



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

TIMO TENHUNEN  
KATODISEN UPOTUSMAALAUSSPROESSIN TEHOSTAMINEN

Diplomityö

Tarkastaja: professori Pekka  
Ruuskanen  
Tarkastaja ja aihe hyväksytty  
Talouden- ja rakentamisen  
tiedekuntaneuvoston kokouksessa  
4. toukokuuta 2016

## TIIVISTELMÄ

**Timo Tenhunen:** Katodisen upotusmaalauksen tehostaminen  
Tampereen teknillinen yliopisto  
Diplomityö, 53 sivua, 2 liitesivua  
Toukokuu 2016  
Tietotekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma  
Pääaine: Elektroniikan materiaalit  
Tarkastaja: professori Pekka Ruuskanen

**Avainsanat:** Katodinen upotusmaalaus, automaalaus, korroosiosuojaus

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla voidaan tasata maalikerroksen jakaumaa auton korissa katodisessa upotusmaalauksessa. Tähän tavoitteeseen päästiin lisäämällä maalialtaaseen ylimääräisiä anodikennoja. Tasaisen jakauman avulla tavoiteltiin kustannussäästöjä vähentyneen materiaalikulutuksen ansiosta. Sähkökemiallinen katodinen upotusmaalaus on automaalauksen ensimmäinen maalausvaihe, jonka avulla myös kotelot kytetään suojaamaan.

Diplomityössä tutustuttiin ensin katodisen upotusmaalauksen sekä automaalauksen teoriaan sekä korroosion esiintymismuotoihin. Työn puitteissa tehtiin selvitystyö mahdollisista ratkaisuista, asennuksesta sekä prosessin optimoinnista. Ennen ja jälkeen asennuksen mitattiin kolmenkymmenen auton korin kerrosvahvuudet tulosten todentamiseksi. Mittaukset analysoitiin Minitab-ohjelmalla ja tulokset todennettiin kahden otoksen t-testin avulla. Työ suoritettiin Valmet Automotiven Uudenkaupungin tehtaalla.

## ABSTRACT

**Timo Tenhunen:** Optimisation of Cathodic Electrocoating Process

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 53 pages, 2 Appendix pages

May 2016

Master's Degree Programme in Information Technology

Major: Electronics Material Science

Examiner: Professor Pekka Ruuskanen

Keywords: Cathodic electrodeposition, automotive painting, corrosion protection

The target of this Master's thesis was to optimise the distribution of paint in a car body in cathodic electrodeposition process by installing extra anode cells in to the paint bath. Better distribution of paint leads to cost savings due lower material consumption. Cathodic electrodeposition is an electrochemical painting process and is the first stage of automotive painting.

The Master's thesis was begun by researching the background theory of cathodic electrodeposition, car painting and different corrosion types. An analysis of different solutions to improve paint distribution was made. The instalment and process optimisation was planned and implemented. Before and after the installation of the equipment a sample of thirty film thickness measurements were taken from the electrocoated car bodies. The measurements were analysed with a statistical program called Minitab and the results were verified with a two-sample t-test. The thesis was conducted in Valmet Automotive, Uusikaupunki.

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty toimiessani prosessisuunnittelijana Valmet Automotivella. Työn ohella opinnäytetyön kirjoittamisella on ollut kaksi puolta. Toisaalta haasteena oli kiire päivittäisen työn viedessä suurimman osan ajasta, mutta toisaalta kirjoittamista on helpottanut organisaation vahva tuki sekä yhteiset intressit hankkeen onnistumiselle.

Haluan esittää kiitokset esikäsittelylaitoksen henkilöistä Teemu Ylöselle ja Tero Haaralle, kunnossapidosta Olli Anttalaiselle, Tero Ståhlille, Mika Sinisalolle ja Jukka Hallmanille. Lisäksi haluan kiittää PPG:n Jani Lindgreniä ja John Bishopia sekä erityisesti opinnäytetyövalvojaani Valmet Automotivella, Jyrki Virtasta.

Porissa, 18.5.2016

Timo Tenhunen

## SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO .....	1
2.	KATODINEN UPOTUSMAALAUS .....	2
2.1	Yleistä teollisesta automaalauksesta.....	2
2.2	Katodisen upotusmaalauksen taustoja .....	3
2.2.1	Kemialliset reaktiot katodisessa maalausprosessissa.....	11
2.3	Korroosio sekä yleisimmät korroosiotyypit autoissa.....	12
2.3.1	Filigraanikorroosio.....	14
2.3.2	Galvaaninen korroosio .....	14
2.3.3	Rakokorroosio.....	15
2.3.4	Pistekorroosio .....	15
2.3.5	Ilmastollinen korroosio .....	16
2.4	Ongelman asettelu .....	16
2.5	Valmet Automotiven maalausprosessi.....	19
2.6	Laadunvalvonta Valmet Automotivella.....	24
2.7	Laitteiston hankinta .....	25
3.	TYÖN TAVOITTEET JA KÄYTETTÄVÄT METODIT .....	27
3.1	Lähtötilanne.....	27
4.	TULOKSET JA ANALYSOINTI .....	32
4.1	Riskien kartoitus.....	32
4.2	Asennus.....	34
4.3	Prosessin optimointi.....	37
5.	YHTEENVETO.....	46
	LÄHTEET .....	48

LIITE A: MAALIN KERROSMITTAUSTEN TULOKSET, 30 KPL 14.-19.1.2016.

LIITE B: MAALIN KERROSMITTAUSTEN TULOKSET, 30 KPL 4.5.2016.

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

VOC	Haihtuva orgaaninen yhdiste (Volatile Organic Compounds)
HAP	Haitalliset ilmaa saastuttavat yhdisteet (Hazardous Air Pollutant)
ED/EC/KTL	Katodinen upotusmaalaus (Electrodeposition, Electrocoat, Katodische Tauchlackierung)
UF	Ultrasuodatus (Ultrafiltration)
SEM	Pyyhkäiselektronimikroskooppi (Scanning Electron Microscope)
EDX	Energiadisersiivinen röntgenanalysaattori (Energy-dispersive X-ray spectroscopy)
SPC	Tilastollinen prosessinohjaus (Statistical Process Control)
Cpk	Prosessin suorituskykyindeksi
FMEA	Riskianalyysi (Failure Mode and Effect Analysis)
AIAG	Automotive Industry Action Group

# 1. JOHDANTO

Tämän diplomityön tavoitteena oli kehittää menetelmä, jolla voidaan tasata maalikerroksen jakaumaa auton korissa katodisessa upotusmaalauksessa. Tasaisempi maalin jakauma tuo säästöjä prosessiin vähentämällä maalin kokonaiskulutusta. Tehtyjen muutosten vaikutus todennetaan tilastollisin menetelmin keräämällä riittävästi tietoa lähtötilanteesta ja vertaamalla tuloksia muutosten jälkeen. Työ suoritetaan Valmet Automotiven Uudenkaupungin autotehtaalla.

Katodinen upotusmaalauks on teollisen automaalauksen ensimmäinen maalauvaihe. Sen ensisijainen tehtävä on toimia suojana korroosiota vastaan. Katodinen upotusmaalauks on sähkökemiallinen prosessi, jossa auton korin ympärille muodostetaan maalikerros upottamalla auton kori maalialtaaseen ja johtamalla siihen sähkövirtaa. Upottamalla pystytään maalaamaan myös koteloalueet, joihin ei muilla maalauksproesseilla päästä.

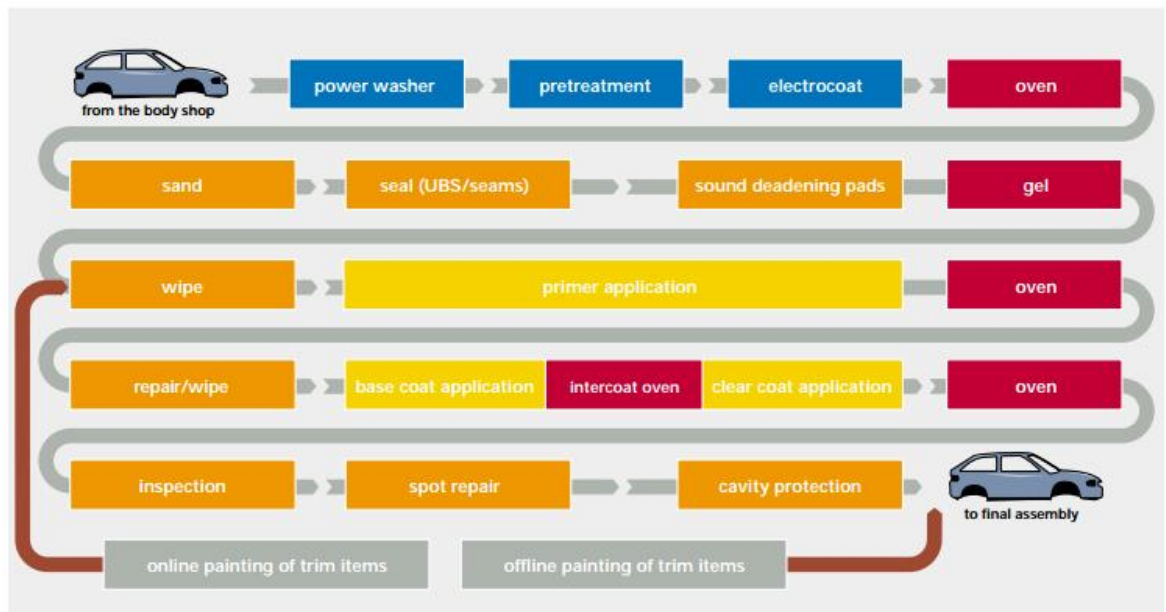
Ensimmäisessä vaiheessa tutustutaan teollisen automaalauksen, katodisen upotusmaalauksen sekä eri korroosiotyyppien teoriaan. Tämän jälkeen määritellään ongelma ja tutustutaan Valmet Automotiven maalauksprosessiin sekä katodisen upotusmaalauksen laadunmittaukseen. Laitteiston hankinnasta laaditaan suunnitelma, laitteet hankitaan ja laaditaan riskien kartoitus. Ennen laitteiston asennusta selvitetään lähtötilanne mittaamalla otos maalin kerrosvahvuuksista.

Laitteet asennetaan paikalleen upotusmaalialtaaseen tuotantoajan ulkopuolella. Prosessi optimoidaan ajamalla ensin tuotannosta poistettuja auton koreja, sitten muutoksia jatketaan asteittain tuotannon aikana. Muutosten vaikutus todennetaan lopuksi mittaamalla jälleen otos maalin kerrosvahvuuksista ja todentamalla muutokset t-testauksen avulla.

## 2. KATODINEN UPOTUSMAALAUS

### 2.1 Yleistä teollisesta automaalauksesta

Auton teollinen maalaus on monivaiheinen prosessi. Eri kerrosten käsittelyvaiheet eroavat suuresti toisistaan. Kuvassa 1 on esitetty automaalauksen vaiheet yleisellä tasolla. Prosessi alkaa auton korin valmistuessa hitsaamosta. Ensin tapahtuu puhdistus suojaöljyistä ja auton kori esikäsitellään. Tämän jälkeen on vuorossa katodinen upotusmaalaus ja uunitus. Maalipinnasta täsmennetään käsin pintavirheet, jonka jälkeen auton kori tiivistetään ja asennetaan äänieristematot. Pinta pyyhkitään epäpuhtauksista ja seuraa välimaalauks ja uunitus. Seuraavassa vaiheessa auton kori täsmennetään uudelleen ja lisätään pintamaali. Uuden uunituksen jälkeen lisätään lakka ja auto uunitetaan. Tämän jälkeen pinta tarkastetaan, korjataan ja alusta suojataan vahalla. Auton kori on viimein valmis kokoonpanoon.

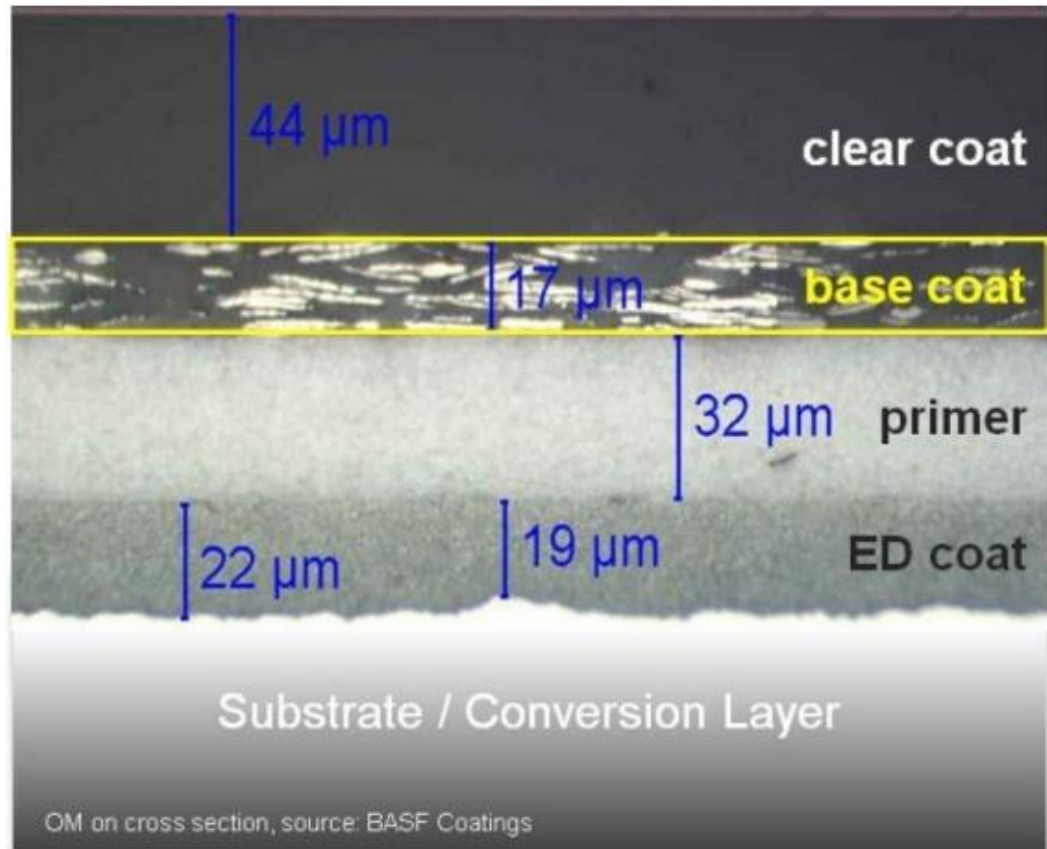


**Kuva 1.** Automaalauksen vaiheet [1].

Perinteisesti maalikerroksia on kaiken kaikkiaan kolme. Kullakin kerroksella on oma erityistehtävänsä. Pohjamaali (ED coat) yhdessä esikäsitteily- eli konversiokerroksen kanssa luo adheesion substraatin eli auton korin pinnan kanssa korroosiokestävyyden varmistamiseksi. Välimaalin (Primer) tehtävä on tasoittaa pintaa sekä suojata maalipintaa absorboimalla mekaanisia iskuja. Pintamaalin (Base coat) tehtävä on täyttää halutut väri-, kiilto- ja tasoittuvuusominaisuudet. Auton kori voidaan myös käsitellä ylimääräisellä alumiinipigmenttejä sisältävällä pintamaalikerroksella metallimaisen



efektin luomiseksi. Maalikerrokset suojataan lakalla (Clear coat), joka tuo pintaan kiiltoa, kovuutta ja suojaa liuottimilta, kemikaaleilta ja säältä. [2] Nykyisin yleisessä käytössä on myös menetelmä, jossa välimaalikerros on korvattu kaksinkertaisella pintamaalikerroksella [3]. Kuvassa 2 on esitetty maalatun pinnan kerrokset sekä niiden paksuudet.



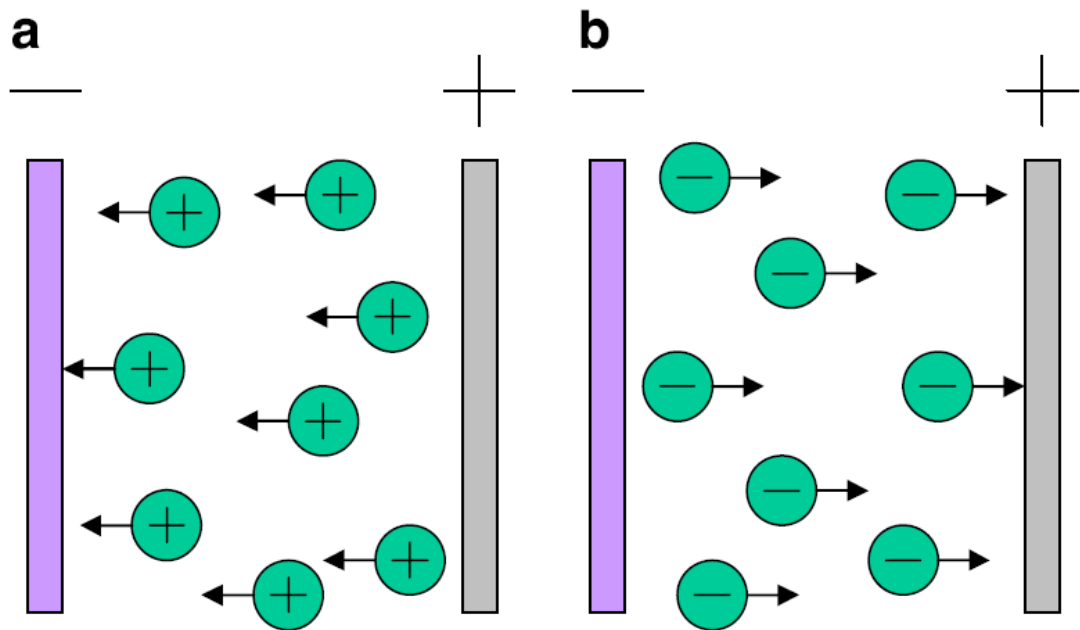
*Kuva 2. Poikkileikkaus auton maalipinnasta [4].*

## 2.2 Katodisen upotusmaalauksen taustoja

Katodinen upotusmaalaukseen perustuu neljälle kemialliselle ilmiölle, jotka ovat elektrolyysi, elektroforeesi, sähkökemiallinen saostuminen sekä elektro-osmoosi. Martinus van Marum kehitti ensimmäisenä laitteen, jolla saatiin aikaan tinan, sinkin ja antimoinin elektrolyysi vuonna 1785 [5]. Elektrolyysissä aineet hajoavat negatiivisiksi ja positiivisiksi ioneiksi.

Elektroforeesin ilmiönä löysi F. F. Reuss vuonna 1809 kokeessa, jossa savipartikkelien havaittiin liikkuvan kohti sähköisesti varattua kenttää nestemäisessä aineessa. Reuss havainnoi samana vuonna myös elektro-osmoosin [6]. Elektroforeesin määritelmä on sähköisesti varautuneiden nesteeseen tai geeliin upotettujen hiukkasten liikkumista, kun nesteeseen tai geeliin kosketuksissa olevaan elektrodiin luodaan lähdejännite [7]. Elektroforeesia käytetään aminohappojen, proteiinien ja peptidien erottamiseen

käyttämällä hyväksi niiden varauseroja, jotka vaikuttavat niiden liikkumisnopeuksiin katodille tai anodille kuten kuvassa 3 on esitetty annetussa pH:ssa [8].



**Kuva 3.** Katodisen elektroforeesin (a) anodisen elektroforeesin ja peruseriaate [9].

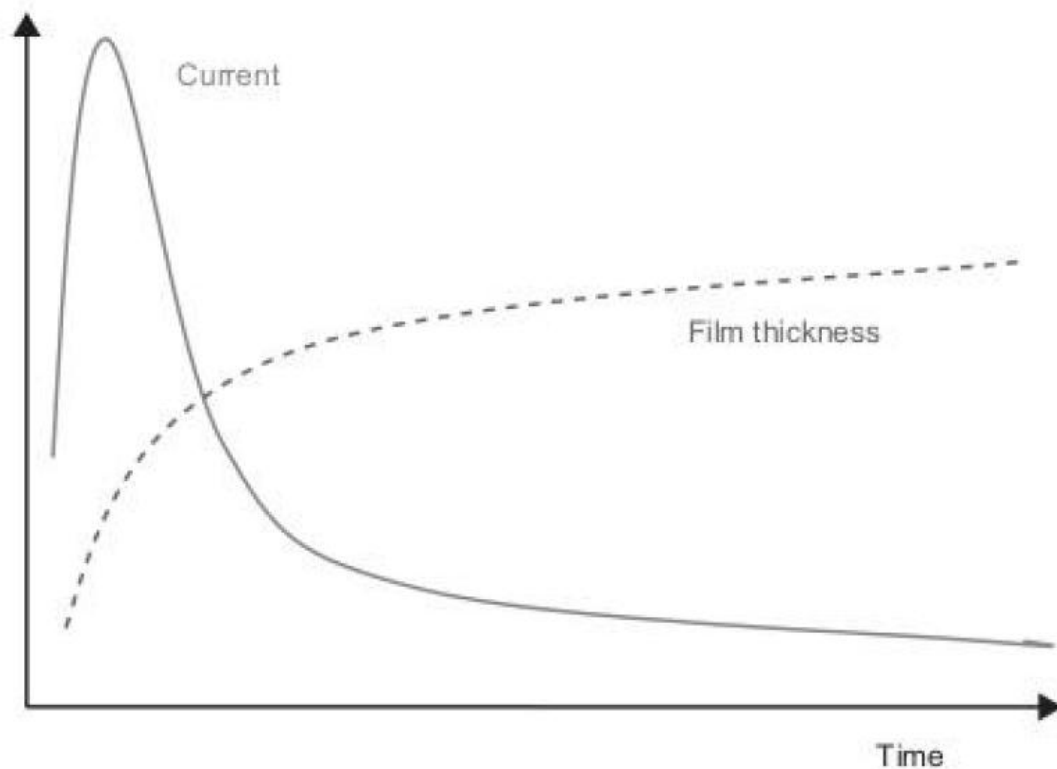
Sähkökemiallisen saostumisen havainnoivat Linder ja Picton vuonna 1905 koaguloimalla suoloja metallipinnalle [10]. Sähkökemiallisen saostus eroaa elektroforeesista siten, että elektroforeesissa reaktio tapahtuu kolloidiliuoksessa, kun taas sähkökemiallinen saostuminen tapahtuu termodynaamisesti oligomeeriseoksessa jopa satakertaisella nopeudella [11]. Ensimmäinen patenti ilmiöön liittyen oli vuodelta 1919 ja koski lateksihanskojen pinnoittamista [12].

Sähkökemiallinen maalaus autoteollisuuden sovelluksena juontaa juurensa 1960-luvun Yhdysvaltoihin. Edeltävät liuotinpohjaiset teknologiat olivat ongelmallisia prosessin laaduntuottokyvyn, ympäristön ja turvallisuuden näkökulmasta. 1960-luvun lopulla prosessiin kehitettiin ultrafiltraattisuodatus, jonka avulla maalin kulutuksen hyötysuhde saatiin jopa 95 % tasolle maalikylyn jälkeisten huuhteluiden avulla. Aluksi upotusmaalaukseen sovellettiin anodista teknologiaa, jossa maali kerrostuu anodille. Anodisen teknologian haittapuolena on metalli-ionien migraatio substraatista maaliin kerrostumisreaktion aikana [13]. 1970-luvun lopulla katodinen upotusmaalauksen yleistyminen paremman korroosiokestävyyden [14], suurempien kerrosvahvuuksien, matalamman liuotintarpeen sekä matalamman polttolämpötilan johdosta. Liuotinpitoisuus maaleissa jatkoi laskuaan 1980-luvulla. Tiukentuneesta ympäristölainsäädännöstä johtuen 1990-luvulla markkinoille tulleet lyijyttömät maalit ovat nykyään korvanneet vanhoja lyijypohjaisia maaleja. [15]

Autoteollisuuden käyttämästä prosessista käytetään englanniksi termejä Electrocoating (EC), E-coating, Electrodeposition (ED) ja saksaksi Katodische Tauchlackierung

(KTL). Suomeksi termit eivät ole vakiintuneet. Tässä työssä käytetään termiä katodinen upotusmaalauk, joka on suora käänös saksankielisestä termistä.

