



Risto Hienonen & Reima Lahtinen

# Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa



VTT PUBLICATIONS 623

# **Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa**

Risto Hienonen & Reima Lahtinen



ISBN 978-951-38-6882-6 (nid.)

ISSN 1235-0621 (nid.)

ISBN 978-951-38-6990-8 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

ISSN 1455-0849 (URL: <http://www.vtt.fi/publications/index.jsp>)

Copyright © VTT 2007

JULKAISIJA – UTGIVARE – PUBLISHER

VTT, Vuorimiehentie 3, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 4374

VTT, Bergsmansvägen 3, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 4374

VTT Technical Research Centre of Finland, Vuorimiehentie 3, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax + 358 20 722 4374

VTT, Otakaari 7 B, PL 1000, 02044 VTT  
puh. vaihde 020 722 111, faksi 020 722 7042

VTT, Otsvängen 7 B, PB 1000, 02044 VTT  
tel. växel 020 722 111, fax 020 722 7042

VTT Technical Research Centre of Finland, Otakaari 7 B, P.O. Box 1000, FI-02044 VTT, Finland  
phone internat. +358 20 722 111, fax +358 20 722 7042

Kansikuva: Suola ryömii helposti pitkin pintoja absorboiden vettä myös ilmasta. Kuvan viinilasiin on laitettu puolilleen 10 % suolaliuosta kaksi viikkoa ennen kuvan ottohetkeä. Suola nousi sisäpintaa pitkin reunalle noin kahdeksassa päivässä ja on jatkanut matkaansa lasin reunojen ylitse (ks. kohta 3.1 Ilmastollinen korroosio ja sen aikajänne, s. 47–51).

Hienonen, Risto & Lahtinen, Reima. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa [Corrosion and climatic effects in electronics]. Espoo 2007. VTT Publications 623. 243 s. + liitt. 172 s.

**Avainsanat** corrosion, electronics, electronic equipment, design, verification, atmosphere, climate, moisture, humidity, pollution, quality, quality control, temperature, corrosive gas, measurement, tests, environmental tests, Finland

## Tiivistelmä

Elektroniikan korroosion hallinnasta ja erilaisten suojaustapojen tuntemisesta on tullut yksi tärkeistä suunnittelun osa-alueista, koska elektroniikkaa käytetään yhä enemmän integroituna erilaisiin laitteisiin olosuhteissa, joiden korrosiivisuus on suuri. Toisaalta elektroniikan pakkaustiheyden kasvaminen on tehnyt elektronii-  
kan herkäksi ympäristön korrodoiville vaikutuksille myös lievemmissä olosuh-  
teissa.

Projektissa kartoitettiin niitä vaikutusmekanismeja, joilla ilmasto ja muut ympä-  
ristötekijät, laitteiden käyttötapa ja rakenne sekä valmistusprosessi vaikuttavat  
elektroniikan korrodoitumiseen ja vikaantumiseen. Näiden ongelmien ratkaise-  
miseen kehitettiin menettely, jonka avulla sekä kokenut että aloitteleva suunnitte-  
lija voivat tarkistaa käyttämänsä korroosiontorjuntatekniikan kelvollisuuden sekä  
osaavat ennakoida mahdollisia korroosio-ongelmia laitteen rakenteessa ja osaavat  
myös löytää uusia lähestymistapoja ratkaista niitä.

Julkaisussa esitetään myös käyttöolosuhteiden korrosiivisuuden arviointimenette-  
ly. Lisäksi kuvataan erilaisia korroosiotyyppejä ja suojautumista niitä vastaan,  
korroosion analyysi- ja mittausmenetelmiä sekä korroosioalttiuden tutkimisessa  
ja laadunvarmistuksessa käytettäviä testausmenetelmiä. Julkaisuun sisältyvät laa-  
jahkot luettelot korroosiota ja ilmastollisia vaikutuksia koskevista standardeista  
ja kirjallisuudesta.

Tämä julkaisu on saatavissa sekä suomen- että englanninkielisenä (VTT Publica-  
tions 626, <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P626.pdf>).

Hienonen, Risto & Lahtinen, Reima. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa [Corrosion and climatic effects in electronics]. Espoo 2007. VTT Publications 623. 243 p. + app. 172 p.

**Keywords** corrosion, electronics, electronic equipment, design, verification, atmosphere, climate, moisture, humidity, pollution, quality, quality control, temperature, corrosive gas, measurement, tests, environmental tests, Finland

## Abstract

Corrosion control in electronics and know-how concerning various protection methods have become an important field of design since electronics is increasingly used as integrated into different devices in highly corrosive conditions. On the other hand, the increase of the packaging density of electronics has resulted in electronics that is sensitive to the corrosive effects of the environment even in milder conditions.

The project charted the mechanisms through which the climate, other environmental factors, the way of use of the device and its structure as well as the manufacturing process affect the corroding and faults of the electronics. A method was developed for solving these problems by which both the experienced and the beginning designer can check the feasibility of the applied corrosion protection technique and foresee possible corrosion problems in the structure of the device as well as find new approaches for solving them.

The report also presents an evaluation method for the corrosive effect of the usage environment. In addition, various types of corrosion and protection against them are described, corrosion analysis and measurement methods introduced and testing methods used for quality assurance regarding corrosion discussed. Comprehensive lists of standards and literature concerning corrosion and climatic effects are appended to the report.

This report is available in Finnish and in English. (VTT Publications 626, <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P626.pdf>).

# Alkusanat

Projektin tavoitteena oli kuvata ilmastollisen korroosion, laitteiden rakenteen ja käyttötavan vaikutusta tuotteiden korroosio-alttiuteen sekä kehittää korroosio-ongelmien ratkaisemiseen menettely, jonka avulla sekä kokenut että aloitteleva suunnittelija voivat tarkistaa käyttämänsä korroosiontorjuntatekniikan oikeellisuuden ja löytää myös uusia lähestymistapoja ratkaista kulloinenkin käytännön ongelma. Kokemusten hankkimiseksi kehitetystä katselmointimenettelystä katselmoitiin jokaisessa osallistuvassa teollisuusyrityksessä tietty tuoteperhe ja sen tuotantoprosessi.

Koska korroosio ilmiönä on aina monimutkainen yhdistelmä ympäristön, materiaalien ja laitteen käyttötavan aiheuttamista tilanteista, tarvitaan ympäristön korroosiivisuuden ja laitteen korroosioalttiuden selvittämisessä kehittynyttä mittaus- ja testaustekniikkaa. Tämän vuoksi koottiin myös tietoa siitä, millaisilla mittauksilla, analyysimenetelmillä ja testeillä voidaan selvittää korroosioon liittyviä ongelmia ja varmistaa tuotteen riittävä laatutaso.

Hanke toteutettiin nimellä “Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa” osana Teknologian kehittämiskeskuksen, Tekesin, tutkimusohjelmaa “ETX Elektroniikka tietoyhteiskunnan palveluksessa”, joka käynnistyi vuonna 1997. Tätä hanketta ovat rahoittaneet Tekes, VTT, ABB Industry Oy:n Teknologiaosasto, Benefon Oyj, Efore Oyj Muuntolaite, KONE Oyj sekä Nokia Matkapuhelimet Oy. Hanke toteutettiin VTT:ssä yhteistyössä em. yritysten ja Tampereen teknillisen korkeakoulun Mikroelektroniikan kanssa.

Hankkeen johtoryhmässä ovat olleet:

Jarmo Ruohonen	Nokia Matkapuhelimet Oy, puheenjohtaja
Jyrki Rönkä	ABB Industry Oyj, Teknologiaosasto
Pia Tanskanen	ABB Industry Oyj, Teknologiaosasto
Martti Huolila	Benefon Oyj
Jari Rautiainen	Benefon Oyj
Seppo Salo	Efore Oyj Muuntolaite
Seppo Suur-Askola	KONE Oyj
Ari Nieminen	KONE Oyj
Eero Ristolainen	Tampereen teknillinen korkeakoulu, Mikroelektroniikka
Risto Hienonen	VTT
Reima Lahtinen	VTT

Hankkeen käytännön toteutuksesta ja julkaisun sekä siinä olevien kuvien laadinnasta vastasi projektipäällikkönä ja tekijänä dipl.ins. Risto Hienonen VTT:stä. Dipl.ins. Reima Lahtinen VTT:stä kirjoitti ja on koonnut aineistoa erityisesti materiaaleista, metallien korroosiosta, pinnoitteista, vikamekanismeista ja sanastosta. Hän osallistui myös kaikkiin katselmointeihin eri yrityksissä. Dipl.ins. Antti Turtola VTT:stä kirjoitti kohdat 6.6 ja 6.7 ja tekn. lis. Helge Palmén avusti VCI-materiaaleja koskevan aineiston kokoamisessa.

Insinööri Jukka Vahter teki projektin toimeksiantona opinnäytetyön diplominsinööritutkintoa varten aiheena *Elektroniikkatuotteiden korroosioherkkyyden määrittäminen* Tampereen teknillisen korkeakoulun Materiaalitekniikan osastolla.

Tutkimuksen johtoryhmän ja omasta puolestani kiitän kaikkia hankkeeseen osallistuneita ja katselmuksissa sekä tiedonhankinnassa auttaneita yrityksiä ja henkilöitä sekä rahoittajia heidän tuestaan hankkeelle. Kiitän professori Tero Hakkarista ja muita julkaisun sisällön tarkastaneita henkilöitä heidän arvokkaista korjausehdotuksistaan.

Espoossa 14.4.2000

Risto Hienonen  
projektipäällikkö

## Toisen painoksen alkusanat

Tämän julkaisun toiseen painokseen on täydennetty lähdeaineistoa, lisätty muutama vikamekanismikuvaus, päivitetty standardeja koskevat tiedot sekä korjattu ensimmäisessä painoksessa havaitut virheet.

Espoossa 12.12.2006

Risto Hienonen  
projektipäällikkö

Yhteystiedot:

e-mail etunimi.sukunimi@vtt.fi

puhelin 020 722 111

faksi 020 722 7042

VTT

PL 1000

02044 VTT



# Sisältö

Tiivistelmä.....	3
Abstract.....	4
Alkusanat.....	5
Toisen painoksen alkusanat.....	6
1. Korroosio elektroniikassa.....	11
1.1 Korroosion ilmeneminen ja merkitys.....	12
1.2 Elektroniikkaa korrodoivat olosuhteet.....	16
1.3 Korroosion merkitys.....	20
1.4 Korroosion hallintastrategia.....	21
1.5 Riskialttiiden kohteiden tunnistaminen tuotteessa.....	24
1.6 Suunnittelu, valmistus ja kenttäpalaute.....	26
2. Korroosion hallitsemismahdollisuudet.....	28
2.1 Analyytinen lähestymistapa.....	28
2.2 Olosuhteiden tunteminen.....	30
2.3 Tuotteen vikaherkkyys ja käyttötapa.....	34
2.4 Korroosiomekanismien tuntemus.....	34
2.5 Testaus ja kenttäpalaute.....	38
2.6 Korroosionestotekniikat.....	40
2.7 Alihankinnat, logistiikka ja kenttäpalaute.....	43
3. Korroosio ja kosteus elektroniikassa.....	47
3.1 Ilmastollinen korroosio ja sen aikajänne.....	47
3.2 Kosteuden vaikutus elektroniikassa.....	51
3.3 Vesi ja kemikaalit.....	52
3.4 Materiaalien ja komponenttien omat päästöt.....	54
3.5 Ulkoiset liitokset ja käyttökytkimet.....	59
3.6 Kotelo- ja runkorakenteet.....	60
4. Tuotteen korroosionsietoisuuden määrittely.....	62
4.1 Korroosionsietoisuus.....	62
4.2 Elinkaaren pituuden vaikutus.....	63
4.3 Tuotteen herkkyys muutoksille.....	64
4.4 Olosuhteiden korrosiivisuus.....	66
4.5 Korroosioriskin suuruusluokka.....	67
4.6 Suojaavat toimenpiteet.....	68

4.7	Vikojen luokittelu.....	69
4.8	Korroosionsietoisuuden kokonaistaso.....	71
5.	Korroosion hallintamethodiikka.....	72
5.1	Korroosionsiedon verifiointi ja liittäminen tuotekehitykseen.....	72
5.2	Käyttöolosuhteiden korrosiivisuus.....	75
5.3	Tuotanto- ja asennusolosuhteet.....	90
5.4	Kuljetus ja varastointi.....	91
5.5	Ulkoinen suojaustekniikka, lähiolosuhteisiin vaikuttaminen.....	95
5.6	Komponentit, johdotukset ja liitokset.....	96
5.7	Maalit, muovit ja ilmastolliset vaikutukset.....	97
5.8	Suojauskeinojen haittavaikutukset.....	98
5.9	Tuotteen spesifikaatio korroosion kannalta.....	99
5.10	Korroosiotestien käyttökelpoisuus.....	100
5.11	Analyysimenetelmien käyttäminen.....	114
5.12	Olosuhdeseuranta.....	115
6.	Korroosionsiedon parantaminen tuotteessa.....	117
6.1	Mikroilmastoon vaikuttaminen.....	117
6.2	Sijoituspaijan valitseminen.....	119
6.3	Kotelon tiiviyden valinta.....	123
6.4	Kotelon suojausluokitus, IP-koodi.....	126
6.5	Piirilevy.....	128
6.6	Komponenttilevyn valmistus.....	131
6.7	Komponenttilevyn valmistuksen puhtaus.....	132
6.8	Liittimet.....	135
6.9	Kotelomateriaalit.....	142
6.10	Metallien pinnoitusmenetelmät.....	147
6.11	EMC- ja muut tiivisteet.....	154
6.12	Johtavat muovit.....	155
6.13	Palonestoaineet.....	156
6.14	Korroosioinhibiittoreiden käyttö.....	156
6.15	Kaasuabsorbentit.....	168
6.16	Kosteuden poisto kuljetuspakkauksista.....	169
7.	Sovellusesimerkit.....	176
7.1	Katselmointikohteet.....	176
7.2	Hissielektroniikka.....	179
7.3	Taajuusmuuttaja.....	180
7.4	Teholähde.....	180
7.5	Matkapuhelin.....	181

Kirjallisuusviitteet .....	182
Lähteet .....	182
Jukka Vahterin opinnäytetyöhön liittyviä lähteitä .....	191
IVF-julkaisuja.....	196
Ympäristöolosuhdestandardit .....	198
Luotettavuus- ja korrosiivisuusstandardit .....	203
Korroosio- ja kosteussuojaus- sekä materiaalistandardit .....	206
Veden absorptio, höyryn ja kaasujen läpäisevyys.....	218
Kuljetuspakkausstandardeja .....	220
Testausmenetelmästandardit.....	222

## Liite 1

Korroosion perusteita ja vikamekanismit.....	1
1 Korroosio, vesi ja kosteus .....	3
2 Korroosiotyypit ja vikamekanismit.....	26
3 Vesiliuokset ja pintajännitys .....	57
4 Metallipintojen ilmiöitä .....	74
5 Korroosion kulkuun vaikuttavia tekijöitä .....	78
6 Pintojen kontaminaatio ja ilman epäpuhtaudet .....	81
Liitteen 1 kirjallisuusviitteet.....	84

## Liite 2

Ilman laatuvaatimukset

## Liite 3

Korroosionhallinnan katselmointimenettely .....	1
1 Korroosion hallinta elektroniikkayrityksessä.....	2
2 Korroosionsiedon verifiointiprosessi .....	2
3 Katselmoinnin tekniset osa-alueet.....	10
4 Elektroniikan katselmointimenettely .....	15

## Liite 4

Korroosiosanasto

Hakemisto



# 1. Korroosio elektroniikassa

Elektroniikan korroosion hallinnasta ja erilaisten suojaustapojen tuntemisesta on tullut yksi tärkeistä suunnittelun osa-alueista, joilla varmistetaan tuotteen luotettavuus ja kilpailukyky vaativilla markkinoilla. Elektroniikkaa käytetään yhä enemmän integroituna erilaisiin koneisiin ja sitä käytetään myös sellaisenaan ulko-olosuhteissa, joiden korrosiivisuus on suuri. Toisaalta elektroniikan pakkaustiheys on noussut niin suureksi kaikilla tärkeillä tuotealueilla, matkapuhelimissa, tietoliikennelaitteissa, tietokoneissa, automaatiassa ja tehoelektroniikassa, että se väistämättä tekee elektroniikan herkäksi ympäristön korrodoiville vaikutuksille myös suhteellisen lievissä olosuhteissa.

Tässä julkaisussa on ollut tavoitteena kartoittaa ja esitellä niitä vaikutusmekanismeja, joilla ilmasto ja muut ympäristötekijät, käyttäjät, laitteiden käyttötapa ja rakenne sekä valmistusprosessi vaikuttavat elektroniikan korrodoitumiseen ja vikaantumiseen. Toinen päätavoite on ollut kehittää näiden ongelmien ratkaisemiseen menettely (kohta 5 *Korroosion hallintamethodiikka* ja liite 3 *Katselmointimenettely*), jonka avulla sekä kokenut että aloitteleva suunnittelija voivat tarkistaa käyttämänsä korroosiontorjuntatekniikan kelvollisuuden. Esitetyt menettelyt auttavat myös ennakoimaan mahdollisia korroosio-ongelmia uuden laitteen rakenteessa ja helpottavat uusien ongelmanratkaisutapojen löytämistä.

Tässä julkaisussa esitetään myös käyttöolosuhteiden korrosiivisuuden arviointimenettely. Lisäksi kuvataan erilaisia korroosiotyyppejä (liite 1 *Korroosion perusteita ja vikamekanismit*) ja suojautumista niitä vastaan, korroosion analyysi- ja mittausmenetelmiä sekä korroosioalttiuden tutkimisessa ja laadunvarmistuksessa käytettäviä testausmenetelmiä. Julkaisun liitteisiin sisältyvät laajahkot luettelot korroosiota ja ilmastollisia vaikutuksia koskevista standardeista ja kirjallisuudesta.

Tätä julkaisua täydentävää tietoa, jonka avulla saa nopeasti tuntuman ilmastolliseen korroosioon elektroniikassa, on teoksissa:

[Henriksen et al. 1991] Corrosion of electronics. Korrosionsinstitutet

[Leygraf & Graedel 2000] Atmospheric Corrosion. Wiley-Interscience.

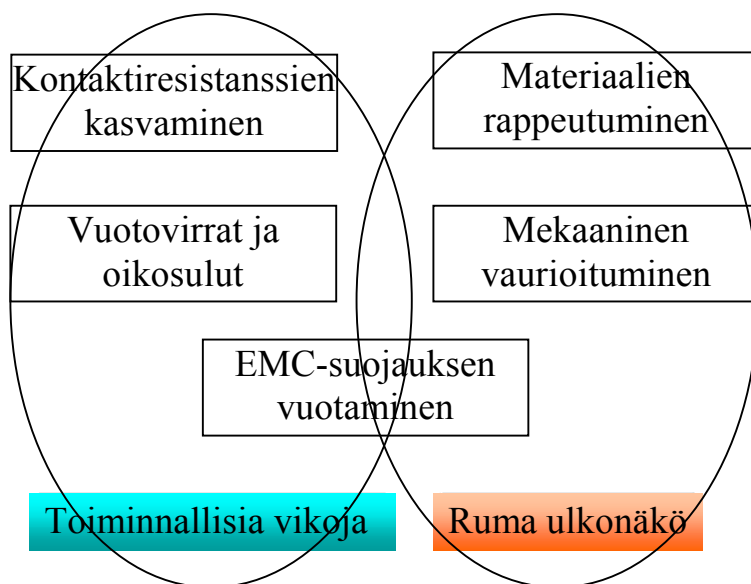
Laaja-alaisen yleiskuvan korroosiosta saa näistä:

[Roberge 2000] Handbook of Corrosion Engineering

[Roberge 2006] Corrosion Basics: An Introduction, 2<sup>nd</sup> Edition.

## 1.1 Korroosion ilmeneminen ja merkitys

Elektroniikan pakkaustiheyden jatkuva kasvaminen synnyttää lisääntyvässä määrin haitallisia häiriöitä laitteisiin. Tuotteet ovat yhä herkempiä kosteuden ja korroosion haittavaikutuksille. Elektroniikassa korroosio ja ilmastolliset vaikutukset kasvattavat liitosten kontaktiresistansseja ja johdinten välisiä vuotovirtoja sekä rappeuttavat materiaaleja, mitkä näkyvät erilaisina toiminnallisina vikoina, sähkömagneettisen häiriintymisen lisääntymisenä ja ulkonäöltään rumina pintoina (kuva 1.1). Nämä viat tulevat lähes aina esille ennen kuin laitteen mekaniikka kärsii. Elektroniikassa hyvinkin vähäinen korroosio ja pintojen kontaminaatio voi olla tuhoisa laitteen toimivuudelle. Jopa vain nanometrien suuruusluokkaa oleva korroosioalue komponentissa voi estää laitteen normaalin toiminnan, kun taas suurissa teräsrakenteissa ei edes millimetrien kokoinen korroosioalue aiheuta ongelmia [Ishikawa & Ozaki 1999].



Kuva 1.1. Korroosion aiheuttamat perusongelmat elektroniikassa.

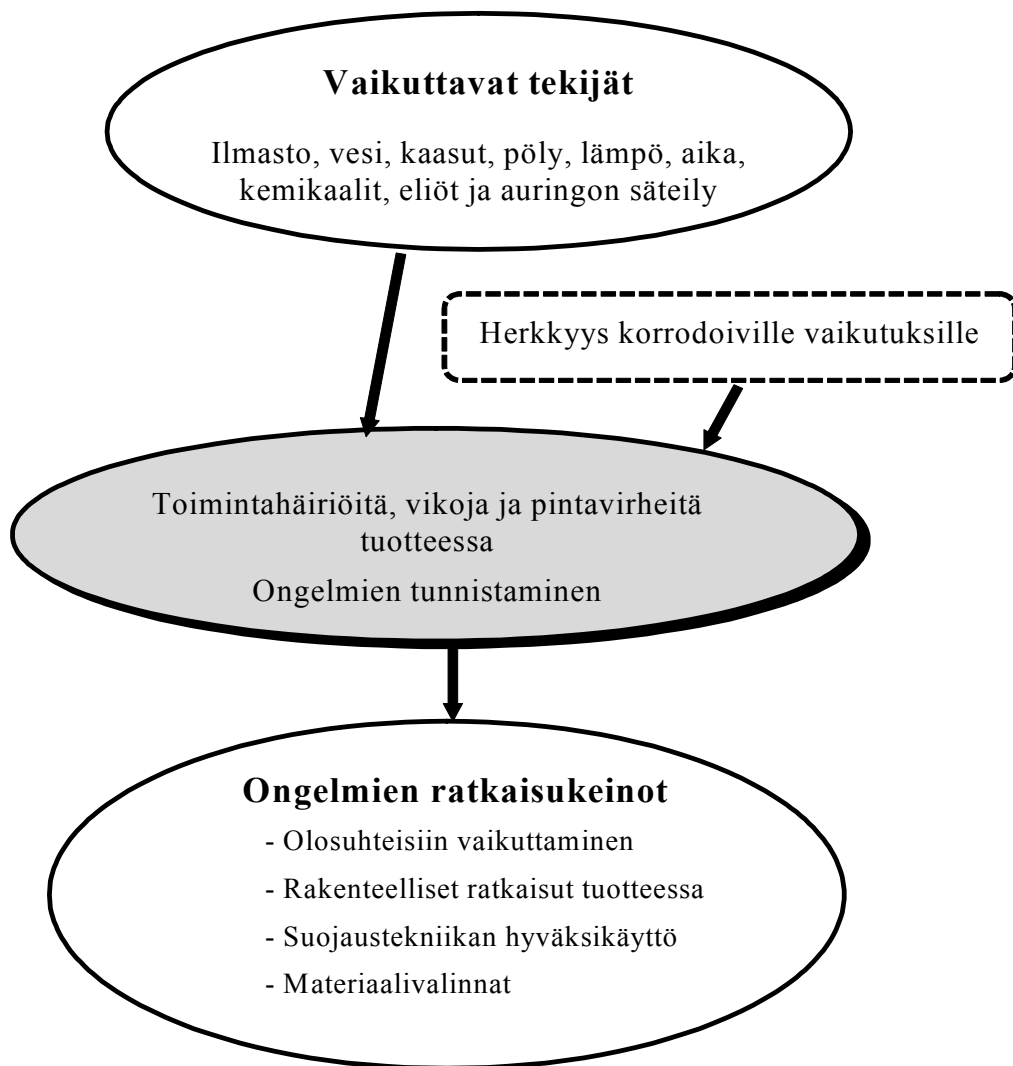
Pelkistetyn määrittelyn mukaan “korroosio on materiaalin tuhoutumista”.

