 Skann – Håndholdt med Intel RealSense

Figur 78 viser resultatet av håndholdt skanning ved bruk av kamerasystemet til Intel RealSense. Punktskyen ble produsert på relativt lang avstand, som forklart i kapittel 3, og det er mulig dette kan ha påvirket resultatet. Skannet er ikke så detaljert, ingen definerte fingre kan observeres, tommelen er nesten ikke til stede. Lenger ned har ikke armen blitt tildelt korrekt geometri, det varierer hvor god kvaliteten er i diverse områder, og resultatet er et upålitelig skann. Resultatet nedenfor er ikke av tilstrekkelig kvalitet til å brukes videre i en modelleringsprosess.



Figur 78 - Rå håndholdt skann med Intel RealSense (Egne bilder)

4.2.4 Skann – Manuell skanner med Intel RealSense

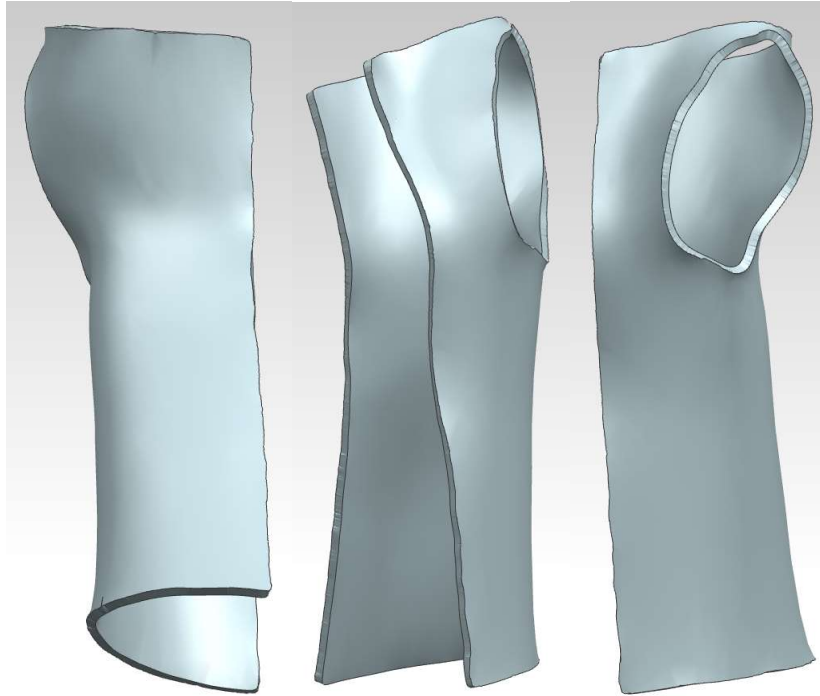
Grunnet avstanden påkrevd av maskinvaren og programvaren var det ikke mulig å bruke skanneren for å produsere et resultat. Det er mulig andre programvarer hadde muliggjort dette, men ingen av programmene henvist til av Intel til 3D-skanning gjorde det.

4.3 Modellering av protese

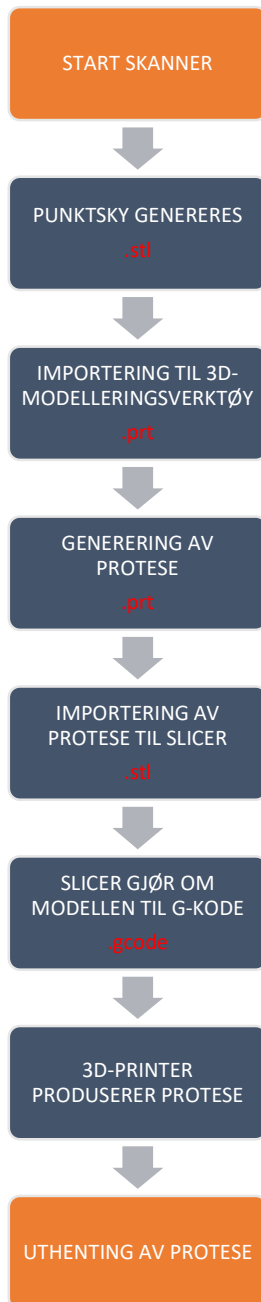
Den endelige prosessen for modellering av protesen er subjektiv til den enkelte skannen. En generell prosedyre er som følger:

1. «Snip» mesh i fire plan
 - a. Fjern data fra øvre arm som ikke skal med
 - b. Kutt en skrå linje på undersiden av metacarpophalangeal-leddet fra pekefinger til lillefinger
 - c. Kutt åpning til tommel, pass på at det er igjen tilstrekkelig data mellom tommel og pekefinger
 - d. Åpning på siden hvor lillefingeren er for å sette på protesen
2. «Smooth»
 - a. Gjøres på alle kantene som kom frem etter trinn 1
3. «Smooth»
 - a. Hele modellen
4. «Cleanup facet body»
 - a. Dette må gjøres i antall omganger som er nødvendig for å få feil ned til 0
5. «Adjust minimum radius»
 - a. Med en verdi på mellom 3 mm og 5 mm, det vil være forskjell på hvilken verdi som vil være riktig for hvert enkelt skann
6. «Offset»

- a. Et nytt sett med data genereres med en avstand lik toleransen på protesen
7. «Cleanup facet body»
 - a. En ny runde med dette verktøyet, igjen helt til det ikke finnes feil i meshen
8. «Thicken»
 - a. En tykkelse legges på meshen og danner en 3D-modell klar for topologioptimalisering



Figur 79 - Protese etter 3D-modellering (Egne bilder)



Figur 80 - Den digitale verdikjeden (Egen figur)

4.4 Den digitale verdikjeden

Skanneren startes ved et enkelt knappetrykk. Skanneren roterer 360 grader for innhenting av data. Det er per dags dato uvisst hvor lang en ideell syklus er, men den antas til å ligge på rundt et minutt. Under rotasjonen skapes en punktsky som etter ferdig skanning sendes som en STL-fil til modelleringsverktøyet. Modelleringsverktøyet importerer filen til en opprettet part fil (.prt) som en «convergent body». I modelleringsverktøyet produseres en skreddersydd protese basert på skannen.