Maalausprosessissa maalialtaassa dispersiona olevat varautuneet hiukkaset kulkeutuvat sähköisesti varattuun, katodina toimivaan auton koriin. Dispersio on seos, jossa aineet ovat tasaisesti sekoittuneena. Menetelmä perustuu lyofiilisen kolloidin, eli liuottimien kanssa yhteensopivan dispersion homogeenisen ja heterogeenisen seoksen, alttiuteen koaguloitua sähköisesti tuotettujen ionien vaikutuksesta [16]. Maalikerrokset muodostuvat ensin alueilla, jotka ovat lähimpänä anodikkenoja. Kerrospaksuuden kasvaessa maali alkaa eristämään pintaa, jolloin auton kori ei saa virtaa ja prosessi hidastuu. Tämä on havainnollistettu kuvassa 4. Kerroksen muodostumiseen vaikuttaa maalin hartsityyppi, neutraloinnin aste, maalin kiintoaine, lämpötila, sähkövirta, upotusaika sekä maalin kiertonopeus altaassa [17]. Samalla maalikerrosten muodostuminen jatkuu sisäosiin ja koteloihin, jotka muilla maalausteknologioilla olisivat äärimmäisen vaikeita saavuttaa [18] [19].



**Kuva 4.** Maalikerrosten kasvaminen ja virran lasku ajan funktiona [14].

Katodisen upotusmaalauksen etuihin kuuluu kustannustehokkuus, tuottavuus ja ympäristöystävällisyys. Kustannustehokkuus koostuu kerrosvahvuuksien tarkasta säädettävyydestä ja matalasta työvoimatarpeesta. Tuottavuus koostuu linjanopeudesta, tiiviistä pakkaamisesta sekä linjan kyvystä maalata useita eri tuotteita. Ympäristöedut muodostuvat matalista VOC-yhdisteistä eli haihtuvista orgaanisista yhdisteistä ja HAP-

jäämistä eli haitallisista ilmaa saastuttavista yhdisteistä, raskasmetallivapaista komponenteista, paloturvallisuudesta sekä vähäisestä altistumisesta ja jätemäärästä. [20]

Suomessa katodinen upotusmaalausprosessi on käytössä Finnish Steel Painting Oy:llä Kurikassa sekä Valmet Automotiven autotehtaalla Uudessakaupungissa [21]. On arvioitu, että maailmassa on yhteensä noin 3000 sähkömaalauslinjaa, joista puolet Yhdysvalloissa [22].

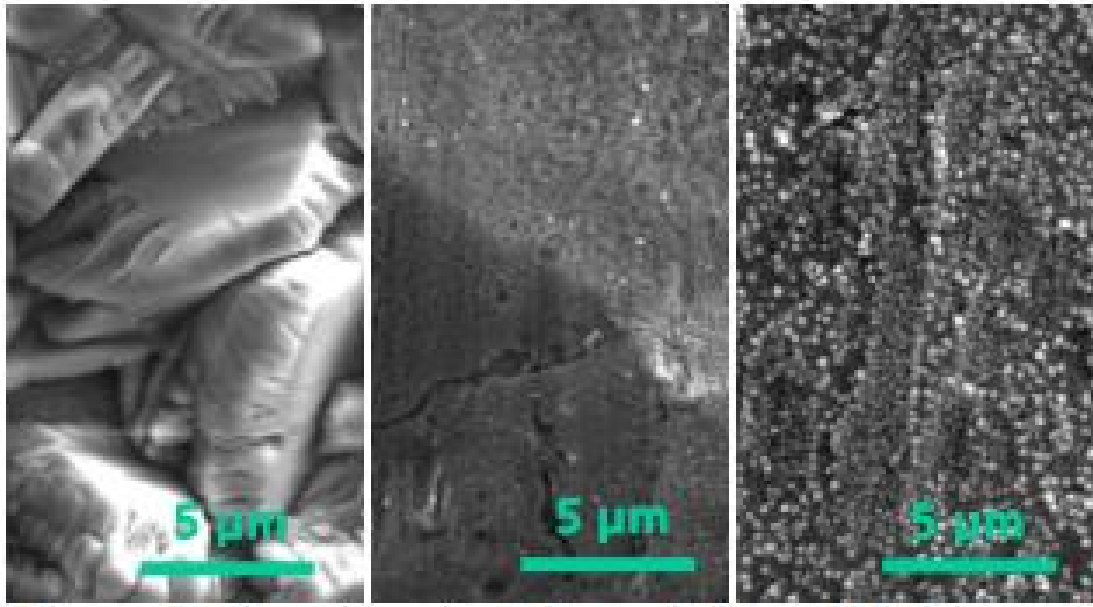
Maailmanlaajuisten upotusmaalimarkkinoiden arvioitiin olevan 2,87 miljardia dollaria vuonna 2015 ja kasvavan vuoteen 2020 mennessä 3,69 miljardiin dollariin. Autoteollisuuden lisäksi suurimpia kohdemarkkinoita ovat muut liikennevälineet, rakennusteollisuus, maatalousvälineet, kodinkoneet ja huonekalut. Suurimpia yrityksiä alalla ovat Axalta Coating Systems, BASF, SE, Hawking Electrotechnology, KCC Corporation, Koch Membrane Systems, Luvata Oy, MetoKote Corporation, Nippon Paint Holdings, PPG industries ja Valspar Corporation. [23] Koko autoteollisuuden maalien maailmanmarkkinoiden arvo vuonna 2020 arvioidaan olevan 11,34 miljardia dollaria [24].

Tuotantolaitos, jossa autoteollisuuden katodinen upotusmaalaus suoritetaan, koostuu yleensä kahdesta pääprosessista, joista ensimmäinen on esikäsitteily ja jälkimmäinen katodinen upotusmaalaus. Esikäsitteilyssä auton korin pinnalle muodostetaan kemiallisen reaktion avulla konversiokerros, joka normaalisti on sinkkifosfaattia. Tämä epäorgaaninen kerros muuttaa pinnan sähkönjohtavuutta ja kemiallista luonnetta ja parantaa maalin kiinnipysyvyyttä ja korroosio-ominaisuuksia huomattavasti [25] [26] toimimalla suojana metallisubstraatin ja elektrolyytin välissä. Muodostuva epätasainen kiteinen, karhea pinta kasvattaa fosfatomateriaalin pinta-alaa, joka parantaa adheesiota. Virtaava maali tarttuu paremmin epätasaiseen pintaan. Lisäksi fosfatomateriaalin matala pH neutraloi maalille haitallista rasvanpoistoa ja mahdolliset happojäämät parantavat adheesiota. [27] [28]

Perinteinen sinkkifosfaattipohjainen esikäsitteily koostuu neljästä vaiheesta, jotka ovat rasvanpoisto, aktivointi, fosfatoiointi sekä passivointi, joista passivointi ei ole välttämätön. Lisäksi vaiheiden välissä on raakavesi- tai ionivesihuuhteluita. Esikäsitteily suoritetaan välittömästi ennen upotusmaalausta.

Esikäsitteily voi olla myös rautafosfaatti-, silaani- tai zirkonumpohjainen [25]. Useat yritykset tarjoavat silaani- ja zirkonumpohjaisia ohutkerrosteknologioita, jotka ovat uusia, nopeasti yleistäviä sovelluksia ja aikaisempiin verrattuna ympäristöystävällisempiä, energiatehokkaampia sekä prosessina yksinkertaisempia [29] [30] [31]. Ohutkerroskäsitteily muodostaa huomattavasti pienemmän kidekoon verrattuna sinkkifosfatoiointiin, joka parantaa adheesiota säilyttämällä substraatin karkeuden [32]. Lisäksi kehitteillä on teknologioita, joissa kaksi pääprosessia olisi yhdistetty yhdeksi kemialliseksi prosessiksi [33] [34]. Nämä teknologiat voivat

mullistaa upotusmaalauksen tulevaisuudessa. Kuvassa 5 on esitetty eri esikäsitteilyteknologioiden kidekokoja. Vasemmalla on kuvattu perinteinen sinkkifosfaattikerros, keskimmäinen ja oikeanpuolinen kuva ovat ohutkerroskäsitellyjä pintoja.



**Kuva 5.** SEM-kuvat Sinkkifosfaatti- (vasemmalla) ja ohutkerroskäsitellyistä (keskellä ja oikealla) teräslevyistä [35].

Maalien yleiset peruskomponentit ovat sidosaine, haihtuvat yhdisteet, pigmentti ja lisäaineet. Sidosaine toimii kerroksen muodostajana sekä sitoo itseensä muut komponentit. Haihtuvat yhdisteet pitävät maalin liukoisessa muodossa maalikerroksen muodostamisen ajan. Pigmenttien päätehtävä on toimia väriaineena, mutta ne vaikuttavat myös muihin maalin ominaisuuksiin. Lisäaineiden tehtävä on muokata haluttuja ominaisuuksia kuten maalin virtausominaisuuksia tai toimia katalyyttinä. [36]

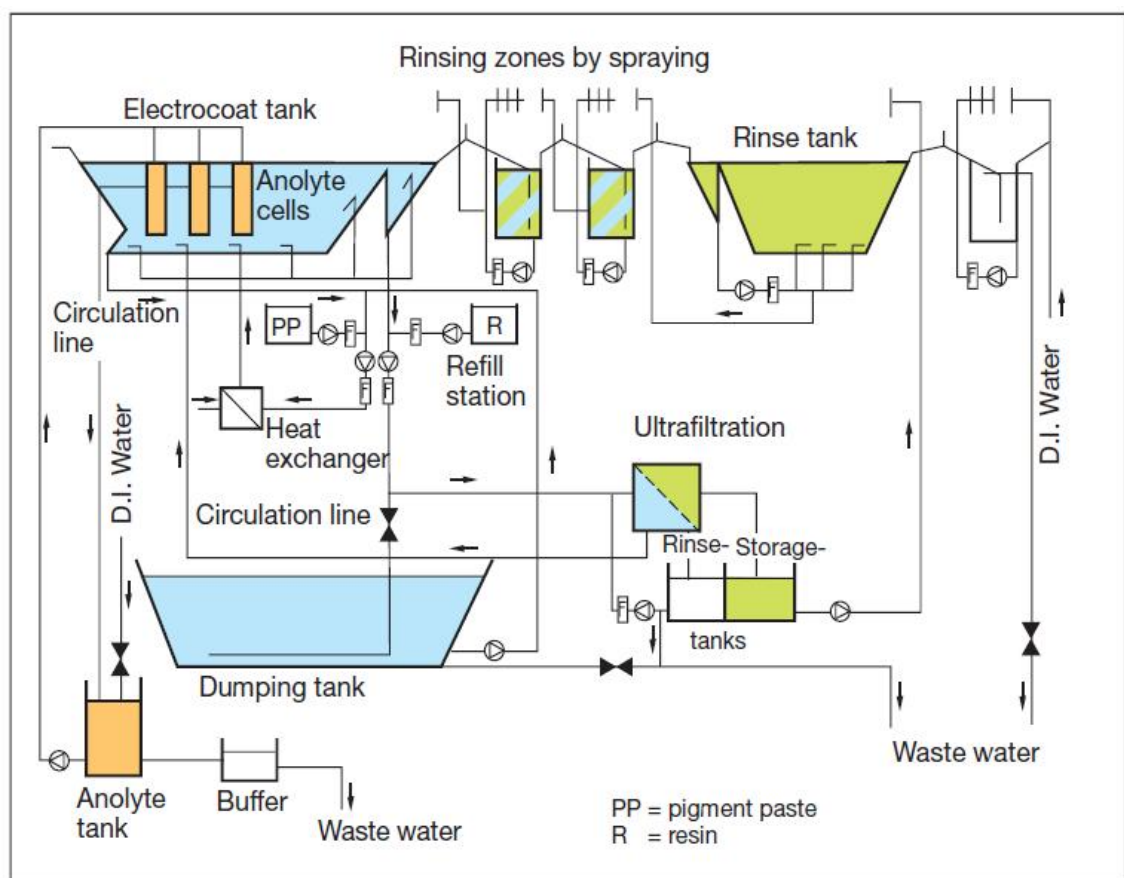
Katodisessa upotusmaalauksessa käytettävä maali koostuu varautuneista polymeereistä, useimmiten katodisista epoksihartseista. Maali ei suojaa pintaa elektrokemiallisesti korroosiolta. Se kuitenkin muodostaa kestäväen hydrofobisen kerroksen, joka eristää metallin hapestä ja vedestä [37]. Katodisia epoksihartseja käytetään hyvän adheesion, korroosio-, abraasio-, kemikaali- ja iskunkestävyyden johdosta [38]. Epoksihartsit ovat kuitenkin herkkiä valohapettumiselle [39], joten ne tulee suojata auringon valolta. Muita käytettyjä polymeerejä ovat anodiset epoksihartsit sekä akryylit, mutta molemmat ovat huonompia korroosiokestävyyden sekä reunojen peittävyiden osalta [40].

Prosessina katodinen upotusmaalauks koostuu maalialtaasta, sitä seuraavista filtraattihuuhteluista sekä valinnaisesta ionivesihuuhtelusta. Kuvassa 6 on skemaattisesti esitetty katodisen maalaukslaitoksen perustoiminnot. Henkilöturvallisuuden ja

puhtausvaatimusten vuoksi pääsy prosessiin tuotannon aikana on estetty altaiden koteloinnilla [41]. Maalialtaan reunoille ja mahdollisesti pinnalle ja pohjaan on aseteltu anodikennoja, jotka voivat olla joko putkimaisia, levymäisiä tai kaarevia sekä membraanipinnalla tai ilman. Membraanit ovat normaalisti termoplastista materiaalia, kuten hartsilla kyllästettyä polyetyleenä tai polypropyleeniä. Eri membraanimallit poikkeavat toisistaan ioniselektiivisyytensä, fysikaalisten ominaisuuksiensa ja kestävyuden osalta [42].

Anodikennoihin ohjattava virta tulee yhdeltä tai useammalta tasasuuntausyksiköltä. Tasasuuntausyksikön jännite tulee olla riittävä halutun kerrosvahvuuden aikaan saamiseksi. Tasasuuntausyksikön kokoon vaikuttaa maalikylvyn koko ja maalattavan kohteen pinta-ala. [43]

Anolyttikennoihin normaalisti kytketty anolyttijärjestelmä kuljettaa kemiallisessa reaktiossa muodostuvan hapon pois maalikylvystä. Kaikki anodikennot eivät ole välttämättä kytkettynä anolyttijärjestelmään, jolloin niissä ei myöskään ole membraaneja. Anolyttijärjestelmän ulkopuolisissa anodikennoissa virta on normaalisti rajoitettu, jotta kylvyn pH pysyy riittävän korkealla. Anolyttijärjestelmä ohjautuu johtokyvyn mukaan. Johtokyvyn ylittyessä järjestelmä tyhjentää kiertävää nestettä ja ottaa ionivettä järjestelmään.

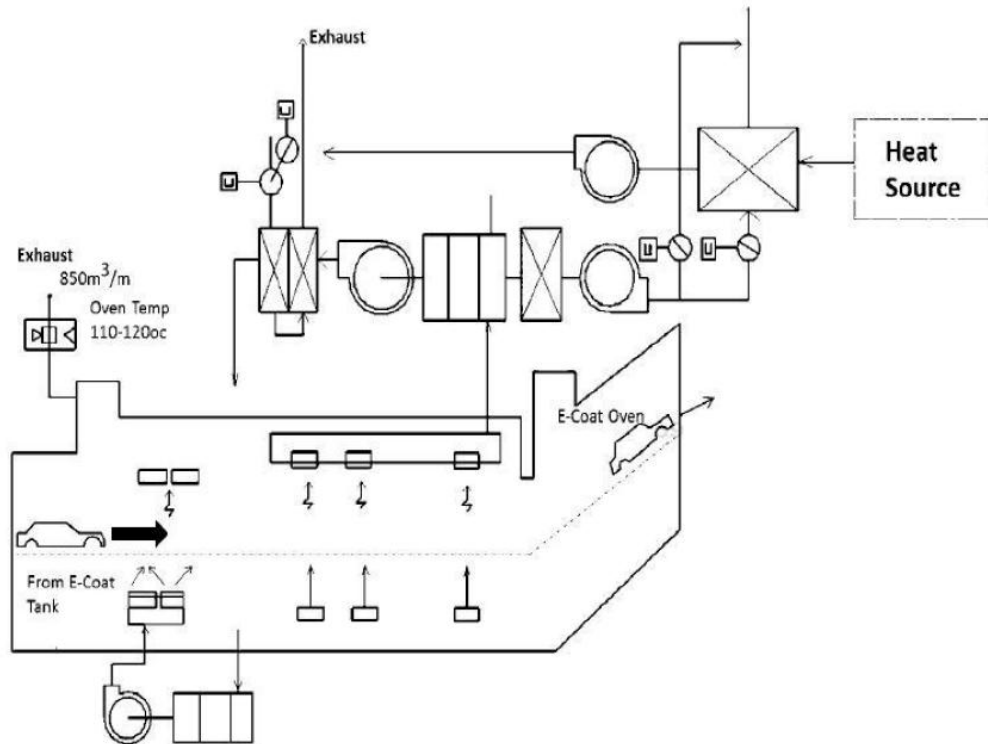


**Kuva 6.** Skemaattinen piirros katodisesta upotusmaalausprosessista [44].

Maalialtaassa on käynnissä pumpuilla toimiva kierto, jotta maalin kiintoaine ei laskeudu kylvyn pohjalle eikä maalin kiintoaineet sedimentoidu tasopinnoille. Maalikylyvyssä on jäähdytys- ja lämmityskierto maalin lämpötilan kontrolloimiseksi. Laitoksen yhteydessä on ultrafiltraattiyksikkö, joka suodattaa maalista pigmentit ja korkean molekyylipainon hartsit. Syntyvä ultrafiltraatti sisältää matalan molekyylipainon hartseja, liuottimia ja liuennetta suoloja [45]. Ultrafiltraatti on esitetty kuvassa 6 sinivihreällä neliöllä. Ultrafiltraatin tehtävä on huuhdella ylimääräinen maali auton korin pinnasta upotusmaalausta seuraavissa vaiheissa. Ultrafiltraattia annostellaan auton korin pintaan ruiskuttamalla ja upottamalla. Ultrafiltraatti maalijäämineen ohjautuu takaisin maalikylypyyn. Tämä minimoi maalin hävikin, joka on vain joitakin prosentteja. Viimeisenä huuhteluna voidaan käyttää ionivettä, jota ei tosin käytetä kaikissa laitoksissa. Ultrafiltraattiruiskutukset ja allas sijaitsevat kuvan 6 yläkulmassa ennen ionivesihuuhtelua. Joissakin nykyaikaisissa laitoserätyöyksiköissä ionivesihuuhtelussa on myös suodatusvaihe maalin talteenottoa varten sekä ioniveden uudelleen kierrättämiseksi, jolloin maalin hävikki pienenee entisestään ja ioniveden kulutusta saadaan vähennettyä.

Prosessin viimeisenä vaiheena on auton korin uunittaminen, jolloin maalin kemikaalit silloittuvat ja maali kovettuu. Silloittuminen on kemiallinen prosessi, jossa termoplastisen aineen ketjumaiset molekyylit muodostavat kovan, kolmiulotteisen molekyyliverkon [46]. Maaliuuni koostuu kolmesta päävaiheesta, jotka ovat nosto-osa, pito-osa ja jäähdytysosa. Nosto-osassa pintaa lämmitetään hitaasti kohti tavoitelämpötilaa. Hidas lämpötilan nosto haihduttaa liitoskohtien väliin jäänyttä filtraattia, joka muuten saattaa kiehua ja aiheuttaa pinta-virheitä näkyville alueille. Pito-osa on tärkein vaihe, jossa silloittuminen tapahtuu.

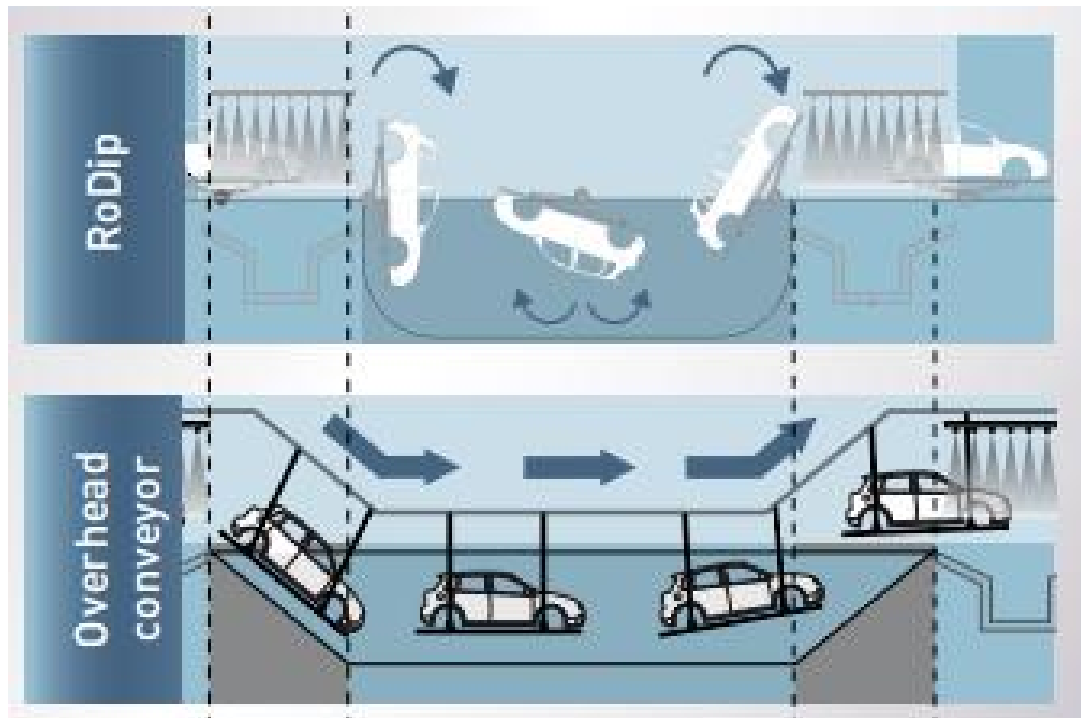
Kuvassa 7 on esitetty auton korin kulku uunin läpi. Lämmitysosa on uunin loppupäässä. Kuvan uuni nousee kaltevasti loppuvaiheessa koteloiden sisällä olevan nesteen valuttamiseksi. Kuvassa merkitty lämpötila on erittäin matala. Maali tarvitsee silloittuakseen vähintään 15 minuuttia 160-190 °C lämpötilassa [44].



