

Tartu Ülikool  
Loodus- ja täppisteaduste valdkond  
Tehnoloogiainstituut

Mona Küüts

**Pehmed täiturid rüürobotile**

Bakalaureusetöö (12 EAP)  
Arvutitehnika eriala

Juhendaja:

Indrek Must

Tartu 2020

# Resümee/Abstract

## **Pehmed täiturid rüürobotile**

Kantavad seadmed ehk kantav elektroonika ehk rüürobot ehk ihuarvuti on riietega ühildatud tehnoloogia, mida kantakse aksessuaarina või mis on inimese kehaga otseses kontaktis nagu implantaat. Kantav elektroonika on kasvav trend, mis pakub igal aastal järjest uusi lahendusi. Uute lahenduste leidmiseks arendatakse tarku tekstiile ja pehmeid täitureid. Pehmed täiturid on laialdaselt levinud eeskätt pehmerobotika valdkonnas, kuna nad on painduvad, kerged ja väheohtlikud.

Töö eesmärgiks oli välja töötada pehmed täiturid rüü-/tekstiilirobotile. Selleks arendati programm, mille väljundiks on tikitava mustri koordinaatidest koosnev fail. Muster tikiti veeslahustuva tugikile peale. Täituri valmistamisel kanti tikandi peale membraani lahus, süsiniku suspensioon ja kuld.

Selliste pehmete täituritega integreeritud tekstiilidel on suur potentsiaal meditsiini- ja moevaldkondades.

**CERCS:** T125 Automatiseerimine, robotika, control engineering, T470 Tekstiilitehnoloogia

**Märksõnad:** pehmerobotika, robotika, targad tekstiilid, kantav elektroonika

## **Soft actuators for textile robots**

Wearable devices or wearable electronics or wearable robots or wearable computers are a technology combined with clothing, that is worn as an accessory or is in direct contact with the human body, such as an implant. Wearable electronics is a growing trend which provides new solutions every year. In order to find new solutions smart textiles and soft actuators are being developed. Soft actuators are widespread in the field of soft robotics thanks to their flexible, light, and safe qualities.

The goal of this thesis was to develop soft actuators for a wearable robot. For this purpose, a program was developed, the output of which was a file consisting of the coordinates of a pattern to be embroidered. The pattern was embroidered on a water-soluble film. A membrane solution, a carbon solution and gold were applied to the embroidery during fabrication of the actuator.

Textiles integrated with such soft actuators have great potential in the medical and fashion fields.

**CERCS:** T125 Automation, robotics, control engineering, T470 Textiles technology

**Keywords:** soft robotics, robotics, smart textiles, wearable electronics

# Sisukord

Resümees/Abstract.....	2
1 Sissejuhatus .....	5
2 Tarkadest tekstiilidest rürobotini.....	6
2.1 Targad tekstiilid .....	6
2.2 Kantav robotika .....	7
2.3 Mehaaniliselt aktiivsed tekstiilid .....	8
2.4 Tikitud robotid .....	8
3 Originaalse lahenduse kirjeldus .....	10
3.1 Ülevaade probleemist .....	10
3.2 Kontseptsioon .....	10
4 Metoodika.....	14
4.1 Disaini loomine.....	14
4.2 Tööfaili loomine .....	15
4.3 Täituri valmistamise etapid .....	17
4.3.1 Sarruse tikkimine ja kinnitamine .....	17
4.3.2 Membraani pealekandmine .....	19
4.3.3 Kile lahustamine .....	19
4.3.4 Elektroodi pealekandmine .....	19
4.3.5 Voolukollektori pealekandmine .....	20
4.3.6 Lõikamine, eraldamine .....	20
4.4 Täituri karakteriseerimine, kontaktid .....	21
5 Tulemused ja arutelu .....	23
5.1 Katsete ülevaade soovitud täiturini jõudmisest .....	23
5.2 Elektromehaanilised parameetrid .....	25
5.3 Täituri morfoloogia.....	28

5.4 Sarruse disain.....	29
5.5 Niidi valik .....	29
5.6 Veelahustuva ajutise kile kasutuselevõtt membraanis .....	30
5.7 Suunised elektroodi membraanile kandmiseks.....	32
5.8 Voolukollektori pealekandmine .....	33
6 Kokkuvõte .....	35
Viited.....	36
Lihtlitsents.....	38

# 1 Sissejuhatus

Kantavad seadmed ehk kantav elektroonika ehk rüürobot ehk ihuarvuti on riietega ühildatud tehnoloogia, mida kantakse aksessuaarina või mis on inimese kehaga otseses kontaktis nagu implantaat. Sellised seadmed peaksid olema ohutud, pehmed, liikuvad ja kerged [1].

Kantav elektroonika on kasvav trend, mis pakub iga aasta järjest uusi lahendusi. Sellisteks on näiteks kellad, kõrvaklapid, prillid jne. Nendest järgmine samm edasi oleks kantav elektroonika, mis on inimesel seljas nagu teine nahk. Sellele kirjeldusele vastab mõiste *e-skin* ehk e-nahk ehk elektrooniline nahk. Selleks arendatakse tarku tekstiile ja pehmeid täitureid. Sellised seadmed on kasulikud militaarriietuses, biomeedilistes ja antimikroobilistes tekstiilides, meditsiinilistes lahendustes ning targas spordiriietuses.

Teadaolevalt ei ole varem kasutatud meetodit, kus tekstiili tootmine ja pehmed täitured oleksid ühendatud. Eesmärgiks oli omavahel ühendada tikkimismeetodil tekstiili tootmine ja pehmed täitured pehmerobotika valdkonnast, et töötada välja pehmed täitured rüü-/ tekstiilirobotile.

Eesmärgini jõudmiseks arendati sarruse disain, programm tikkimismasinale tööfaili loomiseks ning täituri valmistamiseks vajalikud etapid. Täituri valmistamise esimeses etapis tikiti sarrus veeslahustuva tugikile peale ja kinnitati vedrudega raami külge. Järgnesid membraani lahuse kandmine sarrusele, tugikile lahustamine, ning struktuurile elektroodi ja voolukollektori pealekandmine. Valminud struktuurist eraldati täitured, mida karakteriseeriti.

Töös antakse ülevaade juba olemasolevatest lahendustest, originaalse lahenduse eesmärgist, tikkimismeetodil valmistatud täituri meetodikast ja tulemustest.

## 2 Tarkadest tekstiilidest rüürobotini

### 2.1 Targad tekstiilid

Üks kantava elektroonika alajaotusi on STIMES-id. STIMES ehk targa tekstiiliga integreeritud mikroelektroonilised süsteemid (*Smart Textile Integrated Microelectronic Systems*) on kiud või kiudude komplektid, mis on võimelised tunnetama, kohanema, suhtlema, end tervendama, õppima ja muud [2]. Inimestele on arendatud kasutamiseks selliseid STIMES-seadmeid, nagu näiteks kõrvaklapid, riided, jalanõud, kellad, prillid ning ehted [2]. Kuigi kellad, prillid, ehted ja kõrvaklapid ei ole tänapäeval veel tekstiilidest valmistatud, ei ole see tulevikus võimatu. Selliseid tekstiile toodetakse erinevatel viisidel. Üks variant on dielektrilised kiud, mille puhul ehitatakse nanostruktuurid tekstiili kiudude sisse, kuid jäikuse tõttu ei pea need materjalid väga kaua vastu [2]. Teine viis, kuidas tarku tekstiile valmistatakse, on kiudude katmine elektroaktiivse materjaliga. Seda varianti saab rakendada normaalsele tekstiilile ning tootmisprotsess on lihtne [2]. Kolmandaks saab paigaldada mikroelektroonika kantavate materjalide sisse - selleks kasutatakse erinevaid tehnikaid, nagu punumine, tikkimine ja kudumine [2].

Kiukujulised seadmed jagunevad tööfunktsioonide järgi nelja kategooriasse. Esimene kategooria on energiat koguvad kiukujulised seadmed, mis muundavad energiat elektriks (päikesepatarei, piesoelektriline nanogeneraator) [1]. Teise kategooriasse kuuluvad kiukujulised energiat hoiustavad seadmed, nt superkondensaator, ning kolmandasse kuuluvad valgust kiirgavad seadmed ehk ekraanid, mida kasutatakse valgustamiseks ja fototeraapiaks [1]. Viimane kategooria on kiukujulised sensorid, millel on suur potentsiaal meditsiiniseadmete ja aktiivsuse monitoorimise valdkonnas [1]. Vaatamata kiukujuliste seadmete kiirele arengule ei ole veel olemas kategooriat, kuhu selle töö raames arendatav seade sobituks.

Kiukujulise elektroonika edasiliikumist piirab fiiberelektroodide areng [1]. Neid valmistatakse erinevatest materjalidest. Kuigi metallist valmistatud elektroodidel on tavaliselt piiratud mehhaaniline paindumus, sobivad mõned metallnanomaterjalid suurepäraselt venivate elektroodide valmistamiseks, kuna neil on suur mehhaaniline paindumus ja juhtivus [3]. Teine variant on juhtivad polümeerid. Need on tänu oma elektrilistele omadustele võimaldanud ulatuslikke rakendusi energia kogumises ja hoiustamises [1].

Just nagu tavaline arvuti, koosneb ka ihuarvuti tööks vajalikest erinevatest komponentidest. Ümbritsevast keskkonnast informatsiooni kogumiseks ning töötlemiseks on vaja sensoreid. Selleks kasutatakse mehaanilisi, niiskus-, temperatuuri- ja keemilisi sensoreid [3]. Ühed STIMES-ite funktsionaalsed komponendid on täiturid. Need on seadmed, mis muundavad välist energiat mehaaniliseks energiaks. Selle protsessi tagajärjeks on mehaaniline reaktsioon välise ajendi toimel [2]. Välise ajendi tüübi järgi jagunevad pehmed täiturid termilisteks, elektrokeemilisteks, hügromehaanilisteks, optilisteks täituriteks jpm [2]. Nagu nimest välja lugeda võib, on termiliste täiturite ajendiks kuumus, ehk täituri kuju muutub siis, kui temperatuur muutub. Elektrokeemiliste täiturite ajendiks on ionide liikumine. Hügromehaanilise täituri ajendiks on muutus niiskuses (nt veeauru toimel) ning optiliste täiturite ajendiks on valguskiirguse muutus. Pehmed täiturid on laialdaselt levinud eeskätt pehmerobotika valdkonnas, kuna nad on painduvad, kerged ja väheohtlikud. Tänu sellele on neid lihtne tekstiiliga lõimida ehk sisse kududa ja õmmelda [2].

Lisaks täituritele on üks STIMES-ide funktsionaalne komponent tekstiilide baasile tehtud ekraan. Neid valmistatakse orgaanilistest LED-idest ja polümeervalgust kiirgavatest elektrokeemilistest rakkudest [2].

## 2.2 Kantav robotika

Tarkade tekstiilide areng võimaldab kantava robotika arengut. Üks näide sellest valdkonnast on teenindusrobotid. Sellised robotid on suuresti kasutuses meditsiinivaldkonnas. Näiteks on väljatöötatud pehme robotkäsi, mis abistab inimest igapäevastes tegevustes [4]. Meditsiini valdkonnas on kasutusel ka palju erinevaid tekstiilil põhinevaid kantavaid sensoreid. Sellised sensorid jagunevad aktiivseteks ja passiivseteks sensoriteks. Passiivsed sensorid vajavad välist toiteallikat, samas kui aktiivsed sensorid suudavad muundada sisendenergiat mõõdetavaks potentsiaalide erinevuseks [5].

Kantav elektroonika ja targad tekstiilid on valdkonnad, mis on omavahel seotud ning vajavad veel põhjalikku uurimist ja arendamist. Vaatamata sellele on tänapäeval juba olemas mitmeid kantavaid seadmeid. Näiteks 2018. aastal toimunud taliolümpiamängude jaoks disainiti USA võistkonnale osaliselt targast tekstiilist valmistatud jope. Täpsemalt olid jope sinine ja punane osa värvitud metallist tindiga ning nupuvajutuse tagajärjel hakkas tint elektrit juhtima ja soojenema [6].

