

Tomi Tuomaala

**ELEKTROKEMIALLISTEN BIOSENSORIALUSTOJEN  
VALMISTUS SILKKIPAINOTEKNIIKALLA OAMK PRINLAB  
YMPÄRISTÖSSÄ**

**ELEKTROKEMIALLISTEN BIOSENSORIALUSTOJEN  
VALMISTUS SILKKIPAINOTEKNIKALLA OAMK PRINLAB  
YMPÄRISTÖSSÄ**

Tomi Tuomaala  
YAMK  
Opinnäytettyö  
Syksy 2016  
Degree Programme in Industrial Management  
Oulun ammattikorkeakoulu

# TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu  
Degree Programme in Industrial Management

---

Tekijä: Tomi Tuomaala

Opinnäytetyön nimi: Elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistus silkkipainotekniikalla OAMK PrinLab ympäristössä.

Työn ohjaaja: Hannu Päätalo

Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2016 Sivumäärä: 110 + 0 liitettä

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli optimoida valmistusprosessi elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistukseen silkkipainotekniikalla. Elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistus vaatii monialaista osaamista, joten työssä onnistumisen edellytys olikin löytää alan toimijaverkostot Suomessa ja ulkomailta, sekä heidän avullaan hankkia tarvittavaa tietoa kaupallisista materiaaleista sensorin valmistukseen silkkipainomenetelmällä.

Silkkipainotekniikan teoriatietoihin nojaten suunniteltiin ja hankittiin optimaaliset painoverkot sekä materiaalit. Ensimmäiset testipainot tehtiin sensorialustan toiminnan kannalta kriittisimmällä painomusteella ja painoseulalla, tavoitteena oli optimoida painoparametrit kolmesta painokerroksesta koostuvan biosensorialustan valmistukseen. Testipainojen sekä niihin liittyvien painoparametrien muutosten vaikutusta painojälkeen analysoitiin FocalSpec 3D-pintaprofiili mittalaitteella sekä sähköjohtokykymittauksin. Mittaustulosten perusteella analysoitiin painoprosessia ja valittiin optimaaliset painoparametrit ja materiaalit varsinaiseen valmistusprosessiin.

Työn tuloksena syntyi valmistusprosessi elektrokemiallisen biosensorialustan valmistukseen sekä todennettiin työssä esitettyjen silkkipainomenetelmän suunnitelusääntöjen paikkansa pitävyyttä käytännössä. Työssä dokumentoitiin tarpeelliset toimijaverkostot biosensorialustojen tutkimus- ja kehitystyössä sekä luotiin katsaus markkinoihin nyt ja tulevaisuudessa valmiisiin markkinaselvityksiin perustuen. Työn edetessä kehitettiin käytäntö sensoripohjien tuotetiedonhallintaan, mikä pitää sisällään sensoriarkkien osaluettelot ja prosessissa käytettyjen materiaalien ja valmistusparametrien jäljitettävyyden. Materiaalien sekä valmistusparametrien jäljitettävyys on olellisen tärkeää sensoripohjien tutkimus- ja kehitystyössä.

---

Asiasanat: biosensori, silkkipaino, pikadiagnostiikka, painettu äly, elektrodit

## **ABSTRACT**

Oulu University of Applied Sciences  
Degree Programme in Industrial Management

---

Author: Tomi Tuomaala

Title of thesis: Manufacturing of Electrochemical Biosensor Platforms Using Screen Printing Methods in OUAS PrinLab Environment

Supervisor: Hannu Päätalo

Term and year when the thesis was submitted: Autumn 2016 Pages: 110 + 0 appendices

---

The objective of this thesis was to optimize the manufacturing process for an electrochemical sensor platform using the traditional flatbed screen printing method. Manufacturing electrochemical sensor platforms requires multidisciplinary skills, and therefore one prerequisite was to collect people who are working in the rapid diagnostics and screen printing field in Finland or abroad, and utilize them when acquiring material and knowhow for the manufacturing process.

The design rules for the printing process, printing screens and materials were based on the acquired theoretical information. An electrochemical sensor platform consists of three different layers. The first test print was carried out using the most critical printing materials to optimize the screen printing process parameters and to reach the best printing quality. The FocalSpec 3D surface profile and measurements of the electrical conductivity of the electrodes were the methods to analyze and find the optimized parameters for the screen printing process and the materials to manufacture the real electrochemical sensor platform where all three layers were printed.

The most important result of this thesis was the optimization of the manufacturing process for an electrochemical sensor platform. In addition, it was proved how suitable the theoretical screen printing rules are in practice. The needed subcontracting network and companies in the electrochemical sensor research and development work in Finland and abroad were documented and categorized. A review of the electrochemical sensor markets now and in the future based on a commercial market analysis was also shortly presented in this thesis

The traceability of the parameters and materials in the manufacturing process of electro-chemical sensor platforms is noticed in the thesis because it is an important part of long term research and development work. For the use of PrinLab, an operative process for product data management and production management was created in the thesis process.

---

Keywords: electrochemical ,biosensor, screen printing, rapid diagnostic, printed intelligence, electrodes

## **ALKULAUSE**

Haluan kiittää opinnäytetyön tekemiseen saamastani tuesta sekä kannustavista keskusteluista Oulun ammattikorkeakoulun PrinLab laboratorion henkilökuntaa Harria, Jaria, Marjaan sekä Niinaa. Haluan kiittää myös työnohjaajaa Hannu Päätaloa rakentavista keskusteluista työn edetessä.

Suurin kiitos kuuluu perheelleni, erityisesti vaimolleni Elisalle kärsivällisyystä, sekä saamastani tuesta kirjoitella ja viimeistellä opinnäytetyöni loppuun.

Oulussa 4.11.2016

Tuomaala Tomi

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ABSTRACT	4
ALKULAUSE	5
SISÄLLYS	6
SANASTO	9
1 JOHDANTO	11
1.1 Työn tavoite ja haasteet	12
1.2 Työn rakenne	13
2 ELEKTROKEMIALLINEN BIOSENSORI	15
2.1 Silkkipainettu elektrokemiallinen biosensori	16
2.2 Elektrokemiallisen biosensorin toimintaperiaate ja rakenteen merkitys sensorin toimintaan	17
2.3 Elektrokemiallisen sensoripohjan sähkökemiallisia testausmenetelmiä	19
3 ELEKTROKEMIALLISTEN BIOSENSOREIDEN MARKKINAT JA KAUPALLISET TOIMIJAVERKOSTOT	21
3.1 Katsaus painettujen taipuisien sensoriliuskojen markkinoihin nyt ja tulevaisuudessa	21
3.2 Kaupalliset materiaalitoimittajat sekä verkostot sensoreiden valmistukseen	24
4 SILKKIPAINOTEKNIKKA	27
4.1 Tasosilkkipainon periaate	28
4.1.1 Painolastan nopeus ja paine painoprosessissa	31
4.1.2 Levityslasta painoprosessissa	32
4.1.3 Snap-off etäisyys painoprosessissa	33
4.2 Rotaatiosilkkipainon periaate	35
4.3 Painoseula	37
4.3.1 Seulakangasmateriaalit	38
4.3.2 Seulakankaan tärkeimmät ominaisuudet	40
4.3.3 Seulakangas painokehyksessä	41
4.3.4 Seulakankaan kireys	44
4.3.5 Emulsio seulakankaalla ja sen vaikutus painojälkeen	46

4.3.6 Sääntöjä painoseulan suunnitteluun	48
4.4 Painolasta eli raakeli	51
4.4.1 Painolastan koko ja muoto	52
4.4.2 Painolastan kumin kovuus	53
4.5 Painomusteet	54
<b>5 ELEKTROKEMIALLISTEN SENSORIPOHJIEN VALMISTUS TASOSILKKIPAINOPROSESSISSA</b>	<b>58</b>
5.1 Materiaalivalinnat elektrokemiallisten sensoripohjien valmistukseen	59
5.1.1 Painomusteiden valinta	60
5.1.2 Alustamateriaalin valinta	62
5.2 Sensorin eri kerroksien geometrioiden suunnittelu	64
5.3 Painoseulan parametrien määrittäminen ja seulakankaan valinta eri kerroksille	65
5.3.1 Painoseulan suunnittelu grafiittikerrokselle	67
5.3.2 Painoseulan suunnittelu referenssikerrokselle	68
5.3.3 Painoseulan suunnittelu eristekerrokselle	70
5.4 Painoprosessissa tarvittavat laiteet, tarvikkeet ja materiaalit	71
5.5 Painoparametrien optimointi painoprosessiin	72
5.5.1 Testipainettujen elektrodien resistanssi eli sähköjohtokyvyn mittaukset	73
5.5.2 Optiset mittaukset testipainoille	75
5.6 Varsinaisten sensoripainojen valmistelut	77
5.6.1 Alustamateriaalin esikäsittely	78
5.6.2 Painomusteiden esikäsittely ja laatu	79
5.6.3 Painolaitteen sekä painoseulan valmistelu painoihin	81
5.6.4 Painoseulan ja tarvikkeiden pesu	83
5.7 Elektrokemialisen sensoripohjan valmistus	83
5.7.1 Vertailuelektrodin painaminen	84
5.7.2 Työ- ja vastaelektrodin painaminen	86
5.7.3 Eristekerroksen painaminen	88
5.8 Tuotetiedonhallinta, tuotannonohjaus ja jäljitettävyys	90
5.8.1 Painoprosessin parametrien jäljitettävyys	91
5.8.2 Painoseulojen parametrien jäljitettävyys	92

6 SENSORIALUSTOJEN PAINOLAADUN ANALYSointI JA TESTAUS	94
6.1 Pintaprofiilimittaukset painetuille sensorialustoille	95
6.1.1 Työelektrodin pinnan analysointi	95
6.1.2 Referenssi- ja eristekerroksen painopinta	98
7 YHTEENVETO	101
8 POHDINTA	106
LÄHTEET	107

## SANASTO

BIOSENSORI	Analyyttinen laite, jossa biologista tai biologisesti johdetta materiaalia on joko sidottuna tai kokonaan integroitu fysikaalis-kemialliseen anturiin
CAD	Tietokone avusteinen suunnitteluoohjelma
ISOPROPANOLI	Liotinaine, kuuluu alkoholien aineryhmään
PAS	Pascal sekunti, Dynaamisen viskositeetin yksikkö SI-järjestelmässä
PBT	Polybutyleenitereftalaatti on polyesteri, jota käytetään teknisenä muovina ja runsaasti kiteytyvänä ruiskuvalupolymeerinä
RESISTANSSI	Kuvaaa johtimen tai muun sähköisen piiriosan kykyä vastustaa sähkövirtaa
PET	Polytetyleeniterftalaatti on kestomuovi, jota käytetään erityisesti pakkausteollisuudessa
POSITIVIFILMI	Positiivifilmin avulla valotetaan painokuvio painoseulan seulakankaalle pinnoitettuun emulsioon
POISI	Dynaamisen viskositeetin yksikkö Cgs-järjestelmässä
PRINLAB	Oulun ammattikorkeakoulun painettavan elektroniikan kehityslaboratorio
PRINTOCENT	VTT:n, Oulun ammattikorkeakoulu Oy:n, Oulun yliopiston sekä Oulu innovation Oy:n perustama painettavan elektroniikan ja optisen mittaustekniikan innovaatiokeskus

RHEOLOGIA	Oppi nesteen muodon muutoksesta ja virtauskäytäytymisestä
SHORE	Kovuus on materiaalin mekaaninen ominaisuus, kyky vastustaa muodonmuutosta eli naarmuuntumista, kulumista ja leikkaantumista
SINTRAUS	Sintrautuessa kappale muodostaa kiinteän rakenteen
UV-VALO	Ultraviolettisäteily eli UV-säteily on sähkömagneettista säteilyä
VISKOSITEETTI	Suure, joka kuvaaa nesteen kykyä vastustaa virtausta eli nesteen sisäisen kitkan mittayksikkö
3D	Kolmiulotteinen grafiikka on tietokonegrafiikkaa, joka on sisäisesti mallinnettu kolmen tilauksuvuuden suhteen

## **1 JOHDANTO**

Oulun ammattikorkeakoulu Oy:n tutkimus- ja kehitystoiminta on ollut aktiivisesti mukana Oulun alueella toimivan Printocent innovaatiokeskittymän toiminnassa. Printocent innovaatiokeskittymän puitteissa on luotu Oulun seudulle vahvaa osaamista ja kehitysympäristö painettavan älyn sekä biotekniikan alueilla. Oulun ammattikorkeakoulu on ollut mukana Printocent innovaatiokeskittymässä jo vuodesta 2009 olemalla osatoteuttajana erinäisissä painetun älyn hankkeissa.

Painetulla älyllä tarkoitetaan sähköisesti toiminnallisten yleensä nestemäisten materiaalien painamista ohuille taipuisille alustoiille perinteisin painomenetelmin. Oulun ammattikorkeakoulun Informaatioteknologian koulutusosastolle on vuosien aikana kehitetty painetun älyn laboratorio PrinLab, missä kyötään nopeasti ja pienin kustannuksin kokeilemaan erilaisien toiminnallisten materiaalien soveltuutta eri painomenetelmiin, mikä helpottaa kynnystä siirtyä suuremman mittakaavan laitteisiin ja viedä syntynyt prototyppi massavalmistukseen.

Perinteiset väripainomenetelmät ovat vanhoja ja hyvin pitkälle kehitettyjä prosesseja, missä yleensä painetaan väripisteitä, jolloin kuvan laatu, resoluutio sekä kohdistustarkkuus ovat tärkeässä asemassa. Painettavassa elektroniikassa perinteisin painomenetelmin painetaan toiminnallisia materiaaleja, missä painoprosessin hallinnalla on suuri merkitys toiminnallisen rakenteen aikaansaamiseksi.

Toiminnallisen rakenteiden painoprosessia suunniteltaessa on tarkalleen tiedettävä millaisiin eristeväleihin, kerrospaksuuksiin sekä pinnankarheuksiin painotekniikalla päästään ja miten. Painotelojen, painoseulojen, materiaalien sekä painoparametrien suunnittelusääntöjen tärkeys korostuukin toiminnallisia materiaaleja painettaessa, jolloin halutut toiminnollisuudet syntyvät painopinnalle. Toiminnalliset materiaalit ovat yleensä myös hyvin paljon kalliimpia kuin perinteiset painovärit.

## **1.1 Työn tavoite ja haasteet**

Tässä opinnäytetyössä keskityttiin elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistukseen silkkipainomenetelmällä. Biosensorialusta on komponentti pikadiagnostiikan tutkimus- ja kehitystyöhön. Elektrokemialisen sensorialustan toiminta perustuu sensorin työelektrodilla vallitsevaan pintakemiaan ja siellä syntyvien hyvin pienien sähkökemiallisten virtojen mittaamiseen. Edellä mainitut ominaisuudet vaativatkin erittäin tarkkaa valmistusprosessin optimointia sekä käytettävien materiaalien hyvää elektrokemiallista toiminnollisuutta. Opinnäytetyössä ei optimoitu biomateriaalien annosteluprosesseja, jotka tekevät halutun toiminnollisuuden anturille eli sensorialustasta biosensorin.

Elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistus vaatii monialaista osaamista. Tavoitteena olikin luoda toimijaverkosto alan toimijoista Suomessa sekä ulkomailla sekä selvittää kaupallisesti saatavilla olevat toiminnalliset materiaalit elektrokemialisen biosensorialustan valmistukseen. Työssä tehtiin myös katsaus biosensoreiden markkinoihin nyt ja tulevaisuudessa valmiisiin markkinaselvityksiin perustuen.

Silkkipainotekniikka sisältää paljon muuttuja sekä suunnittelusääntöjä, jotka vaikuttavat painopinnan laatuun. Opinnäytetyössä perehdittiin silkkipainotekniikan teoriaan ja todettiin teoreettisten suunnittelusääntöjen paikkansapitävyys käytännössä. Ennen varsinaisia sensoreiden valmistuspainoja haettiin prosessiparametreja tekemällä testipainot. Testipainojen painojäljen laatu analysoitiin pinta-profiilimittauksin.

Opinnäytetyössä tutkittiin näytteenä hankittuja kaupallisia elektrokemiallisia biosensorialustoa sekä kaupallisia materiaaleja painomusteista alustamateriaaleihin ja aina painoprosessissa tarvittaviin oheistarvikkeisiin. Hankittujen materiaalien, verkostojen sekä teoriatietojen perusteella valmistettiin toimiva elektrokemiallinen biosensorialusta.

Valmistusprosessin haasteena oli suunnitella painoseulan parametrit yhteensovivaksi valittujen painomusteiden ja alustamateriaalin kanssa. Painoseulan suun-

ittelussa on otettava huomioon sensorin vaatimusten mukainen painojäljen pakkuus ja painopinnan tasaisuus, jolla on merkittävä vaikutus sensorin laatuun ja jotka omalta osaltaan vaikuttavat sensorin sähköiseen toimintaan. Työssä pyrittiinkin optimoimaan painoprosessi ja materiaalit hyvälaatuisen elektrokemiallisen sensorialustan valmistukseen sekä luotiin ohjeistus painotekniikan tärkeimpiin suunnittelusääntöihin.

Työn tuloksenä syntyi toimiva elektrokemiallinen biosensorialusta pikadiagnostikan sovellusten kehitystyöhön sekä siihen liittyvät valmistusprosessit raportoitiin. Tuloksenä syntyi myös toimiva tuotetiedonhallinta sekä tuotannonohjausmene-telmä sensoripohjen sekä valmistusparametrien jäljitettävyyteen.

## 1.2 Työn rakenne

Aluksi työssä perehdyytiin elektrokemiallisen biosensorin toimintaan ja rakentee-sseen, minkä jälkeen hankittiin tietoa kaupallisista materiaaleista sekä alan toimi-joista Suomessa sekä ulkomailta. Tärkeässä osassa työtä on painomenetelmä, jolla sensoreita PrinLab ympäristössä voisi valmistaa. Silkkipainotekniikka osoit-tautui parhaaksi prosessiin soveltuvien kaupallisten materiaalien saatavuuden sekä painomenetelmän mahdollistavan kohdistustarkkuuden sekä optimaalisen kerrospaksuuden perusteella.

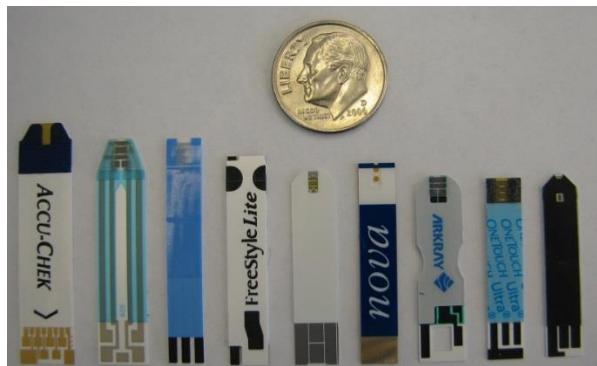
Työssä perehdyytiinkin tarkasti silkkipainotekniikan teoriaan ja suunnittelusää-nöihin, joiden perusteella hankittiin optimaaliset materiaalit ja tarvikkeet elektrokemiallisen biosensorialustan valmistamiseen silkkipainotekniikalla. Painopara-metrit optimoitiin testipainoin, minkä jälkeen painoprosessin muuttujien vaiku-tusta painojäljen laatuun analysoitiin FocalSpec LCI 400 3D-pintaprofiililaitteis-tolla. Optimaalisin prosessiparametrein valmistettiin ensimmäinen protoerä elektrokemiallisia sensorialustoja. Painojälki analysoitiin ja verrattiin kaupalliseen Gwent Electronics Materials sensorialustaan. Teoreettisten suunnittelusääntöjen paikkansa pitävyys todennettiin myös valmistusprosessien yhteydessä.

Sensoreiden valmistusprosessin edetessä havaittiin, että sensoreiden valmistus-erien prosessiparametrit on pystyttävä jäljittämään vuosienkin päästä sensoriar-kin tarkkuudella. Sensoriarkkien jäljitettävyyteen syntyikin toimiva menetelmä, joka jalkautettiin käytäntöön.

## 2 ELEKTROKEMIALLINEN BIOSENSORI

Elektrokemiallinen biosensori on laite, jonka avulla näytteestä tunnistetaan haluttu komponentti biologisen tunnistuksen avulla. Tunnistusreaktiosta kerätty tieto siirtyy mitattavaksi signaaliksi. (Nissinen 2012, 2.) Toiminta perustuu biokemialliseen reaktioon, missä reaktiossa syntvä sähköinen energia voidaan mitata. Kuviossa 1 on esitetty kaupallisia elektrokemiallisia biosensoriliuskoja.

Elektrokemialliset biosensorit ovat olleet tutkimuksien kohteena jo liki 50 vuotta. Leland C. Clark esitteli ensimmäiset glukoosisensorit New Yorkissa tiedetapahumassa vuonna 1962. Ensimmäisen kaupallisen biosensorin toi markkinoille Spring Instruments vuonna 1975. Sensori oli kehitetty diabeetikoille ja sillä mitattiin verinäytteestä sokeripitoisuutta. (Pohanka & Skládal 2008, 57.)



KUVIO 1. Kaupallisia verensokerin mittaukseen kehitetyjä elektrokemiallisia sensoriliuoskoja (Feldman 2009, viitattu 30.3.2016)

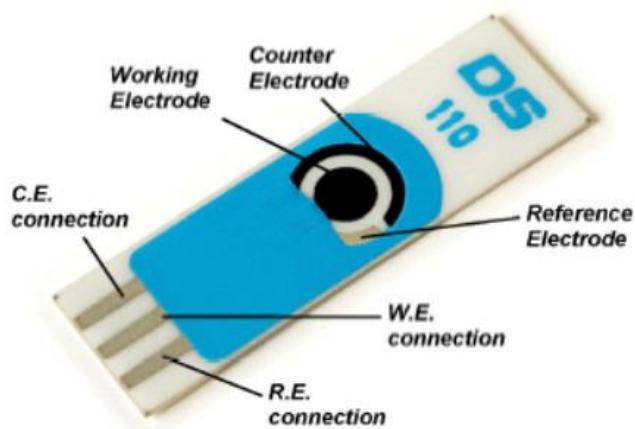
Viimeisen viidentoista vuoden aikana silkkipainomenetelmällä valmistettuja biosensoreita on kehitetty useille eri sovellusalueille kuten ympäristö, lääketiede, terveydenhuolto, bioprosessit, maatalous, puolustusvoimat ja turvallisuus. Osa sovelluksista on taskussa kuljetettavia laitteita esimerkiksi kotihoitopotilaille. Klinisesti merkityksellisin kaupallinen silkkipainettu biosensori onkin verensokerin

mittaukseen kehitetty sensoriliuska ja sille tarkoitettu lukijalaite. (Cooper & Cass 2008, 51.)

Merkityksellisiä muita kaupallisia lääketieteen sovellusalueille kehitettyjä sensoria ovat kolesterolin, virtsahapon, alkoholin, huumeiden, raskauden ja hemoglobiinin diagnostiin tarkoitetut biosensorit (Piila, Juusti, Kylmänen & Ikonen 2015, 119). Useiden uusien sensorisovellusten useilta eri sovellusalueilta uskoaan tulevan pian kaupallisesti saataville.

## 2.1 Silkkipainettu elektrokemiallinen biosensori

Elektrokemiallisia biosensoreita on erikokoisia ja näköisiä erilaisiin käyttötarpeisiin. Kuviossa 2 on esitetty elektrokemiallisen biosensorialustan rakenne. Kriittisimmät muuttujat sensorin geometrioissa ovat työelektrodin (working electrode) ja vastaelektrodin (counter electrode) koko suhteessa toisiinsa sekä niiden etäisyys.



KUVIO 2. Silkkipainetun elektrokemiallisen biosensorin rakenne (DropSens 2016, viitattu 17.8.2016.)

Perus sensorialusta voi rakentua kahdesta tai kolmesta elektrodista. Kahden elektrodin rakenteessa on ainoastaan työ- ja vastaelektrodit. Kolmen elektrodin rekenne sisältää edellä mainittujen elektrodien lisäksi vertailuelektrodiin. (Ronkainen, Halsan & Heineman 2010, 1750.)

Kuviossa 2 mainitut elektrodit painetaan käyttötarkoitukseen parhaaksi havaitulle painoalustalle. Painoalustaksi soveltuват muun muassa erilaiset muovit, nitroseluloosa, keraamit ja lasikuitu. Vaatimuksena on edullisuus, koska monesti sensoreiliuska suunnitellaan kertakäytöiseksi. Alustamateriaalin yksi tärkeistä ominaisuuksista on sen pintaenergia, jonka tulisi olla sopiva käytettävien painomusteidenv kanssa. (Cooper & Cass 2008, 42.) Käytettävien painomusteidenv kuivustulämpötila on myös huomioitava alustamateriaalia valitessa. Näytteen käyttäyminen alustamateriaalin pinnalla on myös tärkeää, liian hydrofobinen pinta aiheuttaa sen, että näyte ei leviä elektrodeille riittävän hyvin (Nissinen, haastattelu 17.8.2016).

Elektrodimateriaalit voidaan jakaa kahteen ryhmään: sähköä johtavat ja eristävät elektrodimateriaalit. Sähköjohtavia ovat työ-, vasta- ja referenssielektrodit. Sähköä johtava materiaali voi olla esimerkiksi kulta-, platina-, hopea- tai grafiittipohjainen. Materiaalit valitaan elektrodille, sen käyttötarkoitukseen ja elektrokemiallisten vaatimusten mukaan. (Cooper & Cass 2008, 43.)

Eriste on yleensä päällimmäinen kerros, joka muodostaa elektrodeja suojaavan kerroksen (Cooper & Cass 2008, 43). Eristekerroksella voidaan myös vaikuttaa reaktioalueen pintaenergiaan sekä sillä voidaan muodostaa niin sanottu allas reaktioalueen tai työelektrodin ympärille estää näytteen tai biomateriaalin levämisen eristeellä rajatun alueen ulkopuolelle (Nissinen, haastattelu 17.8.2016).

## **2.2 Elektrokemiallisen biosensorin toimintaperiaate ja rakenteen merkitys sensorin toimintaan**

Sensorin toiminta perustuu hapettumis-pelkistymisreaktioon eli redox-reaktioon elektrodin pinnalla. Redox-reaktiolla tarkoitetaan kemiallista reaktiota, missä

elektroneja siirtyy aineesta toiseen. Hapettumisella tarkoitetaan yleisesti reaktiota, missä aineen atomit, molekyylit tai ionit luovuttavat elektroneja. Pelkistymisessä puolestaan aineen atomit, molekyylit tai ionit ottavat vastaan elektroneja. (Härkönen, Lähteenmäki & Välimaa 1992, 89.)

Sensorilla sähköisesti aktiivisia aineita ovat biomateriaalit työelektrodilla, jotka yhdessä näytteen ja elektrodimateriaalien kanssa synnyttäävät sähkövirtaa, kun aineet hapettuvat työelektrodin pinnalla ja luovuttavat elektroneja työelektrodille. Aineen hapettuminen vaatii, että kasvava positiivinen jännite ylittää aineen hapettumisjännitteen. Tästä syntyy faradista virtaa, eli hapettumisen ja pelkistymisen aiheuttamaa virtaa. Faradisen virran suuruus on verrannollinen hapettuvien aineiden konsentraatioon liuoksessa. Elektrokemiallisen sensorin toiminta perustuu tämän faradisen virran mittaamiseen. (Parmes 2011, 15.)

Työelektrodin koko ja sen etäisyys vastaelektrodiin vaikuttaa suoraan sensorin nopeuteen, herkkyyteen ja hapettumis-pelkistymisreaktiossa syntynyt virran määrään. Mitä suurempi työelektrodi on ja mitä lähempänä vastaelektrodi sekä työelektrodi ovat toisiaan, sitä suurempi on työelektrodin pinnalla aineessa syntynyt hapettumisreaktion virta ja sitä nopeampaa elektronit siirryvät aineesta työelektrodille ja siitä vastaelektrodille eli sitä nopeampi myös on sensorin toiminta. Monesti tutkimuskäytössä on järkevää suunnitella työelektrodi isommaksi, jotta hapettumis-pelkistymisreaktio olisi selkeämpi ja paremmin havaittavissa. Huomioitava on, että isompi työelektrodi vaatii aina enemmän näytettä sekä biomateriaaleja, jotka voivat olla kalliita tai hankalasti saatavilla. (Nissinen; Torniainen, haastattelu 17.8.2016.)

Vastaelektrodin koko suhteessa työelektrodin kokoon vaikuttaa sensorin herkkyyteen ja myös nopeuteen. Mitä enemmän vastaelektrodin pinta-alaa on lähellä työelektrodia sitä helpommin reaktiossa syntyvät elektronit siirryvät elektrodilta toiselle, näin sensorin herkkyyys paranee ja toiminta nopeutuu (Nissinen; Torniainen, haastattelu 17.8.2016).

Syklisessä voltammetriassa voi voltammogrammin käyrän muoto vaihdella paljonkin, mikäli elektrodin pinta on karhea. Karhea pinta haittaa myös biomateriaalien kiinnittymistä ja vettymistä elektrodille. Näistä syistä valmistusprosessissa on pyrittävä mahdollisimman tasaiseen painojälkeen. (Parmes 2011, 15.)

Elektrodien on oltava sähköä johtavia, jotta elektrokemiallinen reaktio kulkeutuu mittalaitteen tietoon sähköjä johtavia jalkoja pitkin reaktioalueelta. Resistanssin suuruudella ei ole huomattu olevan suurta merkitystä sensorin sähköiseen toimintaan tai resistanssista ei voida päätellä sensorin toimintaa. Pieni resistanssi vastustaa kuitenkin vähemmän todella pienien reaktiovirran kulkua mittalaitteelle, joten pienempää resistanssia on järkevää tavoitella. (Nissinen, haastattelu 17.8.2016.) Painolaadun tasalaatuisuuden yksi hyvä mittari on resistanssierot sensoreiden välillä. Resistanssin suuruuteen voidaan vaikuttaa painoprosessin materiaalivalinnoilla. Suunnittelemalla sensorin elektrodit halutun paksuisiksi ja levyisiksi pyritään mahdollisimman toistettavaan painojälkeen.

### **2.3 Elektrokemiallisen sensoripohjan sähkökemiallisia testausmenetelmiä**

Elektrokemiallisen sensoripohjan testaus voidaan luokitella kahteen osa-alueeseen: painolaadun testaus sekä sähkökemiallisen toiminnan testaus. Alla on esitely hyvin pintapuolisesti elektrokemiallisen sensorin sähkökemiallisista testausmenetelmistä kaksi yleisintä.

Sähkökemiassa neljä yleisintä testausmenetelmää ovat amperometria, kronoamperometria, differentiaalipulssi-voltametria ja syklinen voltammetria (Parmes 2011, 11). Elektrokemiallisen sensorin toiminnan testaaminen ja toiminta perustu sähkökemiaan. Opinnäytetyössä kehitettyjen sensoreiden mittausmenetelminä käytetään syklistä voltammetriaa ja amperometristä menetelmää. Palmsens valmistaa ja kehittää mittalaitteita elektrokemiallisten sensoreiden mittamiseen. (Torniainen, haastattelu 17.8.2016.)