**Kuva 7.** Skemaattinen piirros katodisen upotusmaalauksen jälkeisestä uunista [27].

Auton korin liikuttamiseen on erilaisia ratkaisuja, kuten koria kääntävät Dürr Groupin Rodip-kuljetin [47] ja Eisenmannin VarioShuttle-järjestelmä [48], perinteinen auton korin jalaksissa kiinni oleva riippukuljetin tai koria kantava kiinnitysjärjestelmä. Auton koria kääntävän kuljettimen etuna on katvealueista eroon pääseminen, vähäinen kemikaalien kulkeutuminen sekä se, että saadaan auton kori maalattua pienemmällä alueella. Pienemmästä tilan tarpeesta johtuen linjasta tulee lyhyempi, jolloin linjan rakentaminen on edullisempaa. Lisäksi altaista tulee pienempiä, mikä vähentää altaiden sisältämää kemikaalimäärää kuten kuvassa 8 on havainnollistettu. Riippukuljetinlinjan etuna on yksinkertaisuus, joka parantaa käyttöastetta. Altaita edeltävät ja seuraavat vaiheet kori etenee rullakuljettimien päällä jalaksiin kiinnitettyinä.



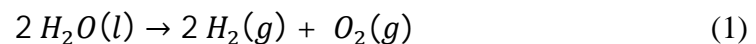


**Kuva 8.** Auton korin kääntävä RoDip-kuljetin sekä perinteinen riippukuljetin [49]

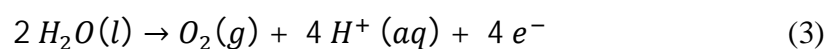
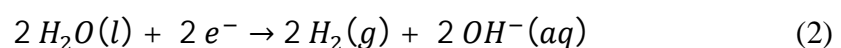
Muita tärkeitä osia upotusmaalauksessa ovat kiertojärjestelmällä varustettu maalin varastosäiliö huoltoja varten, maalin komponenttien automaattiset täyttöasemat sekä prosessiveden valmistukseen tarvittava ionivesilaitos ja prosessista syntyvän jäteveden käsittelylaitos.

### 2.2.1 Kemialliset reaktiot katodisessa maalauksessa

Maalausprosessi upotusmaalaukselyvyssä sisältää neljä pääreaktiota seuraavassa järjestyksessä; elektrolyysi, elektroforeesi, sähkökemiallinen saostuminen sekä elektroosmoosi. Prosessi alkaa jännitteen syöttämisestä kylpyyn, jolloin tapahtuu veden elektrolyysi eli vesi hajoaa vedyksi ja hapeksi.



Paikallisesti tapahtuvat seuraavat edellisen reaktion puolireaktiot. Reduktio tapahtuu katodilla eli tässä tapauksessa auton korissa ja oksidoituminen tapahtuu anodilla eli anodikennolla.

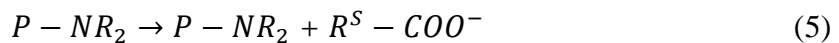


[50]

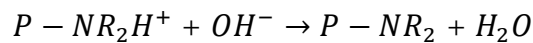
Elektrolyysissä vapautuvat vetyionit muuttavat pH:ta happamaksi anodilla ja emäksiseksi katodilla. Faradayn ja Fick-lakeihin perustuvalla kaavalla voidaan laskea hydroksidi-ionien tiheyttä. Näin voidaan arvioida elektrodilla olevaa pH:ta.

$$C_{OH^-} = 2 \frac{j}{F} \cdot (t/\pi D)^{-1/2}, \quad (4)$$

jossa  $j$  on virran tiheys  $A\ cm^2$ ,  $D$  hydroksidi-ionin diffuusiovakio  $cm^2\ s^{-1}$  ja  $F$  on Faradayn vakio. Muutos pH:ssa aiheuttaa maalin koaguloitumisen katodilla. [14] Maalin vesiliukoinen sidosaine hajoaa kationiseksi ja kulkeutuu elektroforeettisesti kohti katodia. Kaavoissa  $P$  tarkoittaa pitkäketjuista kerroksen muodostavaa ainetta,  $R$  aminoryhmää,  $R'$  hapanta aminoryhmää.



Tämän jälkeen kationinen sidosaine koaguloituu katodille liukenemattomaan muotoon sen reagoidessa elektrolyysissä syntyneiden hydroksidi-ionien kanssa. Vesi kulkeutuu ulos muodostuneesta kerroksesta elektro-osmoottisesti.

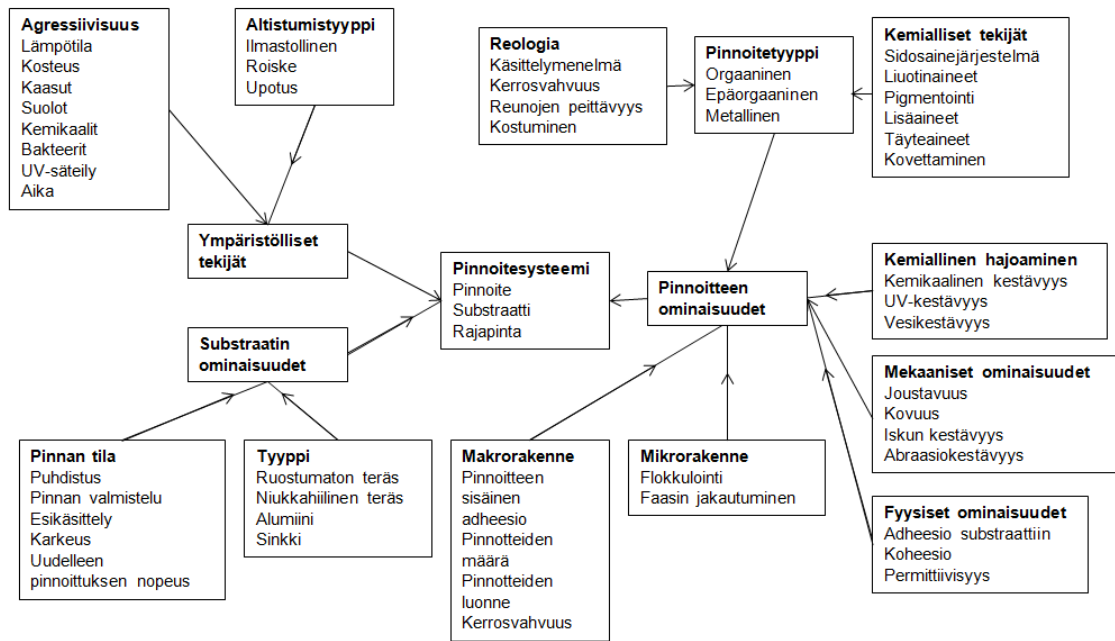


[51]

### 2.3 Korroosio sekä yleisimmät korroosiotyypit autoissa

Katodinen upotusmaalaus on yksi tärkeimmistä vaiheista korroosiosuojauksen kannalta. Korroosio ilmenee monin eri tavoin aina tuotantoprosessista käyttövaiheeseen. Auton kori koostuu pääosin teräksestä ja alumiinista, vaikka myös muovia, hiilikuitua ja magnesiumia käytetään pienemmässä mittakaavassa. Korroosio metalleissa on määritelty hajottavana, ei toivottuna elektrokemiallisena hyökkäyksenä metalliin. On arvioitu, että jopa 5 % teollistuneiden maiden tuloista käytetään korroosion torjuntaan ehkäisyä, huoltona ja korjauksina. Metalliatomit hapettuvat eli luovuttavat elektroneja, jolloin niistä tulee positiivisesti varautuneita ioneja. Hapettuminen tapahtuu anodilla ja siksi reaktiota kutsutaankin usein anodiseksi reaktioksi. [52]

Kuvassa 9 on esitetty korroosiolta suojaavaan pinnoitteeseen vaikuttavia tekijöitä. Käytettävä substraattityyppi vaikuttaa korroosio-ominaisuuksiin huomattavasti, mutta kustannuksista johtuen myös heikommin korroosiolta suojaavia materiaaleja käytetään, mikäli altistuminen korroosiolle on vähäisempää. Kuten jo aikaisemmin mainittiin, kullakin pinnoitteella on omat erityisominaisuutensa. Siksi pinnoitekerroksia on useita niin autoteollisuudessa kuin muillakin teollisuuden aloilla, joissa tuote altistuu korroosio-olosuhteille.

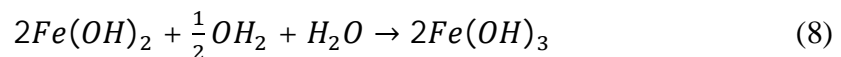
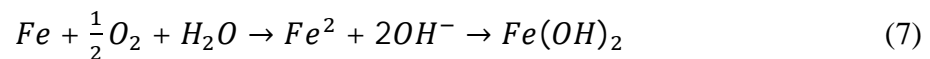


**Kuva 9.** Korroosiolta estävään pinnoitteeseen vaikuttavat tekijät. Piirretty lähteen [53] mukaan.

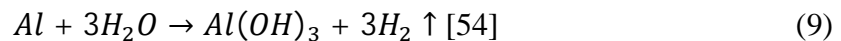
Yleisellä tasolla metallin hapettuminen tapahtuu alla olevan reaktion mukaisesti.



Rauta hapettuu ruosteeksi kahdessa vaiheessa reagoiessaan veden kanssa, johon on liuennut happea.



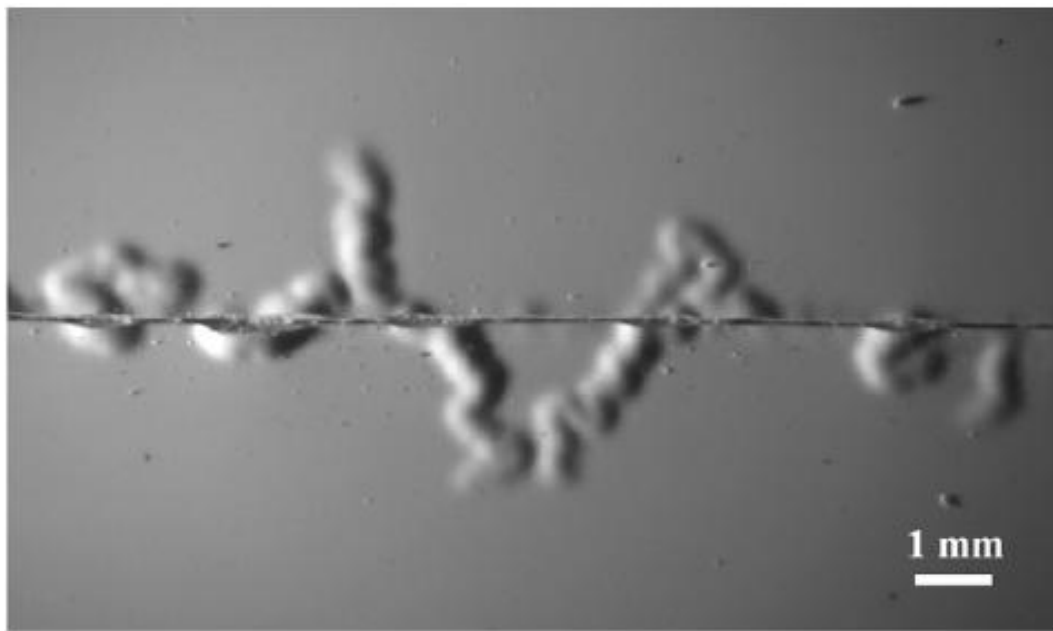
Syntynyt yhdiste  $Fe(OH)_3$  on ruostetta. [52] Alumiini hapettuu seuraavalla tavalla. Muodostunut oksidikerros suojaa alumiinia hyvin ruostumiselta.



Autoteollisuudessa käytettävät teräslevyt ovat kuuma- tai sähkögalvanoituja. Epäjalompi sinkki toimii pinnalla uhrautuvana metallina suojaten teräslevyä korroosiolta. Samalla galvanointi parantaa osien liitettävyyttä ja maalattavuutta. Seuraavissa alakappaleissa on määritelty lyhyesti yleisimmät autoissa ilmenevät korroosion etenemistavat.

### 2.3.1 Filigraanikorrosio

Maalatuille alumiinilevyille tyypillinen ongelma on filigraanikorrosio (Filiform corrosion). Reaktio alkaa rikkoutuneelta maalipinnalta ja etenee sen alla muodostaen 0,1-0,5 mm levyisiä, joitakin millimetrejä pitkiä säikeitä, kuten kuvassa 10 on havainnollistettu. Korroosion syvyys on kuitenkin niin matalaa, enintään joitakin kymmeniä mikrometrejä, että haitta jää kosmeettiseksi. Kloridien vaikutuksesta etenevä reaktio toimii samalla tavoin kuin rakokorroosio. Kärjen korkea kloridipitoisuus aiheuttaa vähähappisen anodisen reaktion [54]. Happi ja vesihöyry diffundoiduu filigraanisäikeen hännästä. Ongelmaa esiintyy etenkin Pohjois-Euroopan rannikkoalueilla. [55] [56]



**Kuva 10.** Filigraanikorrosiota pintakäsitellyllä, naarmutetulla alumilevyllä DIN 65472 korroosiotestin jälkeen [57].

### 2.3.2 Galvaaninen korrosio

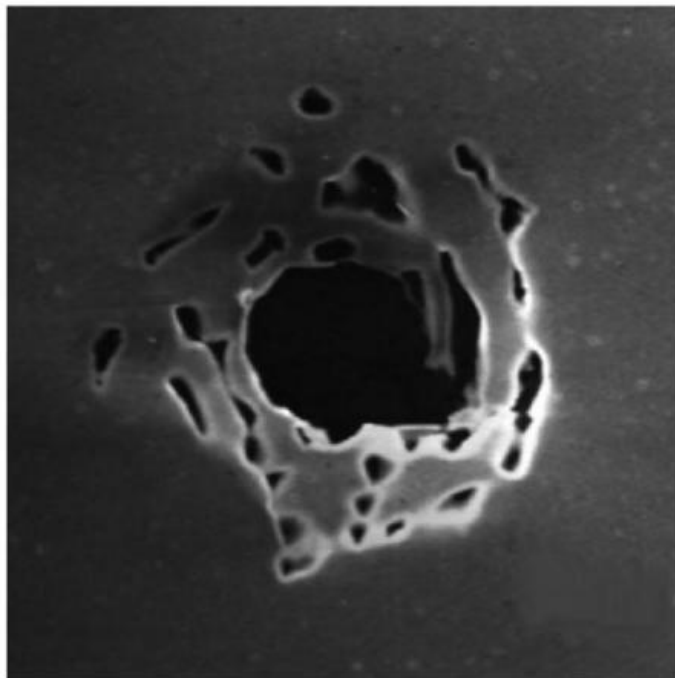
Galvaanista korrosiota (Galvanic corrosion) ilmenee, kun kaksi metallia, joilla on eri sähköpotentiaali, joutuu kosketuksiin toistensa kanssa elektrolyytin läsnäollessa. Metalleista muodostuu anodi-katodipari, joista anodina toimiva epäjalompi metalli korrodoituu. Ilmiötä käytetään hyödyksi galvanoinnissa, jossa sinkillä pinnoitettu teräs suojataan sinkin toimiessa uhrautuvana anodina. [58] Ei toivotuissa tilanteissa vaikuttava tekijä on anodin ja katodin välinen pinta-ala. Mitä suurempi katodinen ala, sitä nopeammin reaktio tapahtuu anodilla. [59]

### 2.3.3 Rakokorroosio

Rakokorroosio (Crevice corrosion) on paikallista ja ilmenee raoissa, joissa metalli ja muu aine, kuten puu, muovi tai kumi ovat kiinni toisissaan. Elektrolyytti kulkeutuu hitaasti rakoön ja korroosioreaktiot kuluttavat hapen raoista, jolloin ulkopuolesta tulee happirikkaampi. Ulkopuolisesta metallista, joka on kosketuksissa happirikkaaseen tulee katodi. Vähähappiseen sisäpuolen metallista muodostuu anodi. Yleisimpiä paikkoja ovat liitoskohteet, joissa on ruuveja, muttereita tai nittejä. Anodi reagoi elektrolyytin kanssa luovuttaen positiivisia metalli-ioneja. Metallionit muodostavat suojoja negatiivisten ionien kuten kloridin kanssa, jotka puolestaan reagoivat veden kanssa muodostaen metallihydroksideja ja happoja. Tämä laskee veden pH:ta, joka huomattavasti nopeuttaa reaktiota. [59]

### 2.3.4 Pistekorroosio

Pistekorroosio (Pitting corrosion) on paikallista korroosiota, jossa pieni alue hapettuu muodostaen reikiä tai koloja kuvan 11 mukaisesti. Reaktion edellytyksenä on se, että metalli on passivoituneessa tilassa. Pistekorroosiota ilmenee alueilla, joissa metallia suojaava kerros on rikkoutunut, paikalla on halogeeni-ioneja kuten kloridia sekä olosuhteet ovat muuttumattomat pitkän aikaa. Syöpyminen muodostuu metallin raerajoille pitkän ajan kuluessa. Voi kulua kuukausia tai vuosia ennen kuin korroosio on silmin havaittavissa. [60]



**Kuva 11.** 1000-kertainen pyyhkäisyelektronimikroskooppikuva pistekorroosiosta metallilevyllä [61].

### 2.3.5 Ilmastollinen korroosio

Aiemmin mainitut korroosiotyypit ovat paikallisia, mutta ilmastollinen korroosio (atmospheric corrosion) jakautuu tasaisesti altistuneelle metallille. Ilmastolliseen korroosioon vaikuttavat ympäristölliset tekijät, jotka vaihtelevat suuresti eri maittain. Korroosiota nopeuttavia tekijöitä ovat ilman suola- tai rikki-pitoisuus, sateen määrä, ilman kosteus ja lämpötila. Ilman suolapitoisuutta nostaa meren läheisyys ja maan pinnan korkeus. Metsät ja vuoret toimivat puolestaan esteenä tuulelle, joka tuo mereltä suoloja. Ilman rikki-pitoisuuteen vaikuttavat teollisuuden ja liikenteen päästöt. Sateen määrä on vaikuttava tekijä, kuin myös korkea lämpötila yhdistettynä korkeaan ilman kosteuteen. Korroosioreaktio pysähtyy lämpötilan laskiessa nollan alapuolelle. Tuuli ja aurinko sekä hidastavat, että nopeuttavat ilmastollista korroosiota. Tuuli tuo suoloja mereltä, mutta toisaalta kuivaa kastuneet pinnat. Aurinko toimii myös kuivaavana tekijänä, mutta UV-valo vahingoittaa suojaavaa maalipintaa. [62]

## 2.4 Ongelman asettelu

Katodisessa upotusmaalauksessa maalikerrokset muodostuvat ympäri auton koria ensin alueilta, jotka ovat lähimpänä anodikennoja. Kerrosten kasvaessa maali alkaa eristämään pintaa, jolloin maalikerroksen muodostuminen jatkuu maalautumattomille alueille koteloihin ja kattoa kohti. Maalikerroksesta tehdyt mittaukset osoittavatkin, että suurimmat kerrosvahvuudet ovat alustan ja sivujen alueilla lähimpänä anodikennoja ja ohuimmat kerrokset löytyvät katosta ja etuluukun takareunasta. Epätasaisen jakauman voidaan siis olettaa johtuvan kerrosten muodostumisesta anodia lähimpänä olevia alueita

Toinen mahdollinen oletus on maalin kiintoainepartikkelien laskeutuminen [63]. Voidaan siis olettaa, että kiintoainetta on enemmän maalialtaan pohjalla. Matalammat kerrosvahvuudet katolla voisivat johtua siis matalammasta partikkelitiheydestä altaan pintaosissa. Partikkelitiheys voidaan tarkistaa ottamalla näytteet kiintoainepitoisuudesta sekä altaan pinnalta.

Muita syitä ohuelle kerrosvahvuudelle voivat olla auton korin huono kontaktointi kuljettimen johtimiin, viallinen tasasuuntausyksikkö, riittämätön elektrodipinta, pinta-alaltaan liian suuri maalattava kohde, matala jännite, matala lämpötila tai riittämätön maalaus aika [64]. Nämä ongelmat eivät kuitenkaan ilmenisi paikallisesti.

Asiakkaan edellyttämät vaatimukset asettavat maalin kerrosvahvuuksille ala- ja ylärajat. Tästä johtuen katon ja etuluukun ohuimmat alueet määrittävät prosessin asetusparametrit. Näille alueille tulee saada riittävästi maalia, jolloin muut alueet kuluttavat huomattavasti enemmän maalia. Maalin kulutus on vuositasolla satoja tuhansia litroja. Mikäli kerrosvahvuuksien jakaumaa saataisiin tasoitettua,

saavutettaisiin huomattavia säästöjä. Jo prosentin säästö maalin kulutuksessa riittää maksamaan investoitavat laitteet takaisin vuodessa 50 000 auton valmistustahdilla.

Kerrosvahvuuksien tasaisempaan jakautumiseen on saatu neuvoja sekä Valmet Automotiven, että yrityksen ulkopuolisilta asiantuntijoilta. Lisäksi prosessin optimoimiseksi on tehty monimuuttuja- ja yksittäismuuttujakokeita, joista jälkimmäisistä onkin saatu positiivisia joskaan ei riittäviä tuloksia. Prosessiparametreistä kerrosvahvuuksien kasvuun vaikuttaa pH-pitoisuuden nostaminen, johtokyvyn nostaminen, liuotinpitoisuuden nostaminen ja jännitteen nostaminen. Taulukosta 1 havaitaan, että kerrosvahvuuksia nostavat parametrit voivat myös laskea tunkeumaa. Tunkeumalla mitataan koteloiden maalautuvuutta ja se on olennainen osa korroosiosuojausta.

*Taulukko 1. Prosessiparametrien vaikutus kerrosvahvuuksiin ja tunkeumaan.*

Toimenpide	Kerrosvahvuus	Tunkeuma
Maalilämpötilan nosto	+	+
Anodikennojen jännitteen nosto	+	+
Maalikylyn pH:n nosto	+	-
Maalikylyn johtokyvyn nosto	+	-
Liuotinainepitoisuuden nosto	+	-

Tiedossa olevia laitteistoa kehittämällä tehtäviä parannuksia on tiedossa kolme. Anodikennojen määrää tai paikkaa muuttamalla voidaan vaikuttaa kerrosten jakaumaan. Anodikennoja voidaan peittää eristemateriaaleilla niillä alueilla, joissa kerrosvahvuudet ovat muita alueita suuremmat. Maalattaviin kohteisiin voidaan kiinnittää niin sanottuja pois heitettäviä osia eli varkaita, jotka keräävät osan maalista niiltä alueilta, joissa maalia on liikaa. Varkaiden käyttö ei ole realistinen vaihtoehto, sillä perimmäinen tavoite tasaisten kerrosvahvuuksien saamiseksi on säästää maalin kulutusta.

