

Träningsmodell för operation av esofagusatresi

Bettinger, Hilma (BME20) & Knubbe, Ebba (BME20)

Sammanfattning—It is estimated that in Sweden, each year, 25 infants are born with the defect known as Esophageal Atresia. As a result the affected has trouble breathing and ingesting food, necessitating surgery within the first few days. Today most surgeries are done through open surgery leaving the infant more vulnerable. Experts are suggesting minimal invasive surgery. However, since this is a complex procedure this requires extensive training of the surgeons. The aim of this project is to develop a realistic material that can be used in varying surgical simulators. The project aspires to assist the development of Esophageal Atresia surgeries, with the ultimate goal of establishing thoracoscopic techniques as the standard approach.

The project was carried out in collaboration with Skåne University Hospital Lund at the department of Pediatric Surgery and 3D Centrum. Using brushing techniques and 3D printed casting molds, two different silicone models were created, both with different distances between the proximal and distal end of the esophagus. Providing the two most important layers found in the esophagus, the models were found useful and realistic by surgeons Helena Árnadóttir and Kristine Hagelsteen. Suturing, cutting and aesthetics were found improved compared to Symulus existing training model that in this project was used as a reference model. This project opens up for future development of surgical models.

I. INTRODUKTION

ESOFAGUSATRESI är ett tillstånd som drabbar ca 25 nyfödda i Sverige varje år. Det är därmed ett relativt ovanligt tillstånd som är mycket allvarligt och kräver operation inom några dagar efter födseln. Esofagus- (matstrupe), atresi (naturlig kanal eller öppning saknas), är en missbildning där matstrupe ej är korrekt kopplad till magsäcken. Oftast innebär tillståndet att matstrupens övre del slutar blint och att den undre delen är kopplad till trakea, en fistel. De olika missbildningarna visas i Figur 1. Detta leder till att spädbarnet har svårt att svälja saliv och slem på ett korrekt sätt, sätter i halsen och får svårt att andas. Symptomen är tydliga vilket gör att tillståndet upptäcks tidigt. Figur 5 visar operationen som sammanfogar ändarna med varandra. Om en fistel finns försluts denna. [1]

A. Esofagus

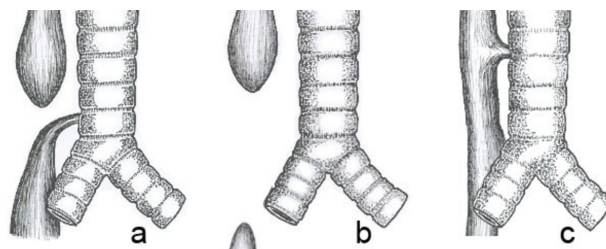
Esofagus (Matstrupen) möjliggör transporten av mat och dryck från svalget ner till magsäcken. Den sträcker sig, enligt Helena Árnadóttir, specialist i barn & ungdomskirurgi vid Skånes universitetssjukhus, ungefär 18 cm från svalget ner till magsäcken, med en diameter på 6-7 mm, på ett nyfött barn. Esofagus ligger mellan lungorna och bakom hjärtat.

Inlämnat den 5 juni 2023

E-mejladress: {ebba.knubbe@hotmail.com, hilmabettinger@gmail.com}

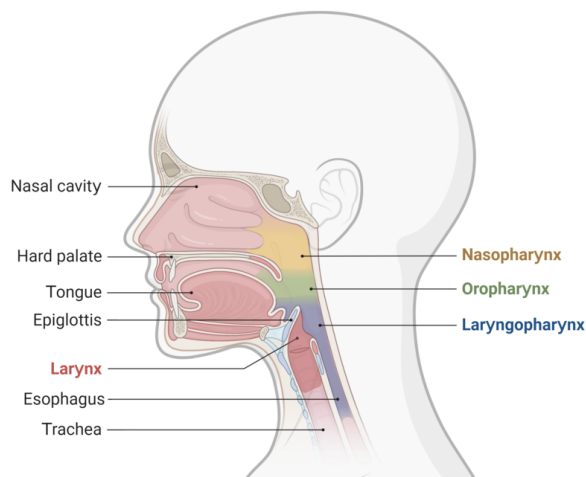
Teknisk handledare: Einar Heiberg, 3D-centrum

Engelsk titel: Educational Model for Esophageal Atresia



Figur 1. Vanliga anatomiska modeller av esofagusatresi illustreras. a) Vanligaste typen av missbildning med Trakeoesofageal fistel. b) Long-Gap esofagusatresi. c) Endast Trakeoesofageal fistel. Hämtad från: Spitz L. Oesophageal atresia. CC BY-SA: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5> [2]