Amperometrisessa mittausmenetelmässä mittalaitteen käyttöliittymässä määritetään jännite halutulle tasolle, koko testisyklin ajan jännite pysyy vakiona. Mene-

telmässä ei saada tietoa virran suhteesta jännitteeseen vaan sillä tarkkaillaan vakiøjännitteen tietyllä ajanhetkellä mitatun virran suuruutta. Menetelmää käytetään kun tiedetään mitä ainetta mitataan. (Parmes 2011, 11.)

Syklinen voltammetria on käytännöllinen kun halutaan saada tietoa sähkökemiallisista reaktiosta, niiden palautuvuudesta, sähköisesti aktiivisten aineiden määrästä elektrodilla ja elektrodin stabiilisuudesta. Syklisessä voltammetriassa mitataan aineen hapettumis- ja pelkistymisreaktion synnyttämää virtaa suhteessa jännitteeseen toisin kuin amperometrisessä menetelmässä. (Parmes 2011, 15-16.)

Sähkökemiallisiin testausmenetelmiin ei tässä työssä perehdytä tämän enempää, koska työ pääosin keskittyy silkipainotekniikkaan, sensorin valmistusprosesseihin sekä painolaadun testaamiseen. Sähkökemialliset testausmenetelmät on hyvä ymmärtää täällä tasolla, jotta elektrodin toimintaperiaate hahmottuisi mahdollisimman moniulotteisesti.

### **3 ELEKTROKEMIALLISTEN BIOSENSOREIDEN MARKKINAT JA KAUPALLISET TOIMIJAVERKOSTOT**

Pikadiagnostiikan sovellukset vaikuttavat olevan kasvava kiinnostuksen kohde tutkimuslaitosten sekä aiheesta kiinnostuneiden yritysten keskuudessa. Perinteiset painomenetelmät, joita käytetään myös painetun älyn kehitystyössä tuovat uusia mahdollisuuksia pikadiagnostiikan kehitystyöhön.

Elektrokemiallisista sensoreista suurivolyymisin pikadiagnostinen komponentti on verensokeriliuska, jolla mitataan diabeetikoiden verensokeripitoisuutta. Viisi prosenttia maailman ihmisistä käyttää verensokerin mittaanseen kehitettyjä sensoriliuskoja päivittäin. Sensoriliuoskojen markkinat ovatkin useita miljardeja euroja. Sensoriliuskojen massavalmistusprosessit ovat hioutuneet huippuunsa mahdollistaen toistettavan, edullisen sekä kertakäyttöisen sensoriliuskan valmistuksen. Sensoriliuskan valmistusmenetelmänä käytetään yleensä silkipainoaa. (Kadara, Jenkinson & Banks 2009,1.)

Verensokerin mittaliuskat ovat vain yksi tuote lääketieteen sovellusalueilla. Elektrokemiallisen sensorin toimintaperiaate pikadiagnostiikan komponenttina on potentiaalinen moniin muihin kaupallisiin sovelluksiin. Sovelluksista on mainittu lyhyesti luvussa kaksi. Tässä luvussa keskitytään sensoriliuoskojen valmistusprosesseissa tarpeelliseksi koettuihin verkostoihin sekä luodaan lyhyt katsaus painoprosessein valmistettujen sensoriliuskojen markkinapotentiaaliin perustuen valmiisiin vuonna 2012 julkaistuihin markkinatutkimuksiin.

#### **3.1 Katsaus painettujen taipuisien sensoriliuskojen markkinoihin nyt ja tulevaisuudessa**

Kansainvälisti vieritutkimuksesta käytetään lyhennettä POCT eli point of care testing. Vieritutkimuksen osa-alueet voidaan kategorisoida kolmeen eri osa-alueeseen, joita ovat sairaalassa tehtävät pikatestit, lääkäreiden suorittamat pikatestit toimistossa ja kotona itse suoritetut pikatestit. Näiden testien tekemiseen tarvittavien testiliuskojen kehitystyössä toimii globaalisti yli 100 yritystä.

Suurimmat toimijat tulevat Pohjois-Amerikasta ja Euroopasta. (TriMark Publications 2013, 35.)

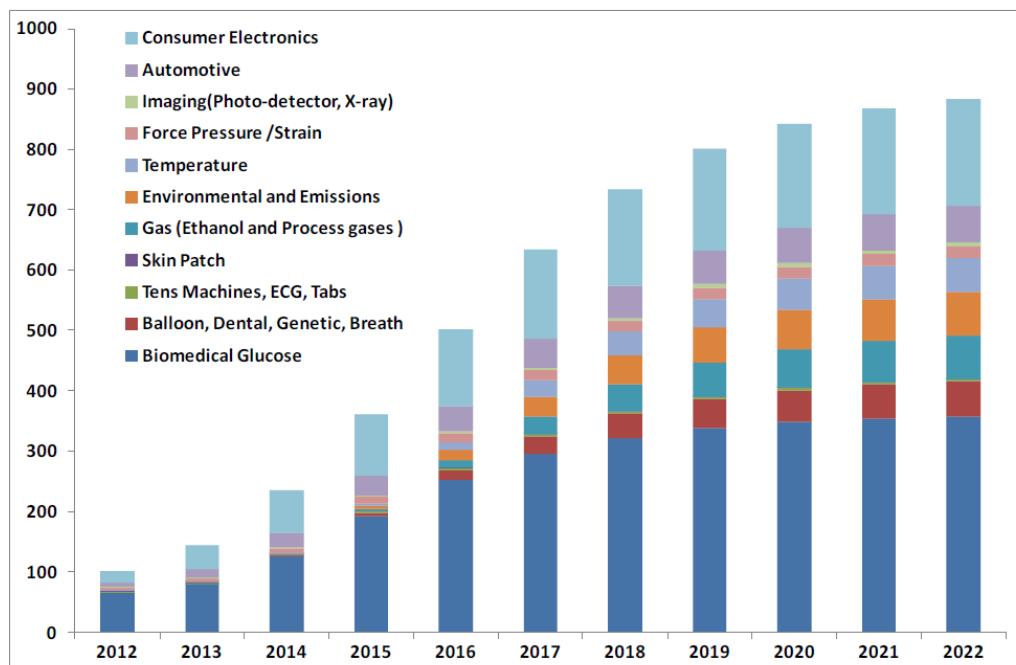
*TAULUKKO 1. Kymmenen suurinta pikadiagnostiikan yritystä ja niiden liikevaihto vuosilta 2011-2012 (TriMark Publications 2013, 38)*

Rank	Company	2011 Sales (\$ Billions)	2012 Sales (\$ Billions)
1	Roche	7.15	7.42
2	Siemens	5.11	5.15
3	Danaher	2.69	4.37
4	Abbott Laboratories	4.12	4.30
5	ThermoFisher Scientific	2.46	2.90
6	Becton Dickinson	2.48	2.53
7	Johnson & Johnson	2.16	2.12
8	Alere	1.80	2.10
9	Sysmex	1.61	1.78
10	bioMerieux	1.63	1.59

Taulukossa 1 on listattuna kymmenen suurinta toimijaa pikadiagnostiikan alueilla vuosina 2011—2012. Suurimmat markkinaosuudet ja liikevaihdot ansaitsivat Roche, Siemens ja Abbot Laboratories. Yli kymmenen prosentin markkinaosuuteen pääsi kuitenkin vain Roche 14,3 % markkinaosuudella. (TriMark Publications 2013, 39.)

IDTechEx on yritys, joka perehtyy painetun älyn nykytilaan ja laatii monialaisia markkinatutkimuksia sekä järjestää suuria painetun elektroniikan seminaari tapahtumia Amerikassa, Aasiassa sekä Euroopassa. Painetut ja taipuisat sensorit ovat heidän mukaansa nopeimmin kasvava markkina painetun ja taipuisan elektroniikan markkinoilla. Painettujen sensoreiden markkinat ovat vasta noin kaksti prosenttia painetun elektroniikan markkinoista. Markkinatutkimuksen laatija arvioi painettujen sensoreiden markkinoiden kasvavan jopa yhdeksänkertaiseksi vuoteen 2022 mennessä. (Das & Igbenehi 2012, 1-4.)

Painettut biosensorit ovat suurin komponentti painettujen sensoreiden markkinoilla, missä verensokeri testiliuskat hallitsee suurimpana noin 64US\$ markkinaosuudella. IDTechEx arvioikin testiliuskoille huimaa kasvua noin 357US\$ markkinaosuuteen vuoteen 2022 mennessä. Kuviossa 3 on esillä painettujen sensoreiden tuoteryhmittelyt ja niiden markkinaosuus painettujen sensoreiden markkinoilla. (Das & Igbenehi 2012, 1-4.)



*KUVIO 3. Painettujen sensoreiden markkinat tuoteryhmittäin, pystysarake US\$ (Das & Igbenehi 2012, 12)*

Kuviosta 3 voi nähdä miten useilla antureiden tuotealueilla on kasvunäkymiä, mikä nostaa painettujen sensoreiden markkinapotentiaalia. Eritoten painettujen taipuisien antureiden markkinat autoteollisuudessa, päästöjen mittaamisessa sekä kuluttajaelektronikassa tulevat kasvamaan, mukaan lukien markkina-ajuri biosensorit.

Kuviossa 3 on POC eli point of care antureista vain verensokerin mittaaniseen tarkoitettujen pikatestien markkinat. Esimerkiksi syljestä, verestä, hiuksista,

ihosta ja hiestä tehtävien testien pikatestiliuskoja kehitetään kokoajan, muun muassa huumeiden, alkoholin, tulehdusarvojen, stressin, räjähteiden, sairauksien, bakteerien ja niin edelleen tunnistamiseen erilaisin pikatestein. Pelkästään Euroopassa POC pikatestien markkinat ovat useita miljardeja euroja. (TriMark Publications 2013, 147-287.)

### **3.2 Kaupalliset materiaalitoimittajat sekä verkostot sensoreiden valmistukseen**

Kaikkea ei tarvitse, ei ole järkevää eikä mahdollista tehdä yksin. Sensorialustojen valmistuksessa on erittäin tärkeää toimivat verkostot. Verkostojen osaamista hyväksikäytäen löytää nopeasti apua erilaisiin ongelmiin kehitystyössä. Kuviossa 4 on elektrokemiallisten sensoreiden valmistamisessa tarvittava osaaminen kategorisoitu neljään pääkategoriaan.

materiaalitoimittajat tai valmistajat	suunnittelupalvelut	laitevalmistajat ja laitetoimittajat	sopimusvalmistajat, alihankkijat
<ul style="list-style-type: none"> <li>• painomusteet</li> <li>• alustamateriaalit</li> <li>• biomateriaalit</li> <li>• laboratoriatarvikkeet</li> <li>• tuotantotarvikkeet</li> <li>• kemikaalit</li> <li>• elektroniikka</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• diagnostiikka ja analytiikka</li> <li>• bioteknologia</li> <li>• painettava elektroniikka, painotekniikat</li> <li>• konsultointi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• laboratorio- ja tuotantolaitteet</li> <li>• mittaus- ja testauslaitteet</li> <li>• painolaitteet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• painettava elektroniikka</li> <li>• painotelat</li> <li>• painoseulat</li> <li>• diagnostiikka ja bioteknologia</li> <li>• paino- ja valmistuspalvelut</li> </ul>

*KUVIO 4. Elektrokemiallisten sensoreiden valmistusprosesseissa tarvittavien verkostojen osaamisalueet kategorisoituna neljään pääryhmään*

Materiaalitoimittajat ja valmistajat ovat ensisijaisen tärkeitä, jotta puuttuvat komponentit prosessissa saadaan hankittua mahdollisimman nopeasti valmiina kaupallisina tuotteina. Prosesin onnistumisen kannalta laitevalmistajien ammattitaitoa tarvitaan prosessien suunnittelussa ja laitehankinnoissa. Joitakin prosessissa tarvittavia komponentteja on järkevää teettää sopimusvalmistajilla

kuten esimerkiksi painotelat ja painoseulat, jonka tekeminen vaatii kalliita laitteita sekä ammattitaitoa, jotka vaatisivat kohtuuttomasti henkilöresursseja sekä laiteinvestointeja.

materiaalitoimittajat ja valmistajat	suunnittelupalvelut	alihankinta yritykset
<p><b>painomustet</b> <u>Gwent Electronic Materials</u>, <u>DuPont</u>, <u>Ercon</u></p> <p><b>alustamateriaalit, muovikalvet</b> <u>Du Pont</u>, <u>Thermoplast Ltd</u>, <u>Katco Performance materials</u>, <u>HiFi Industrial Film Ltd</u>, <u>Bayer AG</u>, <u>Tape Specialities Ltd</u>, <u>Tesa</u>, <u>Adhesive Research</u>, <u>Technifilm</u>, <u>Lohmann Technologies</u>, <u>Professional Plastics</u>, <u>Sabic</u>, <u>Vink Finland OY</u>, <u>Taperoll Oy</u></p> <p><b>biomateriaalit</b> <u>Sigma-Aldrich Finland</u>, <u>Gwent Enzyme Technology Ltd</u>, <u>BBI Enzymes</u>,</p> <p><b>tuotanto/laboratoriolaitteet ja tarvikkeet</b> <u>Trelleborg Applied Technology</u>, <u>Amitronic Oy</u>, <u>Minoa Oy</u>, <u>Ellsworth adhesive</u>, <u>Perel Oy</u>, <u>Solotop Oy</u>, <u>Nylund</u>, <u>BK trading</u>, <u>Marabu Scandinavia</u>, <u>VWR</u>, <u>Mediq Suomi Oy</u>, <u>Sartorius AG</u>, <u>Biohit Oy</u></p> <p><b>elektronikka</b> <u>Elfa Elektroniikka Oy</u>, <u>Farnell</u>, <u>Digikey</u></p> <p><b>kemikaalit</b> <u>Seri-Fantasy Oy</u>, <u>Step Systems Oy</u>, <u>Thermo Fisher Scientific Oy</u></p>	<p><b>analytiikka, diagnostiikka, bioteknologia</b> <u>Chaperone</u>, <u>Gwent Applied Enzyme Technology Ltd</u>, <u>Cemis Oy</u>, <u>ValiRX Finland Oy</u>, <u>VTT</u>, <u>Orion Diagnostica</u>, <u>Pharmatest Services</u>, <u>Goodwiller</u>, <u>Labmaster Ltd</u>, <u>VTT</u></p> <p><b>konsultaatio</b> <u>Bio-Opteron Oy</u>, <u>Wipak Oy</u>, <u>VTT</u>, <u>OY</u>, <u>MK Fluidics</u></p> <p><b>painettava elektronika</b> <u>Neficon Oy</u>, <u>Suomen optomekaniikka Oy</u>, <u>VTT</u>, <u>OY</u></p>	<p><b>painoseulat</b> <u>Finnseri Oy</u>, <u>Gallus</u>, <u>Stork</u>, <u>Laser Tech Services A/S</u>, <u>PVF-Vertriebs GmbH</u>, <u>PS-print</u>, <u>Murakami</u></p> <p><b>painotelat</b> <u>SWG</u>, <u>Flexica Oy</u>, <u>Gallus</u>, <u>Stork</u>, <u>SWG</u>, <u>GRT GmbH&amp;Co</u></p> <p><b>painopalvelut ja valmistus</b> <u>Screetec Oy</u>, <u>VTT</u>, <u>Tekniseri Oy</u>, <u>PS-print Oy</u>, <u>Elcoflex Oy</u>, <u>Premioc</u>, <u>GSI technology</u>, <u>DropSens</u>, <u>University of Florence</u>, <u>Zensor</u>, <u>BVT</u>.</p>

*KUVIO 5. Elektrokemiallisten sensoreiden kehitystyössä ja valmistuksessa tärkeimpiä toimijayrityksiä kategorisoituna osaamisalueittain. Suomessa toimivat yritykset on alleviivattu.*

Kuviossa 5 on listattuna elektrokemiallisten sensoreiden valmistuksessa ja kehitystyössä tärkeimpiä toimijayrityksiä. Sensoreiden valmistus- ja testausprosesseissa tarvitaan erilaisia laitteita, materiaaleja sekä tarvikkeita, joiden nopea saatavuus on tärkeää tavoitteisiin pääsemiseksi. Tutkimuslaitokset tarvitsevat vain pieniä määriä materiaaleja testikäyttöön, jotta prosesseja pystytään optimoimaan materiaalitestauksin halutun toiminnollisuuden aikaansaamiseksi. Edellä mainituista syistä verkostoon kuuluvat materiaalivalmistajat ja niiden toimittaja ovat tärkeässä osassa kehitystyötä.

Elektrokemiallisten sensorien käyttöön kehitettyjä kaupallisia painomusteita valmistavia yrityksiä on maailmassa vain muutamia. Elektrokemiallisen toiminnan

kannalta kriittisin painomuste on grafiitti partikkeleista koostuva painomuste. Grafiittipohjaisia mustevalmistajia on kaupallisena saatavilla lukuisia, mutta suurinta osaa näistä ei kannata käyttää elektrokemiallisten sensoreiden valmistuksessa. Kaupallisena tähän tarkoitukseen kehitettyjä elektrokemiallisesti toimivia painomusteita saa vain kolmelta toimijalta. Yleensä heillä on tarjota useaa erilaista grafiittimustetta sensoreiden valmistukseen. (Pääkkönen, Sempert, Tuomaala, Määttä, Nelo, Kivimäki, Hakalahti, Sesay, Nissinen 2012, 1.)

## **4 SILKKIPAINOTEKNIKKA**

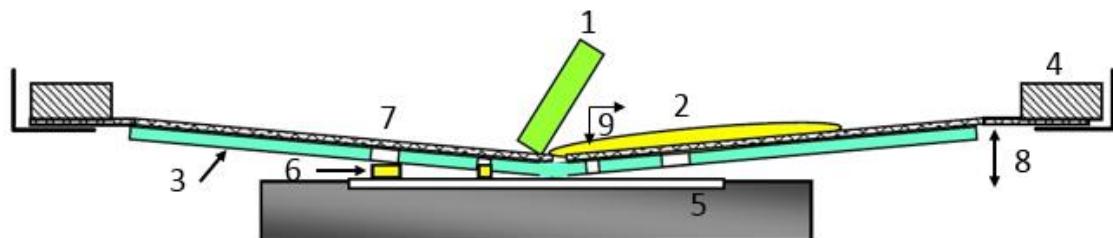
Silkipaino syntyi kun aikoinaan 1600-luvulla vapanilainen Miayzaki Yusen kehitti prototyypin tekstiilipainantaan, missä painokaavio kiinnitettiin ensin hiuksista puunottuun verkkoon, minkä jälkeen silkkikankaalle. Seripaino-nimitystä alettiin käytetämään, kun silkkikangas ja hiussäikeinen verkkorakenne korvattiin synteettisillä seulakankailla, jotka parantavat painoprosessin hallintaa ja painojäljen laattua. (Viluksela, Ristimäki & Spannäri 2007, 88.) Silkipaino nimitys on kuitenkin yleisesti käytössä vielä nykyisinkin.

Silkipaino eli seripaino on monipuolisimpia olemassa olevia painomenetelmiä, koska menetelmässä painopinnan ei tarvitse olla välttämättä täysin tasainen, tämä mahdollistaa painamisen hyvin monenlaisille materiaaleille kuten paperille, tekstiileille, puulle, metallille, lasille ja muoville. Menetelmällä saadaan tarvittaessa erittäin paksuja peittäviä tai kestäviä väripintoja. (Viluksela ym. 2007, 88; Graafinen 2015, viitattu 14.5.2016.)

Painomenetelmä on alun perin kehitetty väripainotarkoitukseen erilaisten grafiikkoiden painamiseen eri alustamateriaaleihin. Nykyisin menetelmää käytetään hyväksi myös painetun elektroniikan tuotteiden valmistuksessa, koska painoprosessi mahdollistaa useiden eri materiaalikerrosten kohdistamisen tarkasti päälekkäin erilaisille yhdestä mikrometristä jopa useiden millimetrien paksuisille alustamateriaaleille. Painoseulan ominaisuuksilla ja painoprosessilla voidaan helposti vaikuttaa painojäljen kerospaksuuteen, joka mahdollistaa sähköä johtavien rakenteiden optimoinnin halutuksi toiminnotollisuudeksi. Prosessissa voidaan käyttää painomusteita laajalla viskoiteettialueella, mikä on etu verrattuna useisiin muihin painomenetelmiin. (Gamota, Brazis, Kalyanasundaram & Zhang 2004, 311-312.)

#### 4.1 Tasosilkipainon periaate

Tasosilkipainomenetelmän periaatekuva on esitetty kuviossa 6. Painoseulaan tarkoin valittu ja pingotettu verkkomateriaali eli seulakangas emulsoidaan valitseen paksuuteen, johon valotetaan ja pestää haluttu painokuvio. Painomuste levitetään seulakankaan päälle. Raakeliin eli painolastaan valitaan halutun kovuinen ja muotoinen kumi, joka puristaa sekä siirtää painomusteen hallitusti seulakankaan läpi allaolevalle painoalustalle. Seulakankaalla oleva emulsio muodostaa ei painavan pinnan, joka tukkii seulakankaan ja siitä kohdalta painomuste ei pääse siirtymään painoalustalle. (Viluksela ym. 2007, 91.) Painotapahtuman jälkeen painoalusta siirretään tai se siirtyy automaattisesti kuivatusyksikköön, missä painomuste kuivuu tai sintrautuu kosketuskuivaksi. Kuivatusmenetelmä riippuu käytettävän painomusteen vaatimuksista.



KUVIO 6. Periaatekuva silkipainotapahtumasta. Kuvassa numero 1=painolasta eli raakeli 2=painomuste 3=emulsoitu seulakangas 4=painokehys 5=painoalusta 6=verkon läpi siirtynyt painomuste 7=avaus emulsiossa 8=verkon etäisyys alustasta (snap-off) 9=painoväriin vaikuttavat voimat (Hoppy 1997, luku 3.2, kuva muokattu, viitattu 15.5.2016)

Tärkeimmät komponentit silkipainoprosessissa ovat painolasta eli raakeli, painoalusta, painomuste, painoseula, painolaite sekä prosessiin liittyvät painopara-

metrit. Tärkeimpiä painoparametreja ovat painolastan vetonopeus ja paine, painoseulan etäisyys painoalustasta, painomusteen ominaisuudet sekä painolaboratorion olosuhteet. Voi olla myös hyödyllistä käyttää flood eli levityslastaa, mikäli painomuste on riittävän viskoosia. Levityslaista hidastaa painomusteen kuivumista seulakankaalle. Laadukas painotulos syntyy kun painoseulan materiaalit on valittu siten, että ne yltävät tavoitteena olevan painojäljen vaatimuksiin sekä ovat yhtensopivat painomusteen kanssa. Alustamateriaalin on myös oltava vetymisomaisuuksiltaan sekä lämpötilankestoltaan sopiva painomusteen kanssa.

Maailmalla käytössä oleva painokonevalikoima on suuri. Painolaitteita on olemassa pöytämallisia automaattisiin taso- ja sylinteripainokoneisiin. Manuaalisissa laitteissa alustan syöttö, painomusteen annostelu sekä painotapahtuma ovat käsityötä (Viluksela ym. 2007, 91). Automaattisissa painolaitteissa nämä ylämainitut toiminnot ovat täysin automatisoituja. Painolaite tai painoprosessi voi olla myös osaksi automatisoitua, jolloin operaattori tekee osan prosessista käsin.



KUVIO 7. *PrinLab laboratoriorion Ekra E2 tasopainolaite (Prinlab kuva-arkistot 2012-2015)*

Kuviossa 7 on kuvattu Oulun ammattikorkeakoululla käytössä oleva Ekra E2 silkipainolaite. Silkkipainolaite on osaksi automaattinen, mikä tässä tapauksessa tarkoittaa sitä, että painomusteen annostelu sekä painoalustan kohdistus täytyy

tehdä manuaalisesti. Painon kohdistamisessa käytetään kuvassa näkyviä kohdistuskameroida, jotka yhdessä käyttöliittymän kanssa mahdollistavat painoseulan kuvion manuaalisen optisen kohdistamisen tarkasti painoalustalle, mikä taas mahdollistaa painetun älyn vaatiman kerrosrakenteen valmistamisen. Kuviossa 7 näkyy painolaitteessa näkyvä huokoinen imupöytä, mihin erilaiset ohuet taipuisat alustamateriaalit saadaan kiinnitettyä pöydässä olevan imun avulla.

Laite mahdollistaa kerrospainamisen  $\pm 25 \mu\text{m}$  kohdistustarkkuudella 250 mm x 250 mm painoalustolle, mikä riittää mainiosti elektrokemiallisten sensorialustojen piensarjavalmistukseen (OAMK 2016, viitattu 17.9.2016).



KUVIO 8. Silkipainon laatuun vaikuttavia muuttujia prosessissa.

Kuviossa 8 on esitetty tärkeimmät muuttujat, jotka on huomioitava silkipainoprosessin aikana tai sitä suunniteltaessa. Laadukkaan painojäljen tavoittelemiseen kuuluu kuvassa näytettyjen pääkohtien parametriien optimointi, hallinta ja yhteensovittaminen.

#### **4.1.1 Painolastan nopeus ja paine painoprosessissa**

Kuviosta 8 voi nähdä, että tasosilkkipainoprosessissa on useita muuttuja, millä painojäljen laatuun voidaan vaikuttaa. Tärkeimpiä laitemuuttuja ovat painolastan paine ja nopeus, flood eli levityslastan nopeus ja etäisyys seulakankaasta sekä snap-off etäisyys. Snap-off etäisyys tarkoittaa painoalustan etäisyyttä seulakan-kaasta painoprosessin aikana.

Raakelin eli painolastan nopeus ja paine ovat yhdessä merkittävä muuttuja painoprosessissa. On huomioitava, että nopeuden kasvaessa painettakin tulisi kasvattaa. Nopeuden laskiessa vastaavasti painetta voi laskea. Toisin sanoen kun nopeus kasvaa, nousee samanaikaisesti myös painolastan mustetta seulakan-kaan läpipuskevan voiman eli paineen tarve, nopeuden laskiessa paineen tarve pienenee.

Huomioitava on myös painolastan aloitus- ja lopetuskohta. Painolastan tiputus seulakankaalle olisi säädettävä siten, että paino alkaisi 3 cm ennen seulakan-kaalla olevaa avausta. Painolasta olisi nostettava ylös vasta 3 cm jälkeen avauksen (Dupont 2016, viitattu 19.6.2016).

Painomusteen viskositeetilla on suuri merkitys painolastan nopeuteen. Mitä korkeampiviskositeettista painomuste on sitä hitaampi painolastan vetonopeuden tulisi olla. Painomustella on oltava riittävästi aikaa virrata seulakankaan läpi painoalustalle. Painomusteen ollessa matalaviskoosista, nopeuden tulisi olla korkeampi, jottei muste virtaa hallitsemattomasti seulakankaan läpi. Järkevää on myös kysyä mustevalmistajilta ovatko he optimoineet painonopeuden kyseiselle painomusteeelle. Nopeaksi voisi sanoa noin 150 mm/s nopeutta, hidas taas on noin 25 mm/s, yleensä nopeus optimoidaan näiden välille. Alla on listattu ja kerrottu nopeuden ja paineen merkityksestä toisiinsa.

- suurempi nopeus, suurempi paine
- pienempi nopeus, pienempi paine
- korkea viskositeetti, hitaampi nopeus
- matala viskositeetti, suurempi nopeus

Painolastan paine on järkevää optimoida mahdollisimman pieneksi. Paine on riittävä kunhan painomuste kaavaroituu seulakankaalta painotapahtuman aikana. Liian alhainen paine näkyy painojäljessä terävyyden heikkenemisenä ja painojälki voi olla epätasaista. Liian korkea paine vaikuttaa painojäljen paksuuteen, epätasaisuuteen sekä musteen levämiseen alustalla. Korkea paine voi myös vahingoittaa painoverkkoa sekä kuluttaa painolastan kumia.

#### 4.1.2 Levityslasta painoprosessissa

Flood eli levityslastan nopeus vaikuttaa siihen miten nopeasti painomuste kuivuu ja tukkii painoverkkoa. Levityslasta on tarpeellinen herkästi kuivuvia musteita käytettäessä tai jos prosessi on yksisuuntainen. Levityslasta tuo musteen takaisin alkuun ja prosessi voi jatkua.

Nopeuden voi pitää samana tai hieman nopeampana kuin painolastan vetro-nopeus. Painoprosessissa kaikki painomuste ei virtaa seulakankaan läpi vaan seulakankaan lankoihin jää painomustetta, joka kuivuu nopeasti. Levityslastalla levitetään painomustetta kuvion 9 esittämällä tavalla ohut kerros avauksen päälle, muste pitää kankaan kosteana ja hidastaa musteen kuivumista. Mitä nopeampaa levityslastaus tapahtuu sitä nopeampaa painomuste levittyy painoverkolle suojaamaan seulakankaan verkkorakennetta.



KUVIO 9. Flood- eli levityslasta levittää painomusteen seulakankaan emulsioon valotetun avauksen päälle hidastaen painomusteen kuivumista ja seulakankaan tukkiintumista. (Pittson & Jones 2014.)

Lastan korkeus seulakankaasta on hyvä pitää mahdollisimman pienenä. Mitä korkeammalla lasta on, sitä enemmän painomustetta tarvitaan painoprosessissa, jotta se riittäisi levittymään ja peittämään seulakankaan avaukset. Etäisyys kannattaa säätää mahdollisimman lähelle seulakangasta käyttäen apuna rakotulkkia. Painomusteen viskositeetista riippuen levityslasta ei aina sovelli painoprosessiin. Alhaisen viskositeetin painomusteilla lastan käytö voi olla mahdotonta. Painomusteen ollessa herkästi kuiva on tämä lähes välittämätön työkalu.

#### **4.1.3 Snap-off etäisyys painoprosessissa**

Snap-off etäisyys eli seulakankaan etäisyys painoalustasta on myös yksi tärkeistä muuttujista silkipainoprosessissa. Etäisyys säädetään prosessin alkuparametrien asettamisen yhteydessä. Painoprosessissa painolasta painaa seulakankaan kiinni painoalustaan painolastan kumin osalta. Painolastan edetessä seulakangas irtoaa painoalustasta itsenäisesti heti painolastan perässä oikein säädetyn snap-off etäisyyden ansiosta. Kuviossa 6 kohdat 8 ja 6 esittävät miltä etäisyys painoalustasta näyttää painoprosessin aikana.

Snap-off etäisyyden ollessa liian korkea painomuste ei siirry painoalustalle, koska kangas ei missään vaiheessa kosketa painoalustaa. Etäisyyden ollessa liian matala jää painomusteesta iso osa seulakankaan avaukseen kiinni, koska kangas jää kosketukseen alustamateriaalin kanssa painolastan jatkaessa matkaa. Tästä syystä painomuste ei virtaa vapaasti painoalustalle, tuloksena epätasainen ja halitsematon painojälki. Huomioitava on myös painonopeus, jonka ollessa korkea voi olla tarve nostaa myös snap-off etäisyyttä. Alla on listattu asioita snap-off parametrin vaikutuksista.