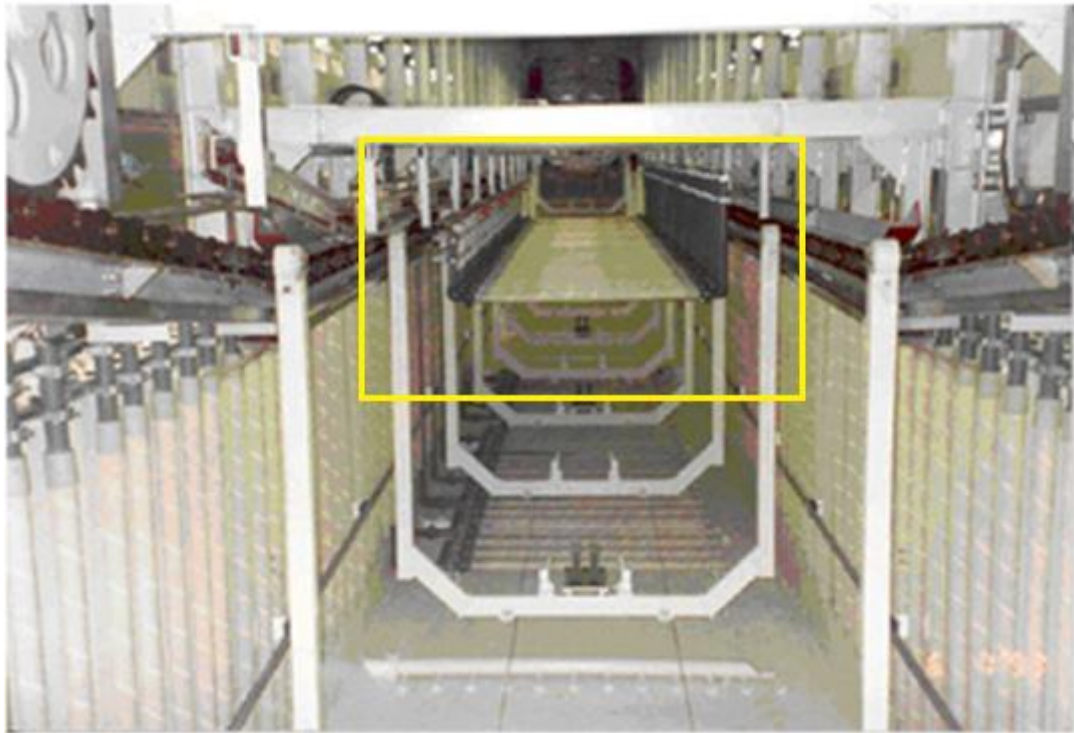
Muutosten vaikutusta on mahdollista simuloida mallinnusohjelmistojen avulla [65]. Useat autovalmistajat käyttävätkin simulointia upotusmaalauksen prosessin asetusten mallintamiseen etukäteen sekä tuotantotestauksen nopeuttamiseen [66]. Simuloinnin toteutus osana tätä diplomityötä olisi kuitenkin liian laaja-alainen tehtävä.

Prosessin optimiasetusten kartoittamiseen on kehitetty myös auton koriin kiinnitettävä, upotettava mittalaite, jonka avulla saadaan tietoa olemassa olevan laitteiston kunnosta ja asetuksista. Mittalaite mittaa jännitteen ja virran useasta eri kohdasta auton koria sen liikkeessa maalikylyn läpi. Mittalaite koostuu elektronisesta tallentimesta, piirilevystä, tiiviistä kotelosta, antureista ja johdoista. Sen avulla voidaan määrittää optimaalisia

parametrejä anodikennoille lineaarisen regression ja numeerisen menetelmän avulla. Saaduilla mittauksilla voidaan ottaa kantaa myös anodikennojen sijaintiin. [67]

Upotettavan mittauslaitteen käyttö on vakavasti harkittava vaihtoehto. Valmet Automotivella ei ole laitetta ollut, mutta se on saatu käyttöön aiemmin maalitoimittajalta. Mittaus voidaan suorittaa myös tuotannon aikana, mikä on merkittävä etu.

Eräs asiantuntijan ehdotus maalikerrosten tasaamiseksi oli anodikennojen asentaminen myös maalialtaan pinnan läheisyyteen. Julkista tietoa kyseisestä käytännöstä oli alustavan selvityksen perusteella vain vähän. Volkswagenin tehtaalla Meksikossa on yksi vastaava linja, joka on esitetty kuvassa 12 [65]. Valmet Automotiven upotusmaalausallasissa ei vastaavia pinnassa sijaitsevia anodiputkia ole kuten kuvassa 13 on havainnollistettu.



**Kuva 12.** Katodinen upotusmaalausallas, jossa on käytössä pinta-anodikennot (rajattu keltaisella) [65].



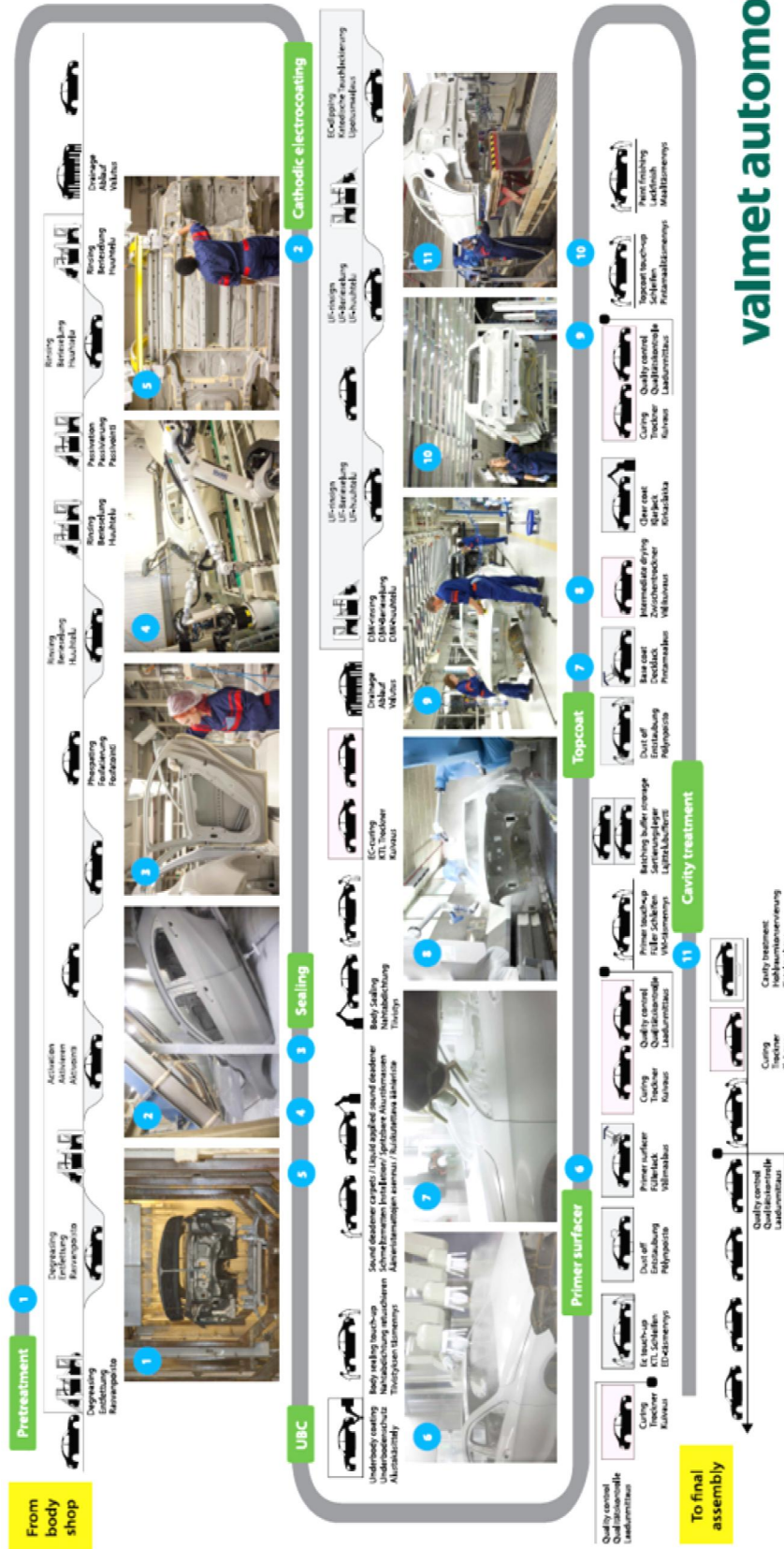


*Kuva 13. Valmet Automotiven upotusmaalauksella*

Asiantuntijaverkoston kautta kuultiin, että ainakin PSA, Toyota, Renault, Fiat sekä IVECO olisi jossain vaiheessa käyttänyt maalikylvyn pinnalle asennettuja anodikennoja. Saksassa, Belgiassa sekä Isossa Britanniassa olisi kussakin tällä hetkellä vähintään yksi autoteollisuuden tuotantolinja, jossa on anodikennoja maalialtaan pinnalla, mutta kyseiset linjat olisivat niin sanottuja RoDip-linjoja. [68] RoDip-linjoissa auton kori kääntyy ylösalaisin maalauksen aikana, jolloin päästään eroon katvealueista. Perinteisellä kuljetinlinjalla katvealueisiin saattaa jäädä maalautumattomia paikkoja, kun koteloihin jää ilmaa. RoDip-linjoissa idea pinnalla olevista anodikennoista on kuitenkin sama, mutta ongelma-alue voi olla päinvastainen, koska auton kori on ylösalaisin.

## **2.5 Valmet Automotiven maalausprosessi**

Valmet Automotiven maalaamo käsittää yhteensä yli 40 eri käsittelyvaihetta. Maalausprosessi on esitetty kuvassa 14. Maalaamo kykenee valmistamaan samanaikaisesti eri tuotteita. Kirjoitushetkellä valmistuksessa oli vuodesta 2013 lähtien tuotettu Mercedes A-sarja. Lisäksi Mercedes GLC-malli oli tulossa valmistukseen vuoden 2017 alusta lähtien. Aikaisempia valmistettuja automalleja ovat muun muassa useat Saab-mallit, Opel Calibra, Porsche Boxter ja Cayman [69].



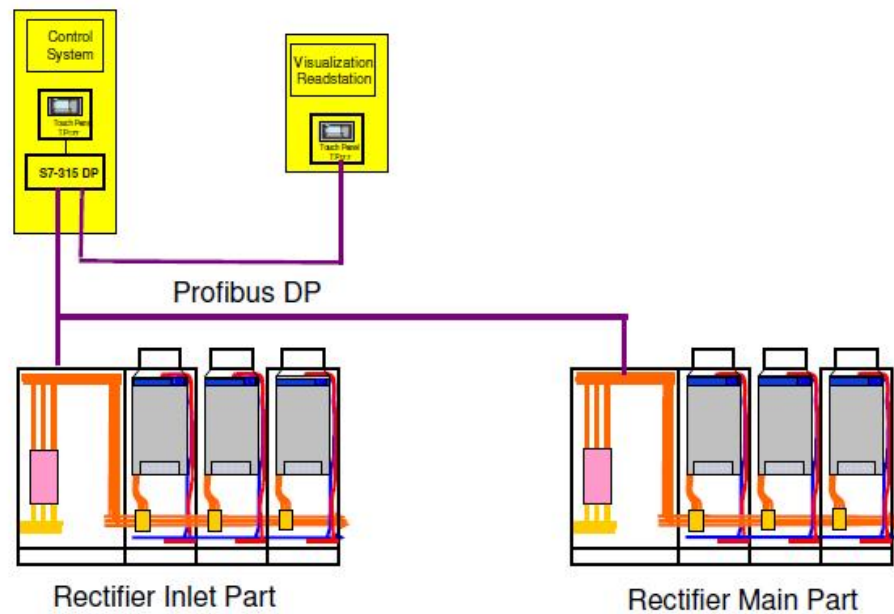
Valmet Automotiven katodinen upotusmaalaukslaitos on rakennettu vuonna 1992 Dürr GmbH:n toimesta yhdessä esikäsitteilylaitoksen ja näiden yhteyteen kuuluvan ioni- ja jäteveden käsitteilylaitoksen kanssa. Vastaava prosessi on ollut aikaisemmin käytössä pienemmässä mittakaavassa. Laitoksen teoreettinen kapasiteetti on 100 000 auton koria vuodessa.

Katodista upotusmaalauksista edeltää esikäsitteily, joka sijaitsee samoissa tiloissa. Auton kori puhdistetaan ja fosfatoidaan, jolloin osien pintaan muodostuu kidemäinen sinkkifosfaattirakenne maalikerroksen kiinnittymisen helpottumiseksi.

Katodisen upotusmaalauksprosessin päävaiheet koostuvat upotusmaalauksaltaasta, ultrafiltraattia kierrättävästä ruiskutushuuhtelusta, kahdesta ultrafiltraattia kierrättävästä upotushuuhtelusta sekä ionivesiruiskutushuuhtelusta. Upotusmaalauksen jälkeinen vaihe on uunitus, jolloin maali silloittuu kovaksi kerrokseksi auton korin pintaan muodostaen tehokkaan korroosiosuojan. Altaisiin liittyy pumppuja materiaalin kierrättämiseksi, suodatusyksiköitä nesteiden puhtaana pitämiseksi, ultrafiltraattiyksikkö maalin suodatukseen sekä anolyyttijärjestelmä hapon kuljettamiseksi maalauksaltaasta.

Hitsaamosta kokoonpanon rengasasennukseen asti auton korit kulkevat prosessivaiheesta toiseen hitsaamossa asennettujen jalaksien päällä. Esikäsitteilylaitoksella jalaksien alle kiinnittyy teräskelkat, joiden avulla auton kori lukittuu riippukuljettimiin. Maalauksaltaassa on 12 anodikennoa. Laatikkomaiset anodikennot sijaitsevat altaan sivuissa, kaksi putkimaista anodikennoa on asennettu altaan pohjan loppupäähän. Henkilöturvallisuuden vuoksi pääsy maalikylyyn alueelle on eristetty työntekijöiltä tuotannon aikana.

Anodeihin kytketyt tasasuuntausyksiköt on otettu käyttöön vuonna 2010. Tasasuuntausyksiköitä on 12 kappaletta ja ne ovat yhteydessä kahteen 20 kV muuntajaan. Laitteistoa ohjataan kahdelta eri ohjauspaneelilta, joista toinen sijaitsee ohjauskeskuksella ja toinen upotusaltaan vieressä auton korimallin tunnistusasemalla kuvan 15 mukaisesti. Ohjauskeskukselta voidaan säätää kunkin anodikennon virrat, nousuajat ja jännitteet erikseen. Tyypillinen asetusohjelma on esitetty taulukossa 2. Anodikennot on jaettu kolmeen ryhmään, jotka vuorotellen käynnistyvät auton korin edessä maalialtaassa. Ensimmäisessä ryhmässä jänniteohjelma on kaksiosainen ja nousee vaiheittain. Eri tuotteille ja niiden umpi- ja avomalleille voidaan ohjelmoida omat ohjelmansa. Haluttu malli tunnistetaan mittaamalla auton korin korkeus etäisyysanturin avulla maaliallasta edeltävällä kuljettimella. Tunnistusohjelmia on mahdollista ohjelmoida yhteensä kymmenen.

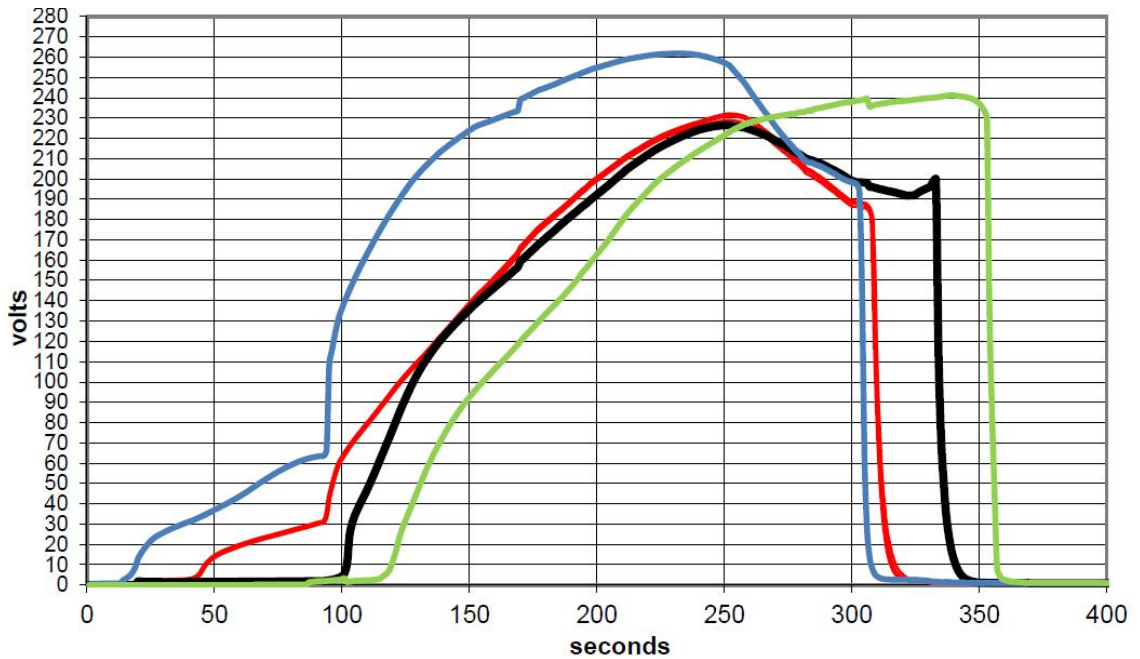


*Kuva 15. Skemaattinen kaavio tasasuuntausyksiköstä [70].*

*Taulukko 2. Esimerkki katodisen upotusmaalauksen jännite- ja virtaohjelmasta [70].*

Anodi-kenno-pari	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Jännite (V)	90/ 210	90/ 210	90 /210	250	290	320	340	340	340	340	340	340
Virta (A)	125/ 90	125/ 90	125/ 90	70	80	80	70	60	60	60	50	10
Nousu-aika (s)	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Vaiheittainen nousu on havainnollistettu kuvassa 16, joka on mallinnettu maalikylyvästä, maalitoimittajalta peräisin olevalla upotettavalla mittalaitteella. Seuraamalla sinistä eli auton etuluukun jännitekäyrää voidaan havaita hyppäykset noin 95 ja 170 sekunnin kohdalla. Näissä kohdissa jänniteohjelmassa käynnistyy uusi vaihe. Sinisestä käyrästä näkyy myös selkeimmin maalin eristekerroksen kasvu välillä 250-300 sekuntia. Tuolloin jännitearvot alkavat laskea maalin eristäessä metallipintaa. Tämän jälkeen auton kori nousee maalikylyvästä, joka on nähtävissä jyrkkänä pudotuksena jännitearvoissa.



**Kuva 16.** Jännitekäyrät ajan funktiona auton korin eri osissa. Punainen käyrä on oveen, musta lattian keskiosaan, sininen etuosaan, vihreä katon takaosaan kiinnitetty anturi [71].

Käytettävä maali koostuu kahdesta pääkomponentista, sidosaineesta ja väriaineesta. Materiaalin annostelu tapahtuu automaattisesti perustuen anodikennojen kuluttaman sähkövirran määrään. Annosteltava sidosaineseos koostuu päähartsista, alahartsista, muovin pehmentäjästä, tensideistä, hapoista sekä liuottimista. Päähartsin tehtävä on muodostaa maalikerros, alahartsin toimii silloittajana, muovin pehmentäjä tekee maalista joustavampaa, tensidit vähentävät maalin vaahtoamista, hapot liuottavat maalia ja liuottimet parantavat maalin virtausominaisuuksia.

Väriaineseos koostuu vesiliuokseen sekoitetusta hartsista, pigmenteistä, katalyytistä, tensideistä, hapoista sekä liuottimista. Hartsi koostuu samasta materiaalista kuin sidosaineen hartsi ja toimii dispersioaineena. Pigmentit toimivat täyteaineina, kraateriherkkyyden vähentäjinä ja värin muodostajina. Pigmenttejä maalissa ovat alumiinisilikaatti, titaanidioksidi sekä hiili. Katalyytin tehtävä väriaineseoksessa on nopeuttaa maalin kuivumista. Tensidien, happojen ja liuottimien tehtävät ovat samat kuin sidosaineessa.

Pääkomponenttien lisäksi maaliin lisätään säännöllisin väliajoin neutralointiainetta pH:n säätämiseksi, joka on sulfamiini-, maito- tai etikkahappoa. Lisäksi liuottimia, kuten butyyli glykolia ja fenoksipropanolia, lisätään kylpyyn tarpeen mukaan. Biosidejä lisätään säännöllisin väliajoin bakteeriongelmien ehkäisemiseksi sekä tilanteissa, joissa bakteeritulokset viittaavat suureen bakteerimäärään. Merkkejä bakteerihaitoista ovat kylpyyn maito- ja etikkahappopitoisuuden laskeminen radikaalisti bakteerien alkaessa

hajottamaan niitä, maalin pH:n muuttuminen hallitsemattomasti tai kerrosvahvuuksien hallitsemattomat muutokset.

## 2.6 Laadunvalvonta Valmet Automotivella

Katodisen upotusmaalauksen ja sitä edeltävien prosessivaiheiden laadunvalvonta suoritetaan laaja-alaisesti. Laadunvalvonta jakautuu prosessin arvojen seuraamiseen, tuotteen mittaamiseen sekä tuotteen ja testilevyjen korroosiokestävyyden testaamiseen laboratorio-olosuhteissa. Laadunvalvontaa suorittavat materiaalitoimittajan laboratorio, Valmet Automotiven materiaalilaboratorio, maalaamon laatuosasto sekä esikäsittelylaitoksen operaattorit. Laadunvalvontaa sanelevat autoteollisuuden standardi (ISO/TS 16946), asiakkaan asettamat vaatimukset sekä ympäristömääräykset.

Upotusmaalauksilyvyn osalta mitataan päivittäin pH, johtokyky sekä kaksi kertaa viikossa happamuus (Meq), maalin kiintoainepitoisuus ja sidosaineen ja väriaineen välinen suhde. Tämän lisäksi materiaalitoimittajan laboratorio mittaa liuottimina käytettävien butyyli glykolin ja fenoksiopropanolin pitoisuudet sekä maito- ja etikkahappopitoisuudet kahden viikon välein. Ultrafiltraatista ja anolyytistä mitataan pH ja johtokyky päivittäin sekä happamuus (Meq) kaksi kertaa viikossa. Lisäksi anolyytistä mitataan klooripitoisuus joka toinen viikko. Ionivedestä mitataan päivittäin johtokyky.

Bakteeripitoisuuksia mitataan ATP- ja Heipha Dip-slide -menetelmillä kerran kuukaudessa Valmet Automotiven materiaalilaboratorion ja ulkoisen laboratorion toimesta. Mitattavat kohteet ovat esikäsittelyn viimeinen huuhtelu, anolyytti, ionivesi, ultrafiltraatti ja maali. Ulkoinen laboratorio mittaa myös homeen ja hiivan pitoisuuksia.

Tuotteen ominaisuuksia seurataan mittaamalla tuotteesta maalin kerrosvahvuutta, karkeutta, tunkeumaa sekä kiiltoa tähän soveltuvin mittalaittein. Tämän lisäksi maalipinnan virheitä tarkastellaan visuaalisesti jokaisessa tuotantovuorossa otoksen omaisesti. Ominaisuuksista seuratuin on kerrosvahvuus. Sitä seurataan sekä prosessin hoitajien että laatuosaston laadun mittaajien toimesta. Kerrosmittarit mittaavat sinkkipinnoitetuissa teräsosissa materiaalin paksuuden teräkseen asti. Koska sinkin kerrospaksuus eri alueilla voi vaihdella, prosessinhoitajat mittaavat myös sinkkikerroksia säännöllisen väliajoin.

Valmet Automotiven laboratoriossa testataan korroosiokestävyyttä standardoiduista testilevyistä sekä tuotanto-osista. Korroosiotestit kestävät yhdestä tunnista vuoteen metodista riippuen. Kokeet suoritetaan sekä alumiinille, että sinkitylle teräkselle. Testattavia metodeja ovat muun muassa kiinnipysyvyys-, venyvyys-, taivutus-, kosteuskestävyys-, suolasumu-, syklinen ja vuoden kestävä säättesti. Testejä suoritetaan lakkapinnalta sekä kaikilta kolmelta maalikerrokselta. Korroosiotestit on listattu taulukkoon 3.