Materiaali voi olla metallia, mineraalia tai orgaanista yhdistettä, kuten muovia, jotka kaikki tuhoutuvat myös korroosioreaktioiden kautta! Korroosioreaktiot eivät vaadi korkeata lämpötilaa, tavallisimmat korroosiohaitat esiintyvät lämpötiloissa +0...+40 °C. Pakkasessa korroosiota ei yleensä tapahdu tai se on hyvin hidasta (esim. suolaliuos on nesteinä muutamassa pakkasasteessakin, jolloin korroosio jatkuu), mutta korkeissa lämpötiloissa > 55 °C korroosioreaktiot kiihtyvät kuivissakin käyttöolosuhteissa johtaen materiaalien rappeutumiseen. Pelkistäen

voidaan sanoa, että *korroosio on läsnä aina ja kaikkialla, missä vain on vettä, happea ja eliöitä.*

Standardisointijärjestöt ovat määritelleet korroosion hieman suppeammin [SFS-ISO 8044]:

”Korroosio on metallin fysikaalis-kemiallinen reaktio ympäristönsä kanssa, mikä aiheuttaa muutoksia metallin ominaisuuksiin ja mikä usein voi johtaa metallin, sen ympäristön tai teknisen järjestelmän vaurioihin.”



*Kuva 1.2. Korroosio-ongelman ilmenemisen ja hallitsemisen perusosat.*

Ilmastolliset vaikutukset (kuva 1.2) aikaansaavat epäpuhtauksien ja veden kertymisen pinnoille. Myös lämpö ja auringonvalo rappeuttavat tuotteita ja edistävät korroosion ja muiden haittavaikutusten etenemistä.

Vesi, pöly, kaasut ja orgaaniset yhdisteet aikaansaavat vuotovirtoja, oikosulkuja ja mekaanisia muutoksia. Kontaminaatiosta ja korroosiosta johtuva vuotovirtojen lisääntyminen voi aiheuttaa esim. ylikuulumista tai satunnaisia “pehmeitä” vikoja muistin osoituksessa [Comizzoli et al. 1992 ja 1999]. Korroosion vaikutukset ovat joskus verrattavissa avaruuden hiukkassäteilystä aiheutuviin pehmeisiin vikoihin, jotka esiintyvät satunnaisesti ja aiheuttavat joko tilapäisiä tai pysyviä toimintahäiriöitä laitteisiin.

Korroosion vaikutukset voivat olla hyvin radikaaleja ja nopeita tavallisissakin ympäristöolosuhteissa. Korrosio näkyy tuotteen toimintakyvyn menetyksenä ja rumana ulkonäköinä jopa muutaman viikon kuluttua käyttöönotosta taikka viikon kestäneen kuljetuksen jälkeen, jos tuote altistuu vedelle ja korrodoiville aineille.

Vaikeimmissakin olosuhteissa ongelmiin on mahdollista löytää toimiva ratkaisu, koska ongelmien syyt ovat yleensä selvitettävissä. Lievähköissä olosuhteissa esiintyviin ongelmiin on usein vaikeampi saada otetta, koska vikojen haitallisuuden vaikuttaa hyvin paljon laitteen sähköinen ja mekaaninen suunnittelu. Jos laite on suunniteltu huonosti, ts. siinä on vikamekanismeja (vuotovirrat, sarjaresistanssit, EMC-ongelmat), jotka tekevät sen herkäksi toimintahäiriöille, voi hyvinkin vähäinen korrodoituminen, jota on vaikea paikantaa, aiheuttaa lisää ongelmia. Toisaalta laitteen mekaaninen konstruktio voi olla sellainen, että se edistää korroosiota, esim. veden kertyminen laitteen liitospintoihin tai sisäosiin, mekaanisten resonanssien aiheuttama alttius hiertymiselle (fretting) ja liian runsaan puhdistamattoman jäähdytysilman puhaltaminen elektroniikkaosiin.

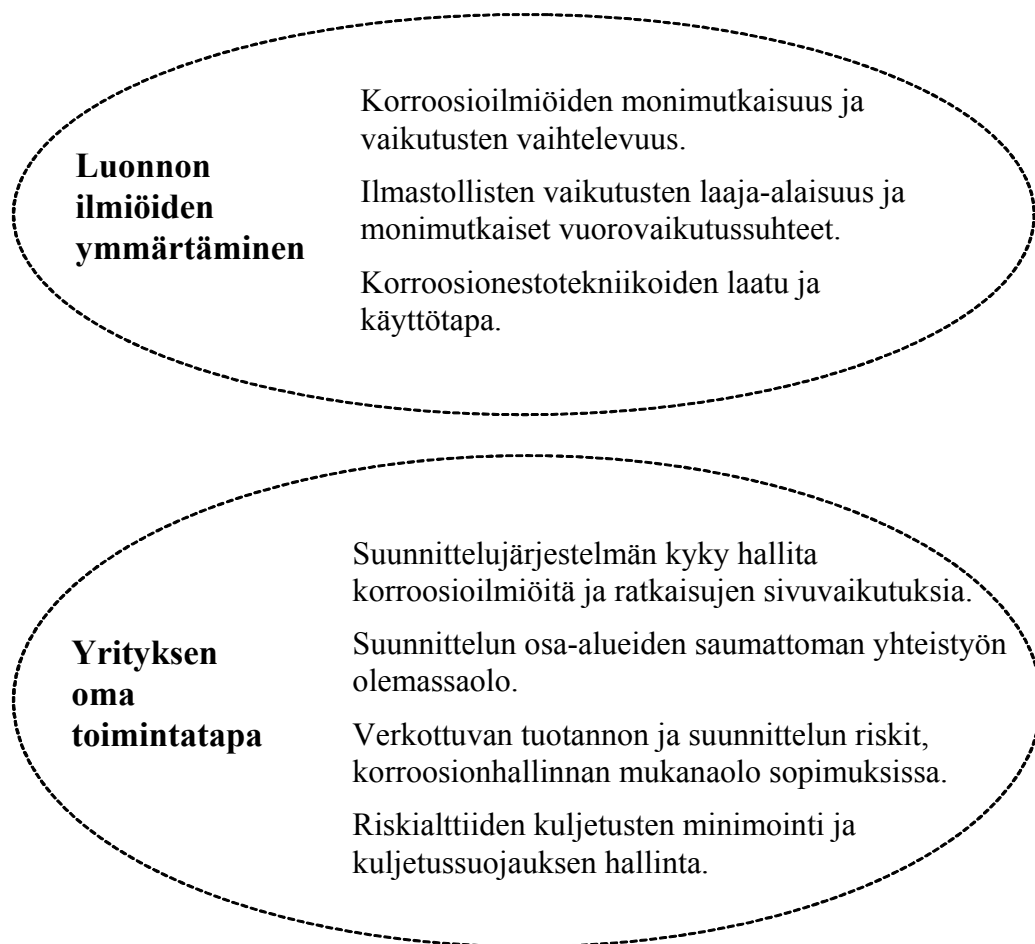
Elektroniikassa on tavallista kontaminoitumisen ja korroosion vaivihkainen eteneminen, mikä näkyy ajoittain esiintyvinä toimintahäiriöinä ja pintakäsittelyn pieninä, mutta kiusallisina virheinä. Kontaktiresistanssit ja vuotovirrat kasvavat aiheuttaen erilaisia häiriöitä. Tämä on laitevalmistajalle erityisen kiusallista, koska vikojen todellinen syy jää usein selvittämättä ja asiakkaiden vialliseksi ilmoittamisissa tuotteissa voi esiintyä huomattava määrä yksilöitä, joista huolto ei löydä mitään “varsinaista vikaa”.

Voidaan jopa väittää että, jos selvittämättömien vikojen osuus on huomattavan suuri, silloin yrityksellä on vakava laatuongelma, joka voi olla esim. korrosio, EMC (sähkömagneettinen yhteensopivuus) tai lämpösuunnittelu taikka nämä kolme yhdessä, kuten käytännössä usein onkin.

Tässä käsitellään korroosiota ja ilmastollisia vaikutuksia elektroniikassa laaja-alaisesti tavoitteena tutustuttaa lukija niihin olosuhteisiin ja ilmiöihin, jotka aiheuttavat korroosiota ja muita rappeutumisilmiöitä elektronisissa tuotteissa. Kor-



roosion ja muiden rappeutumismekanismien torjunnassa voidaan harvoin varmistaa tuotteen selviäminen käyttöolosuhteissa soveltamalla vain yhtä tai edes muutamaa teknistä ratkaisutapaa (kuva 1.3). Jos asioiden keskinäisistä vaikutussuhteista ei ole tietoa, saattaa suunnittelija ratkaista osaongelman ja tietämättään synnyttää saman tien muutamia uusia ongelmia. Suunnittelijoiden on ymmärrettävä kohtalainen joukko taustalla olevia ilmiöitä voidakseen valita ne korroosio-ongelmakokonaisuuden ratkaisutavat, joita kussakin yksityiskohdassa on järkevää käyttää. Lisäksi tuote olisi suunniteltava siten, että se olisi mahdollisimman epäherkkä osien ja komponenttien ominaisuuksien pienille muutoksille.



*Kuva 1.3. Korroosionhallinnan riski- ja ongelma-alueet.*

Korroosion hallinta ei ole pelkästään tuotteen ominaisuuksien hallintaa (kuva 1.3). Jotta yrityksen taloudellinen tulos, tuotteen laatu ja asiakkaiden tyytyväisyys tulisivat varmennettua, yrityksen koko toimintalogistiikka ja suunnittelujärjestelmä on saatava omaksumaan sellaiset toimintatavat ja menetelmät, joiden avulla ilmastollisia ja korroosio-ongelmia voidaan hallita.

Korroosion torjunta itsessään on poikkitieteellistä toimintaa, mutta sen torjunnassa ja vaikutusten minimoinnissa on oleellista, että suunnittelutyössä saadaan sekä logistiikan, sähköisen toiminnan, EMC:n, mekaniikan, lämpösuunnittelun, komponenttien että ergonomian suunnittelijat ja toteuttajat toimimaan yhdessä siten, että saavutetaan kokonaisuuden kannalta toimiva ja taloudellisesti edullinen ratkaisu.

Käytännössä tilanteissa, joissa korroosion taustoja ja vaikutuksia ei ole otettu riittävästi huomioon, saatetaan ongelmien selvittämisen tuloksena joutua arvioimaan uudelleen sekä yrityksen logistiikka että tuotteiden koko rakenne ja suunnittelutapa sen lisäksi, että materiaalit ja komponentit saattavat mennä uusiksi.

E erityisen suuri merkitys korroosion haittojen torjunnassa on sopimisella verkotuneessa tuotanto- ja suunnitteluprosessissa, miten erilaiset korroosion hallintaan liittyvät asiat hoidetaan. Ongelmaa ei voida sysätä pelkästään alihankkijoiden vastuulle, vaikka näillä esim. osien pinnoittajina on erittäin tärkeä rooli, vaan koko logistiikkaketjun on osallistuttava tuotteen korroosionhallintaan tekemällä aina kussakin tuotanto- ja kuljetusvaiheessa oikeat toimenpiteet.

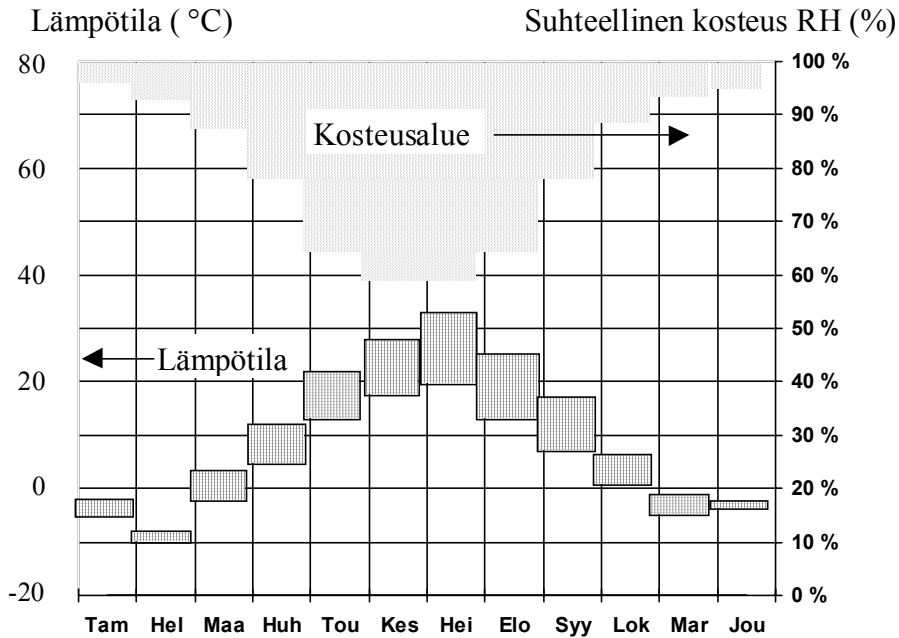
Jokainen kuljetusvaihe lisää tuotteiden käsittelyä ja altistaa sen hallitsemattomille ilmastollisille ja mekaanisille rasituksille. Kovin pilkkoutuneessa tuotannossa kuljetukset eri tehdasyksiköiden välillä voivat olla hyvin runsaat. Kaikissa kuljetuksissa osat olisi suojattava ympäristörasituksilta, jotteivat osat vikaantuisi mekaanisesti, korrodoituisi ja kontaminoituisi näiden kuljetusten ja välivarastointien yhteydessä. Sama koskee luonnollisesti valmiita tuotteita.

Tuotteen ja tuotannon suunnittelu ei saa olla vain palikkaleikkiä, jossa palikoita järjestellään sujuvan kokoonpanon kannalta, mutta palikoiden fyysinen olemus ja herkkyys erilaisille ympäristörasituksille jää huomiotta. Erityisesti olisi varmistettava ettei suojaamattomia kuljetuksia järjestetä sellaisiin osaprosessien väleihin, joissa osat ovat erityisen herkkiä vaurioitumaan tai kontaminoitumaan. Suunnitteluun on saatava tietämys niistä fysikaalisista ja kemiallisista vaikutuksista, jotka viime kädessä ratkaisevat toimiiko tuote ja onko se myytävissä asiakkaalle pitkällä tähtäyksellä.

## **1.2 Elektroniikkaa korrodoivat olosuhteet**

Elektroniikkalaitteiden korroosio- ja kontaminaatiouhkan kannalta kriittisimmille olosuhteille on ominaista kastuminen ilmasta tiivistyvän tai tippuvan veden vuoksi. Mikäli laitteen välitön ympäristö on suhteellisen pölytön ja kuiva, ilman suhteellinen kosteus on alle 40 %, eikä tippuvaa vettä ole, valtaosa korroosio-ongelmista

alle 40 °C lämpötiloissa jää pois tai korroosio muuttuu niin hitaaksi ettei se ennätä vaikuttaa tuotteen elinjakson aikana kovinkaan paljoa. Todellisuudessa tällaiset olosuhteet ovat ylläpidettävissä vain ilmastoiduissa sisätiloissa. Ulkona tällaisten olosuhteiden saavuttaminen on melko vaikeaa, mitä kuvastaa kuvan 1.4 säätilasto.

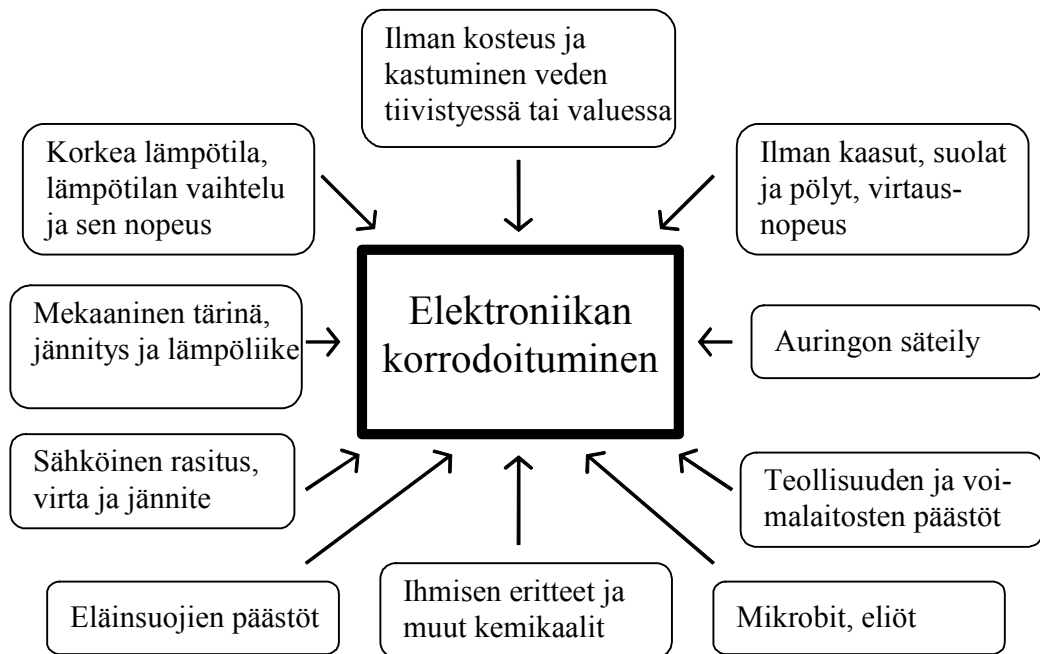


Kuva 1.4. Lauhkeiden ja kylmien alueiden sääkeskiarvot eri vuodenaikoina (Keski-Eurooppa, Kanada ja Yhdysvaltojen pohjoisosa) [Gellerstedt 1995, STANAG 1980].

Kuva 1.4 esittää vallitsevaa lämpötilan ja suhteellisen kosteuden **keskiarvojen** jakautumista kalenterivuoden aikana lauhkeilla ja kylmillä ilmastoalueilla. Korroosioriskin kannalta erittäin merkittävää on havaita, että ulkoilman suhteellinen kosteus on aina yli 60 %. Vain toukokuusta elokuun loppuun esiintyy jaksoja, jolloin kosteus on keskimäärin edes alle 80 % ulkona. Trooppisilla alueilla ja meren läheisyydessä kosteudet ovat näitäkin korkeammalla tasolla (ks. liite 1 kohta 1.7 *Ilman suhteellinen kosteus*).

Kohdassa *Ympäristöolosuhdestandardit* on esitetty IEC:ssä standardisoidut lämpötila- ja kosteusluokat, joita suositellaan käytettäväksi, kun määritellään laitteiden ja komponenttien ympäristöluokkia [IEC 60721-1, IEC 60721-3-9]. Jälkimmäinen standardi luokittelee nimenomaan laitteiden sisäosissa (mikroilmastossa) vallitsevat lämpötilat ja suhteelliset kosteudet. Siinä mikroilmasto määritellään paikkana, johon komponentit on asennettu tuotteessa. Mikroilmaston kuvauksessa vain lämpötila ja kosteus on otettu huomioon.

Kuvassa 1.5 on lueteltu korroosioriskiä lisäävät olosuhteet. Ilman virtausnopeus, lämpötilan muutosnopeus sekä suhteellisen kosteuden muutosnopeus vaikuttavat osaltaan pintojen korroosio- ja kontaminoitumisnopeuteen. Laitesuunnittelija voi päätöksillään vaikuttaa myös näihin, paras tilannehan olisi korroosion kannalta, että nämä muutosnopeudet olisivat mahdollisimman hitaat ja absoluuttiset tasot mahdollisimman alhaiset.



Kuva 1.5. Korroosioriskiä lisäävät olosuhteet.

Vapaassa ulkoilmassa ilman epäpuhtauksien ja veden ohella huomattava lisäys korroosioriskiin tulee auringon säteilystä, mikä rappeuttaa kaikkia sille altistuvia materiaaleja. Auringon säteilyn suora haittavaikutus muovimateriaaleihin ja maalipintoihin on hyvin suuri verrattuna metallipinnoille kohdistuviin haittoihin.

Ilmassa olevat kaasumaiset ja ioniset aineet sekä pöly ovat levinneet pääosin suhteellisen tasaisesti kaikkialle kaupunkimaisissa ympäristöissä. Vain hyvin suurten liikennevirtojen ja teollisuuslaitosten sekä voimaloiden läheisyydessä esiintyy huomattavasti keskiarvoja suurempia pitoisuuksia, jotka nostavat korroosioriskiä tavanomaisesta. Näin ollen korroosio- ja kontaminaatoriskit ovat yleisesti kohtalaisen tasaisesti levinneitä kaikkialle.

Luonnon omat päästöt aiheuttavat usein suuren korroosioriskin. Näistä riskin aiheuttajista yleisin lienee merivedestä peräisin oleva suola (kloridit), joka leviää ilman kautta jopa 50 km etäisyydelle rannikoista. Toisaalta jo 250 m etäisyydellä meren rannasta ilman kloridipitoisuus voi olla vain kymmenesosa meren välittö-

mässä läheisyydessä (25 m) vallitsevasta kloridipitoisuudesta. Myrskyt saattavat joillakin alueilla aiheuttaa ajoittain erittäin voimakasta suolan ja/tai hiekkapölyn leviämistä. Esim. Arabian niemimaa on muinaista merenpohjaa, jonka vuoksi hiekka on suolaista ja näin ollen hiekkapölykin on suolaista. Samantapaisia ongelmia aiheuttavat tulivuorten paikalliset rikkipitoiset kaasu- ja tuhkapäästöt sekä kuumavesilähteiden päästöt.

Kun ilmasta ja ihmisen toiminnasta peräisin olevat taustasaasteet vaikuttavat yhdessä laitteen rakenteesta, materiaalivalinnoista, kuljetuksesta ja käytöstä johtuviin riskeihin, syntyy näistä helposti yhdistelmä, joka näkyy lopputuotteen enenaikaisena vikaantumisenä kontaminaation ja korroosion seurauksena.

Suuret lämpötilan vaihtelut, jotka ovat päivittäisiä ulko-olosuhteissa, aiheuttavat aina riskejä veden tiivistymisestä pinnoille, jolloin ilman kaasut, ja muut epäpuhtaudet yhdessä veden kanssa muodostavat pinnoille syövyttäviä yhdisteitä esim. rikki-, typpi- ja suolahappoja, jotka sitten korrodoivat kaikkia metalleja. Myös laitteiden tilapäinen kastuminen kuljetuksen aikana taikka ihmisen toimenpiteiden vuoksi aiheuttaa melko suuren ja toistuvan riskin korroosion käynnistymiseen.

Mekaaninen tärinä ja lämpötilan vaihtelut aiheuttavat esim. liittimien uros- ja naaraskoskettimien hieroutumista toisiansa vasten. Tämä hierova liike aiheuttaa kosketinpinnoitteiden kulumista ja hiertymiskorroosiota, joka kasvattaa kontaktiresistanssia hyvinkin voimakkaasti [liite 1, kohta 2.14].