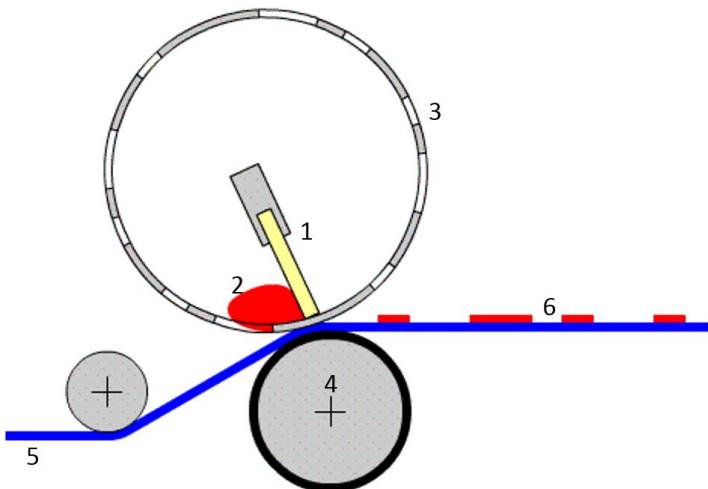
- Liian matala snap-off heikentää musteen siirtymistä, siitä seuraa huono ja epätasainen painojälki.
- Liian korkea snap-off, paineen tarve kasvaa, seulakangas kuluu, painolastan kumi kuluu, painojälki ohenee. Seulakankaan venyminen aiheuttaa painokaavioon muutoksia, mistä seuraa rekisteröintiongelmia kerrospaineissa.

- Optimaalinen snap-off etäisyys on mahdollisimman lähellä painoalustaa, mutta kuitenkin riittävä seulakankaan irtoamiseen itsenäisesti painoalus-tasta painolastan edetessä.

Oikean snap-off etäisyyden määrittämiseksi olisi huomioitava painoseulan koko, painoseulan kireys ja materiaali, painomusteen viskositeetti sekä painolastan nopeus. Tärkeimpänä muistisääntönä on kuitenkin painoseulan koko, materiaali ja kireys, koska yleensä teräs- tai polyarylaattipainoseula on pingotettu kireämmälle kuin polyesteri- tai nylongeulat, joten snap-off kireämmällä verkolla ei ole tarpeen eikä voi olla kovin suuri. Mitä suurempi painoseula on sitä suurempi etäisyys painoalustasta tarvitaan. Hyvä lähtökohta on kokeilla prosessin alkuvaiheessa, että etäisyys tuntuu selkeästi sormella kangasta painaessa. 15"x15" teräsgeulalla etäisyys voisi olla noin 1,5—3 mm, muoviseuloilla 3—4 mm. Pienemmillä esimerkiksi 5"x5" tuuman geulalla jopa alle millimetri voi olla riittävä. (Dupont 2016, viitattu 17.6.2016.) Ensimmäisen testipainon jälkeen etäisyyttä kasvataan tarvittaessa, tavoitteena mahdollisimman pieni etäisyys alustasta, mutta kuitenkin riittävä itsenäiseen alustasta irtoamiseen heti painolastan perässä.

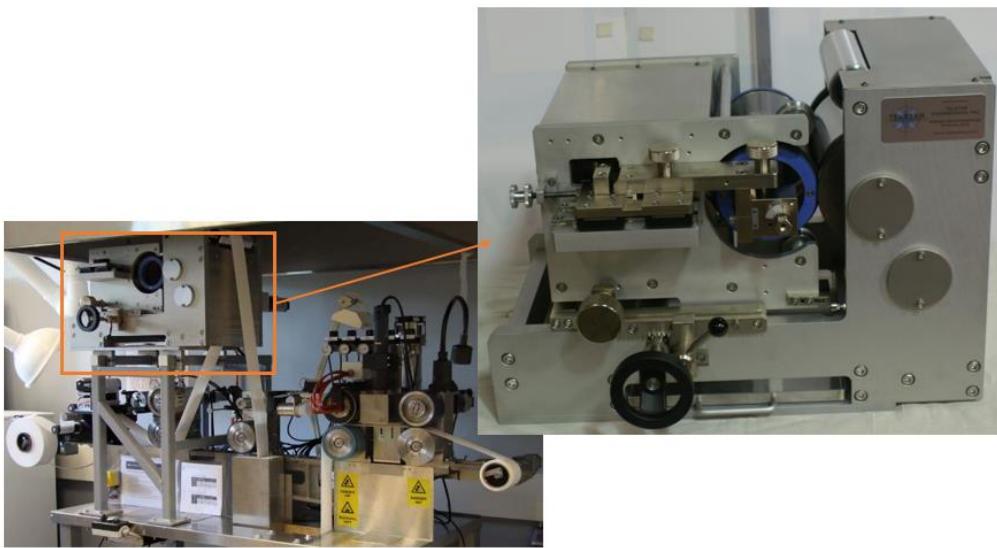
Etäisyyden mittaanseen on olemassa erilaisia laitteita, joiden hankintaa on syytä harkita, mikäli tavoitteena on täydellisen painoprosessin optimointi ja painojäljen toistettavuus.

## 4.2 Rotaatiosilkipainon periaate



KUVIO 10. Periaatekuva rotaatiosilkipaino menetelmästä. Kuvassa numero 1=painolasta eli raakeli 2=painomuste 3=painosylinteri 4=puristussylinteri/vastatela 5=painosylinterin ja puristussylinterin välissä liikkuva raina (painovalusta) 6=painosylinterin läpi rainalle siirtynyt painomoste (Nippo Bunkaseiko Co., Ltd 2015, kuvaa muokattu, viitattu 18.05.2016)

Kuviossa 10 on esitetty periaatekuva rotaatiosilkipainosta, jossa niin sanottu painoseula on sylinterimuotoinen. Painolasta sijaitsee painosylinterin sisällä ja puristaa painomusteen painoverkon läpi alla liikkuvalle rainalle. Prosessi sisältää myös kuivatusyksikötä ennen rainan kiinnirullausta riippuen millaisen kuivatusprosessin painomuste vaatii. Rotaatiosilkipaino on nopea ja kustannustehokas menetelmä massavalmistukseen.



*KUVIO 11. PrinLab laboratoriorion SOM-100 rullalinjastoon asennettu rotaatiosilkkipainoyksikkö (PrinLab kuva-arkistot 2012-2015)*

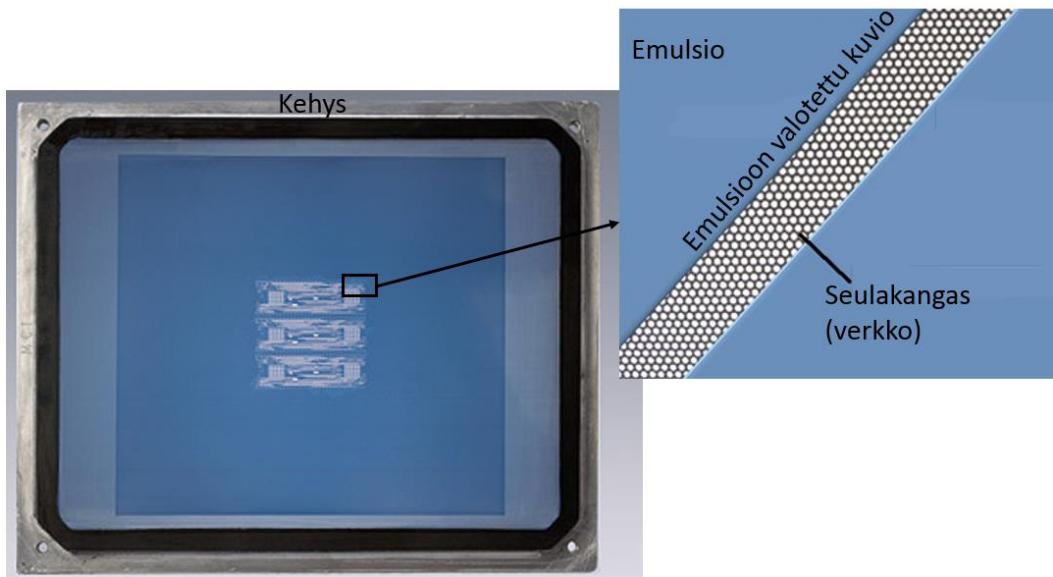
Kuviossa 11 on esitetty PrinLab laboratoriorion SOM-100 pienen mittakaavan rulla-painolaitte. Rullapainolaitteessa yksi neljästä painoyksiköstä on rotaatiosilkkipainoyksikkö, joka näkyy kuvista suurennettuna. Painoyksikkö on asennettu linjas-toon vuonna 2014. Painoyksikön on valmistanut Telstar Engineering.

Painoyksikön painoleveys rajoittuu SOM-100-linjan rajoittamaan rainanleveyteen, joka on 80 mm, rullalinjaston maksiminopeus on 26 metriä minuutissa. Kui-vatusuunin kapasiteetti linjastossa on yhteensä noin 5,6 metriä, mikä rajoittaa painonopeuden painomustesteesta ja kerospaksuudesta riippuen noin 4—8 metriin minuutissa. Linjastossa ei ole tällä hetkellä valosintrausmahdolisuutta.

PrinLab rotaatiosilkkipainoyksiköllä voidaan tehdä testipainoja pienemmässä mit-takaavassa ja kojeistaa elektrokemiallisten sensorialustojen valmistuksessa kä-yttävien materiaalien soveltuvuutta rullalta rullalle massavalmistusprosesseihin.

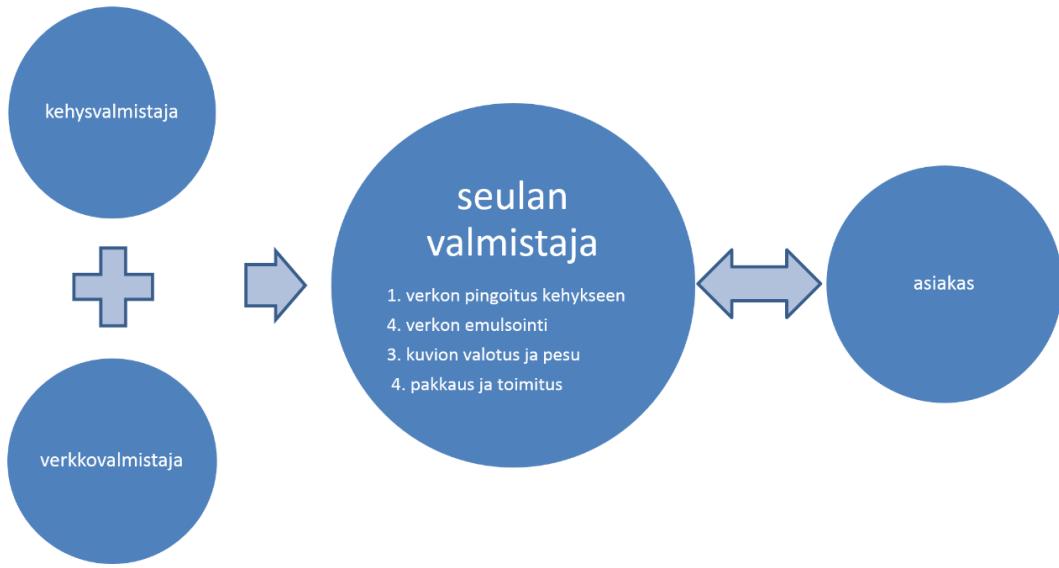
#### 4.3 Painoseula

Painoseulan rakenteen tärkeimmät muuttujat ovat seulakangas ja sen ominaisuudet, emulsion paksuus sekä kehys, johon seulakangas kiinnitetään sopivalle kireydelle. Kuviossa 12 on esitetty periaatekuva painoseulasta, jossa seulakangas on pingotettu teräskehysiin. Seulakangas on emulsoitu haluttuun paksuteen, minkä jälkeen siihen on valotettu painokuvio. Muste pääsee virtaamaan seulakankaan langotuksen läpi painoalustalle painolastan puristavan paineen vaikutuksesta kohdista, joista emulsio on pesty pois.



KUVIO 12. Painoseula (BOPP 2016; Becker 2016, kuva muokattu, viitattu 22.5.2016)

Kuviossa 13 on esitetty prosessikaaviona seulan valmistukseen liittyviä vaiheita. Seulalvalmistaja tilaa asiakkaan haluaman seulakankaan ja kehyksen, mikäli tarvikkeet ovat suoraan varastonimikkeitä voi seulan valmistus alkaa välittömästi. Ensin seulakangas pingotetaan kehykseen, minkä jälkeen se emulsoidaan. Emulsioon valotetaan painokuvio, minkä jälkeen painoseula on valmis toimitettavaksi asiakkaalle. Toimitusaika on yleensä 1—2 viikkoa.



KUVIO 13. Painoseulan valmistusvaiheita painoseulan tilaajan näkökulmasta

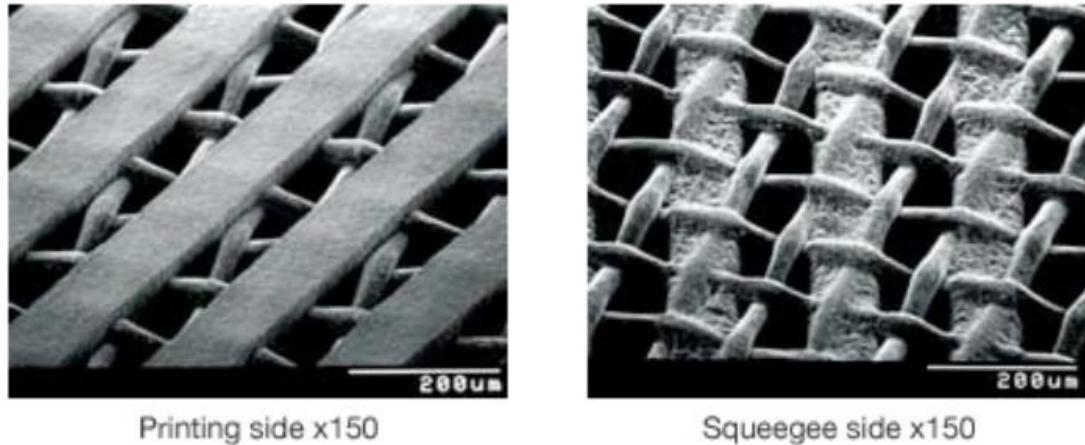
#### 4.3.1 Seulakangasmateriaalit

Seulakangas tukee ja pitää paikoillaan painokaaviota eli emulsiota sekä sallii seulakankaan ominaisuuksiin perustuen hallitun painomusteen läpivirtauksen painoalustalle. Seulakankaan on oltava ominaisuuksiltaan, rakenteeltaan ja paksuudeltaan tasalaatuista. Kankaan on myös kestettävä siihen kohdistuva mekaaninen rasitus painoprosessin ja sen jälkeisen painoseulan puhdistuksen aikana, jolloin voidaan joutua käyttämään voimakkaitakin liuotinaineita. (Viluksela ym. 2007, 88-89.)

Seulakankaan materiaalivaihtoehtoja eri ominaisuuksilla on olemassa paljon. Yleisimpä ovat nylon-, polyesteri-, polyarylaatti- sekä teräskankaat. Kaikilla näillä on omat hyvät puolensa. Operaattorin on osattava valita paras mahdollinen kangas käyttötarkoitukseen. Seulakankaan valintaan vaikuttaa suurelta osin painojäljen vaatimukset sekä rahoitus, koska laadukkaimmat kangasmateriaalit ovat huomattavasti kalliimpia. (Gamota ym. 2004, 310.)

Nylonkankaiden etu on kimmoisuus, joka mahdollistaa painamisen epätasaisille alustoiille, kangas kestää hyvin epätasaisen alustan ja painolastan aiheuttamaa mekaanista rasitusta. Nylonkankaan etu on myös huokea hinta. Korkean resoluution painoihin eikä tarkkoihin kohdistusvaatimuksien omaaviin kerrosrakennepainoihin nylonkangasta kuitenkaan kannata valita, koska verkon jousto-ominaisuudet aiheuttaa vääristymiä kuvioon. (PVF 2015, 22; Gamota ym. 2004, 311.)

Teräs- ja polyarylaattikankaat ovat vastaus erittäin tarkan ja laadukkaan painojäljen vaatimuksiin. Ominaisuuksina mainittakoon ohuemmat langanpaksuudet, suuremmat solmutiheydet sekä lankojen etäisyydet. Kankaat ovat erittäin stabilia painoprosessissa, eivät veny ja löysty herkästi kehyksessä. Polyarylaattikangas on syrjäyttämässä teräskankaat ominaisuuksillaan erittäin tarkkoihin painojäljen laatuvaatimuksiin. Kuviossa 14 on 150 kertainen suurennos polyarylaattikankaasta, jossa johtimen langanpaksuus on 30  $\mu\text{m}$ , solmuja tuumalla 250 kappaletta.



KUVIO 14. Periaatekuva seulakankaasta 150 kertaisella suurennoksella. Kuvassa on polyarylaattikangas, jossa langanpaksuus on 30  $\mu\text{m}$  sekä solmuja tuumalla 250 kappaletta (NBC meshtec 2016, viitattu 30.5.2016)

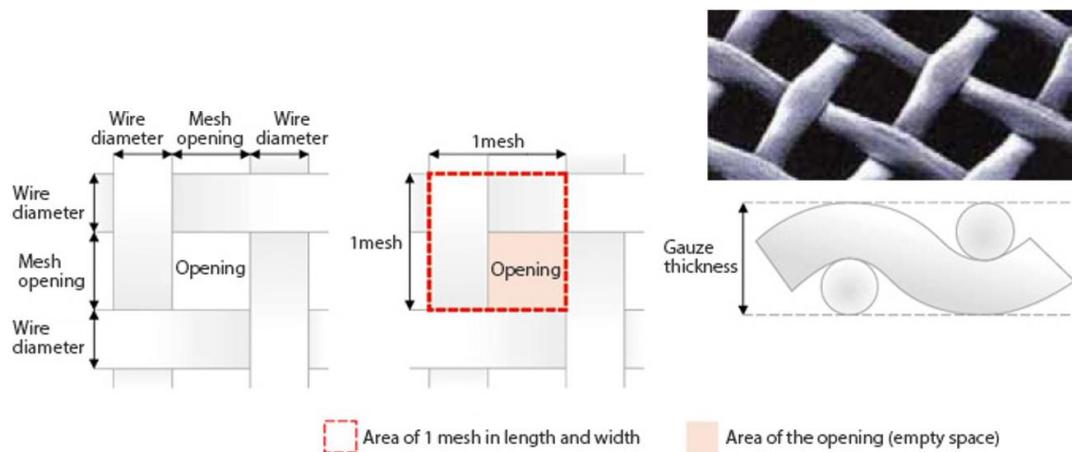
Polyesterikankaat ovat edullisempia ja mahdollistavat erittäinkin laadukkaan painojäljen, mutta eivät kuitenkaan pärjää polyarylaatti- tai teräskankaiden ominaisuuksille. Polyesterikankaita käyttävät eniten graafinen-, tekstiili- ja pakkausteollisuus. Metalli- ja polyarylaattikankaat ovat suosiossa painetun älyn sekä elektroniikan sovelluksissa, missä vaatimukset ovat tarkempia ja mittakaavat pienempiä. (Gamota ym. 2004, 311.)

Elektrokemiallisten sensorialustojen valmistamisessa on tarkoin harkittava riittäväkö polyesteriseulan stabiilisuus kerrosrakenteisen sensorin valmistukseen ja onko kohdistustarkkuus ja toistettavuus riittävä. Seulakankaiden ominaisuuksia voi vertailla kangasvalmistajien teknisistä datalehdistä, joista löytyy monipuolista tietoa kangasmateriaalista ja sen ominaisuuksista. Kuviossa 5 on mainittu seula-kangasvalmistajia, joiden kotisivulta voi tarkempaa tietoa tarvittaessa etsiä.

#### **4.3.2 Seulakankaan tärkeimmät ominaisuudet**

Seulakangas muodostuu verkkomaisesta rakenteesta, joka on esitetty kuviossa 15. Rakenne nimensä mukaisesti sisältää solmuja ja lankoja, joiden väliin jää aukkoja. Seulakankaan ominaisuudet vaikuttavat suoraan haluttuun painojälkeen, milloin tärkeintä on katsoa langan paksuutta, seulakankaan paksuutta sekä avauslukuarvoa. Avaslukuarvo ilmoitetaan prosentteina, muut mikrometreinä. Käytettävän painomusteen kannalta on tärkeää huomioida lankojen etäisyys toisiaan, mikäli partikelikoko on tiedossa.

Seulakankaalle on aina annettu tiheys lukuarvona, mikä tarkoittaa montako lanka tai solmua on tuumalla tai senttimetrillä. Käytännössä lankatiheydet vaihtelevat välillä 200 lankaa/cm tai 500 lankaa/tuuma. (Viluksela ym. 2007, 89.) Seulakankaan tiheys on yleensä suoraan verrannollinen sen kykyyn läpäistä painomustetta painoalustalle. Mitä tiheämpi seulakangas on, sitä vähemmän mustettava läpäisee mahdollistaen tarkempien ja pienempien kuvioiden painamisen. Tiheämällä kankaalla on yleensä ohuemmat langanpaksuudet, mikä omalta osaltaan vaikuttaa painojäljen tasaisuuteen ja kerospaksuuteen.

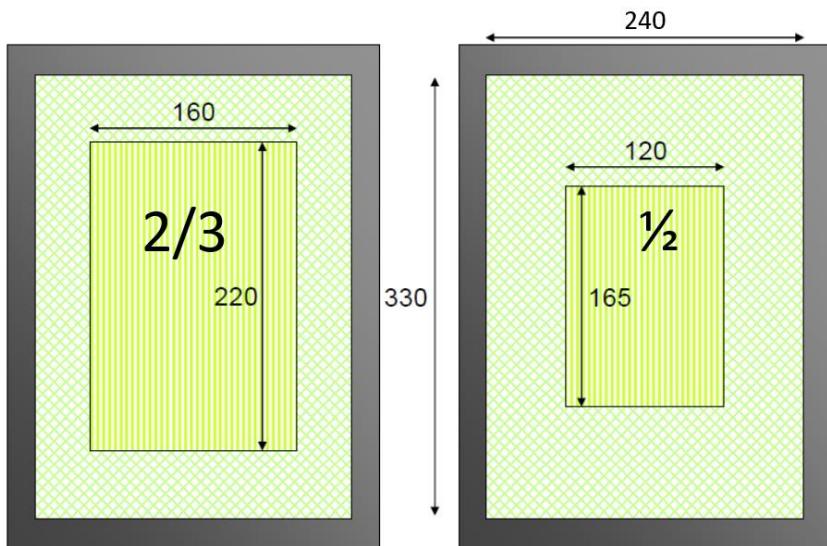


*KUVIO 15. Seulakangas on verkkomainen kudos, missä tärkeitä muuttuja ovat solmujen lukumäärä, langan paksuus sekä lankojen etäisyys toisistaan (Murakami CO.LTD 2013. viitattu 23.2.2016; PVF 2015, 9)*

#### 4.3.3 Seulakangas painokehyksessä

Kehys on yleensä valmistettu teräksestä, alumiinista tai puusta ja sen tarkoitus on pitää seulakangas paikoillaan sekä toimia painovärikaukalona painovaiheessa. Painetun älyn kuten elektrokemiallisten sensorialustojen valmistusprosessissa seulakankaan kireyden on pysytävä vakiona, jotta painojälki olisi toistettavissa. Kehyksen on myös kestettävä hyvin liuotinpohjaisia painomusteita sekä painoseulan pesuaineina käytettäviä liuottimia, näistä syistä suositeltu kehysmateriaali on teräs tai alumiini. (Viluksela ym. 2007, 89-90.)

Kehyksen koko valitaan painettavan kuvion mittojen perusteella, ottaen huomioon käytettävien painolastojen koko. Suurin sallittu koko kankaaseen valotetullaalle kuviolle on kaksi kolmasosaa kehyksen sisämitasta. Paras painotulos saavutetaan mitoittamalla painokuvio puolel pienemmäksi suhteessa kehyksen sisämittoihin. Kuviossa 16 on esimerkki painokuvion mitoista suhteessa kehyksen sisämittaan. (Pittson & Jones 2014.)



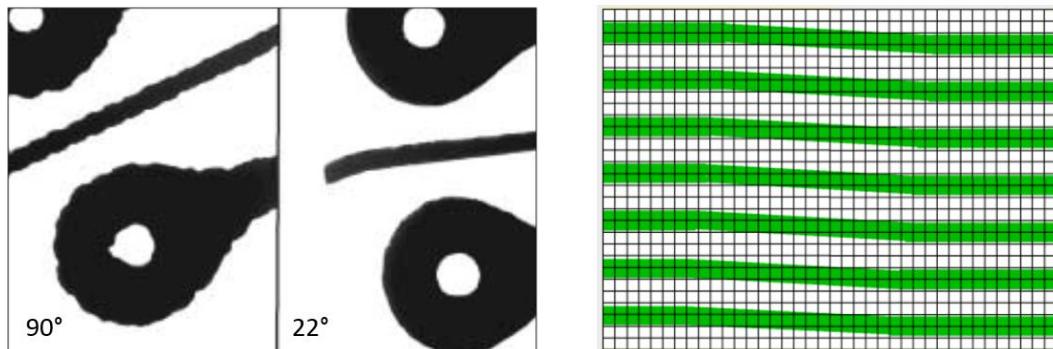
*KUVIO 15. Painokuvion mittasuhteet suhteessa painokehyksen mittoihin. Paras kestävyys painoseulalle sekä painojäljen laatu saadaan, mikäli kuvio on noin puolet kehyksen sisämitasta (Pittson & Jones 2014, kuvaaa muokattu)*

PrinLab laboratoriorion Ekra E2 silkipainolaitteessa kehyksen suurin mahdollinen koko voi olla 15", mikäli reunojen leveys kehyksessä on alle 5 senttimetriä, milloin on käytettävä kehyksille suunniteltuja adaptereita. Kehyksen koko on suoraan verrannollinen painoseulan lopulliseen hintaan, koska seulakangasta kuluu enemmän.

Seulakangas pingotetaan keykseen asentamalla seulakangas ensin 90 asteen kulmassa tähän tarkoitukseen kehitettyyn telineeseen, jossa se kiristetään seulakangasmateriaalista riippuen sille soveltuvaan kireyteen. Kehys asetetaan ja liimataan painolaatuvaatimusten mukaan 90, 45 tai 22,5 asteen kulmassa telineeseen kiristetyn seulakankaan päälle, mistä se liiman kuivuttua leikataan irti. (Viluksela ym. 2007, 90.)

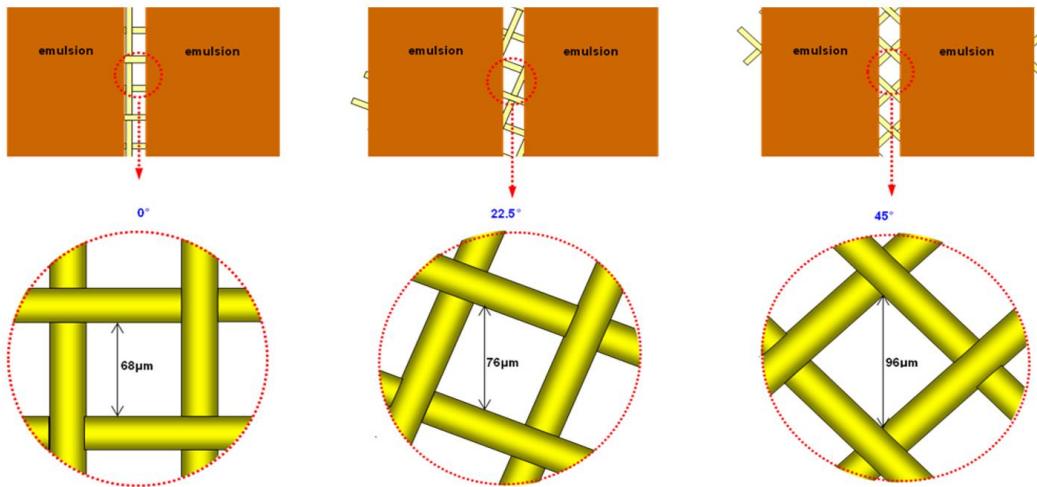
Kehyksen asennus pienempään kulmaan vähentää tai poistaa kankaan venymisen aiheuttamaa vääritystämää painojäljessä sekä painojäljen reunan epätasaisuutta (SaatiPrint 2001, 35). Kuviossa 16 on kaksi esimerkkiä venymisen aiheuttamasta ongelmasta. Toinen kuva kuvaaa painojäljen vääritymän riskiä 90 asteen

kulmalla ja toinen heikkoa resoluutiota painojäljessä, mikä vaikuttaa reunan taisisuuteen.



KUVIO 16. Kuvasta näkee miten väärä kehyksen ja seulakankaan välinen kulmavalinta voi vaikuttaa painojälkeen (SaatiPrint 2001, 36; Hoppy 1997, Luku 4.11, viitattu 15.5.2016)

Kehyksen asennusta 22,5 asteen kulmaan suositellaan, mikäli tavoitteena on korkean resoluution painojälki, kapeat viivaleveydet tai eristevälit. Asennus 45 asteen kulmaan kannattaa jos resoluutiovaatimus ei ole korkea, mutta kuitenkin vaaditaan tarkkareunaisuutta. Käytännössä 90 asteen kulmaa kannattaa käyttää pinnoitus tarpeissa tai painojäljelle ei ole resoluutiovaatimuksia. Suurempi kulma säästäää myös kangasmateriaalia, jolloin painoseula on edullisempi.



KUVIO 17. Periaatekuva miten seulakankaan asennuskulma vaikuttaa seulakankaan lankojen ja emulsion asemaan (Murakami CO.LTD 2013, viitattu 23.2.2016)

Kuviossa 17 on esitetty miten kehyksen asennuskulma suhteessa seulakankaan lankoihin vaikuttaa. Nolla astetta on käytännössä 90 asteen kulma, jolloin lanka voi jäädä emulsion laitaan ja painomuste ei pääse täydellisesti virtaamaan avauksen mukaisesti. 45 asteen kulmassa solmukohta voi jäädä keskelle avausta ja aiheuttaa estoja painomusteen vapaalle virtaukselle. 22,5 asteen kulma on tässä tapauksessa parhain vaihtoehto.