**Taulukko 3.** Valmet Automotiven korroosiotestit katodiselle upotusmaalikerrokselle [70].

<b>Testi</b>
Kerrosvahvuus
König-kovuus Vakiointiaika 1h (23°C / 50 % r.h.)
Kiinnipysyvyys Vakiointiaika 16h (23°C / 50 % r.h.)
Raapaisutesti. Vakiointiaika 1h (23°C / 50 % r.h.)
Venyvyydestesti (Erichsen) Vakiointiaika 16h (23°C / 50 % r.h.)
Taivutustesti
Kosteuskestävyys DIN EN ISO 6270-2 CH / 240 h
Korroosiokestävyys, suolasumu DIN EN ISO 9227 NSS, 504 h
Korroosiokestävyys, suolasumu, PVC-kiila 0-500 µm DIN EN ISO 9227 NSS, 840 h
Korroosiokestävyys, syklinen DIN EN ISO 11997-1, sykli B, 10 sykliä
CASS-korroosiotesti DIN EN ISO 9227 CASS, 240 h
Säänkestävyys MBN 10494-6, 12 kk. Väliarvostelu 6 kk:n kohdalla Ruiskutus 1x viikossa 3% NaCl-liuoksella

Esikäsitellyistä eli fosfatoiduista testilevyistä kuvataan ja arvioidaan SEM-kuvat ulkoisen laboratorion toimesta kerran kuukaudessa. Sama laboratorio suorittaa EDX-analyysin samoista levyistä joka toinen kuukausi. Tuote- ja prosessimuutosten yhteydessä suoritetaan tehostettu laadunvalvonta, joka vaihtelee muutoksen laajuudesta ja asiakasvaatimuksista riippuen.

## 2.7 Laitteiston hankinta

Anodikennoja on useita eri tyyppejä. Valmet Automotive käyttää Dürrin toimittamia levymäisiä teräksisiä anodikennoja sekä lattiassa putkimaisia iridiumilla pinnoitettuja titaanisia anodikennoja. Teräslevyt sisältävät yli 17 % kromia, jonka ansiosta levyt

passivoituvat itsestään muodostaen kestävästä korroosiosuojan. Titaani pinnoitettuna katalyyteillä on liukenematon anodimateriaali, jolla on erinomainen korroosiokestävyys. Titaani muodostaa suojaavan oksidikerroksen reagoiessaan veden tai ilman kanssa ja anodinen virta vain vahvistaa sitä. Katalyyttiä tarvitaan, jotta materiaali johtaa virtaa. [72]

Altaan sivuilla olevissa anodikennoissa on ympärillä membraanikalvo, joka eristää anodilla käytön aikana muodostuvan hapon maalialtaasta anolyyttijärjestelmään. Titaanisissa pohjakennoissa ei ole membraanikalvoa. Anolyyttijärjestelmä viemäri hapon johtokyvyn nousun mukaan ja korvaa tyhjennetyin aineen ionivedellä. Mikäli anodikennoja käytetään ilman membraaneja, virtaa tulee rajoittaa, sillä prosessiin muodostuvaa happoa ei saada poistettua riittävän tehokkaasti maalialtaasta.

Laitteiston hankinnan selvitystyö aloitettiin tiedustelemalla anodikennosovelluksia ensin nykyiseltä laitosrakentajalta (Dürr) sekä internetistä löytyvistä laitetoimittajien sivuilta. Valmet Automotiven katodisen upotusaltaan pohjalla 2000-luvun alussa hankitut, lattiaan asennetut anodikennot olivat tyypiltään mahdollisesti sovellettavissa myös altaan pinnalle. Näiden hankintatietojen perusteella saatiin muodostettua hinta-arvio jo ennen tarjousten pyytämistä laitteista. Vastaavien putkien hankintaa puosi myös se, että jos sovelluksen käyttöönotosta ei havaittaisi mainittavaa hyötyä, voitaisiin anodikennot varastoida varaosiksi.

Valmet Automotiven toimittajista BASF sekä PPG tarjosivat informaatiota laiteratkaisuvaihtoehtoista sekä mahdollisista toimittajista. Kumpikaan yritys ei valmista laitteita, mutta toimittaa käytettäviä maaleja. Tiedossa olevat laitetoimittajat olivat UFS (Yhdysvallat), Membracon (Iso Britannia), EKK (Kiina), Dürr (Saksa), Alcore (Kanada) sekä Koch (Yhdysvallat). Näistä vaihtoehtoista Membraconilta ja Dürriltä pyydettiin tarjousta ratkaisuun kerrosvahvuuksien jakautumisen kehittämiseksi.

Tarjoukset laiteratkaisuista rajattiin eurooppalaisiin toimittajiin toteutusaikataulusta johtuen. Membraconin tarjous oli erittäin kilpailukykyinen. Laitteisto päätettiin tilata kuitenkin Dürriltä, sillä tuote oli jo käytössä upotusaltaan pohjalla. Tästä johtuen tuotteen luotettavuudesta, käytöstä ja asennettavuudesta tiedettiin jo ennalta. Lisäksi tilaamalla käytössä oleva tuote säilytettiin samalla optio osien käytöstä varaosiksi. Tilaukseen sisältyi osa tarvittavista kaapeloinneista sekä putkien kiinnikkeistä.

Kiinnitysratkaisut ja sähköasennukset päätettiin suorittaa hyödyntäen yrityksen ja osaston sisäistä osaamista. Lisäksi etukäteen tilattavia materiaaleja olivat anolyttikennojen virtajohtojen riviliittimet. Maalaamon kunnossapidon kanssa laadittiin suunnitelma asennuspaikasta, tarvittavista välineistä sekä aikataulusta.



### 3. TYÖN TAVOITTEET JA KÄYTETTÄVÄT METODIT

Työn tavoitteena oli saada tasattua kerrosvahvuuksien jakautumista auton korin ympärillä. Tämä päätettiin toteuttaa asentamalla upotusmaalikylvyn pintaan anodikennot. Kerrosvahvuuksien tasaisen jakautumisen mittaaminen suoritettiin käytettävissä olevilla mittareilla tuotannon metodein. Tuotannossa mittatulos lasketaan aina kussakin mittapisteessä kolmen mittauksen keskiarvosta, jolloin minimoidaan mittalaitteesta ja mittaajasta aiheutuva epätarkkuus. Näin tehtiin myös tässä diplomityössä, mittaajana toimi työn kirjoittaja.

Lähtötilanteen selvittämiseksi kustakin tuotannon mittapisteestä suoritettiin 30 mittausta. Näitä voitiin verrata työn loppuvaiheessa tehtyjen muutosten jälkeen tehtyihin mittauksiin, jotka suoritettiin samoin metodein. Suunnitelmana oli todentaa muutosten vaikutus t-testauksella. T-testauksen avulla voidaan tutkia tilastollisesti kahden eri näytteen keskiarvon eroa [73].

Kaikki prosessissa tapahtuvat muutokset kirjattiin lähtötilannemittauksesta lähtien ja niiden vaikutukset arvioitiin. Käytettyjen mittarien mallit olivat sinkitylle teräkselle Elcometer 300 ja alumiiniosille Phynix. Kummatkin mittarit antavat tulokset mikrometrin kymmenyksen tarkkuudella sekä laskevat keskiarvomittaukset automaattisesti. Tiedot kirjattiin käsin.

Oletetuista tekijöistä myös kiintoaineen laskeutuminen tarkastettiin. Tämä tehtiin ottamalla näyte altaan pinnalta sekä normaalista näytteenottopaikasta altaan pohjalta. Mittatulokset kiintoaineen osalta olivat 22,26 % pinnalla ja 22,15 % pohjalla. Mitattu ero ei missään tapauksessa ollut merkittävä ja lisäksi se oli päinvastainen kuin oletettiin.

Riskinkartoitus tehtäviin muutoksiin päätettiin suorittaa autoteollisuuden standardin mukaisesti käyttämällä FMEA-menetelmää (Failure Mode and Effect Analysis). Menetelmän tehtävänä on ehkäistä tai minimoida riskit tunnistamalla ja pisteyttämällä niiden vakavuus, todennäköisyys ja havaittavuus. Pisteytysten perusteella määritetään ehkäisevät toimenpiteet ja lasketaan jäännösriski. Arviointi ja toimenpiteet tuli suorittaa ennen muutosten käyttöönottoa [74].

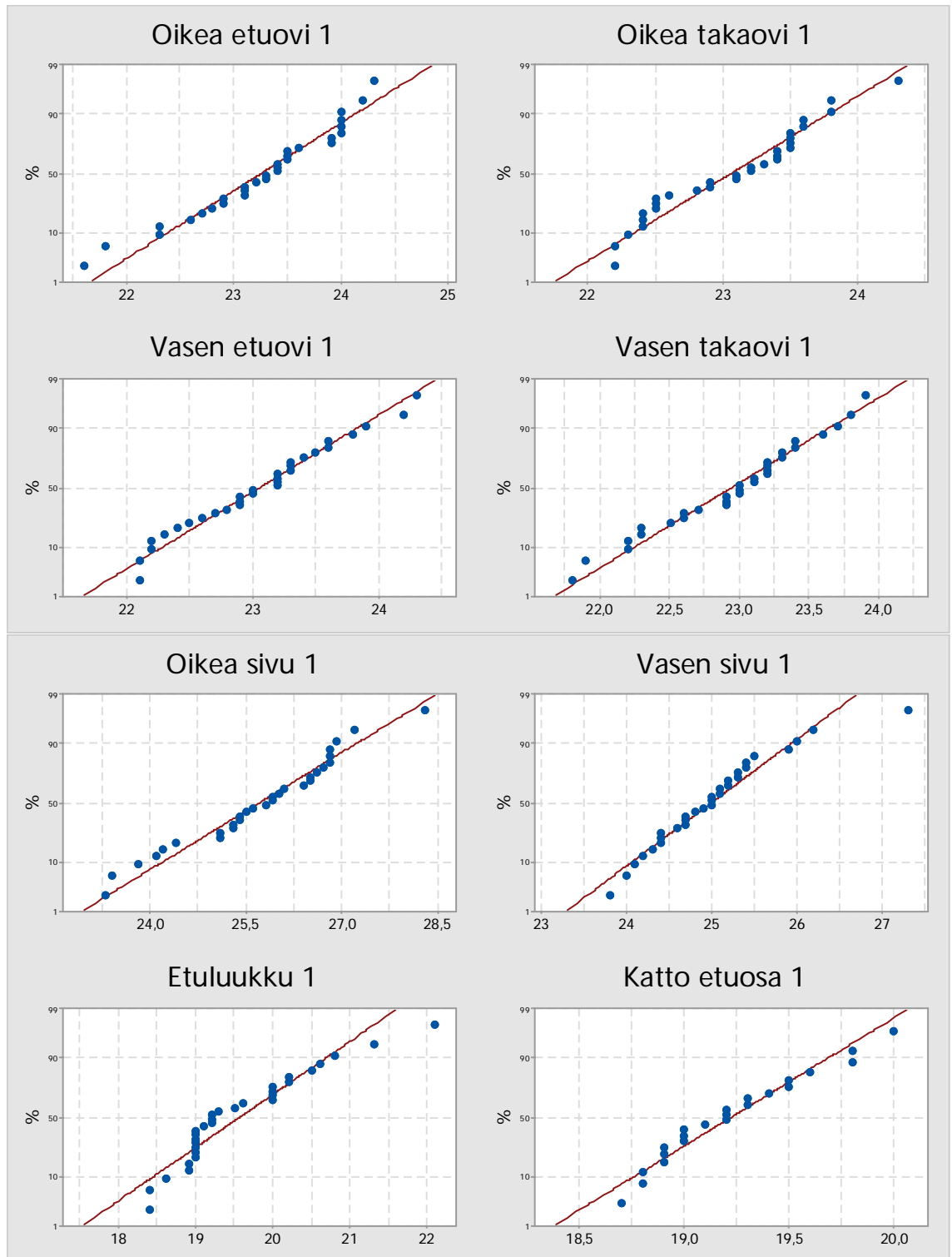
#### 3.1 Lähtötilanne

Muutosta edeltävä tuotantokorien mittaus suoritettiin 14.1.-19.1.2016 välisenä aikana. Mittatulokset on esitetty liitteessä A. Mittaukset kirjattiin kaikista mittapisteistä, mutta

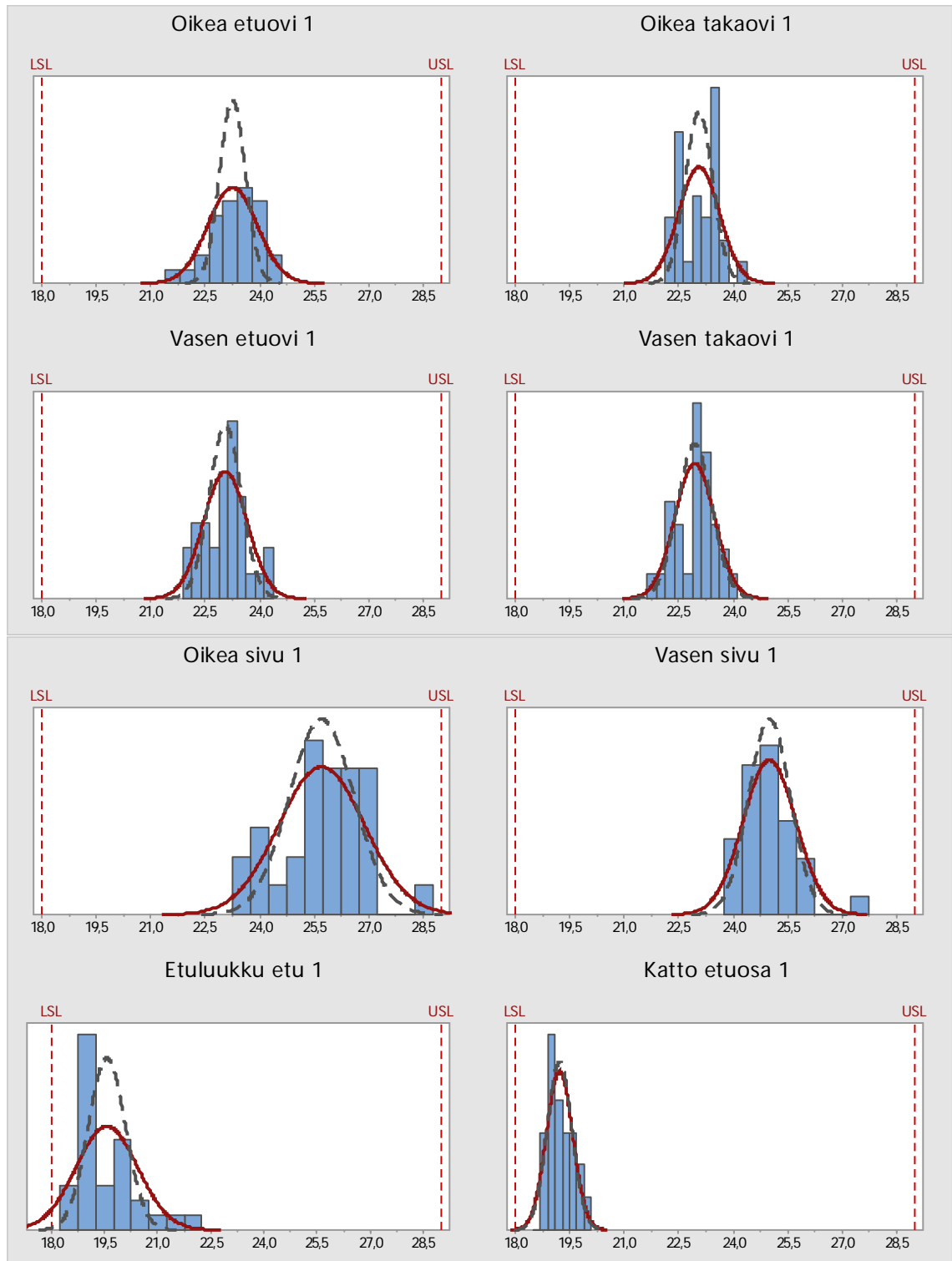
lähempään tarkasteluun valittiin kahdeksan mittapistettä, jotka olivat auton etu- ja takaovet, sivut, etuluukku sekä katon etuosa. Tarkastelluille arvoille suoritettiin ensin normaalisuustestit Andersson-Darlingin metodina. Anderson-Darling normaalisuustesti vertaa mittatuloksia teoreettiseen normaalijakaumaan hyödyntäen samaa näytekokoa, keskiarvoa ja standardipoikkeamaa. Normaalijakauman selvittäminen on tärkeää, sillä se tulee ottaa huomioon t-testauksessa. Nollahypoteesina oli, että mittaukset ovat normaalijakautuneita. Alfa-lukuna käytettiin arvoa 0,05, jolloin P-arvon ollessa alle 0,05 hylätään nollahypoteesi. Nollahypoteesi hylättiin etuluukun osalta. Muut mittapistet olivat normaalisti jakautuneita. Käsitellyt mittapistet on esitetty kuvassa 17 suhteessa normaalijakaumaan.

Seuraavaksi mittapisteille suoritettiin prosessin suorituskykyanalyysit. Suorituskykyanalyysissä normaalijakauma on piirretty taustalle ja mittatulokset muodostettu histogrammiksi. Tulokset on havainnollistettu kuvassa 18. Suorituskykyanalyysin perusteella voitiin nähdä kerrosmittauspisteiden sijoittautuminen spesifikaatorajojen sisälle. Merkille pantavaa oli etuluukun ja katon etuosan kerrosmittauspisteiden sijoittautuminen spesifikaatioiden alarajalle. Samalla sivujen mittaukset sijoittuivat spesifikaatioiden ylärajalle. Ovien kerrosmittaukset puolestaan sijoittautuivat keskelle spesifikaatorajoja. Hajontaa mittatuloksissa eniten oli sivuissa ja vähiten katon etuosassa. Prosessin ohjauksen kannalta epätoivottavia seikkoja olivat mittapisteiden eriävät kerrosvahvuudet, toisin sanoen kerrosten jakauma ympäri auton koria. Toisena lievempänä ongelmana voitiin pitää melko suurta hajontaa oikeassa sivussa. Oikean sivun prosessin suorituskykyindeksi  $C_{pk}$  oli 1,23, jolloin todennäköisesti 1,4 % kerrosvahvuuksista ylittää toleranssirajan.

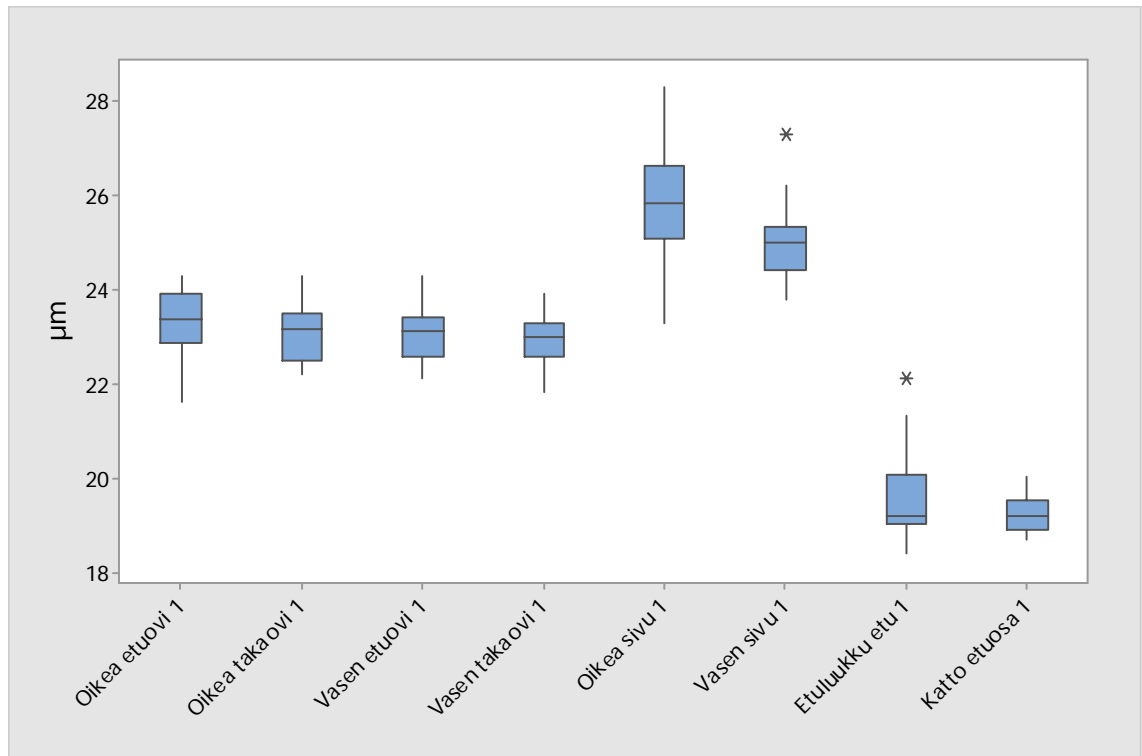
Kerrosvahvuuksien välinen ero on myös havainnollistettu kuvassa 19 laatikkokaavioiden muodossa. Pystypintojen eli ovien ja sivujen välinen ero oli selvästi nähtävissä suhteessa tasopintoihin eli etuluukkuun ja katon etuosaan. Myös ovien ja sivujen välinen kerrosvahvuuksien ero oli selvä. Merkille pantavaa oli, että auton korin puolten kuten oikean ja vasemman sivun tai oven välillä ei ollut havaittavaa eroa.



**Kuva 17.** Tarkasteltavien maalin kerrosmittauspisteiden normaalisuustestit ennen muutosta.



**Kuva 18.** Tarkasteltavien maalin kerrosmittauspisteiden prosessin suorituskykykuvaajat ennen muutosta.



**Kuva 19.** Mittausten välinen vertailu Box plot -kaavion avulla.

Tarkasteluun otettujen mittausten perusteella laskettiin vähimmäismuutokset kerrosvahvuuksien keskiarvoissa, jotka tilastollisesti voitiin osoittaa luotettaviksi. Tämä tehtiin Minitab-ohjelman Power and sample size -toiminnolla. Luottamusväliksi asetettiin 95 %, näytekooksi 30 kpl sekä keskihajonnaksi kunkin mitatun pisteen keskihajonta. Oletettiin, ettei muutoksen jälkeen suoritettavan näytteen keskihajonta poikkeaisi huomattavasti nykytilanteesta. Tulokseksi saatiin 0,34-1,12  $\mu\text{m}$  mittauspisteestä riippuen. Mikäli muutoksen jälkeen t-testi tuottaisi suuremman eron voitaisiin todeta, että prosessissa on tapahtunut selvä muutos.

## 4. TULOKSET JA ANALYSOINTI

### 4.1 Riskien kartoitus

Riskejä asennukseen ja tuotannon aloitukseen liittyen arvioitiin yhdessä kunnossapitopäällikön ja kunnossapidon alue-esimiehen kanssa. Riskit arvioitiin yksinkertaistetun AIAG:n (Automotive Industry Action Group) julkaiseman FMEA:n projektiriskianalyysipohjan mukaisesti. Riskianalyysissä pisteytetään kukin riski vakavuutensa mukaan yhdestä viiteen, viiden ollessa vakavin. Samalla tavoin pisteytettiin riskin toteutumisen todennäköisyys. Pisteet kerrottiin keskenään, jolloin saatiin riskin kokonaispistemäärä. Kokonaispistemäärän avulla riskit voitiin priorisoida. Vakavimmille riskeille määritettiin toimenpiteet. Suunnitelluille toimenpiteille laskettiin samalla tavoin jäännösriski. Lopuksi normaalissa riskinarvioinnissa tulisi määrittää vielä pisteet toteutetuista toimenpiteistä. Viimeinen vaihe jätettiin pois tehdystä riskianalyysistä luettavuuden helpottamiseksi.

Riskit jaettiin neljään eri työvaiheeseen; suunnitteluun, asennukseen, käyttöönottoon ja käyttöön. Potentiaalinen riski määriteltiin, jonka jälkeen määriteltiin riskimekanismi ja ehkäisevät toimenpiteet riskin pienentämiseksi. Riskit ja niiden toimenpiteet on listattu taulukkoon 4.