Olemas on moebränd CuteCircuit, mis kasutab tarku tekstiile, et valmistada rõivaid ja aksessuaare. Nad on disaininud näiteks käekotte, mis on valmistatud LED-idega integreeritud kangast ning tarkadest tekstiilidest valmistatud särke, millel on erinevad funktsionaalsused. Üks selline on *The Sound Shirt*, mis võimaldab kurtidel inimestel muusikat kogeda. Särgi sisse on paigaldatud 30 mikroajamit, mis võtavad informatsiooni vastu samal ajal kui muusika mängib. Need ajamid tekitavad erinevatel kehaosadel aistinguid vastavalt sellele, milline instrument mängib [7].

## 2.3 Mehaaniliselt aktiivsed tekstiilid

Mehaaniliselt aktiivsed tekstiilid on tekstiilid, mis on integreeritud pehmete täituritega. Sellistes tekstiilides käituvad täitured ka struktuuri moodustava osana [8]. Selline tekstiil on näiteks õhukeste McKibben'i tehislühastega integreeritud põimitud tekstiil, mis muudab oma struktuuri [8]. Mehaaniliselt aktiivsest tekstiilist on valmistatud näiteks ka robotkinnas, mis sisaldab pehmeid täitureid, mis aitab kahjustatud kätega inimesi [4].



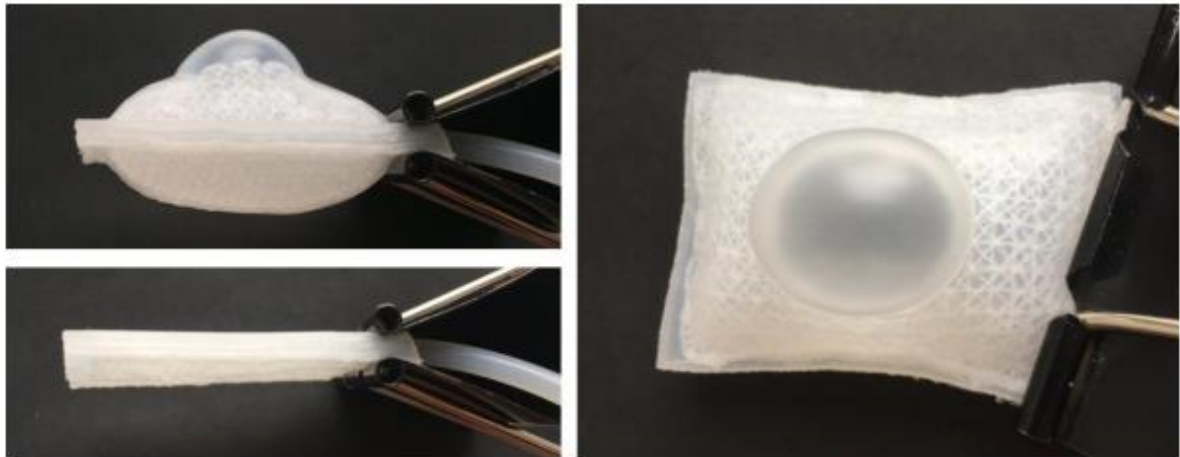
**Joonis 1.** Mehaaniliselt aktiivsete tekstiilide erinevad vormid [8]

## 2.4 Tikitud robotid

Kudumine ja tikkimine on arendatavad meetodid tarkade tekstiilide valmistamises. Kudumist peetakse masstoodangu vaatenurgast kasulikumaks [9]. Tikkimisel on aga suurem potentsiaal

kantavate seadmete disainimisel, sest erinevalt kudumisest on tikkides disainide ja niitide asetuse variantide valik suurem [10].

Üks näide tikitud robotist on tikkimismeetodil valmistatud täispuhutav täitur (joonis 2). Sellise täituri valmistamist uuriti Eindhoveni Tehnikaülikoolis. Sarnaselt käesoleva töö meetoditele tikiti ka selle täituri valmistamisel tikand veeslahustuva kile peale [10].



**Joonis 2.** *Tikkimismeetodil valmistatud täispuhutav täitur [10]*

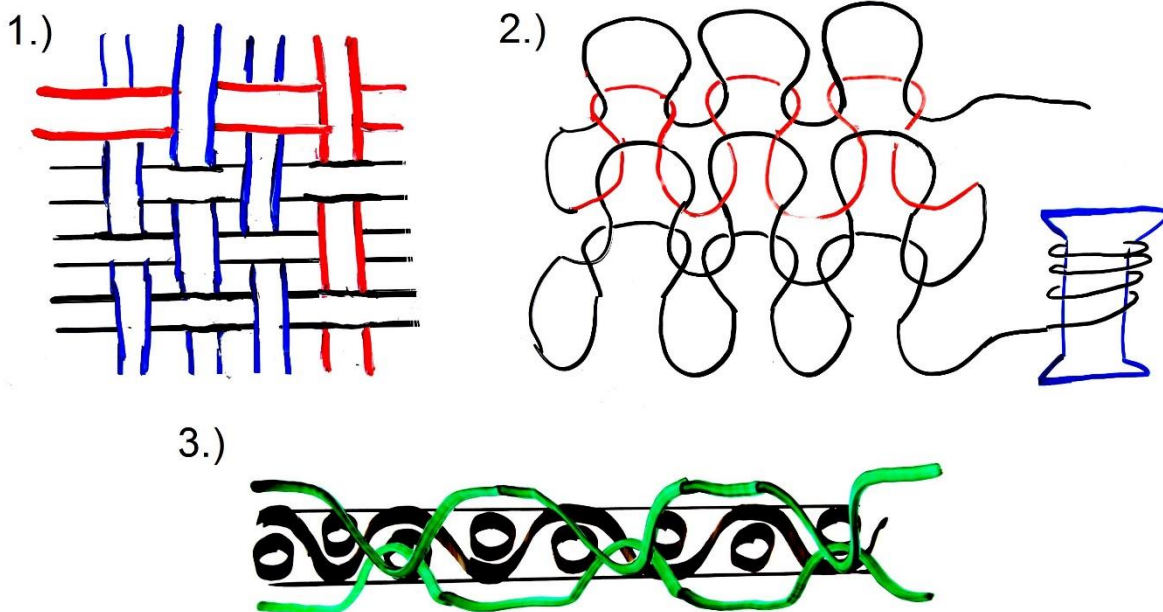
## 3 Originaalse lahenduse kirjeldus

### 3.1 Ülevaade probleemist

Tarkade tekstiilide maailmas on suur rõhk fiiberelektroodide arendamisel, kuid selle töö raames arendatava lahenduse jaoks ei ole neid vaja. Praegu olemasolevate lahenduste puhul kasutatakse täituri valmistamise protsessis valmistekstiile ehk tekstiili ennast ei valmistata roboti valmistusprotsessi osana. Teadaolevalt ei ole varem kasutatud meetodit, kus tekstiili tootmine ja pehmed täituriid oleksid ühendatud. Eesmärgiks on omavahel ühendada tikkimismeetodil tekstiili tootmine ning pehmed täituriid pehmerobotika valdkonnast. Selline lahendus võimaldaks integreerida omavahel tekstiile ning täituriid, või valmistada kantavaid seadmeid, mis moodustuksid täielikult pehmetest täituriidest. Sellistel kantavatel seadmetel on suur potentsiaal meditsiini- ja moevaldkondades.

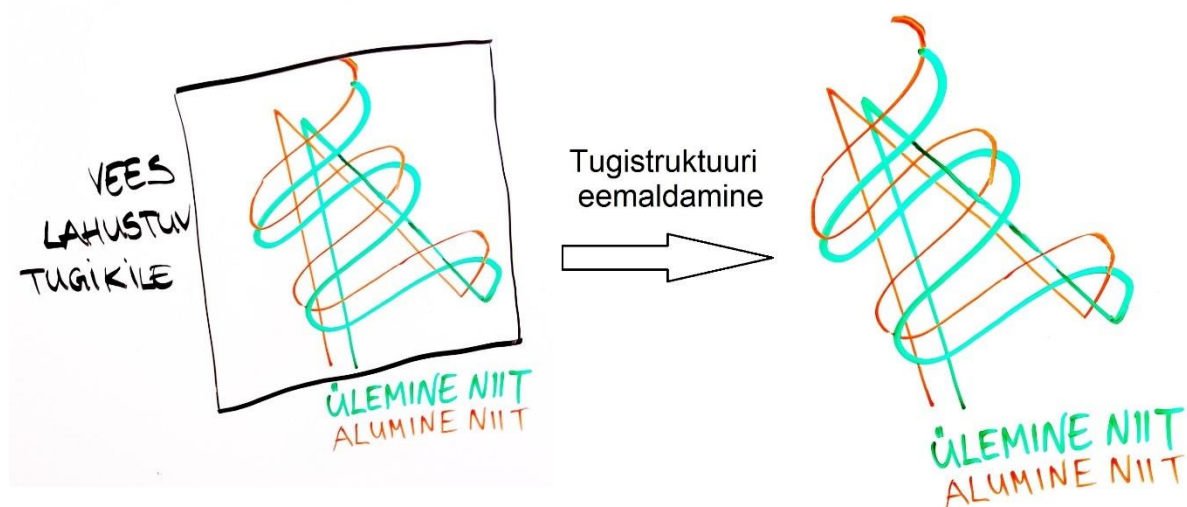
### 3.2 Kontseptsioon

Tekstiilid koosnevad kiududest ning tavaliselt on need kiud omavahel põimitud (joonis 3.1) või kootud (joonis 3.2). Tavaliselt tikitakse (joonis 3.3) tikandid just selliste tekstiilide peale. Sellistest tekstiilidest erinevad on heegeldatud tekstiilid, mis on eraldiseisvad (tugistruktuurita) struktuurid.



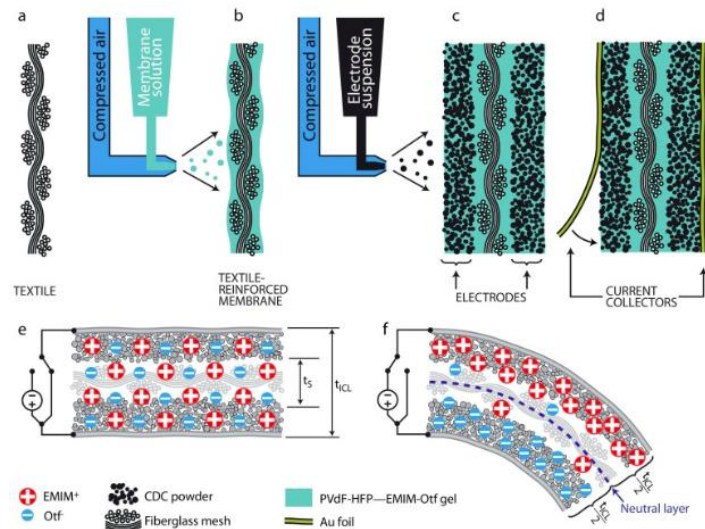
**Joonis 3.** 1.) Põimismeetodil valmistatud tekstiil 2.) Kudumismeetodil valmistatud tekstiil 3.) Tikkimismeetodil valmistatud tekstiil (rohelisega on tähistatud tikitavad niidid, ülemine ja alumine)

Kõige primitiivsem tekstiilivalmistamise meetod on põimimine, sest siis on disaini valmistamise võimalused piiratud – varieerida saab ainult kiudude asetust üksteise suhtes (üks kiud ristub teisega pealt- või altpoolt). Vaatamata sellele, et kududes on võimalik saavutada keerulisemaid mustreid kui põimides, seab piiratud kiudude arv piirangud. Lisaks sellel kootakse tekstiili alati ridahaaval. Tikkimise puhul aga ei ole ühte kindlat meetodit, kuidas sellisel viisil tekstiili valmistada – vastavalt peatükis 2.4 öeldule, on disainide ja niitide asetuse variandid lõputud. Kui tikkida tikand tugistruktuuri peale, mida on võimalik hiljem eemaldada (joonis 4), saab tikand samuti eraldiseisvaks (tugistruktuurita) struktuuriks (joonis 4).