Når gipsen modelleres i NX er den formatert som en part fil (.prt). Etter fullført modellering skal gipsen videre til 3D-printeren, som bruker G-kode. Før filen gjøres om til G-kode, går gipsen gjennom en programvare kalt «slicer», hvor formen på gipsen gjøres om til instruksjoner som kan sendes videre til skriveren (.gcode). For Ultimaker printere blir programmet Cura brukt. I tillegg til å lage instruksjoner kan «slicer»-programvaren stille inn høyden på lagene, hvor raskt dysen skal bevege seg, og om en vil ha et solid objekt eller et skall. Alle disse valgene vil ha en innvirkning på hvor lang tid det vil ta å skrive ut gipsen. For å benytte Cura må filen ha part fil format eller STL-format (Sjåstad, Alvestad, & Nedreid, 2019).

Ved en manuell prosess, og dermed modellering via en operatør vil det ikke være behov for en kvalitetskontroll ettersom det vil være tydelig om det er noe feil med protesen. I en automatisert prosess, derimot vil implementering av kvalitetskontroll før printing være et viktig tillegg i verdikjeden.

4.5 Analyse og forbedring av dagens prosess ved bruk av «Process Mapping»

For å kvantifisere verdien av 3D-teknologi, blir prosessen analysert i denne delen ved hjelp av «process mapping» som verktøy. «Process mapping» kommer fra prinsippene om lean manufacturing, og er nyttig for å eliminere sløsing. Dette er en del av en oppgave i regi av faget Industri 4.0, og ser på gipsprotesen fra pasientens perspektiv.

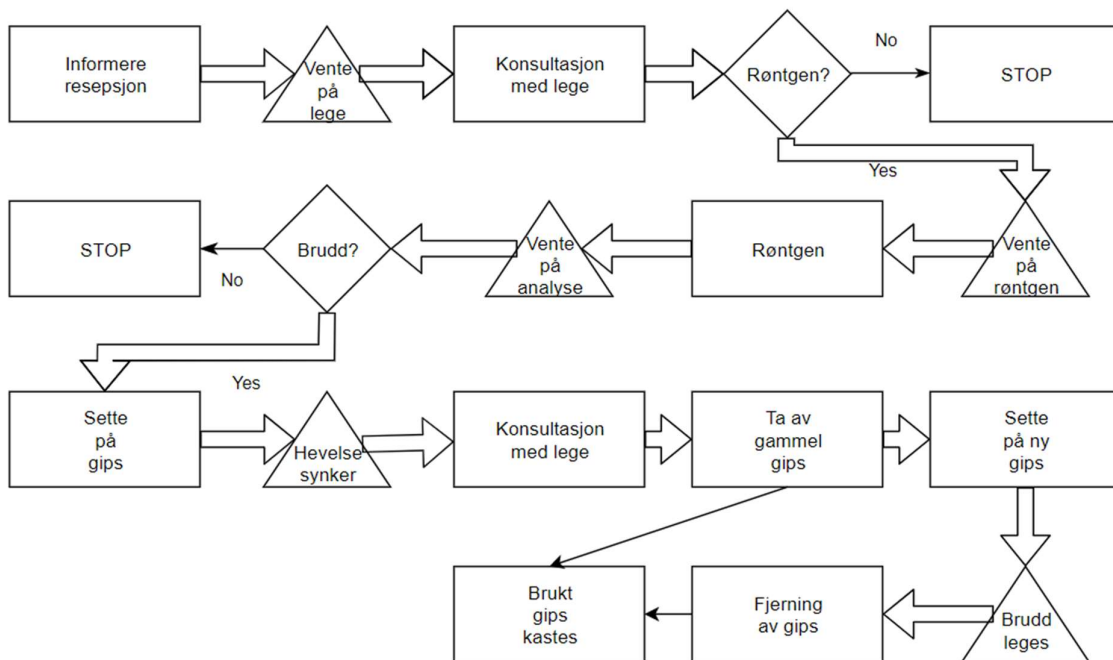
Ved mulig håndleddsbrudd reiser pasienten til sykehuset for evaluering. Pasienten forklarer situasjonen til en sykepleier som noterer det ned for legen å se på senere. Etter noen minutter med ventetid blir pasienten kalt inn til legen, og forklarer situasjonen på nytt. Legen sjekker håndleddet og

vurderer om det er nødvendig med røntgen. Dersom det er nødvendig med røntgen setter pasienten seg utenfor og venter til det er deres tur til å ta bilde. Etter røntgen setter pasienten seg ned igjen for å vente til bildene er analysert. Når bildene er ferdige, forklarer legen om de har funnet brudd og om eventuell videre behandling. Dersom det er nødvendig med gips vil neste steg være å legge på gipsen. Etter 2-3 dager vil hevelsen i håndleddet ha gått ned, så pasienten drar tilbake til sykehuset. Pasienten blir kalt inn til legen, som stiller kontrollspørsmål og passer på at alt går etter behandlingsplanen. Så tas gammel gips av, og ny gips settes på. Videre tar det i gjennomsnitt 5 uker for et håndleddsbrudd å lege. Etter 5 uker drar pasienten derfor tilbake til sykehuset hvor legen sjekker status på bruddet, tar av gipsen og eventuelt tar nytt røntgenbilde.