Laitteiden pakkaus- ja tehotiheyden kasvaminen on usein lisännyt jäähdytykseen käytettävän ilman kierrättämistä laitteiden sisällä, tämä lisää oleellisesti pintojen kontaminaatiota ja kaasukontakteja [Lobnig et al. 1999].

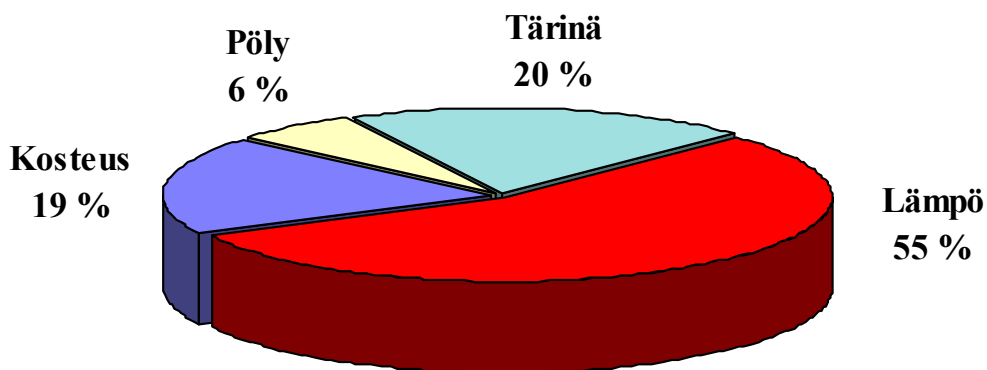
Ihmisen toimintaan läheisesti liittyvässä maataloudessa ja karjankasvatuksessa esiintyy hyvin vahvoja kaasuu- ja nestemäisiä päästöjä, joista hankalimmat ovat ammoniakki ja rikkivety, joita esiintyy kanaloissa, sikaloissa ja navetoissa sekä luonnossa mätänevien kasvien läheisyydessä. Jokaiselle tuttu on keväinen vahva maan lemu, joka johtuu pääosin mätänevistä kasvinjätteistä lähtevistä rikkiyhdisteistä. Myös ihmisen omat eritteet, kuten hiki, sylki sekä erilaiset ihonhoitoaineet, pesuaineet sekä nautinta-aineet aiheuttavat monenlaisia vikailmiöitä laitteisiin. Ihmisen aineenvaihdunnan lopputuotteina syntyy hiilidioksidia, metaania ja aldehydejä (hengitys ja hiki). Tupakan savu sisältää erilaisia tervoja ja muita yhdisteitä, jotka voivat aiheuttaa korroosio- ja kontaminaatio-ongelmia.

Sähköinen rasitus nopeuttaa myös korroosiota. Esim. suuri virta voi lämmittää juotosliitosta ja asteittain rappeuttaa sitä. Tiheissä johdinkuvioissa johdinten vä-

linen suuri kentänvoimakkuus lisää vuotovirtoja ja edistää kontaminoituneella pinnalla korroosiota. Mikropiireissä, joissa johdinleveydet ovat enintään muutamia mikrometrejä tai sen osia, voi tapahtua johdinten katkeilua metallin migratointumisen vuoksi, kun virrantiheys on hyvin suuri (liite 1, kohta 4.3 *Elektromi-graatio*).

### 1.3 Korroosion merkitys

Kuvan 1.6 mukaan elektroniikkalaitteen vikaantumisen syistä pääosa liittyy lämpöön tai kosteuteen ja tätä kautta korroosioon. Lämpötilan korkeus (kylmä/kuuma) ja vaihtelu sekä kosteus vaikuttavat aina materiaalien ja komponenttien fyysisiin ja kemiallisiin ominaisuuksiin.



Kuva 1.6. Elektroniikkalaitteen vikaantumisen syyt ilmailualalla (*Flomerics, US Air Avionics Integrity Program, Journal of the IEST*).

Näiden vaikutusten suuruus puolestaan ratkaisee sen, milloin jokin lämpötilan muutos tai absoluuttinen taso taikka kosteustaso on merkittävä tuotteen ominaisuuksien huononemisen ja käyttövarmuuden kannalta.

Kaikki kuvassa 1.6 mainitut ympäristövaikutukset edistävät korroosion syntymistä ja tätä kautta laitteiden vioittumista käytössä. Kaikki nämä rasitteet vaikuttavat sekä laitteiden toimintaan suoraan, käytettyjen materiaalien ominaisuuksiin (komponenttien parametrimuutokset) sekä korroosiomekanismien kautta vikaantumisten laatuun ja määrään.

## 1.4 Korroosion hallintastrategia

Korroosion moni-ilmeisyyden vuoksi siitä on usein vaikea saada kunnollista otetta. Yksittäistä vikatapausta tutkittaessa korroosion perusilmentymä saadaan suhteellisen helposti selville, mutta korroosion todellinen syy ja sen järkevä ennaltaehkäisevä korjaustapa jäävät helposti selvittämättä. Korroosion olemassaolo ehkä tunnetaan, mutta sitä, milloin ja missä se on merkittävänä vikamekanismina tuotteessa, on suunnittelijan ja laatuhenkilöstön vaikea saada selvää. Peruseriaatteena pitäisi olla *tunnistaa ensin ongelma ja löytää sitten sille järkevä ratkaisu*.

Käytännön toimintaympäristössä korroosion hallintaan voidaan päästä vain suunnittelua ja laatu järjestelmää kehittämällä. Suunnittelu tuottaa uusia ideoita, ratkaisuja ja laatu järjestelmä antaa palautteen kuinka suunnittelu ja tuotanto ovat onnistuneet.

Korroosion hallitseminen voidaan kiteyttää kahteen periaatteeseen:

- tehdään vikasietoinen laite ja
- käytetään mahdollisimman inertejä materiaaleja.

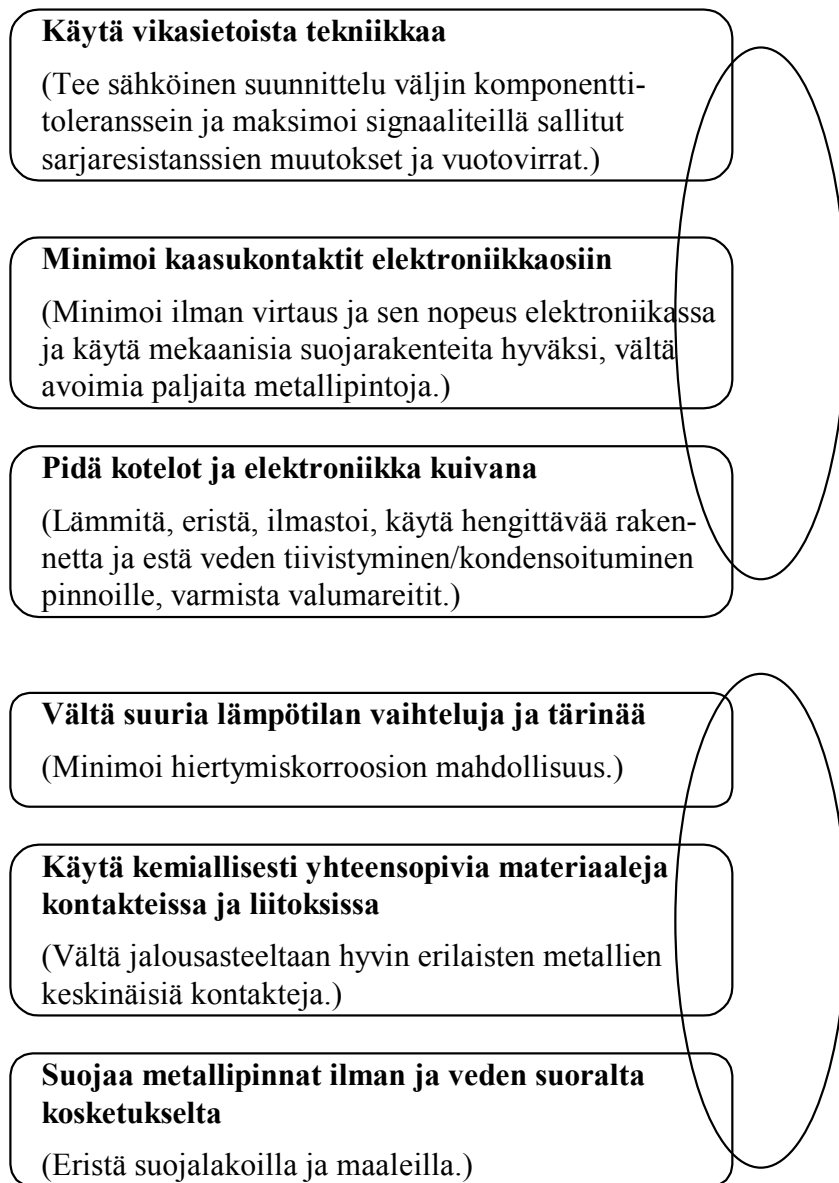
Vikasietoisuudella tarkoitetaan tässä laitteen kykyä toimia, vaikka sen osien ominaisuudet muuttuvatkin esim. lämpötilan ja ajan myötä. Vikasietoisuuden toteuttamisella voidaan huomattavasti lieventää vaivihkaa etenevän korroosion vaikutuksia tuotteen toimivuuteen. Vikasietoisuudella tuotteen toimivuus varmistetaan, vaikka korrosio aiheuttaa koko ajan esim. kontaktiresistanssien ja vuotovirtojen kasvua.

Täysin inertejä (kemiallisesti passiivisia) materiaaleja ei ole, mutta komponentit, komponenttilevyt ja metalliosat sekä muovirakenteet voidaan kohtuullisella vaivannäöllä tehdä melko inerteiksi ilmastollisille, kemiallisille ja näin myös korroosion vaikutuksille. Jos inertti materiaali on liian kallis, on hinnan alentamiseksi silloin käytettävä muita yksinkertaisia ja usein myös halpoja suojaavia keinoja, joilla voidaan saavuttaa kohtuullinen riskitaso korrosio-ongelmien suhteen.

Elektroniikkatuotteen suunnittelussa on valittava se strategia, jolla korrosio-ongelma ratkaistaan työn alla olevassa tuotteessa. Käytettävissä on itse asiassa vain muutama peruseriaate (kuva 1.7), mutta niiden toteuttamiseen löytyy sitten loputon määrä erilaisia teknisiä ratkaisuja.

Näitä peruseriaatteita voidaan soveltaa kutakin erikseen tai useampia yhdessä kunkin tapauksen sallimissa rajoissa. Itse asiassa lähes koko korroosioproblematiikka voitaisiin hoitaa toteuttamalla mahdollisimman pitkälle kuvassa 1.7 esitetyn kolmen ensimmäisen periaatteen mukaiset toimenpiteet, jotka voisi pelkistää seuraavasti:

- Käytä liitoksissa optimaalisia materiaaleja, jotka sietävät korrodoivia olosuhteita ja takaavat stabiilin kosketusresistanssin.
- Käytä hyvälaatuisia eristeitä (lakat, maalit, jne.) suojattavilla pinnoilla.
- Optimoï kotelon tiiviys ja mekaniikka korroosion kannalta.



*Kuva 1.7. Korroosion hallinnan fyysiset peruseriaatteet.*



Tilanne hankaloituu jonkin verran siitä, että tuotteen on selvittävä vaihtelevista olosuhteista kuljetuksessa, varastoinnissa, asennuksessa ja lopuksi varsinaisessa käytössä, minkä vuoksi ei ole yhtä kaiken kattavaa keinoa huolehtia korroosio-ongelmista.

Yrityksen suunnittelu- ja laatu järjestelmän kehittämisessä on oleellista sisällyttää siihen sellaisia katselmoitteja ja dokumentointeja, joiden avulla korroosion huomioonottaminen kehittyy ja laatu palautteen hyväksikäyttöä edistetään osaavan laatuorganisaation avulla. Niin kuin muissakin hyvää osaamista edellyttävissä suunnittelun osa-alueissa on tässäkin tärkeää kytkeä korroosion tuntemus ja hallintatekniikka osaksi muiden osa-alueiden suunnittelijoiden yleisosaamista.

Kuvan 1.7 periaatteiden noudattamisessa syntyy helposti ristiriitaisia tilanteita. Esim. huomattavassa osassa elektroniikkaa korkea käyntilämpötila kuivaa luonnostaan laitteen sisäosat, mutta kiihdyttää materiaalien hapettumista ja rappeutumista, jonka vuoksi korroosio tulee esiin jossain muussa muodossa, kuten juotosliitosten rappeutumisenä tai eristeiden haurastumisena. Vastaavasti tehokas jäähdytys puhdistamattomalla ja/tai kostealla ulkoilmalla nostaa oleellisesti sisäosien kaasukontakteja ja sisäilman suhteellista kosteutta, jolloin korroosio ja kontaminaatio kontakteissa ja komponenttien johtimissa lisääntyy. Kuivissa ja pölyisissä ympäristöissä laitteen sisään kulkeva ilma vie pölyä mukanaan (myös hiekkapöly) tehden pinnat sähköä johtaviksi, mikä lisää vuotovirtoja ja aiheuttaa läpilyöntejä (vrt. Impingement cooled modules, s. 49 [RTMG/RAC 1995] ja [MIL-STD-454]).

Käytännössä mainittuja peruseriaatteita voidaan lähteä toteuttamaan käyttöolosuhteiden analyysin jälkeen esim. valitsemalla tuotteen

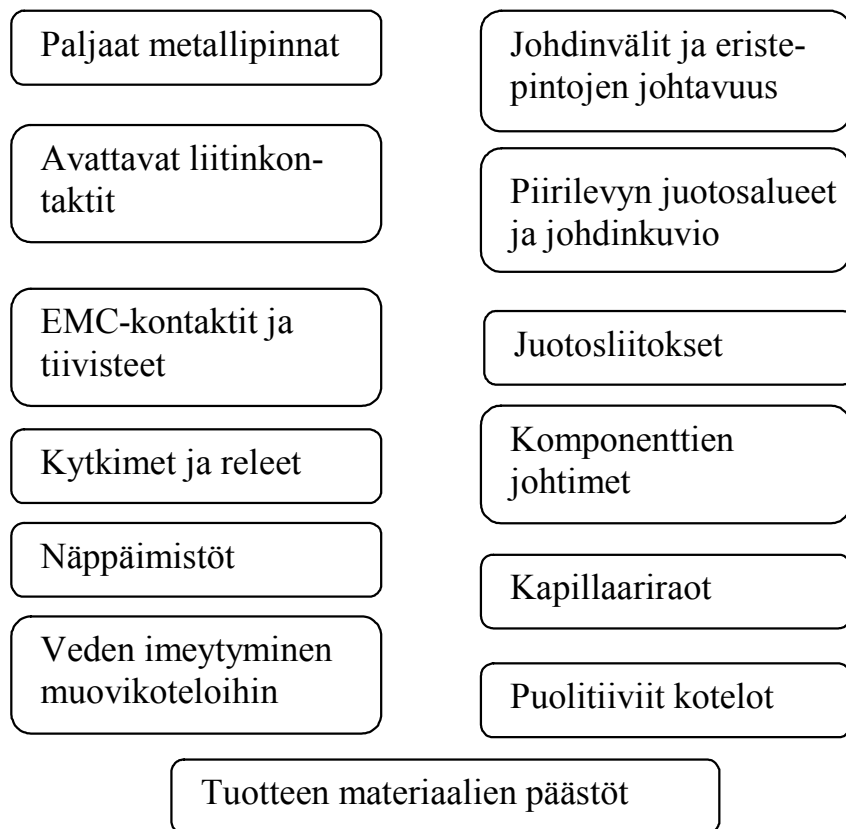
- tiiviys- tai kotelointiluokka
- jäähdytysmenetelmä
- sisäosien suojaustaso (lakkaus tai ei lakkausta)
- kontaktien ja liitosjohdinten pinnoitteet
- komponenttien lämpöluokka
- kotelon pintojen laatu
- sähkösuunnittelun vikasietoisuustaso.

Näiden eri osasten teknisen toteutuksen ja hintatason vaihtoehtoja tutkien päädytään ratkaisuihin, joissa sitten analysoidaan korroosioriskit tarkemmin ja toteutetaan tuote siten, että haluttu laatu saavutetaan.

Olipa valittu korroosion hallintastrategia mikä tahansa, sen toteutuksessa on varmennettava, että kokonaisuus toimii halutulla tavalla lankeamatta uusiin ongelmiin. Tässä auttaa eri osa-alueiden suunnittelijoiden tehokas keskinäinen tiedonvaihto ja toimiminen työryhmänä.

## 1.5 Riskialttiiden kohteiden tunnistaminen tuotteessa

Elektroniikkatuotteessa korroosio-ongelmaa tulisi tarkastella toisaalta sähköisen ja mekaanisen toimivuuden kannalta ja toisaalta mekaniikan yleisen kunnon ja ulkonäön kannalta, koska näillä osa-alueilla haitalliset ilmiöt ovat aivan eriasteisia ja luonteisia (kuva 1.8).



*Kuva 1.8. Korroosioriskialttiita kohtia elektroniikassa.*

Laitteen toimivuudessa on otettava kantaa siihen, miten vakava toimintahäiriö taikka suoranainen vikaantuminen otetaan laatuksiteerioksi. Korroosio ja kontaminaatio etenevät elektronisessa laitteessa periaatteessa jatkuvasti laitteen valmistushetkestä alkaen ja ne alkavat asteittain aiheuttaa hetkellisiä toimintavirheitä, joiden laatu ja vakavuusaste vaihtelee. Olosuhteiden muuttuessa viat voivat

myös hävitä ja hyvin tyypillistä on, että huoltoon tulee tuotteita, joista “ei löydy mitään vikaa”.

Toiminnallisia vikoja elektroniikkalaitteeseen tulee korroosion vuoksi tyypillisesti sarjaresistanssin ja vuotovirtojen kasvun muodossa

- avattaviin liitinkontakteihin
- juotosliitoksiin
- EMC-kontakteihin ja tiivistesiin
- johdinväleihin (johtavat pinnat)
- kytkimiin ja releisiin
- näppäimistöihin.

Vähemmässä määrin ulkoinen korroosio näkyy esim. mikropiireissä ja tehokomponenteissa, joissa puolestaan jatkuva ongelma on korkeasta käyntilämpötilasta johtuva sisäinen korroosio ja ääritapauksissa johtoliitosten lämpenemisestä johtuvat liitosten peittämiset (liite 1, kohta 2.10 *Jännityskorroosio ja väsyminen*). Kuitenkin hyvin tihein ulkoisin johdinvälein valmistettujen mikropiirien (esim. flip-chip) johdineristyksen säilyttäminen on ongelma-alue, mikä edellyttää puhtaampia valmistusprosesseja ja parempaa pintojen suojausta ulkoiselta kontaminaatiolta ja kosteudelta.

Mekaniikassa syntyy helposti sellaisia rakenteita, joihin tiivistynyt tai muuten pinnoille joutunut vesi imeytyy. Tällaisia ovat mekaaniset kapillaariraot (alle 1 mm) toisiaan vasten olevien osien välissä. Tavallisin väli on piirilevyä vasten asennettujen komponenttien ja osien alla. Jos tällaisessa raossa on paljaita metallipintoja, tapahtuu korroosio hyvin nopeasti ja johdinten välille tulee johtavia siltoja, koska vesi ei pääse haihtumaan pois ahtaista raoista. Perusongelmia voi tulla puolitiiviistä kotelorakenteista, jos kotelon sisään pääsee vettä eikä se sitten pääsekään ulos laitteesta.

Mainittujen asteittaisten kontaktivikojen ennakoimiseen voidaan päästä käsiksi liittämällä sähkösuunnitteluun toleranssitarkasteluja, joissa komponenttien johdinreiteille lisätään vaihtelevia sarjavastuksia ja vuotovirtoja niihin kohteisiin, joissa on ahtaita johdinreittejä, avattavia kontakteja ja tiheitä johdinkuvioita. Melko nopean analyysin perusteella löytyvät ne kohteet, joissa sallitut sarjaresistanssin muutokset ja vuotovirrat ovat kriittisiä. Tilanne voidaan korjata joko sähkösuunnittelua muuttamalla tai johdinkuvion taikka liittimien muutoksin. Kun näin tunnetaan todelliset sähköiset vaatimukset, voidaan valita kuhunkin kohtaan oikeanlaiset sähkömekaaniset ratkaisut, pinnoitteet sekä suojaukset ja estetään korroosion ja kontaminaation haittavaikutukset.

Analoginen tälle analyysille on komponenttien parametrien vaihtelun analysointi lämpötilan funktiona, jossa tutkitaan voiko laite toimia tietyllä lämpötila-alueella. Komponenteillehan on ominaista, että kaikki parametrit muuttuvat lämpötilan funktiona, jonka vuoksi suunnittelija saattaa käyttää komponentteja liian laajalla lämpötila-alueella. Komponentti ei vikaannu, mutta parametrien muuttuminen aiheuttaa yleensä palautuvia toimintavikoja, jotka näkyvät lähellä ääriolosuhteita.

Tuotannossa tyypillinen korroosio-ongelma on juottamisessa ajoittain esiintyvät vaikeudet. Varsin tuttu tilanne on vaikeus saada komponentit juottumaan kunnolla. Huonoon juottavuuteen syynä voi olla komponenttien johdinten tai piirilevyn johdinkuvion pinnoitemateriaalien korrodoituminen kuljetusten ja varastointien aikana taikka sopimattomuus ao. juotteeseen. Monivaiheisessa juotosprosessissa, jossa levyille juotetaan komponentteja molemmille puolille useammassa vaiheessa, voivat juotoslämpötila ja juoksuotteet korrodoida piirilevyn paljaat juotosalueet, jolloin niiden juottavuus on huono myöhäisemmissä juotosvaiheissa.

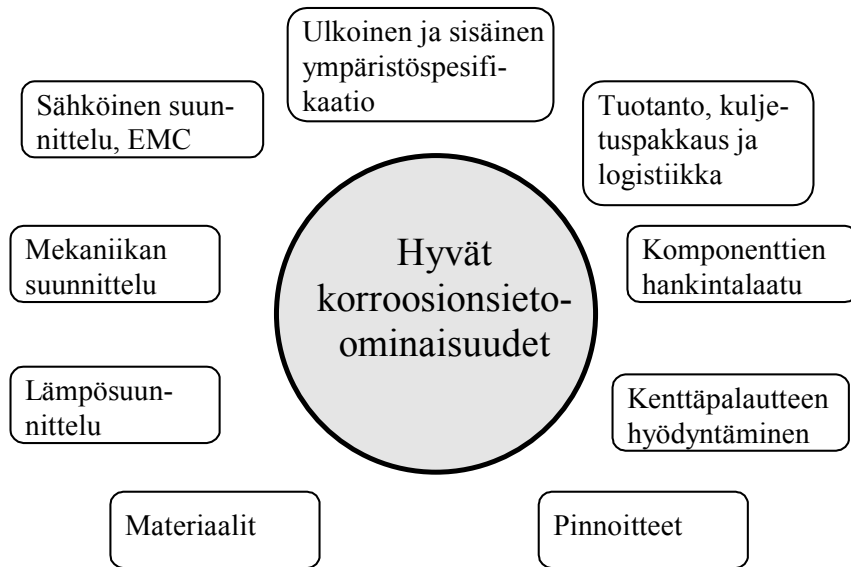
Toinen juottamiseen liittyvä ilmastoperäinen ongelma-alue on muovikoteloiden taipumus absorboida itseensä vettä kuljetusten aikana, jonka seurauksena kotelossa olevat ioniset epäpuhtaudet lähtevät liikkeelle ja kotelot turpoavat mekaanisesti, lisäksi komponentit voivat paukhdella (räjähdellä) juotoslämpötilassa, koska veden tilavuus kasvaa 1 200-kertaiseksi sen höyrystyessä [Pecht 1995 ja 1994 sekä Chan et al. 1998]. Tämä on ns. lämpöpaukahtelu-ilmiö (popcorn-ilmiö).