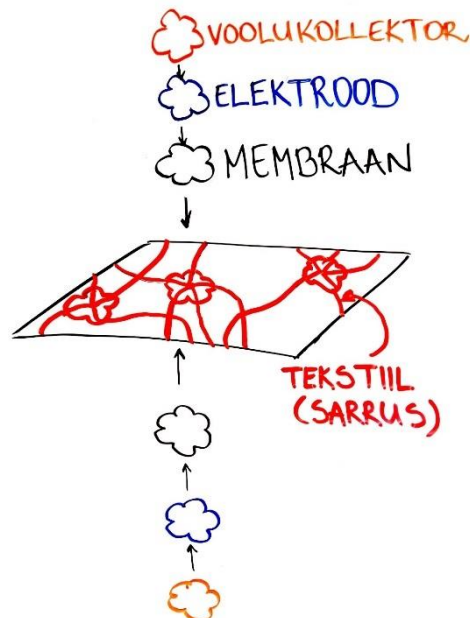
**Joonis 4.** Tugistruktuurivaba tikkimine

Varasemalt on valmistatud mahtvuslikke täitureid viisil, kus elektroaktiivsed komponendid kantakse (joonis 5) põimitud tekstiilile (joonis 5) ning täitur defineeritakse tekstiilist soovitud osa väljalõikamisega. Sel juhul lõigatakse tekstiilikiud läbi ning tekib oht, et hiljem hakkab põimitud tekstiil hargnema.



**Joonis 5.** Olemasolev ioonsete mahtvuslike täiturite valmistamise viis [11]

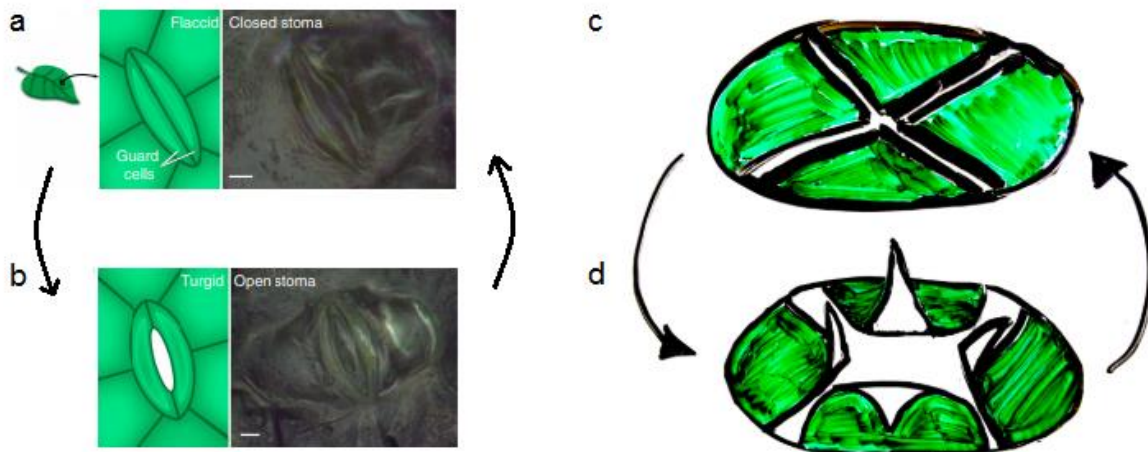
Selle probleemi lahendab sarruse tikkimine veeslahustuva tugistruktuuri peale. Siis ei pea täituri defineerimise käigus tekstiilikiude läbi lõikama ning struktuuri valmistamise ajal kantakse elektroaktiivsed komponendid vaid tikandi peale soovitud kohta (joonis 6).



**Joonis 6.** Uudsel viisil ioonsete mahtvuslike täiturite valmistamine

Seega oli eesmärgiks ühildades omavahel tekstiilitehnoloogia näol tikkimine ning ioonsed tehislhased töötada välja meetod rüürobotile sobivate pehmete täiturite masintikkimiseks.

Töö käigus loodud täituri sarruse disain oli inspireeritud taimlehtede õhulõhedest. Taimel on õhulõhed transpiratsiooniprotsessi jaoks ehk atmosfääriga gaaside vahetamiseks. Selleks taim avab ja sulgeb oma õhulõhesid (joonis 7a ja 7b) [12]. Töö käigus tegin tehis-õhulõheroboti (joonis 7c ja 7d).



**Joonis 7.** Taimel õhulõhe liigutused. a.) Õhulõhe on suletud [12] b.) Õhulõhe on avatud [12] c.) Tehis-õhulõhe on suletud d.) Tehis-õhulõhe on avatud

## 4 Metoodika

Esiteks, oli vaja välja selgitada, milline mustridisain sobib kõige paremini töö eesmärgi saavutamiseks, milleks on täiturite tikkimine.

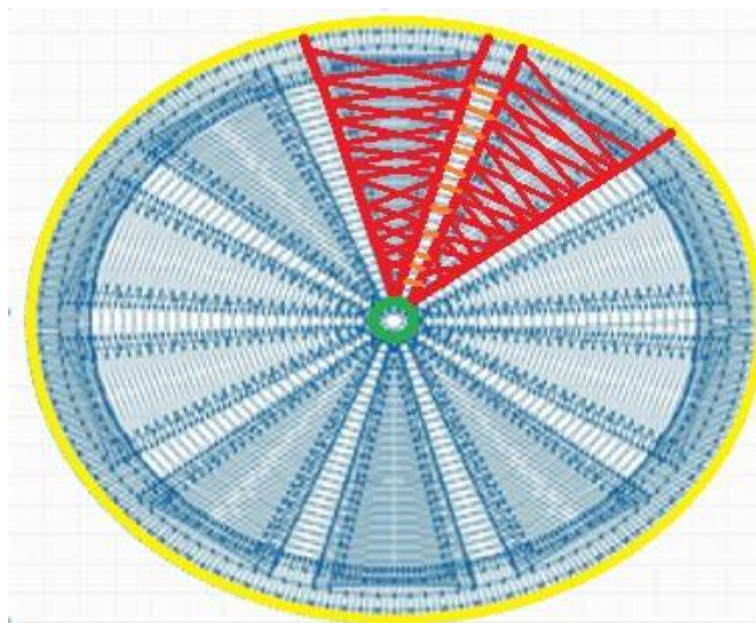
Teiseks, oli vaja välja selgitada õmblusmasinale esitatava faili formaat ning täiustada juba olemasolevaid LabVIEW programme nii, et oleks võimalik genereerida tööfail soovitud mustrist.

Kolmandaks, oli vaja välja töötada struktuuri valmistamise viis, mida oleks võimalik edukalt korrata.

Viimaseks, oli vaja valminud struktuurist eraldada täiturid ning neid testida.

### 4.1 Disaini loomine

Käesoleva töö käigus täiustati juba olemasolevat disaini.



**Joonis 8.** Sarruse disain enne muutuseid. Kollane – disaini välisring, punane – disaini sisu, roheline – disaini keskel asuv ring, oranž – disaini sisu ühendavad niidid

Disainiks oli kolmnurkadega (Joonis 8 punased kolmnurgad) täidetud ring (joonis 8 kollane ring). Kolmnurgad peaksid sealjuures käituma nagu õhulõhe sulgrakud (joonis 7a ja 7b). Nende tipud ulatusid disaini keskel oleva ringini (joonis 8 roheline ring) ning kõik kolmnurgad olid

täidetud ristuvate niitidega (joonis 8 punastes kolmnurkades ristuvad jooned). Lisaks sellele olid kolmnurgad omavahel ühendatud (joonis 8 oranžid jooned).

Disaini muudeti vastavalt vajadusele. Tehtud muudatusi on kirjeldatud tulemuste peatükis. Põhilised muudatused olid mustri tiheduse muutmine ning osade niitide pikendamine.

## 4.2 Tööfaili loomine

Tartu Ülikooli tehnoloogiainstituudis on õmblusmasin *Pfaff creative icon*, millel on olemas ka tikkimise funktsioon. Lisaks masinaga kaasasolevatele mustritele on võimalik tikkida enda disainitud mustreid. Need peavad olema PCS failiformaadis.

Esimese asjana tuli välja selgitada, milline on tööfaili sisu. See osutus keeruliseks, sest väga head dokumentatsiooni õmblusmasinale ette antavast failiformaadist ei eksisteeri. Siiski on olemas üks allikas mis andis piisavalt hea ülevaate [13]. Tööfail koosneb faili päisest ja koordinaatidest. Päises defineeritakse tikkimisraami suurus, mitme värvilist mustrit tikitakse, värvitoonid (siinse lahenduse puhul niidi tüüp) ja pistete arv.

**Tabel 1.** Tööfaili päise kirjeldus

Bait(HEX)	Väärtus(HEX)	Seletus
0000	32	Sissejuhatav sümbol
0001	02 või 03	Raami suurus (02 = väike, 03 = suur)
0002 - 0003	10 00	Värvide arv (alati 16)
0004 - 0043	NN NN NN NN	10x4 baiti värvide deklareerimiseks
0044 - 0045	NN NN	Pistete arv, vähima kaaluga bitt esimesena. Pistete võimalik maksimaalne arv on 65536 ilma värvivahetusteta
0046 + MMMM	MMMM = (pistete arv + värvivahetuste arv) * 9	
0046 + DDDD	DDDD = MMMM + 13	Pistete koordinaadid

Koordinaadid on esitatud kahemõõtmelises ruumis ehk defineeritud x- ja y- koordinaadiga. Iga piste x- ja y-koordinaat on defineeritud 9 baidiga.

**Tabel 2. Koordinaatide esitus tööfailis**

<b>Aadress</b>	<b>Väärtus(HEX)</b>	<b>Seletus</b>
NNNN	00 XX XX XX 00 YY YY YY 00	x- ja y-koordinaadid, vähima kaaluga bitt esimesena
NNNN	00 XX XX XX <b>02</b> YY YY YY <b>01</b>	Nii x- kui ka y-koordinaadile järgnev bait määrab, mis veerandi suhtes on muster nihutatud
NNNN	<b>02</b> 00 00 00 00 00 00 00 <b>03</b>	Värvivahetust tähistav rida. Rea viimane bait on alati 03. Esimene bait tähistab värvi.

Iga uus piste algab väärtusega 00 ning sellele järgneb 3 baiti, mis tähistavad x-koordinaadi väärtust. Järgmine bait määrab, millises suunas koordinaatteljestikul x-koordinaat nullpunktist asub. Sellele järgneb 3 baiti, mis tähistavad y-koordinaadi väärtust. Täpselt nagu x-koordinaadi puhul määrab ka nüüd järgmine bait y-koordinaadi asukohta koordinaatteljestikul.