### Taulukko 4. Riskianalyysi.

RISK IDENTIFICATION AND EVALUATION						CORRECTIVE ACTIONS WITH ESTIMATED EFFECT					
Process Function/ Requirements	Potential Failure Mode (identified risk)	S e v	Potential Cause(s)/ Mechanism(s) of Failure	O c c	R P N	Corrective Action	S e v	O c c	R P N	Responsibility	Target Date
Suunnitteluvaihe	Muutostöiden huomiointo.Reaaliotio telineessä suurempaan määrään putkia jälkiasennuksena	3	Huomioidaan laitteiston muokattavuus.	2	6	Valmistetaan tarvittuun teline.	3	1	3	TTe	11.4.2016
Suunnitteluvaihe	Osat eivät saavu ajoissa.	5	Osilla 6 viikon toimitusaika.	3	15	Tilataan varaosat riittävän ajoissa.	5	2	10	TTe	3.2.2016
Suunnitteluvaihe	Asennuksen jälkeinen tuotannon aloitus myöhästyy.	5	Asennus, altaan lasku, nosto ja testaus vievät paljon aikaa.	2	10	Laaditaan testisuunnitelma.	5	1	5	TTe	11.4.2016
Suunnitteluvaihe	Asentaja ja laitoshoitaja ei saada asennukseen.	5	Osa avainhenkilöistä poissa keväällä.	2	10	Varataan riittävät resurssit ajoissa.	5	1	5	OAn, TTe	11.4.2016
Suunnitteluvaihe	Virtaa ei saada asetettua haluttuihin arvoihin.	4	Tasatuuntausyksikössä rajoitus virran suhteen.	3	12	Tarkistetaan rajoitus	4	2	8	JyV	1.4.2016
Asennusvaihe	Altaan pohjan vaurioituminen asennettaessa	4	Tikkaat, telineet tai putoavat työkalut rikkovat altaan pinnoitetta.	3	12	Pohjan suojaaminen muovivilyillä	4	1	4	TTe	16.4.2016
Asennusvaihe	Asennettävien anodien vaurioituminen asennettaessa	4	Putkien lipeäminen asennettaessa.	3	12	Kaksi työntekijää asennukseen.	4	1	4	OAn	16.4.2016
Asennusvaihe	Vanhojen anodien vaurioituminen asennettaessa	5	Asennustyökalut tai tikkaat osuvat vanhoihin anodeihin.	3	15	Työn suorituksen valvonta.	5	2	10	TTe	16.4.2016
Asennusvaihe	Putkien asennus ei onnistu korkeuserosta johtuen	5	Asennettavaan poikkipalkkiin ei yletytä.	3	15	Telineen hankkiminen ja asentaminen tai tikkaiden käyttö	5	1	5	TTe	1.4.2016
Asennusvaihe	Putoamisvaara	5	Tikkaille tai telineille kipeäminen asennettaessa välttämätöntä.	3	15	Valjaiden käyttö asennettaessa. Valjaiden hankinta.	5	1	5	TTe	16.4.2016
Asennusvaihe	Sähköiskun vaara	5	Jännitteet anodiselleissä.	2	10	Kytetään muuntajat pois päältä asennuksen aikana	5	1	5	OAn	16.4.2016
Asennusvaihe	Oikosulun vaara Telineitä ei eristetty riittävästi	5	Kytentä suoritettu väärin.	2	10	Varmistetaan asennustapa ennen varsinaista asennusta	5	1	5	OAn	15.4.2016
Asennusvaihe	Bakteerikontaminaation vaara	4	Vieraita aineita päätyy altaaseen työkalujen tai vaatteiden mukana.	3	12	Suojavaatteiden ja saappaiden käyttö Biosidikäsitteily?	4	1	4	TTe, OAn	16.4.2016
Asennusvaihe	Riittämättömän kiinnityksen aiheuttama laitteen osan irtominen	5	Kiinnike pettää ajan myötä.	3	15	Tarkastetaan kiinnitykset lopussa	5	1	5	OAn	16.4.2016
Asennusvaihe	HSE-riskit – Nostovammat	4	Raskaita nostoja vaikeissa asennoissa.	3	12	Kaksi työntekijää asennukseen.	4	2	8	OAn	16.4.2016
Asennusvaihe	HSE-riskit – Liukastuminen altaan pohjalla	4	Altaan pohja märkä.	3	12	Pohjan suojaaminen muovivilyillä	4	2	8	TTe	16.4.2016
Asennusvaihe	Tuotannon aloitus viivästyy asennuksen jälkeen.	3	Liitossysteemiä ei voida purkaa, mikäli asennus ei onnistu.	3	9	Kytetään sellit niin, että voidaan palauttaa vanhat asetukset.	3	2	6	OAn	16.4.2016
Käyttöönotto	Juovien muodostuminen etuluvulle huonontuneen maalivirtauksen ja virran aiheuttaman lämmön nousun johdosta	3	Asennettujen anodien jännitteet liian korkeat.	3	9	Rajoitetaan jännitteet ja virta pohja-anodien mukaan.	3	1	3	TTe	16.4.2016
Käyttöönotto	Asennus ei toimi odotetusti	4	Täysin vastaava työtä ei ole suoritettu ennen.	4	16	Testikorien ajaminen ennen tuotannon aloitusta	4	1	4		16.4.2016
Käyttöönotto	Tuotantokori repii osia mukanaan	5	Asentaminen virheelliseen asentoon – Uusissa malleissa tulee ottaa huomioon korkeus	3	15	Ajetaan yksi testikori käsijalalla.	5	1	5	TTe	16.4.2016
Käyttöönotto	Laadunvarmistusta ei voida suorittaa ennen tuotannon	5	Testikoreja ei saada hankittua.	3	15	Testikorien kerääminen ajoissa etukäteen.	5	1	5	TTe	8.4.2016
Käyttöönotto	Liian korkeasta aloitusjännitteestä johtuva spesifikaatioiden ylittyminen (korin kerrosvahvuus, upotusaltaan pH)	4	Asetusparametrit syötetään liian korkeiksi.	3	12	Testikorien ajaminen ennen tuotannon aloitusta	4	1	4	TTe	16.4.2016
Käyttöönotto	Väärin kytkentä -> toimimattomuus, riittämätön teho	5	Olemassa olevia anodisellejä joudutaan sulkemaan.	3	15	Testikorien ajaminen ennen tuotannon aloitusta	5	1	5	TTe	16.4.2016
Käyttöönotto	Jännite ei saa pudota viereisissä selkeissä kuin 30 V?	4	Aikaisemman ohjeituksen mukaan vierekkäisissä anodiselleissä ei saa olla suuria eroja.	3	12	Varmistetaan onko mahdollista kytkeä putket sarjaan litteiden anodien kanssa.	4	1	4	JyV	1.4.2016
Käyttövaihe	Anodiputkien huolto	3	Ei tietoa putkien huollosta. Teräs-anodiputkia tulee kääntää tasaisin väliajoin.	3	9	Putkien kääntö? Selvitetään toimittajalta	3	2	6	TTe	1.4.2016

## 4.2 Asennus

Laitteiston asennus suoritettiin 21.-24.4.2016 välisenä aikana. Tuotannon laadun turvaamiseksi asennukset suoritettiin illalla ja viikonloppuna. Ensimmäisessä vaiheessa ennen varsinaista anodiputkien asennusta tehtiin rinnankytkentätestaus olemassa oleville anodeille. Rinnankytkentää tarvittiin vapauttamaan yksi tasasuuntausyksikkö uusia pinta-anodeja varten. Rinnankytkentä tehtiin 21.4.2016 tuotannon jälkeen iltavuorossa kytkemällä anodikennoparit 2-3 toisiinsa niin, että virtajohdot kolmannelta anodikennoparista vapautettiin. Kolmannen anodikennoparin virtajohdot kytkettiin pois. Tämän jälkeen ajettiin yksi tuotannosta poistettu, testaukseen varattu autonkori. Tällä tavoin saatiin onnistuneesti varmistettua rinnankytkennän toimivuus sekä riittävät jännitteet spesifikaatiot täyttäviin kerrosvahvuuksiin. Testauksen jälkeen kytkennät palautettiin.

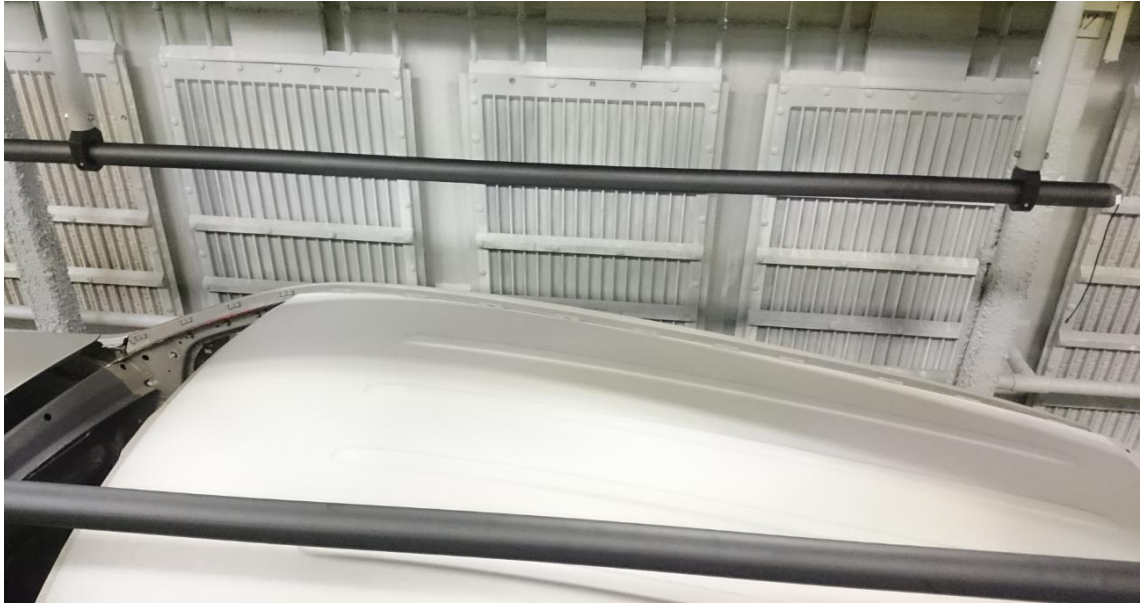
Samaan aikaan kunnossapidon asentajat valmistivat kiinnikkeet sekä tukirakenteet anodiputkille. Kiinnikkeet valittiin niin, että anodiputkien sijaintia maalialtaan leveysuunnassa oli mahdollista muuttaa tarvittaessa. Samaa ajattelutapaa sovellettiin tukirakenteisiin. Tukirakenteet valmistettiin kiskomallisesta alumiiniprofiilista. Kiskot mahdollistivat tarvittaessa anodiputkien säätämisen altaan pituus- ja korkeusuunnassa. Kiskot asennettiin jatkeeksi Dürrin toimittamiin anodiputkien kiinnikkeisiin.

Varsinaiset anodiputkien asennustyöt tehtiin seuraavana viikonloppuna 22.-24.4.2016. Työt aloitettiin 22.4. tyhjentämällä upotusmaalialtaan 190 000 litraa maalia varastosäiliöön. Maaliallas huuhdeltiin seuraavan päivän asennusta varten. 23.4. aloitettiin sähköasennukset sekä laitteiston asennukset samanaikaisesti.

Anodiputkien asennukset alkoivat asentamalla kiinnikerakenteet altaan ylläoleviin poikittaisiin tukipalkkeihin kahden kunnossapidon mekaanisen asentajan toimesta. Anodiputkien keskinäiseksi etäisyydeksi asetettiin 100 cm. Aikaisemmat valmistelut nopeuttivat työtä ja laitteisto oli paikallaan kolmessa tunnissa. Sähkötyöt suoritti kunnossapidon sähköasentaja. Anodikennoparien 2-3 välille tehtiin jälleen rinnankytkentä, mutta tällä kertaa johdot koteloitiin. Pinta-anodeille tehtiin oma kotelo, josta vedettiin maadoitukset.

Anodiputkien asennukset testattiin Bremenissä valmistetulla tuotantotesteihin saadulla Mercedes-Benz GLC:n autonkorilla. Auton kori ajettiin maalialtaaseen käsin ajona maalin edelleen ollessa varastosäiliössä. Tämä on esitetty kuvassa 20. Oikeanpuoleiseen anodiputkeen kiinnitettiin 30 cm pituiset narut molempiin päihin, jotta sopiva etäisyys anodiputkien ja auton korin välillä voitaisiin todentaa. Samanaikaisesti mittauksia suoritettiin myös mittanauhalla.





**Kuva 20.** Asennusvaiheen testaus auton korilla tyhjässä maalialtaassa.

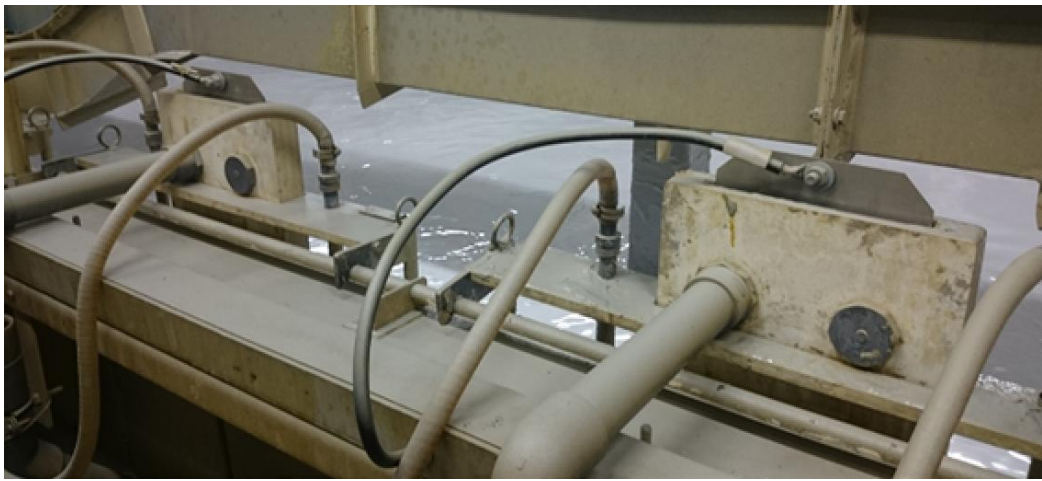
Ensimmäiset asetukset osoittivat, että anodiputket olivat liian lähellä altaan alkupäätä, sillä etäisyys anodeista auton kattoon oli vain 15 cm. Laitteita siirrettiin välittömästi 15 cm taaksepäin. Tällä tavoin päästiin noin 25 cm minimietäisyyteen kaikissa auton korin kulkukohdissa. Tämä oli edelleen noin 5 cm tavoite-etäisyyttä lähempänä. Asennusta siirrettiin vielä 10 cm taaksepäin. Kiinnitykset kiristettiin ja asennus todettiin valmiiksi. Valmis asennus on havainnollistettu kuvassa 21.



**Kuva 21.** Asennetut pinta-anodiputket

Sähkötöiden ja oikeiden jänniteasetusten todentaminen oli vuorossa kiinnitystöiden jälkeen. Uudet anodikennon rinnakkainkytkennät on esitetty kuvassa 22. Tämä vaati maalin nostamisen takaisin altaaseen. Nostoa ennen noin kello 11:00 kuitenkin huomattiin, että kuudennen vasemmanpuoleisen sivuanodin membraanissa oli repeämä. Testaukset keskeytyivät, sillä anodi oli korjattava välittömästi. Uuden anodin kokoamiseen ja maalialtaan nostoon meni yhteensä seitsemän tuntia, joten testausta siirrettiin seuraavaan päivään.

Päätettiin, että kaksi laitosoperaattoria suorittaisivat tarvittavan testauksen yhdessä sähköasentajan kanssa ilman esimiehen valvontaa, sillä työvaiheet vastasivat jo normaalirutiinityötä. Testijännitteet ja virta-asetukset määritettiin jo tässä vaiheessa. Uusien anodien lähtöarvoiksi asetettiin 115 V ja 28 A. Arvot asetettiin huomattavasti muita anodiyksikköjen arvoja matalammiksi mahdollisten laatuongelmien välttämiseksi.



a)



b)

**Kuva 22.** Sähköasennukset anodikennoparien 2 ja 3 välillä ennen (a) ja jälkeen (b) asennuksen.

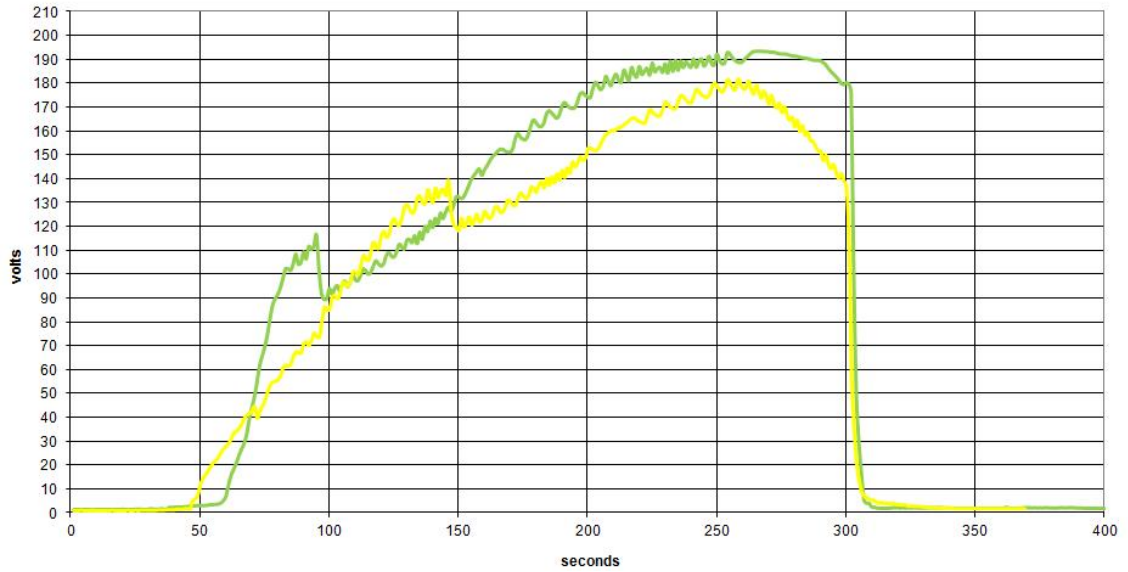
24.4. aloitettiin ajamalla Mercedes-Benz GLC:n testikori. Kyseessä oleva Bremenissä valmistettu auton kori oli varattu hitsaamon uunin lämpötilamittauksia varten, joten se soveltui hyvin kerrosvahvuuksien testaamiseen. Testikori ajettiin normaalirutiinin mukaan ja mittaukset suoritettiin suunnitellusti. Saadut tulokset olivat spesifikaatioiden sisällä koteloiden kerrosvahvuuksia lukuunottamatta. Tähän epäiltiin syyksi anolyytin matalaa johtokykyä, jota testauksen yhteydessä oli unohdettu säätää. Koska testeissä ei ilmennyt muita häiriöitä, saaduilla asetuksilla päätettiin lähteä tuotantoon. Testiajot päätettiin viimeistelemällä maalialtaan täyttöön liittyvät huoltotyöt sekä lisäämällä 200 kg biosidiä bakteeririskin ehkäisemiseksi.

### 4.3 Prosessin optimointi

Prosessin optimointi aloitettiin heti asennusta seuraavana maanantaina. Riskejä tuotannolle aiheutuvista häiriöistä edelleen minimoitiin aloittamalla tuotanto jaksoissa. Jännitetestit toteutettiin Shewhart syklin neljän vaiheen mukaisesti eli suunnittelemalla testi, toteuttamalla testisuunnitelma pienessä mittakaavassa, todentamalla muutokset ja ottamalla lopuksi muutokset käyttöön, jos ne todettiin toimiviksi [75]. Jännitettä pinta-anodeissa nostettiin vähitellen pitkin päivää niin, että muutokset tehtiin kolmelle tai neljälle auton korille ja arvot palautettiin siihen asti kunnes nähtiin tuotteen laadun olevan kunnossa. Seuraavana päivänä materiaalitoimittajan tekninen asiantuntija vieraili tehtaalla ja toi mukanaan upotettavan jännitemittalaitteen. Mittalaite, UFS:n TruIDL, oli uudempaa teknologiaa kuin edellisellä kerralla mitattaessa. Mittalaite ajettiin onnistuneesti läpi tuotannon päätteeksi.

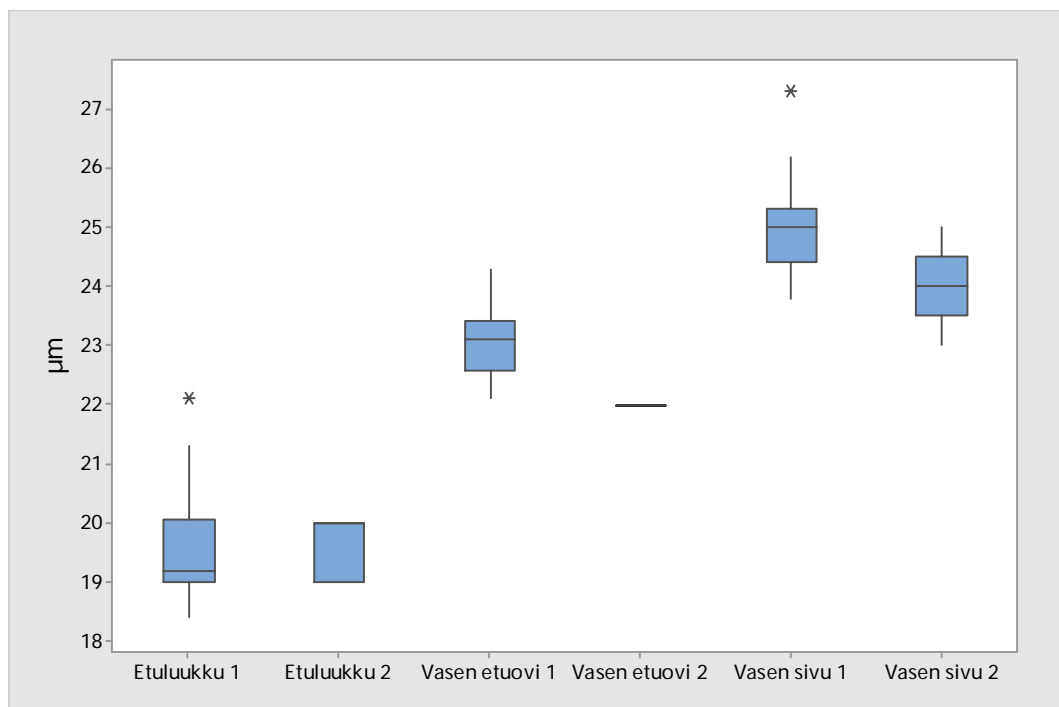
Mittatuloksista piirretystä kuvan 23 kuvaajasta voitiin havaita, että pinta-anodeilla oli selvä vaikutus. Katon takaosa, jota esittää vihreä käyrä sekä kuvassa 15 että kuvassa 23, saavuttaa 100 voltin jännitteen huomattavasti nopeammin muutoksen jälkeen. Kuvan 23 molemmissa käyrissä on nähtävissä pinta-anodien sammuminen noin kohdassa 100 ja 150 sekuntia pienenä pudotuksena. Mittatulosten perusteella todettiin, että virtaa voitiin vielä nostaa.