Larynx and Pharynx Relationship: Sagittal View

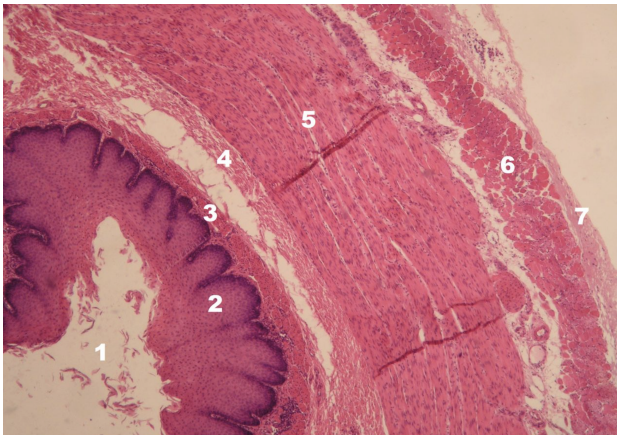


Figur 2. Munhålans anatomi. Hämtad från Wikimedia. CC BY-SA: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5> [3]

Esofagus vägg består av ett antal olika lager med olika egenskaper. Det första kallas Mucosa som ger matstrupen stöd och vaskulär support, men är väldigt skört. Näringsämnen från maten passerar in i kapillärerna i Mucosan. Mucosan avslutas med ett tunnare muskellager. Submucosa är ett lager som består av blodkärl, fetter, nerver och körtlar. Muscularis propria består av två muskellager, ett cirkulärt och ett longitudinellt. Ytterst sitter ett löst lager som kallas Adventitia, som består av blodkärl, fetter och nerver. Se Figur 3. [5]

Om man skulle ta ut esofagus och känna på den så skulle det inte märkas att den består av alla dessa lager. Enligt Dr. Árnadóttir, känns den snarare som ett lager med en täckande skör film på insidan, se Figur 4.

Framför esofagus sitter trachea (luftstrupen). Enligt Dr. Árnadóttir är längden på trachea på ett nyfött barn ca 4-5



Figur 3. Matstrupens lager illustreras. 1-Lumen, 2-Epithelium, 3-Mucosa, 4-Submucosa, 5-Muscularis externa, 6-Extern muskelvävnad, 7-Adventitia. Hämtat från WikiLectures. CC BY-SA: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5> [6]

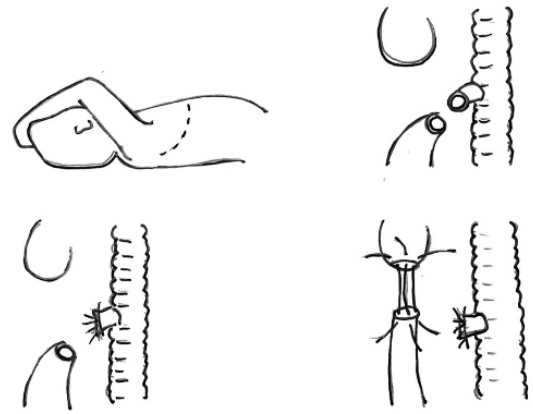


Figur 4. Bild på verklig matstrupe från gris. Hämtad från Wikimedia. CC BY-SA: <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5> [7]

cm från stämbanden till carina, samt har en diameter på 8-10 mm.

B. Operationen

Idag utförs majoriteten av operationerna genom öppen kirurgi där man går in från sidan under armhålan, se Figur 5. Kirurgen sårar på revbenen för att komma åt att laga missbildningen, dvs både försluta eventuell fistel och sammanfoga esofagus båda ändar. Denna metod fungerar men är invasiv och leder till stor påfrestning för barnet. En stor utmaning idag är också hur operationen med Long Gap esofagusatresi, se Figur 1 (b), där det är stora avstånd mellan distala och proximala ändarna av esofagus, ska göras på bästa sätt. Operationen måste oftast vänta för att barnet ska hinna utvecklas. Då det inte går att koppla ihop de två ändarna av matstrupen vid operationen används ofta tunntarm eller tjocktarm från barnet mellan de två matstrupeändarna. I vissa fall lyfts delar av magsäcken upp i bröstkorgen [9]. Det sistnämnda är enligt Dr. Árnadóttir inte optimalt då barnet får leva med magsäcken där hela sitt



Figur 5. Beskriver operationen av de vanligaste missbildningarna.

liv. Denna typ av operation innebär också stora påfrestningar för barnet.

Runt om i världen börjar kirurger genomföra esofagusatresi-operationer genom titthålsteknik s.k. thorakoskopi och även i Sverige ser man att denna metod är skonsammare för barnet. Dr. Árnadóttir förklarar metoden som följer. Metoden innebär att kirurgen gör tre små incisioner och opererar m.h.a. smala instrument (laparaskopi-instrument), samt en kamera som är 5 mm i diameter. Kirurgen följer proceduren via en videoskärm som är kopplat till kameran. Thorakoskopi är skonsammare för barnen och ger lägre risk för nervskador, sned rygg, sårruptur och infektion. Metoden öppnar även nya möjligheter att hjälpa barn med Long gap esofagusatresi då det ger möjlighet för att få ihop matstrupsändarna på bästa sätt och minskar behovet av att dra upp magsäcken upp i bröstkorgen. Bevarandet av esofagus på barn med Long Gap esofagusatresi är möjligt med bland annat Foker processen som används på Boston Children's Hospital. Med denna process utnyttjar de celltillväxten och organförlängningen som sker vid ökad kraft i axiell riktning. Genom att stretcha och spänna strupen växer den och går efter några dagar att sammanfoga. Processen kan göras genom öppen kirurgi men nu även minimalt invasiv genom thorakoskopi. Istället för att gå in via ett snitt i sidan och sära revbenen så gör man flera mindre snitt där man för in proberna och en kamera. Ett antal stygn placeras i den distala och proximala änden av esofagus, men istället för ett spänningssystem på utsidan av kroppen använder man revbenen och stretchar vävnaden på insidan. Varje vecka spänns stygnen lite stramare tills ändarna är tillräckligt nära för att fästas i varandra. Det minimalt invasiva ingreppet minskar risken för slitningar och att spänningssystemet går sönder. Andra fördelar är att barnet inte behöver ligga helt stilla och sövas som med den traditionella öppna operationen. Sammanfattningsvis är det eftertraktat med en minimalt invasiv process som minskar tiden barnet behöver intensivvårdas och snabbar på återhämtningsprocessen [10].