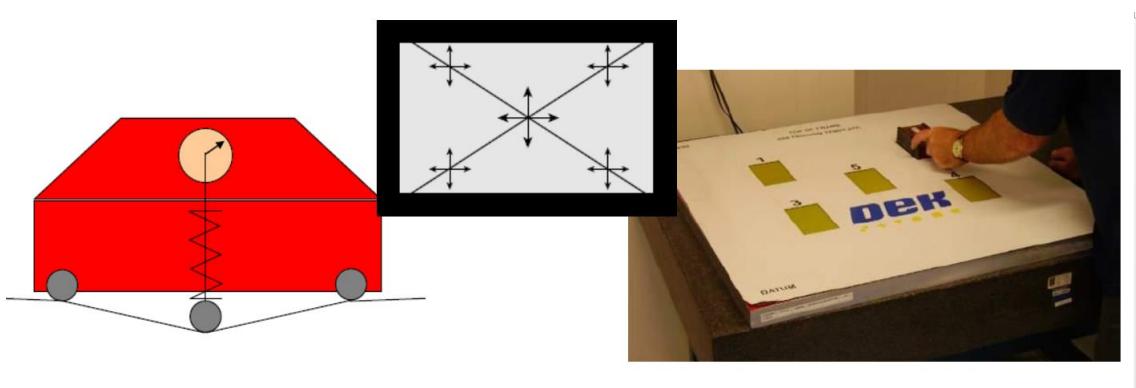
Elektrokemiallisten sensoripohjien valmistuksessa on järkevää käyttää 22,5 asteen kulmassa kehykseen pingotettua painoseulaa, jolloin elektrodien reunasta tulisi mahdollisimman tarkkaviivainen. 45 asteen kulma on myös riittävä tässä työssä käytettävien geometrioiden hyvänlaatuisen painojäljen aikaansaamiseksi.

#### 4.3.4 Seulakankaan kireys

Seulakankaan kireys täytyy tarkastaa säännöllisesti, kireys on yksi tapa seurata painoseulan kuntoa. Painoprosessin alussa painoseula säädetään hieman irti

painoalustasta ja seulakangas niin sanotusti venyy painolastan paineen vaikutuksesta ja koskettaa painoalustaa. Painolastan edetessä painoprosessin aikana irtoaa seulakangas hallitusti painoalustasta seulakankaan kimoisuuden ansiosta. (Hoppy 1997, luku 4.10, viitattu 15.5.2016.)

Kireyden voi tarkastaa siihen tarkoitettulla mittalaitteella. Seulakankaan kireys ilmoitetaan voiman yksiköllä N/cm. Kuviossa 18 on esitetty periaatekuva kuinka seulakankaan kireys tarkastetaan. Yleensä kireys vaihtelee välillä 20—50 N/cm, riippuen kangasmateriaalista. Metallikangas voidaan pingottaa kireämälle kuin nylon-, polyesteri- tai polyarylaattikankaat. Suositus kireys on tarkastettava valitun seulakangasvalmistajan laatimista teknisistä datalehdistä.



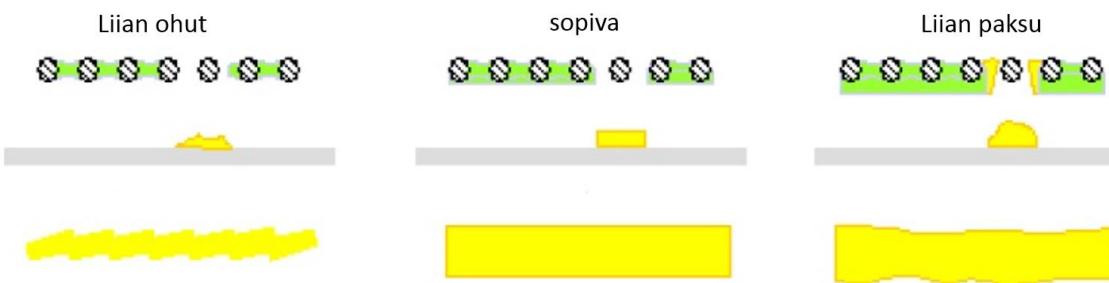
*KUVIO 18. Seulakankaan kireyden mittaus ja mittalaitteen toimintaperiaate. Kireys on suositeltavaa mitata viidestä eri kohtaa painoseulalta. Kireyden vaihtelun olisi pysyttävä  $\pm 2$  N/cm sisällä mittauspisteiden välillä (Pittson & Jones 2014; SaatiPrin 2001, 26)*

Seulakankaan kunto ja kireys on elektrokemiallisten sensoripohjien valmistusprosessissa oleellisen tärkeä, jotta sensoreiden painojälki olisi mahdollisimman tasalaatuista. Vaihtelut panojäljessä vaikuttavat suoraan painojäljen paksuuteen sekä tasaisuuteen, millä on suoraan vaikuttusta sensoreiden toimintaan ja toistetavuuteen.

#### 4.3.5 Emulsio seulakankaalla ja sen vaikutus painojälkeen

Painoseulan seulakankaan pinta päällystetään valoherkällä kalvolla eli seulakan-gas emulsoidaan. Emulsion kuivuttua siihen valotetaan UV-valolla positiivifilmin läpi haluttu painokuvio. Positiivifilmin UV-valolta suojaama alue ei kovetu ja se pestää pois. Kovettunut alue muodostaa alueen, jota painomuste ei läpäise. (Vi-luksela ym. 2007, 90.) Emulsion paksuudella voidaan myös vaikuttaa paino-seulan kokonaispaksuuteen ja tämän myötä painokerroksen paksuuteen alus-talla (Gamota ym. 2004, 312).

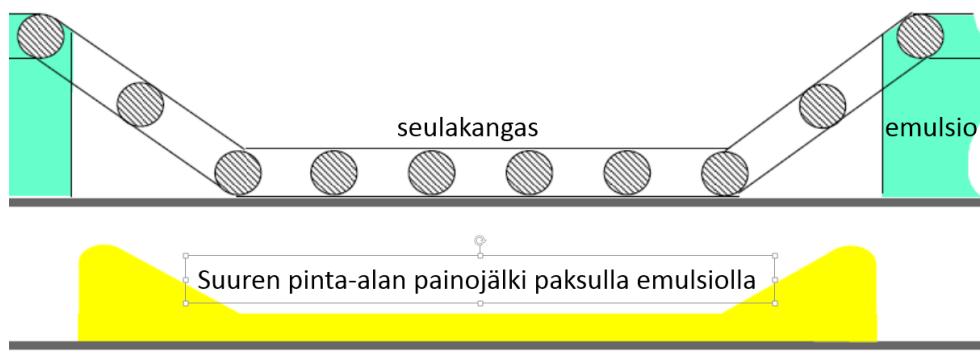
Emulsiomateriaaleja on saatavilla erilaisia soveltuuen eri seulakangasmateriaa-leille sekä panomusteille. Emulsion valinnassa kannattaa käyttää hyväksi paino-seulan valmistajan asiantuntemusta, mikäli se on mahdollista. Emulsiomateriaa-lin valinnassa on tärkeää perehtyä siihen, miten se kestää käytettävän painomus-teen ominaisuudet sekä miten painomuste vetyy emulsion pinnalla ja millaisiin emulsionpaksuksiin se kykenee. Emulsion on myös kestettävä painoseulan pe-suprosessissa käytettävät pesuaineet. (Pittson & Jones 2014.) Tässä opinnäyte-työssä ei perehdytä itse painokaavion valmistusprosessiin syvällisesti, ainoas-taan emulsion merkitykseen painojäljessä.



KUVIO 19. Emulsion paksuuden merkitys painojälkeen (Hoppy 1997, luku 5.3, Kuva 15, kuva muokattu, viitattu 08.06.2016)

Emulsion on peitetävä hennosti seulakankaan langat, jotta se nostaisi ja kannattelisi hieman lankoja painoalustan pinnasta. Tämä parantaa painomusteen virtausta lankojen alle. Kuvion 19 tarkoitus on havainnollistaa emulsion paksuuden merkitys painojälkeen. Liian ohut emulsio näkyy painojäljessä sahalaitaisuutena, korostuen mikäli painomuste on korkeaviskoosista. Liian paksu emulsio aiheuttaa painomusteen virtaukseen ongelmia eli virtaus seulakankaan läpi ei ole täydetlistä. Virtaukseen liittyvät ongelmat korostuvat jos painomuste on matalaviskoosista, mustetta tarttuu emulsion reunoihin aiheuttaen epäsäännöllisyyttä painojäljessä. Perussääntönä on, että emulsion paksuus tulisi olla noin 10 % seulakankaan paksuudesta, yleensä noin 5—30 µm.

Mikäli on tarve kasvattaa painojäljen paksuutta, se voidaan toteuttaa emulsion paksuutta kasvattamalla. Lähtökohtaisesti kuitenkin on suositeltavaa valita seulakangas vähemmän paksulla emulsiolla, jolloin kuviossa 20 esitetyä paksun emulsion aiheuttamaa kuppimaisuutta ei pääsisi tapahtumaan painojälkeen. (Pittson & Jones 2014.)



*KUVIO 20. Suuren pinta-alan sekä emulsion vaikutus painojälkeen (Hoppy 1997, luku 5.3, kuva 17, kuvaa muokattu, viitattu 08.06.2016)*

Taulukossa 2 on määritetty emulsioon valotetun avauksen leveyden merkitys painojäljen kokonaispaksuuteen. Näitä sääntöjä käytetään suunniteltaessa paino-

seulaa. Mitä kapeampi avaus on emulsiossa sitä enemmän emulsion paksuudella voi vaikuttaa kokonaiskerrospaksuuteen. Yli 10 mm avauksilla emulsiota ei tarvitsisi enää huomioida teoreettista kerrospaksuutta laskettaessa.

**TAULUKKO 2. Emulsion merkitys painojäljen kerrospaksuuteen (Pittson & Jones 2014)**

Avausleveys	Emulsion merkitys kerrospaksuuteen
<2 mm	100 %
2-5 mm	67 %
5-10 mm	33 %
>10 mm	0 %

#### **4.3.6 Sääntöjä painoseulan suunnittelun**

Painoseula koostuu kehyksestä, seulakankaasta, emulsiosta ja siihen valotetusta painokuvioista. Painettavan älykkyyden tai painettavan elektroniikan sovelluksissa on tärkeää, että painojälki on tarkalleen halutun paksuinen ja levyinen, myös pinnan tasaisuudellakin on monesti merkitystä. Painoseulan suunnittelussa on myös huomioitava käytettävä painomoste ja sen viskositeetti. Tässä luvussa tavoitteena on tuoda esiin tärkeimmät suunnittelusäännöt halutun levyisen ja pakuisen painojäljen aikaansaamiseksi.

Seulakankaan, kehyksen ja emulsion ominaisuuksilla on suuri merkitys ja niiden valintaan vaikuttavista muuttujista on kerrottu tarkemmin niitä koskevissa luvuissa. Painoseulan valmistajalla on myös suuri merkitys seulakankaan materiaalivalinnasta riippuen millaiseen kireyteen seulakangas on mahdollista pingottaa kehykseen. Järkevää onkin keskustella seulavalmistajan kanssa, mikä on järkevä kireys valitulle materiaalille.

Seulakankaan tärkeimpiä muuttuja ovat solmujen lukumäärä tuumalla, kankaan paksuus, avausprosentti, langan paksuus, lankojen välinen etäisyys sekä

emulsion paksuus. Mitä korkeampi solmujen lukumäärä on, sitä pienempi on lankojen välinen etäisyys sekä langan paksuus, mikä tarkoittaa seulakankaan pienempää kapasiteettia läpäistä painomustetta.

Ennen seulakankaan valintaprosessia on tiedettävä millainen on tavoiteltu kerrospaksuus ja viivaleveys, myös perustiedot käytettävästä painomusteesta. Alla on lueteltu huomioitavia asioita seulakangasta suunniteltaessa.

- Kangas on valittava siten, että seulakankaan langan paksuuden eli halkaisijan on oltava kolme kertaa pienempi mitä painokuvion kapein viivaleveys (Pittson & Jones 2014).
- Lankojen välisen etäisyyden on oltava kolme kertaa painomusteen partikkelikokoa suurempi (Hoppy 1997, Luku 4.6).
- Emulsion paksuus on määriteltävä tavoiteltavan kerrospaksuuden mukaan.
- Seulakangas on pinnoitettava kehykseen kangasmateriaalin edellyttämään kireyteen.

Seulakankaan teknisessä datalehdessä on yleensä mainittu seulakankaan TIV eli Total Ink Volume, joka tarkoittaa kankaan kapasiteettia läpäistä painomustetta, yksikkö on  $\text{cm}^3/\text{m}^2$ . Luku voidaan ajatella olevan myös märkäpaksuus mikrometreinä. Todellisuudessa märkäpaksuus on noin 10—20 % pienempi, johtuen viskoosin painomusteen kyvystä läpäistä seulakangas. Emulsion paksuudella voi vielä hienosäättää painojäljen märkäpaksuutta.

Teoreettisesta märkäpaksuudesta on vähennettävä luvussa 4.5 mainitut viskositeetin vaikutukset painomusteen läpäisyn. Esimerkiksi korkean viskositeetin painomusteella olisi TIV märkäpaksuudesta vähennettävä 50 %. Emulsion vaikuttus märkäpaksuteen on kuvattu luvun 4.3.5 taulukossa 2.

#### **4.3.6.1 Esimerkki teoreettisen painojäljen paksuuden määrittämisestä**

Tässä luvussa on pyritty esittämään käytännön esimerkki teoreettisen märkäpaksuuden määrittäminen valitulle painoseulalle. Sääntöjä käytetään hyväksi myöhemmin painoverkkojen valinnassa elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistukseen. Esimerkin säädöt perustuvat Robin Pittsonin pitämään teoriakoulutukseen Gwent Electronic Materials Ltd tiloissa Walesissa, vuonna 2012. Koulutuksesta saatuja neuvoja on tässä työssä sovellettu käytäntöön.

Määritetään painojäljen märkä- ja kuivapaksuus kun painoseulan parametrit ovat:

- seulakangas NBC Meshtec UX 90-040
- emulsion paksuus 15 µm
- kuvion suurin viivaleveys on 4 mm
- painomuste on viskositeetiltään keskivahvaa.
- painomusteen kiintoaineepitoisuus on 40 %

Seulakankaan teknisestä datalehdestä nähdään, että UX 90-040 kankaan TIV on 22,1 cm<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> (NBC Meshtec 2016, viitattu 17.9.2016). TIV eli Total Ink Volume voidaan myös määrittää laskennallisesti kertomalla kankaan paksuus avausprosentilla.

Valittu painomuste on viskositeetiltaan keskivahvaa, joten luvussa 4.5 kerrotun säädön mukaisesti painomusteen läpäisy on 67 %. Painomusteen viskositeetti huomioiden teoreettinen märkäpaksuus olisi 14,8 µm.

On huomioitava myös seulakankaan emulsion paksuus, mikä tässä tapauksessa on 15 µm ja sen vaikutus märkäpaksuuteen. Taulukosta 2 tarkastettuna 4 millimetrin viivaleveys emulsiossa aiheuttaisi vain 33 % menetyksen painolastan kaavioinnin aiheuttamana, jolloin emulsion vaikutus märkäpaksuuteen on 10,05 µm. Emulsion paksuus ja siihen valotettu avaus sekä painomusteen viskositeetti huomioiden teoreettiseksi märkäpaksuudeksi tulee 24,85 µm.

Painomusteen sidosaineen hahduttua kuivatusprosessissa jää jäljelle vain painomusteen kiintoaine, joka tässä tapauksessa on yllämainittu 40 %, joka löytyy myös aina painomusteen teknisestä datalehdestä. Esimerkin teoreettiseksi kui-vapaksuudeksi tulisi 9,94 µm.

#### **4.4 Painolasta eli raakeli**

Raakelin eli painolastan tehtävä silkkipainoprosessissa on puristaa painomuste seulakankaan avauksien läpi seulakankaan alla olevalle alustalle. Painolastan kumeja on saatavilla erikokoisia, erimuotoisia ja eri materiaaleista valmistettuina.

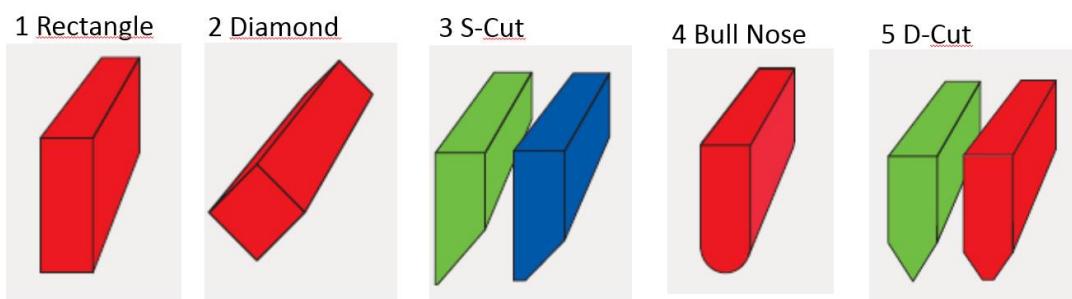
Mikäli käytössä on liuotinpohjaiset painomusteet kuten biosensorialustojen valmistuksessa yleisesti käytetään, tulee kumimateriaalin kestää näitä liuottimia. Yleisimmin käytetty ja kohtalaisen hyvin liuotinpohjaisia painomusteita kestävä kumimateriaali on polyuretaani. Polyuretaanin kemiallisesta koostumuksesta tai käytettävistä liuotinaineista riippuen voi kumi koveta tai pehmentyä käytettävän liuottimen vaikutuksesta. (Gamota ym. 2004, 314.)

Painolastan kulmalla painoprosessissa on oma merkityksensä. Kuten kuviosta 6 luvussa 4.1 nähdään, painolastan kumi on jossakin kulmassa suhteessa seulakankaaseen. Painolastan kulma vaikuttaa painomustetta alaspäin puristavaan voimaan. Liian suuri kulma ei puske painomustetta riittävähän hyvin painoseulan läpi. Pieni kulma taas ei kaavaroi painomustetta kunnolla ja painolastan alle jäädä painomustekerros pyrkii nostamaan sitä irti seulakankaasta ja musteen siirto heikkenee. (Viluksela ym. 2007, 90.)

Tavallisella suorakulmion muotoisella painolastan kumin muodolla optimaalinen painolastan kulma on noin 60 astetta. Painolastan paine asetettuna painoproses-sin aikana on painolastan kulma käytännössä noin 45 astetta, johtuen kumin taipuisuudesta. (Hoppy 1997, luku 6.5.)

#### 4.4.1 Painolastan koko ja muoto

Painolastan koko vaikuttaa miten se rasittaa seulakangasta painoseulan reunalta, aiheuttaen vääritymää painokuvioon ja kohdistustarkkuuteen. Painolastan koko vaikuttaa myös seulakankaan ja painolastan kumin kulumiseen sekä painomusteen siirtymiseen seulakankaan läpi painoalustalle. Painolastan koko on oltava 1—2 cm seulakankaalle valotettua avausta suurempi. Painoseulan olisi oltava myös vähintään kaksois kertaa suurempi kuin painolasta, jotta edellä mainitulta ongelmilta vältyttäisiin. (Dupont 2016.) Tärkeää on huomioida myös, että mikäli painoseulalle valotettu kuvio on liian suuri kehyksiin nähdyn, joudutaan siihen valitsemaan liian leveää painolasta.



KUVIO 21. Erilaisia painolastan muotoja (Trelleborg 2016, 9, viitattu 18.6.2016)

Painolastoja on monen muotoisia soveltuen hyvin moniin tarkoituksiin. Kuviossa 21 on esitetty yleisimmät painolastan kumin muodot, alla on lueteltu mihin ne soveltuvat parhaiten:

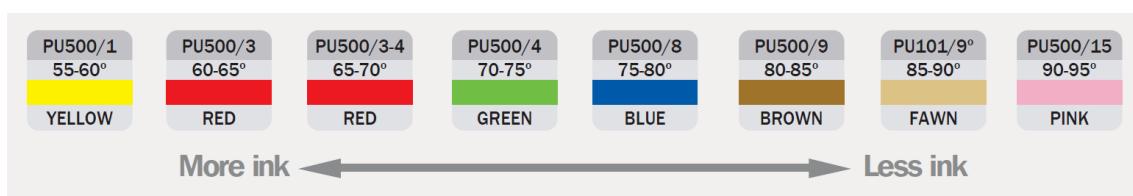
- **rectangle** soveltuu laajasti eri painoalustoille, painomusteille, yleiskäyttöisin, yleensä käytössä grafiikka- ja tekstiilipainoissa
- **diamond**, piirilevyjen stensiilipainot, erityisen tarkat painetun älyn sovelukset
- **s-cut**, epätasaiset tai epäsäännölliset painoalustat
- **bull nose**, tekstiilipainot, maksimaalinen värisiirto
- **d-cut**, lasi tai muovi sylinterimuotoisiin pintoihin, myös tekstileihin

Elektrokemiallisten sensoripohjien valmistuksessa käytettävien painomusteiden sekä painoalustan puolesta paras valinta voisi olla tavallinen suorakulmio "rectangle" muoto, toinen nimitys tälle on "trailing edge".

#### 4.4.2 Painolastan kumin kovuus

Painolastan eli raakelin kumin kovuus ilmoitetaan yleensä shore luokissa. Silkipainoprosessissa kumin kovuus on luokassa shore A. Yleensä kovuus on valittavissa väliltä 55—95 shore A. Kovuus on merkittävä kriteeri painolastan soveltuvuudelle painoprosessiin. Painolastan kumi onkin monesti värikoodattu. Painolastavalmistajat myyvät lastan ilmoittamalla pääasiassa kovuuden, mutta iso ero eri valmistajien painolastojen välillä on myös lastan elastisuudessa, jäykkyydessä, venyvyydessä sekä taipuisuudessa. (Trelleborg 2016, 7.)

Kuviossa 22 on esitetty painolastojen värikoodaus. Kuvan tarkoitus on havainnlistaan kovuuden merkitystä painomusteen siirtymiseen seulakankaan läpi.



KUVIO 22. Painolastojen kovuudet ja niille ominaiset värit (Trelleborg 2016, 3)

Yleisesti kovuudet voisi luokitella kolmeen kategoriaan: pehmyt, keskikova ja kova. Pehmyttä 60—65 shore A on järkevää käyttää, mikäli painoalusta on epätasainen, painomusteen viskositeetti on matala tai painokuviossa avauksien pinta-ala on suuri. Pehmeämmällä painolastalla painomustetta siirtyy enemmän painoalustalle. Keskikova painolasta 70—75 shore A on yleiskäyttöisin ja eniten

käytetty. Se mahdollistaa tarkan painojäljen ja erinomaisen painoprosessin hallinnan. Kova painolasta 80—90 shore A on parhaimmillaan korkean viskositeetin painomustella, koska paine voidaan asettaa korkeaksi. Kova painolasta on eniten käytetty erittäin ohuilla seulakankailla tai jos tavoitteena on erittäin ohut painojälki. (Trelleborg 2016, 7.)

Alla on listattuna neuvoja painolastan valintaan. (Saatiprint 2001, 87.)

- Mitä pehmeämpi ja tylsempi painolasta on, sitä enemmän painomustetta siirtyy.
- Mitä kovempi ja terävämpi painolasta on, sitä vähemmän painomustetta siirtyy.
- Pehmeämpi painolasta epätasaisille ja karheammille painoalustoiille.
- Kovemmissa painolastoissa on yleensä parempi liuottimien kesto.

#### **4.5 Painomusteet**

Silkipainotekniikassa painomusteelta vaadittavia ominaisuuksia ovat muun muassa seulakankaan läpäisy, tarttuminen ja vettymisominaisuudet painoalustan kanssa. Painomusteella on myös oltava sopiva kuivumislämpötila ja kuivumisaika, jotta painoalusta kestää kuivatusprosessin. Painomuste koostuu yleensä pigmentistä, sideaineesta, liuottimesta ja muista lisääineista riippuen käyttötarkoituksesta. (Viluksela ym. 2007, 91.) Painettavassa elektronikkassa sekä elektrokemiallisten biosensoreiden valmistuksessa käytettävät painomusteet sisältävät yllämainittujen aineiden lisäksi partikkeleja, jotka voivat olla grafiittia, hopea/hopeakloridia tai muuta biomateriaalien kiinnitymistä parantavia materiaaleja.

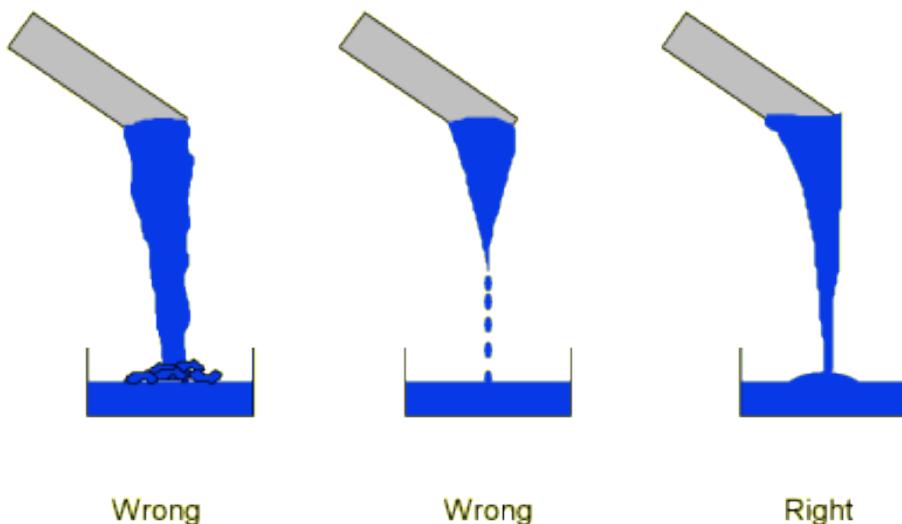
Painomusteen viskositeetti voi vaihdella 0.5—50 poisia. Painomusteen on kuljettava painolastan mukana siirtyen seulakankaan avauksien kohdalta hallitusti painoalustalle. (Gamota ym. 2004, 315.) Monesti toiminnalliset painetun älyn materiaalit ilmoitetaan SI-järjestelmän viskositeetin yksiköllä eli Paskal sekuntia. Jopa 70 Pa:s painomusteet toimivat vielä silkipainoprosessissa. Viskositeetin ollessa liian matala painomuste valuu hallitsemattomasti seulakankaan läpi alustalle.

Biosensoreiden valmistuksessa on ehdottoman tärkeää, että painomusteen siirtyminen hallitaan painoseulan ja painoprosessin muuttujien vaikutuksesta. Yleensä suurimmat ongelmat prosessissa aiheuttaa liian suuri tai alhainen painomusteen viskositeetti tai painomuste kuivuu seulakankaalle ja tukkii sen avaukset.

Painomusteet voidaan yleiskielessä luokitella korkean, keskivaiheen sekä alhaisen viskositeetin painomusteiksi. Alla on lueteltu viskositeetin vaikutuksia painomusteen kykyyn läpäistä seulakangas. (Pittson & Jones 2014.)

- Korkea viskositeettinen painomoste, vastaava kuin maapähkinävoi, läpäisy on noin 50 % laskennallisesta märkäpaksuudesta.
- Keskivaiheen viskositeeteilla läpäisy on noin 67 % laskennallisesta märkäpaksuudesta.
- Matalaviskoosinen painomoste, lähellä veden viskositeettia, läpäisy on noin 75 % laskennallisesta märkäpaksuudesta, mikä monesti on jo vaikea hallita prosessissa.

Mikäli seulakankaan teoreettinen märkäpaksuus ilman muita muuttujia olisi 20  $\mu\text{m}$ , on siitä vähennettävä 50 %, jos painuste on korkeaviskoosinen. Teoreettinen laskettu märkäpaksuus olisi tällöin 10  $\mu\text{m}$ , säädön on huomioitava seulakangasta valittaessa. (Pittson & Jones 2014.)



*KUVIO 23. Painomusteen viskositeetin pikainen tarkistaminen ilman rheologisia laitteita (Hoppy 1997, kuva 26)*

Kuviossa 23 on kuvattu painomusteen viskositeetin vaikutusta kun sitä valutetaan vapaasti purkkiin. Painomusteista saatu informaatio on tärkeää lukea valmistajan datalehdestä huolella ennen painoa tai painomusteen hankintaa. Joskus painomustetta on ohennettava ja siihen tulee käyttää valmistajan suosittelemaa liuotinta. Painomusteen laatua voi tarkkailla erilaisin rheologisin mittalaittein tai menetelmin. Tässä opinnäytetyössä ei tarkastella rheologisia ominaisuuksia tämän tarkemmin. Yksinkertainen keino tarkkailla painomusteen laatua on käyttää Grindometriä ennen painojen aloittamista. Grindometrillä mitataan partikkelikoko painomusteessa.



KUVIO 23. Grindometrin toimintaperiaate (TQC 2016)

Partikkelikoko vaikuttaa seulakankaan lankojen väisen etäisyyden valintaan. Lankojen välinen etäisyys on oltava kolme kertaa painomusteen partikkelikokoa suurempi. Mikäli painomusteessa partikkelikoko on  $10 \mu\text{m}$ , seulakankaan lankojen välinen etäisyys on oltava vähintään  $30 \mu\text{m}$ . (Hoppy 1997, luku 4.6.)

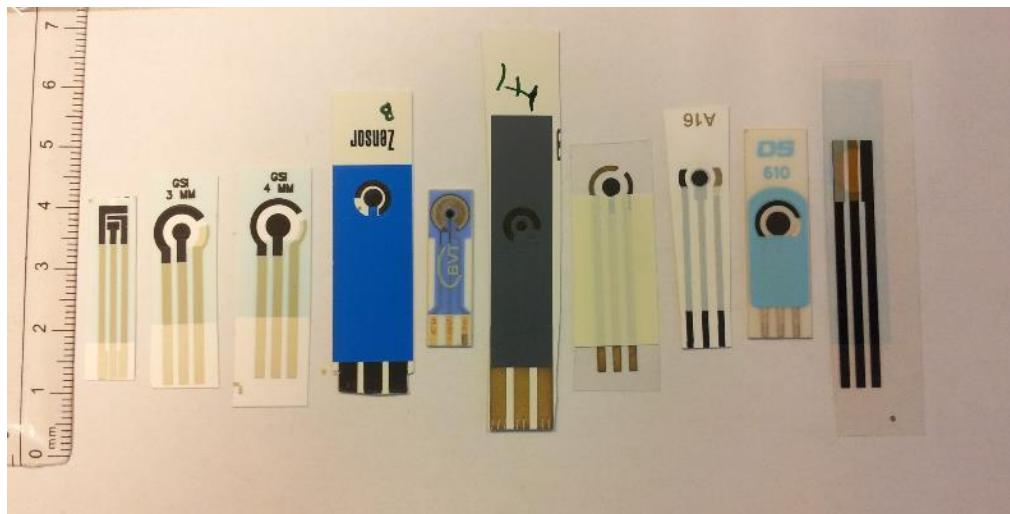
## **5 ELEKTROKEMIALLISTEN SENSORIPOHJIEN VALMISTUS TASOSILKKIPAINOPROSESSISSA**

Elektrokemiallisten sensoripohjien valmistusmenetelmän valintaan vaikuttaa suurelta osin menetelmän kyky vastata valmistettavan tuotteen vaatimuksiin. PrinLab laboratorion käytössä olevista valmistusmenetelmistä silkipaino eli verkkopaino soveltuu parhaiten, koska menetelmässä painojäljen paksuus, painoverkkojen edullisuus, kaupallisten painomusteiden sekä alustamateriaalien saatavuus soveltuват parhaiten sensoripohjien valmistukseen.