For bedre oversikt over prosessen, samt hvordan den er satt sammen med tanke på oppgaver, venting og beslutninger som må tas, settes det opp grafisk i det som heter process mapping. Tabell 5 nedenfor viser betydningen av de forskjellige figurene brukt i figur 81 for å vise hvordan dagens gipsprosess ser ut grafisk.

Figur	Betydning
Stor pil	Hovedprosessflyt
Liten pil	Sekundær prosessflyt
Rektangel	Oppgave
Kvadrat	Beslutning
Trekant	Venting

Tabell 5 - Process mapping symboler



Figur 81 (Egen figur)

4.5.1 «The 8 wastes of lean»

Det grunnleggende prinsippet til lean er eliminering av unødvendig sløsing og minimering av nødvendig sløsing (O'Kelly, 2017). Det er 8 definerte områder som anses som sløsing. Ved å eliminere sløsing vil det som gjenstår være verdiskapende aktiviteter i prosessen. Eliminering av sløsing vil øke flyten i prosessen, og derav den helhetlige produktiviteten. Nedenfor blir de 8 områdene spesifisert og satt i betraktning av gipsprosessen ved Ålesund sykehus.

Defekter

Filosofien til lean uttyper at ved produksjon skal det gjøres riktig første gang, herav uttrykket «right the first time». Defekte produkter betyr sløsing av materialer, tid og/eller ressurser ettersom det fører til reparasjon eller behov for å produsere produktet på nytt (Lachance, Worximity, 2018).

Ved manuell påføring av gips vil det alltid være en risiko for feil. Dersom sykepleier/turnuslege legger for hardt trykk på et område når kalkgips påføres, skaper dette en kul mot huden som skaper ubehag og eventuelle trykksår hos pasienten (Sjåstad, Alvestad, & Nedrelid, 2019). I et slikt tilfelle må gipsen legges på nytt. I dette tilfellet må den defekte gipsen fjernes og legges på nytt, som resulterer i tap av materiale og tid som hadde potensialet til å bli brukt for noe annet.

Overproduksjon

Dette skjer i tilfeller hvor en prosess lager flere produkter enn markedet ønsker å kjøpe (Lachance, Worximity, 2018). I et slikt tilfelle må firmaet lagre produktene, som er nok en kategori av sløsing oppgaven kommer tilbake til senere.

I tilfellet hos Ålesund sykehus legges gips kun i tilfeller hvor det er allerede er vurdert nødvendig, som eliminerer muligheten for overproduksjon.

Venting

Dersom det er en periode under produksjonen hvor produktet må vente på neste steg av produksjonen er dette en form for sløsing. Ved å eliminere venting, vil produktiviteten av prosessen øke (Lachance, Worximity, 2018). I dette tilfelle er det bare nødvendig venting i hovedprosessen, ettersom dette er tid hvor bruddet settes og leges.

Ikke-utnyttet talent

Dette er en type sløsing hvor menneskers kunnskap, talent og ferdigheter ikke utnyttes. En analogi for en prosess der talent ikke blir utnyttet er en motor med 8 sylindere hvor bare 6 blir brukt, som klart er unødvendig sløsing. Målet med å eliminere denne type sløsing er å utnytte ressursene tilgjengelige i prosessen på best mulig måte (NEHP, 2019).

Utførelsen og derfor også kvaliteten på gipsen vil avhenge av når på døgnet pasienten ankommer sykehuset. Dersom skadepoliklinikken er åpen, vil gipsingen bli utført av sykepleiere på ortopedisk poliklinikk. Hvis pasienten ankommer utenom disse tidene derimot, vil det være turnuslegene på

akuttmottaket som utfører jobben. Turnuslegene har et bredt ansvar ved akuttmottaket, og dersom de skal bruke 20 minutter på å legge gips tar dette tiden bort fra mulig alvorlig skadde pasienter. Her vil det være viktig å eliminere sløsing slik at turnuslegen kan bruke kunnskapen sin på best mulig måte. På akuttmottaket blir pasienter rangert etter hvor alvorlig situasjonen deres er, og dersom det er pasienter som er rangert over brudd vil dette resultere i venting.

Transport

Unødvendig forflytning av mennesker eller deler underveis i prosessen, for eksempel for å hente materiale eller levere en del til neste steg i prosessen, blir sett på som sløsing og burde elimineres eller minskes så mye som mulig (Clearpath Robotics, 2016).

I figur 1 ser vi at pasienten flytter seg fra mye frem og tilbake mellom venterom, røntgen og legekontor. Her er det fort å gjøre antakelsen av denne forflyttelsen er sløsing, men det er viktig å huske at det er produktet som står i fokus. Og gipsen har minimal forflytning, fordi gipsen legges i rommet hvor alle materialene for denne prosessen er tilgjengelige. Videre er sykehuset satt opp slik at helsearbeiderne forflytter seg minst mulig, for å behandle så mange pasienter som mulig, og en konsekvens av dette er mer forflytning av pasientene mellom avdelinger, men mer effektive avdelinger.

Inventar

Overproduksjon og innkjøp i bulk av nødvendige deler til produksjon vil føre til behov for inventar. Inventar bruker unødvendig plass og tilfører ingen verdi til prosessen (Lachance, Worximity, 2018). I de fleste tilfeller vil det være behov for litt inventar, men sløsing skjer når det kjøpes inn mer enn behovet. En god løsning for dette vil være å innføre et kanban system, hvor det vises grafisk når det er behov å bestille mer. Et effektivt kanban system bidrar til bedre flyt i prosessen fordi det minsker inventar og gjennomfører gode rutiner for påfyll av deler til prosessen.