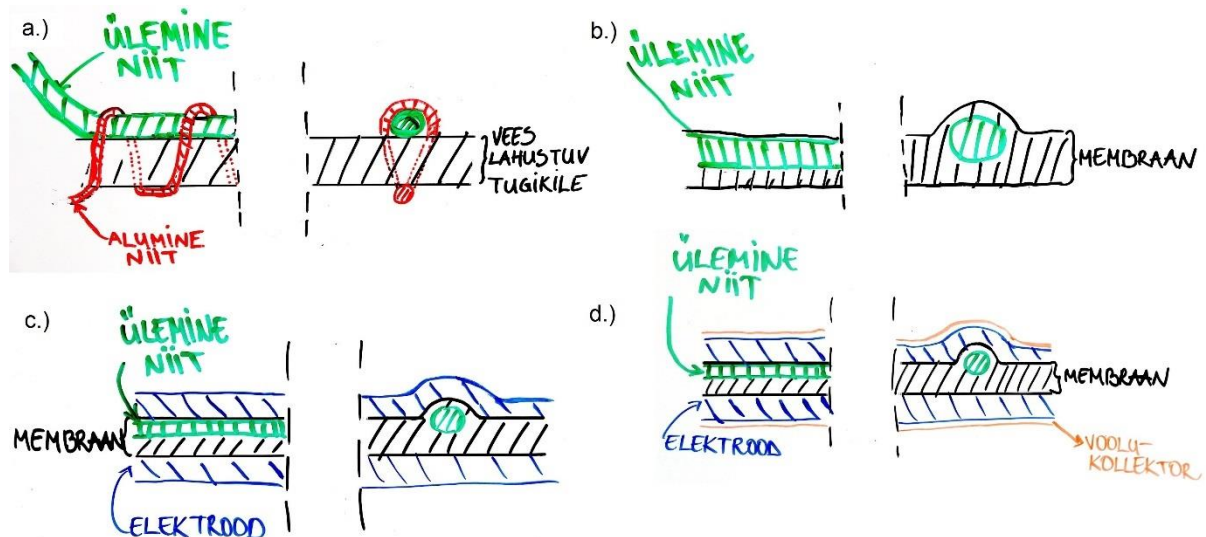
Kui tegemist on värvivahetust tähistava reaga on 9-st baidist koosneva rea viimane bait alati 03. Sel juhul tähistab esimene bait milline värv tuleb valida faili päises defineeritud värvide loetelust. Ülejäänud 7 baidi väärtus on 00.

Programme koostati LabVIEW programmeerimiskeskonnas. Kasutatavas arvutis oli 2018. aastal ilmunud versioon LabVIEW 2018 SP1. Tulemuse saavutamiseks vajalikud programmid saadi juhendaja käest. Töö autori ülesandeks oli neid muuta selliselt, et saavutada disainitud mustri kõige optimaalsem variant.

Kuna otsustati jätkata juhendaja poolt varasemalt disainitud mustriga, ei vajanud programm suuri muudatusi. Eelkõige muudeti programmi loetavamaks – mõned funktsionaalsed plokid muudeti alamprogrammideks.

## 4.3 Täituri valmistamise etapid

Täituri valmistamine koosneb järgnevatest etappidest: sarruse tikkimine (joonis 9a) ja kinnitamine, membraani pealekandmine (joonis 9b), kile lahustamine, elektroodi pealekandmine (joonis 9c), voolukollektori pealekandmine (joonis 9d) ning täituri eraldamine.



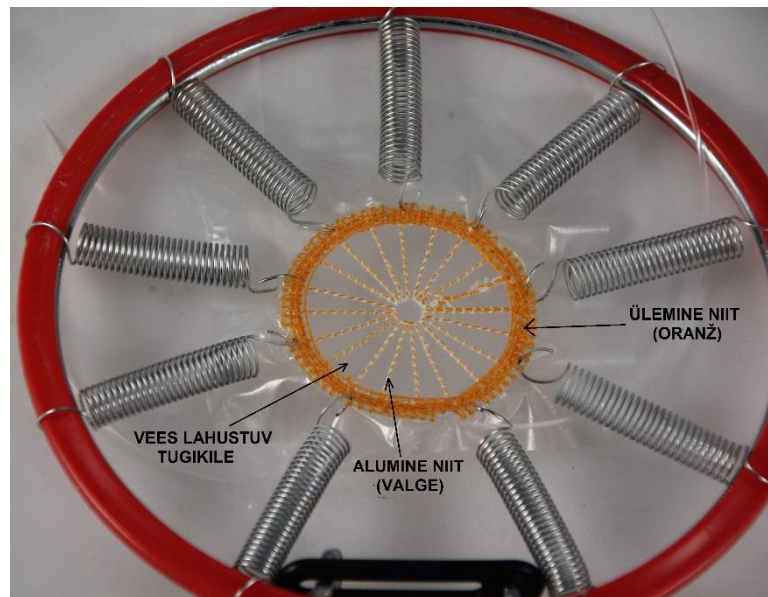
**Joonis 9.** a.) Disain tikitakse vees lahustuva tugikile peale b.) Kile lahustatakse ning alles jäävad niitide struktuur ja membraan c.) Membraani peale kantakse elektroodi kiht d.) Elektroodi peale kantakse voolukollektor

### 4.3.1 Sarruse tikkimine ja kinnitamine

Selle töö raames kasutati sarruse valmistamiseks kahte erinevat materjali. Mõlemad sarrused olid tikitud kahekordse kihi veeslahustuva kile (paksus: 26  $\mu\text{m}$ ) peale. Esimese puhul kasutati niidina nailonist monofilamenti (diameeter: 140  $\mu\text{m}$ ). Selle tagajärjel oli sarrus rohkem kolmemõõtmeline struktuur. Teise tikandi niit oli tavaline puuvillane niit (diameeter: 40  $\mu\text{m}$ ) - vähem kolmemõõtmeline struktuur, edaspidi viidatakse kui kahemõõtmelisele. Kolmemõõtmelise sarruse valmistamisel kasutati kõigi katsete puhul nõela nr 90 ja tikiti kahekordse kihi veeslahustuva kile peale, mis oli paigaldatud väikese tikkimisraami (120mm x 120mm) vahele. Teise sarruse valmistamine erines vaid nõela suuruse poolest – kasutati väiksemat, nr 75 nõela.

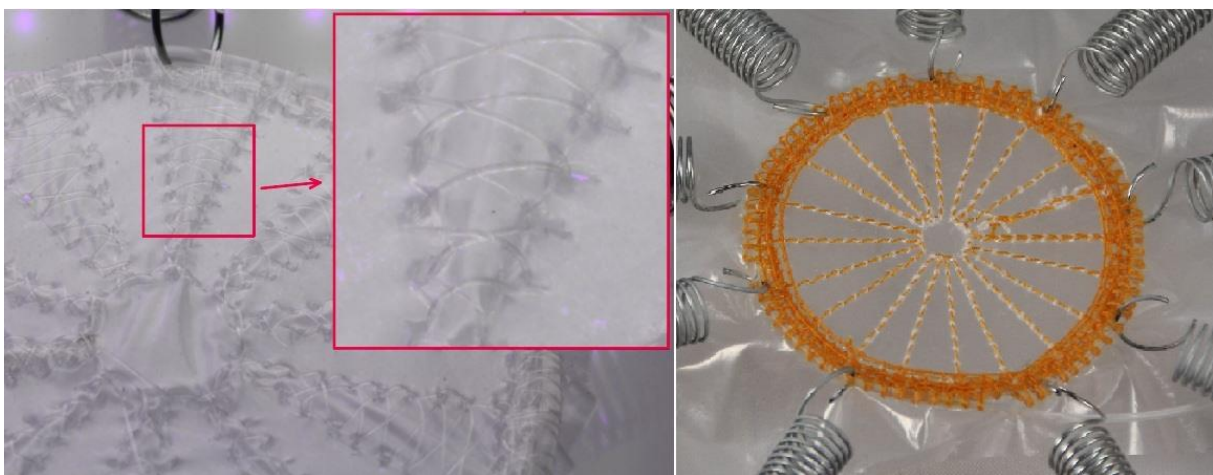
Reaalselt on valmistatav täitur osa suuremast tekstiilist (joonis 6), mis hoiab seda pingul, kuid siin oli vaja leida teine lahendus. Seega valminud sarrus kinnitati raamile (joonis 10), et see püsiks täituri valmistamise etappide ajal pingul ning ei muudaks kuju. Selleks paigaldati sarruse

serva sisse nailonist filament, mille külge kinnitati vedrude üks ots. Vedrude teine ots kinnitati raami külge.



**Joonis 10.** Raamile kinnitatud sarrus

Esimene prototüüp oli kolmemõõtmeline (joonis 11 vasakul), sest tikand oli valmistatud nailonist. Seega edasi liikudes prooviti saavutada pigem kahemõõtmelist struktuuri (joonis 11 paremal) ning selleks asendati nailon puuvillase niidiga.



**Joonis 11.** Vasakult: kolmemõõtmeline struktuur, kahemõõtmeline struktuur

Masinal oli võimalik reguleerida niidi pingsust (TT). Et tagada kile võimalikult väike rebenemine, reguleeriti niidi pingsus nii väikseks kui võimalik.

### 4.3.2 Membraani pealekandmine

Esimene etapp täituri valmimisel oli membraani lahuse (koostis: polüvinülideendifluoriid, 1-etüül-3-metüülimidasoolium trifluorometaansulfonaat, N-dimetüülsetamiid, propüleenkarbonaat. Täpne kirjeldus [14]), mis oli juba laboris olemas, kandmine sarrusele. Lahust kanti sarruse pealmisele poolele aerograafi abil. See võimaldas kanda lahust tikandile ühtlaste kihtidena. Enne iga kihi pealekandmist veenduti, et eelnevalt spreitud kiht oleks täielikult kuivanud. Uusi kihte lisati seni kuni tundus, et membraan on katnud kile ja täitnud kõik nõela poolt kilesse tekitatud avad. Mõned nõela poolt tekitatud avad olid suuremad ning neid ei suudetud aerograafi abil membraani lahusega täita. Kuna membraani lahus nailonit ei märga, oli nailonist valmistatud sarruse puhul nende kohtade täitmine keerulisem. Kui kasutada puuvillast niiti, siis märgab membraani lahus niiti väga hästi ning probleemsed kohad täituvad lahusega paremini. Kuna eesmärk oli jõuda tulemuseni nii, et membraani kiht oleks võimalikult õhuke, otsustati probleemsed kohad parandada pintsliga. Niimoodi välditi kogu membraani kihi liialt paksuks muutumist.

### 4.3.3 Kile lahustamine

Järgmiseks etapiks oli kile lahustamine. Suurem osa kilest lahustati jooksva vee all. Peale seda asetati struktuur veega täidetud polüetüleenist valmistatud ning sulguriga varustatud kotti. Kott asetati pooleks tunniks ultrahelivanni. Selle tulemusena oli kogu kile membraani pealt lahustunud.

### 4.3.4 Elektroodi pealekandmine

Järgmisena oli vaja kanda membraani mõlemale poolele süsiniku suspensioon (koostis: polüvinülideendifluoriid-ko-heksafluoropropüleen, 4-metüül-2-pentanoon, tahm BP-1000, 1-etüül-3-metüülimidasoolium trifluorometaansulfonaat. Täpne kirjeldus [14]), mis oli juba laboris olemas. Oluline oli vältida süsiniku sattumist välisservale, sest see võis hiljem lühiseid põhjustada. Selle vältimiseks tehti raamile papist kate ja koonus, et süsiniku pealekandmisel

satuks see ainult membraani peale. Süsiniku suspensioon kanti membraanile aerograafiga. Samaselt membraanile üritati ka nüüd saavutada ühtlaseid ja õhuke kihte.

#### 4.3.5 Voolukollektori pealekandmine

Viimaseks sammuks oli struktuuri katmine kullaga. Kuld kanti struktuuri mõlemale poolele. Selleks spreiti aerograafiga struktuuri pinnale hästi õhuke kiht membraani lahust, mis käitus nagu liim. Seejärel kanti liimi peale kullalehed (paksus: 100nm) ning puhta ja kuiva pintsliga patsutati kulda seni, kuni membraani lahus oli kuivanud. Oluline oli veenduda, et lahus on täielikult kuivanud, sest vastasel juhul ei saanud järgmist kullalehte struktuuri peale kanda. Neid samme korrati seni, kuni struktuuri mõlemad pooled olid võimalikult ühtlaselt kullaga kaetud.