Vid samtal med med Dr Árnadóttir och kollegan Kristine Hagelsteen, överläkare i barn- & ungdomskirurgi vid Skånes

universitetssjukhus, har denna process legat till grund för vad man har som mål att åstadkomma även här i Sverige.

C. Modellens lager

Enligt Dr. Árnadóttir, anses minst två lager vara nödvändigt för att resultera i en modell med relevanta egenskaper. Ena lagret ska representera mucosa, som ska vara skört. Det är relevant att ha med eftersom stygn i endast mucosa inte kommer hålla när kirurgen försöker dra ihop ändarna mot varandra. Det andra lagret ska representera muskellagret och adventitia. Detta lager behöver vara starkare men också mjukt och elastiskt, och är mycket viktigt eftersom det ligger till grund för att stygnen ska sitta kvar.

D. Modellens material

I en studie som gjordes 2021 skapades en simulator av tarmarna. Den gjordes för att användas av läkare för att träna på tarmoperation och ska enligt artikeln varit användbar i utbildningen av kirurger.

Simulatorn skapades med olika lager av Smooth-on Silicon, samt 3D-printade formar för gjutningen av modellen. Formerna printades i materialet generisk polyaktid (polymjölksyra). Materialet som användes för att simulera hud var Ecoflex 00-30 silicone inbäddat i en mesh. För simuleringen av fett användes Ecoflex Gel och för att simulera muskler användes återigen Ecoflex 00-30 silicone, med röd färg adderat [11].

E. Alternativ metodteknik

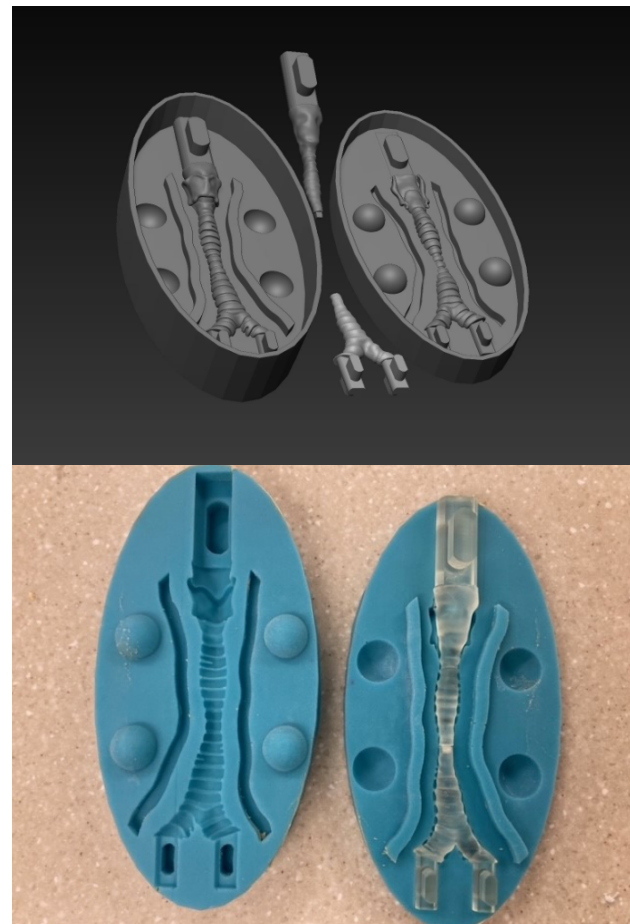
Inför detta projekt kontaktades Christian Hanson, ingenjör inom simulationsteknik på Mayo Anatomic Modeling Unit som under ledning av Dr. Jonathan Morris delade med sig av sina kunskaper gällande att printa en form, samt gjutningstekniker.

Vid skapandet av hans trachea-modell användes en penselteknik för att möjliggöra den ihåliga struktur som önskas. För att skapa struktur och styrka i materialet, och därmed göra det möjligt att sy i materialet utan att förstöra det, användes en s.k. "power mesh" i nylon (struktur-nät). För att möjliggöra behovet av flera lager använde han en teknik med en inverterad gjutform, se Figur 6. Hansons slutgiltiga resultat visas i Figur 7.

Trots att Hanson här själv använder en inverterad gjutform så rekommenderar han ändå endast penselteknik för detta projekt. Han menar att den inverterade modellen förmodligen är ett onödigt steg. Däremot rekommenderar han att esofagusmodellen kan göras med liknande penselteknik och struktur-nät som hans trachea modell.