Sykehus har generelt litt mer inventar enn de vanligvis har behov for fordi mangel på utstyr kan i visse tilfeller være livstruende. I tilfellet vi undersøker vil det være viktig å alltid ha materiale tilgjengelig, og dersom et kanban system ikke er på plass kan det ha positive effekter på flyten av prosessen.

Bevegelse

Her ser en på hvordan mennesker/roboter må bevege seg under produksjonen av produktet (Skhnot, 2017). Dersom en ansatt for eksempel må gå til en annen stasjon for å hente en del, vil dette være sløsing av bevegelse og må elimineres fra prosessen. En løsning på problemet vil være å flytte den relevante delen innen en armlengdes avstand fra den ansatte. Ved å eliminere unødvendig bevegelse, vil det ta kortere tid å utføre oppgaven og dermed også senke hele produksjonstiden. Et verktøy for å eliminere bevegelse er GEMBA, hvor man går gjennom prosessen, ser og spør om hva som skjer ved hvert steg (se figur 82).



Figur 82 – GEMBA hentet fra <https://kanbanize.com/lean-management/improvement/gemba-walk/>

Ekstra prosessering

Dette steget handler om å kontrollere at det ikke blir gjort mer arbeid enn nødvendig; med andre ord, dersom en handling ikke er verdiskapende for kunden vil det være sløsing av ressurser og tid for bedriften (Skhnot, 2017). Her kan iverksetting av ny teknologi komme godt med. Det hender at en prosess er unødvendig komplisert på grunn diverse begrensninger, for eksempel eldre maskiner eller kompliserte oppgave som krever flere arbeidere.

Ved påføring av gips hender det at to helsearbeidere må involveres for å holde bandasje eller hjelpe til med påføring av kalkkluter/plastbandasje ettersom det er viktig at det blir lagt riktig og nøyaktig. Innføring av 3D-teknologi vil effektivisere prosessen betydelig, og vil kun kreve at kun én helsemedarbeider assisterer med 3D-skanning, og at prosessen deretter vil fullføres automatisk uten behov for tilsyn.

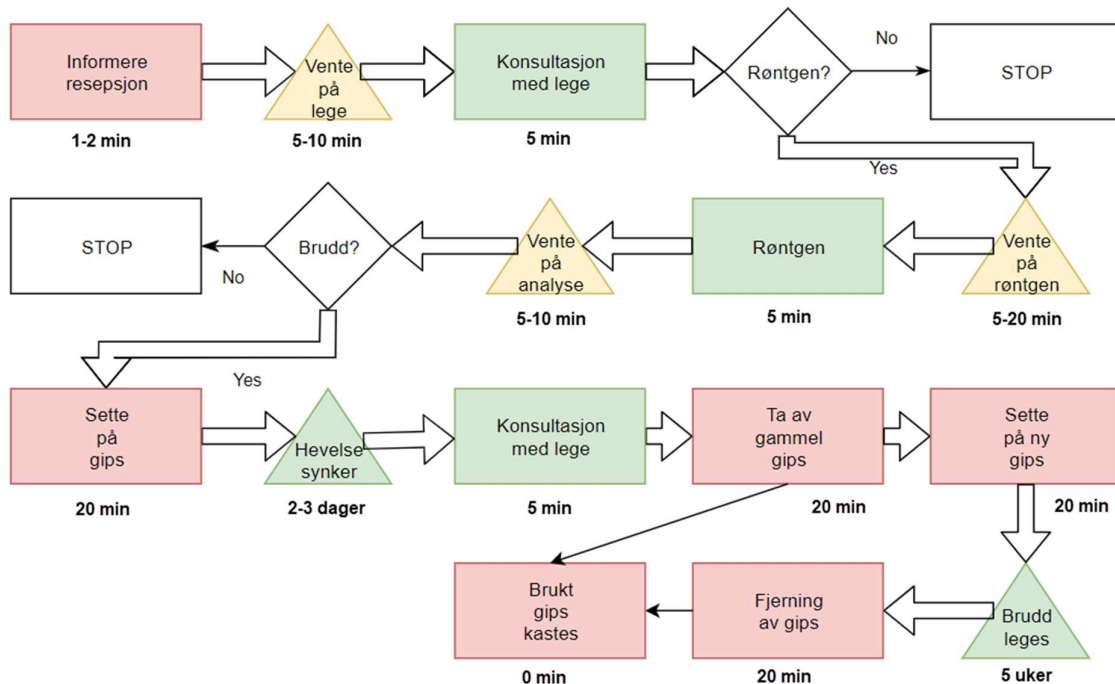
4.5.2 Kartlegging av sløsing i dagens gipsprosess

Figur 83 viser gipsprosessen som beskrevet tidligere i oppgaven, men fargekodet med områder som representerer delene av prosessen med sløsing som må elimineres eller minskes. Kartleggingen er basert på muligheten av å iverksette ny teknologi.

Oversikt over farger og deres betydning:

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

Tabell 6 - Fargekoder



Figur 83 – Kartlagt sløsing med hensyn til ny teknologi (Egen figur)

Verdiskapende aktiviteter

Figur 3 viser en verdiskapende aktivitet i prosessens «main flow»:

- Konsultasjon med lege
- Røntgen
- Konsultasjon med lege
- Hevelse synker
- Brudd leges

Disse aktivitetene beholdes derfor når det vurderes å gjøre endringer.

Aktivitetene «hevelse synker» og «brudd leges» kan ikke minskes ettersom det er opp til kroppen til hver enkelt pasient. Selv om det er venting er det en verdiskapende prosess, ettersom bruddet leges i disse periodene.