#### 4.3.6 Lõikamine, eraldamine

Umbes poolest valminud struktuurist lõigati välja erinevaid kolmnurkseid täitureid nii, et niite läbi ei lõigatud ja täituri alumine serv oli endiselt struktuuri välisserva küljes. Üks variant oli lõigata niitidega piiratud alast (joonis 12 punane joon) ning teine variant oli lõigata niitide vahele jäävast alast (joonis 12 roheline joon). Eraldatud kolmnurkseid täitureid tuli ka natuke kitsamaks lõigata, sest vastasel juhul tekkis naabertäituriiga lühis.



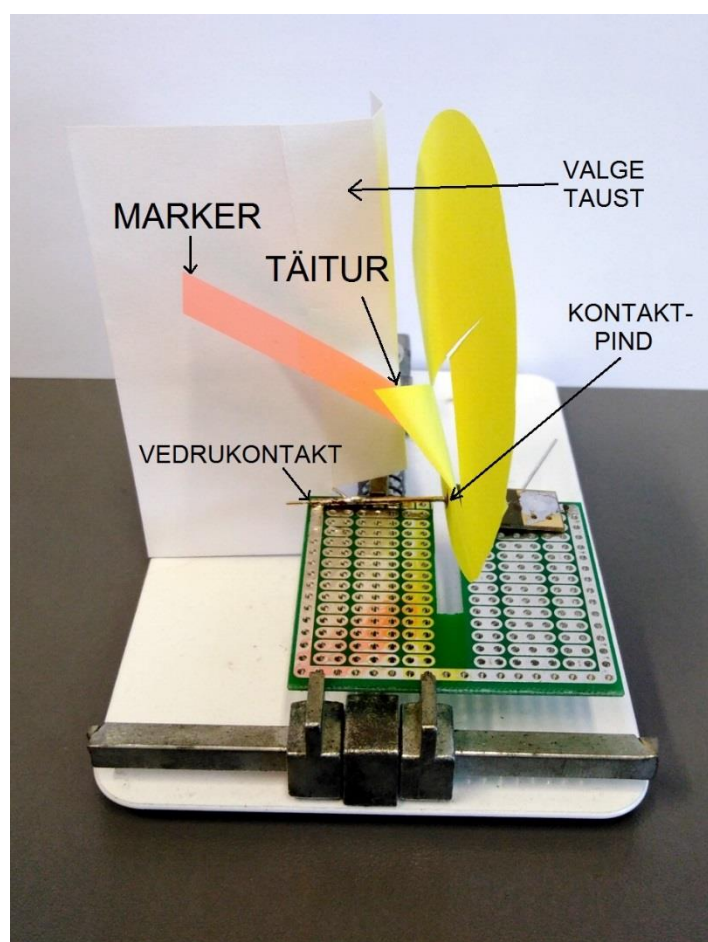
**Joonis 12.** Variandid struktuurist täituri lõikamiseks. Punane – niitidega piiratud ala, roheline – niitide vahele jääv ala

## 4.4 Täituri karakteriseerimine, kontaktid

Et valminud täituri mõõtmisi sooritada tuli lahendada kontaktid. Selleks joodeti trükkplaadile kullast kontaktpindadega (pindala: umbes 8 mm<sup>2</sup>) vedrukontaktid (joonis 13), mille vahele sai täituri kinnitada. Lisaks sellele joodeti trükkplaadi külge ka juhtmed, et oleks lihtsam mõõtmisi läbi viia. Kõik mõõtmised sooritati kasutades Biologic BP-300 elektrokeemia mõõtekompleksi ja EC-Lab tarkvara.

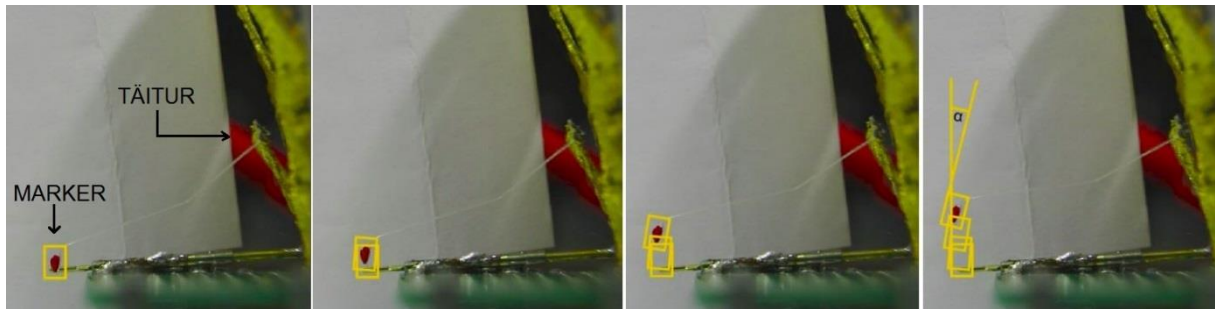
Täituri läbilõiget vaadeldi skaneeriva elektronmikroskoobiga Hitachi TM3000, mis oli varustatud tagasipeegeldunud elektronide detektoriga.

Mikroskoobi all tehtud pildid elektroodiga kaetud struktuurist (joonis 27) on valgustatud ultravioletse valgusega nurga alt. See võimaldas paremini näha elektroodi kihi reljeefsust.



**Joonis 13.** Täituri karakteriseerimise lahendus. Kollane paber tähistab täituri asukohta ja punane paber tähistab markeri asukohta

Täituril mõõdeti ka liigutusulatuse nurka. Selleks valiti välja, millist kolmnurkset täiturit mõõtmistel kasutada. Välja valitud kolmnurga külge kinnitati marker (joonis 14), mille järgi sai pärast videotöötlust kasutades (joonis 14) määrata, kui palju täitur end liigutas.



**Joonis 14.** *Markeri tuvastamine*

Täiturile rakendati bipolaarse voolu signaal, mis koosnes vahelduva polaarsusega laadimisimpulssidest, millele järgnesid lühikesed hetked, mil täiturit hoiti avatud vooluringi potentsiaalil [11].

## 5 Tulemused ja arutelu

### 5.1 Katsete ülevaade soovitud täiturini jõudmisest

Järgnev tabel kirjeldab mustridisainis tehtud muudatusi seni, kuni jõuti töötava disainini. Punane värv tabelis tähendab vastava etapi ebaõnnestumist, roheline õnnestumist ning valge puhul selle etapini ei jõutud.

**Tabel 3.** *Etapid töötava disainini jõudmiseks*

Disaini nr	Tikkimine	Membraan	Elektrood	Seadistus	Tulemus	Mida muuta?
1				Algne muster. Kogu muster puuvillasest niidist. Niidi pinge (TT) = 50	Liiga tihe ja pingul	Muster hõredamaks
2				Alumine niit – lahustuv. Ülemine niit – mustri serval puuvillane, mustri sisul lahustuv. TT = 50	Niit ei rebinud enam kilet katki	Mustri sisu ja serv järgmine kord lahustuva niidi asemel nailonist
3				Alumine niit – mustri serval nailon, mustri sisul lahustuv. Ülemine niit – nailon. TT = 50	Tundus et mustri välisring ehk serv ei kattu mustri keskel olevate kolmnurkadega ehk ei ole võimalik, et see variant kuidagi ühes tükis püsiks.	Välisserv tuleb teha laiemaks, et see kattuks mustri sisuga.
4				Alumine niit – mustri serval nailon, mustri sisul lahustuv. Ülemine niit – nailon. TT = 50	Välisserva laiemaks tegemine parandas eelmise probleemi. Nüüd mustri sisu haakub välisservaga.	Järgmisena väiksem TT ning kasutada mustri serval alumise niidina lahustuvat niiti.

5			Alumine niit – lahustuv. Ülemine niit – nailon. TT = 30	Niit tundub endiselt natuke liiga pingul. Proovisin siiski seda mustrit kuumaga töödelda, kuid nailonist niidid ei sulanud väga hästi kokku.	Järgmine kord TT veel väiksem.
6			Alumine niit – lahustuv. Ülemine niit – nailon. TT = 20	Proovisin ka TT = 10, aga tundub et nailon on liiga libe - jäi masinasse kinni. Selle tulemuse kinnitasin raamile, et kile ära lahustada. Muster lagunes keskel ära.	Lisada mustri keskele väike ring, mis hoiaks mustri sisu keskel koos.
7			Kogu muster nailonist. TT = 20	Nüüd on kogu muster nailonist. Muidu hea, aga ringi sisuks olevate kolmnurkade sisu ei haaku igalt poolt kolmnurkade piirjoontega.	Vaja teha kolmnurkade sisu niidid veidi pikemaks, et need haakuksid kolmnurkade piirjoontega. Samuti pikendada kolmnurki, et kindlasti oleks olemas haakumine välisservaga.
8			Kogu muster nailonist. TT = 20	Vaatluse tulemusena tundus see muster olevat esimene sobiv prototüüp.	Vahetada nailon puuvillase niidi vastu, et saavutada kahemõõtmelist struktuuri.
9			Kogu muster puuvillasest niidist. TT = 20.	Üldiselt hea tulemus, aga välisserva juures on palju nõela poolt tekitatud vigastusi.	Et vigastusi kinni katta, tuleb lisada välisserva ja ringi sisu vahele veel üks ring.
10			Kogu muster puuvillasest niidist. TT = 20.	Lisatud ring ei katnud nõela auke täiuslikult.	Vaja suurendada lisatud ringi raadiust.
11			Ülemine niit – mustri sisul lahustuv, mustri serval	Lisatud ring kattis nõela augud täiuslikult.	Mustri keskel olev väike ring ei ole enam oluline

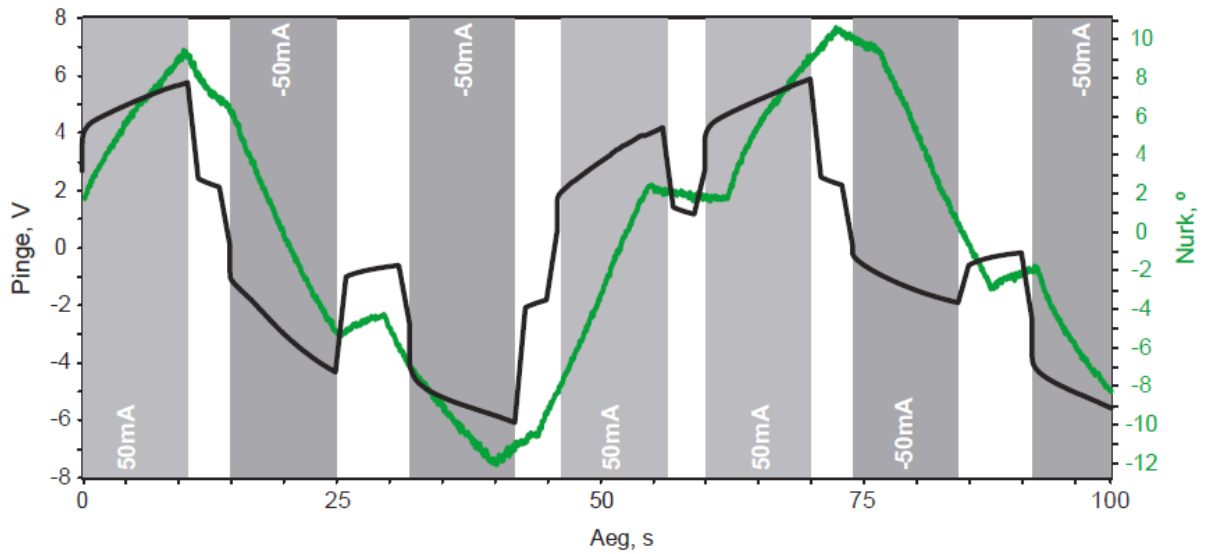
				puuvillane. Alumine niit – kogu mustril puuvillane. TT = 20.		ja selle võib eemaldada.
12				Ülemine niit – mustri sisul lahustuv, mustri serval puuvillane. Alumine niit – kogu mustril puuvillane. TT = 20.	Selleks et täiturit oleks hiljem lihtsam skalpelliga töödelda, on vaja mustri keskel olevaid kolmnurki kohendada.	Vaja muuta kolmnurkade kaugust üksteisest, et neid oleks hiljem lihtsam skalpelliga töödelda.
13				Ülemine niit – mustri sisul lahustuv, mustri serval puuvillane. Alumine niit – kogu mustril puuvillane. TT = 20.	Kolmnurgad on nüüd sobivad.	Oleks vaja ringi välisserva peale lisada veel üks ring, et välisserva niitidest moodustuks tunnel. Seda tunnelit on vaja, et saaks tikandi vedrudega raami külge kinnitada.
14				Ülemine niit – mustri sisul lahustuv, mustri serval puuvillane. Alumine niit – kogu mustril puuvillane. TT = 20.	Vaatluse tulemusena tundus see muster täituri valmistamiseks sobiv.	