F. Simulatorn

Under 1990-talet tog tithålskirurgin fart och har sen dess spridit sig över Sverige och världen snabbt [13]. Ett hinder på vägen till utförandet av thorakoskopiska operationer i Sverige är bristande kompetens. För att operationerna ska bli möjliga finns det ett behov av träning. Ett flertal studier har visat att realistiska simulatorer som en del i utbildningen av läkare har stor potential och förbättrar inlärningsprocessen. Bland



Figur 6. Christian Hansons gjutform.



Figur 7. Färdig modell av Christian hanson

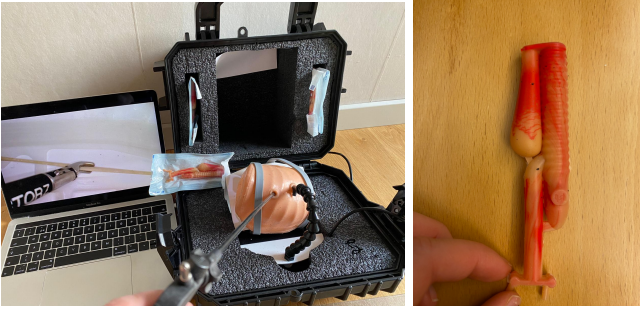


Figure 8. Symulus EA/TEF trainer (thoracoscopic simulator) från Nya Zeeland med tillhörande missbildning. I bild syns simulatorm uppkopplad till skärm.

annat vid kärl-operation, gynekologi och obestrik [14] [12]. Efter slutsatser som dessa har satsningen på bra och realistiska simulatorer ökat.

I september 2021 presenterade det Nya Zeeländska företaget Symulus en simulator där tanken är att förbättra utbildningen av esofagusatresi-operationer via thorakoskopi. Syftet med simulatorm är att öka kvaliteten på träningen jämfört med tidigare metoder där djurvävnad använts. Dessa tidigare tekniker innebär inte bara mycket svinn utan är även kostsamt och, trots biologisk grund, inte helt realistiskt. Simulatorm inkluderar idag en konstgjord modell av hela bröstkorgen med tillhörande matstrupe, luftstrupe och missbildning, se Figur 8. Missbildningen är gjort av ett mjukt, silikonliknande lager och är enligt Dr. Árnadóttir inte tillräckligt realistiskt för den kvalitativa utbildning som önskas. En smartplatta används för visualisering och modellen är även portabel vilket medför att kirurger kan öva vart som helst och när som helst [15].

Idag finns ingen realistisk simulator för utbildning av thorakoskopisk operation av esofagusatresi. Materialet på Symulus simulator är inte tillräckligt verklighetstroget och saknar bland annat två lager med olika egenskaper. Denna modell är dessutom för stor för att kunna representera ett spädbarns esofagus. Med inspiration från Dr. Árnadóttir och Dr. Hagelsteen, tidigare nämnd tarmmodell och hansons form- och gjutningsteknik samt med utgångspunkt ur Symulus simulator, presenterar vi två olika modeller av esofagus och trachea. Rapporten behandlar utvecklingen av dessa realistiska esofagus-och trachea-modeller. Metoden visar hur modellerna utvecklats för att känslan av att sy och klippa i de ska vara nära den verkliga känslan vid operation. Syftet med modellerna är att de kunna användas för att träna operation på flera olika varianter av missbildningen, de ska vara ekonomiskt gynnsamma samt bidra till kvalitativ träning av minimalt invasiva operationer. Vidare följer en utvärdering av modellerna baserat på målet, samt en diskussion där eventuella förbättringar och möjligheterna som finns med modellerna diskuteras.

II. METOD

Nyckeln i projektet var att hitta det materialkombination som gav den mest realistiska modellen. Således innebar tillvägagångssättet mycket experimenterande och test av materialkombinationer. Plastbitar från läskflaskor användes för att representera enkla gjutformer. Olika lager penslades på i olika kombinationer för att kunna dra slutsatser om hur vi bäst liknar



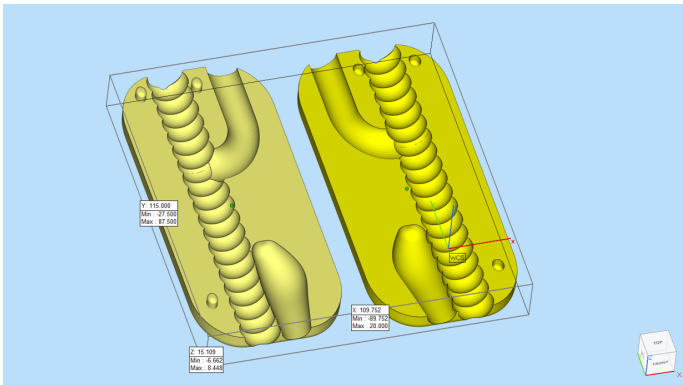
Figure 9. Ett ihopplock av provbitar som gjordes för att testa olika materialkombinationer.