Nødvendig sløsing

Aktiviteter av denne typen inkluderer:

- Vente på lege
- Vente på røntgen
- Vente på analyse av røntgenbilder

Venting er sløsing fordi det ikke er verdiskapende, men aktivitetene er alle nødvendige fordi sykehusets effektivitet baseres på at pasienter er villig til å vente på helsepersonellet. Minimering av

ventetiden skjer vet at helsepersonellet jobber så effektivt de kan, som kan forbedres ved hjelp av lean i deres arbeid (selv om det ikke er en produksjonsprosess vil lean verktøy være nyttig i langt flere sammenhenger).

Unødvendig sløsing

Prosessen viser til seks aktiviteter som anses som unødvendig sløsing:

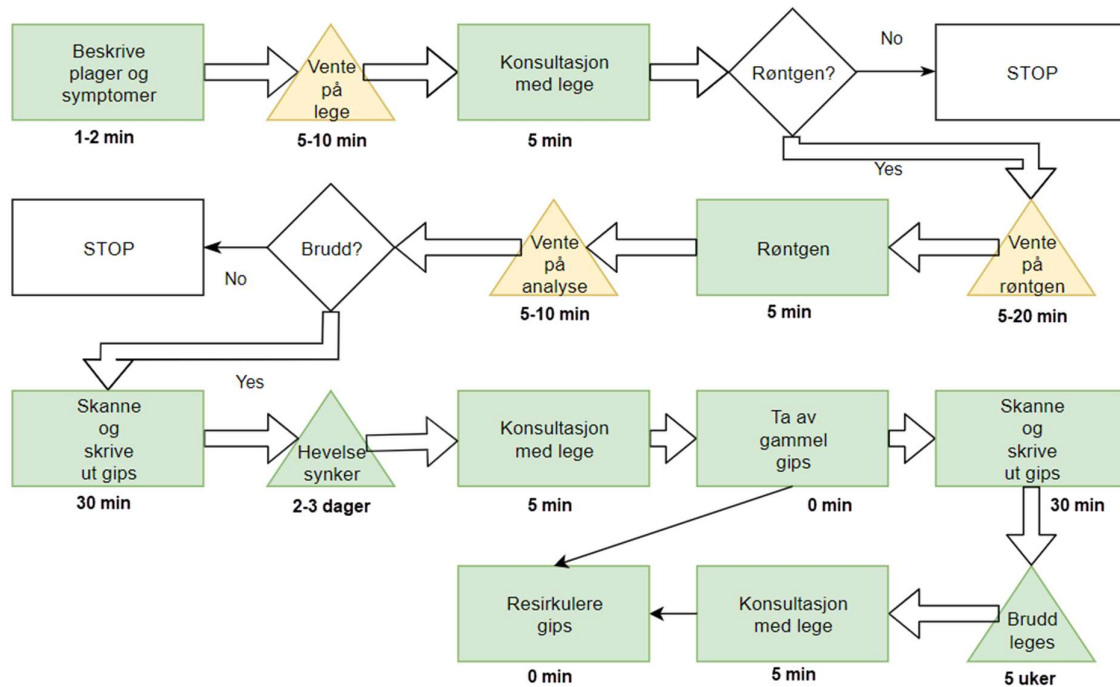
- Informere resepsjon
- Sette på gips
- Ta av gammel gips
- Sette på ny gips
- Fjerning av gips
- Brukt gips kastes

Å informere resepsjonen kan anses som unødvendig sløsing ettersom et enkelt automatisert køsystem kan innføres i stedet. Pasienter som ankommer legevakten rangeres som rød, gul eller grønn, hvor rød er mest alvorlig og blir tatt vare om med en gang, pasienter i kategori gul får komme inn til legen så snart som mulig og kategori grønn er pasienter med mindre alvorlige plager blir tatt hånd om når det ikke er kategori rød og gul pasienter (Astrup & Schjelderup, 2009). Per dags dato blir denne rangeringen gjort av helsepersonellet i resepsjonen på bakgrunn av symptomer fortalt av pasienten. Ettersom de tre kategoriene allerede er godt definert, vil en enkel algoritme kunne sortere pasientene ut ifra symptomene se skriver opp. Videre kan maskinlære utvikle algoritmen til et høyt effektivt sorteringssystem. Investering i et slikt system vil frigjøre mer helsepersonell og videre effektivisere deres bruk av tid.

De neste tre punktene erstattes av to enkle skanner av håndleddet, og ettersom plasten kan resirkuleres vil dette føre til mindre avfall av materiale, så i stedet for å kaste gipsen blir det sendt til resirkulering, som videre senker sløsing av materiale.

4.5.3 Process map ved implementering av 3D-teknologi

Ved implementering av automasjon og 3D-teknologi kan gipsprosessen drastisk endres. Nedenfor vises et prosesskart over den nye gipsprosessen hvor lean prinsipper er implementert for å senke sløsing.



Figur 84 - Gipsprosess med ny teknologi (Egen figur)

Tidsbesparing

Hvor å sammenlikne ulikheter mellom de to prosessene er tid en viktig faktor se nærmere på. Tabell 7 viser hvordan total tid, tid benyttet av helsepersonell og tid brukt av automatiserte prosesser devierte med implementering av systemer. Aktivitetene «hevelse synker» og «brudd leges» er ikke tatt med i beregningen ettersom de ikke foregår på sykehuset og vil ha stor innvirkning på det totale tidsbilde. Tider vist i figurer 83 og 84 er antatte tider. Ved skanning og utskrivning av gips antas det at det tar 3 minutter å skanne og 27 minutter deretter for ferdig utskrevet gips fordi sykehuset krever en prosess som bruker maks 30 minutter. Ettersom noen av aktivitetene har varierende tider vises både beste og verste utfall i tabell 2.