## 5.2 Elektromehaanilised parameetrid

Kõigil mõõtmistulemuste graafikutel (tabel 3 disain 14) on musta joonega kujutatud pinge ning rohelise joonega täituri liigutusulatust.

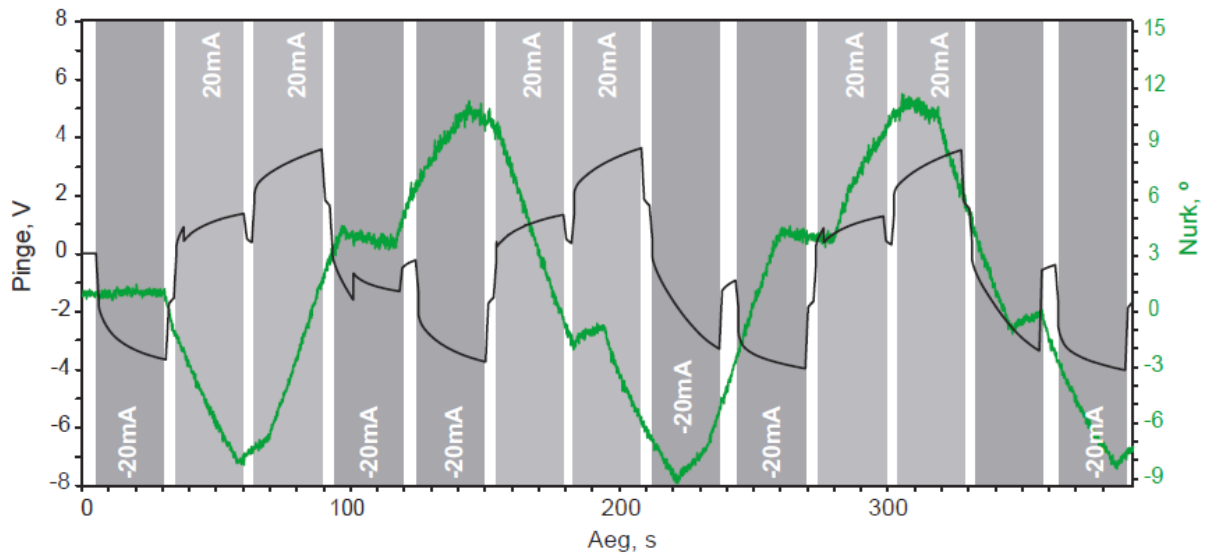
Esimesel mõõtmisel (joonis 15) rakendati täiturile bipolaarse voolu signaal amplituudiga 50mA, teisel mõõtmisel (joonis 16) amplituudiga 20mA ning kolmandal mõõtmisel (joonis 17)

amplituudiga 100mA. Graafikute pealt näeme, et seal kus on täiturile rakendatud vool, on nurgal mahtuvuslikule süsteemile omane lineaarne tõus nagu eeldati.



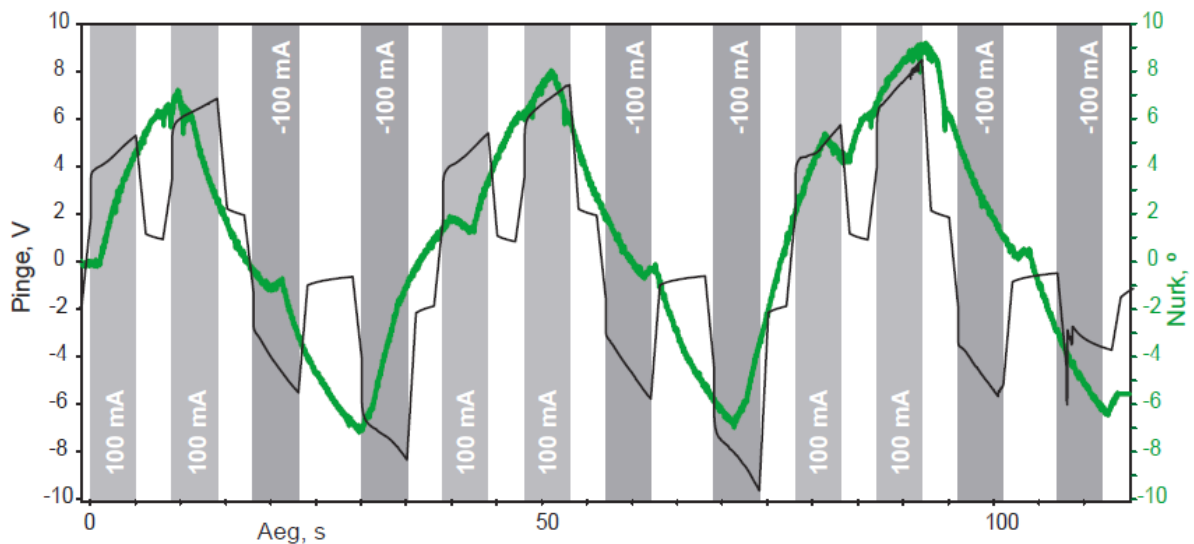
**Joonis 15.** Esimese mõõtmise tulemuste graafik

Täiturile rakendati bipolaarse voolu signaal amplituudiga 20mA (joonis 16).



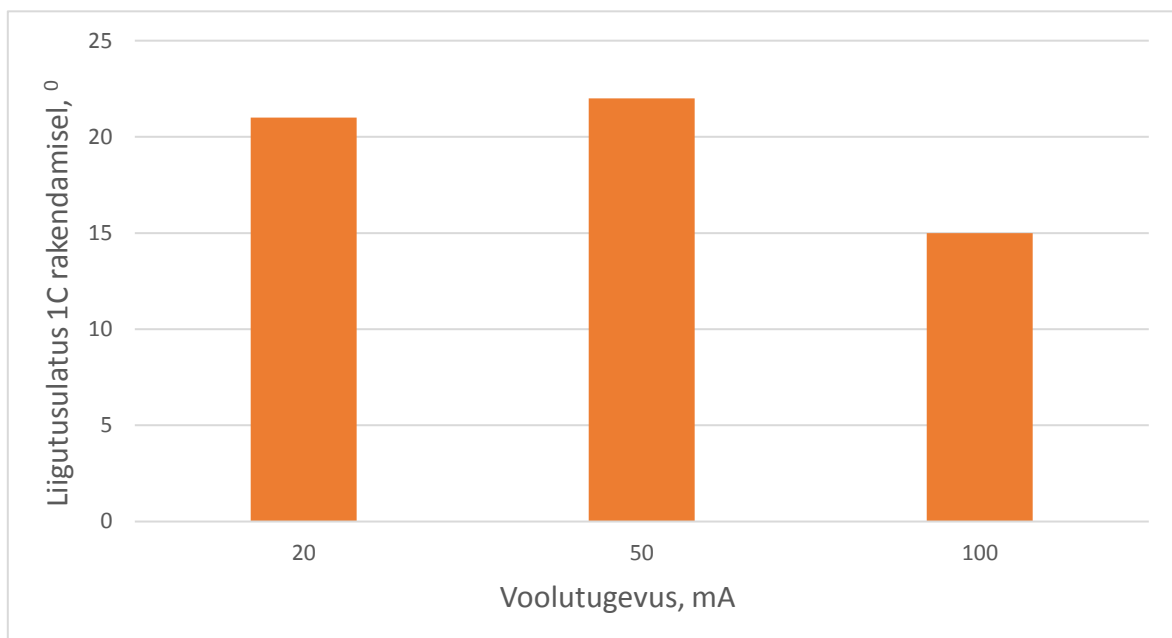
**Joonis 16.** Teise mõõtmise tulemuste graafik

Täiturile rakendati bipolaarse voolu signaal amplituudiga 100mA (joonis 17).



**Joonis 17.** Kolmanda mõõtmise graafik

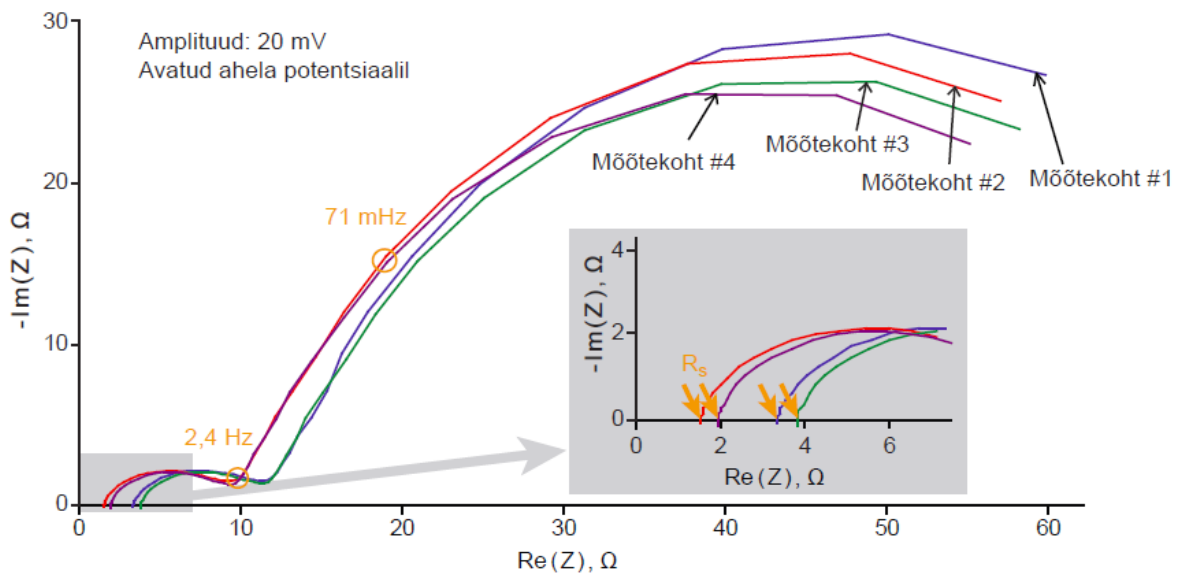
Kõigil katsetel oli amplituud (joonis 18) võrdlemisi sarnane, aga madala laadimiskiirusega (laadimisvool 20 mA) oli see 5% väiksem kui kõrgemal laadimiskiirusel (laadimisvool 50 mA). Seda seetõttu, et tõenäoliselt oli laengul rohkem aega levida üle kogu struktuuri, mitte ainult täituri peale - seetõttu näis madalal laadimiskiirusel olevat väiksem amplituud. Veelgi kõrgemal laadimiskiirusel (laadimisvool 100 mA) oli liigutusulatus aga 32% madalam kui 50 mA korral, seda tõenäoliselt seetõttu, et laengul ei olnud piisavalt aega levida ühe täituri piires.