## **1.6 Suunnittelu, valmistus ja kenttäpalaute**

Korroosion hallinnassa suurin vaikutus tuotteen mahdollisuuksiin selvitä käytössä ja kuljetuksissa ilman haitallista korroosiota on ottaa nämä asiat esille suunnitteluvaiheessa ja sisällyttää korroosionsietoisuus osaksi tuotteen “menestymisstrategiaa” (kuva 1.9).

Mekaanisten, lämpötekniisten ja sähköisten ominaisuuksien suunnittelussa voidaan suhteellisen vähin toimenpitein vaikuttaa oleellisesti siihen kuinka tuote tulee selviytymään käytössä. Toisaalta näissä suunnittelun osa-alueissa on helppo tehdä yksinkertaisia virheitä, jotka pilaavat tuotteen laadun. Liittimien laatu, pinnoitteet ja käyttötapa vaikuttavat melko paljon tuotteen sähköiseen toimivuuteen. Lämpösuunnittelun avulla voidaan onnistuneesti pitää tuote kuivana taikka aiheuttaa sen toistuva kastuminen esim. puhallettaessa kylmää jäähdytysilmaa laitteeseen. Sähkösuunnittelija saattaa valita EMC-kontakteiksi tiivisteet, jotka eivät toimi muutamaa kuukautta pitempää korroosion vuoksi.

Tuotteen mekaanisen rakenteen tarkoitus on suojata ja tukea sisäosia ulkoisia ra-  
situksia vastaan. Tällöin suunnitellaan helposti tuote, joka päällisin puolin on hyvä,  
mutta alkaakin korrodoitua käytössä. Korrodoituminen tapahtuu esim. sen vuoksi,  
että laitteen sisätiloihin pääsee vettä eikä vesi pääse ulos taikka laitteeseen pu-  
halletaan runsaasti jäähdytysilmaa, jota ei voida kuivata eikä puhdistaa, jolloin  
luodaan tahattomasti otolliset korroosio-olosuhteet.



*Kuva 1.9. Korroosionsiedon suunnittelun osa-alueet.*

Komponenttien kostumisen estäminen ennen tuotantoa juottuvuuden varmistamiseksi on yksi merkittävimmistä tekijöistä, koska yleensä kokoonpanossa ei juurikaan käytetä esim. syövyttäviä kemikaaleja, jotka voisivat korrodoida tuotteita.

Suurin vaikutus korroosion sietoon on laitteen osien, ts. komponenttien, piirilevyjen ja metalliosien valmistuksen ja niissä käytettyjen materiaalien ja pinnoitteiden laadulla ja sillä ovatko pinnat korrodoituneet esim. kuljetusten ja väliavarastointien aikana. Näissä tehtyjä virheitä ei enää voida korjata kokoonpanotuotannossa.

Korroosion aiheuttamien käyttöhäiriöiden ja laitevikojen tunnistaminen on yleensä vaikeaa, missä osansa on aina henkilöstön tietämättömyys, kuinka korroosion vaikutukset tunnistetaan. Tämän vuoksi on tärkeää luoda yrityksen laatujärjestelmään mekanismi, jonka avulla saadaan kentältä palautuneita tuotteita tarkempaan vika-analyysiin lähelle tuotekehitysryhmiä. Kenttäpalautteen tietojen jalostaminen siten, että syntyy mahdollisuudet havaita myös korroosioperäiset viat, antaa suunnittelijoille mahdollisuuden tehdä parannuksia uusiin tuoteversioihin ja oppia tekemis-tään virheistä taikka siitä tiedosta, mitä käyttökokemukset yleensäkin antavat.

## 2. Korroosion hallitsemismahdollisuudet

### 2.1 Analyyttinen lähestymistapa

Periaatteessa korroosio on jossain määrin aina ongelmana kaikissa elektronisissa tuotteissa tuotteen koko elinkaaren aikana. Kemisti ilmaisisi tämän siten, että:

“Niin kauan kuin maapallolla on happea, vettä ja lämpöä, korroosion esiintyminen kaikkialla ja kaikissa tuotteissa on varmaa.”

Korroosio etenee usein melko vaivihkaa ja sen ilmenemismuodot ovat lukuisat. Se voi tulla näkyviin täysin yllätyksellisesti tilanteissa, joihin suunnittelija ei ole tullut varautuneeksi.

Tämän vuoksi kannattaa ongelman laadulliseen ja määrälliseen analyysiin paneutua kattavasti käyden läpi ilmiselvät havainnot omasta tuotteesta ja toisaalta katselemaan yrityksen koko suunnittelu ja valmistusprosessi järjestelmällisesti, kuten kuvassa 2.1 on esitetty.

Ongelmiin voidaan tarttua paneutumalla konkreettisiin vikoihin, mutta tässä on se vaara, että tutkitaan vain rajoittunutta ongelma-aluetta ja tehdään väriä johtopäätöksiä tarvittavien toimenpiteiden sisällöstä ja laajuudesta. Hedelmällisempi tapa on ongelmia ennaltaehkäisevä menettely aloittaa oman tuotteen ja laatujärjestelmän kehittäminen kokonaisuutena, jossa toteutetaan sekä suunnittelussa, tuotannossa että logistiikassa sellaisia muutoksia, jotka vähentävät korroosioriskiä tuotteen valmistuksessa, asennuksessa ja käytössä.

Kun lähdetään tutkimaan yksittäisiä vikatapauksia, on korroosio-ongelman varma tunnistaminen, vikamekanismien ja edeltävien tapahtumien taustojen selvittäminen oleellista ennen kuin käynnistetään korjaavia toimenpiteitä oman tuotteen valmistuksessa ja käytössä. Kun ongelman olemus ja laajuus tunnetaan, voidaan arvioida sen teknistaloudellinen merkitys yritystoiminnalle ja sen perusteella kyetään myös mitoittamaan ja suuntaamaan toimenpiteet myös taloudellisesti oikeisiin kohteisiin.

Tuotteessa on epämääräisiä tai yllätyksellisiä vikoja mahdollisesti korroosion vuoksi

Tutkitaan/katselmoidaan tuote, tuotanto ja käyttöolosuhteet korroosionäkökulmasta ottaen huomioon tiedossa olevat tulokset vikojen analysoinneista.

### Suunnitteluprosessi

Korroosiouhkan huomioonottava suunnittelutapa  
Ympäristövaatimukset, asiakaskohtainen eriyttäminen  
Tuotteen epäherkistäminen korroosioperäisille vioille  
Käyttäjän toimintatavan huomioonottaminen  
Mekaniikka, pinnoitteet, sähkösuunnittelu, EMC-suunnittelu, lämpösuunnittelu, käyttöolosuhteisiin vaikuttaminen

### Logistiikka

Ostetut osat ja komponentit  
- kuljetuspakkaukset  
- kuljetusolosuhteet  
Omat tuotteet  
- kuljetuspakkaukset  
- kuljetusolosuhteet  
- välivarastot  
Asennustyöt  
- asennusolosuhteet

### Tuotanto

- osien vastaanotto
- välivarastointi
- tehdastila
- ladonta ja juottaminen
- kokoonpano
- testaus
- pakkaus asiakkaalle

### Rakenteet

- liittimet ja kontaktialueet, - kytkimet
- piirilevyt, komponentit, pinnoitteet, kotelointi

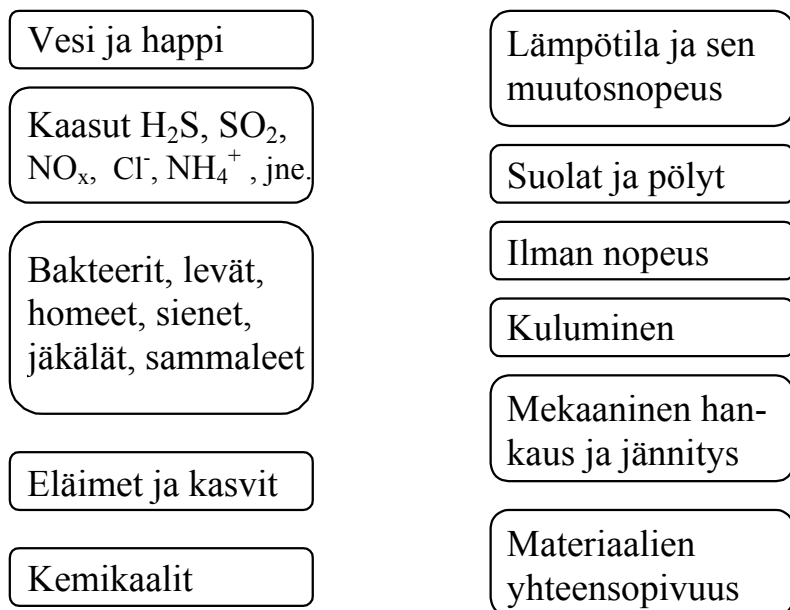
### Korrodoivat olosuhteet

Kuljetukset, tuotanto, asennustyömaa  
Käyttöympäristö, käyttötavat

*Kuva 2.1. Analyttinen lähestymistapa korroosion hallintaan.*

## 2.2 Olosuhteiden tunteminen

Korroosion hallinnan kannalta on tärkeää tiedostaa se, että myös tuotteeseen kohdistuviin ympäristörasituksiin (kuva 2.2) voidaan jossain määrin vaikuttaa erilaisin suojaavin toimenpitein, jotka ovat usein hyvinkin yksinkertaisia (katos, lippa, suojaverkko, lämmöneriste, maalaus, jne.). Kosteusongelmiin auttaa usein harkiten tehty lämmitys, mikä pitää tuotteen pinnat kuivina, vaikka ympäristö onkin kostea.



*Kuva 2.2. Korrodoivat ympäristövaikutukset.*

Korroosion kannalta tärkeitä rasitteita ovat ilmasta peräisin oleva vesi, happi ja ilman epäpuhtaudet. Ilmassa ja tuotteiden kuljetus- ja käyttöympäristöissä vaikuttavia muita aineita on tuhansittain, aineet esiintyvät kaasuina, nesteinä, ioneina, suspensioina tai kiinteinä kappaleina, kuten ilmassa oleva hiekkapöly.

Korroosioon vaikuttaa myös lämpötila, ilman virtausnopeus, mekaaninen hankaus (liittimet, kytkimet) ja esim. metallin jännittäminen (mekaaninen kuormittaminen). Oman lisänsä tuovat erilaiset biologiset eliöt kuten bakteerit, levät, homeet, sienet, jäkälät ja sammaleet sekä erilaiset eläimet ja niiden päästöt.

### **Pintojen kontaminaatio**

Kaikkien materiaalien pinnalle adsorboituu aina ympäröivästä tilasta aineita. Normaali ympäristöilma sisältää paitsi happea ja typpeä, myös vesihöyryä, hiilidioksidia, erilaisia typen oksideja, rikkiyhdisteitä, hiekkapölyä, nokea, jne. Kaik-



kia näitä kertyy (adsorboituu) pinnalle ja myös lähtee pinnalta (desorboituu) ympäröivän ilman liikkua pinnan yli. Pinnalla vallitsee aineenvaihdon tasapaino. Sopivien olosuhteiden vallitessa tasapaino rikkoutuu ja aineet alkavat reagoida keskenään. Pinnoissa tapahtuu korroosiota ja pintojen sähköiset ominaisuudet muuttuvat.

Eräs pinnoille kertyvän irto- ja kiintoaineksen kiusallinen piirre on, että esim. hienojakoinen pöly, jonka koostumus voi olla melkein mitä vain, sisältää sekä rikkiä että suoloja eri muodoissaan [Burnett et al. 1992, Lobnig et al. 1999, Comizzoli et al. 1992 ja 1999]. Useimmat suolat ovat todellisia elektrolyyttejä ts. ne ovat sähköä johtavia myös kiinteässä olomuodossa tehden pinnat osittain johtaviksi [liite 1, kohta 3.6 *Vesiliuokset ja elektrolyytit*]. Pinnoille kertyvät partikkelit absorboivat itseensä herkästi myös vettä, jonka vuoksi pinnat muuttuvat sähköä hyvin johtaviksi.

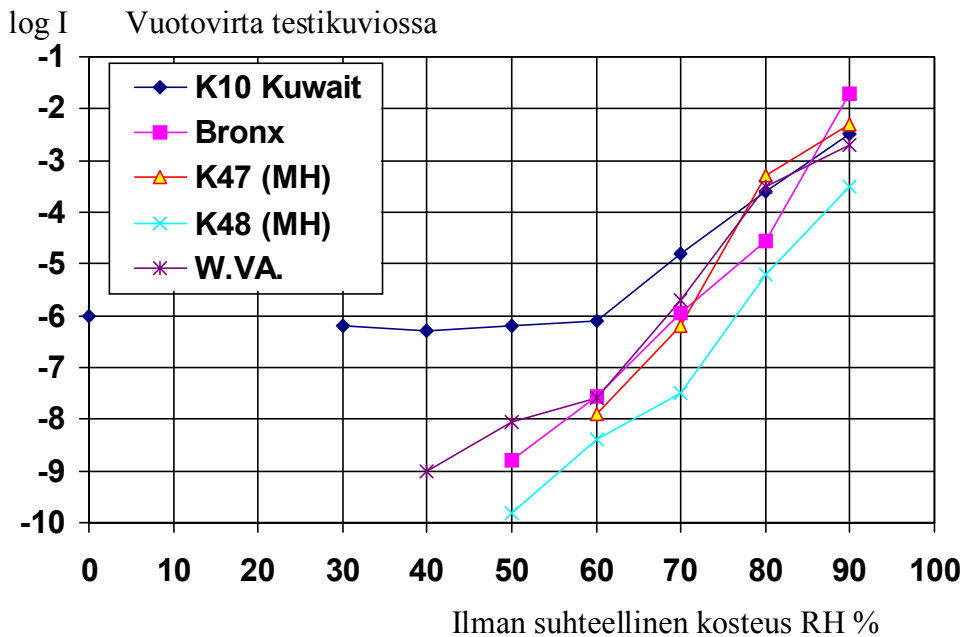
Itse asiassa pintojen kontaminaation aiheuttama vuotovirta ja korrosio ovat olleet haitallisempia kuin ilmassa olevien kaasumaisten epäpuhtauksien vaikutus [Comizzoli et al. 1992]. Näin ollen laitteiden ja etenkin niiden sisäosien suojaaminen ilman mukana kulkeutuvilta kiintoaineilta on hyvä keino vähentää korroosioriskejä, missä ilman suodatus ja ilman kierron minimoiminen ovat tehokkaita keinoja. Kuvassa 2.3 esitetyt virtamittaukset on tehty painamalla ulkona olleet pölynkeräiminä käytetyt teflon-suodattimet vasten piirilevyllä olevaa johdinkuviota ja mittaamalla sitten vuotovirtaa erilaisilla ilman suhteellisen kosteuden arvoilla. Käytetyt mittausjännitteet olivat 5 V, 10 V ja 15 V. Virran todettiin olevan eri tapauksissa lähes lineaarisesti verrannollinen jännitteeseen ja ajan suhteen lähes vakio.

Pölysuodatinten sijaintipaikat (kuva 2.3):

K10	ulkotila, Yhdysvaltojen lähetystö, Kuwait, kevät 1991
Bronx	ulkotila, New York
K47(MH)	ulkotila, Murray Hill, NJ
K48(MH)	ulkotila, Murray Hill, NJ
W.VA.	ulkotila, West Virginia.

Jos johdinkuvio on hyvin tiheä tai suojauksessa on aukkoja, johdinten väliset vuotovirrat kasvavat helposti liian suuriksi. Tämän vuoksi esim. vuodenaikoina, jolloin ilman suhteellinen kosteus on korkea, yli 75 % RH, laitteiden pinnat kostuvat hieman ja niihin tulee vuotovirtojen vuoksi epämääräisiä toimintahäiriöitä tai suurijännitteisissä piireissä tapahtuu selittämättömiä läpilyöntejä pitkin pintoja. Nämä häiriöt voidaan tulkita EMC- taikka muiksi käyttöhäiriöiksi eikä niistä

päästä eroon, koska vian syy voi jäädä selvittämättä. Lyhytaikaista pintojen kostumista voi sattua sisätiloissakin esim. myrskyjen aikana, jolloin syntyvät häiriöt ja viat tulkitaan helposti salamoinnin aiheuttamiksi.



Kuva 2.3. Ilman suhteellisen kosteuden vaikutus noen ja erilaisia sähköä johtavia aineksia sisältävän pölyn kontaminoiman pinnan sähköjohtavuuteen. Tässä on mitattu vuotovirtaa testikuviossa 15 V:n tasajännitteellä. [Comizzoli et al. 1992, kuva 4].

## Veden merkitys

Korroosion esiintymisen kannalta ratkaisevassa asemassa on vesi. Normaaliolosuhteissa voi vettä olla kiinteän aineen pinnalle adsorboituneena 1...3 molekyylin vahvuinen kerros (0,2...0,6 nanometriä) ilman, että korroosioreaktiot käynnistyvät. Kun kerros kasvaa 20...50 molekyylin vahvuiseksi (4...10 nm) korroosioreaktiot tulevat vallitseviksi [White 1992]. Mainittu havainto koskee teräspintoja, mutta antaa myös käsityksen korroosion edellytyksistä yleensäkin.

Korroosio on myös sähkökemiallinen tapahtuma, ts. korroosio aiheuttaa aina pienen korroosiovirran. Metallin pinnalle syntyvässä sähkökemiallisessa kennossa on aina jokin jännite-ero anodin (syöpymiskohtan) ja katodin välillä. Korroosiokeinojen jännitteet ovat tyypillisesti 0,5...1,5 V ja virrat  $10^{-12}$ ... $10^{-6}$  A. Alle 0,3 V jännite-erolla korroosion eteneminen on jo hyvin hidasta. Korroosiossa on aina alkuvaiheessaan kyse ilmiöistä, joita ei voi välittömästi havaita (pikoampeeriluokkaa olevat virrat ja nanometriluokkaa olevat fyysiset vaikutusalueet). Yleensä korroosio havaitaan vasta silloin, kun korroosiotuotteita alkaa ilmesytyä näkyviin. Elektroniikan kannalta tämä on jo liian myöhäistä ja yleensä elekt-

roniikan toiminta onkin häiriytynyt jo paljon ennen korroosiotuotteiden havaitsemista. Tämän vuoksi on hyvin vaikeaa todentaa, että elektroniikan toimintahäiriön on aiheuttanut korrosio.

### **Mikrobiologiset vaikutukset**

Samaan tapaan kuin erilaisia kemiallisia aineksia myös mikrobeja ja muita eliöitä kertyy aina vapaana oleville pinnoille. Eliöt alkavat toimia, kun laitteiden pinnoilla on riittävästi vettä, kuten aina on merellisissä ja rannikko-olosuhteissa sekä trooppisilla seuduilla. Mikrobiset biokalvot kehittyvät aina pinnoille, jotka ovat suorassa kosketuksessa veden kanssa (liite 1, kohta 2.17 *Mikrobiologinen korrosio*). Biokalvot ovat vettä absorboivia ja huokoisia. Ne koostuvat toisiinsa kiinnittyneistä soluista, jotka tunkeutuvat orgaanisten polymeerien rakenteeseen. Biokalvot sisältävät liuotteita, raskasmetalleja ja epäorgaanisia hiukkasia solun ainesten lisäksi. Biokalvon pinnan kemialliset olosuhteet (happamuus pH, liuenut happi ja orgaaniset sekä epäorgaaniset yhdisteet) voivat poiketa radikaalisti lähiympäristön olosuhteista. Mikro-organismit voivat kiihdyttää korroosiomekanismeja ja myös muuttaa niiden luonnetta [Naval Research Laboratory 1999].

### **Käyttäjät ja tuotanto**

Elektroniikkavalmistajan kannalta tärkeätä on muodostaa mahdollisimman kattava kuva niistä olosuhteista, joissa valmistettavaa tuotetta kuljetetaan ja käytetään. Maantieteellisen käyttöalueen ja ilmastollisten olosuhteiden kartoituksen jälkeen, joka voi tapahtua pääosin käyttämällä valmista julkisesti saatavilla olevaa aineistoa, voidaan suunnitella tuotteen ympäristöspesifikaatio käyttäen mallina esim. International Electrotechnical Commission, IEC:n määrittelemien ympäristöluokitusten (IEC 60721 Classification of environmental conditions) kaltaista luokittelua. Tätä luokittelutulosta joudutaan aina täydentämään tuotekohtaisesti poikkeuksin tai lisäyksin, jolloin muodostuu kattava kuva useimmista ympäristötekijöistä, jotka vaikuttavat myös korroosioon.

Kyseisen IEC 60721-ympäristöolosuhdeluokituksen avulla päästään käsiksi lämpötiloihin, kosteuteen ja kaasupitoisuuksiin, joihin joka tapauksessa joudutaan varautumaan. Näistä olosuhdetiedoista päästään testausvaatimuksiin ja edelleen varsinaisiin tuotteen rakennetta, materiaaleja ja pinnoitteita koskeviin vaatimuksiin.

Tuotteiden käyttäjien käyttäytyminen ja kulttuuriset piirteet vaikuttavat siihen, millaisia kemikaaleja ihmiset käyttävät ja mihin tapaan esim. oleskelu- tai työtiloja pestään. Näillä voi olla paikallisesti suurikin vaikutus olosuhteiden korrosiivisuuteen.

Monissa työpaikoissa, joissa käsitellään runsaasti erilaisia kemikaaleja tai jotka tuottavat sivutuotteena korrodoivia aineksia (kemian teollisuus, sellutehtaat, voimalaitokset), olosuhteet voivat olla erittäin korrodoivia. Näitäkin hankalampia olosuhteita voi olla erilaisissa eläinsuojissa, kuten sikalat, kanalat ja navetat.

### **2.3 Tuotteen vikaherkkyys ja käyttötapa**

Tuote, joka on täysin epäherkkä komponenttiparametrien ja rakenteen sisäisille muutoksille ja ulkoisille häiriöille olisi myös korroosion kannalta ihanteellinen, koska korroosion aiheuttamat muutokset eivät vaikuttaisi häiritsevästi tuotteen toimintaan. Tämän ihannetilän lähelle voidaan käytännössäkin päästä ottamalla yleiseksi periaatteeksi suunnitella tuote mahdollisimman vikasietoiseksi kohtuullisin kustannuksin.

Korroosion aiheuttamien vikatyyppejen kannalta, kuten pintaresistanssin pieneneminen, vuotovirtojen kasvaminen, kontaktien ja materiaalien rappeutuminen, laitteen sähköinen ja mekaaninen toiminta voidaan suunnitella siten ettei kohtuullinen korroosio haittaa laitteen toimintaa. Toisaalta lieventämällä ulkoisten ympäristörasitusten vaikutusta käyttämällä sopivia suojaustekniikoita, voidaan tuotteen korrodoitumista hidastaa oleellisesti.

Sellaisissa paikoissa, missä vaatimus ahtaampiin toleransseihin ja korkealaatuiseen pintakäsittelyyn tuotteen myyvyyden takaamiseksi on ehdoton, on puolestaan käytettävä niin hyviä pinnoitteita ja suojaustekniikoita kuin se teknistaloudellisesti on mahdollista.