de olika lagrena i esofagus. Vid val av power-mesh testades tre olika tyger. Elastisk stöbandage och tubifast köptes från apoteket, samt ett trikåtyg från Berndts i Lund. Tillsammans med testning av de två olika silikonerna utvärderades prototyperna av Dr. Árnadóttir. Dr. Árnadóttir ansåg att trikåtyg inbäddat i Ecoflex 00-30 Silikon med ett tunt lager Ecoflex Silikon Gel på den inre ytan liknade en verklig esofagus bra. Lindan och tubifast ansågs vara lite för elastiska samt att lindan var lite för tjock. Gel och silikon färgades i olika färg för att tydligt se skillnad på våra provbitar. I Figur 9 visas ett urplock av de provbitar som utvärderades. När rätt kombination av lager och power-mesh konstaterats ritades en första modell av esofagus i programmet Magics av Materialise. Därefter testades olika typer av skrivare och material för gjutformen. Silikonet stelnade bäst och snabbast när formen var gjord av generisk polyaktid i en skrivare från Raise3d E2. Dock blev gjutformen inte lika detaljerad och lagren som skapas vid utskriften gjorde tydliga spår i silikonet i form av linjer. Utskrift i SLA-skrivare med materialet resin gav en finare yta, men problem vid gjutning uppstod då silikonet inte alltid stelnade. Efter flera tester drogs slutsatsen att modellen i resin fungerar om ett första lager silikon läggs på och vilar för att sedan skrapas bort. Därefter stelnar silikonet som det ska vid gjutningen. Det sista steget i testningen innebar utskriften av vår slutgiltiga gjutform. Mått valdes efter rådgivning av Dr. Árnadóttir och med hjälp av Imsirovic skissades modellen och skrevs ut i Clear Resin.

Den slutgiltiga metoden för framtagen modell blev som följer. Missbildningen designas i programvaran CAD med programmet Magics av Materialise, se Figur 10. Två modeller designas, med olika avstånd mellan den distala och proximala änden av esofagus. Måtten till gjutformen syns i Figur 10.

För att tillverka modellerna användes Ecoflex Silicone Gel, Ecoflex 00-30 Silicone, THI-VEX till förtjockning samt pigment för att färga silikonet. Samtliga produkter beställdes från företaget Smooth-on.

Gjutformen printas i SLA-skrivare med materialet fotopo-



Figur 10. En skiss av missbildningen i Magic, Materialise används för den 3D printade modellen.

lymer resin som härddas. Gjutformen tvättas i isopropanol och värms därefter upp med UV-strålning till 60 grader. Innan modellen gjuts i formen krävs att ett första lager silikon appliceras i gjutformen. Detta lager vilar sedan på formen i två timmar. När lagret vilat, torkas det av med papper. Efter denna procedur är gjutformen klar att användas för tillverkning av projektets esofagusmodell.

Oljespray sprayas i botten på gjutformar. Ecoflex 00-30 silicone blandas efter Smooth-ons användarinstruktion. Ett tunt lager av Ecoflex 00-30 silicone, färgat med lämplig mängd *Medium Flesh* och förtjockat med några droppar THI-VEX penslas i botten och placerar gjutformen med silikonet upp och ner på. Power-mesh i form av trikåtyg (95% bomull och 5% elastan) förbereds genom att klippas i bitar som passar gjutformens design, se Figur 12. Ytterligare ett lager med Ecoflex 00-30 silicone och THI-VEX penslas på, nu färgat med *Blood*. Direkt efter, innan detta lager härddas, läggs de klippta power-mesh-bitarna på och trycks tätt intill alla kanter. Ytterligare ett lager silikon och THI-VEX, *Medium Flesh* penslas på innan allt låter härddas plant på bordet, se Figur 13.

Efter härdning blandas Ecoflex Silicone Gel efter Smooth-ons användarinstruktion.

Innan pensling lossas de båda del-modellerna från gjutformen för att sedan placeras tillbaka i formen igen. Silikonet färgas med *Light Flesh* och penslas på modellerna. Silikonet penslas dessutom lite utanför utformningen för att kunna fungera som lim mellan de båda delarna. Efter penslingen sammanfogas delarna. Under härdningsprocessen låts gjutformen placeras i vertikal riktning. Modellen placeras så att delen med fisteln hamnar överst. För rätt håll vid härdning se Figur 14.

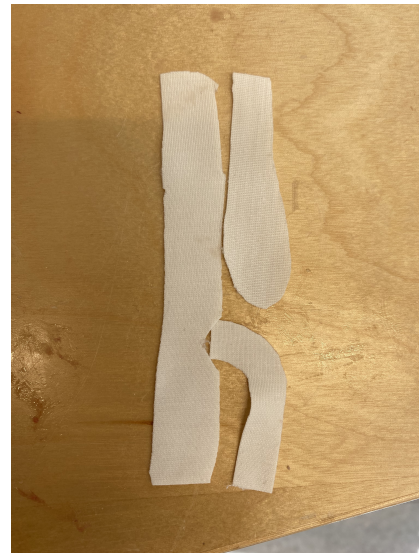
När allt härdat avlägsnas modellen från gjutformarna och eventuellt överflöd klipps bort. För resultat se figur 15.