**Joonis 18.** Maksimaalne täituri liigutusulatus erinevate signaalide korral

Samuti mõõdeti kahemõõtmelise (tabel 3 disain nr 14) täituri impedantsi (joonis 19). Sooritati neli mõõtmist ning iga mõõtmise ajal oli erinev osa täiturist vedrukontaktide vahel. Graafiku kõrge sagedusega ots lõikub x-teljega punktides 3,35  $\Omega$ , 1,55  $\Omega$ , 3,83  $\Omega$  ja 1,95  $\Omega$ . Need on küll

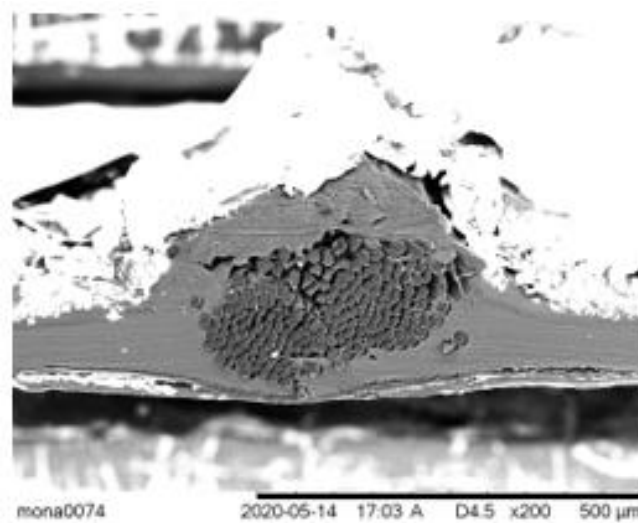
väärtuse poolest erinevad (standardhälve: 0,95  $\Omega$ ), aga absoluutväärtus on kõigil väga madal (keskväärtus: 2,67  $\Omega$ ). See näitab, et järjestiktakistus on madal ja katse tulemus on ootuspärane.



**Joonis 19.** Kahemõõtmelise täituri impedantsi graafik

### 5.3 Täituri morfoloogia

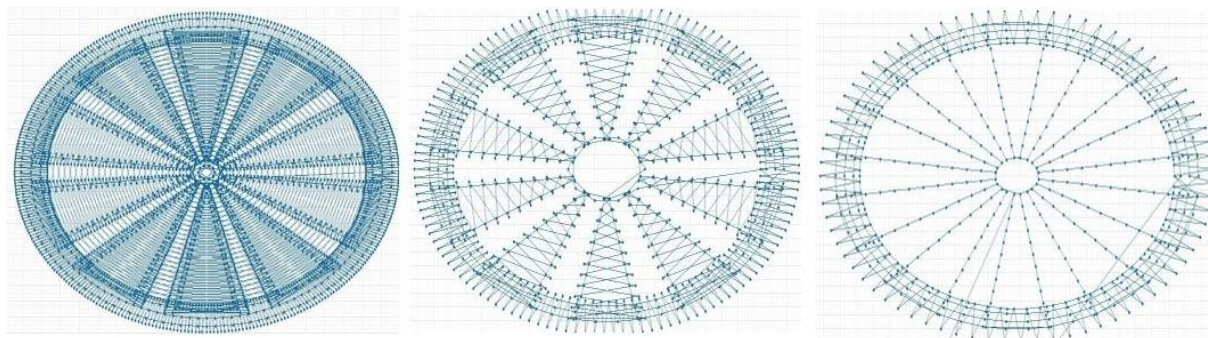
Kahemõõtmelise täituri läbilõike vaatlemisel skaneeriva elektronmikroskoobiga on näha, et mitte ainult puuvillane niit vaid ka niidi kiud on ümbritsetud membraaniga (joonis 20). Samuti on näha, et niidi koha pealt on täitur umbes kolm korda paksem kui ülejäänud kohtades (joonis 20).



**Joonis 20.** Skaneeriva elektronmikroskoobi kujutis täituri läbilõikest

## 5.4 Sarruse disain

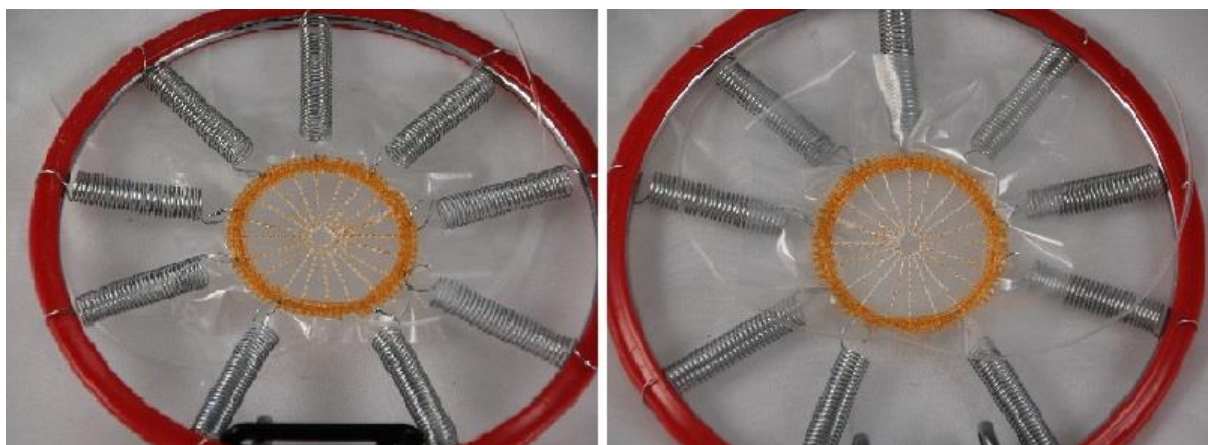
Disain nr 8 (joonis 21, keskel) põhjal tikiti kolmemõõtmeline sarrus, mis oli valmistatud nailonist ning oli kantud veeslahustuva tugikilele.



**Joonis 21.** Vasakult: Disain nr 1, disain nr 8, disain nr 14

Disaini nr 14 (joonis 21, paremal) põhjal tikiti puuvillase niidiga kahemõõtmeline sarrus veeslahustuva tugikile peale (joonis 22).

Suurimad muudatused olid järgnevad: mustri tihedust vähendati, mustri välisserv muudeti laiemaks, alates disain nr 9-st eemaldati kolmnurki täitvad niidid, kolmnurgad muudeti pikemaks ning mustri keskel olev ring eemaldati.



**Joonis 22.** Vasakult: disain nr 14 järgi valmistatud sarrus pealt vaates, disain nr 14 järgi valmistatud sarrus alt vaates

## 5.5 Niidi valik

Esimene prototüüp oli kolmemõõtmeline, sest sarrus oli valmistatud nailonist. Kuna membraani lahus nailonit ei märga, oli nende kohtade, kus nailon kilet läbis, täitmine keerulisem.

Puuvillasest niidist valmistatud sarrus oli kahemõõtmeline. Kui kasutada puuvillast niiti, siis märgab membraani lahus niiti väga hästi. See on positiivne, sest siis täituvad kohad, kus niit tugistruktuuri läbib, lahusega paremini. Samuti tagab antud lähenemine membraani hea mehaanilise sidususe niidiga, mida näitab läbilõige joonisel 20. Samas kulus membraani lahust niidi kiudude küllastamiseks palju enam kui niitide vahelise kile moodustamiseks - see oli ka põhjus, miks tugistruktuuri ei suudetud katta ainult aerograafi abil, vaid tuli sarruse välisservi tugevdada sinna pintsliga lahust lisades.

## 5.6 Veelahustuva ajutise kile kasutuselevõtt membraanis

Esimesele sarrusele kanti aerograafiga 4 ühtlast kihti membraani lahust. Kuigi enamus sarruse pinnast tundus olevat kaetud oli siiski vaja mõnda kohta pintsliga parandada.

Esimese struktuuri (tabel 3 disain nr 8) tugikile lahustamise tulemusena püsis umbes pool struktuurist ühes tükis (joonis 23), kuid mõned nõela poolt tekitatud augud ei olnud siiski piisavalt membraani lahusega täidetud ning teine pool struktuurist hävines. Siiski oli säilinud osa pealt täpselt näha, kui kolmemõõtmeline tulemus oli (joonis 23). Lisaks sellele oli tulemuseks vastupidiselt ootustele nähtus, kus membraan oli nailoni peal ja ümber, mitte all ja ümber (joonis 23).



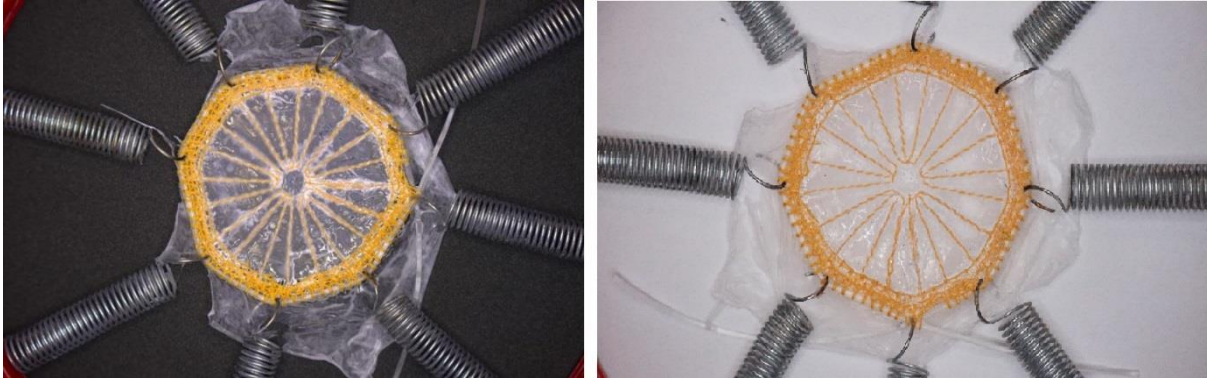
**Joonis 23.** *Esimene struktuur peale tugikile lahustamist*

Viimasena mõõdeti selle struktuuri membraani paksust aladelt, kus ei olnud nailonit. Paksust mõõdeti iga kord erineva koha pealt. Tulemused olid vahemikus 3 kuni 14  $\mu\text{m}$ . Nii suur vahemik näitas, et membraani kiht ei olnud väga ühtlase paksusega, aga kõik olid absoluutväärtuse poolest väga õhukesed.

Kuna esimese lähenemise tulemused ei olnud nii head kui loodeti, otsustati edasi liikuda teise variandiga, kus niidiks oli puuvillane niit ning tulemus on kahemõõtmeline.

Enne eduka tulemuseni jõudmist valmis mitmeid ebaõnnestunud membraane. Iga kord kanti sarrusele erinev arv lahuse kihte. Pärast mitmeid katsetusi osutus kõige edukamaks variant, kus spreiti 10 hästi õhukest kihti lahust aerograafiga ning tugevdati pintsliga neid kohti, mis tundusid endiselt liiga õhukesed.

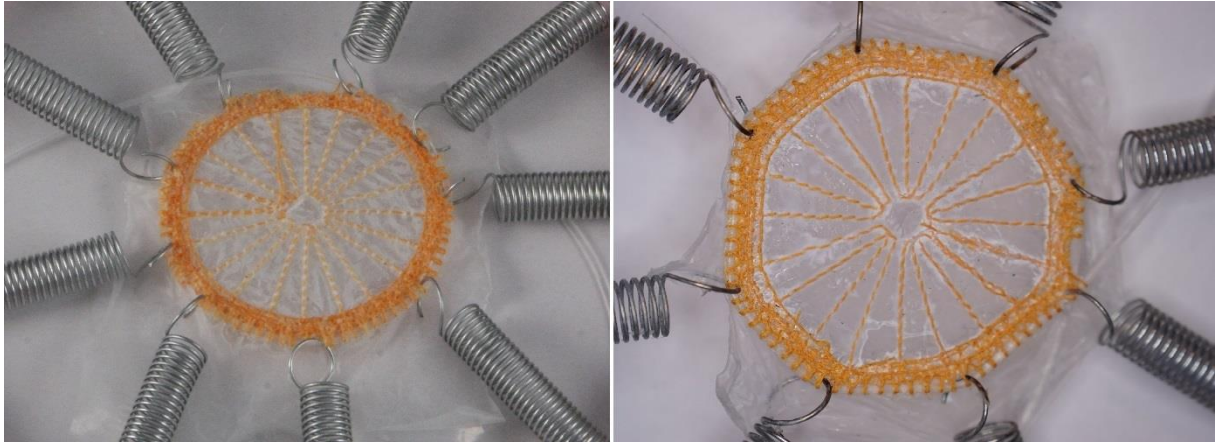
Selle struktuuri tugikile lahustamise tulemusena püsis membraan ühes tükis (joonis 24).