### **2.4 Korroosiomekanismien tuntemus**

Elektroniikkalaitteen korroosiota aiheuttavia vikamekanismeja (liite 1 ja luku 3) kannattaa tarkastella niiden vaikutusalan mukaan, jotta voitaisiin paremmin jäsentää itse korroosion torjunta. Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset kohdistuvat seuraaviin neljään ryhmään:

- sähköiseen toimintaan
- mekaaniseen toimintaan
- rakenteiden lujuteen
- ulkonäköön.

Kaikki tyypilliset ympäristörasitteet vesi, kaasut, eliöt ja pintojen kontaminaatio voivat vaikuttaa kaikkiin näihin osa-alueisiin. Kun vaikutuksia selvitetään ja painotetaan niiden merkitystä, on syytä tarkistaa, millaiset viat ovat tuotteen laadun kannalta merkittäviä ja arvioida tämän perusteella, mitkä yksittäiset vikamekanismit, joita on käsitelty laajemmin liitteessä 1 ja luvussa 3, on otettava huomioon korroosiosuojausta kehitettäessä.

Kuvassa 2.4 on esitetty muutamia tyypillisiä vikatyyppejä, joita korroosio ja ilmasto aiheuttavat laitteisiin. Sähköisiin ominaisuuksiin vaikuttavat ensisijaisesti komponentti- ja piirilevytason vikamekanismit. Koska vikamekanismit vaikuttavat eri tavoin eri materiaaleihin, joudutaan sähköisen toimivuuden varmistamisessa käymään läpi hyvin laaja mekanismijoukko, missä komponenttilevyn, liittimien, näppäimistöjen ja kytkimien vikamekanismit ovat yleisimmät. Myös laitteiden johdotukset ja niiden liitokset saattavat etenkin hajasijoitetuissa laitejärjestelmissä tulla merkittäväksi vikalähteeksi.

Viat mekaanisessa toimivuudessa tulevat yleensä esiin sähköisten vikojen jälkeen, kun laite on jo melko selvästi korrodoitunut. Kuitenkin melko yleistä on, että laitteen tukirakenteet taikka yksittäiset osat ovat mekaanisesti epävarmoja ja ehkä huonosti mitoitettuja, jonka vuoksi jo uusissakin laitteissa esim. lämpöliike ja mekaaninen värinä aiheuttavat katkoksia johtoliitoksissa ja liittimissä. Jos esim. liittimessä uros- ja naaraskosketin liikkuvat näistä syistä toistensa suhteen, edistää tämä myös korroosiota (hiertymiskorroosio, fretting), jolloin sekä hetkelliset katkokset että aikaa myöten pysyvät muutokset sähköisessä toiminnassa ovat mahdollisia. Hyvin tärkeää on etenkin liittimiä teetettäessä varmistaa, että liitin toimii mekaanisesti virheettömästi koko ajatellun käyttöajan ja että se ei vaurioidu normaalissa käytössä.

Mekaaninen lujuus on yleensä viimeisiä ongelmia, joka tulee esiin korroosion vaikutuksesta. Tukirakenteet saattavat joskus vaikeissa olosuhteissa vaurioitua. Tavallisempaa on erilaisten pienosien tai juotosliitosten murtuminen korroosion vaikutuksesta. Juotosliitosten mekaaninen lujuus voi heikentyä mekaanisen rasituksen ja lämpötilan vaikutuksesta, mihin vaikuttavat käytettyjen juotteiden ja pinnoitteiden ominaisuudet [Mattila 2005, Vuorinen 2006, Roslund 2002].

Melko tavallinen vika elektroniikassa on juotosliitosten asteittainen rappeutuminen etenkin kuumissa kohdissa, jolloin sekä juotemateriaalin rappeutuminen että liitokseen mahdollisesti vaikuttavat suuret lämpömekaaniset voimat väsyttävät liitokset poikki ennenaikojaan (liite 1, kohta 2.10 *Jännityskorroosio ja väsyminen*). Näiden vikojen tunnetuimpia seurauksia ovat televisioiden aiheuttamat tulipalot kotitalouksissa. Isompimassaisten komponenttien kiinnitykset, kun käyte-

tään vain komponentin liitäntäjohtimia kiinnitykseen, saattavat murtua tärinän ja lämmön yhteisvaikutuksesta. Myös kaapeleiden vedonpoiston puuttuminen aiheuttaa helposti ja nopeasti katkoksia.

Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset	
Sähköinen toimivuus	Sarjaresistanssin muutos liitoksissa Johdinkatkokset Eristysresistanssin muutos ja vuotovirrat Pinnan vuotovirrat, likaantuminen Oikosulut Materiaalien dielektrisyysvakion muutos Komponenttikoteloiden vikaantuminen Liitäntäjohtinten vioittuminen Kaapelin johdinten katkeaminen
Mekaaninen toimivuus	Kitkan kasvaminen Liikkeen estyminen Jousen heikkeneminen Kosketinmekanismin vioittuminen Kytkinmekanismin vioittuminen Satunnaiset katkokset lämpö- ja mekaanisessa rasituksessa
Mekaaninen lujuus	Mekaanisten toimilaitteiden murtuminen Tukirakenteiden murtuminen Juotosliitoksen murtuminen
Ulkonäkö	Ulkonäkö muuttuu rumaksi Ulkopintojen vioittuminen Pinnoitteiden värinmuutokset Pintojen likaantuminen Merkintöjen häviäminen
Toimintahäiriö	Ajoittainen vika Aiheeton komponentin vaihtaminen Ehjätuntuisen laitteen hylkäys Ohjelmistovika EMC-häiriö, sähkö- tai lähiverkon häiriö

Kuva 2.4. Korroosion vaikutusten ryhmittely kohteen mukaan.

Ulkonäön perusteella käyttäjät muodostavat kuvan tuotteen laadusta, vaikka useimmiten hyvin kaunis ulkonäkö ei ole tarpeen esim. laitteen sisäosissa eikä

myöskään ulkoisissa osissa, jos ajatellaan vain laitteen teknistä toimivuutta. Ulkonäkö kielii kuitenkin hyvin nopeasti, onko laite ollut tavallista vaikeammissa olosuhteissa ja myös onko jokin pinnoiteprosessi mahdollisesti epäonnistunut. Ulkonäön kriittisin osa on kotelon ulkopinnan pintakäsittely. Komponentteja ja osakokoonpanoja ostettaessa on erilaisten osien pinnoittamisella erittäin suuri vaikutus tuotteen korroosionsietoon. Pinnoitteen valmistusprosessin ja itse pinnoitteen ominaisuuksien spesifioinnissa olisi varmistettava, millä tavalla lopputuloksen laatu varmistetaan. Monissa tapauksissa ulkonäöltään siisti ja tasainen pinnoite on merkki hyvin toimineesta pinnoiteprosessista, mutta tapauksissa, joissa ensisijainen tavoite on korroosiosuojaus, pinnoitteen ulkonäkö voi olla hyvinkin läikikäs (esim. kromatointi), kun se on tehty hyvin. Laitteissa käytetyt merkinnät voivat joskus hävitä tai homehtua kosteuden vaikutuksesta. Näin on esim. selluloosapitoisilla tarroilla, jotka kosteina ovat homeiden hyviä kasvualustoja (liite 1, kohta 2.18 *Homeen kasvuedellytykset*).

Kuvassa 2.4 on viimeisenä osana mainittu toimintahäiriö, jolla tässä yhteydessä tarkoitetaan satunnaisesti silloin tällöin esiintyviä vikoja, joiden syy voi myös jäädä selvittämättä. Tällaisiin vikoihin löytyy suuri määrä selityksiä alkaen käytövirheistä laitteen huonoon suunnitteluun. Todellisuudessa ajoittaisten “tunte mattomien” vikojen syynä voivat olla esim.

- komponenttien parametrien palautuva muuttuminen lämpötilan muuttuessa tai arvojen ryömiminen ajan mukana
- liitoksissa esiintyvä korroosio
- komponenttilevyn pinnan vuotovirrat kostealla säällä
- likaantuneiden pintojen vuotovirrat
- liitoksissa tai johtimissa esiintyvä katkos lämpölaajenemisen vuoksi
- EMC-kontaktien huononeminen tai ulkoinen vakava EMC-häiriö
- ESD-purkauksen aiheuttama vika
- tärinän aiheuttamat katkokset
- huonon kosketinjousimateriaalin tai muotoilun aiheuttama kontaktivika
- näppäimistön vikaantuminen ihmisperäisten kemikaalien vuoksi
- mekaanisen rakenteen ongelmat
- ohjelmistohäiriö
- tietoliikenne- tai sähköverkon häiriö.

Mikäli laitteiden vikatiedoissa esiintyy huomattavan paljon vikoja, joiden syy on jäänyt selvittämättä, kannattaa analysoida vialliseksi ilmoitettuja laitteita tarkemmin, onko niissä kontaminaatiota pinnoilla, onko liitinpinnoissa vikoja, ovatko kosketinjouset ehjiä, ovatko EMC-tiivisteet kunnossa, jne. Perusoletuksena voidaan pitää, että korroosion aiheuttamat sähköiset toimintahäiriöt etenevät

yleensä asteittain ja niiden vaikutukset yhdistyvät muihin epämääräisten vikojen lähteisiin, kuten EMC-ongelmat, satunnaiset komponenttiviati ja ohjelmistojen virheellinen toiminta.

## 2.5 Testaus ja kenttäpalautte

Tuotekehityksen tueksi tarvitaan aina kokeellista tutkimusta, jonka avulla todennetaan onko tuotekehitystulos asetettujen tavoitteiden mukaista. Erilaisten pikatestien tai hallitumpien standardisoitujen testien avulla saadaan melko luotettavaa tietoa tuotteiden korroosionsieto-ominaisuuksista.

Näitä kokeita pitäisi tehdä aina, kun muutetaan tuotetta siten, että sillä voi olla vaikutuksia ympäristöolosuhteiden sietoisuuteen. Uusia materiaaleja ja komponentteja käytettäessä on syytä tarkistaa, että nämä todellakin toimivat myös oman tuotteen käyttöolosuhteissa.

Koska tuotteiden komponentti- ja materiaalivalikoima on yleensä kohtuullisen suuri, ei yksittäinen laitevalmistaja voi testata kaikkia osia eikä edes koko laitetta kaiken mahdollisen varalle. Näin ollen pääpainon pitäisi olla suunnittelussa ja materiaali- sekä komponenttivalinnassa (spesifikaatioissa), joita täydennetään soveliailla ilmasto- ja korroosiotesteillä etenkin niissä yksityiskohdissa, joista ei ole aikaisempaa kokemusta.

Testauksessa kannattaa keskittyä esim. tässä esitettyjen yleisten testien käyttöön, joiden avulla tulee varmistettua kohtalainen osa koko kentästä. Luvussa 5 on yksityiskohtaisempaa tietoa yksittäisten testausmenetelmien käytettävyydestä eri tarkoituksiin.

Kuvassa 2.5 todettuja analyysi- ja testausmenetelmiä käytetään erilaisille pinnoitteille, komponenttilevyille, komponenteille ja kokonaisille laitteille.

Nämä menetelmät sopivat myös kenttäpalautteena huoltoon saatujen laitteiden tutkimiseen. Kenttäpalautteessa olisi ensisijaisen tärkeää selvittää niin pitkälle kuin suinkin vikojen todelliset syyt. Kun vikamekanismit saadaan selvitettyä, on mahdollista löytää myös hyviä korjaustoimenpiteitä ainakin seuraavassa tuotesukupolvessa. Edellytyksenä tälle on, että huoltoon tulevia laitteita saataisiin myös tuotekehityksen suunnittelijoiden tutkittavaksi, jotta saataisiin mahdollisimman autenttista ja oikeaa palautetta kentällä olevien laitteiden olosuhteista ja laatutasosta.



## Korroosio- ja ilmastollinen testaus

Vika-analyysimenetelmät	Visuaalinen tarkastus, valokuvaus Mikroskopia Resistanssimittaukset Pinnoitteiden mittaus Aineanalyysimenetelmät, SEM, ESCA...
Pikatestimenetelmät	Vesi, kosteus, suolaliuos, happohöyry Raaputus, teippitesti Kemikaalit, parfyymit
Lämpötestit	Kuiva kylmä ja kuuma (lyhyt ja pitkäaikainen) Lämpövaihtelu Yhdistetty lämpövaihtelu ja kosteusjaksottelu
Kosteustestit	Jaksottainen kostea lämpövaihtelu Pitkäaikainen kosteus vakiolämmössä Komponenttien kiihdytetyt testit esim. 85 °C / 85 % RH
Kaasutestit	Monikaasutestit, kaasut H <sub>2</sub> S, SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Cl <sup>-</sup> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , jne.
Suolasumutestit	Suolaisen vesiliuoksen sumuttaminen
Tiiviystestit	Mekaaniset, pöly- ja vesitiiviystestit
Mekaaniset testit	Tärinä- ja iskutestit sekä hierrekorroosio-testi (fretting)

*Kuva 2.5. Korroosionsiedon tutkimuksessa käytettävät testit.*

Kenttäpalautteessa riittää kohtalaisen edustavan näytemäärän palautuminen analysoitavaksi. Tärkeää olisi selvittää ovatko tapahtuneet viat kovin yleisiä vaiko vain yksittäistapauksia. Jos palautteen laitteista huomattava osa ja samalla merkittävä absoluuttinen määrä on tuntemattomia vikoja, kannattaa tutkia näitä laitteita myös korroosion kannalta. Jos vikojen syyt kyetään selvittämään, voidaan myös löytää korjaavia toimenpiteitä.

## 2.6 Korroosionestotekniikat

Kuten edellä kohdan 1 kuvassa 1.7. *Korroosionhallinnan fyysiset perusperiaatteet* todettiin, korroosion ja ilmaston sietoa voidaan parantaa lukuisilla eri keinoilla. Oleellista olisi keinovalikoimaa käytettäessä tiedostaa aluksi ne periaatteet, joiden avulla voidaan rajoittaa oleellisesti ympäristön rasituksia, kun nämä on käytetty hyväksi on selvitettävä ne konkreettiset keinot, joilla esim. komponenttilevy suojataan ja varmistetaan liitinkontaktien toimivuus. Kuvan 1.7 yleisperiaatteiden soveltamisesta voidaan poimia esimerkkeinä seuraavia keinoja parantaa korroosionsietoa.

### Vikasetoisen tekniikan käyttäminen

Korroosio ja ilmasto aiheuttavat kaikissa komponenteissa ja materiaaleissa niiden ominaisuuksien muutoksia. Mikäli laite voitaisiin suunnitella siten, että se toimisi, vaikka komponenttien parametrit muuttuisivat väljissä rajoissa, sietäisivät useimmat laitteet korroosiotakin melko hyvin. Korroosiohan aiheuttaa elektronikassa useimmiten asteittain eteneviä pienehköjä muutoksia, jotka vaivihkaa huonontavat laitteen ominaisuuksia.

Jos laitteen sähköinen/mekaaninen toimivuus edellyttää hyvin pieniä toleransseja signaaleissa, vuotovirroissa taikka piirien impedanssien suuruudessa ja laadussa (kosteus vaikuttaa dielektrisyysvakioon  $\epsilon_r$ ), on laite myös korroosioherkkä, koska pintojen korroosio, kontaminaatiot ja kostuminen vaikuttavat metallipintojen ohella eristeidenkin pintojen sähköisiin ominaisuuksiin.

Laitesuunnittelussa tulisikin ottaa sähköisten piirien mitoitukseen mukaan nämä korroosiosta aiheutuvat muutokset liitosten sarjaresistansseissa (liittimet, juotokset, kytkimet), johdinten välisissä vuotovirroissa, eristysresistansseissa ja hakea näille numeeriset toleranssit, joiden perusteella informoidaan korroosioasiantuntijoita ja komponenttivalmistajia oikeantasosten suojausmenetelmien löytämiseksi.

Korroosioriskin kannalta sähkömekaniikka: liittimet, kytkimet, releet ja muiden komponenttien ja näyttöjen liitännät sekä piirilevyn johdinkuvio ovat usein ongelmallisimpia alueita. Kaikkein hankalimmissa olosuhteissa, jollainen on esim. tyypillinen pintakäsittelylaitos, sähkömekaniikkaan kohdistuvat viat, joissa korroosio on osatekijänä, kattavat yli puolet esiintyvistä vioista. Sähkömekaanisten liitosten, etenkin avattavien suojaamattomien liitosten, määrän minimoiminen on varteenotettava keino vähentää korroosioriskiä. Käytännön syistä joudutaan laitteissa käyttämään avattavia sähköisiä liitoksia, esim. EMC-tiivisteitä, näyttöjen-

näppäimistöjen- ja pistoyksiköiden liittimiä sekä ulkoisia kaapeliliittimiä, jolloin vikasietoisuus on rakennettava kehittämällä myös näiden osien korroosionsietoisuuteen vaikuttavia ominaisuuksia.

### **Kaasukontaktien minimoiminen**

Kaasukontaktilla tarkoitetaan tässä ilmassa olevien ainesten osumista elektroniikkalaitteen ulko- tai sisäosien pintoihin. Kaasu- ja pölyhiukkasten osuminen pintoihin on sitä tiheämpää mitä nopeampi ilmavirtaus on ja mitä suurempi on erilaisten kaasujen ja pölyn pitoisuus ilmassa. Yksinkertaistaen tämä merkitsee sitä, että kemiallisten reaktioiden (korroosio, kostuminen) ja likaantumisen todennäköisyys on sitä suurempi mitä enemmän pinta on kosketuksissa näihin ei toivottaviin aineksiin.

Käytännön rakenteissa on todettu, että hyvinkin yksinkertainen mekaaninen verhouk vähentää oleellisesti pintojen kontaminoitumista ja sitä kautta myös korroosiota ja muita pintailmiöitä. Laitteen sisällä piirilevyn toinen puoli voi olla täysin kontaminoitunut johtuen ilman epäpuhtauksista, kun katvepuoli näyttää aivan puhtaalta ja virheettömältä. Samaan tapaan kaksiosainen reunaliitin on aivan siisti sisäosiltaan, vaikka ulkopuoli olisi täysin kontaminoitunut. Selitys tähän on yksinkertaisesti kaasukontaktien vähäisyys mekaanisesti suojatussa tilassa.

Saastuneen ilman kierron ja kulun vähentäminen laitteen sisäosissa on yksi parhaita keinoja korroosion estämisessä, jos laitteen lämpötila voidaan hallita pienemmällä tai suljetulla ilmankierrolla. Samalla on kuitenkin muistettava kostumisen ja kondensaation aiheuttamat ongelmat liian tiiviissä koteloissa (ks. liite 1 kohta 1.8 *Kosteuden kondensoituminen pinnoille*).

Yleisenä peruseriaatteena elektroniikan suunnittelussa voisi soveltaa tätä ilman kierron vähentämistä esim. käyttämällä kaksikerroksista rakennetta, jossa elektroniikan tiheät johdotukset ja pienet komponentit on eristetty ulkoisesta ilman kierrosta ja ainoastaan jäähdytyksessä tarvittavien osien ulkopinnat ovat alttiina voimakkaalle ilman kierrolle.

Pitemmälle vietyinä tämä tarkoittaisi elektroniikan valamista johonkin inerttiin massaan, joka ei absorboi vettä, jolloin laite koostuisi pienistä paketeista, joiden jäähdytys hoidettaisiin melko vapaavalintaisin keinoin.

## **Koteloiden ja elektroniikan kuivana pitäminen**

Laitetekeloiden sisäosat ja elektroniikkaosat tulisi pitää mahdollisimman kuivina kaikissa tilanteissa, koska veden läsnäolo lisää aina huomattavasti korroosioriskiä ja pintojen eristyksen huononemista. Suhteellisen tiivis laitekotelo on paras ratkaisu. Ongelmat alkavatkin tästä, millaiseksi kotelo kannattaa suunnitella.

Koska koteloihin yleensä pääsee aina ulkoista ilmaa, olisi kostumisen haittojen minimoimiseksi käytettävä laitteen omaa lämpöä hyväksi laitteen pitämiseksi kuivana ja mahdollisesti sisään tunkeutuneen kosteuden poistumisen varmistamiseksi. Jos laite voitaisiin pitää aina ympäristöään lämpimämpänä, kuivana pitäminen olisi helppoa. Laitteen sisällä kiertävä jäähdytysilma toimii luonnollisena apuna kosteuden poistamisessa, mutta jos kierto on vain niukkaan luonnolliseen konvektioon taikka tiivisteiden rakojen kautta tapahtuvaan ilmanvaihtoon perustuva, on varauduttava sisäisen kosteuden pitempiaikaiseen vaikutukseen ja suojattava sisäpinnat paremmin.

Ulko- ja sisätiloissa olisi oleellista estää ainakin laitteen sisällä tapahtuva kondensoitumisesta johtuva veden tippuminen komponenttilevyihin tai liittimiin.

## **Liitosmateriaalien yhteensopivuus**

Elektroniikkalaitteissa on hyvin paljon erilaisten materiaalien välisiä rajapintoja esim. piirilevyllä, johdinkuvioissa, liittimissä, kytkimissä ja mikropiireissä. Kun laite on alttiina ilmassa oleville korrodoiville aineille ja vedelle ja ilma väistämättä on aina jossain määrin kontaktissa kaikkien pintojen kanssa, tapahtuu galvaanista korroosiota aina, kun kaksi metallia ovat kosketuksissa toisiinsa. Korkea lämpötila ja kosteus kiihdyttävät näitä reaktioita.

Pienin korroosioriski kahden metallipinnan välillä on, jos ne ovat keskenään samoja. Kun metallit ovat erilaisia, vähäisin korroosio tapahtuu sellaisten pintojen välillä, joiden sähköinen pintajännite on mahdollisimman lähellä toisiaan. Materiaalivalinnassa voidaan käyttää avuksi mm. liitteen 1 kohdassa 1.2 *Metallien sähkökemiallinen ja galvaaninen jännitesarja* kuvattua jännitesarjaa. Jos materiaalit ovat tässä kaukana toisistaan, on korroosiotodennäköisyys suuri, jos ilmassa ja pinnoilla on vettä ja korrodoivia kaasuja.

Elektroniikkalaitteissa on melko vaikea välttää erilaisten materiaalien kontakteja keskenään, esim. EMC-tiivisteiden kontaktit piirilevyyn ja laitteen kuoreen ovat luonnostaan kontaktissa erilaisten metallien kanssa. Ratkaisuksi tässäkin muodostune tiivistesauvojen mekaaninen suunnittelu siten, että estetään kosteuden

tunkeutuminen ainakin sauman kontaktialueen keskiosiin, vaikka reunoissa olisi-kin vedelle ja korroosiolle altis vyöhyke.

Tina-lyijyjuotteen käyttämisessä on aiheellista tarkistaa ettei piirilevyllä tai komponenttien johtimissa ole esim. liian paksuja kultakerroksia, jotka tina kanssa muodostavat rajametalliseoksia, joiden mekaaninen lujuus on heikko ja jotka lämmössä korrodoituvat nopeasti.

### **Eristävät pinnoitteet**

Piirilevyn johdinkuvion suojaaminen kontaminaation ja kosteuden vaikutuksilta on tarpeen, kun laitteen sisällä kiertävän ilman laatuun ei voida vaikuttaa ja laitekotelo on suhteellisen avoin. Pinnoitteet suojaavat levyjä myös mekaaniselta rasi- tukselta kokoonpanon ja huollon yhteydessä. Kuivissa oloissa pelkkä juotteenes- topinnoite antaa jonkin verran suojaa tilapäisen kostumisen aiheuttamia haittoja vastaan, vaikka se alentaakin pinnan eristysresistanssia etenkin kosteana. Tätä on käsitelty enemmän liitteen 1 kohdassa 2.17 *Kosteuden ja geometrian vaikutus piirilevyn eristysresistanssiin*. Vaikeisiin olosuhteisiin tarkoitetut komponenttile- vytyt on aiheellista lakata jopa upottamalla ne kokonaan suojaavaan lakkaan, koska komponenttien alle johtimiin pääsee muuten helposti vettä.