	Tid benyttet av helsepersonell (minutter)	Tid benyttet av automatiserte prosesser (minutter)	Annet (minutter)	Total tid (minutter)	Total tid (timer)
Dagens prosess	96/97	0	15/40	111/137	1.85/2.28
Foreslått prosess	26/31	55/56	15/40	96/122	1.6/2.03

Tabell 7 – Tidsberegninger

Beregningene viser at implementering av den nye prosessen vil senke tid benyttet av helsepersonell i prosessen med 68-73%. Videre viser beregningene at total syklustid for prosessen synker med 11-14%. Ved å bruke rundt 70% mindre tid på å gipsprosessen vil helsepersonell ha tid til å se flere pasienter i samme tidsperiode, som vil senke ventetiden (nødvendig sløsing, som vist i figur 3) og dermed den generelle effektiviteten til prosessen.

Kostnadsbesparelser

En annen effekt av mindre tid benyttet av helsepersonell er lavere kostnader. Ettersom det ikke er behov for en til to ansatte for å legge gips, vil det lede til kostnadsbesparelser. Kostnad av 3D-printer per dags dato finnes relativt rimelig og vil bli tilbakebetalt hurtig. Vedlikeholdskostnader for 3D-printer er også lave.

Kunde verdi

Produktet vil ha økt kunde verdi fordi brukeropplevelsen ved en 3D-printet protese vil forbedres betraktelig. Til å begynne med vil kunden kunne dusje med protesen uten problem. Med dagens materiale kan ikke gipsen komme i kontakt med vann, fordi materialet da mister styrken og formen sin. Dagens gipsprosess resulterer i gips som dekker store deler hud, og med perspirasjon, ingen vasking og nærhet til forskjellige omgivelser bygges en bakterieflora som burde unngås. Med en 3D-printet protese vil huden kunne puste på et langt større område, og ettersom en kan dusje med protesen på vil ikke en farlig bakterieflora bygges opp. Muligheten for trykksår er heller ikke til stedet, en komplikasjon som trekker fra brukeropplevelsen i de tilfellene det oppstår.

Kontinuerlig forbedring

Gipsing slik det er gjort i dag har blitt gjort likt siden begynnelsen av 1800 tallet (Oster, 2012). Flere aspekter av metoden kan dateres tilbake til det gamle Egypt. Med den teknologiske utviklingen industrier verden over der i dag er det rart at prosessen ikke har blitt effektivisert tidligere. Det er på tide å implementere ny teknologi for å forbedre prosessen og eliminere ulempene ved de gamle metodene. Ved implementering av lean prinsipper vedliggjer også kontinuerlig forbedring av prosessen. Å se etter områder som kan forbedres og fortsette å effektivisere.

5 Diskusjon

Skanning av hånd med Intel kamera og programvaren RecFusion ble gjort med kameraet i en statisk posisjon og at personen som hold opp hånden roterte 360 grader. Etter et utvidet søk på hvordan best bruke programvaren viser det seg at de fleste som bruker samme oppsett utfører skanningen motsatt; Objektet (hånden) forblir statisk og kameraet er dynamisk ved rotering rundt objektet. Implementering av denne teknikken kan ha ført til andre resultater for skanneren. På en annen side ville det ha vært utfordrende å finne et åpent område som tillatte en fri radius på 2 meter fra skannerobjektet for best mulig skann.

I motsetning til skann utført med iPhone, ble ikke skann med Intel RealSense utført med varierende lysscenarier. Litteraturstudiet i kapittel 2 understreker viktigheten av riktig lys under skanning. Før bruk av Intel RealSense kameraet blir neglisjert burde testing av skann med gunstig belysning undersøkes.

Toleranse på radius rundt protesen er en utfordring. Etersom hånden blir større og mindre i løpet av dagen med henhold til temperatur og vanninnhold vil toleransen være viktig for god passform og brukeropplevelse. I denne oppgaven ble det ikke funnet litteratur som støttet en satt verdi, men for å komme i mål med konseptet må denne variabelen løses. Videre kan det være hensiktsmessig å utføre testing av ergonomi ved ulike toleranser. Testen kan også kartlegge hvordan ergonomien føles over en lenger tidsperiode, samt hvordan en eventuell støttestrømpe på innsiden påvirker brukeropplevelsen.

Fra et automatiseringsperspektiv er det mulig at implementering av maskinlære kan løse noen av utfordringene som denne oppgaven har møtt på. Det underliggende temaet for konseptet til oppgaven er skreddersydde løsninger til hver pasient, som vil si at systemet vil møte noe nytt hver gang en arm skal skannes. Prosessen må derfor være bygd for å håndtere deviasjoner og avvik. Maskinlære er teknologi som lærer av tidligere erfaringer, og blir bedre etter hvert bruk. Ved bruk av maskinlære kan en for eksempel lære programmet hvordan et kritisk område kan repareres. Maskinlære har blitt populære de siste årene, og blir brukt som et forbedringsverktøy i en rekke ulike industrier, så hvorfor ikke til brukertilpasset gips?

6 Konklusjon

Sammenlikning av resultatene fra skanning med ulike kombinasjoner av apparater og metoder viste et tydelig bedre skann med bruk av iPhone og tredjeparti-programvaren Scandy Pro ovenfor bruk av Intel RealSense og tredjeparti-programvaren RecFusion. Dette er interessant, fordi løsningen er helt gratis (dersom telefonen allerede er tilgjengelig), og er rettet mot den private sektoren og de som gjør 3D-skanning som en hobby. Intel RealSense koster 4225 NOK (RS Components AS), og lisens til RecFusion koster 1589 NOK (ImFusion GmbH), som betyr en sum på 5814 NOK for en kombinasjon rettet mot et kommersielt nivå. Dette tyder på at markedet rettet mot den private sektoren har kommet litt lenger i utviklingen, og at utstyr med samme kvalitet og en rimelig prisklasse ikke har nådd det kommersielle markedet enda.