**Joonis 24.** Teine struktuur peale tugikile lahustamist (tabel 3 disain nr 14)

Veeslahustuv ajutine kile osutus üldkokkuvõttes heaks aluseks, mille peale membraani lahust kanda. Aerograafiga kile peale membraani lahust kandes oli iga spreitud lahuse kiht ühtlase paksusega. Selle tulemuseks oli ühtlane ja õhuke membraan ning seda peegeldab ka impedantsi graafik (joonis 19).

Üks oluline faktor membraani edukaks valmimiseks oli sarruse tihedus. Mida hõredam sarrus oli, seda vähem oli ka pisteid. Selle tulemusena vigastati tikitavat materjali vähem ning tänu sellele oli membraani valmistamine lihtsam. Membraani valmimisel mängis olulist rolli ka see, kui sirge oli kile, mille peale lahust kanti. Kui kile oli kortsus, siis lõpptulemusena oli ka membraan ebaühtlane (joonis 25). Selle probleemi lahendamiseks lisati juurde vedrusid, mille abil tikand raami peale pingule tõmmati. Nii toimides ei olnud ükski vedru rohkem pinges kui teised ja kile oli raami peal pingul, aga mitte kortsus.



**Joonis 25.** Vasakult: kortsus kile peale kantud membraan, sileda kile peale kantud membraan

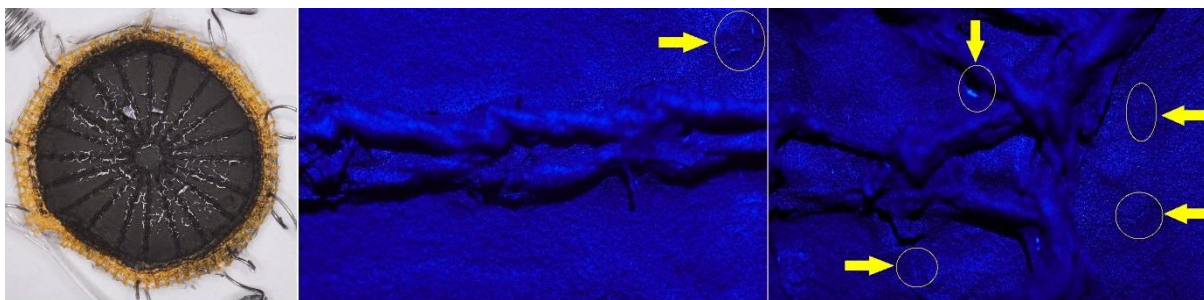
## 5.7 Suunised elektroodi membraanile kandmiseks

Teise struktuuri membraani mõlemale poolele kanti elektroodi kiht (joonis 26). Tulemuseni jõudmiseks tuli membraani mõlemale poolele kanda 9 õhukest kihti süsiniku suspensiooni. Elektroodi kiht järgib täpselt selle all asetseva niidi profiili (joonis 27).



**Joonis 26.** Elektroodiga kaetud struktuur pealtpoolt

Enne, kui alustada elektroodi membraanile kandmist, tuleb veenduda, et kogu kile oleks membraani pealt lahustunud. Vastasel juhul kohtadel, kus kile pole lahustunud, elektroodi kiht praguneb ja koorub membraani küljest lahti (joonis 27).



**Joonis 27.** *Pragunenud elektroodiga kaetud struktuur üldvaates ja mikroskoobi all*

Enne, kui alustada elektroodi spreimist aeroograafiga, on vaja raam ja vedrud kinni katta. Samuti on vaja valmistada koonus, mis sobitaks täituri peale nii, et elektrood niidist tehtud välisserva peale ei satuks. Vastasel juhul võib tulevikus tekkida lühis.

Impedantsi graafikul (joonis 19) madala sagedusega alas moodustub poolring diameetriga umbes  $70 \Omega$ . See vastab kahe elektroodi kokkupuutekohale. Et  $70 \Omega$  on palju suurem kui kõrgesageduslikus alas olev väiksem kui  $4 \Omega$  takistus, ei valmistanud see katsetes kasutatud ajaskaalas (minutid) olulisi probleeme.

## 5.8 Voolukollektori pealekandmine

Enne kui alustati struktuurile kulla pealekandmist, eemaldati struktuuri küljest vedrud ehk seda ei hoitud enam vedrude abil pingul. Eesmärgiks oli katta struktuuri mõlemad pooled ühe ühtlase kihi kullaga, kuid see osutus keeruliseks, sest struktuur ei olnud enam täiesti lapik (joonis 28). Lisaks sellele oli keeruline voolukollektorit sarruse niitide peale kanda (joonis 26), sest need ei olnud valminud struktuuriga tasapinnas. Seega enamuse pinnast oli kaetud rohkem kui ühe kihi kullaga.

Valminud struktuurist lõigati välja kolmnurkseid täitureid vastavalt peatükis 4.3.6 kirjeldatud meetodile.



**Joonis 28.** Vasakult: voolukollektoriga kaetud struktuur pealt- ja altpoolt

## 6 Kokkuvõte

Kantav elektroonika on kasvav trend, mis pakub igal aastal järjest uusi lahendusi. Uute lahenduste leidmiseks arendatakse tarku tekstiile ja pehmeid täitureid. Pehmed täiturid on laialdaselt levinud eeskätt pehmerobotika valdkonnas, kuna nad on painduvad, kerged ja väheohtlikud.

Käesoleva lõputöö tulemusena töötati välja protsess tikkimismeetodil täituri valmistamiseks. Töö käigus esiteks täiustati olemasolevat programmi mille eesmärk oli genereerida fail tikandi pistete koordinaatide hoiustamiseks. Teiseks, täiustati tikandi disaini vastavalt vajadusele. Kolmandaks, katsetati erinevaid meetodeid membraani valmistamiseks, kuni jõuti kõige optimaalsema lahenduseni. Järgmisena, kanti membraani peale süsiniku suspensiooni ja kulla kihid. Valminud täiturile valmistati testimise tarbeks kullast pindadega vedrukontaktid ning EC-Lab tarkvara abil sooritati vajalikud mõõtmised.

Mustri disainimisel osutus LabVIEW keskkond väga kasulikuks, sest visuaalprogrammeerimise abil oli võimalik mustris tehtud muudatusi mugavalt jälgida. Mustri disainimisel osutus oluliseks ka mustri tihedus, ehk mitu pistet nööelaga tehakse. Mida hõredam muster oli, seda vähem oli ka pisteid. Selle tulemusena vigastati materjali millele tikiti vähem ning tänu sellele oli membraani valmistamine lihtsam.

Täituri valmistamisel katsetati erinevaid variante membraani lahuse tikandile kandmiseks. Kõige efektiivsemaks kujunes spreimismeetod, kus aerograafi abil kanti kile peale mitu õhukest, aga ühtlast kihti lahust. Lisaks sellele pintseldati lahust mustri servadele ja kohtadele, kus kile sisse olid tikkimisest tekkinud suuremad avad. Selle tulemusena olid täituri servad tugevad ning täitur ei lagunenu peale kile lahustamist.

Süsiniku suspensiooni kanti membraani peale samuti aerograafi abil. Tulevikus oleks vaja välja mõelda parem lahendus mis võimaldaks suunata süsiniku suspensiooni spreimisel ainult membraani peale. Nii nagu süsiniku puhul, võiks ka kulla pealekandmise meetodit efektiivsemaks muuta.

Tikkimismeetodil valmistatud täitur täitis oma eesmärgi. Seega töö tulemusena töötati täituri valmistamiseks välja meetod, mida on võimalik edukalt korrata.

# Viited

- [1] L.Wang, X. Fu, J. He, X. Shi, T. Chen *et al*, „Application Challenges in Fiber and Textile Electronics“, *Advanced Materials*, 2019, 32, 1901971
- [2] J. Shi, S. Liu, L.Zhang, B.Yang, L. Shu *et al*, „Smart Textile-Integrated Microelectronic Systems for Wearable Applications“, *Advanced Materials*, 2019, 32, 1901958
- [3] J. Lee, B. L. Zambrano, J. Woo, K. Yoon ja T. Lee, „Recent Advances in 1D Stretchable Electrodes and Devices for Textile and Wearable Electronics: Materials, Fabrications, and Applications“, *Advanced Materials*, 2019, 32, 1902532
- [4] W. Pyka, M. Jedrzejowski, M. Chudy, W. Krafczyk, O. Tokarczyk *et al*, „On the use of textile materials in robotics“, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 15, 2020, 1-8
- [5] A. Hatamie, S. Angizi, S. Kumar, C. M. Pandey, A. Simchi *et al*, „Review—Textile Based Chemical and Physical Sensors for Healthcare Monitoring“, *Journal of The Electrochemical Society*, 167, 2020, 037546
- [6] Olympic Clothing Designers Try to Beat the Cold with Technology, *scientificamerican.com* [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud 1. detsember 2019] <https://www.scientificamerican.com/article/olympic-clothing-designers-try-to-beat-the-cold-with-technology/>
- [7] SoundShirt 2.0 DEV KIT, *shop.cutecircuit.com* [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud 1. detsember 2019] <https://shop.cutecircuit.com/collections/special-products/products/soundshirt-2-0-dev-kit>
- [8] T. Hiramitsu, K. Suzumori, H. Nabaie ja G. Endo, „Experimental Evaluation of Textile Mechanisms Made of Artificial Muscles“ Ettekanne konverentsil „2nd IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)“, Seoul, 2019
- [9] G. Acar, O. Ozturk, A. J. Golparvar, T. A. Elboshra, K. Böhringer ja M. K. Yapici, „Wearable ja Flexible Textile Electrodes for Biopotential Signal Monitoring: A review“, *MDPI Electronics*, 8, 2019, 479
- [10] B. G. Da Rocha, O. Tomico, P. Markopoulos ja D. Tetteroo, „Inflatable Actuators Based on Machine Embroidery“ Ettekanne konverentsil „Textile Intersections“, London, 2019

- [11] F. Kaasik, I. Must, I. Baranova, I. Põldsalu, E. Lust *et al*, „Scalable fabrication of ionic and capacitive laminate actuators for soft robotics“, *Sensors and Actuators*, 246, 2017, 154-163
- [12] I. Must, E. Sinibaldi ja B. Mazzolai, „A variable-stiffness tendril-like soft robot based on reversible osmotic actuation“, *Nature Communications*, 10, 2019, 344
- [13] PCS (Pfaff home) Design format [Võrgumaterjal] [Tsiteeritud 25. november 2019]  
<http://www.achatina.de/sewing/main/PCS.HTM>
- [14] I. Uduste, F. Kaasik, U. Johanson, A. Aabloo ja I. Must, „An All-Textile Non-muscular Biomimetic Actuator Based on Electrohydrodynamic Swelling“, *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 8, 2020, 408

# Lihtlitsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, Mona Kүүts,

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

„Pehmed täiturid rüürobotile“

mille juhendaja on Indrek Must

reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, alates **20.05.2023** kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

*Mona Kүүts*

**20.05.2020**