## **2.7 Alihankinnat, logistiikka ja kenttäpalaute**

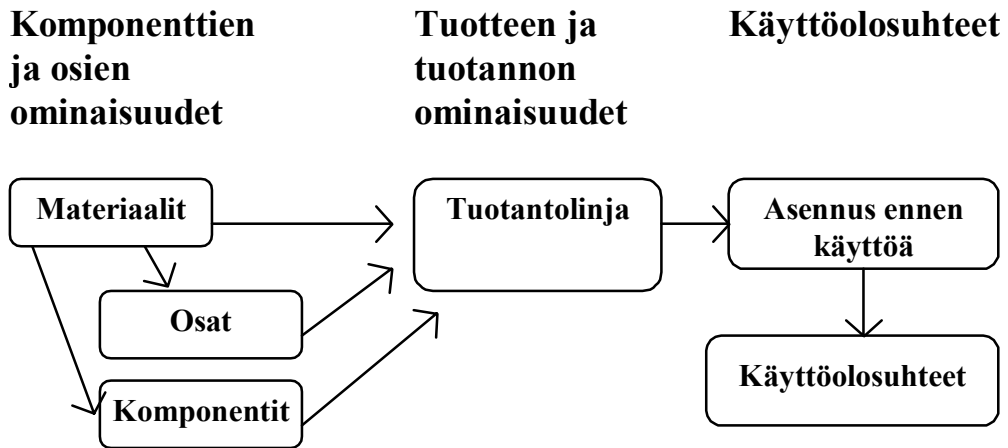
Korroosioriskien hallinnassa yrityksen alihankintatoiminnan laadulla ja määrällä on erittäin suuri vaikutus niihin mahdollisuuksiin, mitä yrityksellä yleensäkin on vaikuttaa omien tuotteittensa korroosionsietoon ja selviämiseen kuljetuksissa ja käytössä (kuva 2.6).

**Alihankinnoissa ja komponenttien ostoissa** sekä hankitun palvelun tai tavaran laadullinen hallinta ja toisaalta tavaran kuljetus korroosioriskiä lisäämättä ovat ne pääkohdat, joihin yrityksen kannattaa panostaa pyrkiessään hallitsemaan myös korroosioriskit.

Alihankkijan taikka komponentin toimittajan osaamistason myös korroosion suh- teen tulisi olla vähintään yhtä hyvä ellei parempikin kuin laitevalmistajalla, koska ostettujen tavaroiden laatuun ei enää voida vaikuttaa laitetuotannon loppuvai- heessa, joka tyypillisesti sisältää vain komponenttien ladonnan, liittämisen ja lop- pukokoonpanon sekä lopputestaukset. Jos lopputuotteen valmistaja ei osaa spesi- fioida vaatimuksiaan korroosionsietoisuuden suhteen, olisi alihankkijan osattava tehdä tämä ja myös toteutettava se vaikka loppukäyttäjä ei kaikkea vaatisikaan.

Alihankkijoilla on kuitenkin suhteellisen harvoin mahdollisuuksia tietää, mitä erityisvaatimuksia toimitettuun tavaraan kohdistuu korroosion ja yleisen ympäristöolosuhteiden sietoisuuden osalta. Harva alihankkija takaa tietyille pinnoitteille tai suojausmenetelmille ja materiaaleille elinikäitietoa, jota voisi sellaiseen käyttää tuotteen eliniän määrittelyssä.

### Logistiikka vaikuttaa korroosioon



Kuva 2.6. Logistiikan ja alihankintojen vaikutus korroosionsietoon.

Tilanteen ollessa tämänkaltainen suuressa osassa alihankintoja ja komponenttien ostoissa, laadun varmistuksen kannalta parhaiten toiminee sellainen yhteistyö, jossa lopputuotevalmistaja yhdessä alihankkijan kanssa spesifioi myös korroosionsietoon ja sen toteutukseen liittyvät asiat mahdollisimman hyvin. Tässä auttavat olemassa olevat tuote-, pinnoite- ja testausmenetelmästandardit. Kutakin tapausta varten joudutaan luonnollisesti laatimaan omat spesifikaatiot, jotka kuvaavat tekniset ominaisuudet, mahdollisesti ottavat kantaa käytettäviin valmistustekniikoihin (esim. pinnoitteet) ja määrittelevät millaisin keinoin kunkin osan laatu tarkistetaan. Kaiken kaikkiaan lopputuotevalmistajalla tulee olla syvä näkemys tuotteen ympäristön siedosta ja siihen kohdistuvista vaatimuksista ja elinikäitavoitteiden merkityksestä. Myös korroosionsietoisuuden toteutustavasta (valmistusprosessit, materiaalivalinnat, suojaukset, pinnoitteet, pakkaus, kuljetustavat) on oltava hyvä käsitys, jotta voitaisiin suhtautua terveeseen kriittisesti alihankkijoiden tarjoamiin ratkaisuihin.

**Alihankintojen ja ostojen spesifioinnissa** ja toimitussopimuksissa tarvitaan aina seuraavat kaksi hyvin spesifioitua osuutta, jotta korroosionsietoisuustavoitteisiin voitaisiin päästä:

- hyvin spesifioidut komponentit ja osat kattaen korroosionestotekniikan
- huolella määritelty osien pakkaus, kuljetus ja varastointimenettely.

**Osien ja komponenttien kuljettaminen** ympäri maapalloa aiheuttaa korroosiovikojen kannalta paradoksaalisen tilanteen, kun tuotteen osa, mikropiirin paljas siru, metalliosa, piirilevy, jne. ollessaan kaikkein herkimmillään korrodotumaan, pakataan (joskus huonosti ja joskus hyvin) ja rahdataan toiselle tehtaalle seuraavaa työvaihetta varten. Jos ostaja/toimittaja eivät oivalla, että kuljetuksissa tuotteet ovat kaikkein eniten alttiina hallitsemattomille ympäristörasituksille (lämpötilan vaihtelu, kosteus, ilman epäpuhtaudet, pöly, jne.), aiheutetaan sekä seuraaville tuotantovaiheille (etenkin juottaminen) ja lopputuotteen eliniälle vaikeasti korjattavia tai pysyviä vahinkoja. Tällaisten laatuvirheiden kustannukset voidaan hoitaa kuljetusvakuutuksin, mutta ne eivät korvaa lopputuotteen yleiselle laatukselle aiheutettua vahinkoa.

Vastuuta lopputuotteen ja sen osien toimivuudesta on vaikea vierittää alihankkijoille, näin ollen ainoaksi turvaavaksi keinoksi jää lopputuotevalmistajan oma osaaminen, jolla organisoidaan osien hankinnat, niiden laatu sekä oman tuotteen valmistus ja suunnittelu.

Tärkeintä lopputuotteen kannalta on, että hankittu osa todella toimii lopputuotteessa sille määritellyissä olosuhteissa. Alihankinnoissa, kuten yrityksessä itsessäänkin, hyviin tuloksiin voi päästä vain tietoperäisesti hyödyntäen myös alihankkijoiden logistiset osaamiset.

**Kenttäpalautteen hankkiminen** on välttämätöntä korjaavien toimenpiteiden toteuttamiseksi. Korroosiovikojen tunnistaminen on ääritapauksissa melko helppoa, mutta useimmissa käytännön tilanteissa, joissa viat esiintyvät vaivihkaa ja satunnaisesti, todellisen vian syyn selvittäminen on teknisestikin vaativa tehtävä. Käytännössä kenttäpalautteen saaminen suoraan suunnittelijoille vaatii aktiivista palautetiedon hankintaa. Palautteen hankkiminen olisi organisoitava yhteistyössä huolto- ja myyntiorganisaatioiden kanssa tehden näiden kanssa sopimuksia vikaantuneiden laitteiden toimittamisesta esim. takuuvaihtojen yhteydessä. Lopputuotevalmistajan ei pitäisi tyytyä vain huolto-organisaation raportteihin. Tehtaan suunnittelijoille olisi saatava analysoitavaksi eri tavoin vikaantuneita tuotteita rutiininomaisesti. Vasta näitä tutkimalla voidaan saada hyödyllistä tietoa korjaavia toimenpiteitä ja etenkin oman osaamistason parantamista varten.

Koska useimmissa tuotteissa vikapalautteessa esiintyy suurehkoja tuntemattomien vikojen ryhmiä ja toisaalta korroosiovikoja ei ehkä ole ohjeissa edes mainittu, jää palaute tältä osin melko arvottomaksi. Mikäli laatujärjestelmään sisältyy vialliseksi ilmoitettujen tuotteiden aktiivinen palauttaminen yrityksen suunnittelijoiden tutkittavaksi, mahdollisuudet päästä todellisten vikojen jäljille kasvavat oleellisesti. Lähinnä olisi harkittava ja organisoitava se, miten viallisia tuotteita ja kuinka paljon toimitetaan suunnittelijoiden tutkittavaksi. Suunnittelijoille voidaan laatia ohjeita, kuten ohessa on tehty (luvut 4...6 ja liite 3 *Katselmointimenettely*), joiden avulla osataan analysoida ja tunnistaa korroosio-ongelmia.



## 3. Korroosio ja kosteus elektroniikassa

Huomattava osa korroosiomekanismeista ja kosteuden vaikutuksesta elektroniikkaan on esitetty liitteessä 1 *Korroosion perusteita ja vikamekanismeita* ja muissa yhteyksissä, jonka vuoksi tässä kappaleessa käsitellään vain osaa näistä ilmiöistä. Kosteuden hallintaa laitteissa ja niiden kuljetuspakkauksissa on käsitelty luvuissa 2, 5 ja 6.

### 3.1 Ilmastollinen korroosio ja sen aikajänne

Ilmastolliseen korroosioon vaikuttavat ilman lämpötila, kosteus ja ilman epäpuhtaudet. Ympäristössä, jossa ihmiset päivittäin työskentelevät, on paljon tekstiilipölyä. Tämä pöly ei sinällään aiheuta ongelmia, mutta se sitoo pinnalleen muita hiukkasia ilmasta ja nämä hiukkaset voivat aiheuttaa ongelmia. Teollisuusympäristössä pöly koostuu valtaosaltaan epäorgaanisista hiukkasista, joiden koostumuksesta riippuu niiden tuhoisuus elektroniikalle. Pahimpia ovat hiili-/nokihiukkaset ja ruostetta/metallipölyä sisältävät hiukkaset.

Ilmastolliseen korroosioon vaikuttaa ehkä eniten lämpötila kosteuden välityksellä, kun se vaikuttaa vallitseviin kosteusolosuhteisiin. Lämpötila sellaisenaan vaikuttaa kemiallisia reaktioita kiihdyttävästi Arrheniuksen yhtälön mukaisella tavalla. Kosteuden myötävaikutuksella syntyvä korroosio voi edetä nopeasti jo lämpötiloissa 0...30 °C. Lämpötilan muuttuessa ilman suhteellinen kosteus myös muuttuu. Lämpötilan laskiessa suhteellinen kosteus nousee jossain vaiheessa yli 100 % RH ja pinnalle muodostuu vesikerros. Vesikerroksen muodostuttua korroosionopeuskin kasvaa tuhansia kertoja nopeammaksi lähtötilanteeseen nähden. Normaaliolosuhteissa (RH < 50 %) vettä voi olla pinnalle adsorboituneena 1...3 molekyylin vahvuinen kerros ilman, että korroosioreaktiot käynnistyvät. Kun kerros kasvaa 20...50 molekyylin vahvuiseksi, korroosioreaktiot alkavat muodostua vallitseviksi. Lämpötilan jälleen noustessa vesi haihtuu pois ja korroosiokin lähes pysähtyy. Korroosioilmiön nopeutta ja vakavuutta arvioitaessa puhutaankin yleisesti pinnan kosteana oloajasta (TOW).

Veden tunkeutuminen orgaanisten kalvojen (maalien) läpi tapahtuu nopeasti (katso liite 1, kohdat 1.5 ja 1.6). Alkydimaalille on mitattu aikoja, jotka ovat muutamia minutteja 20 µm kalvonpaksuudella [Feser & Stratmann 1991]. Epoksinnoit-teilla tehdyissä upotuskokeissa [van Westing et al. 1994] on havaittu, että vesi muodostaa muutamassa tunnissa pysyvän kerroksen pinnoitteen alle ja pysyvä korroosiotuotekerros muodostuu noin sadan tunnin kuluessa. Muutamassa tunnissa muodostunut vesikerros myös kuivui suunnilleen samassa ajassa.

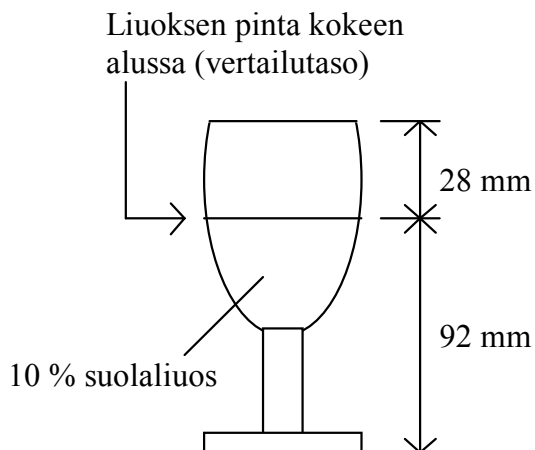
Maalikalvoon muutaman tunnin kuluessa kertynyt tasapainotilaa vastaava vesimäärä ei vielä aiheuta haittoja, sillä tässä vaiheessa kalvo pystyy vielä korjaamaan vauriot ja kuivumaan ennalleen. Korroosion liikkeelle lähtemiseen sisältyy aina jonkin verran hitautta ts. korroosiotuotteita ei ala heti syntyä kalvon alle. Sen jälkeen, kun korroosiotuotteita on alkanut syntyä, ei kalvo pysty enää palautumaan ennalleen. Analoginen tilanne em. ilmiöiden kanssa vallitsee juotteenestopinnoitteen päälle jääneiden juoksutejäämien kanssa. Vasta, kun jäämät pääsevät tunkeutumaan kalvon läpi (veden vaikutuksesta) kupariin asti, alkaa tapahtua korroosiota.

Vesiliuoksille altistetun metallin korrodoitumisaika vaihtelee liuoksen koostumuksen ja altistetun metallin koostumuksen mukaan. Puhtaalla vedellä tarvitaan viikkoja tai kuukausia kestävä yhtämittäinen altistus (esim. alumiini puhtaassa vedessä ei reagoi juuri mitenkään). Suolaa sisältävillä liuoksilla voi haitallisia korroosiotuotteita syntyä muutamassa tunnissa, jopa minuuteissa jännitteenalaisissa osissa. Tämä on pidettävä mielessä, kun suojataan ulko-olosuhteisiin tarkoitettuja laitekoteloita erilaisin maalein ja muin pinnoittein. Ulko-olosuhteissa vesi sisältää aina ilmasta peräisin olevia suoloja ja muita korrodoivia aineksia. Pahin on tilanne, jos vesi seisoo pinnoilla tai jää kapillaarirakoihin, koska tällöin hyvinkin suojattu pinta voi korrodoitua.

Edelläolevan perusteella voidaan arvioida, että muutama tilapäinen kostuminen ei välttämättä vielä johda mihinkään, mutta useampi kastuminen kosteana oloajan kasvaessa aiheuttaa jo vaurioita.

Kuvat 3.1...3.3 esittävät suolan (tässä tavallinen ruokasuola tai Pan-suola) taipumusta kulkea pitkin pintoja ja rakoja. Kuvassa 3.1 on koejärjestelyn alkutilanne ja koeastian mitat. Kuvaan 3.2 on piirretty ajan funktiona suolan kulkeutumismatka pitkin lasin sisä- ja ulkopintaa sekä suolaliuoksen pinnankorkeus alkutilanteeseen nähden. Kuvassa 3.3 on valokuvat suolan käyttäytymisestä kymmenen vuorokauden aikana kokeen aloittamisesta.

Kuvasarjan (kuva 3.3) mukaan suola nousee lasin sisäpintaa pitkin ja etenee lasin ulkopinnalle vajaan viiden vuorokauden kuluessa ja ulottuu seitsemän vuorokauden kuluttua jo 10 mm reunan ulkopuolelle. Kuvasarjan tapauksessa suola on sekoitettu vesijohtoveteen noin 10 %:iseksi liuokseksi, joka on kaadettu lasiin, jossa liuos on saanut olla sellaisenaan koskemattomana. Ympäristön lämpötila oli noin 24 °C ja suhteellinen kosteus 40...50 %.

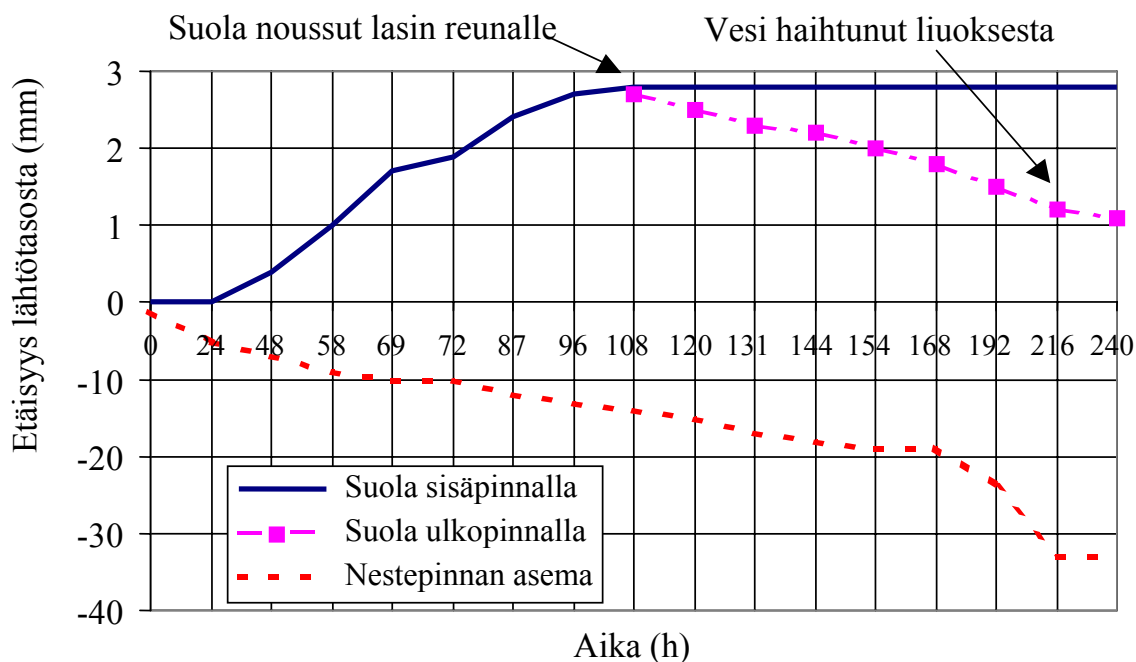


Kokeessa käytetyn Pan-suolan koostumus oli:

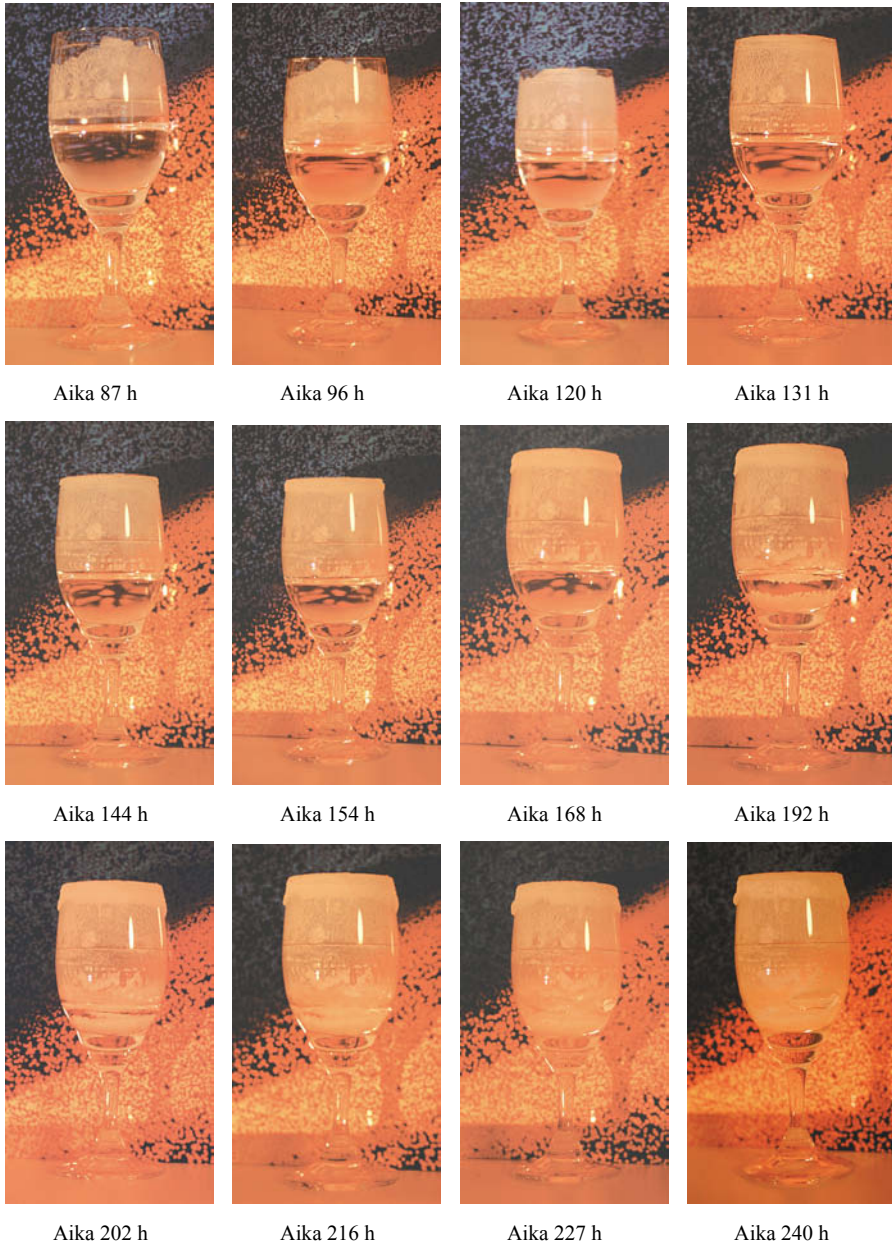
- kaliumkloridi 28 %,
- magnesiumsulfaatti 12 %,
- lyysiinihydrokloridi 2 %,
- kaliumjodidi 0,0036 %,
- natriumkloridi 57 % ja
- piidioksidi 1 % (paakkuuntumisen estoaine).

Kuva 3.1. Suolakoejärjestely.

Suolan kulkeutuminen tapahtuu seuraavasti. Kun suolaliuos on kaadettu lasiin, liuos nousee jonkin matkaa ylöspäin pitkin lasin sisäpintaa pintajännitysvoimien ansiosta. Lasin pinnalle nousseesta liuksesta haihtuu vettä ilmaan, jolloin pinnalla olevan liuksen suolapitoisuus kasvaa ja osa suolasta kiteytyy lasin pinnalle. Kuivumista seuraa veden adsorboitumista suolakiteisiin sekä liuksesta että ympäröivästä ilmasta. Vettä kulkeutuu liuksesta kiteytyneen suolan läpi kosteammilta alueilta kuivemmille alueille ja se vie mukanaan suolaa.



Kuva 3.2. Suolan kulkeutuminen viinilasissa kokeen aikana.