Samalla mittatuloksista nähtiin, että maalikylyyn muut anodit sekä tasasuuntausyksiköt toimivat normaalisti. Olemassa olevien anodien kunto oli jossain määrin tuntematon, sillä anodien huoltotaajuus on useita vuosia. Kahtena edellisenä vuonna tuotantoa oli lisäksi ajettu ennätysmäärä, joka lisäsi anodien käyttöastetta. Tulosten perusteella pinta-anodien virtaa nostettiin 60 ampeerista 100 ampeeriin ja maalikylyyn lämpötilaa laskettiin yhdellä asteella. Virran noston tavoite oli lisätä edelleen kerrosten muodostumista korin tasopinnoille prosessin alkuvaiheessa. Maalin lämpötilan laskemisen tavoitteena oli laskea kerrosvahvuuksia tasaisesti pinta-anodien virran noston kompensoidessa katon ja etuluukun kerrosvahvuuksien laskua.



**Kuva 23.** Jännitekuvaaja auton korin etu- (keltainen) ja takaosasta (vihreä).

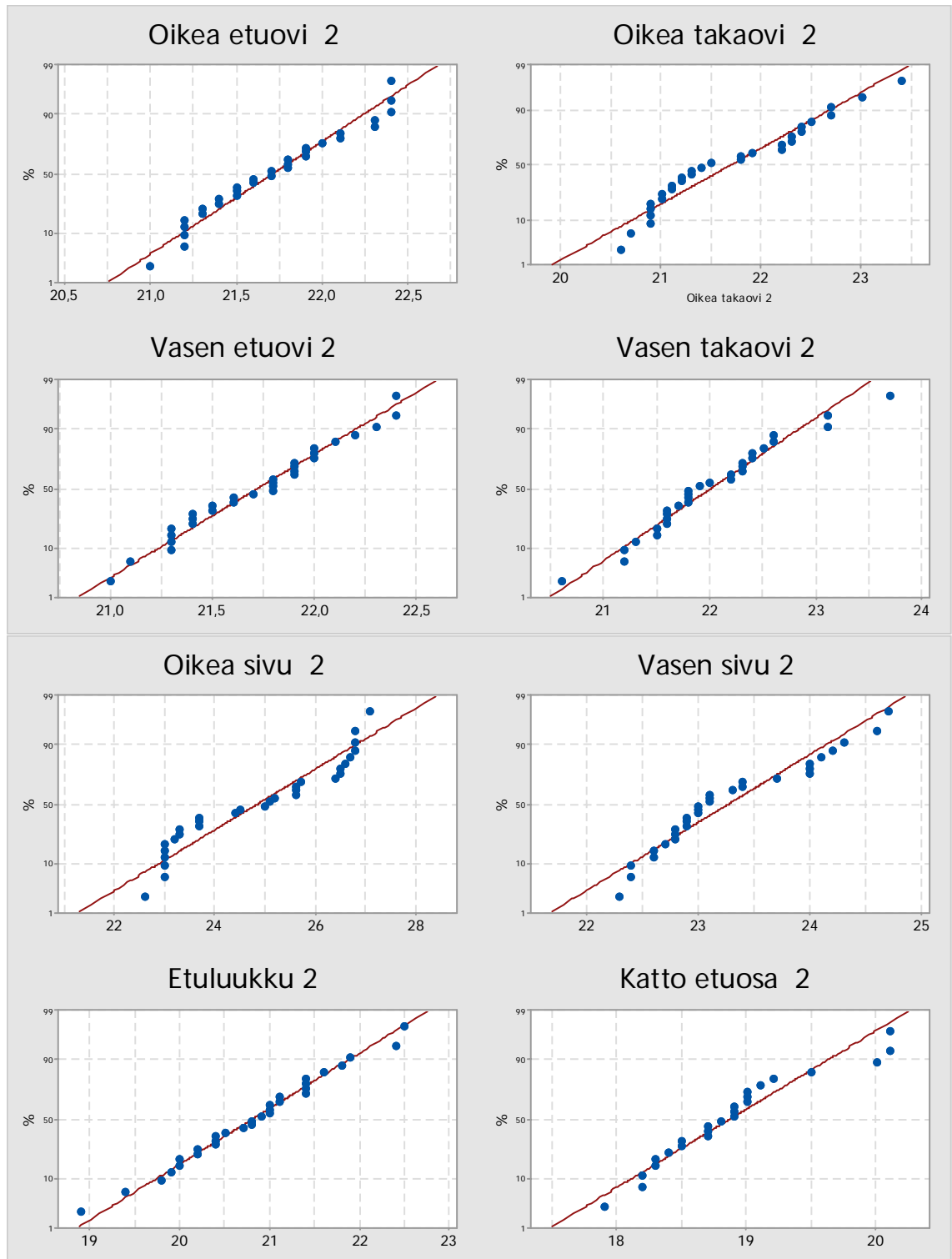
Lämpötilan laskun ja jännitemuutosten jälkeen suoritettiin ensimmäinen vertaileva mittaus. Jokaisesta mittauspisteestä suoritettiin viisi mittausta. Vaikka muutokset olivat pieniä, ne olivat oikean suuntaisia. Tämä on esitetty kuvan 24 janakaaviossa on esitetty etuluukun, vasemman etuoven ja vasemman sivun mittaukset ennen ja jälkeen muutoksen. Tasopinnoilla ei havaittu huomattavaa laskua kerrosvahvuuksissa, kun taas pystypinnoilla kuten ovesa ja sivuissa mittaukset viittasivat noin yhden mikrometrin laskuun.



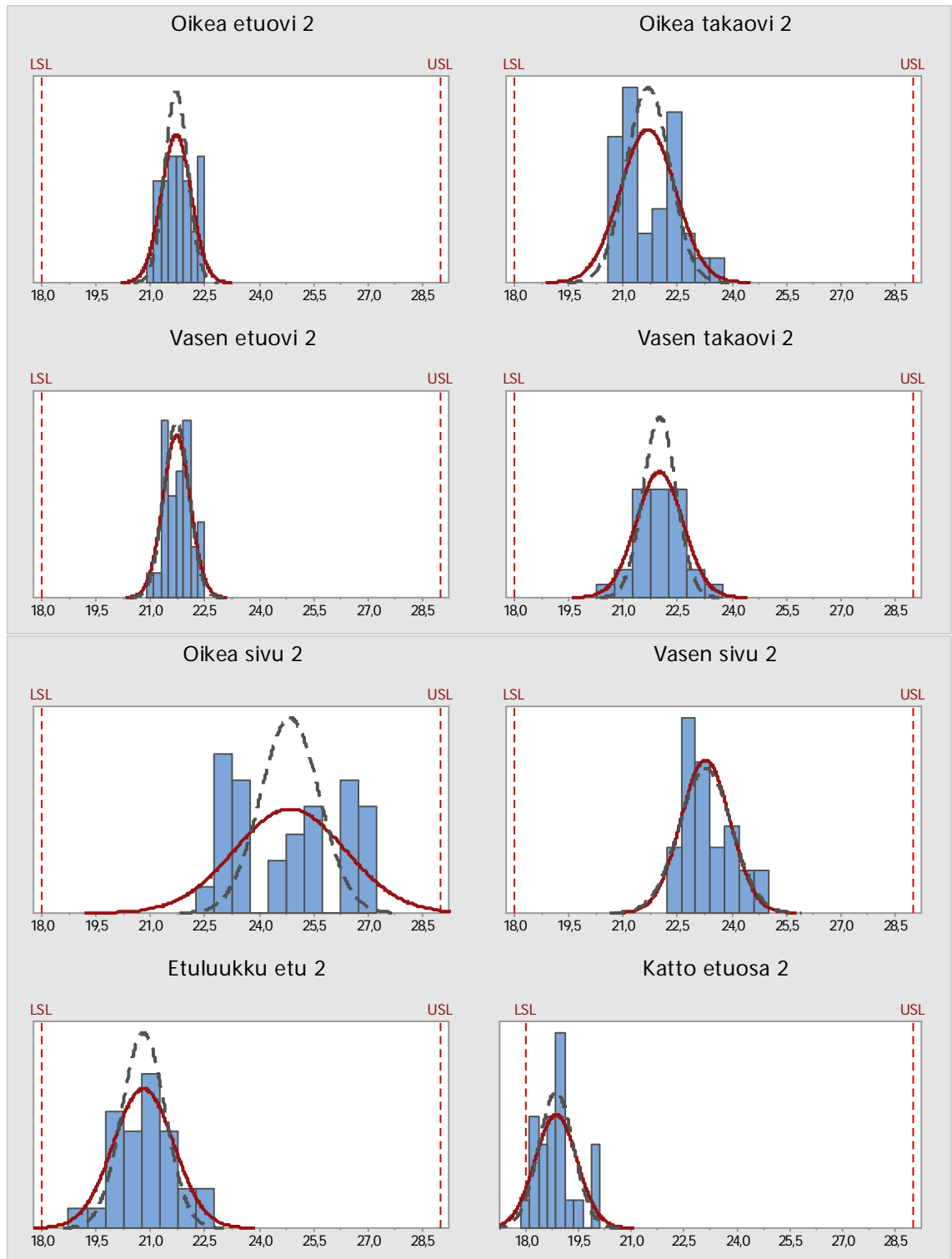
**Kuva 24.** Kerrosvahvuusmittausten vertailu ennen (30 mittausta) ja jälkeen (5 mittausta) muutoksia.

Kerrosvahvuuksia laskettiin saatujen tulosten perusteella edelleen. Tässä vaiheessa huomattiin kuitenkin koteloiden kerrosvahvuuksien, eli tunkeuman, laskevan liian lähelle alarajaa, joten muutosta ei otettu käyttöön. Päätettiin suorittaa 30 auton korin maalin kerrosvahvuuksien mittaus, jonka perusteella voitaisiin laskea parannuksen lopullinen vaikutus. Mittaukset suoritettiin 4.5.2016. Tulokset on esitetty liitteessä B.

Tarkasteluun otettiin samat mittapisteet kuin edellisellä 30 mittauksen kerralla. Tällä kertaa havaittiin, että vasenta sivua, oikeaa sivua ja oikeaa takaovea lukuun ottamatta mittaukset noudattivat normaalijakaumaa. Tämä on esitetty kuvassa 25. Kuvan 26 suorituskykyanalyyseistä havaittiin, että oikean sivun ja takaoven histogrammit olivat monihuippuisia, mutta vasemman sivun jakauma näytti olevan melko lähellä normaalijakaumaa. Syytä poikkeaviin tuloksiin ei löydetty, tosin sivujen osalta epäiltiin teräsosien pinnalla olevan sinkkikerroksen vaihtelua. Mittarilla ei voida erottaa sinkkiä ja maalikerrosta, joten sinkkikerros vähennetään laskennallisesti vanhojen keskiarvomittausten mukaan.



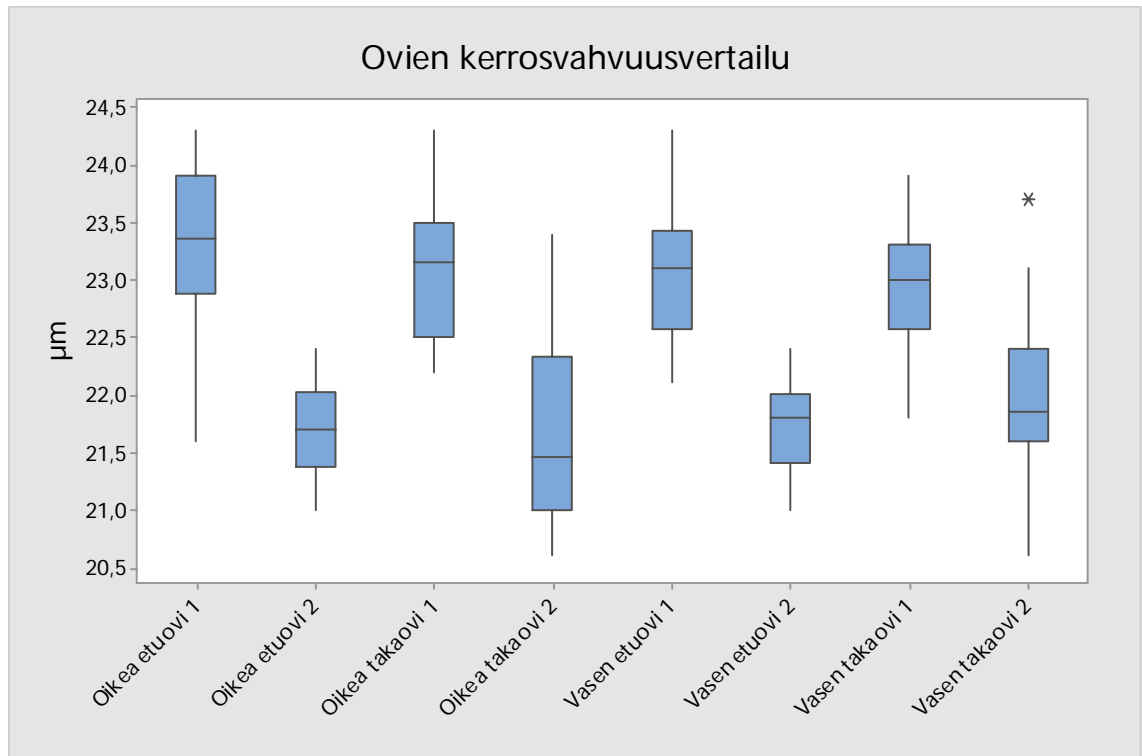
*Kuva 25. Tarkasteltavien maalin kerrosmittauspisteiden normaalisuustestit muutoksen jälkeen.*



**Kuva 26.** Tarkasteltavien maalin kerrosmittauspisteiden prosessin suorituskykykuvaajat muutoksen jälkeen.

Tulokset otettiin tarkasteluun kahteen eri janakaavioon. Vaikka tulosten hajonta oli aiempien analyysien mukaan kasvanut osassa mittapisteissä, oli janakaavioista selkeästi nähtävissä, että muutos oli tuonut halutun suuntaisia tuloksia. Kerrosvahvuuksien erot olivat selvästi kaventuneet kaikissa ovissa, kuten kuvassa 27 on nähtävissä.

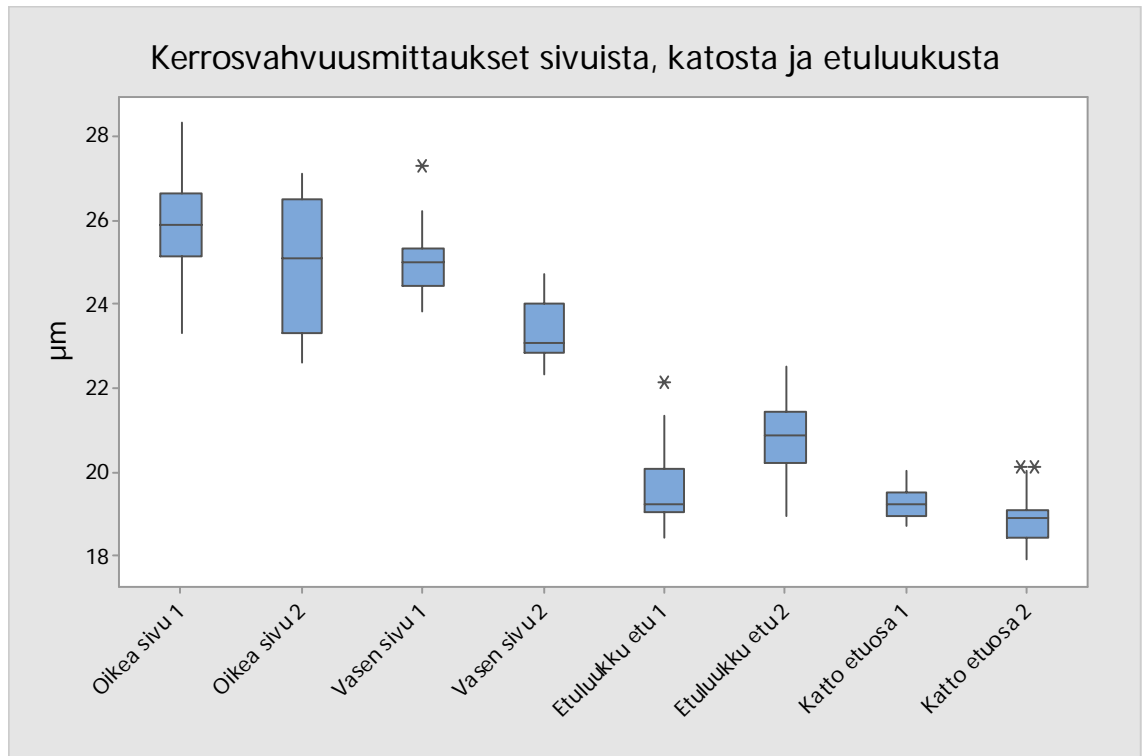




**Kuva 27.** Ovien kerrosvahvuusmittausten vertailu ennen (30 kpl) ja jälkeen (30 kpl) muutoksia.

Kuvassa 28 esitettyjen sivujen mittauspisteiden osalta muutos ei ollut aivan yhtä selkeä. Tämä saattoi johtua kahdesta asiasta. Asennettujen anodikennojen keskinäinen etäisyys saatettiin asentaa hieman liian leveäksi, joten katon lisäksi myös sivut todennäköisesti maalautuivat enemmän. Sivujen mittapisteet sijaitsivat huomattavasti ovien mittapisteitä ylempänä, joten tämä oli hyvinkin mahdollista. Lisäksi asennettujen anodikennojen maalaus aika saattoi olla toinen tekijä. Anodikennot jatkavat maalausta vielä auton korin ohittaessa ne. Sivujen mittapisteet sijaitsivat auton korin takaosassa, joten tulosten perusteella oli pääteltävissä, että anodikennojen sammuttaminen aikaisemmassa vaiheessa voisi vähentää sivujen maalikerroksia. Katon ja etuluukun mittatulokset olivat janakaavion perusteella positiivisia. Etuluukun kerrosvahvuudet olivat selvästi nousseet ja katon etuosassa ei ollut huomattavia muutoksia.





**Kuva 28.** Sivujen, etuluukun ja katon kerrosvahvuusmittausten vertailu ennen (30 kpl) ja jälkeen (30 kpl) muutoksia.

Ennen t-testiä mittatuloksille suoritettiin varianssitestit. Koska näytekokoko oli riittävän suuri, päädyttiin käyttämään Bonnett-varianssitestiä. Jos otos olisi ollut pienempi eivätkä mittaukset olisi olleet normaalijakautuneita, olisi käytetty Levene-varianssitestiä. Varianssitestin perusteella havaittiin, että oikean ja vasemman etuoven varianssit olivat kussakin eriävät. Muiden mittapisteiden varianssit vastasivat toisiaan ensimmäisellä ja toisella mittauksella. Varianssien eroavuus otettiin huomioon t-testauksessa, jotta tuloksesta saatiin tarkempi. Samat varianssit omaavissa mittauksissa käytettiin painotettua varianssien keskiarvoa.

Saadut mittatulokset osoittivat selvän muutoksen kerrosvahvuuksissa t-testin perusteella. Taulukossa 5 on esitetty mittauspisteiden avainlukuja, kuten keskiarvot, keskihajonnat, t-testauksen tuloksia sekä näytekokoja. Muista mittapisteistä poiketen katon etuosa sisälsi pienemmän otannan osan auton koreista ollessa avomalleja.

Lähtömittausten jälkeen suoritetun testin tehovertailun tuloksien perusteella arvioitiin, että tarvitaan noin 0,34-1,12 µm muutos t-testin perusteella, jotta voidaan 95 % varmuudella sanoa, että muutos prosessissa on tapahtunut. Arvio tehotettiin tehtiin mittauksen keskihajonnan mukaan. Mitä pienempi keskihajonta saatiin sitä varmempia voitiin olla testin luotettavuudesta.

Janakaaviossa havaitut muutokset vahvistuivat t-testin avulla. Ovien kerrosvahvuuksissa oli t-testin perusteella huomattava ero (0,93-1,54 µm) ja lisäksi

pienen keskihajonnan perusteella tulokset olivat kiistattomia. Sivujen osalta vasemman puolen kerrokset olivat selvästi laskeneet, mutta oikean puolen osalta mittauksissa muutos oli pieni verrattuna suureen hajontaan. Etuluukun osalta kerrosvahvuudet selvästi kasvoivat ja katon etuosan mittaukset pysyivät suunnilleen samoina.

Mittatulokset eriteltiin lopuksi vielä taso- ja pystypintamittauksiin. Näin kasvatettiin otoskoko ja parannettiin arviota kerrosvahvuuksien lopullisesta muutoksesta. Normaalisuus- ja varianssitestit suoritettiin myös näille mittauksille. T-testin luottamusvälivaihtelun perusteella voidaan olettaa, että kerrosvahvuudet tasopinnoilla ovat jatkossa 1,04-1,59  $\mu\text{m}$  korkeammat ja pystypintojen kerrosvahvuudet 0,81-1,13  $\mu\text{m}$  matalammat. Ulkoisten tasopintojen osuus auton korista on verrattain pieni suhteessa pystypintoihin, joten keskimääräinen maalin kerrosvahvuus laski.

Lopuksi voitiin todeta, että kahden näytteen t-testauksen P-arvot olivat kaikki alle 0,05, joten voitiin vetää tilastollinen johtopäätös, että 95 % varmuudella maalin kerrosvahvuudet muuttuivat. Käytännössä voidaan todeta, että saatiin aikaan huomattava lasku kerrosvahvuuksissa halutuilla alueilla. Maalikerrosten jakaumaa saatiin siis tasattua.

#### **Taulukko 5. Mittausten välisten tulosten tilastollisia avainlukuja**

Mittapist	Ka 1	Ka 2	Ka ero	K.hajonta 1	K.hajonta 2	Normaalisuus testi 1	Normaalisuus testi 2	Varians sitesti (Bonett)	2t-testin ero	t-testin luottamusvälivaihtelu	Näytekkoko	
Etuluukku	19,57	20,8	-1,23	0,87	0,83	0,005	0,947	0,833	-1,24	-1,68	-0,80	30 - 30
Vasen etuovi	23,05	21,72	1,33	0,59	0,38	0,746	0,495	0,011	1,33	1,07	1,59	30 - 30
Vasen takaovi	22,94	22	0,94	0,54	0,65	0,432	0,349	0,385	0,93	0,63	1,24	30 - 30
Vasen sivu	25	23,27	1,73	0,73	0,68	0,264	0,013	0,758	1,73	1,36	2,09	30 - 30
Oikea etuovi	23,25	21,71	1,54	0,68	0,41	0,434	0,34	0,02	1,54	1,25	1,83	30 - 30
Oikea takaovi	23,06	21,69	1,37	0,56	0,76	0,074	0,032	0,072	1,37	1,03	1,72	30 - 30
Oikea sivu	25,7	24,85	0,85	1,18	1,52	0,3	0,005	0,055	0,86	0,15	1,56	30 - 30
Katto etuosa	19,22	18,87	0,35	0,36	0,59	0,321	0,08	0,063	0,35	0,06	0,65	22 - 24
Tasopinnot	24,06	22,75	1,31	1,38	1,48	0,005	0,005	0,366	1,31	1,04	1,59	210 - 210
Pystypinnat	18,95	19,76	-0,81	0,93	1,12	0,005	0,23	0,095	-0,81	-1,13	-0,49	82-84

Tarkkaa laskelmaa maalin säästöstä yhden auton korin pinnalta on vaikea laskea, sillä kokonaispinta-ala maalatussa kappaleessa (Mercedes Benz A-sarja) on noin 89 m<sup>2</sup>, joista suuri osa on koteloalueita ja korin sisäosia. Näistä suurinta osaa ei ole mitattu, mutta nämäkin alueet maalautuvat. Lopullinen varmistus kulutuslukumista saadaan seuraamalla järjestelmään syötetyn maalin määrää.