III. RESULTAT

Två gjutformar, se Figur 16, av fotopolymer resin med olika design utvecklades för ändamålet. Dessa resulterade i tillverkningen av två olika esofagusmodeller. En modell representerar den vanligaste typen av missbildning, kännetecknad av en fistel med ett kortare avstånd till magsäcken, medan den andra modellen representerar ett längre avstånd mellan



Figur 11. Första lagret silikon applicerat i gjutformen.



Figur 12. Mallar av tyget som användes som power mesh.

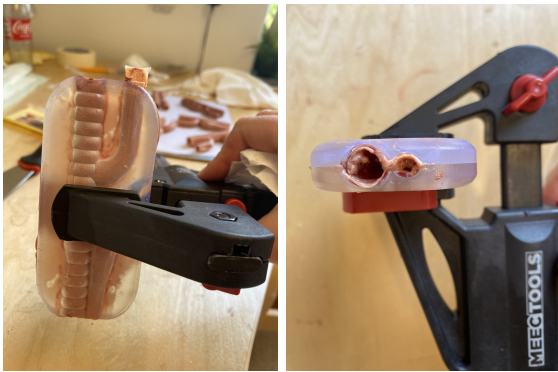
esofagus båda ändar, också med en fistel. Esofagusmodellen har en innerdiameter på 6-12mm och trachea en innerdiameter på 7-9 mm.

I Tabell 1 återfinns en utvärdering av utvecklade modeller i relation till Symulus modell enligt ett antal kvaliteter. Dr. Árnadóttir, som betygsatt utvecklade modeller menade att det finns betydligt större likhet med en verklig esofagus jämfört med Symulus modell. Däremot ansåg Dr. Árnadóttir att trachea-modellen sänker realismen vilket resulterade i en 2:a i graderingen av trachean, och alltså inte någon förbättring jämfört med Symulus modell.

Under sin testning av modellerna ansåg Dr. Árnadóttir att sutureringen av modellen liknade en verklig operation då de olika lagren i modellen på ett mer realistiskt sätt återspeglade den faktiska känslan. Om man syr för långt ut, släpper stygnen, precis som önskat. Vid klipp i modellen upplevdes motståndet likt det verkliga motståndet. Modellen liknar dessutom en



Figur 13. Det avslutande lagret gel.



Figur 14. Sammanfogningsprocessen av de båda delarna.

verklig esofagus estetiskt där Dr. Árnadóttir betygsätter estetiken till nästan helt identisk (9), se Tabell 1.

För att sammanfatta utvärderingen av Dr. Árnadóttir kan det konstateras att de utvecklade modellerna visar en högre prestanda i flera aspekter. Framför allt demonstrerar modellerna en tydlig representation av två olika lager, en realistisk avbildning av esofagus, en realistisk känsla av att sy i modellen samt en realistisk estetik. De största bristerna ligger i en oralistisk trachea och möjligen känslan att klippa i modellerna.

Tabell 1

JÄMFÖRELSE AV UTVECKLAD MODELL MED SYMULUS MODELL EFTER
UTVÄRDERING GJORD AV HELENA ÁRNADÓTTIR. DR. ÁRNADÓTTIR HAR
BETYGSATT EGENSKAPER PÅ SKALAN 1-10, DÄR 10 ÄR PERFEKT
JÄMFÖRT MED VERKLIG ESOFAGUS.

	Utvecklad modell	Symulus modell
Känsla att sy i	7	4
Känsla att klippa i	6	4
Tydliga lager	8	1
Realistisk trachea	2	2
Realistisk esofagus	7	2
Estetik	9	5



Figur 15. Ovan visas två färdiga modeller av EA. Den vänstra är en modell av klassisk EA med fistel och den högra är en modell med Long gap EA.



Figur 16. Färdig gjutform utskriven på SLA-skrivare i clear resin.

IV. DISKUSSION

Utifrån Tabell 1 kan det konstateras att framtagna modeller i större utsträckning liknar en verklig esofagus. Vi anser att flera lager i modellen med stor sannolikhet ligger till grund för att känslan vid klippning och suturering i den framtagna modellen blev bättre.

A. Utvecklingen av esofagusmodellen

Skapandet av esofagusmodellen inspirerades av redan existerande arbeten samt efter samråd med handledare och

experter inom esofagusatresi och simulatorer. Utifrån en tidigare studie där de simulerat tarmar av två olika typer av silikon, Ecoflex 00-30 Silikon och Ecoflex Silikon Gel, ansågs dessa vara relevanta för en första testning. I studien hade dessutom färgning använts för att öka det realistiska utseendet och detta ansågs vara relevant även för projektets esofagusmodell. Därutöver, för att förtjocka blandningen av silikon användes THI-VEX. Detta minskade risken för att för mycket av silikonblandningen skulle rinna av gjutformen vid härdning. Olika gjutningstekniker diskuterades men efter kontakt med Hanson och testning av den penselteknik han rekommenderade drogs slutsatsen att pensling fungerade bäst. Den slutsatsen stärktes dessutom av målet att återskapa olika lager, vilket skulle vara möjligt med penselteknik.