*Kuva 3.3. Kuvasarja esittää suolan kulkeutumista viinilasin sisältä sen ulkopinnalle. Kuvien alle on merkitty kuvanottohetket tunteina kokeen alusta lukien. Lasi on alussa ollut puolillaan (28 mm yläreunasta alaspäin) 10 %:sta suolavesiliuosta. Kokeen lopussa kymmenen vuorokauden kuluttua vesi oli haihtunut ja suola on kulkeutunut lasin ulkopinnalle noin 17 mm reunasta alaspäin.*

Etenemisrintamassa uudelleen kastunut suola etenee pintajännitysvoimien ansiosta jälleen eteenpäin pitkin lasin pintaa. Suolaliuoksen kuivumisvaiheet ja suolan kostumisvaiheet seuraavat toisiaan, jolloin liuoksesta kulkeutuva suola ja vesi synnyttävät lasin pinnalle aaltomaisia kiteytyneen suolan vyöhykkeitä (muistuttaa puun vuosirenkaita), jotka etenevät ympäristöön pinnanlaadun, suolan kiteyty-

misen ja kosteusolosuhteiden sanelemassa tahdissa ja suunnassa. Suolan kulkeutumiseen vaikuttavat seuraavat kaksi perusmekanismia:

- Suolaliuoksen ja lasin välinen pintajännitysvoima on pienempi kuin ilman ja lasin välinen pintajännitysvoima, jonka vuoksi nesteeseen kohdistuu suurempi voima pitkin lasin pintaa poispäin liuoksesta kuin nesteeseen päin suuntautuva voima. Ts. suolaliuoksen kastumiskulma on alle 90° lasin pinnalla ja liuos leviää lasin pinnalla myös ylöspäin (vrt. liite 1, kohta 3.4, kuva 3.4).
- Suola on hygroskooppista ja adsorboi itseensä vettä myös ilmasta (vrt. liite 1, kohta 5 *Korroosion kulkuun vaikuttavia tekijöitä*).

Kuvattu suolan hygroskooppisuus ja taipumus edetä pitkin pintoja ja kapillaarirakoja suhteellisen pitkiä matkoja muutamassa vuorokaudessa on syynä siihen, että se tunkeutuu nopeasti laitteiden sisälle ahtaistakin raoista sekä kertyy itse ja kerää vettä mekaanisiin rajapintoihin (ks. liite 1 kohta 3.5 *Kapillaari-ilmiö*). Veden kertyminen tällä tavalla erilaisiin rajapintoihin, esim. kalvokytkimien ja elastisten EMC-tiivisteiden kosketusalueisiin aiheuttaa aina voimakasta korroosiota yhdessä muiden epäpuhtauksien kanssa. Kosteissa olosuhteissa suolaliuos voi kerätä vettä niin paljon että elektroniikan johdinkuvioihin syntyy oikosulkuja. Maalipinnoitteissa suola voi aiheuttaa muutamassa viikossa lankamaista korroosiota, jos pinta pääsee kostumaan (liite1, kohta 2.9 *Lankamainen korroosio*).

### 3.2 Kosteuden vaikutus elektroniikassa

Kosteus ja vesi vaikuttavat laitteisiin mm. seuraavien tapahtumien kautta:

- Ilman kosteus absorboituu materiaaleihin ja adsorboituu pinnoille. (Esim. 200 h, 25 °C, 61 % RH olosuhde ajaa IC-kotelomuoviin vettä 0,15 % sen painosta [Lind 1995].)
- Materiaaleihin absorboitunut vesi kasvattaa materiaalien häviöitä ja muuttaa johtuvuutta ja dielektrisyysvakiota  $\epsilon_r$ .
- Komponenttien muovikoteloissa olevat ioniset epäpuhtaudet lähtevät liikkeelle ja kotelot turpoavat mekaanisesti.
- Ilman kosteus kondensoituu vedeksi ilmaa kylmemmille pinnoille. Ilman lämpötilan vaihtelu mahdollistaa kondensoitumisen.
- Vesi/kosteus diffundoituu materiaalien läpi kosteuserojen tai ilman paineen taikka lämpötilaerojen vaikutuksesta.

- Kuljetuspakkauksissa olevat hygroskooppiset materiaalit luovuttavat vettä pakkauksen sisätilaan.
- Valuva vesi kertyy rakenteiden rakoihin ja pintojen epätasaisuuksiin.
- Sade tunkeutuu laitteen sisään voimakkaan ilman/vedenpaineen johdosta ja myös siksi, että sade jäähdyyttää laitteita, jolloin se imee veden sisäänsä.
- Aurinko lämmittää laitteen toista sivua, jolloin vesi kondensoituu kylmälle sivulle [Gellerstedt 1995]. Vastaavasti kylmälle taivaalle osoittava pinta jäähtyy voimakkaasti ja aiheuttaa kondensoitumis-/jäätymisriskin.
- Kylmälle alustalle asennettu laitteen sisäpinta kerää kondenssivettä, kun ulkoilma lämpiää.
- Laite joutuu tai sijaitsee veden sisällä.
- Ihmisen toimet aiheuttavat vesivahinkoja, esim. erilaiset pesutilanteet taikka vesivahingot (vrt. taulukko 3.1).

*Taulukko 3.1. Kosteuden vaikutukset laitteisiin [IEC 60068-1].*

<b>Kosteus</b>	<b>Pääasiallinen vaikutus</b>	<b>Tyypillinen vioittuminen</b>
Korkea suhteellinen kosteus	Kosteuden absorptio ja adsorptio Turpoaminen Mekaanisen lujuuden heikkeneminen Korroosio ja elektrolyysi Eristeiden johtavuuden kasvu Dielektrisyysvakion $\epsilon_r$ kasvu	Fyysinen vikaantuminen, eristysvika, mekaaninen vika, sähköisten häviöiden kasvaminen
Alhainen suhteellinen kosteus	Kuivuminen Murtuminen Mekaanisen lujuuden heikkeneminen Kutistuminen Metallikosketinten kuluminen	Mekaanisia vikoja, murtumia

### 3.3 Vesi ja kemikaalit

Puhdas vesi ei sinällään ole vaarallista. Sen pintajännitys on erittäin suuri eikä se siksi kostuta pintoja kovinkaan hyvin. Puhtaalla vedellä on kuitenkin erittäin suuri kyky liuottaa itseensä ympäristöstä muita aineita, jolloin tilanne muuttuu välit-

tömästi. Vesi ei toisin sanoen pysy eikä esiinny luonnossa koskaan puhtaana. Veteen liukenevat aineet alentavat yleensä sen pintajännitystä ja likaisen veden kykyä kostuttaa pintoja onkin jo paljon parempi.

Piirilevyjen valmistuksessa veden pintajännitystä alennetaan tarkoituksella, jotta pinnoitusliuokset saataisiin tunkeutumaan piirilevylle porattuihin reikiin. Koska käyttöön tulee yhä pienempiä reikiä, jotka eivät aina ulotu piirilevyn läpi, voi näihin reikiin jäädä pinnoitusprosessista jäämiä. Mitään säännöllistä käyttäytymistä tällaisissa tapauksissa ei ole havaittavissa, vaan jäämät esiintyvät satunnaisesti joissakin rei'issä siellä täällä. Halkaisijaltaan 0,1 mm ja sitä pienemmät reiät tuottavat tässä suhteessa hankaluuksia.

Liuottimet, kuten alkoholi, yleensä poistuvat samaa tietä kuin tulevatkin. Liuottimien aiheuttamat vauriot jäävät yleensä havaitsematta, ellei pintaa pyyhitä voimakkaasti. Tällöin liuottimen pehmentämään pintaan tulee näkyviin pyyhkäisyjäljet. Jotkut muovit ja liuottimet eivät kuitenkaan sovi yhteen. Tällöin muovi tuhoutuu, koska liuotin saa aikaan muovissa jännityssäröilyä tai kertakaikkisesti liuottaa muovin. Esim. polykarbonaatti (PC) tuhoutuu asetonin (kynsilakanpoistoaine) aiheuttaman jännityssäröilyn vuoksi.

Kotitaloudessa käytettävät puhdistusaineet, saippuat ja kemikaalit voivat sisältää yllättävänkin tuhoisia aineita elektroniikan kannalta. Normaalissa nestemäisessä astianpesuaineessa on mukana alkoholia, joka voi imeytyä mm. käsipuhelimen kuoren muoviin. Monet muutkin puhdistusaineet sisältävät alkoholia esim. Sinol. Sama pätee moniin kosmetiikkatuotteisiinkin, kuten partavesiin.

Rasvamaiset aineet ja pintajännitystä alentavat aineet (saippuat) aiheuttavat vaurioita polymeerisissä rakenteissa, kuten muoveissa. Rasvamaisten aineiden ikävin ominaisuus on se, että ne vaeltavat imeytymispaikastaan pitkiäkin matkoja lämpötilavaihteluiden ajamana ja vauriot saattavat syntyä aivan yllättäviin paikkoihin. Niiden tuhoisa vaikutus perustuu kykyyn toimia pehmitteiden kaltaisesti. Muovi turpoaa ja muuttuu pahimmassa tapauksessa juoksevaksi ja menettää kokonaan mekaanisen lujutensa. Pehmennyt muovi kykenee myös imemään itseensä mm. vettä, jolloin korroosiovaara kasvaa oleellisesti. Joissakin saippuoissa on mukana ihonhoitoon tarkoitettuja rasvoja, jotka on valittu siten, että niillä on kyky imeytyä polymeereihin, jollainen ihokin on! Tämänkaltaisten aineiden vaikutus ilmenee siten, että muoviosat turpoavat tai pehmenevät pinnaltaan eli muuttuvat tahmaisiksi ja likaa kerääviksi.

Ihmisen omat päästöt hengityksestä, käsien hiki ja rasva, hiukset, hilse ja ihonhoitoaineet sisältävät kemikaaleja, joilla voi olla korrodoivia tai esim. muoveja

pehmentäviä ominaisuuksia. Tällaisia kemikaaleja ovat esim. hiilidioksidi, aldehydit, metaani, ihovoiteet, puuterit, parfyymien liuotteet. Lisäksi tupakasta vapautuu mm. tervaa, ammoniakkia, asetonia, formaldehydiä ja typen oksideja. Ihmisen hiessä ja hengityksessä olevat aldehydit läpäisevät silikonikumin, josta tehdään esim. kalvonäppäimistöjä. Silikonikumi myös reagoi aldehydien kanssa ja voi erittää itsestään liimamaisia yhdisteitä, jotka haittaavat koskettimien toimintaa.

On hyvä muistaa vanha ohje likaantuneiden pintojen puhdistusta ajateltaessa. Pyyhitään puhtaaksi puhtaalla vedellä kostutetulla rätillä ja jos pesuainetta käytetään, tulee sen olla neutraalia ehkä hieman emäksistä saippuaa!

### **3.4 Materiaalien ja komponenttien omat päästöt**

Elektroniikassa käytetyistä orgaanisista materiaaleista voi haihtua tai muuten erittyä elektroniikkaa korrodoivia taikka laitteiden toimintaa muutenkin häiritseviä aineksia. Nämä päästöt ovat tavallisesti joitain rasvahappoja, kuten muurahais- ja etikkahappo sekä näiden aldehydejä, jotka kontaktissa metalleihin hapettuvat ja muodostavat vastaavia rasvahappoja. Näiden aineiden haitat tulevat yleensä esiin vain, jos ilmassa on samanaikaisesti korkea (> 50 % RH) suhteellinen kosteus. Magnesiumilla korrodoituminen alkaa jo 30 % RH kosteudella. Tällöin korrosio voi olla hyvin runsasta. Rasvahappojen lisäksi muita päästöjä ovat suolahappo, rikkivety, fenolit, amiinit ja ammoniakki. Alhainen ilmanpaine voi edistää päästöjä. Korkea lämpötila (> 60...75 °C) kiihdyttää voimakkaasti päästöjä ja aineiden vanhenemista. Korkea lämpötila myös kiihdyttää korroosiomekanismeja.

Koska orgaanisten aineiden päästöt ovat yleensä kaasumaisessa muodossa, yksi tehokas tapa välttää niiden haittavaikutukset on ylläpitää kohtuullista tuuletusta laitteiden läheisyydessä ja sisällä. Laitteen sisällä voimakas tuuletus voi kuitenkin olla haitaksi, jos tuuletus mahdollistaa korkean kosteuden ja myös muiden kuin laitteesta itsestään peräisin olevien päästöjen vaikutuksen. Useiden lähteiden mukaan [esim. Henriksen et al. 1991, IPC-A-610, BS 7195] korrodoivia aineita päästäviä ovat esim. seuraavassa luetellut aineet.

#### **Silikoni**

Silikonipitoisista tiivisteaineista lähtee etikkahappoa ja etyylialkoholia, jos tiiviste on tyypiltään huoneen lämpötilassa vulkanoitua (RTV).



Silikonikumit, jotka ovat tyypiltään huoneen lämpötilassa vulkanoituja, päästävät etikka- ja muurahaishappoa.

Silikonit itsessään ryömivät helposti pitkin pintoja ja muodostavat eristäviä kalvoja esim. liitinten ja kytkinten koskettimiin.

Piirilevytuotannossa ja kokoonpanossa erityisen haitallisia ovat voiteet ja parfyymit, jotka voivat sisältää silikoniöljyä, joka huonontaa juottuvuutta ja heikentää suojapinnoitteiden adheesiota suojattaville pinnoille. [IPC-A-610, s. 5–6, 1996]

## **Hartsit**

Fenolihartsit päästävät fenoleita (fenoli-/karbolihappoja).

Valetut hartsit päästävät ammoniakkipitoisia kaasuja.

Pehmitetyt muovit päästävät estereitä ja orgaanisia happoja.

## **Kumit**

Kumit päästävät sulfideja (rikkipitoisia kaasuja).

Esim. EPDM-kumitiivisteet voivat päästää vulkanointitavasta riippuen erilaisia määriä korrosiivisia yhdisteitä, kuten hiilioksidisulfidia (COS) ja hiilidisulfidia (CS<sub>2</sub> rikkihiili). Nämä korrodoivat sellaisenaan metalleja, kuten Cu, Ag ja Zn ja reagoidessaan hapen tai veden kanssa synnyttävät rikkivetyä ja rikkidioksidia. EPDM kumit (ethylene-propylene-diene rubbers) vulkanoidaan usein rikin avulla, jonka vuoksi sen rakenteeseen jää rikkiyhdisteitä. Peroksidivulkanoinnilla voidaan välttyä rikkiyhdisteiden päästöltä.

## **Muovit ja pinnoitteet**

PVC-muovi päästää suolahappoa UV-valossa ja yli 70 °C lämpötilassa. Tulipalojen yhteydessä palavat PVC:tä sisältävät kaapelit päästävät ympäristöön vahvasti syövyttäviä kaasuja, joista suolahappo on yksi merkittävimmistä.

Epoksit päästävät amiineja.

Polyamidit (nylonit) päästävät etikkahappoa yli 60 °C lämpötilassa.

Lisäaineeton polyvinyyliasetaatti päästää muurahaishappoa. Sopivien stabilointi- ja inhibiittoriaineiden kanssa se ei ole korrodoiva.

Mm. seuraavia pidetään korroosion kannalta harmittomina tavallisissa ympäristö- lämpötiloissa: polyolefiini, polyesteri, polykarbonaatti, polystyreeni, polysulfoni.

Huoneen lämpötilassa kuivuvat öljymaalit ja -lakat päästävät etenkin tuoreina muurahaishappoa.

### **Pakkausmateriaalit**

Paperit ja pahvit (kartonki) päästävät rikkiä sisältäviä kaasuja.

Puu ja vaneri päästävät orgaanisia happoja, useimmiten etikkahappoa. Etenkin uunikuivatut puut päästävät etikkahapon lisäksi myös muurahaishappoa sekä muita orgaanisia happoja.

Ruskea puuhioketta sisältävä, ns. märkälujia pakkauspahvi tai lastulevy voivat kostuessaan erittää korrodoivia aineita. Herkästi reagoivia metalleja kuten messinki, sinkki ja alumiini ei saisi koskaan sulkea ilman lisäsuojaa (muovipussi tms.) näihin pakkauksiin. Tuore puukin sisältää varsin paljon haihtuvia aineksia. Puun sijasta onkin suositeltavampaa käyttää vaneria tms. materiaalia.

### **Pehmusteet päästävät rikkiä sisältäviä kaasuja tai happoja.**

Lähteessä [Henriksen et al. 1991] suositellaan ettei kaikkein eniten kontaminoivia orgaanisia materiaaleja käytettäisi elektroniikassa, jos suinkin mahdollista. Tällaisia ovat PVC, neopreeni, fenoli- ja polysulfidimateriaalit. Orgaaniset hartsit olisi kovatettava hyvin loppuun asti tai ne olisi vanhennettava ennen käyttöönottoa. Puupitoisia materiaaleja pidetään korrosiivisina, jonka vuoksi elektroniikka on suojattava niiden vaikutuksilta niin kuljetuspakkauksissa kuin käytössäkin.

### **Muut ainekset ja vaikutukset**

Polysulfidi-tiivisteaineista haihtuu rikkiä sisältäviä kaasuja.

Orgaaniset nesteet, työkalurasvat, voiteluaineet, liimat, paineherkät teipit, elastomeerit, laakerirasvat ja huonosti kovettuneet valettavat muovit voivat päästää itsestään erilaisia korrodoivia kaasuja. Niissä voi olla myös silikoneja, jotka muodostavat eristäviä kalvoja pinnoille ja ovat haitallisia juottamisessa sekä pinnoitettaessa tuotteita.

Käsijuotoksessa käytettävä tina sisältää mm. suojarahartsia, joka voi haihtua ympäristöön. Hartsit voivat olla fenoliyhdisteitä sisältäviä aineita. Näillä yhdisteillä on korrodoiva vaikutus messinkiseoksiin.

Akkuteknologia on siirtynyt myös perinteisiä laimeita elektrolyyttejä sisältävissä akuissa – pääasiassa lyijyakuissa – suljettuihin akkurakenteisiin. Näissä akuissa voi liian suuria latausvirtoja käytettäessä muodostua vetyä, joka voi purkautua akun paineventtiilin kautta ulos ja sen mukana voi myös purkautua rikkihappopitoista elektrolyyttisumua. Rikkihapposumu syövyttää lähes kaikkia materiaaleja. Akkujen päästöille onkin varattava tuuletustiet, joiden varrella ei saa olla elektrolyttisumussa tuhoutuvia materiaaleja. Akut on myös pidettävä pystyasennossa, jottei elektrolyttineste tuki paineventtiilejä. Jos akut ovat kyljellään, silloin pienikin vedyn muodostuksen nostama sisäinen paine ajaa akkunesteet ulos myös paineventtiilin kautta, jolloin sekä korroosion vaara että suuremmat vahingot ovat mahdolliset.

Useimmat pienakut ovat “umpinaisia”, joten niistä ei tule ulos mitään. Jos tällaisia akkuja lataa liian suurella virralla, ne voivat räjähtää. Pienakkujen elektrolyytti on alkalista ja mikäli sitä pääsee purkautumaan poikkeustilanteissa ulos, aiheuttaa se vaurioita alkaleille herkkiin materiaaleihin. Alkaleille herkkiä ovat esim. alumiini, kupari ja tina. Muovit ovat melko kestäviä alkaleita vastaan, mutta ne voivat turvota niihin imeytyvien alkalimetalli-ionien takia, mikä johtaa muovin mekaanisten ominaisuuksien heikkenemiseen.

Klooratut hiilivedyt (sisältävät klooria), jotka ovat myrkyllisyytensä vuoksi kiellettyjä aineita, hajoavat muodostaen kloorivetyä eli suolahappoa joutuessaan veden kanssa kosketuksiin. Esim. maaliruiskuja, jotka ovat Al/Mg seoksista tehtyjä, ei saa puhdistaa klooratuilla hiilivedyillä suolahapon syntymisvaaran takia – vetyräjähdys maaliruiskussa ei ole leikin asia.

Kosteissa alumiini- ja tantaalielektrolyyttikondensaattoreissa on ylipaineventtiili, jonka tarkoituksena on estää kondensaattorin räjähtäminen sisäisen paineen nousun vuoksi. Kosteissa elektrolyyttikondensaattoreissa on nestemäistä elektrolyyttiä, joka vuotovirran vaikutuksesta tuottaa aina hieman vetykaasua; ylipaineventtiilin tarkoitus on päästää tämä vety ulos. Jos kondensaattorin tiivisteet vuotavat, saattaa kondensaattorin elektrolyttineste valua ulos, jolloin se happoisena syövyttää esim. piirilevyn johdinkuviota. Jotta vetykaasun vuotaminen ei vuodattaisi mukanaan myös elektrolyyttiä, olisi isot kosteat elektrolyyttikondensaattorit asennettava liitäntäjohtimet ylöspäin, jolloin elektrolyttineste ei peitä ylipaineventtiiliä.

Halogenoidut hiilivedyt (sisältävät klooria ja mahdollisesti myös bromia ja fluoria) joutuessaan kosketuksiin alumiinielektrolyyttikondensaattorin eristekalvon kanssa liuottavat ja hajottavat oksidikalvoa, turmellen kondensaattorin. Nämä hiilivedyt voivat läpäistä ja reagoida kondensaattoreiden tiivisteiden kanssa ja päätyä kondensaattorin sisälle. Tämän vuoksi kondensaattoreita saisi pestä vain halogeenivapailta pesuaineilla, kuten etanoli, propanoli ja isopropanoli (vaihtoehtoisesti altistusaika olisi minimoitava) [Aluminum Electrolytic Capacitors 1999].

## **BS 7195**

Standardiohjeessa BS 7195 (1989) *Prevention of corrosion of metals caused by vapours from organic materials* annetaan melko seikkaperäinen listaus orgaanisten materiaalien korrodoivien aineiden päästöistä ja ohjeistusta kuinka erityyppiset metallipinnat tulisi suojata näiden päästöjen varalta.

BS 7195 jakaa metallit seuraaviin ryhmiin niiden alttiuden perusteella orgaanisten aineiden korrodoiville päästöille. Ryhmittelyä ei ole laadittu silmälläpitäen elektroniikan korroosioherkkyyttä, mutta sitä voi käyttää ohjenuorana ainakin kotelo- ja tukimateriaalien korroosioherkkyyttä arvioitaessa.

### Ryhmä 1: Vakava korroosioalttius

Hiiliteräkset, lyijy ja lyijyseokset, sinkki ja sinkkiseokset, magnesium ja magnesiumseokset sekä kadmium (kadmiumin käyttö on nykyään kielletty).

### Ryhmä 2: Kohtalainen korroosioalttius

Kupari ja kupariseokset.

### Ryhmä 3: Lievä korroosioalttius

Alumiini ja alumiiniseokset, nikkeli ja nikkelseokset.

### Ryhmä 4: Kestävät materiaalit

Austeniittinen ruostumaton teräs, kromi, kulta, molybdeeni, hopea, tina, titaani ja titaaniyhdisteet.

Kestävimpään ryhmään on merkitty myös hopea, joka kuitenkin elektroniikan kosketinpinnoitteena ei ole suositeltava, jos toimitaan piensignaaliolosuhteissa alle muutaman voltin jännitteellä ja ilmassa on rikkijyhdisteitä kuten yleensä kaikkialla on. Hopea soveltuu suurivirtaisiin ja -jännitteisiin koskettimiin esim. kytkimissä ja releissä, koska se kestää kipinäintiä (valokaarieroosiota) avautuvissa/sulkeutuvissa koskettimissa.

BS 7195:ssä esitetään suojaamiskeinoina seuraavat toimenpiteet kuvaten tarkemmin myös niiden toteutusta:

- epäsopivien materiaalien poistaminen
- ilman kuivaaminen
- tuuletus
- suojaavat pinnoitteet.