Mangel på tilgang til verksted og bruk av 3D-printere over en lengere periode under sosial distansering for COVID-19, samt manglede evne til å treffe andre som hjalp til i prosjektet satte en stopper for ulike resultater. Den motoriserte skanneren har ikke blitt koblet sammen og testet, noe som vil være den siste styrketesten til designet og de ulike løsningene som er tatt i bruk.

Topologioptimalisering og styrkeberegninger har heller ikke blitt utført grunnet omstendighetene, hvorav begge er faktorer i bestemmelse av kvaliteten på løsningene samt eventuelle feil.

Modelleringsverktøyet brukt under oppgavens forløp, Siemens NX, har verktøy tilgjengelig for å prosessere en punktsky og produsere en protese av god kvalitet. Ulempen med programvaren er at en operatør må utføre mange av funksjonene som trengs for å produsere protesen. Mangel på et konsekvent koordinatsystem som plasserer modellen er ikke et problem når det er en operatør til stede, men dersom en automatisert prosess er målet, vil ikke Siemens NX være det rette modelleringsverktøyet slik som programvaren fungerer i dag.

I mediene i dag er mye snakk om underbemanning i offentlig helsesektor, og hvordan det påvirker kvaliteten på arbeid og omsorg. Ved implementering av lean prinsipper og process mapping kan gipsprosessen ved Ålesund Sykehus effektiviseres med rundt 70% i henhold til tid, hvor ressursene kan bli distribuert etter behov. Videre viser analyse av de 8 typer sløsing at sykehuset er planlagt for høy effektivitet, men at det kan videreutvikles med ny teknologi.

Prototypen som ble konstruert under forløpet av oppgaven resulterte i en effektiv og billig løsning. Resultater som sammenliknet skann med og uten skanner viste tydelige forbedringer, og skanningen tok mindre tid og presisjon fra operatøren. Ved å ta i bruk lærdommen og metodene som gav best resultater i tidligere oppgaver har denne oppgaven kunnet jobbe med svake områder, som 3D-skanning og utvikling av en verdiskapende prototype, og kommet en lang vei mot et konsept som vil komme til nytte ved Ålesund sykehus.

7 Bibliografi

- 3DNet. (2020, Mai 19). *3DNet*. Hentet fra NinjaTek NinjaFlex 1.75: <https://3dnet.no/collections/1-75/products/ninjaflex-1-75?variant=6087024963>
- Apple Inc. (2020, Mars 18). *Apple Newsroom*. Hentet fra Apple unveils new iPad Pro with breakthrough LiDAR Scanner and brings trackpad support to iPadOS: <https://www.apple.com/newsroom/2020/03/apple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/>
- Astrup, S., & Schjelderup, E. (2009, Mars 3). *Sykepleien*. Hentet fra Rød, gul eller grønn standard: <https://sykepleien.no/forskning/2009/03/rod-gul-eller-gronn-standard>
- B3D S.C. (u.d.). *Outlet3D.eu*. Hentet fra Reference Points 3MM - Markers - 3D Scanning: <https://outlet3d.eu/de/3d-accesories/137-reference-points-3mm-markers-3d-scanning.html>
- Blakemore, E. (2019, Juli 29). *National Geographic*. Hentet fra Lasers are driving a revolution in archeology: <https://www.nationalgeographic.com/culture/archaeology/lasers-lidar-driving-revolution-archaeology/>
- Bryhn, N. (2019, November 28). *Lommelegen*. Hentet fra Håndleddsbrudd: <https://www.lommelegen.no/muskel-ledd-og-skjelett/beinbrudd/artikkel/handleddsbrudd/68999327>
- Cardinal, D. (2017, September 14). *Extreme Tech*. Hentet fra How Apple's iPhone X TrueDepth Camera Works: <https://www.extremetech.com/mobile/255771-apple-iphone-x-truedepth-camera-works>
- Chakravorty, D. (2019, Februar 14). *All3DP*. Hentet fra STL File Format (3D Printing) - Simply Explained: <https://all3dp.com/what-is-stl-file-format-extension-3d-printing/>
- Christensson, P. (2015, Februar 03). *TechTerms*. Hentet fra FPS Definition: <https://techterms.com/definition/fps>
- Christensson, P. (2019, Mai 17). *TechTerms*. Hentet fra RGB Definition: <https://techterms.com/definition/rgb>
- Clearpath Robotics. (2016, Mai 5). *OTTO Motors*. Hentet fra LEAN Manufacturing: Eliminating the Transportation Muda: <https://ottomotors.com/blog/eliminating-transportation-muda>
- enykeev. (2019, Mars 12). *Thiniverse*. Hentet fra ODrive Case: <https://www.thiniverse.com/thing:3486256>
- Flynt, J. (2019, April 10). *3DInsider*. Hentet fra Types of 3D Scanning Technologies: <https://3dinsider.com/3d-scanning-technology/>
- Flynt, J. (2020, Januar 10). *3DInsider*. Hentet fra Structured Light 3D Scanning: What is it and how does it work?: <https://3dinsider.com/structured-light-3d-scanning/>
- Gihleengen, B. E., Thoresen, L., & Grimsrud, K. A. (2007). *Semiconductor Lasers*. Trondheim: NTNU.
- GIS Geography. (2020, April 9). *GIS Geography*. Hentet fra A Complete Guide to LiDAR: Light Detection and Ranging: <https://gisgeography.com/lidar-light-detection-and-ranging/>
- Harish, A. (2020, Mars 10). *Simscale*. Hentet fra Finite Element Method - What is it? FEM and FEA Explained: <https://www.simscale.com/blog/2016/10/what-is-finite-element-method/>