Efter rådgivning från Dr. Árnadóttir ansågs två lager vara tillräckligt för att återskapa känslan. Ett skörare lager, för att representera adventitia, och ett starkare, som representerar Mucosa, submucosa och Muscularis propria. Detta för simulera den kritiska faktor som finns vid operationen, att sätta stygnen rätt där de inte riskerar att lossa. Det starkare lagret behövde innehålla en s.k. power-mesh. Den valda meshen behövde vara elastisk och stark.

Den tidigare modellen som fanns i Symulus simulator var dessutom, enligt Dr. Árnadóttir, aningen för stor för att kunna representera ett spädbarns esofagus. Därmed valdes mått som både skulle representera en verklig esofagus medan modellen samtidigt gjordes tillräckligt lång för att passa simulatören. Även om måtten på framtagna modeller hade ett lite större spann än en verklig representation ansåg Dr. Árnadóttir det vara tillräckligt godtyckligt. Alla missbildningar skiljer sig åt och storleken kan även här variera.

Under den första härdningen, placerades gjutformen med det penslade silikonet upp och ner på. Detta för att silikonet ska rinna av formen och inte lägga sig som ett tjockare lager i mitten. Denna positionering möjliggjorde även att lagret belv tunnt. Ett tunnt första lager släpper dessutom igenom blod-färgen av nästa silikonlager och ger esofagusmodellen ett realistiskt utseende. Under den andra härdningen av silikon och power-mesh placeras den på omvänt håll, detta för att hindra power-meshen från att lossna från gjutformen. Den sista härdningsprocessen sker vertikalt så att överflödigt silikon rinner ur och inte samlas på ena innerväggen av modellen. Notera att modellen placeras så att delen med fisteln hamnar överst. Denna positionering hindrar silikon från att samlas i den förslutna delen av esofagusmodellen.

Hansons gjutformar, se Figur 6, valde vi att inte använda eftersom vi höll med Hanson om att detta var ett onödigt steg i denna process. Ett steg kunde hoppas över och testningen av materialet kom igång snabbare. Däremot hämtades inspiration från hans tracheamodeller i designen av framtagna modeller.

B. Utvecklingsmöjligheter

En eventuell utvecklingsmöjlighet är en förbättrad realisering av trachea. Dr. Árnadóttir ansåg den inte alls realistisk och menade att den kunde ha varit styvare. Faktorn är däremot inte avgörande för att modellen ska nå målen för projektet. En styvare trachea hade eventuellt kunnat göras med ett styvare

power-meshmaterial. En eventuell lösning till denna styvare power-mesh är en tunn utskrift i Thermoplastic Polyurethane Powders (TPU) från en SLS-skrivare. Dr. Árnadóttir ansåg att detta är en relevant förbättringsmöjlighet men att modellen har de funktioner som önskas utan den styva trachean.

Att klippa i modellen upplevdes också något sämre än övriga kvaliteter och anledningen till detta anser vi förmodligen ligger i power-meshen. Att tyg används som power-mesh känns tydligt vid klippning och tyget efterliknar i denna aspekten inte mjukvävnaden i esofagus. Det känns istället precis som att man klipper i tyg och därav minskar realismen av modellen en aning. Motståndet är dock större än i Symulus-modellen vilket leder till att graderingen av klippning i projektets esofagusmodell även i denna aspekt vinner över Symulus.

Ytterligare testning och undersökning hade krävts för att ta reda på varför det första lagret efter utskriften av gjutformen inte torkar. En förklaring till det problemet hade eventuellt kunnat spara på den mängd silikon som nu bara slängs.

C. Etik & Hållbarhet

Vid prövning och framarbetande av nya kirurgiska metoder krävs klinisk prövning och godkännande från exempelvis FDA. Det är vanligt idag att tester genomförs på djur eller på människor som vill delta. Ur ett etiskt perspektiv erbjuder simulatorer testning som inte innebär kliniska tester på varken djur eller människor. Detta talar för användandet av simulatorer. En mer realistisk träningsmodell kan senarelägga kliniska prövningar vilket ökar säkerheten då metoden blir mer beprövad. Utöver säkerhetsaspekten är djurens påverkan på miljön betydande. Uppfödning av djur för medicinsk testning och utbildning leder till ökade koldioxidutsläpp samt en ökande förbrukning av spannmål och andra resurser. Det är därför önskvärt att minska antalet djur som används i forskningen.

Dessutom tillverkas dessa modeller lokalt och det krävs varken lång transport för att modellerna ska nå sjukhuset eller någon lång resa för läkarstudenterna på Lunds Universitets-sjukhus för att få sin utbildning. Den minskade transporten minskar återigen koldioxidutsläppet. Den lokala produktionen skapar dessutom möjlighet att specialanpassa designen av modellen för varje enskild patient. Denna flexibilitet i designen leder därmed till ökad kvalitet i utbildningen. Den korta transporten leder, utöver nämnda aspekter, till minskade transportkostnader. Minskningen i dessa kostnader väger upp mot den eventuellt ökade kostnaden som ofta blir vid lokal produktion. Alltså, trots att projektets esofagusmodell förmodligen har ett högre styckpris än Symulus enklare modell, gör de minskade transportkostnaderna att projektets modell ändå kan anses gynnsam ekonomiskt.