PrinLab laboratorion silkipainolaite on puolautomatiivinen, mikä tarkoittaa sitä, että alusta asetetaan ja kohdistetaan manuaalisesti. Kohdistamisessa on käytetään kamerat, jotka opetetaan etsimään halutut kohdistusmerkit painoalustalta ja osoittamaan ovatko painoalusta ja painoseulan avaus kohdistettu oikein ennen varsinaista painotapahtumaa.

Silkipainomenetelmän saanto ja laadun toistettavuus on parhain johtuen sensorin kerrosrakenteen kohdistuksen aiheuttamista haasteista. Käytössä oleva silkipainolaitteisto mahdollistaa kerrosrakenteiden painamisen päällekkäin noin 25  $\mu\text{m}$  tarkkuudella, mikä on riittävä sensoripohjien valmistukseen.

Ensimmäinen tavoite olikin löytää parametrit painoverkoille ja painoprosessille hyvälaatuisten elektrokemiallisesti toimivien sensoripohjien valmistukseen. Onnistumiseen vaikuttavat painoverkkojen ja painoprosessin lisäksi materiaalivalinnat kuten alustamateriaalit, painomusteet, laboratorio-olosuhteet ja painoprosessissa käytettävät oheistarvikkeet sekä sensorin geometriset mitat.



*KUVIO 24. Erilaisia näytteeksi hankittuja tutkimuskäytöön tarkoitettuja kaupallisia sensoriliuskoja.*

Mallina sensoripohjan geometriaksi ja mitoitukseen käytettiin kuvion 24 kaupallisesti saatavien sensoripohjien mittoja ja elektrodien geometrioita. Kaupallisia sensoreita käytettiin myös referenssinä sensoripohjan kehitystyössä sekä toiminnan arvioinnissa. Haasteena kehitystyössä oli mitoittaa sensorin työelektrodi, vastaelektrodi sekä referenssielektrodi sopivassa suhteessa oikean kokoisiksi. Tavoitteena oli valmistaa sensoripohja, joka soveltuu mahdollisimman monipuolisesti erisuuruisten reaktiovirtojen analysointiin. Painoprosessiin liittyvät haasteet liittyivät painopinnan laatuun, myös painokerroksien paksuudet oli oltava riittäviä sähköä johtavan rakenteen aikaan saamiseksi.

## **5.1 Materiaalivalinnat elektrokemiallisten sensoripohjien valmistukseen**

Sensoripohjien valmistuksessa käytettävistä materiaaleista tärkeimpä ovat painomusteet eri kerroksille sekä alustamateriaalit. On myös valittava painomentelmä sekä painoprosessissa käytettävä materiaalit ja tarvikkeet, joita ovat painoseula jokaiselle kerrokselle sekä painolastan koko, muoto, kulma ja kovuus. Painomusteiden ja alustamateriaalien haasteena on niiden saatavuus, toimitusaika, hinta ja minimitoimitusmäärit, mitkä voivat olla liian suuria. Yleensä tarjolla

onkin näytteenä edullisempaan hintaan saatavia pakkauskokoja tutkimuslaitosten tarpeisiin, mikä on tärkeää tuotekehitystyössä.

### **5.1.1 Painomusteiden valinta**

Painomusteet ovat tärkein materiaali elektrokemiallisen sensoripohjan valmistukseissa. Tässä työssä käytetyt painomusteet ovat kaupallisia ja valmiiksi silkkipainoprosessiin soveltuvaksi kehitettyjä.

Kriittisin painomuste sensorin toiminnan kannalta on grafiittimuste, josta muodostuu sensorialustan vastaelektrodi sekä työelektrodi. Grafiittimusteen valinta perustui näytteenä hankittujen grafiittimusteiden painokokeiluihin sekä syklisellä voltammetriamenetelmällä tehtyihin testimittauksiin.

Erilaisia grafiittimusteita hankittiin näytteenä kahdeksaa eri nimikettä neljältä eri valmistajalta. Taulukossa 3 on esitetty erilaiset testatut grafiittipainomusteet, mukaan on myös referenssielektrodille sekä eristemusteeksi näytteenä hankittuja painomusteita. Taulukkoon on tummennettu opinnäytetyössä käytetyt painomusteet.

*TAULUKKO 3. Näytteenä hankittuja painomusteita. Taulukossa tummennettuna näkyy opinnäytetyöhön valitut painomusteet.*

Nimike	tunniste	valmistaja	Elektrodi
Carbon paste	120-16	Creative materials	Työ/vasta
Carbon Conductive Ink	112-48	Creative materials	Työ/vasta
Carbon sernsor paste	<b>C2030519P4</b>	<b>Gwent</b>	Työ/vasta
Carbon sensor paste	C2091208D1	Gwent	Työ/vasta
Carbon conductor paste	7105	Du Pont	Työ/vasta
Carbon conductor paste	BQ221	Du Pont	Työ/vasta
Carbon conductor paste	BQ242	Du Pont	Työ/vasta
Carbon conductor paste	SD 2843 HAL	Peters	Työ/vasta
Silver Paste	C2020522D1	Gwent	Referenssi
Conductive ink Silver Paste	LS-411AW	Asahi	Referenssi
Silver/Silver Chloride paste	<b>C2130809D5</b>	<b>Gwent</b>	Referenssi
Polyester resin green	452SS	Henkel Acheson	Eriste
Dielectric Paste, off white	8153	Du Pont	Eriste
Grey Dielectric Paste	<b>D2070423P5</b>	<b>Gwent</b>	Eriste

Silkipainoprosessiin soveltuuden kannalta lähes kaikki olivat ominaisuuksiltaan optimaalisia. Lähes kaikilla painomusteilla ongelmaksi osoittautui kuitenkin nopea kuivuminen, jonka seurauksesta painoseulan avaukset menevät herkästi tukkoon, saanto ensimmäisissä painokokeiluissa oli heikko. Painoprosessin optimointi jokaiselle painomusteeelle ei aikataulun puitteissa ollut mahdollista.

Syklistenvoltammetria mittausten perusteella ainoastaan DuPont ja Gwent painomusteet toimivat elektrokemiallisessa testissä hyvin. Peters ja Creative materials painomusteet eivät sovellu tähän käyttötarkoitukseen elektrokemiallisten ominaisuuksien takia. (Pääkkönen & muut. 2012, viitattu 13.8.2016.)

Gwent C2030519P4 valittiin työssä käytettäväksi painomusteeksi työ- ja vastalektrodille, koska sen paino-ominaisuudet ja saatavuus osoittautui parhaimmiksi. Gwentin kaupallisissa kahden elektrodin sensoreissa on käytetty samaa painomustetta.

Referenssikerrokselle valittiin Gwentin tarjoama hopea/hopeakloridi suhteessa 60/40. Painomusteen valmistajan tunniste on C2130809D5. Valinta perustuu helppouteen tilata materiaali samalta mustevalmistajalta kuin grafiittimustekin. Pelkkä hopea referenssielektrodilla olisi riittävä, mutta kloridi on tärkeä elektrokemiallisen reaktion kannalta, se myös hidastaa elektrodin hapettumista (Nissinen, haastattelu 17.8.2016). Hopea/hopeakloridi painomuste on myös huomattavasti edullisempaa kuin pelkkä hopeamuste alhaisemman hopeapitoisuuden takia.

Myös eristekerroksella valinta kohdistui Gwentin kaupalliseen painomusteeseen D2070423P5. Eristemusteen tärkein tehtävä tässä työssä valmistetaville biosensorialustoiille on suojata sähköä johtavia kerrosia ulkoisilta epäpuhtausilta sekä rajata näyte- sekä biomateriaalien leviämistä reaktioalueen ulkopuolelle.

Painomusteiden hinta on kerrottu taulukossa 4. Gwent Electronics Materials valmistaa ja toimittaa painomusteet yksinoikeudella, joten hintakilpailutus ei ole mahdollista. Painokokeiluihin on hyvä varata vähintään 100g jokaista painomustetta.

*TAULUKKO 4. Painomusteiden hinnat. Toimitusaika on noin 4-5 viikkoa tilauksesta. Toimituskulut voivat nousta jopa 200 euroon.*

Nimike	tunniste	valmistaja	Hinta/ 1000g / ALV 0%
Carbon sernsor paste	C2030519P4	Gwent	211 €
Silver/Silver Chloride paste 60/40	C2130809D5	Gwent	1060 €
Grey Dielectric Paste	D2070423P5	Gwent	270 €

### **5.1.2 Alustamateriaalin valinta**

Luvussa 2.1 on mainittu joitakin suosittuja alustamateriaaleja elektrokemiallisten sensoreiden valmistuksessa. Muovi valittiin alustamateriaaliksi sen edullisuuden,

kestävyyden ja monipuolisten saatavilla olevien pintaominaisuksien takia. Taulukossa 5 on esitetty muutamia näytteenä hankittuja muovimateriaaleja, joihin Gwent Electronics Materials kaupallisia painomusteita kokeiltiin.

Tavoitteena oli löytää valkoinen muovimateriaali, joten kirkkaat materiaalit jäetettiin listasta pois. Painoalustan on kestettävä painomusteen vaatima kuivatuslämpötila, joka tässä tapauksessa on jokaisella painokerroksen painomusteella 80 °C. Jokainen näistä taulukossa 5 esitetyistä muovimateriaaleista kestää vaaditun lämpötilan, eikä kutistumista tässä lämpötilassa pitäisi tapahtua teknisten data-lehtien mukaan. Käytössä ei ollut alustamateriaalin pintaenergian mittaanmiseen liitteita eikä materiaaleja, joten painomusteen ja alustan yhteensopivuus täytyi todeta painotestein. Parhaiten painomuste käyttää tyypillinen PET Hydroprint F350HWT sekä PBT Valox FR1 muovimateriaalien kanssa.

#### *TAULUKKO 5. Erilaisia näytteenä hankittuja muovimateriaaleja.*

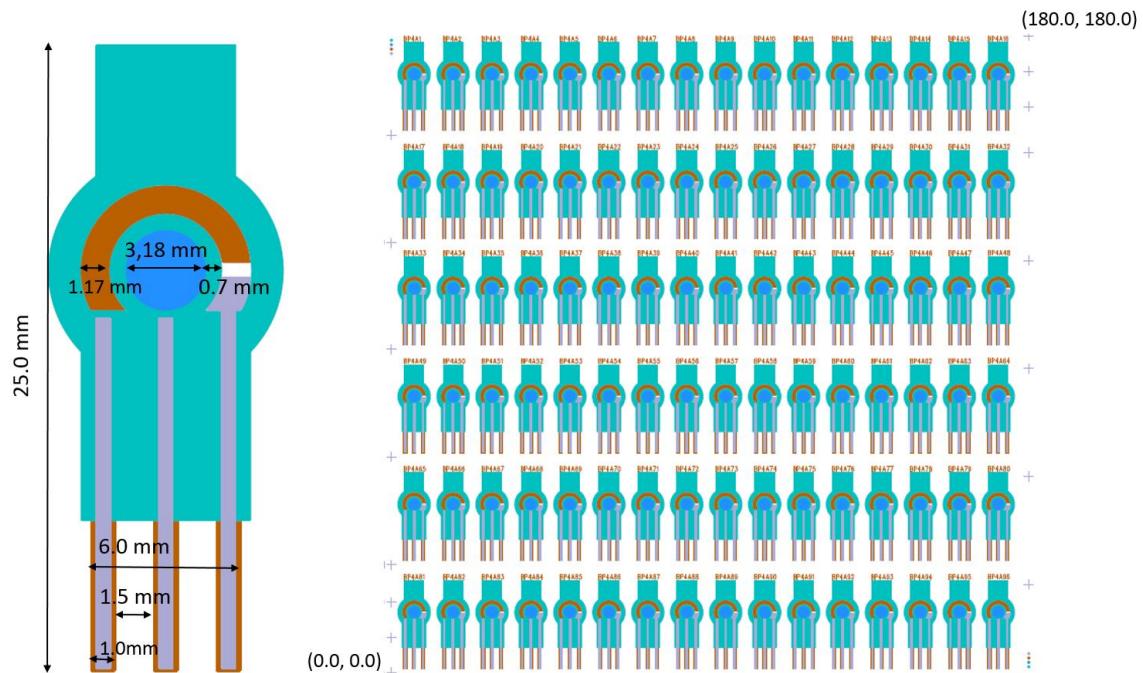
Nimi	Valmistajan tunniste	Valmistaja
Hydroprint Matt white PET	F350HWT 350µm	Kernow Coatings Limited
Melinex white 339 PET	339 250µm	Du Pont
Melinex white 347 PET	347 125 µm	Du Pont
<b>Valox white PBT</b>	<b>FR1 Valox 250µm</b>	<b>Sabic Innovative Plastics</b>

Valinta kohdistui Valox FR1 PBT muoviin, koska se on sama materiaali, jota Gwent electronic materials käyttää kaupallisissa sensoreissaan. Erikoistutkija Marja Nissisen sekä Laboratorioanalytikko Niina Torniaisen mukaan Valox FR1 PBT muovin pintaenergia on soveltuvampi näytteen leviämisen kannalta reaktioalueella. Hydroprint muovissa pinta on hydrofobisempi, joten näytepisara kasvaa helpommin korkeutta kuin leviää koko työskentelyalueen peittävälle alalle. Näistä syistä valinta kohdistui Valox FR1 PBT muovimateriaaliin.

## 5.2 Sensorin eri kerroksien geometrioiden suunnittelu

Tässä työssä käytetty CAD-suunnittelutyökalu oli Mentor Graphics PADS. Kyseinen tietokoneavusteinen suunnittelutyökalu on tarkoitettu elektronikan suunnitelijoille piirilevysuunnittelun. Työkalu soveltuu hyvin monikerrosrakenteisten yksinkertaisten geometrioiden mallintamiseen.

Kuviossa 25 esitetty ja työssä valmistetun elektrokemiallisen sensoripohjan geometriat on piirtänyt erikoistutkija Harri Määttä. Geometriat sensoreille suunniteltiin yhdessä erikoistutkija Marja Nissisen sekä laboratorioanalytiikko Niina Torniaisen kanssa, koska heillä on vahva kokemus sensoreiden elektrokemiallisesta käyttäytymisestä.



KUVIO 25. CAD-mittakuva työssä valmistetun elektrokemiallisen sensorin geometriosta.

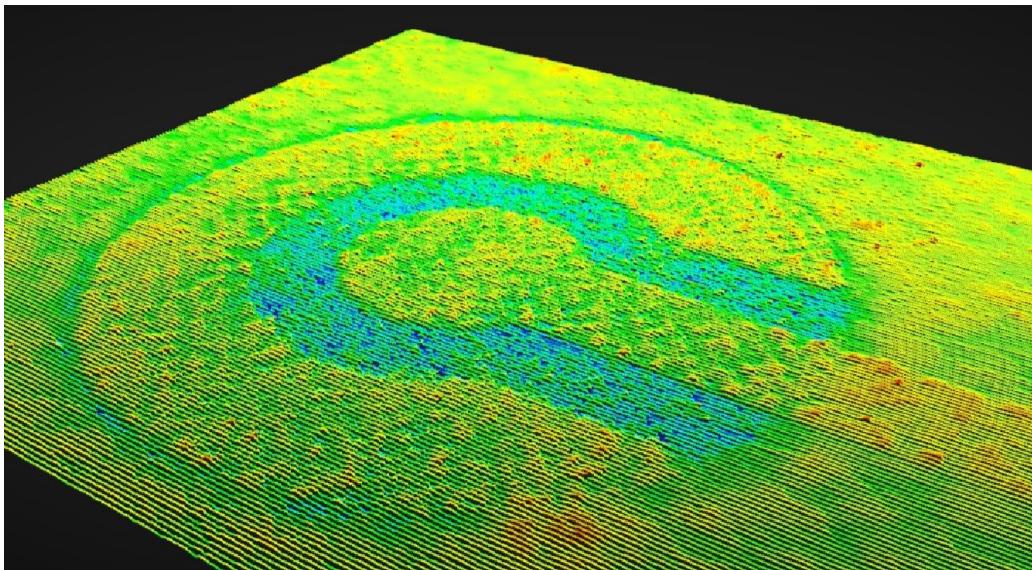
Painoseulan 15"x15" kehyksen sisämitta on 381 mm, kuvio mitoitettiin siten, että sen leveys on alle puolet kehyksen sisämitasta. Yhdelle arkille valmistuu 96 kappaletta elektrokemiallisia sensorialustoja.

### **5.3 Painoseulan parametrien määrittäminen ja seulakankaan valinta eri kerroksille**

Painoseulan parametrien valinta vaikuttaa suoraan kerospaksuuteen sekä yhdessä prosessiparametrien kanssa painopinnan karheuteen. Kriittisin painopinnan laadun ja paksuuden kannalta on työelektrodi. Referenssielektrodin pinnan paksuudeksi riittää, yhtenäinen painojälki. Kokemuksesta tiedetään, että se saavutetaan jopa jo muutamien mikrometriien paksuudella riippuen painomusteen viskositeetista ja vettymisominaisuksista painoalustan kanssa.

Kuvion 24 näytteille tehtiin pintaprofiilianalyysi FocalSpec LCI 400 3D-pintaprofiililaitteistolla. LCI 400 pintaprofiililaitteisto mahdollistaa painopinnan paksuuden sekä pinnankarheuden tarkastelun noin  $2,2 \times 10 \times 0,1 \text{ } \mu\text{m}$  tarkkuudella optisesti koskettamatta painopintaa (Focalspec 2016, viitattu 28.9.2016).

Tarkastelun kohteena oli työelektrodin painopinnan paksuus. Florensen kaupallisen sensorialustan painopinnan paksuus oli noin  $10 \text{ } \mu\text{m}$ , Gwent sensorialustalla painopinnan paksuus oli sama. Ainoastaan Dropsens sensorilla työelektrodin paksuus ylitti yllämainitun kerospaksuuden. Kuviossa 26 on esitetty 3D-pintaprofiili Englannissa toimivan Gwent Elektronic materials kaupalliselle kaksielektrodiselle sensorialustalle. Kuviossa 26 värin muutos kertoo korkeuserosta painopinnalla.



*KUVIO 26. PrinLab laboratorion FocalSpec LCI 400 3D pintaprofiili Gwent kaupallisen sensorin pinnasta. Kerrospaksuus työelektrodilla on noin 10 µm.*

Painoseulojen valmistajaksi valittiin PVF-Vertriebs GmbH Saksasta. Heidän kotisivuillaan on paljon erilaisia seulamateriaaleja. Seulamateriaaliksi valittiin NBC Alpha sarjan polyesteri seulamateriaali (PVF 2016, viitattu 21.8.2016). NBC seulakangasvalmistajan kotisivulta löytyvien testitulosten perusteella NBC Alpha EX-, UX- tai L-sarjan seulamateriaalien resoluutio ja mekaaniset ominaisuudet ovat riittävät käyttötarkoitukseen (NBC Meshtec 2016, viitattu 21.8.2016). Alustavan hintatiedustelun perusteella EX-sarjan seulakangas on hintalaatusuhteeltaan sopiva tässä työssä tehtäviin painokokeisiin.

Lisäksi painoseula varustettiin kaikille kolmelle kerrokselle 15"x15" teräskehysillä, joka on mekaanisesti kestävin vaihtoehto. Seulakangas pingotettiin kehykseen valmistajan suosituskireyteen 26—28 N/cm noin 22,5 asteen kulmassa. Emulsiomateriaalin on valinnut painoseulan valmistaja sellaiseksi, että sen vetymisominaisuudet liotinpohjaiselle painomosteelle ovat optimaaliset sekä liuotinpesuaineiden kesto on hyvä.

Painoseulan hinta muodostuu kehyksestä, seulakangasmateriaalista, seulakan-kaan pingotuksesta kehykseen, emulsointityöstä haluttuun paksuuteen, valotusfilmin tulostamisesta ja kuvion valottamisesta emulsioon. Toimituskuluista tulee

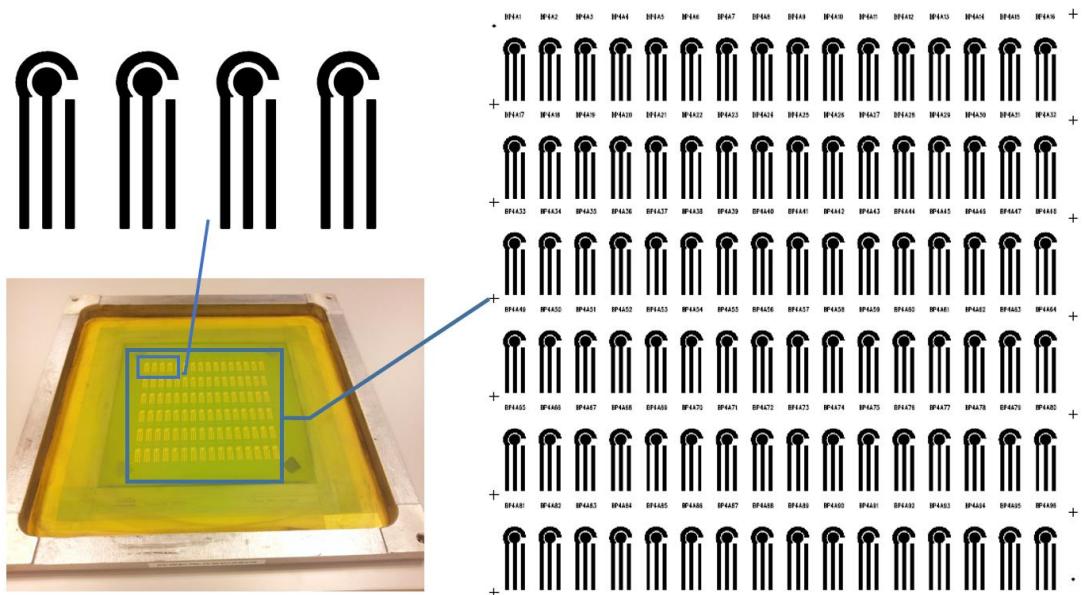
myös kustannuksia. Kokonaisuudessaan 15"x15" painoseula maksaa noin 300—350 euroa, riippuen materiaalivalinnoista. Tässä opinnäytetyössä painoseuloissa käytettiin PrinLab painolaboratorion painokehyksiä, jotka lähetettiin valmistajalle etukäteen. Kustannus yhdelle painoseulalle oli noin 200 euroa.

### **5.3.1 Painoseulan suunnittelu grafiittikerrokselle**

Tässä työssä käytettiin Gwentin kaupallista grafiittipainomustetta, tavoite oli päästä lähelle 10 µm painojälkeä, kuten Gwentin kaupallisen sensorin painopinta mittaustulosten perusteella on. Tavoitteena oli sama tai tasaisempi painopinnan karheus kuin kuvan 26 pintaprofiilista nähdään. Painopinnan tasaisuuteen voidaan vaikuttaa painoprosessin ja painoseulan lisäksi paksummalla painokerroksella, jolloin painoseulan solmujen ja lankojen aiheuttama karheus tasottuu hieman itsekseen ennen lopullista kuivatusta uunissa.

Painokerroksen paksuuden tavoitteeksi asetettiin hieman paksumpi painokerros kuin 10 µm. Painokerroksen tavoitepaksuus oli noin 14—15 µm, jonka perusteella seulakankaan valinta on tehty.

Luvussa 4 esitetyn teoriatiedon ja suunnittelusääntöjen perusteella teoreettiseksi kuivakerospaksuudeksi 20 µm emulsiolla NBC Meshtec EX79-048/ 200 PW seulakankaalla tulee 13,27 µm. Taulukosta 11 luvussa 5.7.2 löytyy grafiittikerrokselle suunnitellun painoseulan kaikki tärkeimmät parametrit. Painoseulan PrinLab tunnistumeroksi määritettiin BVP28.



KUVIO 27. Painoseula, missä emulsioon on valotettu työ- ja vastaelektrodien geometriat.

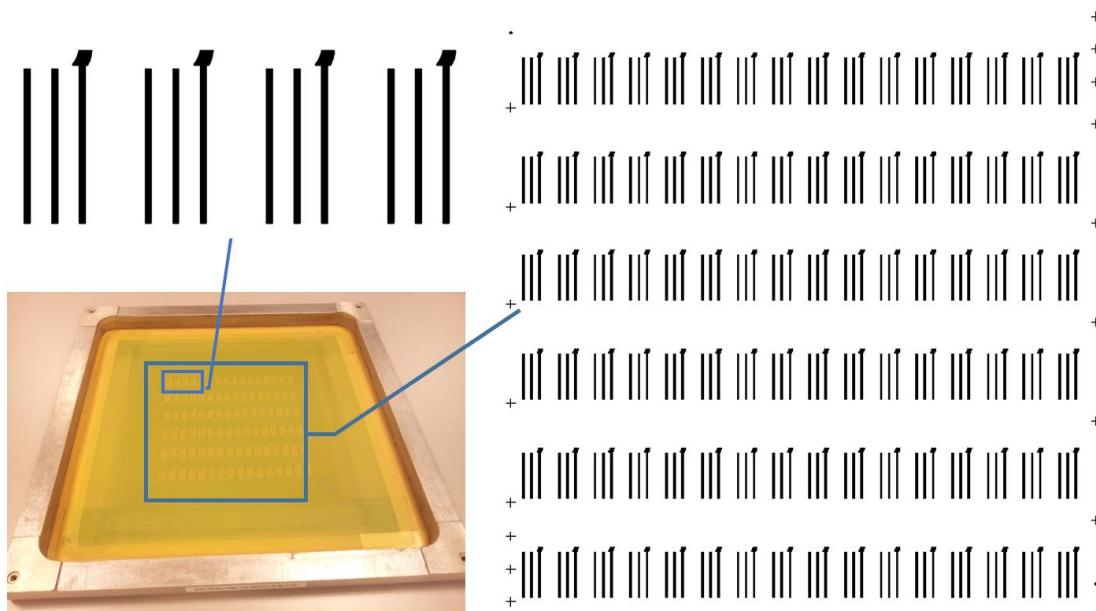
Teoreettisen kuivakerospaksuuden määrittämisessä teoriatiedon perusteella on huomioitu valitun seulakankaan TIV, suurin avaus emulsiolla, mikä on noin 4 mm työelektrodin alueella sekä musteen viskositeetin vaikutus siirtymiseen seulakan-kaan läpi alustalle. Huomioitu on myös Gwent Electronic Materials kaupallisen C2030519P4 grafiittipainomusteen kiintoaineepitoisuus, millä on merkittävä osuus. Jopa 57—61 % painomusteen sidosaineista haihtuu kuivatusprosessin aikana märkäpaksuudesta kiintoaineepitoisuuden ollessa 39—43 %. (Gwent group 2016. viitattu 18.9.2016.) Todennäköisesti 13,27  $\mu\text{m}$  kerospaksuus toteutuu työelektrodin keskellä, reunoilta painopinnan paksuus voi olla suurempi, eli tavoitepaksuus 14—15  $\mu\text{m}$  voisi olla tällä kokoonpanolla realistinen.

### 5.3.2 Painoseulan suunnittelu referenssikerrokselle

Painoseulan seulakangasmateriaaliksi referenssikerrokselle valittiin EX79-048/200 PW, mikä on sama kuin grafiittikerroksellakin. Emulsion paksuudeksi määritettiin 8  $\mu\text{m}$ .

Teorialuvuissa käytyjen laskentasääntöjen perusteella teoreettiseksi kuivakerospaksuudeksi tulee  $18,49 \mu\text{m}$ , mikä on ehkä tarpeettoman paksu kyseiselle kerrokselle, mutta ei pitäisi olla haitallisen paksu. Tavoitteenahan on yhtenäisen sähköä johtavan kerroksen valmistaminen.

Seulakankaan valinta sekä emulsion paksuus perustuu Gwent Electronic materials C2130809D5 painomusteen teknisestä datalehdestä löytyvään tyypilliseen kuivapaksuuden arvoon  $20 \mu\text{m}$ . (Gwenti group 2016, viitattu 18.9.2016.) Tieto- sesti valittiin seulakangas, jolla painopinnan paksuus on hieman alle yllämainitun paksuuden.



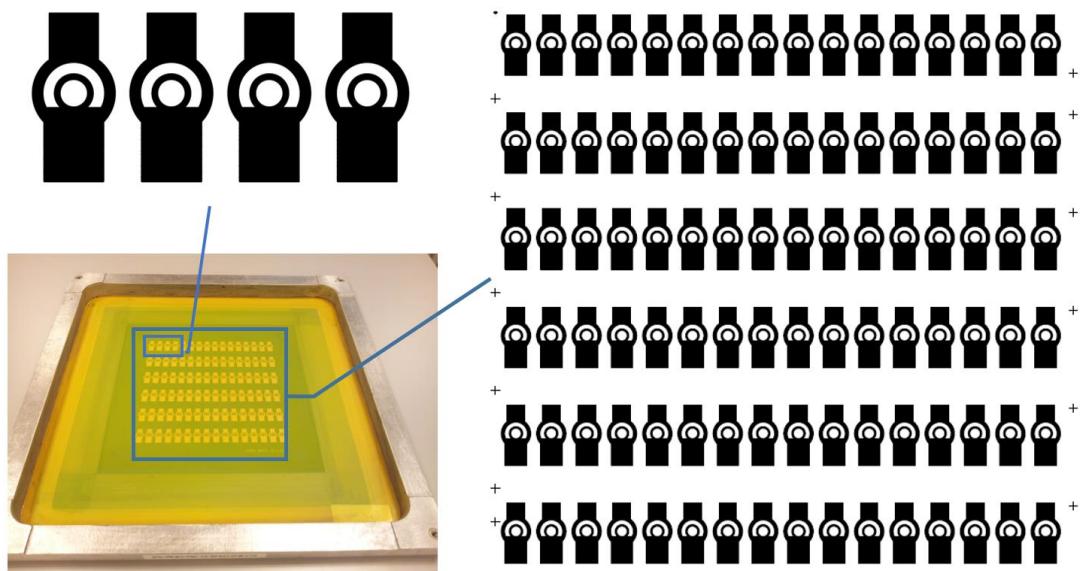
KUVIO 28. Painoseula, jossa emulsioon on valotettu referenssielektrodin geometriat

Kuviossa 28 on esitetty referenssikerroksen geometria valotettuna painoseulan emulsioon. Taulukosta 11 luvussa 5.7.2 löytyy referenssikerrokselle suunnitellun painoseulan kaikki tärkeimmät parametrit. Painoseulan PrinLab tunnistenumeroksi määritettiin BVP27.

### 5.3.3 Painoseulan suunnittelu eristekerrokselle

Painoseulan seulakangasmateriaaliksi referenssikerrokselle valittiin EX79-048/200 PW, mikä on sama kuin grafiitti- ja referenssikeroksillakin. Emulsion paksuudeksi määritettiin 20  $\mu\text{m}$ .

Teorialuvuissa käytyjen laskentasääntöjen perusteella teoreettiseksi kuivakerospaksuudeksi tulee 13,58  $\mu\text{m}$ . Eristekerroksella kriittisin kohta on renkaat reaktioalueen ympärillä, niiden tarkoitus on estää näyte- tai biomateriaalien leväimisen reaktioalueen ulkopuolelle.