Jatkotoimenpiteinä maalitoimittajan asiantuntija ehdotti maalikylyyn lämpötilaa edelleen laskettavaksi ja samalla jännitteiden nostoa paremman kerrosjakauman aikaansaamiseksi. Toisena ehdotuksena oli pinta-anodien siirto maalialtaan alkupäästä keskelle tai loppupäähän, jotta pinta-anodit eivät osallistuisi kerroksen muodostuksen ensi vaiheeseen. Maalialtaan loppupäässä olevat pohja-anoditkin olisi mahdollista siirtää maalialtaan pinnalle, jolloin saataisiin lisätehoa ilman uusia hankintoja. Anodiputkien keskinäisestä optimietäisyydestä saatiin myös uutta tietoa. Arvioiduksi minimiväliseksi tekninen asiantuntija arvioi 20-30 cm.

Pinta-anodien siirto ei kuitenkaan ollut enää tässä vaiheessa helposti toteutettavissa, koska maalialtaan lasku viikonlopun aikana oli osoittautunut haastavaksi ja se olisi pitänyt suorittaa jälleen ylitöinä. Lisäksi pinta-anodien asentaminen maalialtaan keskivaiheeseen ei olisi muutenkaan mahdollista, sillä kuljettimen nousuvaihe, jonka tehtävä on poistaa ilmakuplia korin kotelosta, nostaa auton korin liian lähelle pintaa. Seuraavan kerran maaliallas tullaan laskemaan kesätauon yhteydessä heinäkuun puolivälissä, joten aikaisintaan siihen mennessä voitaisiin harkita siirtoa tai lisäanodeja.

## 5. YHTEENVETO

Tämän diplomityön tavoite oli saada tasattua maalikerroksen jakaumaa ympäri auton koria. Tämä toteutettiin asentamalla katodisen upotusmaalaukseltaan pinnalle ylimääräisiä anodikennoja. Tasaisemman maalikerroksen jakaumalla on mahdollista päästä säästöihin maalin kokonaiskulutuksen vähenemisen johdosta. Lisäksi työssä käsiteltiin katodisen upotusmaalauksen teoriaa, teollisen automaalauksen perusteoriaa sekä yleisimpiä korroosiotyyppejä. Valmet Automotiven katodisen upotusmaalauksen toiminta sekä laadunmittausmenetelmät esiteltiin. Työstä aikaansaadut tulokset todennettiin tilastollisin menetelmin mittaamalla maalatun auton korin kerrosvahvuuksien muutosta.

Työ aloitettiin taustateorian tutkimuksella, josta edettiin erilaisiin toteutusvaihtoehtoihin. Tämän jälkeen tehtiin selvitys mahdollisista laitteistotoimittajista. Ennen laitteiston asennusta suoritettiin maalin kerrosvahvuusmittaukset 30 auton korista tuotannon mittauspisteistä lähtötilanteen selvittämiseksi. Laitteiston asennusta ja käyttöönottoa varten laadittiin riskianalyysi mahdollisten ongelmatilanteiden ehkäisemiseksi tai minimoimiseksi. Asennustyö suoritettiin kahdessa vaiheessa. Ensin suorittamalla rinnankytkentöjä olemassa oleviin anodeihin tasasuuntausyksikön vapauttamiseksi ja tämän jälkeen suorittamalla varsinainen asennus seuraavana viikonloppuna.

Asennuksen jälkeen prosessille haettiin ajoarvot nostamalla pinta-anodien virtaa ja jännitettä asteittain. Maalitoimittajalta saatiin mittalaitteet jänniteohjelman toiminnan tarkastamiseksi. Jännitemittaustulosten perusteella ajoarvoja edelleen optimoitiin. Lopuksi mitattiin jälleen maalin kerrosvahvuudet 30 auton korista. Tuloksia käytettiin parannuksen todentamiseen.

Tulosten perusteella voitiin tilastollisesti osoittaa, että parannus prosessissa saatiin aikaan. Maalikerrosten jakaumaa auton korin ympärillä saatiin tasaisemmaksi. Laitteiston takaisinmaksuaika voitiin varovaisen arvion perusteella olettaa olevan alle vuoden mittainen. Kustannussäästöjen lisäksi pinta-anodit mahdollistivat paremman maalattavuuden tasopinnoille. Tämä on tärkeää etenkin uusia tuotteita maalattaessa, sillä tavoitearvoihin päästään nopeammin parempien säätömahdollisuuksien johdosta.

Varsinaisten tulosten lisäksi taustatutkimus toi mukanaan uutta osaamista. Etenkin SPC:n soveltamisesta maalauksen prosessiin saatiin uusia työkaluja, kun löydetyistä artikkeleista saatiin ideoita avainarvojen seurantaan sekä mittausjärjestelmän analyysin toteuttamiseen. Lisäksi maalialtaan seurannasta saatiin hyödyllistä informaatiota

käyttämällä upotettavaa mittalaitetta. Suunnitelmassa onkin upotettavan mittalaitteen käyttö säännöllisin väliajoin, jotta anodien ja maalialtaan kuntoa kyettäisiin seuraamaan ilman maalialtaan tyhjentämistä. Selvisi, että olemassa oleva mittalaite on mahdollista saada käyttöön maalitoimittajalta säännöllisten vierailuiden yhteydessä.

Hyödyllistä informaatiota saatiin myös varaosatoiminnan kannalta, sillä anodien varaosahankintaa varten löydettiin uusia kilpailukykyisiä toimittajia. Myös jatkoehdotuksia prosessin edelleen kehittämiseksi nousi esiin kuten pinta-anodien paikan vaihtaminen ja määrän lisääminen.

## LÄHTEET

- [1] Complete Paint Shops for the Automotive Industry and its Supplier, Dürr, verkkoaineisto. Saatavissa: (viitattu 6.3.2016)  
[http://www.durr.com/fileadmin/user\\_upload/duerr/en/pdf/pas/Paint-Brochure-english.pdf](http://www.durr.com/fileadmin/user_upload/duerr/en/pdf/pas/Paint-Brochure-english.pdf)
- [2] U. Poth, Automotive Coatings Formulation, Vincentz Network, Hannover, Germany, 2008, 42 p.
- [3] M. Farish, On the count of three, Automotive paintshop solutions, Autumn 2015, 12 p.
- [4] J. Carmo, J. Ribeiro, New Advances in Vehicular Technology and Automotive Engineering, Intech, 2012. Saatavissa: (viitattu 6.3.2016)  
<http://www.intechopen.com/books/new-advances-in-vehicular-technology-and-automotive-engineering>
- [5] J. Burge, Chemistry: Atoms First, Content Technologies, Inc. and Cram101 Publishing, 2015
- [6] J. Lyklema, Fundamental of Interface and Colloid Science: Solid-Liquid Interfaces, Academic Press, 1995, 4.1 p]
- [7] J. Gooch, Encyclopedic Dictionary of Polymers, Springer-Verlag, 2007, 351 p.
- [8] H. Hart, L. Craine, D.Hart, Organic Chemistry, A short course, Houghton Mifflin Company, 2003, USA, pp 487-488
- [9] L. Besra, L.M. Liu, A review on fundamentals and applications of electrophoretic deposition (EPD), Progress in Material Science, vol 52, 2007, 4 p.
- [10] B. Vincent, Early (pre-DLVO) studies of particle aggregation, Advances in Colloid and Interface Science, Vol 170, Issues 1-2, 2012, pp 56-67] viitattu [S. Linder, H. Picton, J Chem Soc Trans, 87, 1905, 1906 p.
- [11] I. Krylova, Review: Painting by electrodeposition on the eve of the 21st century, Progress in Organic Coatings, 42, 2001, 2 p. ; katso 1,3,9,11
- [12] H. Austin, J. Motley, New developments in automotive E-coat point to a promising future for the technology, Industrial Paint and Powder, 4/2001, 22 p.
- [13] A. Ladak, E-Coats: Beyond Prime Time, Finishing Today, Vol 84, Issue 5, 2008, 42 p.

- [14] H. Streitberger, K. Dössel, *Automotive Paints and Coatings*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2008, pp 89-92.
- [15] H. Austin, J. Motley, *Advances in Automotive E-Coat Technology*, *Industrial Paint and Powder*, 4/2001, 23 p.
- [16] A. Marrion, *Chemistry and Physics of Coatings*, Royal Society of Chemistry, 2004, 223 p.
- [17] B. Müller, U. Poth, *Coatings Formulation*, Vincentz, Hannover, Germany, 2006, 216 p.
- [18] N. Baraskar, *Electrocoating: An environomic technology superceding customer expectations*, *paintindia*, September 2009, 83 p.
- [19] M. Contos, M. Bordeaus, *understanding the Total Costs of Electrocoating*, *Paint and Powder*, March 2004, 23 p.
- [20] L. Merlo, *E-coat can produce uniform finishes with excellent coverage and outstanding corrosion resistance*, *Products Finishing*, 21.2.2011. Saatavissa: (viitattu 12.12.2015) <http://www.pfonline.com/articles/electrocoating>.
- [21] M. Hämäläinen, *FSP nostaa työkoneiden maalauksen henkilöautoluokkaan*, *Metallitekniikka*, 12/2006
- [22] A. Tracton, *Coatings Technology Handbook*, Taylor & Francis Group, LLC, 2006, 26-2 p.
- [23] PR Newswire Association LLC, *Electrocoating (E-coat) Market Worth 3,69 Billion USD by 2020*, *PR Newswire Europe Including UK Disclose*, New York, 12.8.2015
- [24] *Markets and Markets, Automotive Paints worth \$11,340.7 Million by 2020*. Saatavissa: (viitattu 10.1.2016): <http://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/automotive-paints.asp>.
- [25] T. Giles, *Pretreatment for Painting*, *Products Finishing*, 2011. Saatavissa: <http://www.pfonline.com/articles/pretreatment-for-painting>
- [26] N. Rani, A. Singh, S. Alam, N. Bandyopadhyay, M. Denys, *Optimization of phosphate coating properties on steel sheet for superior paint performance*, *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol 9, No. 5, 2012, pp 629-636
- [27] O. Mohammed, *Automotive Body Manufacturing Systems and Processes*, John Wiley and Sons, New Jersey, USA, 2011, pp 181-188.

- [28] J. Bajat, V. Miskovic-Stankovic, J. Popic, D. Drazic, Adhesion characteristics and corrosion stability of epoxy coatings electrodeposited on phosphated hot-dip galvanized steel, *Progress in Organic Coatings*, vol 63, 2008, 207 p.
- [29] The BONDERITE M-NT Process (former TECTALIS), verkkosivu. Saatavissa: (viitattu 8.2.2016) <http://www.henkel-adhesives.com/automotive/bonderite-m-nt-process-44207.htm>
- [30] Pretreatment, verkkosivu. Saatavissa: (viitattu 8.2.2016) <http://www.ppgindustrialcoatings.com/Technologies-Products/Pretreatment.aspx>
- [31] Oxsilan, verkkosivu. Saatavissa: (viitattu 8.2..2016) <http://www.chemetall.com/Products/Trademarks/Oxsilan/index.jsp>
- [32] M. Fedel, M. Druart, M. Olivier, M. Poelman, F. Deflorian, S. Rossi, Compatibility between cathaphoretic electro-coating and silane surface layer for the corrosion protection of galvanized steel, *Progress in Organic Coatings*, 69, 2010, 125 p.
- [33] Henkel Corporation, BONDERITE® M-PP Technology Overview, 2015, verkkoaineisto. Saatavissa: (viitattu 10.2.2016) <http://www.henkeladhesivesna.com/smartchemistry/?filename=Intro%20to%20Thin%20Film%20Metal%20Pretreatment%20Process.pdf>
- [34] K. Woock, *Stremlining Autodeposition, Finishing Today*, Vol 84, Issue 5, 2008, 15 p.
- [35] Influence of pretreatment technologies as alternatives to zinc phosphating on new and standardized steel substrate surfaces in automotive applications, *Metec* 2015, 4 p. Saatavissa: <http://www.metec-estad2015.com/papers2015final/P661.pdf>
- [36] Z. Wicks, F. Jones, S. Pappas, D. Wicks, *Organic Coatings: Science and Technology*, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2007, pp 4-5
- [37] G. Bowers, R. Bowers, *Understanding Chemistry Through Cars*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2015, 82 p.
- [38] R. Talbert, *Paint Technology Handbook*, CRC Press, Boca Raton, USA, 2008, 59 p.
- [39] C. Kremers, Epoxy Resins, *European Coatings Journal*, Issue 12, 2015, 20 p.
- [40] R. Talbert, Bulk E-Coat Has Arrived, *Product Finishing*, May 2007, 30 p.



- [41] D. Uhde, Safety Considerations in Electrocoat Systems, Metal Finishing, September 2004, 64 p.
- [42] J. Tirado, Anode Membranes, Product Finishing, December, 2014, 36 p.
- [43] G. Henry, P. Bougneit, An Electrocoaters Guide to Selecting and Maintaining Rectifiers, Metal Finishing, February 2004, 23 p.
- [44] A. Goldschmidt, H. Streitberger, BASF Handbook on Basics of Coating Technology, Vincentz, Hannover, Germany, 2007, pp 490-697.
- [45] T. Pennington, Ultrafiltration in Electrocoating Becoming Critical, Pfonline.com, Aug. 2012, 26 p.
- [46] P. Nanetti, Coatings from A to Z, Vincentz Network, Hannover, Germany, 2006, 50 p.
- [47] S. Smith, Application expertise exhibited, Automotive manufacturing solutions, 9/2010, verkkojulkaisu. Saatavissa: (viitattu 27.2.2016)  
<http://viewer.zmags.com/publication/6c4272a2#/6c4272a2/24>
- [48] D. Schulz, A stronger simpler safer shuttle for PT and EC lines, Automotive manufacturing solutions, 1.9.2012, verkkojulkaisu. Saatavissa: (viitattu 26.2.2016) <http://www.automotivemanufacturingsolutions.com/equipment/a-stronger-simpler-safer-shuttle-for-pt-and-ec-lines>
- [49] Ecopaint RoDip EFFICIENCY AND QUALITY THROUGH ROTATION, verkkoaineisto. Saatavissa: (viitattu 8.2.2016)  
[http://www.durr.com/fileadmin/user\\_upload/pfs/02\\_documents/02\\_Products/04\\_PT\\_ED/Ecopaint\\_RoDip\\_Efficiency\\_and\\_Quality\\_Through\\_Rotation.pdf](http://www.durr.com/fileadmin/user_upload/pfs/02_documents/02_Products/04_PT_ED/Ecopaint_RoDip_Efficiency_and_Quality_Through_Rotation.pdf)
- [50] R. Petrucci, W. Harwood, F. Herring, J. Madura, General Chemistry, Pearson Education international, USA, 2007, pp 850-851
- [51] P. Svejda, Prozesse und Applikationsverfahren in der industriellen Lackiertechnik, Vincentz Network, Germany, Hannover, 2003, 20 p.
- [52] W. Callister, Materials Science and Engineering, John Wiley and Sons Inc, United States, 2003, pp 570-573.
- [53] T. Nguyen, J. Hubbard, G. Mcfadden, A mathematical model for the cathodic blistering of organic coatings on steel immersed in electrolytes, Journal of coatings technology, vol. 63, no. 794, 1991, pp. 43-52

- [54] Corrosion of Aluminum and Its Alloys: Forms of Corrosion, 1/2008. Saatavissa: (viitattu 21.1.2016)  
<http://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=187>
- [55] P.Schweitzer, Corrosion engineering handbook, Marcel Dekker, Inc., New York, 1996, pp 134-135
- [56] C.Vargel, M.Jacques, Corrosion of Aluminium, Elsevier Science, 2004, 134 p.
- [57] L. Fedrizzi, M. Stenico, F. Deflorian, S. Maschio, P. Bonora, Effect of powder painting procedures on filiform corrosion of aluminium profiles, Progress in Organic Coatings, vol 59, 2007, 232 p.
- [58] Galvanic Corrosion Control, Industrial Heating, Vol 76, Issue 7, 2009
- [59] V. Cicek, Corrosion engineering, Wiley, Scrivener Publishing, Beverly, USA, 2014, 58-60 p.
- [60] A. Zaki, Principles of Corrosion Engineering and Corrosion Control, Butterworth-Heineman, Great Britain, 2006, pp 149-151
- [61] P.Markus, Corrosion Mechanisms in Theory and Practice, CRC Press, Boca Raton, USA, 2012, 420 p.
- [62] V. Cicek, Cathodic protection, John Wiley & Sons, 2013, pp 37-38
- [63] N. Vatistas, A. Della Schiava, Electro-coating bath movement/pulsed voltage and primer thickness, Progress in Organic Coatings, Vol 69, No. 3, 2010, pp 247-251 – viitattu G. Lovell, Prod. Finish, 3, 1990, 58 p.
- [64] K. Bubash, Troubleshooting for Electrocoat, Products Finishing, Vol 62, Issue 10, 1998, 7 p.
- [65] F. Hess, U. Gonzalez, Automotive E-Coat Paint Process Simulation Using FEA, Orlando, USA, 2003, verkkoaineisto. Saatavissa: (viitattu 10.12.2015)  
[http://www.algor.com/news\\_pub/tech\\_white\\_papers/e-coat\\_paint\\_process/](http://www.algor.com/news_pub/tech_white_papers/e-coat_paint_process/)
- [66] J. Osborne, The power of process simulation, Automotive Manufacturing Solutions, Nov/Dec 2004, p30
- [67] J. Subda, The Magic of Electrocoat Processing, [www.metalfinishing.com](http://www.metalfinishing.com), April 2005, pp. 16-22
- [68] J.Bishop, Senior Technical Coordinator, PPG, sähköposti 17.12.2015

- [69] Valmistetut autot, verkkoaineisto. Saatavissa: (viitattu 27.3.2016)  
<http://www.valmet-automotive.com/automotive/cms.nsf/pages/C7F948C0BFAD491EC2257706007AB625?opendocument>
- [70] J. Virtanen, Kunnossapitopäällikkö, sähköposti 14.3.2016
- [71] Valmet Automotiven sisäinen tietokanta, ei julkaistu (viitattu 25.2-14.3.2016)
- [72] Suomen Galvanotekninen Yhdistys, Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely, osa III, Gummerus Kirjapaino Oy, Jyväskylä, 2001, 111 s.
- [73] R. Walpole, R. Myers, S. Myers, K. Ye, Probability & Statistics for Engineers and Scientists, Pearson, 2012, 250 p.
- [74] Chrysler LLC, Ford Motor Company, General Motors Corporation, 2008, 3 p.
- [75] W. Deming, Out of the Crisis, The MIT Press, London, England, 88 p.

## LIITE A: MAALIN KERROSMITTAUSTEN TULOKSET, 30 KPL 14.-19.1.2016.

Zn kerros vähennetty.							
0	-12	-12	-11	-12	-12	-11	-8
Etuluukku 1	Vasen etuovi 1	Vasen takaovi 1	Vasen sivu 1	Oikea etuovi 1	Oikea takaovi 1	Oikea sivu 1	Katto etuosa 1
22,1	24,2	23,4	26,2	24,3	24,3	28,3	20
21,3	24,3	23,6	25,3	24,2	23,8	26,8	0
20,6	23,6	22,9	25,4	24	23,8	26,8	19,2
19	23,8	23,1	25,4	24	23,5	26,8	0
20	23,9	23	25,2	24	23,3	27,2	19,5
20	23,3	23	25,5	23,9	23,1	26,9	18,8
20	22,4	22,5	25	23,2	22,2	23,8	0
19	22,2	21,8	24	21,8	22,4	26,5	19
19	22,8	21,9	27,3	22,3	22,4	24,4	19,2
18,4	22,2	22,6	24,1	21,6	22,5	23,3	18,9
18,4	22,1	22,2	24,4	22,3	22,2	25,1	18,8
19,1	22,7	22,3	24,4	22,6	22,4	24,1	19
19	23	22,9	25,1	23,3	23,6	25,1	19,3
20,8	23,2	23,8	24,6	22,7	22,8	23,4	18,7
19,2	22,9	23,1	24,8	23,5	23,2	26,1	0
18,9	22,5	22,2	25,2	23,9	22,9	24,2	18,9
19	23,2	23,2	26	24	23,4	26,6	19,8
19,2	23	22,9	25	23,1	23,5	25,9	19,4
18,9	23,3	23,4	25,9	23,5	23,4	26,5	19,8
20	23,3	22,3	25	23,4	22,6	26	19,3
20,2	22,3	23	24,4	22,9	23,6	25,8	0
20,5	23,6	23,2	24,3	22,9	22,3	25,5	19,5
20,2	22,6	23,7	24,7	23,1	23,4	25,9	0
19	23,4	23,2	24,7	22,8	23,5	26,4	19,6
19,5	23,5	23,9	25,3	23,6	23,5	26,7	0
19,2	22,1	23,2	25,1	23,3	22,5	25,3	19,2
19,3	22,9	22,6	24,9	23,4	22,5	25,4	19
18,6	23,2	23,3	24,7	23,1	22,9	25,6	0
19,6	22,9	22,7	23,8	23,4	23,2	25,4	18,9
19	23,2	23,3	24,2	23,5	23,1	25,3	19,1

## LIITE B: MAALIN KERROSMITTAUSTEN TULOKSET, 30 KPL 4.5.2016.

Zn kerros vähennetty.							
	0-12	-12	-11	-12	-12	-11	-8
Etuluukku 2	Vasen etuovi 2	Vasen takaovi 2	Vasen sivu 2	Oikea etuovi 2	Oikea takaovi 2	Oikea sivu 2	Katto etuosa 2
20,7	21,4	23,7	24,1	22,4	22,5	26,7	18,8
21,8	21,5	22,2	23	22,4	22,4	25,7	0
21	21,6	22,3	23,4	22,3	22,3	26,5	18,3
21,6	21,9	23,1	23,7	22,4	23,4	26,5	18,9
22,5	21,4	22,6	24	22,3	22,4	27,1	18,7
20,2	21	21,8	22,9	21,2	21,2	25,6	19
20,4	21,8	21,9	23	21,8	22,3	26,4	0
19,9	22,4	22,2	24	22	22,7	26,8	20
20	21,5	22,4	23,1	21,5	22,2	25,6	0
19,4	22,1	23,1	24,7	21,9	22,7	26,8	20,1
20,2	22	22,5	22,8	21,7	21,3	25,1	19
20	21,3	22,6	24,3	22,1	23	26,6	20,1
20,4	21,8	22	23,1	21,7	21,9	25,2	19,2
18,9	21,8	21,6	22,9	21	21,1	25	18,2
19,8	22,4	22,3	24	21,9	21,8	26,8	0
20,4	21,3	21,2	22,6	21,6	21	25,6	18,5
20,5	21,4	21,7	22,6	21,3	20,6	23	18,7
20,8	21,6	21,2	22,4	21,5	21,2	23,3	0
22,4	21,3	21,5	22,3	21,2	20,9	23	18,4
21	21,1	21,8	22,8	21,3	20,9	23	18,9
21	21,7	22,3	24,6	21,4	21,8	24,4	19
21,4	21,8	21,8	22,4	21,8	21,4	23,3	18,7
21,1	21,9	22,4	24,2	22,1	22,2	24,5	19,5
21,9	22	21,5	22,7	21,8	21,1	23,7	19,1
20,9	22,2	21,6	22,9	21,2	20,7	23,2	18,5
21,4	22	21,8	23	21,6	21	23	18,2
20,8	22,3	21,6	22,8	21,5	21,5	23	0
21,4	21,3	21,3	23,1	21,4	20,9	23,7	18,9
21,4	21,9	21,6	23,4	21,9	21,3	22,6	18,3
21,1	21,9	20,6	23,3	21,2	20,9	23,7	17,9