Produktionen av varje modell är begränsad till ett fåtal användningar, vilket utifrån ett hållbarhetsperspektiv kan betraktas som problematiskt. För att öka modellernas hållbarhet krävs ökad återvinning. Eftersom modellen är gjord av silikon och trikåtyg, som separata är återvinningsbara, skulle det krävas en specifik metod för separation av dessa. Däremot är gjutformarna återanvändbara och kan användas många gånger

innan de behöver kasseras. För att öka hållbarheten hos modellerna är det viktigt att ta hänsyn till dess olika material och vidta lämpliga åtgärder för att minska miljöpåverkan vid produktion och återvinning.

V. SLUTSATSER

Möjligheterna med simulatorer likt denna är stora. Utifrån detta är arbetet högst relevant och har potential att appliceras inom många olika fält i sjukvården, inte bara esofagusatresi.

En tydlig slutsats som kan dras är att de framtagna modellerna är mer realistiska än liknande modeller på marknaden idag. Vid fortsatt utveckling kan modellerna i kombination med förslagsvis Symulus simulator komma att bidra med livsviktig kunskap. Fler kirurger kan lära sig tekniker som “The Foker Process” från Boston’s Children’s Hospital och kunskapen blir inte platsbunden utan kan genomföras på flera ställen världen över.

För att sammanfatta kan vår modell bidra till att läkare på ett realistiskt sätt kan få träning i thoraskopi vid esofagusatresi-operationer och i framtiden potentiellt även andra operationer.

VI. EFTERORD

Vi vill rikta ett särskilt tack till Muris Imsirovic i sitt arbete att bistå med 3D-ritningar och utskrifter av gjutformar. Utan hans hjälp hade projektet inte varit möjligt. Likaså vill vi tacka Einar Heiberg för guidning och feedback, samt Erik Ekbohm som i början av projektet bidrog med värdefull stöttning och inspiration. Vidare riktas ett stort tack till Dr. Árnadóttir och Dr. Hagelsteen som varit med och utvärderat modellerna och bidragit med viktig kunskap kopplat till esofagusatresi. Avslutningsvis vill vi även tacka Christian Hanson och hans arbetsledare Dr. Jonathan Morris för värdefull input om simulatorer, gjutningstekniker och sin kunskap kring ämnet.

REFERENSER

- [1] *Sällsynta hälsotillstånd, esofagusatresi*. Socialstyrelsen, sammanfattad text från Socialstyrelsens databas. Reviderad februari 2020.
- [2] Spitz L. *Oesophageal atresia*. Orphanet J Rare Dis. 2007 May 11;2:24. doi: 10.1186/1750-1172-2-24. PMID: 17498283; PMCID: PMC1884133.
- [3] Sethu Keslo, Wikimedia. *File:Larynx and Pharynx Anatomical Relationship.png* Februari 2023.
- [4] Johanna Brydolf, Nationella redaktionen. *Så fungerar matsmältningsorganen*. 1177. Oktober 2019.
- [5] Dr Michelle Peckham, Adele Knibbs, Steve Paxton *Layers of the Oesophagus*. Histology Guide Faculty of Biological Sciences, University of Leeds
- [6] *Esophagus - layers of the wall*. WikiLectures. Mars 2023
- [7] *Open cut esophagus of a pig*. Wikimedia. Oktober 2007
- [8] Bryce Mieczkowski, Brian F. Seavey. *Anatomy, Head and Neck, Trachea*. National Library of Medicine. Augusti 2022.
- [9] *Esofagusatresi, Information till vårdnadshavare/anhöriga*. Akademiska Barnsjukhuset, Uppsala. 2017.
- [10] Dr. Benjamin Zendejas-Mummert. Video: *What is the minimally invasive Foker process?* Boston Children’s Hospital. 2022.
- [11] Katie Oxford, BMSc, Greg Walsh, BEng, Jonathan Bungay, Stephen Quigley, MD, Adam Dubrowski, PhD. *Development, manufacture and initial assessment of validity of a 3-dimensional-printed bowel anastomosis simulation training model*. 2021.
- [12] Anders Hansen. *Träning i simulator gav kirurgisk färdighet* Läkartidningen, 2009.
- [13] Claes Rudberg. *Laparoskopi igår – idag – imorgon* Medicinhistoria Sällskapet Westmannia, Mars 2015.
- [14] Max Berry. *Billigt och effektivt när läkare tränar ingrepp i simulator* Avhandling från Sahlgrenska Akademin, 2007.
- [15] Case study: *Launching a New Zealand-made surgical simulator to the world*. Symulus, September 2021.
- [16] Andrew Krososky. *How to Recycle Silicone* Greenmatters, Juni 2021.
- [17] Jennifer Okafor. *Is Silicone Recyclable? How to Recycle Silicone Correctly*. trvst.world, 2023.
- [18] Sharmon Lebby. *What Is Elastane, and Is It Sustainable?* Treehugger, December 2021.
- [19] Naturskyddsforeningen. *Hur miljövänliga är materialen i våra kläder?* Naturskyddsforeningen.se, Mars 2023
- [20] Benedict O’Neill. *Is UV resin toxic? Risks and safety measures explained* Wevolver, Juni 2022