KUVIO 29. Painoseula, jossa emulsioon on valotettu eristekeroksen geometriat.

Kuviossa 29 on esitetty eristekeroksen geometriat valotettuna painoseulan emulsioon. Taulukosta 11 luvussa 5.7.2 löytyy eristekerrokselle suunnitellun painoseulan kaikki tärkeimmät parametrit. Painoseulan PrinLab tunnistenumeroksi määritettiin BVP30.

## 5.4 Painoprosessissa tarvittavat laiteet, tarvikkeet ja materiaalit

Painoprosessissa tarvittava laiteluettelo on esitetty taulukossa 6. Laiteluettelo sisältää prosessissa käytettyjen laitteiden tarkat osanumerot ja valmistajat. Tärkeimpinä laitteina taulukossa on itse painolaite, johon painoparametrit optimoidaan. Muut luettelossa mainitut tukevat prosessin onnistumista hallitusti ja toistettavasti myös jatkossa.

**TAULUKKO 6. Painoprosessissa tarvittavien laitteiden ja tarvikkeiden luettelo**

kuvaus	osanumero	valmistaja	tehtävä prosessissa
painolaite	E2	Ekra	silkipainolaite
grindometer	VF2111	TQC	painomusteen laatu
kiertoilmauuni	-	Termaks	painojäljen kuivatus
lämpö/kosteusmittari	971	Fluke	paboratorio-olosuhteide
kireysmittari	7-50	TETKomat	painoseulan kunto
paperileikkuri	BS 5498	DAHLE	painoalustojen leikkaus
painolasta 60° 250mm	2242200046	Ekra	paakeli eli painolasta. malli: trailing edge.
levityslasta 180mm	2242100037	Ekra	Levityslasta
painoseulat	EX79-048/ 200 PW	PVF-Vertriebs GmbH	painovalmis painoseula 20µm ja 8µm
palettiveitsi	2020	Daler-Rowney	painomusteen levitys
PCB kehikko 110°C	22-152-2120	QuickFill	painoarkkien kuivatus
hengityssuojain	Autoflow	Scott	puhallinsuojain+suodatti met

Ennen varsinaisia materiaalivalintoja painoprosessiin tehtiin vasta- ja työelektrodikerokselle eli grafiittikerokselle painoprosessin parametrien optimointiin testipainoja jo valitulla painomusteella Valox FR1 painoalustalle. Testipainojen tuloksesta on kerrottu luvussa 5.4.1. Testipainoihin perustuen valittiin prosessiparametrit sekä materiaalit varsinaiseen painoprosessiin. Taulukossa 7 on listattu tärkeimmät painoprosessissa käytetyt materiaalit.

#### *TAULUKKO 7. Painoprosessissa käytetyt materiaalit*

<b>kuvaus</b>	<b>osanumero</b>	<b>valmistaja</b>	<b>tehtävä prosessissa</b>
Ag/AgCl	C2130809D5	Gwent	painomuste referenssielektrodi
grafiitti	C2030519P4	Gwent	painomuste vasta- ja työelektrodi
eriste	D2070423P5	Gwent	painomuste, eriste
painolastan kumi	SR1 75shA	Serilor	vihreä kumi, kovuus 75 shore A
painolastan kumi	SR1 65shA	Serilor	punainen kumi, kovuus 65 shore A
puhdistusliuotin	ZT639	Sericol	painoseulan ja tarvikkeiden puhdistus
painoalusta	Valox FR1 250µm	Sabic	PBT valkoinen painoalusta
puhdistusliina	TX609	TexWipe	painoseulan ja tarvikkeiden puhdistus

#### **5.5 Painoparametrien optimointi painoprosessiin**

Painoparametrit kriittisimmälle kerrokselle eli grafiittikerokselle pyrittiin optimimaan tekemällä testipaino hankitulla painoseulalla valitulle Valox FR1 painoalustalle Gwent C2030519P4 painomusteella. Tavoitteena oli optimoida prosesiparametrit mahdollisimman hyvälaatuiselle painopinnalle. Testipainoja tehtiin kokonaisuudessaan 18 painoarkille.

Muuttujia prosessissa on paljon, joten lähtökohtaisesti päätettiin, että pidetään nopeus vakiona, sellaisena että painomuste varmasti ennättää siirtyä painoseulan läpi painoalustalle. Painoseulan etäisyys painoalustasta säädettiin mahdollisimman lähelle painoalustaa, tehtiin testipaino ja todettiin sopiva etäisyys testipainojäljen perusteella. Taulukossa 8 on esitetty testipainossa käytetyt tärkeimät parametrit. Testipainoissa ainoastaan painetta ja painolastan kovuutta muutettiin.

**TAULUKKO 8. Grafiittikerroksen painoparametrien optimoinnissa käytetyt tärkeimmät prosessiparametrit ja materiaalit**

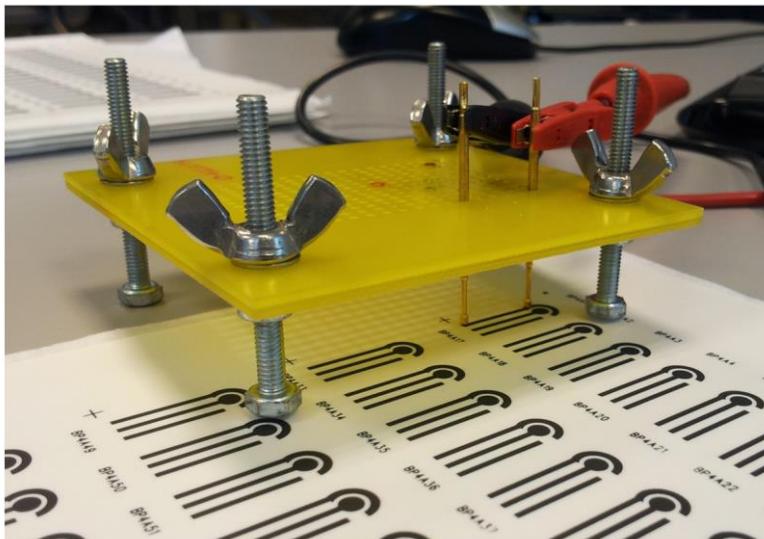
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W			
1	<b>ÖAMK</b>	ÖULUN AMMATTIKORKEAKOULU																							
2																									
3																									
4																									
5	<b>Manufacturing table</b>																								
6	template rev2/totomaa																								
7	10.8.2016/TT																								
8	<b>Codes and used inks</b>																								
9	Date/opera	Sheet item number	Screen code	Ink partnumber	Ink Öamk PN	Substrate	Layer / name	<b>Printing parameters</b>									<b>Sinterin Environment</b>			<b>Notes</b>					
10	18.8.2016	BVP28	C2030519P4	0028	Valox FR1	Carbon	Print speed forward (mm/s)	50	110	120	Print speed backward (mm/s)	385	3	Print mode	Print pressure (bar)	PCB thickness (mm)	Snap off (mm)	Separation way (mm)	Separation speed(mm/s)	Squeegee	Temperature (°C)	Time (min)	Room temp °C	humidity (%RH)	Comments
11																									
12																									
13																									
14																									
15																									
16																									
		<b>Manufacturing table</b>																							

### 5.5.1 Testipainettujen elektrodien resistanssi eli sähköjohtokyvyn mittaukset

Sensorin elektrodit ovat sähköä johtavia, siksi nopea ja helppo menetelmä tarkistaa painojäljen laatuja on mitata elektrodien sähköjohtavuus. Jos painomusteen määrä elektrodilla vaihtelee, näkyy se sähköjohtavuuden eli resistanssin muutoksesta elektrodilla. Johtavuuden mittaumisessa on tärkeää, että mittalaitteen

mittapään kosketuspinta-ala, kontaktiresistanssi sekä paine ovat mahdollisimman vakiot. Tästä syystä kehitettiin yhdessä erikoistutkija Harri Määän kanssa kuvion 30 mukainen työkalu elektrodien resistanssien mittaamiseen.

Grafiittimusteen resistanssi on suuri verrattuna referenssielektrodin resistanssiin. Referenssielektrodin sähköjohtokyky on suuruusluokkaa 2—3 ohmia kun taas grafiitilla se on 1—3 kilo-ohmia. Huonosta sähköjohtokyvystä johtuen grafiitti- elektrodin eli työ- ja vastaelektrodin sähköjohtokyky reagoi herkästi painolaadun vaihteluun. Tästä syystä testipainoille on järkevää tehdä myös resistanssimittaukset.



KUVIO 30. Painettujen elektrodien resistanssin mittaustyökalu.

Kaikille painoprosessin muuttujille tehtiin kolme painoa. Jokaisen muuttujan kolmannelle painoarkille tehtiin resistanssimittaukset eli sähkön johtavuusmittaukset. Mittaus tehtiin ainoastaan jokaisen elektrodin vastaelektrodille. Mittalaitteena käytettiin Fluke 175 yleismittaria ja kuvion 30 työkalua.

Taulukon 9 mittaustuloksista nähdään, että paineen kasvaessa elektrodien keskimääräinen resistanssi hieman kasvaa, mikä johtunee siitä, että prosessissa pait-

nomustetta on siirtynyt vähemmän painoalustalle. Paineen muutos näyttää vai-kuttavan myös arkkikohtaiseen keskihajontaan. Arkkikohtaisten elektrodien re-sistanssien keskihajonta näyttäisi kasvavan painolastan paineen kasvaessa. Pehmeämällä eli 65 shore A painolastan kumilla näyttäisi olevan parempi ko-koarkin elektrodien sekä arkin rivien keskiarvojen keskihajonta, tosin ero on hyvin pieni.

Mittauksista voisi lyhyesti päätellä, että 75 shore A painolastalla ja 0,3 bar paineella painomustetta siirtyy parhaiten painoalustalle. 65 shore A painolastalla ar-kin sensoreiden keskihajonta sekä rivien välinen keskihajonta on hieman pa-rempia. Painolastan kovuuden vaikutus painojälkeen on pieni, mikä voi johtua mit-tausvirheestäkin. Seuraavaksi mitattiin pintaprofiilit ja tarkasteltiin miten muuttujat prosessissa vaikuttivat pinnan karheuteen.

#### **TAULUKKO 9. Sähköjohtokyvyn mittaustulokset kaikille prosessimuuttujille.**

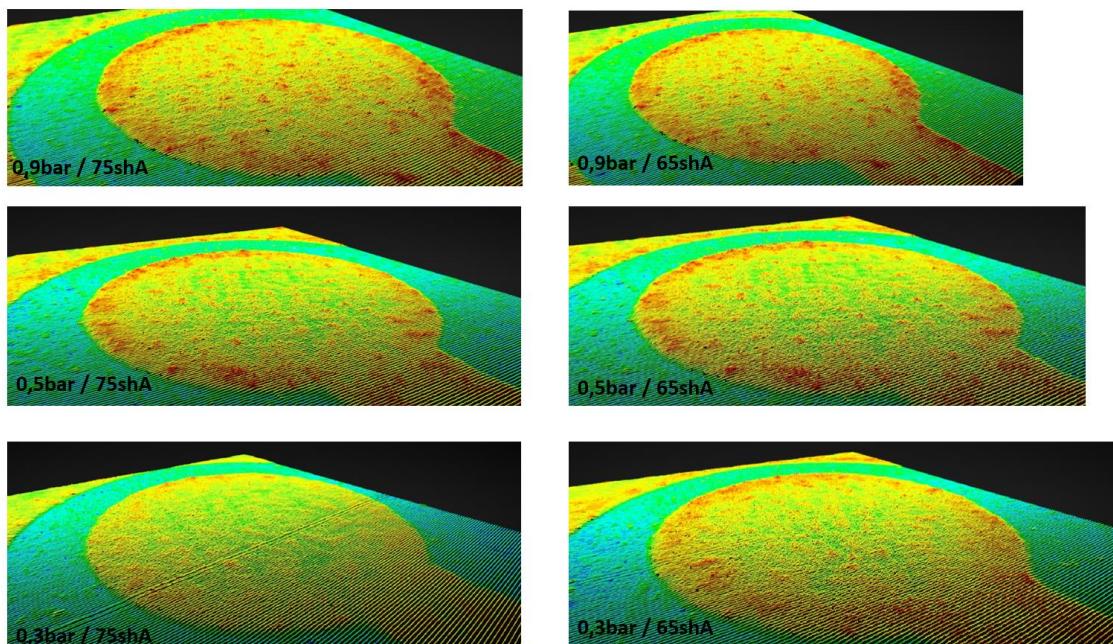
Taulukossa AVG=keskiarvo, STDEVA=keskihajonta.

<b>ARKKI</b>	<b>AVG KAIKKI (KΩ)</b>	<b>STDEVA KAIKKI (KΩ)</b>	<b>STDEVA RIVIT AVG (KΩ)</b>
<b>0,3bar 75sh</b>	<b>1,75</b>	<b>0,28</b>	<b>0,19</b>
<b>0,5bar 75sh</b>	<b>2,18</b>	<b>0,39</b>	<b>0,24</b>
<b>0,9bar 75sh</b>	<b>2,59</b>	<b>0,48</b>	<b>0,23</b>
<b>0,3bar 65sh</b>	<b>1,97</b>	<b>0,15</b>	<b>0,09</b>
<b>0,5bar 65sh</b>	<b>2,24</b>	<b>0,19</b>	<b>0,1</b>
<b>0,9bar 65sh</b>	<b>2,57</b>	<b>0,21</b>	<b>0,17</b>

#### **5.5.2 Optiset mittaukset testipainoille**

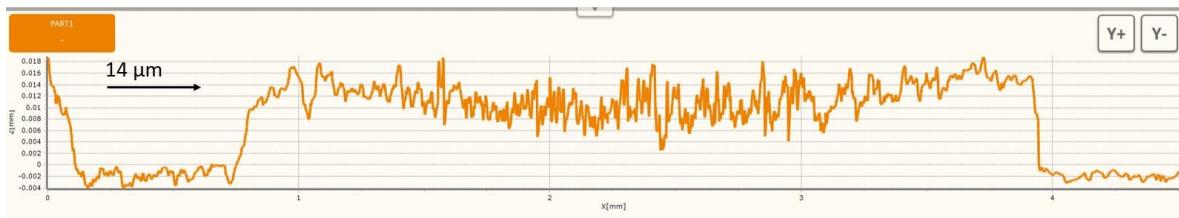
Kuviosta 31 nähdään paineen muutoksen vaikutus painojälkeen. Korkeusero pai-nopinnalla näkyy värin muutoksena kuvassa. Painotestissä muutettiin ainoastaan painolastan painetta ja kovuutta. Tavoitteena oli optimoida painolastan paine so-pivaksi valitulle painonopeudelle. Painolastan nopeus ja painoseulan etäisyys alustasta optimoitiin sopivaksi testipainoin.

Jokaisen muutoksen jälkeen tehtiin kolme testipainoa ja kolmannen arkin sensorista painojälki analysoitiin FocalSpec LCI 400 pintaprofiilimittalaitteella. Pehmeämmän eli 65 shore A ja kovemman 75 shore A painolastan kumin merkitys oli aika pieni. Selkeä ero on paineella: mitä korkeampi paine sitä epätasaisemalta painojälki näyttää. Myös kerospaksuudessa oli pieniä eroja. Valitettavasti pinnankarheudesta ei saada numeerisia arvoja vielä tällä hetkellä, on tulkittava silmämääräisesti muutosten vaikutusta painojälkeen.



*KUVIO 31. Painoparametrien optimointiin tehtyjen testipainojen 3D-pintaprofiilit. Korkeusero painopinnassa näkyy värin muutoksena kuvassa*

Optisten mittausten perusteella prosessiparametreilla paine 0,3 bar ja vihreä 75 shore A painolastan kumi toisi tavoiteltavan arvoisen painojäljen. Muut prosessiparametrit on lueteltu tarkemmin taulukossa 8. Kuviossa 32 on esitetty 0,3 bar ja 75 shore A kuvan pintaprofiilin kuvaaja. Painojäljen kerospaksuus näyttäisi olevan keskimäärin tavoiteltu 14—15  $\mu\text{m}$ , reunilla painojälki on jopa 18—19  $\mu\text{m}$  paksu.

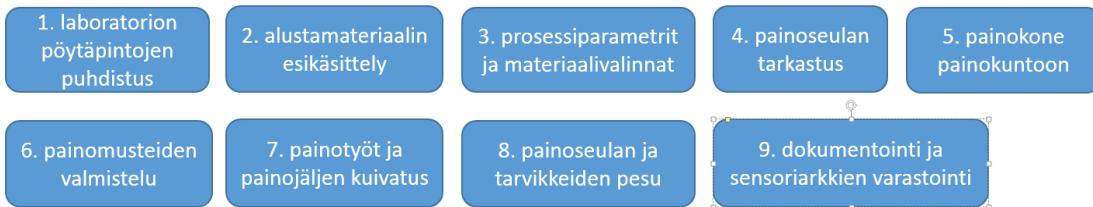


**KUVIO 32.** *FocalSpec LCI 400 mittalaitteella mitattu pintaprofiiliin kuvaaja 0,3 bar/75 shore A painojäljestä. Y-akselilla painopinnan paksuus 0-18  $\mu\text{m}$ . X-akselilla on skannauksen pituus 0—4,5 mm.*

Testipainoissa ei vielä ollut referenssielektrodi eikä eristekerros mukana, joten varsinaiset sensorin valmistuspainot on tehty kerros kerrokselta myöhemmissä luvuissa. Varsinaiset prosessiparametrit jokaiselle kerrokselle löytyvät luvusta 5.8.1, taulukosta 10.

## 5.6 Varsinaisten sensoripainojen valmistelut

Painoprosessin valmisteluun liittyvät tärkeimmät työvaiheet pöytäpintojen puhdistuksesta valmiiden sensorialustojen dokumentointiin ja varastointiin on esitetty kuviossa 33. Painoprosessi kokonaisuudessaan kehittyi yhdeksän vaiheiseksi. Jokainen työvaihe sisältää paljon asioita, jotka on tässä luvussa pyritty aukaisemaan ja selkeyttämään.



**KUVIO 33.** *Painoprosessiin liittyviä työvaiheita*

Valmiiden sensoriarkkien tuotetiedonhallinta ja jäljitettävyys on esitetty luvussa 5.8. Tavoitteena oli, että kaikki sensoriarkin valmistukseen liittyvät parametrit ja materiaalit pystytään jäljittämään jälkeenpäin tarvittaessa. Valmiit sensoriarkit arkitoidaan kosteussuojattuun vakuumipussiin, jossa ne säilyvät hyvin suoressa vuodenaikojen aiheuttamilta olosuhdemuutoksilta.

### **5.6.1 Alustamateriaalin esikäsittely**

Painoprosessin ensimmäisen vaiheen eli laboratoriolojen siistimisen ja pöytäpintojen puhdistamisen jälkeen on painoalustan esikäsittely.

Valmistajan datalehden mukaan Valox FR1 kalvon kutistuminen 150 °C lämpötilassa on 0,40 %. Painoalustalle tehtiin lämpötestaus painomusteiden kuivatustlämpötilassa 80 °C, tavoitteena oli selvittää tapahtuuko kutistumista vielä painomusteiden kuivatustlämpötilassa. Painoalustaan tehtiin merkki jokaiselle siivulle 150 mm välein tarkasti työntömitalla mitaten. Materiaalia pidettiin uunissa 30 minuutin ajan, minkä jälkeen mitattiin oliko merkkien välimatka pienentynyt. Kutistumista ei havaittu, joten uunitusta kaikille arkeille ennen varsinaisia painoja ei nähty tarpeelliseksi tehdä.

Alustamateriaali täytyi leikata pienemmiksi arkeiksi, jotta ne mahtuisivat kuviossa 34 esitettyyn kehikkoon. Kehikko käytettiin, koska laboratoriossa on pöytätilaa rajallisesti. Kehikossa kaikki painoalustat saattiin kätevästi yhtä aikaa uuniin. Sopiva arkkikoko on 210x220 mm.



KUVIO 34. Painoprosessissa tarvittavat painoarkit saatiin kätevästi pieneen tilaan käyttämällä kuvan mukaista piirilevykehikkoa

Painoarkit puhdistettiin kostuttamalla puhdastilaliina isopropanolilla ja pyyhki-mällä hellästi arkin pinta, jottei painoalustan pintaan jäisi sormenjälkiä, pölyä tai muita tahroja, jotka voivat vaikuttaa painojäljen laatuun.

### 5.6.2 Painomusteiden esikäsittely ja laatu

Liuotin- sekä vesipohjaisten painomusteiden kiintoaineet pyrkivät varastoinnin aikana painumaan pohjalle ja liuotin jää pintaan. On erittäin tärkeää sekoittaa painomustepurkin sisältö huolella käyttäen lasitikkua tai sähköistä sekoitinta. Tässä työssä sekoittamiseen käytettiin lasisauvaa. Kuviossa 35 on havainnollistettu miltä painomuste näyttää kun se on vielä purkissa.



*KUVIO 35. Painomusteiden varastoinnin jälkeinen sekoitus sekä laadun tarkastus ennen varsinaisia painoja. Vasemmalta oikealle hopea/hopeakloridi muste, grafiittimuste ja eristemuste.*

Painomustepurkin reunaan yleensä kovettuu ja kuivuu painomustejäämiä. Purkia avatessa voi painomusteen sekä varista kuivuneita mustepartikkeleita purkin reunalta, jotka aiheuttavat ongelmia painoprosessissa. Myös painomusteen sisällä olevat pienet muutaman mikrometrin kokoiset partikkelit kasaantuvat ja paakuuntuvat kun painomoste vanhenee tai seisoo pitkään. PrinLab laboratorioon hankittiin Grindometri, jolla painomusteen laatua ja partikkelikokoa voi tarkastella. Kuviossa 36 on esitetty grafiittimusteeelle Grindometrilla tehty testi. Grindometrin mitta-asteikon alkuun asetettiin pieni määrä painomustetta ja lastalla vedenettiin painomuste mittausalueen yli. Grindometrin asteikosta voi lukea painomusteen partikkelikoon sekä tarkkailla onko painomusteesseen muodostunut paakuja.

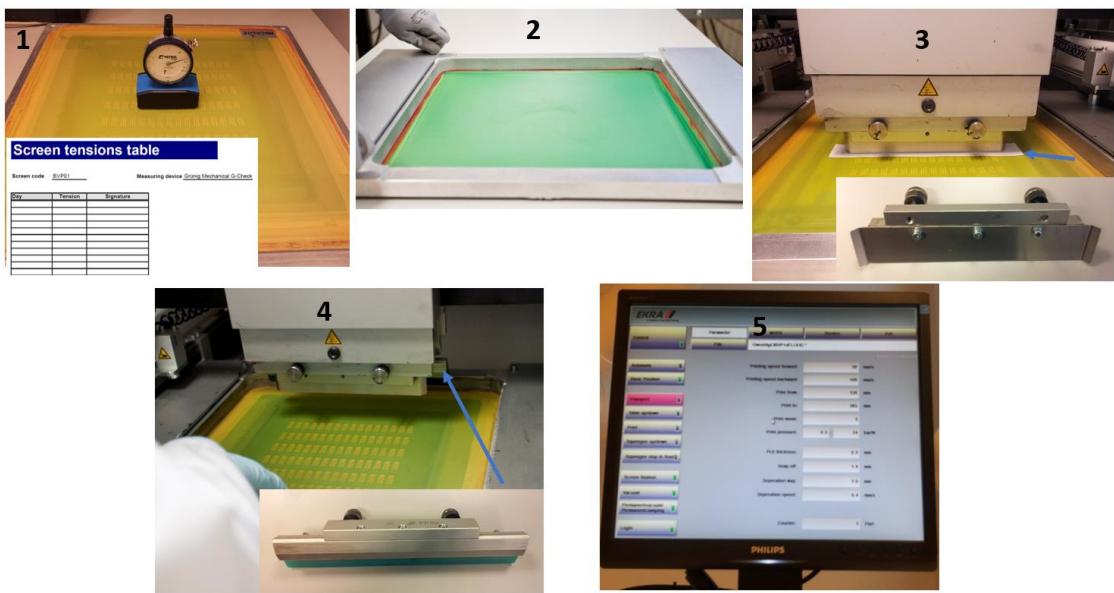


KUVIO 36. Grafiittimusteen laadun testaus Grindomerillä

Kuten kuvista 36 näkee, partikkelikoko painomusteessa on alle 10 µm, myös-kään suurempia paakuja ei painomusteen seassa näy. Todettiin, että paino-muste on vielä painokunnossa. Sama toistettiin myös hopea/hopeakloridi ja eris-temustelleille.

### 5.6.3 Painolaitteen sekä painoseulan valmistelu painoihin

Painolaitteen valmistelu ja siihen määritetyt painoparametrit ovat silkipanopro-sessin tärkein vaihe painoseulan suunnittelun rinnalla. Painoseulan avauksien kunto tarkastettiin ensin mikroskoopilla. Grafiitti kerroksen painoseulassa havaittiin pieniä tukkeumia pienempien avauksien kohdalla, kuten kohdistusmerkki. Tu-kos ei kuitenkaan estä käyttämästä painoseulaa. Kuviossa 37 on esitetty tärkeim-mät vaiheet painolaitteen painokuntaan asettamisessa.



*KUVIO 37. Painoseulan kunnon tarkastus sekä painolaitteen asettaminen painokuntaan 1=painoseulan kireyden tarkastus 2=painoseulan kiinnitys adaptereihin 3=levityslastan asettaminen 4=painolastan asennus sekä painoseulan etäisyys optimi korkeuteen alustasta 5=painoparametrit painolaitteen käyttöliittämässä*

Painoseulan kireys tarkistettiin ja lukema verrattiin painoseulan vastaanottotarkastuksessa mitattuun lukemaan. Painoseuloille kehitettiin taulukko mihin painoseulan kireys merkataan ennen painoja. Taulukon avulla seurattiin painoseulan kuntoa.

Painoseula kiinnitettiin adaptereihin, jotka pitivät painoseulaa painolaitteen kiinnitysmekanismissa painoprosessin aikana paikoillaan. Painoprosessin optimoinnin edetessä opittiin, että levityslaista on välttämätön Gwent Electronics Materials painomusteita käytettäessä. Levityslastan optimikorkeuden asettamisessa käytettiin rakotulkkina 250 µm paksuista muovikalvon palasta. Havaittiin, että korkeus on optimaalinen ja riittävä kaikille kolmelle painomustelle.

Levityslastan optimoinnin jälkeen tarkistettiin painolastan kumin terävyys sekä kunto ja asennettiin se paikoilleen. Tämän jälkeen vakuumipöydälle asennettiin varsinainen painoalusta ja vakuumipöytä ajettiin painoseulan alle, säädettiin painoseulan ja painoalustan välinen etäisyys painotestissä optimoituun etäisyyteen.

Tämän jälkeen asetettiin muut painoparametrit käyttöliittymään. Painoparametrit on esitetty luvussa 5.8.1 taulukossa 10. Samat yllämainitut valmistelut toistettiin kaikkia kolmea kerrosta painettaessa.

#### **5.6.4 Painoseulan ja tarvikkeiden pesu**

Havaittiin, että tunnin kestävää painotapahtumaa seurasi puoli tuntia tarvikkeiden ja painoseulan pesua. On erittäin tärkeää, että painoseulan pesu alkaa välittömästi viimeisen painoarkin jälkeen, jottei painomuste kuivu ja tuki painoseulan avauksia. Kaikille työssä käytetylle painomustelle soveltuu hyvin Sericol seriwash ZT639 liuotinpесuaine.

Pesuprosessissa suurimmat epäpuhtaudet poistettiin asetonilla, minkä jälkeen viimeisteltiin ZT639 liuotinpесuaineella. Työssä käytetyt painolastan kumit ovat niin edullisia, ettei niitä kannata pestä, jos niille ei heti ole tiedossa uusiokäyttöä. Pesuprosessin jälkeen painoseulan avauksien puhtaus tarkistettiin USB-mikroskoopilla ja painoseula varastoitiin uusia painoja odottamaan.

#### **5.7 Elektrokemiallisen sensoripohjan valmistus**

Kerrosrakenteisen elektrokemiallisen sensorialustan valmistamisessa on oleellisen tärkeää kohdistustarkkuus, painomusteen hallinta painoseulalla sekä painoseulan ja painolaitteen parametrit. Painomusteen hallinnassa on oleellisen tärkeää, ettei se pääse kuivumaan painoseulan verkkomaiseen rakenteeseen esittäen painomusteen vapaan virtauksen seulakankaan läpi painoalustalle.

Gwent Electronics Matrials painomusteet tukkivat herkästi seulakankaan avaukset, joten tähän oli keksittävä ratkaisu, miten kuivumista hidastetaan ja sitä myötä saantoa parannetaan. Painomusteesseen lisättävä liuosmaiset hidastimet eivät toimineet, joten ratkaisua lähdettiin hakemaan laitteen sisälämpötilasta. Painolaitteen sisällä oleva vakuumipumppu nosti painolaitteen sisälämpötilaa, joten se siirrettiin laitteen ulkopuolelle. Lopullinen ratkaisu painomusteen hallinnalle

painoprosessin aikana löytyi levityslastasta, joka levittää painomusteen painoseulan avausten päälle pitäen seulakankaan avaukset kosteana ja hidastaen seulakankaan tukkeutumista.

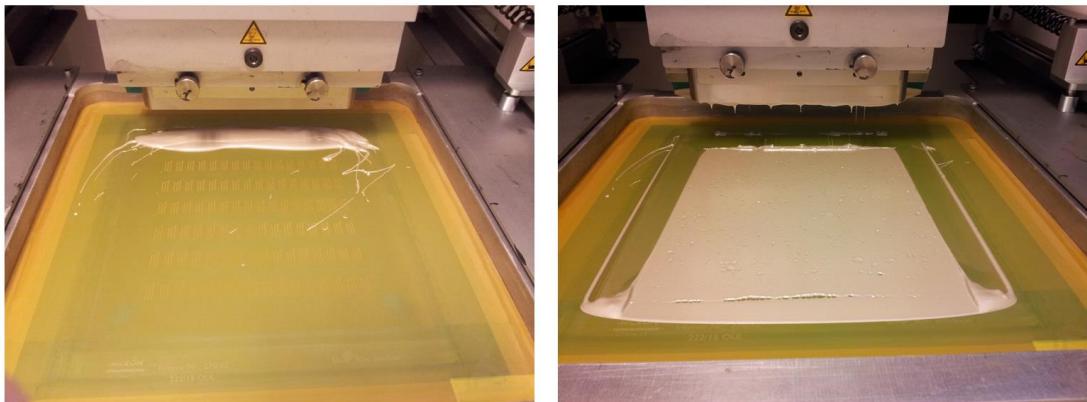
Teoriatietojen pohjalta kohdistustarkkuutta pyrittiin parantamaan pitämällä painolastan paine mahdollisimman pienenä, jottei paineen tuoma venytys aiheuttaisi vääristymää kuvioihin. Pienellä paineella saatiin myös tasaisin painojälki.