- ImFusion GmbH. (u.d.). *RecFusion*. Hentet fra User Guide: <https://www.recfusion.net/index.php/en/tutorial>
- ImFusion GmbH. (u.d.). *RecFusion*. Hentet fra Download RecFusion Pro 2.0.9 (64-bit): <https://www.recfusion.net/index.php/en/download>
- Intel Corporation. (u.d.). *Intel Real Sense*. Hentet fra Depth Camera D435: <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>
- Knight, J. (2020, Mars 31). *Gadget Hacks*. Hentet fra LiDAR vs. 3D ToF Sensors - How Apple Is Making AR Better for Smartphones: <https://ios.gadgethacks.com/news/lidar-vs-3d-tof-sensors-apple-is-making-ar-better-for-smartphones-0280778/>
- Lachance, E. A. (2018, April 13). *Worximity*. Hentet fra Types of Waste in Lean Manufacturing - Part 1 - Defects Waste: https://blog.worximity.com/en/industry-4_0/defects-waste-in-lean-manufacturing
- Lachance, E. A. (2018, April 13). *Worximity*. Hentet fra Types of Waste in Lean Manufacturing - Part 2 - Overproduction Waste: https://blog.worximity.com/en/industry-4_0/overproduction-waste-in-lean-manufacturing
- Lachance, E. A. (2018, April 13). *Worximity*. Hentet fra Types of Waste in Lean Manufacturing - Part 3 - Waiting Waste: https://blog.worximity.com/en/industry-4_0/waiting-waste-in-lean-manufacturing
- Lachance, E. A. (2018, April 13). *Worximity*. Hentet fra Types of Waste in Lean Manufacturing - Part 6 - What Is Inventory Waste?: https://blog.worximity.com/en/industry-4_0/inventory-waste-in-lean-manufacturing
- Merriam-Webster. (2020, Mai 19). *Merriam-Webster*. Hentet fra Augmented reality: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/augmented%20reality>
- Merriam-Webster. (2020, Mai 19). *Merriam-Webster*. Hentet fra Virtual Reality: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/virtual%20reality>
- Merriam-Webster. (2020, Mai 19). *Merriam-Webster*. Hentet fra Voxel: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/voxel>
- NEHP. (2019, Februar 12). *NEHP, Inc*. Hentet fra 8 Wastes of Lean Construction Part 4: Non-utilized Talent: <https://blog.cpsgrp.com/nehp/8-wastes-of-lean-non-utilized-talent>
- O'Kelly, J. (2017, Desember 30). *Manufacturing Automation*. Hentet fra Seven wastes of Lean and how to eliminate them: <https://www.automationmag.com/7872-seven-wastes-of-lean-and-how-to-eliminate-them/>
- Oster, G. (2012). *Hankering for History*. Hentet fra History of the Cast: <https://hankeringforhistory.com/history-of-the-cast/#:~:text=>
- P., A. (2017, September 8). *3Dnatives*. Hentet fra The Complete Guide to 3D Scanners using Laser Triangulation: <https://www.3dnatives.com/en/3d-scanner-laser-triangulation080920174-99/>
- Rogers, T. (2015, Oktober 7). *Creative Mechanisms Blog*. Hentet fra Everything You Need To Know About Polyactic Acid (PLA): <https://www.creativemechanisms.com/blog/learn-about-polylactic-acid-pla-prototypes>

- Rouse, M., Ferguson, K., & Steele, C. (2019). *Search Virtual Desktop*. Hentet fra GPU (Graphics Processing Unit): <https://searchvirtualdesktop.techtarget.com/definition/GPU-graphics-processing-unit>
- RS Components AS. (u.d.). *RS*. Hentet fra Intel RealSense Depth Camera D435: https://no.rs-online.com/web/p/depth-cameras/1720981?cm_mmc=NO-PLA-DS3A-_-google-_-CSS_NO_NO_Catch_All-_-Catch+All-_-PRODUCT_GROUP&matchtype=&pla-379154728750&gclid=CjwKCAjw5Ij2BRBdEiwA0Frc9X3a-6aXiwEhBzF5iZAhqgSSd2tH8_GcPSDj03_44opZwaXeAFiOgBoCy24QAvD_Bw
- Sculpteo. (2020, Mai 19). *Sculpteo*. Hentet fra PLA (Polylactic Acid) Biodegradable Filament: <https://www.sculpteo.com/en/glossary/pla-definition/>
- Siemens Industry Software Inc. (u.d.). *Siemens*. Hentet fra Material Extrusion: <https://www.plm.automation.siemens.com/global/en/our-story/glossary/material-extrusion/53981>
- Sjåstad, D., Alvestad, V., & Nedrelid, O. (2019). *Brukertilpasset gips*. Ålesund: NTNU.
- Skhmot, N. (2017, August 5). *The Lean Way*. Hentet fra The 8 Wastes of Lean: <https://theleanway.net/The-8-Wastes-of-Lean>
- Thorsen, A. D., & Gya, M. (2017). *Spesialtilpasset gips for håndleddsbrudd ved bruk av dagens 3D-teknologi*. Ålesund: NTNU.
- Tilman, M. (2020, Mars 8). *Pocket-Lint*. Hentet fra What is a ToF camera? The Time-of-flight sensor explained: <https://www.pocket-lint.com/phones/news/147024-what-is-a-time-of-flight-camera-and-which-phones-have-it>
- Universitetet i Oslo. (u.d.). *Universitetet i Oslo*. Hentet fra Gips: http://meddev.uio.no/elaring/lcms/traumer/frakturer/generelt_om_frakturer/frakturbehandling/konservativ_behandling/gips/gips.xml?menuItemIndex=7
- V., C. (2019, August 8). *3Dnatives*. Hentet fra Laser Scanner vs Structured Light Scanner: which should you choose?: <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/>