Seulakankaalle valotetun kuvion kokonaisleveys on noin 180 mm ja tätä lähin painolastan leveys PrinLab laboratorior valikoimissa on 250 mm. Teoriatietojen mukaan käytetty painolastan leveys voi olla liian leveä suhteessa painoseulan kokoon voiden aiheuttaa pientä vääristymää kuvion muodostumiseen painoalus-talle heikentäen kohdistustarkkuutta.

Luvussa 4.1 kuviossa 7 on kuvattu painolaite Ekra E2 painokunnossa. Seuraavissa luvuissa on kuvattu painoprosessin etenemistä kerros kerrokselta.

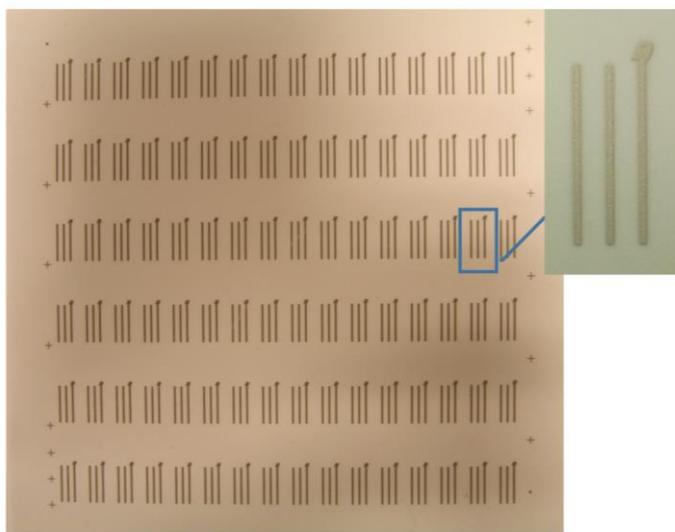
### **5.7.1 Vertailuelektrodin painaminen**

Referenssielektrodi eli vertailuelektrodin painamisessa käytetty hopea/hopeakloridi painomuste Gwent Electronics Materials C2130809D5 oli kehitetty silkipainoprosessiin, joten painoparametrit löytyivät kohtalaisen helposti. Painolaite asetettiin käyttökuntoon ja painomuste annosteltiin seulakankaan päälle. Kuviossa 38 vasemman puoleinen kuva esittää tilannetta, jossa painomuste on levitetty painoseulalle. Oikeanpuoleinen kuva kuvaa miltä painoseula näyttää painotapahtuman jälkeen kun levityslasta on levittänyt painomusteen avausten päälle. Kaikki tärkeimmät prosessiparametrit referenssikerroksen painoprosessista on esitetty luvun 5.8.1 taulukossa 10.



*KUVIO 38. Referenssielektrodin eli hopea/hopeakloridi painomusteen painaminen*

Ensimmäisen kerroksen painot onnistuivat hyvin ilman isompia optimointeja. Ensimmäisten painokokeiden jälkeen painetta hieman nostettiin ja kaikki loput arkit painettiin samoilla painoparametreilla. Viimeisen arkin jälkeen tarvikkeet ja painoseula pestiin sekä arkit kuivatettiin painomusteen vaativassa lämpötilassa. Viimeiseksi arkit yksilöitiin omille nimikekoodeille P001—P007. Kuviossa on 39 esitettty referenssielektrodi painettuna Valox FR1 alustalle.

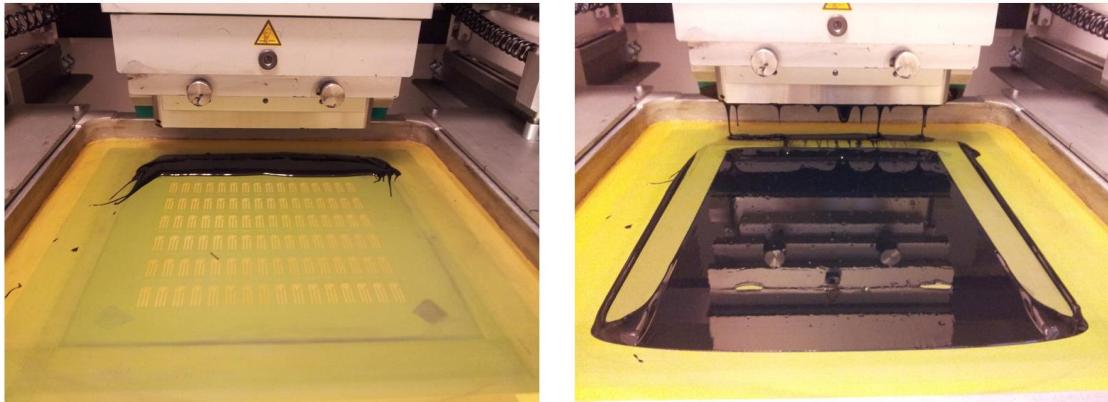


*KUVIO 39. Painettu referenssielektrodi Valox FR1 alustalla*

### 5.7.2 Työ- ja vastaelektrodin painaminen

Työ- ja vastaelektrodi painettiin kohdistamalla se tarkasti referenssielektrodiin päälle, käyttäen hyväksi kohdistukseen tarkoitettuja kohdistusmerkkejä. Painomusteenä yllämainitulle kerrokselle käytettiin Gwent Electronics Materials C2030519P4 grafiitti painomustetta, joka oli kehitetty silkkipanoprosessiin soveltuaksi. Testipainojen jälkeen painoparametrit olivatkin hyvin tiedossa.

Kuviossa 40 vasemmanpuoleinen kuva esittää tilannetta, jossa painomuste on levitetty painoseulalle. Oikeanpuoleisessa kuvassa on painoseula painotapahuman jälkeen kun levityslasta on levittänyt painomusteen avausten päälle. Kaikki tärkeimmät parametrit on esitetty luvun 5.8.1 taulukossa 10.



*KUVIO 40. Työ- ja vastaelektrodin painaminen*

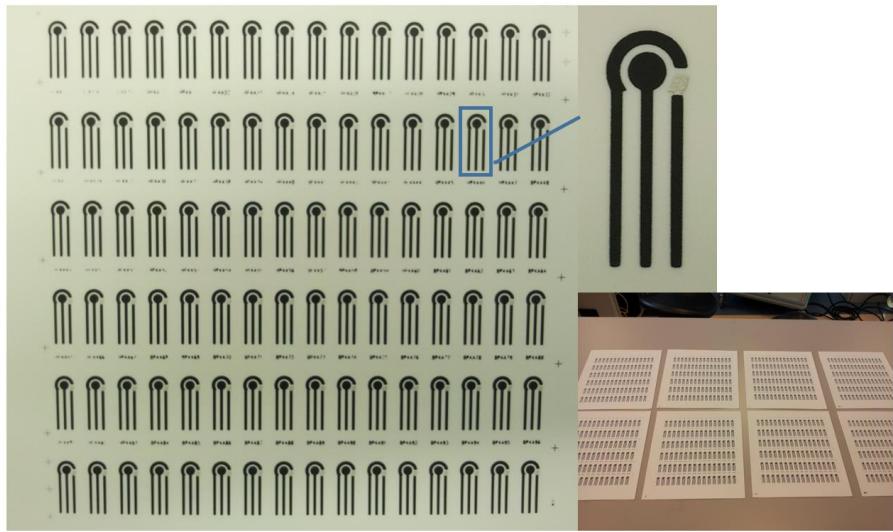
Ensimmäinen arkki on niin sanottu kohdistuspaino, joka painettiin tyhjälle Valox FR1 arkille. Kohdistusmerkkien paikat opetettiin Ekra E2 painolaitteen kohdistuskameroille. Kohdistusarkki poistettiin vakuumipöydältä ja tilalle asetettiin ensimmäinen varsinainen sensoriarkki, johon referenssielektrodi oli jo painettu. Referenssielektrodiarkki asetettiin kohdistuskameroiden avulla oikeaan kohtaan painolaitteen vakuumipöydälle. Kuviossa 41 on esitetty Ekra E2 painolaitteen käytöliittymän manuaalisen optisen kohdistuksen kuva. Vasemmanpuoleisessa ku-

vassa kohdistus on vielä hieman pielessä. Pienen hienosäädön jälkeen painoarkki saatiin oikeaan kohtaan vakuumipöydälle. Kuvion 41 oikeanpuoleisen kuvan vihreät pisteet osoittavat arkin olevan täsmälleen oikeassa kohdassa ja paino voitiin käynnistää. Tämä toistettiin kaikille arkeille.



KUVIO 41. *Ekra E2 käyttöliittymän manuaalisen optisen kohdistuksen periaate*

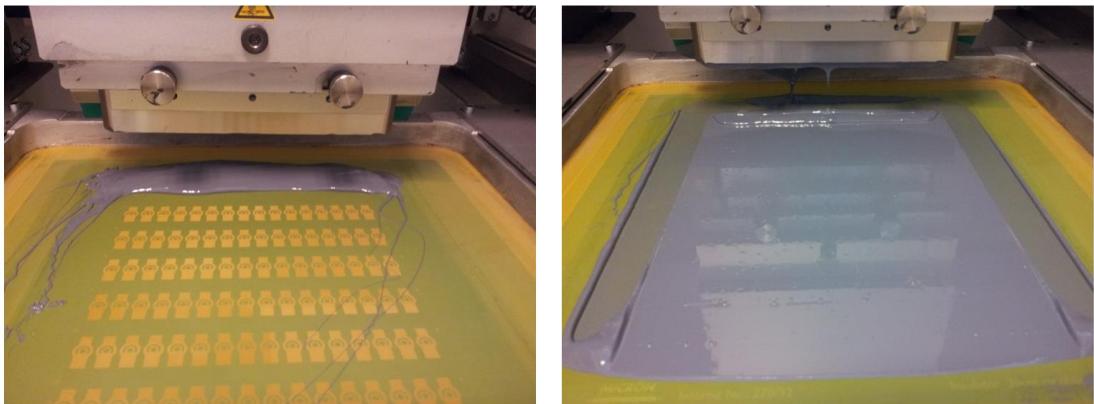
Kuviossa 42 on esitetty työ- ja vastaelektrodi painettuna referenssielektrodiin päälle. Painoprosessin aikana huomattiin, että sensoriarkin yläpäässä olevat sensorikohtaiset tunnistetekstit alkoivat himmentyä. Yksi syy tähän on, että tekstin avaus oli mitoitettu hieman liian kapeaksi ja se tukkiintui herkästi. Jo painoseulan alkutarkastuksessa havaittiin, että tekstien ja kohdistusmerkkien avauksissa oli pieniä mustetahraa havaittavissa. Havainnoitiin myös, että painoseula suhteessa vakuumipöytään ja painoalustaan ei ole täysin suorassa painolaitteen sisällä. Painoalustan ja seulakankaan etäisyys eli "snap-off" tai "gap" on suurempi vasemmalla ylälaidassa kuin muualla ja tästä johtuen paine ei ollut riittävä toisessa laidassa, mistä osaksi seurasi puutteet painomusteen siirtymisessä seulakankaan läpi.



KUVIO 42. Työ- ja vastaelektrodi painettuna referenssielektrodin päälle.

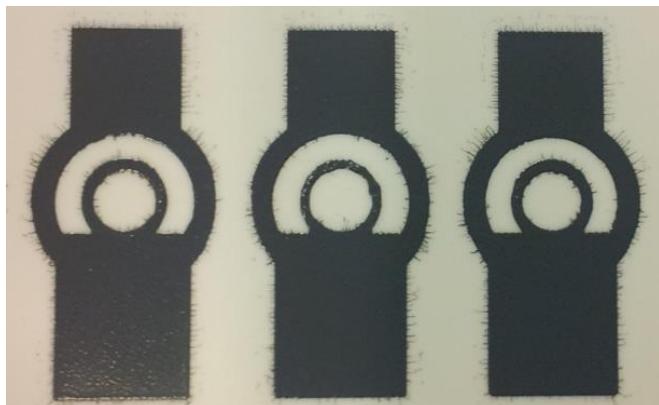
### 5.7.3 Eristekeroksen painaminen

Eristekerros painettiin samalla periaatteella kuin aikaisemmatkin kerrokset, ensin kohdistuspaino ja kohdistusmerkkien opetus kameroille, minkä jälkeen varsinaiset painot. Kuviossa 43 vasemmanpuoleisessa kuvassa on esitetty lähtötilanne eli painomuste levitetyän seulakankaalle. Oikeanpuoleinen kuva esittää tilannetta, jossa ensimmäisen painon jälkeen levityslasta on levittänyt painomusteen seulakankaan avausten päälle.



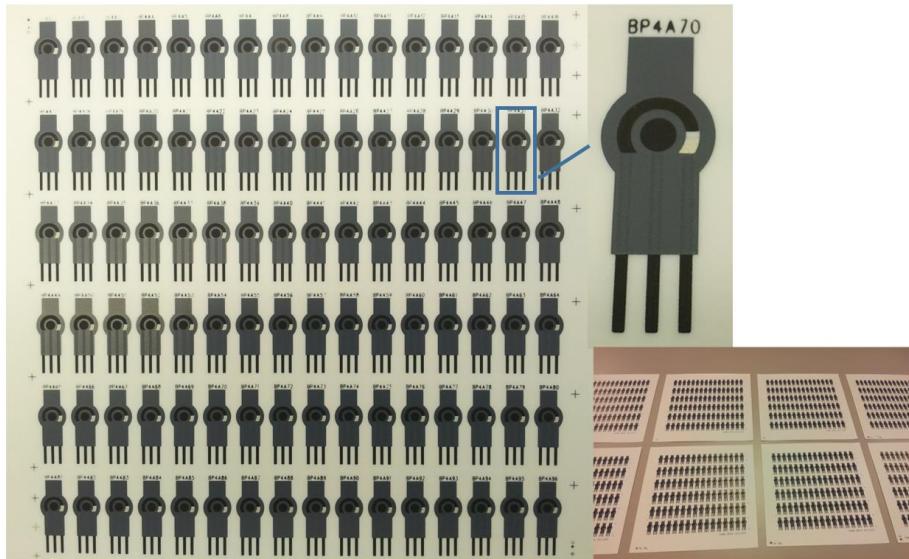
*KUVIO 43. Eristekeroksen painaminen. Vasemmalla alkutilanne, missä paino-mustetta on annosteltu sopiva määrä. Oikealla levityslasta on levittänyt paino-musteen seulakankaan avausten päälle painotapahtuman jälkeen.*

Painojen alkuvaiheessa eristekeroksen viimeisellä rivillä havaittiin pieniä kuviossa 44 esitettyjä roiskeita eristekerroksen reunoilla. Ongelman aiheutti seulakankaan liian pien etäisyys painoalustasta sekä painolastan kulkua rajoittava "print to" matka oli liian lyhyt. Käytännössä panolasta nousi hieman liian aikaisin ylös seulakankaalta aiheuttaen roiskeen. Ongelma korjaantui kun painolastan "print to" parametria kasvatettiin, mikä salli painolastan kulkea hieman pidemällä. Samalla seulakankaan etäisyyttä painoalustasta hieman kasvatettiin.



*KUVIO 44. Pieniä roiskeita eristekerroksen reunoilla.*

Kuviossa 45 on esitetty eristekerros painettuna aikaisempien kerosten päälle suojaamaan toiminnallisia elektrodeja. Elektrokemiallinen sensorialusta on nyt valmis. Yhdellä painoarkilla on 96 kappaletta elektrokemiallisia sensorialustoja. Yhteensä arkkeja valmistettiin kahdeksan kappaletta.



*KUVIO 45. Eristekerros painettuna aikaisempien kerosten päälle. Elektrokemiallinen sensorialusta on nyt valmis.*

## 5.8 Tuotetiedonhallinta, tuotannonohjaus ja jäljitettävyys

Elektrokemiallisten sensoripohjien valmistus- ja kehitystyö on pitkäjänteistä ja todennäköisesti joudutaan valmistamaan useita kymmeniä painoerää eri kuukausina tai jopa eri vuosina. Kehitystyön edetessä on erittäin tärkeää, että yksittäisen sensorin tai painoarkissa käytettyjen sensoreiden materiaalit tai painoprosessin painoparametrit pystytään jäljittämään vielä vuosienkin päästä.

Käytössä ei ole tuotetiedonhallinta- tai tuotannonohjausjärjestelmää, jossa sensoriarkkien materiaalilista voisi ylläpitää ja versionhallinta olisi sujuvaa tai valmistuksessa käytetyt materiaalit tai valmistusparametrit voisi jäljittää painoarkki-kohtaisesti. Näistä syistä on kehitettävä oma toimiva käytäntö yllämainittuihin tarpeisiin.

Yhteistyössä erikoistutkijoiden Marja Niissisen ja Harri Määtän kanssa luotiin raa-mit ja vaatimukset tuotetiedonhallinnalle. Vaatimuksiin nojaten syntyi taulukko painoverkkojen parametrien jäljitettävyyteen sekä painoprosessin parametrien jäljitettävyyteen.

Myös painomusteet saavat oman nimikekoodin kun ne vastaanotetaan Oulun ammattikorkeakoulun PrinLab varastoon. Painomusteilla on oma taulukko, josta painomusteen yksityiskohtaiset tiedot, varastopaikka sekä varastosaldo gram-moina ovat helposti löydettävissä. Nimikekoodia käytetään myös sensoreiden valmistusparametritaulukossa 10.

### **5.8.1 Painoprosessin parametrien jäljitettävyys**

Taulukkoon 10 kirjataan painoprosessissa käytetyt parametrit, materiaalit ja la-boratorio-olosuhteet painohetkellä. Jokainen painoarkki päättiin yksilöidä ja luoda arkeille juokseva numerointikäytäntö P001 eli print 001. Jokaiseen arkkiin kirjataan heti painotapahtuman jälkeen oma nimikekoodi, minkä perusteella sen valmistustiedot ja materiaalit voidaan jälkeenpäin jäljittää taulukosta 10.

**TAULUKKO 10. Taulukko painettujen sensoripohjien valmistustietojen jäljitettävyyteen**

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	
1																						
2																						
3																						
4																						
5	<b>Manufacturing table</b>																					
6	Template rev2/töitämää																					
7	30.8.2016/11																					
8	<b>Codes and used inks</b>																					
9	Date/op	Sheet item number	Screen code	Ink partnumber	Ink Oamk PN	Substrate	Layer / name	Print speed forward (mm)	Print speed bckwrd (mm)	Print from (mm)	Print to (mm)	Print mode	Print pressure (bar)	Pcb thickness (mm)	Snap off (mm)	Separation way (mm)	Separation speed(mm)	Squegee	Sintering Environment	No	Co	
10	12.8.2016	P001	BVP27	C213080905	0033	Valox FR1	Ag/AgCl	50	110	125	385	3	0,9	0,3	0,8	1	0,4	TE60/flood/SH75	85	20	22,1	44,7
11	24.8.2016	P001	BVP28	C2030519P4	0028	Valox FR1	Carbon	50	100	120	385	3	0,3	0,3	0,8	1	0,4	TE60/flood/SH75	85	20	22	40,2
12	30.8.2016	P001	BVP30	D2070423P5	0032	Valox FR1	dielectric	70	110	115	390	3	1,2	0,3	0,8	1	0,4	TE60/flood/SH75	85	30	21,9	40,1
13	12.8.2016	P002	BVP27	C213080905	0033	Valox FR1	Ag/AgCl	50	110	125	385	3	0,9	0,3	0,8	1	0,4	TE60/flood/SH75	85	20	22,1	44,7
14	24.8.2016	P002	BVP28	C2030519P4	0028	Valox FR1	Carbon	50	100	120	385	3	0,3	0,3	0,8	1	0,4	TE60/flood/SH75	85	20	22	40,2

### 5.8.2 Painoseulojen parametrien jäljitettävyys

Painoseulan parametrien jäljitettävyyden helpottamiseksi luotiin selkeä käytäntö, mikä osoittautui tuomivaksi kehitystyössä. Painoseula tilataan ja vastaanotetaan PrinLab varastoon. Vastaanottovaiheessa painoseula yksilöidään ja sille luodaan oma nimikekoodi. Nimikekoodi koostuu kolmesta kirjaimesta ja juoksevasta numeroinnista, esimerkiksi BVP001. Ensimmäisestä kahdesta kirjaimesta voi päätellä, että painoseula on hankittu PrinLab käyttöön, viimeinen kirjain kertoo onko painoseula varustettu polyesteri-, nylon- vai teräskankaalla. Taulukoon 11 tallennetaan tärkeimmät painoseulan parametrit, milloin se on vastaanotettu, mille projektille ja mistä.

**TAULUKKO 11. Painoseulan parametrit taulukko**

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	
1																		
2	<b>ÖAMK</b>																	
3																		
4																		
5	<b>Screen parameters</b>																	
6	template rev1/totuuma																	
7	15.8.2016																	
8	Otek codes			Screen parameters										general information				
9	Purchased / -r	Project		Screen code	Screen type (SS or poly)	Mesh count (tpi)	Emulsion thickness (µm)	thread diameter (µm)	Mesh opening (µm)	Open area (%)	Mesh angle (deg)	Fabric thickness (µm)	Tension	Frame size (inch)	Image name	Supplier	TIV	ready for use or not (YES or NO)
10	15.8.2016	Thesis	BVP27	EX 79-048	200	8	48	75	35	23	75	28N/cm	15x15	ref	PVF	26,5	YES	
11	15.8.2016	Thesis	BVP28	EX 79-048	200	20	48	75	35	23	75	28N/cm	15x15	car	PVF	26,5	YES	
12	15.8.2016	Thesis	BVP30	EX 79-048	200	20	48	75	35	23	75	28N/cm	15x15	ins	PVF	26,5	YES	

## **6 SENSORIALUSTOJEN PAINOLAADUN ANALYSointi JA TESTAUS**

Silkipainovalmistusmenetelmään perehtymisen ja useampien painokokeilujen perusteella painolaatuun vaikuttavia tekijöitä on paljon. Painolaadun toistettavuus olisi yksi tärkeimpiä tavoiteltavia asioita elektrokemiallisen sensorialustan valmisteussa, tästä syystä painoprosessin muuttujien vaikutus painojälkeen on tärkeää oppia tuntemaan.

Painolaadun mittauksessa saatuja tuloksia olisi tärkeää pyrkiä korreloimaan elektrokemiallisiin mittaustuloksiin. Tärkeää olisi tutkia miten painojäljen vaihtelut, pinnan epätasaisuudet tai jopa resistanssien vaihtelut eri sensoreiden välillä vaikuttavat elektrokemialliseen käyttäytymiseen.

PrinLab ympäristössä voidaan painopinnan laatua tarkkailla optisesti stereomikroskoopilla, USB-mikroskoopilla, valomikroskoopilla sekä FocalSpec pintaprofiili-laitteistolla.

Sähköjohtokyvyn määrittämiseen Oulun ammattikorkeakoulun elekoniikan laboratorioista löytyy monenlaisia mittalaitteita. Mittauksia ei kuitenkaan tehty valmiille sensoreille vaan ainoastaan pelkille grafiittikerroksen testipainoille. Havaittiin, että mikäli referenssielektrodi on työ- ja vastaelektrodin alla, aiheuttaa se hajontaa mittaustuloksiin. Myöskään tuloksista ei voi päätellä mitään grafiittikerroksen tasalaatusisuudesta arkin sisällä.

Referenssikerroksen johtavuusmittaukset osoittautuivat myös turhiksi, koska hopea/hopeakloridimusteen sähköjohtavuus on niin hyvä, ettei se vaihtelee merkitävästi pienistä painolaadun vaihteluista.

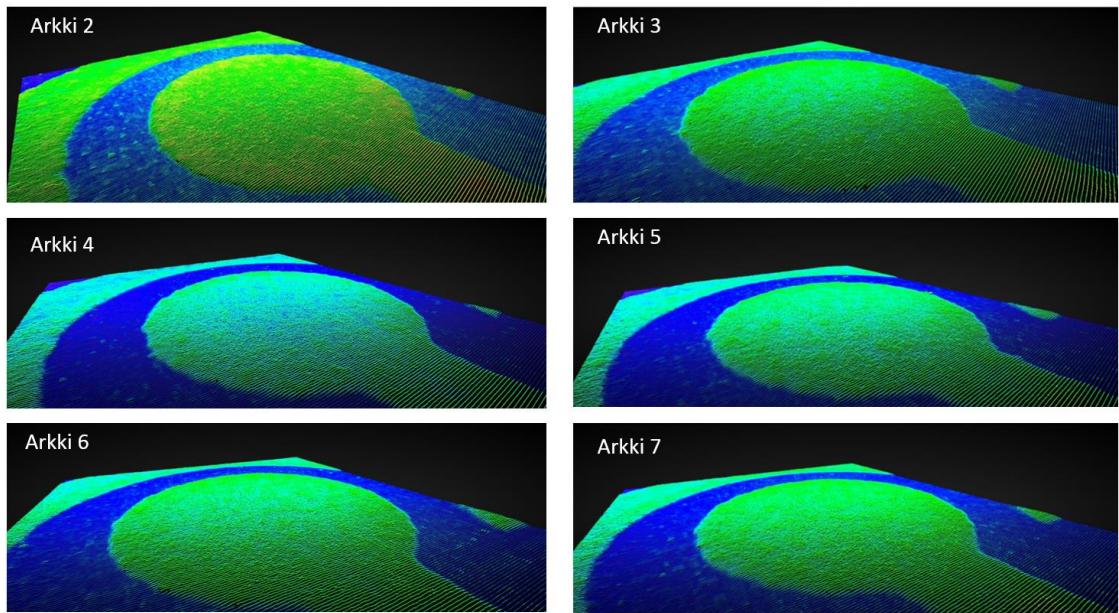
## **6.1 Pintaprofiilimittaukset painetulle sensorialustolle**

Pintaprofiilimittauksella tarkoitetaan tässä tapauksessa pinnankarheuden analysointia sekä painopinnan paksuuden mittausta. Elektrokemiallinen reaktio tapahtuu sensorin työelektrodin pinnalla, joten pinnan karheus vaikuttaa monella tavalla sensorin sähköiseen käyttäytymiseen (Nissinen, haastattelu 17.8.2016).

Tässä luvussa pintaprofiilimittauksilla pyrittiin katsomaan testipainojen perusteella hyväksi havaittuilla painoparametreilla valmistettujen sensoreiden painopinnan laadun vaihtelua eri arkeilla. Valitettavasti numeerisia arvoja painopinnan karheudelle ei FocalSpec LCI 300 mittalaite pystynyt esittämään, joten analysointi jouduttiin tekemään silmämääräisesti 3D-pintaprofiili kuvista. Koska analysointi on silmämääräinen, ei luotettavia tuloksia pinnankarheudesta voida analysoida. Tässä luvussa tarkastellaan miten painopinnan paksuus toteutui teoreettisin periaattein suunnitelluilla painoseuloilla.

### **6.1.1 Työelektrodin pinnan analysointi**

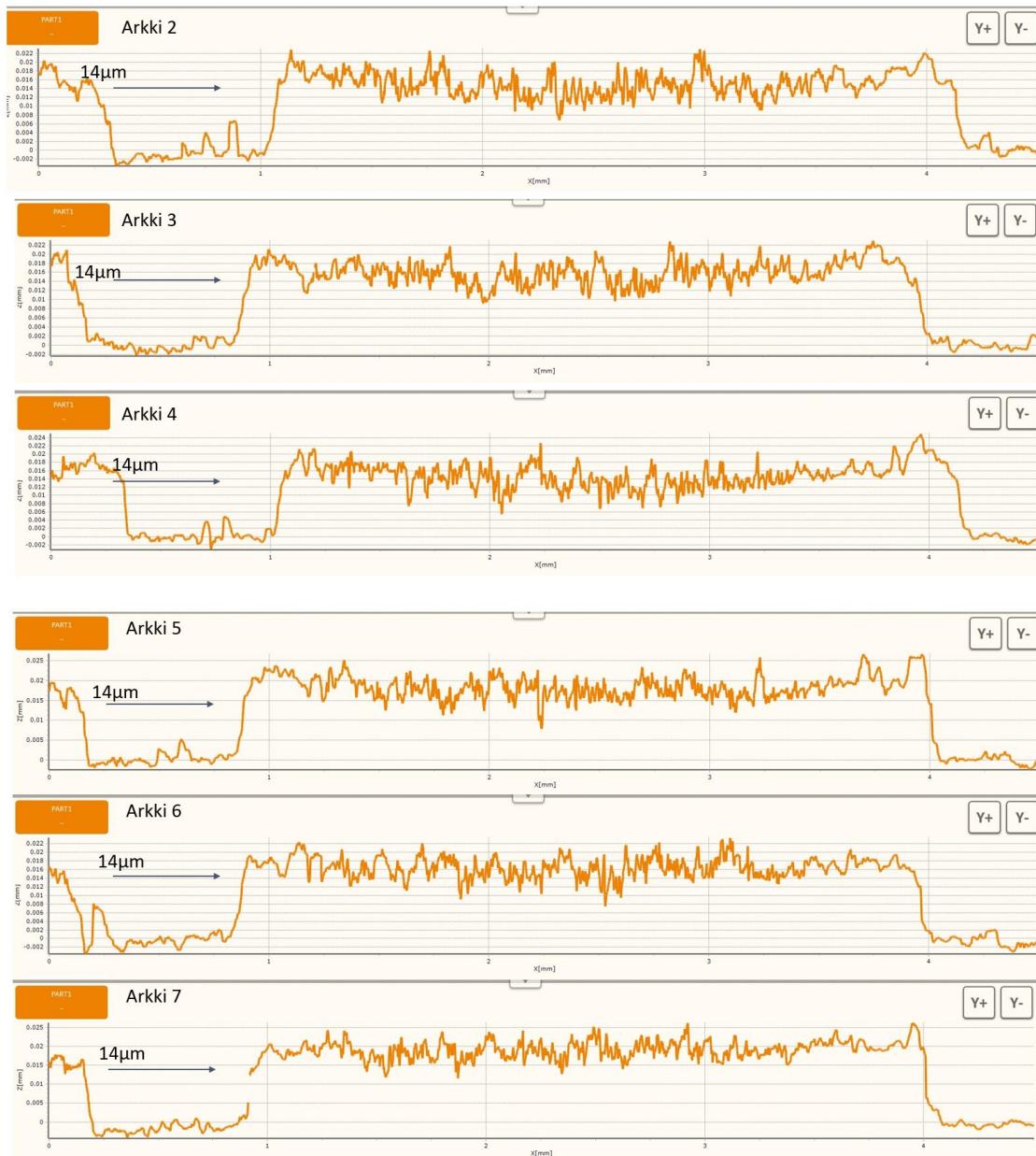
Kuviossa 46 on esitetty FocalSpec LCI-400 3D-pintaprofiilit melkein valmiiden sensorialustojen työelektrodeilta. Varsinaisissa sensoripainoissa valmistettiin kahdeksan arkkia. Tietoisesti ensimmäinen arkki jäettiin skannaamatta, koska yleensä se ei ole vertailukelpoinen muiden kanssa. Jokaiselta arkilta skannattiin arkin puolivälissä oleva BP4A39 sensori.



*KUVIO 46. 3D-pintaprofiilit työelektrodin pinnalta. Skannaus tehtiin kuudelle arkille varsinaisista sensoripainoista*

Luvussa 5.3 kuviossa 26 on kuvattu Gwent Electronics Materials valmistaman kaupallisen sensorialustan 3D-pintaprofiili. Kaupallisen sensorin pinta verrattuna työssä valmistettuihin on huomattavasti karheampi, verkon solmukohdat ja avaukset näkyvät selkeästi painojäljessä. Kuvion 46 3D-pintaprofiileista voi päätellä valmistusprosessin onnistuneen painopinnan karheuden puolesta ihan hyvin. Korkeuserot näkyvät värin muutoksena kuvassa.

Kuviossa 46 olevien 3D-pintaprofiilien kuvista voi päätellä, että myös toinen arkki näyttäisi eroavan muista erittäin hyväällä painopinnan laadulla. Kuudes ja seitsemäs arkki osoittaisi, että painojälki alkaa stabiloitumaan. Tulevissa tutkimuksissa tulisikin tarkemmin tutkia miten painolaatu vaihtelee painoprosessin edetessä useisiin kymmeniin arkeihin. Tutkittava olisi myös miten paljon sensoreiden laatu vaihtelee arkin sisällä.



KUVIO 47. Pintaprofiilin kuvaajat kuviossa 46 esitetyn 3D-pintaprofiilin arkkien 2—7 työlektrodin BP4A39 pinnoista.

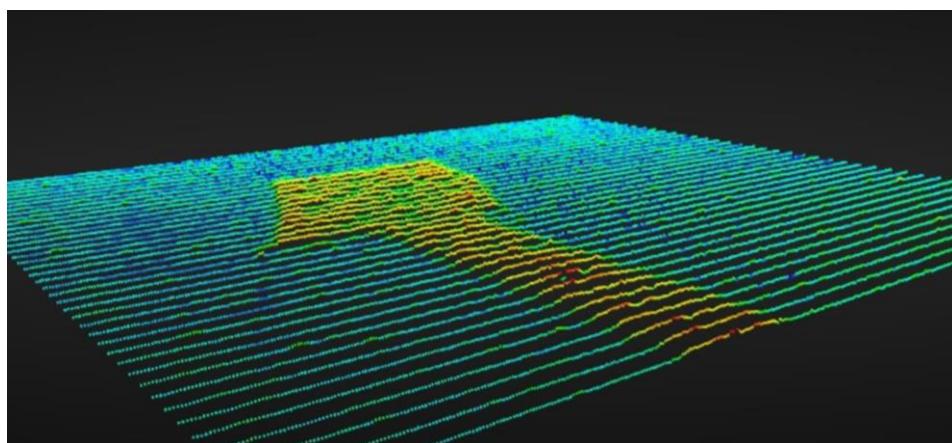
Luvussa 5.3 laskettu teoreettinen kuivapaksuus grafiittikerroksella käytettävälle painoseulalle ja painomusteelle oli 13.27  $\mu\text{m}$ . Kuvion 47 kuvaajista voi päätellä toteutunutta painopinnan paksuutta työelektrodilla. Tavoitteellinen painopinnan paksuus oli noin 14—15  $\mu\text{m}$ , jonka uskottiin toteutuvan työelektrodin keskellä, emulsion reunilla painopinnan arvioitiin olevan hieman paksumpi.

Arkeilla 2—7 näyttäisi olevan keskimäärin sama toteutunut painopinnan paksuus, noin 14 µm. Työelektrodin keskellä painopinnan paksuus selkeästi ohenee verrattuna reunoihin, varsinkin tarkemmin tarkasteltuna arkkeja 2—4. Kuvaaja tarkastellen voi päätellä, että työssä julkaistut teoreettiset säännot painoseulan mitoitukseen pitivät aika hyvin paikkansa.

Seuraavissa tutkimuksissa tulisi viedä painoprosessia pidemmälle ja tarkastella miten painopinta käyttäätyy useiden kymmenien arkkien valmistusprosessissa. Tutkimus painottuisi mittauksiin ja painopinnan analysointiin sekä pinnan laadun vaihtelun vaikutuksiin elektrokemiallisissa mittauksissa. Ensin on kuitenkin kehitettävä FocalSpec pintaprofiililaitteiston käyttöliittymää siten, että pinnan paksuudelle sekä pinnan karheudelle saadaan käyttöliittymästä numeeriset arvot.

### 6.1.2 Referenssi- ja eristekerroksen painopinta

Referenssielektrodin pintaprofiili on kuvattu kuviossa 48. Elektrodin painopinta ei ole kriittinen sensorin toiminnan kannalta, mutta painoseulan teoreettinen kuiva-paksuus sekä toteutunut painopinnan paksuus tarkastettiin. Skannaus on tehty ennen grafiittielektrodin painamista referenssielektrodin päälle.

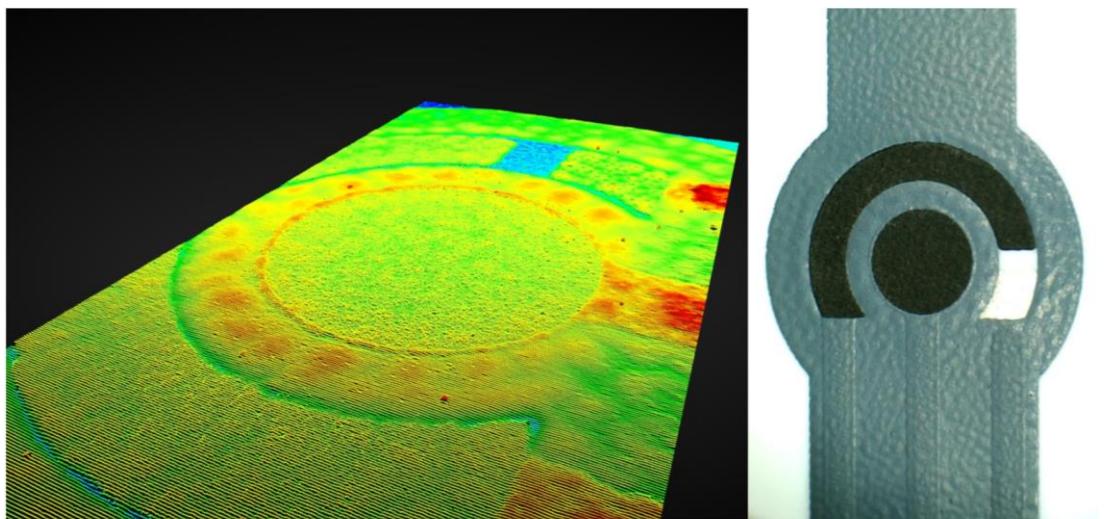


KUVIO 48. 3D-pintaprofiili referenssielektrodin pinnasta

Keskimääräinen painoissa toteutunut painopinnan paksuus kuvion 48 pintaprofiiliassa on noin 16—17  $\mu\text{m}$ , korkeimmat epätasaisuudet painopinnassa yltävät jopa 20  $\mu\text{m}$  paksuuteen. Teoreettinen painopinnan kuivapaksuus hankitulla painoseulalla oli noin 18,49  $\mu\text{m}$ , mikä on kohtaisen lähellä toteutunutta painopinnan paksuutta.

Eristekerokselle teoreettiseksi kuivapaksuudeksi saatiaan 13,58  $\mu\text{m}$ . Kuviossa 53 on esitetty 3D-pintaprofiili, missä näkyy eristekerros, referenssielektrodi sekä työja vastaelektrodi. Kuvista mitattiin kerospaksuus eristekerokselle, joka oli noin 14—15  $\mu\text{m}$ , korkeimmilta kohdilta jopa 17  $\mu\text{m}$ . Eristekeroksen painoissa toteutunut kerospaksuus oli lähellä teoreettista kerospaksuutta.

Eristekeroksella näkyy herkästi painoseulan seulakankaan solmujen ja avauksien aiheuttama epätasaisuus korostuneesti. Eristemusteen viskositeetti on todennäköisesti hieman liian korkea, mustetta tarrautuu painoseulaan sen irrotessa alustasta painolastan kulkiessa eteenpäin, tämä näkyy selkeästi kuvion 49 Veho VMS-004 USB-mikroskoopilla otetussa kuvassa. Mikäli tarve on saada aikaan paksu painokerros voi viskositeetin alentaminen pienentää kuivakerospaksuutta. Järkevää olisi kokeilla joitain muuta kaupallista eristemustetta tähän taroitukseen. Epätasaisuus näkyy myös herkemmin eristekeroksen pinnalla, koska pinnan valon taitekerroin on eri verrattuna grafiittikerroksen mustaan painopintaan.



KUVIO 49. 3D-pintaprofiili sekä Veho VMS-004 USB-mikroskoopilla otettu kuva eristekerroksesta

## 7 YHTEENVETO

Elektrokemiallisen biosensorin kaupallinen potentiaali pikatestauksen komponenttina on suuri. Käytännön esimerkkinä ja markkinaveturina elektrokemialliselle biosensorille on perinteinen verensokeriliuska, jota jopa 5 % maailman ihmisiä käyttää päivittäin. Opinnäytetyössä pyrittiin löytämään optimaaliset materiaalit sekä valmistusparametrit elektrokemiallisen biosensorin valmistukseen. Sensorialustan rakenteena käytettiin tutkimus- ja kehityskäytöön paremmin soveltuva rakennetta, millä reaktioita on helpompi analysoida, tutkia sekä kehittää.

Työn teorian tutkimuksen edetessä sensorialustan valmistusmenetelmäksi valittiin silkkipainotekniikka, joka on perinteisessä väripainossa todella pitkälle kehitetty menetelmä. Elektrokemiallisen sensorialustan valmistuksessa käytettävät materiaalit koostuvat toiminnallisista partikkeleista ja sidosaineista, jotka eroavat perinteisistä väripainomosteista paljon. Perinteisessä väripainossa päätee samat laiteparametrit, mutta painojäljeltä vaaditaan erilaisia ominaisuuksia. Toiminnallisen rakenteen aikaansaaminen vaatii optimaalista kerrospaksuutta, pinnankarheutta sekä riittävää kohdistustarkkuutta.

Opinnäytetyössä perehdynniinkin tarkasti silkkipainotekniikan prosesseihin ja suunnittelusääntöihin, mikä tuki työn tarkoitusta valmistaa silkkipainotekniikalla ensimmäinen protoerä elektrokemiallisia sensorialustoja PrinLab ympäristössä. Sensorialustan valmistus vaatii painoparametrien ja tarvikkeiden lisäksi oikeanaisia materiaaleja, jotka aikaansaavat elektrokemiallisen toiminnollisuuden sensorille. Työssä perehdynniin kaupallisiin materiaaleihin, hankittiin niitä näytteenä sekä valittiin optimaaliset materiaalit parhaan mahdollisen toiminnollisuuden aikaansaamiseksi.

Elektrokemiallisen sensorialustan kehitystyö on monialaista ja vaatii kattavan toimijaverkoston, joka osaamisellaan tukee kehitystyötä. Työssä kartoitettiinkin alan toimijat ja luotiin osaamisalueittain kategorisoitu toimijalistaus alan toimijoista.

Painoprosessin optimaalisten painoparametrien löytäminen vaati testipainoja, joiden tavoitteena oli löytää painoprosessin kriittisimpien muuttujien vaikutus painojälkeen. Painojälkeä analysoitiin sähköjohtokykymittauksin. Pintaa ja painojäljen

paksuutta analysoitiin optisella pintaprofiilimittauksella. Painojäljen analysoinnin toinen tarkoitus oli todentaa teoreettisten suunnittelusääntöjen paikkansa pitävyttä käytännön testauksin.

Työssä suunnitellut painoseulat osoittautuvat soveltuiksi painoprosessiin ja taavioiteltuihin painopinnan paksuuksiin päätäin. Valmistuksessa käytetty painolasta oli teoriatietoihin pohjautuen liian leveä suhteessa kehyksiin, koska PrinLab laboratorion tarvikkeistosta ei löytynyt pienempää painolastaa. Painolastan vaikutukset tiedostettiin ja niitä tarkkailtiin, haitta vaikutuksia ei havaittu prosessien aikana. Painoprosessin optimoinnissa suurin saavutus oli mielestäni ratkaisu miten painomusteen kuivuminen painoseulalle hallitaan. Tähän löytyikin ratkaisu käytää levityslastaa, joka leivittää painomusteen seulakankaan avausten päälle.

Työssä kehitetyt painoprosessit dokumentoitiin, samalla kehittyi toimiva menetelmä painoarkkien jäljitettävyyteen, mikä tukee tutkimus- ja kehitystyötä jatkossa. Painettu arkki yksilöidään ja sille luodaan nimikekoodi, jonka avulla luo- duista taulukoista voidaan jäljittää arkin valmistamisessa käytetyt materiaalit ja prosessiparametrit aina painomusteen valmistajan valmistuseriä myöten.

Työ onnistui hyvin tavoitteessaan löytää optimaaliset valmistusprosessit ja materiaalit elektrokemiallisen biosensorialustan valmistukseen, luoda osaamisalueiden kategorisoitu alan toimijaverkosto sekä kokeilla silkipainotekniikan teoreettisia suunnittelusääntöjä käytäntöön. Tulosten rinnalla kehittyi toimiva käytäntö valmistettujen sensorialustojen jäljitettävyyteen sekä valmistusparametrien hallintaan. Analysointityökaluna käytetyn FocalSpec LCI 400 optinen pintaprofiili-laitteiston ominaisuudet eivät olleet riittävä perinpohjaiseen analysointiin, koska numeerisia tarkkoja tuloksia ei käyttöliittymä mahdollistanut. Kuitenkin suuntaantavat kuvat sekä kuvaajat auttoivat saamaan käsitksen painopinnan laadusta ja toteutuneista painopinnan paksuuksista.

Valmistusprosessin edetessä huomattiin, että PrinLab laboratorion Ekra E2 painolaitteen vakuumipöydän etäisyys seulakankaaseen vaihtelee hieman eri kohdalta vakuumipöytää, mikä näkyy suoraan arkin sisällä olevien sensoreiden painopinnan tasalaatuisuudessa. Tämä havaittiin, koska toinen laita seulakankaalla

vaati suuremman painolastan paineen. Havainnon perusteella olisikin järkevää huoltaa laite tältä osin kuntoon.

Opinnäytetyön aihealue oli laaja ja kehitettävää paljon. Työn sisältö rajattiin elektrokemiallisten biosensorialustojen valmistuksessa hyödyllisen toimijaverkoston luomiseen sekä sensorialustojen materiaalivalintojen sekä valmistusparametrien ja materiaalien optimointiin. Yllämainituissa tavoitteissa onnistuttiin hyvin ja tärkeimmät asiat dokumentoitiin tarkasti.

Työn tuloksina syntyivät prosessit elektrokemiallisten sensoripohjien valmistamiseen, mutta painojäljen laatu ja toistettavuus vaatii vielä jatkotutkimuksia. Epäselväksi jäi, missä vaiheessa arkkien painojäljen tasalaatusisuus alkaa muuttumaan. Tiedossa on, että painomusteesta haihtuu liuottimia ja sen myötä painomusteen viskositeetti muuttuu prosessin edetessä. Tämä tarkoittaa sitä, että painomusteen seulakankaan läpäisykyky muuttuu ja todennäköisesti myös painojälki. Analysointi vaatii painopinnan tarkkailuun laitteen, millä painopinnan paksuudesta sekä karheudesta saadaan numeerinen arvo, jotta tuloksia voidaan taulukoida sekä vertailla suurilla kappalemäärellä.

Opinnäytetyössä valmistettiin vain muutama arkki sensorialustoja tarkoin mietityillä geometriolla, prosessiparametreilla sekä materiaaleilla. Yhdelle arkille valmistui 96 kappaletta elektrokemiallisia sensorialustoja. Tässä opinnäytetyössä ei sensorialustoja testattu elektrokemiallisin menetelmin, mistä tulisikin hyvä aihe toiselle opinnäytetyölle tai tutkimukselle. Muutoksia painojäljen laadussa tai sensorialustan geometriissa tulisi verrata elektrokemialaiseen käyttäytymiseen. Opinnäytetyössä valmistetuille sensoreille tehdyissä mittauksissa havaittiin, että sähköjohtavuus elektrodeilla sensoriarkin sisällä vaihteli hieman. Jatkotutkimuksena olisikin mielenkiintoista selvittää, vaikuttaako resistanssin muutos sensorin elektrokemialaiseen käyttäytymiseen. Tarkemmin tulisi tarkastella myös pinnankarheuden vaihtelua ja sen vaikutusta sensorin toimintaan.

Mikäli emulsioon valotettu avaus on yli kaksi millimetriä ja painopinnalta vaaditaan tietty paksuus, tulisi painopinnan paksuutta pyrkiä kasvattamaan paksumalla seulakankaalla sen sijaan että paksunnetaan emulsiota. Paksu emulsio ai-

heuttaa sen, että painopinnan reunoista tulee paksummat avauksen keskikohaan verrattuna. Työssä käytetyn emulsion paksuus grafiittipainomusteelel eli työ- ja vastaelektrodille tarkoitettulla painoseulalla oli 20 µm, jotta painopinnasta saatiin riittävän paksu. Mielenkiintoista olisikin kokeilla eripaksuisia painoseuloja ohuella emulsiolla Gwent Electronics Materials grafiittimusteele.

Opinnäytetyössä valmistettu elektrokemiallinen biosensorialusta on komponentti pikadiagnostiikan tutkimus- ja kehityskäyttöön. Sensorialusta palvelee biomateriaalien kehitystä eri pikadiagnostiikan sovellusalueilla. Biomateriaalien, jotka tekivät sensorialustasta biosensorin, annostelu sensorialustan työelektrodille ei ole yksiselitteinen prosessi, joka vaatii paljon optimointia. Tässä opinnäytetyössä ei erilaisia biomateriaalien annostelumenetelmiä ole käsitelty eikä annosteluprosessia eri annostelupumpuille ja materiaaleille ole optimoitu. Nämä yllämainitut kaipaavat jatkotutkimuksia muun muassa validoida PrinLab dispensointipumppujen kyvykkyyksiä biomateriaalien annosteluun sekä optimoida biomateriaalien pisarakokoa työelektrodilla. Kehittää tulisi myös biomateriaalien levimistä työelektrodin pinnalla. Näytteen tuominen työelektrodille on myös monista muuttujista koostuva prosessi, mikä vaatii paljon optimointia.

Täydellisen elektrokemiallisen sensorialustan aikaansaaminen vaatii vielä materiaalikehitystä. Painokokeiden perusteella aivan tasainen painopinta vaatii erilaisen painomusteen koostumuksen. Tässä työssä käytetyn kaupallisen grafiittimusteen viskositeettia voisi kokeilla optimoida, minkä seurauksena painopinnan laatua voisi vielä yrittää parantaa.

Havaittiin, että Gwent Electronics Materials eristemusteen pinnasta tulee helposti karhea. Tiedossa on, että eristemusteita on saatavilla helposti multakin valmistajilta. Olisikin mielenkiintoista kokeilla eri eristemusteita täydellinen materiaalin löytämiseksi käyttötarkoitukseen.

Työssä tutkittiin ainoastaan tasosilkipainoprosessia elektrokemiallisten sensoripohjien valmistukseen. Tasosilkipaino on nopea, mutta se ei sovella massavalmistusmenetelmäksi kovin hyvin. Yksi mielenkiintoisista massavalmistusmenetelmistä on rullasilkipaino, joka mahdollistaisi valmistuksen lähes samoin peri-

aattein kuin tasopainossa ja menetelmän etuna olisi nopeus. Olisikin mielenkiintoista optimoida prosessiparametrit elektrokemiallisten sensorialustojen valmistukseen rullasilkipainomenetelmällä. Verkostoja hyväksikäytäen voisi etsiä menetelmään soveltuvat painomusteet ja tarvikkeet, optimoida painoprosessi ja testata menetelmän kyvykkyyttä sensoriarkkien valmistukseen.

## 8 POHDINTA

IOT, joka tulee sanoista Internet Of Things eli esineiden internet tai HMI eli Human Machine Interface ovat kasvavia teknologioita, joissa erilaisten antureiden merkitys on suuri. Elektrokemialliset biosensorit ovat toivottavasti tulevaisuudessa mukana yllämainittujen teknologioiden kehityksessä muiden antureiden mukana. Sensori voisikin tehdä erilaisia pikatestauksia esimerkiksi sairaaloissa, kotitalouksissa tai teollisuudessa tuoden lukijalaitteen kautta tietoa testeistä pilveen ja sitä kautta valvomoihin tai käyttäjän tietoon.

Teollisuuden tarpeisiin ja säännölliisiin mittauksiin tarkoitettu sensori ei saisi olla kertakäytöinen ja näyteknavankin tulisi olla useasti käytettäväissä. Tulevaisuudessa IOT- ja HMI-teknologioiden kehittyvillä markkinoilla sensorilla voisi olla huimasti käytökohteita, kunhan ratkaistaan näytteen pidemmänkin matkan hallittu kulkeutuminen elektrodille sekä toimintavarmuus useasti peräkkäin. Ratkaisuna näytteen kulkeutumiseen työelektrodille voisi olla erilaiset kapillaariset mikrokanavat paperilla tai muovialustolla, näyte ja käyttöolosuhteet tietysti huomioiden.

Silkipainotekniikka mahdollistaa sensorin valmistuksen suoraan kankaalle. Tulevaisuudessa voisikin olla mahdollista valmistaa elektrokemialliset biosensorit suoraan erikoisvarustettuihin vaatteisiin ja näin ne olisivat mukana älyvaatteiden kehityksessä yhtenä anturina. Vaatteella ja siihen painetuilla sensoreilla olisi tarpeen määritetty toiminnollisuus mitata asioita esimerkiksi ihmisenstä tai eläimestä suorituksen aikana. Tämä yhdistettynä yllämainittuihin IOT- ja HMI-teknologioihin toisi huimasti kaupallisia markkinoita alan toimijoille.

Silkipainotekniikka valmistusmenetelmänä mahdollistaa sensorin valmistamisen todella monipuolisesti eri alustamateriaaleille, mikä lisää sensorin kaupallista potentiaalia tulevaisuudessa ja yrityksien kiinnostus kehittää pikatestaukseen tarjoitetun elektrokemialisen biosensorin sovelluksia toivottavasti kasvaa.

## LÄHTEET

Becker, D. 2016. All About Flex: Imaging Methods for Etch Resist, Part 1. Viitattu 22.5.2016, <http://iconnect007.com/printfn/print.php?cdID=97275>.

BOPP. 2016. Screen Printing using BOPP SD Meshes. Viitattu 22.5.2016, <http://www.bopp.ch/en-US/Applications/Screen-Printing-1.aspx>.

Cooper, J. & Cass, T. 2008. Biosensors. Oxford university press.

Das, R. & Igbenehi, H. 2012. Printed and Flexible Sensors Forecast, Players and Opportunities, 2013-2023. IDTechEx Ltd. Maksullinen julkaisu. [www.IDTechEx.com/research](http://www.IDTechEx.com/research)

DropSens. 2016. Screen printed electrodes. Viitattu 17.8.2016. [http://www.dropsens.com/en/screen\\_printed\\_electrodes\\_pag.html](http://www.dropsens.com/en/screen_printed_electrodes_pag.html).

Dupont. 2016. Basics of screen printing thick film inks. Viitattu 19.6.2016, <http://www.dupont.com/products-and-services/electronic-electrical-materials/articles/basics-of-screen-printing.html>.

Feldman, B. 2009. Electrochemical blood glucose test strips for people with diabetes. Abbot Diabetes Care. Viitattu 30.3.2016, <http://knowledge.electro-chem.org/encycl/art-q01-glucose.htm>.

Focalspec. 2016. Line confocal sensor for industrial applications. LCI 400. Viitattu 28.9.2016, [http://www.focalspec.com/wp-content/uploads/2016/08/LineConfocalSensors\\_A4\\_24082016\\_for\\_web.pdf](http://www.focalspec.com/wp-content/uploads/2016/08/LineConfocalSensors_A4_24082016_for_web.pdf).

Gamota, D., Brazis, P., Kalyanasundaram, K. & Zhang, J. 2004. Printed organic and molecular electronics. Kluwer academic publishers. United states of America.

Graafinen, Tietopankki graafikoille. 2015. Painomenetelmät. Viitattu 14.5.2016, <http://www.graafinen.com/tietopankki/painomenetelmat/>.

Gwent group. 2016. Product information. C2030519P4 graphite ink. Viitattu 18.9.2016. [http://www.gwent.org/gem\\_data\\_sheets/biosensor\\_products/carbon\\_based\\_working\\_electrode\\_materials/carbon\\_graphite\\_c2030519p4.pdf](http://www.gwent.org/gem_data_sheets/biosensor_products/carbon_based_working_electrode_materials/carbon_graphite_c2030519p4.pdf)

Gwent group. 2016. Product information. C2130809D5 Silver/silver chloride paste. Viitattu 18.9.2016. [http://www.gwent.org/gem\\_data\\_sheets/biosensor\\_products/reference\\_electrode\\_materials/60\\_40\\_ag\\_agcl\\_c2130809d5.pdf](http://www.gwent.org/gem_data_sheets/biosensor_products/reference_electrode_materials/60_40_ag_agcl_c2130809d5.pdf)

Hoppy, A. 1997. Screen printing for the industrial user. Viitattu 15.5.2016, [http://www.gwent.org/gem\\_screen\\_printing.html](http://www.gwent.org/gem_screen_printing.html).

Härkönen, S., Lähteenmäki, I. & Välimaa, T. 1992. Teollisuuden mittauste tekniikka. Analyysimittaukset.

Kadara, R., Jenkinson N. & Banks C. 2009. Sensors and Actuators B: Chemical. Characterisation of commercially available electrochemical sensing platform. Nidos 138. nro 2. s. 556–562. Viitattu 8.8.2016. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925400509000422>.

Murakami CO.,LTD. 2013. Viitattu 23.2.2016, <http://www.murakami.co.jp/english/products/fiber.html>.

NBC Meshtec. V-screen 2016. Viitattu 31.5.2016. <http://www.nbc-jp.com/eng/product/screen/mc/vscreen.html>.

NBC Meshtec. 2016. α-series. Viitattu 21.8.2016. <http://www.nbc-jp.com/eng/product/screen/mc/alphasseries.html>.

NBC Meshtec. 2016. α-series . High modulus polyester monofilament mesh for technical screen printing applications. Viitattu 17.9.2016. [http://www.nbc-jp.com/eng/product/2016Alpha\\_Lux\\_ex\\_spec.pdf](http://www.nbc-jp.com/eng/product/2016Alpha_Lux_ex_spec.pdf)

Nissinen, M. 2012. BioPrint-projekti esitys. Viitattu 13.5.2016, <http://www.oamk.fi/hankkeet/prinlab/docs/materials/nissinen.pdf>.

Nissinen, M. 2016. Erikoistutkija, Oulun Ammattikorkeakoulu Oy, Informaatioteknologia. Haastattelu 17.8.2016.

Nippo Bunkaseiko Co., Ltd. 2015. Rotary screen printing presses. Viitattu 18.5.2016, [http://www.npt-print.co.jp/en/screen\\_en.html](http://www.npt-print.co.jp/en/screen_en.html).

OAMK. 2016. Painettavien antureiden kehityslaboratorio. PrinLab. Ekra E2 silkscreen printer. Viitattu 17.9.2016. <http://www.oamk.fi/hankkeet/prinlab/equipment/index.php?page=ekra>

Parmes, S. 2011. Diplomityö. Hermoston välittäjääineepitoisuksien sähkökemialliseen mittaanmiseen käytettävät elektrodit. Aalto-Yliopisto, Sähkötekniikan korkeakoulu. Viitattu 14.8.2016. <http://lib.tkk.fi/Dipl/2011/urn100488.pdf>

Piila, T., Juusti, A., Kylmänen, M & Ikonen, K. 2015. Printed electronics & diagnostic products – Printocent Designers's Handbook. Neficon Finland Oy. 6.10 Chemical and Biosensors. s. 119. Viitattu 24.11.2015. <http://www.ppe-info.com/> (maksullinen).

Pittson, R. & Jones, L. 2014. Silkipaino koulutus materiaalit. Wales, Pontypool: Gwent Electronics materials Ltd.

Pohanka, M. & Skládal, P. 2008. Electrochemical biosensors – principles and applications. Journal of Applied Biomedicine nro 6. s. 57–64. Viitattu 23.11.2015. [http://jab.zsf.jcu.cz//6\\_2/pohanka.pdf](http://jab.zsf.jcu.cz//6_2/pohanka.pdf).

PrinLab kuva-arkistot. 2012-2015. Ei julkinen. Hakupäivä: 23.5.2016

PVF. 2015. Precision mesh & solutions for industrial applications. Viitattu 31.5.2016. <http://pvfgmbh.de/en/wp-content/uploads/2015/01/PVF-SCREEN-PRINTING-BROCHURE-2014-KL.pdf>.

PVF. 2016. Alpha-series-High modulus polyester mesh for highest screen printing requirements. Viitattu 21.8.2016. [http://pvfgmbh.de/en/wp-content/uploads/2015/11/Flyer\\_Alpha-Serie\\_EN.pdf](http://pvfgmbh.de/en/wp-content/uploads/2015/11/Flyer_Alpha-Serie_EN.pdf).

Pääkkönen, S., Sempert, K., Tuomaala, T., Määttä, H., Nelo, M., Kivimäki, L., Hakalahti, L., Sesay, A. & Nissinen, M. 2012. Development of biosensors using printed technology. Comparison of commercial-available graphite inks used to fabricate amperometric screen printed electrodes for biosensors. Oulu University of applied sciences. Viitattu 13.8.2016. [http://www.oamk.fi/kirja-sto/elektroniset\\_aineistot/julle/Nissinen\\_Comparison.pdf](http://www.oamk.fi/kirja-sto/elektroniset_aineistot/julle/Nissinen_Comparison.pdf)

Ronkainen, N., Halsan, B. & Heineman, W. 2010. Electrochemical biosensors. Chemical Society Rewies vol 39. s. 1747-1763.

SaatiPrint. 2001. Tech tips for screen printes. Viitattu 27.5.2016. <http://www.catspitproductionsllc.com/Documents/SaatiPrint%20TechTip%20Handbook.pdf>.

Torniainen, N. 2016. Laboratorioanalytikko, Oulun Ammatikorkeakoulu Oy, Informaatioteknologia, Haastattelu 17.8.2016.

Trelleborg. 2016. Unitex Squeegees, Printing for the long run. Viitattu 18.6.2016. <http://www.trelleborg.com/en/applied-technologies/products/screen--printing--squeegee--blades/unitex--ulon--hp--composite--squeegee--blades>.

TriMark Publications, LLC. 2013 Point of care diagnostic testing world markets. Trends, Industry participants, product overviews and market drivers. Maksullinen julkaisu. <https://www.trimarkpublications.com/>

TQC. 2016. Grindometers fineness of grind gauges. Viitattu 19.6.2016. <https://www.tqc.eu/en/products/article/grindometers-fineness-of-grind-gauges>.

Viluksela, P., Ristimäki, S. & Spannäri, T. 2007. Painoviestinnän tekniikka. Ota-van kirjapaino Oy. Keuruu.