### **3.5 Ulkoiset liitokset ja käyttökytkimet**

Elektroniikkalaitteen ulkoiset liittimet ja johdotukset ovat yksi eniten vaikeuksia tuottava osa korroosion aiheuttamien ongelmien hallinnassa. Hyvin tavallisia vikoja ulkoisissa liittimissä ovat ajoittain esiintyvät katkokset, joiden syy yleensä on kosketinpinnoitteiden asteittainen korrodoituminen, likaantuminen taikka kontaktien kuluminen ja jousien väsyminen.

Avattavien liitosten on kestävä toistuvaa mekaanista kulutusta, niiden tulisi olla vesitiiviitä ja kosketinpinnoitteiden pitäisi sietää ulkoisen lämpötilan vaihtelusta aiheutuvaa kostumista ja mekaanista kulumista. Lisäksi johdinten pysyvyys liitinnäkössä on varmistettava vedonpoiston avulla.

Ulos sijoitettavissa laitteissa ulkoisten johdotusten tukeminen mekaanisesti, joihin tuominen alakautta sisään veden valumisen estämiseksi suoraan liittimiin ja materiaalien valinta siten, että kaapelointi kestää taivutukset, lämpötilan vaihtelut ja veden jatkuvan läsnäolon, parantaa korroosiovaaran torjuntaa.

Lähes kaikissa laitteissa on ainakin muutama käyttökytkin laitteen käyttöä varten. Nykyään hyvin monissa laitteissa käytetään kalvokytkimiä, joiden etuna on halpa hinta ja mahdollisuus aikaansaada myös kosketuksen sietäviä vesitiiviitä rakenteita. Useimpien laitteiden käyttöliittymän käsittely tapahtuu paljain käsin (hisin ohjaus, matkapuhelin, tietokonepäätte, kulunvalvontalaitteet), jolloin näissä olevat käyttökytkimet altistuvat hyvin monille kemikaaleille ja myös pesulle. Koska kytkimet ovat laitteen ulkopinnalla, ne altistuvat myös ilman lämpötilan vaihtelulle ja kosteudelle. Tämän vuoksi kytkimien tiiviys, kemikaalien sieto, sekä mekaanisen kulutuksen kestävyys on useissa laitteissa täysin ratkaiseva tuotteen toimivuudelle. Korroosio on merkittävä osatekijä käyttökytkimien vikamekanismeissa.

### 3.6 Kotelo- ja runkorakenteet

Laitteen koteloinnin perustehtävä on suojata laitteen herkkiä osia ulkoisilta rasituksilta. Ulkopintojen korroosio vaikuttaa yleensä lähinnä tuotteen ulkonäköön, mutta pahimmillaan myös rakenteiden tiiviys ja lujuus voivat kärsiä liiallisesta korroosiosta. Märkiin olosuhteisiin tarkoitettujen koteloiden tiiviynsäilyttäminen on laitteiden toimivuuden kannalta erittäin tärkeä ominaisuus, kotelon muodon ja tiivisteiden ominaisuuksien tulisi säilyä tuotteen koko elinkaaren ajan. Huomattava osa koteloinnin korroosio-ongelmista keskittyy erilaisten saumojen, avattavien kansien ja ovien reunoihin. Kun näissä saumoissa tarvitaan myös sähköistä johtuvuutta, joudutaan tekemisiin hankalan metalliparikorroosion kanssa. Ulkotiloissa koteloiden ulkopintojen suojaamisessa on tärkeää suunnitella pintojen ja saumojen muodot siten ettei valuva tai kondensoituva vesi jää seisomaan mihinkään pitkäksi aikaa.

Koteloiden ulkopinnat ovat yleensä maalattuja. Maaleina käytetään korotetussa lämpötilassa kovettuvia materiaaleja tai kemiallisesti verkkoutuvia kaksikomponenttimaaleja, joista ei kovetusprosessin jälkeen irtoa mitään ympäristöön. Enevässä määrin koteloita maalataan pulverimaalilla, jolla saadaan kulmiin/nurkkiin parempi suoja kuin liuotinmaaleilla. Pulverimaalin päästöt ovat pienempiä kuin liuotinmaalien, mutta kovetusprosessi vaatii aina korotetun lämpötilan. Markkinoille tulee lähivuosina (2000–2002) matalassa lämpötilassa kovettuvia pulverimaaleja erityisesti muovien maalaukseen. (Ks. kohta 6.9 *Kotelomateriaalit*).

Muovisten kotelomateriaalien ja muovisten laitekuorien korroosion kannalta tärkeimmät tekijät ovat: herkkyys UV-valolle, kemikaaleille sekä veden absorption aiheuttama materiaalin ominaisuuksien muuttuminen. Kemikaalien vaikutusta on käsitelty kohdassa 3.3 *Vesi ja kemikaalit*. Materiaalin herkkyys UV-valolle riippuu polymeerin rakenteesta ja muovissa käytetyistä stabilisaattoreista. Yleisenä piirteenä voidaan sanoa, että mitä vähemmän UV-valolle muovia altistetaan sitä pidempään se kestää. Huom.! UV-valoa esiintyy vähäisiä määriä myös sisätiloissa loisteputkien säteilyssä.

Koteloiden sisäpuoliset rakenteiden on oltava rakenteeltaan niin lujia, että ne kestävät komponenttien/piirilevyjen asennuksen aiheuttamat rasitukset. Rakenne toimii yleensä myös maadoituksena, joten sen on oltava sähköä johtavaa ts. metallia. Sähkösinkitty ja keltakromatoitu teräs on yleensä liitinkiskoja/kehikoiden materiaalina halpuutensa takia ja kuumasinkitty tasoitusvalssattu ohutlevy yleensä muuna kotelon rakennemateriaalina.

Hyvä keltakromatointi antaa kotelon sisällä vallitsevissa olosuhteissa yleensä useiden vuosien kestoian. Paitsi keltakromatointia käytetään etenkin kiinnikkeille myös ohuempaa väritöntä kromatointia (sinipassivointi). Tasoitusvalssatun ohutlevyn kromatointi on myös väritön. Sinipassivointi ei anna samaa suojaa kuin keltakromatointi ohuemmasta kerroksesta johtuen. Siksi on erikoista, että kiskot ja muut raskaammat rakenteet ovat yleensä hyvin suojattuja eli keltapassivoituja ja ruuvit, joilla raskaammat rakenteet kiinnitetään, ovat yleensä sinipassivoituja. Tämän seurauksena ruuveissa syntyy korroosiota, joka näkyy ruuvinkantojen höytymäisenä valkoruosteena. Huonosti tehty passivointi tai sähkösinkitys voivat johtaa myös siihen, että pinnoitteesta irtoaa hiukkasia, jotka voivat aiheuttaa oikosulun tiheällä piirilevyllä. Pinnoitusprosessin hallintaan ja pinnoitteen laatuun tulisikin kiinnittää selvästi enemmän huomiota kuin aiemmin on tehty.

Tasoitusvalssatussa ohutlevyissä ei valkoruostetta yleensä samoissa oloissa synny, sillä tasoitusvalssaus muuttaa pintaa kestävämmäksi. Sen sijaan levyjen reunoissa voi esiintyä ns. punaruostetta, joka tulee ohutlevyn teräsmateriaalin syöpymisestä. Leikattujen teräsreunojen syöpymisen estämiseen ei ole olemassa helppoa ja halpaa ratkaisua. Ainoa tapa estää ko. ilmiö on joko sinkkifosfatoita ja maalata koko kappale tai muuttaa mikroilmasto laitteen sisällä sellaiseksi, että syöpymistä ei tapahdu. Pelkkä reunojen maalaus ei yleensä kappaleiden mutkikkaan muodon takia onnistu. Reunoista irtoava ruostepöly muodostaa potentiaalisen vaaran ympäristölle johtavuutensa takia. Ruostepöly vaikuttaa myös muovimateriaaleihin [Kemisk Tidskrift 1986]. Ruostepöly, kosteus ja UV-säteily katalysoivat muovien hajoamista, mikä voi muodostua ongelmaksi mm. sähkötiloissa, joissa UV-säteilyä on aina läsnä jonkin verran loisteputkien valossa.

Euroopan yhteisön, EU, [RoHS] direktiivi elektroniikkaromun kierrätyksestä kielsi elektroniikkalaitteissa lyijyn (juotostina), elohopean (pienparistot), kadmiumin (akut), 6-arvoisen kromin (kromatoitu alumiini ja sinkki, kiiltokromatut koristeet, näppäimet ja ulkokuoret) ja halogenoitujen palonestoaineiden (piirilevyt) käytön vuoden 2006 heinäkuun alusta lähtien. Direktiivin soveltaminen muuttaa melkoisesti elektroniikassa käytettäviä materiaaleja. Pelkästään lyijyn vähentäminen juotteista aiheuttaa sekä tuotannollisia juottamiseen, komponenttien lämmönsietoon että luotettavuuteen vaikuttavia ongelmia.

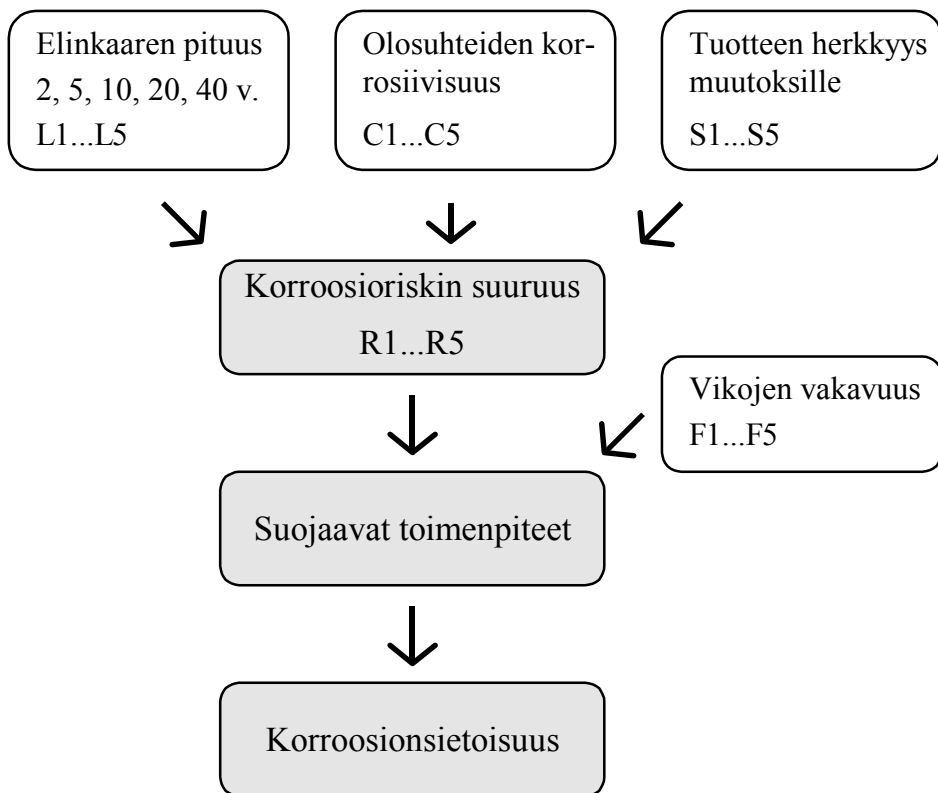
## 4. Tuotteen korroosionsietoisuuden määrittely

Korroosionsietoisuudella tarkoitetaan tässä tuotteen kykyä toimia tarkoitetulla tavalla ja kestää korroosiota ja ilmastollisia vaikutuksia tietyn pituisen elinkaaren ajan ilman että tuote aiheuttaisi ympäristölleen vaaraa.

### 4.1 Korroosionsietoisuus

Korroosionsietoisuus muodostuu kahdesta osakokonaisuudesta:

- korroosioriskiä lisäävät tekijät ja
- suojaavat ts. korroosiota estävät toimenpiteet.



*Kuva 4.1. Tuotteen korroosionsietoisuuden määrittäminen.*

Perustavoitteena tässä on hahmottaa sellainen menettely, jolla korroosionsietoisuudelle voidaan saada käytännöllinen ilmaisu- ja mittaustapa. Tämän menetelyn avulla voidaan tuotesuunnittelussa tehdä tarkoituksenmukaisia päätöksiä niistä toimenpiteistä, joilla tuotteen korroosionsietoisuutta ja luotettavuutta optimoidaan.



Tuotteiden korroosionsietoisuuden määrittelyssä on otettava huomioon kuvassa 4.1 hahmotetulla tavalla korroosioriskiä lisäävät tekijät: tavoiteltu elinkaaren pituus, ympäristöolosuhteiden korrosiivisuus, tuotteen konstruktion herkkyys korroosion aiheuttamille muutoksille sekä erilaiset suojaavat ts. korroosiota rajoittavat toimenpiteet. Kuvassa 4.1 riskitaso on esitetty asteikolla 1...5, jossa 1 on pienin ja 5 suurin riskitaso. Lisäksi eri seikkojen merkityksen arvioimiseksi on arvioitava kunkin korroosiosta aiheutuvan vikatyypin haitallisuus laitteen toiminnalle. Mitä haitallisempi vika on sitä enemmän sen torjuntaan on sijoitettava. Kullekin riskitekijälle voidaan laatia luokittelu, jonka avulla saadaan mitta ao. tekijän vaikutukselle ja eri tekijöiden yhdistelmänä mitta tuotteen kokonaisriskille ja suojaavien toimenpiteiden perusteella mitta tuotteen korroosionsietoisuudelle.

On pidettävä mielessä, että tässä korroosiolla tarkoitetaan kaikkia niitä rappeuttavia vaikutuksia, mitä korrodoivat aineet, hapettuminen sekä ilmastolliset- ja muut ympäristövaikutukset aiheuttavat korroosiomekanismien kautta laitteiden toimintaan ja ulkonäköön. Näin ollen korroosionsietoisuuskäsitteen sisältö on yhdistelmä hyvin monista osatekijöistä.

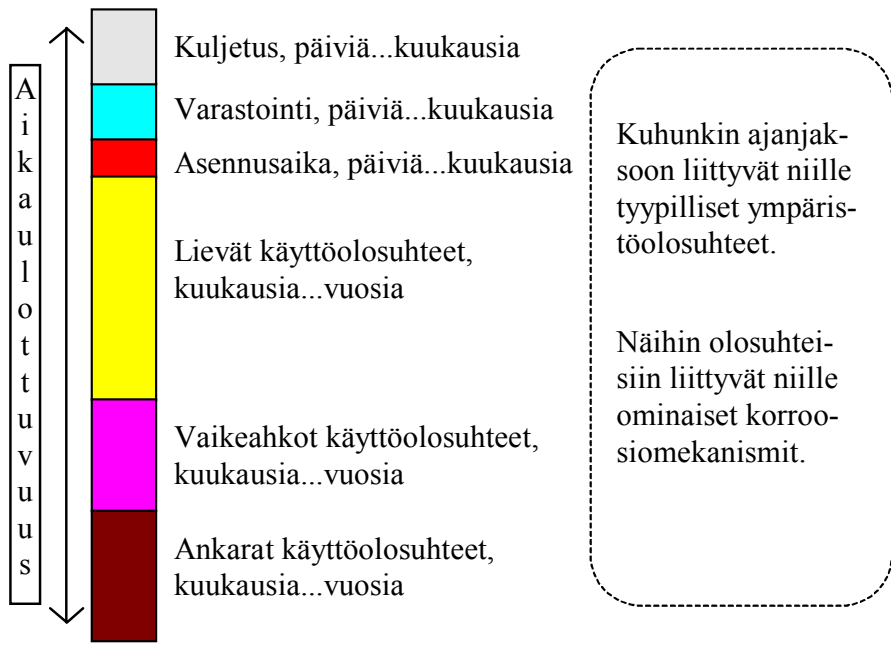
## **4.2 Elinkaaren pituuden vaikutus**

Korroosion määrä on verrannollinen vaikutusaikaan. Luokituksena voidaan periaatteessa käyttää esim. elinkaaren pituuksia 2, 5, 10, 20 ja 40 vuotta. Tuotteen elinkaaren pituus vaikuttaa ensisijaisesti siihen, kuinka suuriin muutoksiin on varauduttava laitteen ominaisuuksissa ja miten monenlaisia vikamekanismeja on otettava huomioon korroosionsietoisuutta suunniteltaessa. Osa korroosion aiheuttamista muutoksista on nopeasti ja rajusti vaikuttavia, jos olosuhteet ja konstruktio ovat tätä suosivia, mutta huomattava osa korroosion vaikutuksista etenee melko hitaasti, etenkin, jos olosuhteet ovat vain hetkittäin selkeästi korrodoivat (kuva 4.2).

Jos tavoiteltu elinkaaren pituus on kymmenen vuotta, kasvaa korroosioriski jo senkin vuoksi, että todennäköisyys korrodoivien olosuhteiden esiintymiseen on suuri ainakin ajoittain, kontaminaation kumuloituva vaikutus näkyy ja hyvin monenlaisilla mekanismeilla on aikaa kehittyä ja aiheuttaa muutoksia laitteen eri osiin.

Hyvin lyhyeksikään suunniteltu elinkaari, esim. kaksi vuotta, ei salli laitesuunnittelussa kovin suuria vapauksia, koska jo kahden vuoden aikana yleensä ehtii tapahtua kaikenlaista korroosioriskiä nostavaa. Toisaalta riskit korroosiovahinkoihin ovat suurimmat kuljetusten, asennuksen ja käytön ensimmäisten kuukausien aikana. Lyhyt elinkaari mahdollistaa laitteen suojatummista osissa halvempien

ratkaisujen käytön, koska hitaammin etenevät viat eivät suurella todennäköisyydellä ennätä vaikuttaa toimivuuteen, jolloin esim. ohuemmat suojapinnoitteetkin voivat olla aivan hyvä ratkaisu. Varsinainen riski piilee kuitenkin siinä, jos olosuhteet ovat lyhyenkin ajan hyvin korrodoivat (korkea kosteus, korrodoivia aineksia runsaasti), että tavallisissa olosuhteissa hyvin toimivat ohuet pinnoitteet saattavat pettää jo muutaman päivän aikana.



Kuva 4.2. Elinkaaren jaksottaminen tyypillisiin altistusaikaosuuksiin.

Tuotteet, joita käytetään kaikkialla maapallolla, ovat erityisen alttiita vaihteleville olosuhteille, jolloin olosuhteista johtuva riski korroosiolle ylittää lyhyenkin elinkaaren, esim. viiden vuoden pituisen, tarjoaman säästömahdollisuuden suojauksen tasossa.

Näistä olosuhteiden vaihteluista johtuen tuotteen elinkaaren pituuden vaikutusta arvioitaessa se on purettava osiin, joissa kussakin arvioidaan ko. tilan kesto aika ja vallitsevat olosuhteet sekä tyypilliset vikamekanismit.

### 4.3 Tuotteen herkkyys muutoksille

Tuotteen toiminnan herkkyys komponenttien, liitosten, johdinkuvioiden ja eristeiden ominaisuuksien muutoksille vaikuttaa hyvin paljon siihen, missä vaiheessa jokin ilmastollinen ja korroosiovaikutus näkyy laitteen toiminnassa. Tuotteen herkkyyden mittana muutoksille on järkevää käyttää sähköisissä ominaisuuksissa tapahtuvia perussuureiden muutoksia.

Nämä perussuureet ovat virrankulkuteilla (signaalit, tehonsyöttö) näkyvät impedanssit ja eristysvälien ominaisuudet, jotka lopulta vaikuttavat kaikkiin laitteen toiminnallisiin ominaisuuksiin.

- sarjaresistanssi virrankulkutiellä
- vuotovirta johdinten välillä
- eristeiden dielektrisyysvakio ( $\epsilon_r$ )
- kapasitanssi
- johdinten induktanssi.

Sähkösuunnittelussa olisi ideaalista, jos kaikille näille “häiritseville parametreille” voitaisiin sallia hyvin väljät toleranssit, jolloin kohtuulliset kosteudesta, lämpötilan vaihtelusta, mekaanisesta rasituksesta ja korrodoitumisesta aiheutuvat muutokset eivät vaikuttaisi näkyvästi laitteen toimintaan.

Lämpötilan, kosteuden ja korroosiomekanismien aiheuttamien sähköisten ominaisuuksien muutosten suuruusluokan tunteminen ja toisaalta analyttinen tieto sallituista häiritsevien parametrien arvoista mahdollistavat laitteen korroosioherkkyyden laadullisen ja määrällisen arvioinnin ja luokittelun. Käytännössä kaikille signaaliteille ja eristysväleille ei voida esittää samaa herkkyysluokitusta, mutta piirisuunnittelija voi analysoida yksityiskohdittain, miten suuria häiritseviä parametrimuutoksia voidaan sallia erityyppisissä kontakteissa ja johdotuksissa.

Esimerkiksi virrankulkutien sarjaresistanssin kannalta kriittisimmät kohdat ovat juotosliitokset, liitinkontaktit ja virran suuruuteen nähden alimitoitetut johtimet. Tavanomainen juotosliitoksen ja liittimien sarjaresistanssi on milliohmien tai milliohmin osien luokkaa. Juotosliitoksen resistanssi voi kasvaa liitoksen rappeutumisen ja korroosion myötä moninkertaiseksi samoin kuin liitinkontaktienkin.

Mekaanisesti hyvin pienissä avattavissa kontakteissa saattaa kontaktivoiman pienuus ja epästabiilisuus aiheuttaa suuria resistanssin muutoksia. Milloin tämä muutos on häiritsevä, riippuu ko. piiriratkaisusta. Suunnittelijan on kuitenkin itse pääteltävä, millaiset spesifikaatiot laaditaan kullekin virrankulkutielle.

Nykyään yleisissä kalvokytkimissä virrankulkutien resistanssit ovat sadan ohmin suuruusluokkaa ja tätäkin suurempia, minkä vuoksi muiden osien kuin itse kalvokytkimen resistanssin muutosten vaikutus on vähäinen. Sen sijaan johdinten välinen vuotovirta voi tulla merkitseväksi osaksi häiriöitä.

Piirilevyn johdinkuviossa ja liittimissä johdinten väliset vuotovirrat kuivassa ympäristössä ovat tyypillisesti nanoampeerien luokkaa alle 50 V jännitteillä.

Kosteuden vaikutuksesta ja etenkin kontaminaation ja korroosion esiintyessä vuotovirrat voivat nousta 3...7 dekadia suuremmiksi. Liitteessä 1 kohta 2.19 *Kosteuden ja geometrian vaikutus piirilevyn eristysresistanssiin* on kuvattu tarkemmin, mitkä seikat vaikuttavat vuotovirtoihin johdinkuviossa.

Kosteus ja lämpötila vaikuttavat eristysmateriaalien sähköiseen dielektrisyysvakioon, minkä vuoksi esim. suurtaajuisissa piireissä tämän muuttuminen aiheuttaa piirien hyvyysluvun ja resonanssitaajuuksien muutoksia. Vastaavia muutoksia voi tapahtua induktansseissa etenkin, kun korrosio muuttaa johdinten geometriaa ja oikosulkee osittain piirejä.

Sähkömagneettiseen suojaukseen käytettyjen laitteen sisäisten metallikoteloiden kontaktien korrodoituminen heikentää EMC-suojauksia ja voi näin häiritä piirien toimintaa. Suojauksen perussääntönä on käytetty vaatimusta suljetun kotelon saumojen sähköiseen kontaktiin vähintään aallonpituuden kymmenyksen välimatkoin. Kontaktikohtien resistanssin tulisi olla milliohmien luokkaa. Jos kontaktit korrodoituvat, kotelon sauma voi muuttua rakoantenniksi, joka välittää häiriöt sisältä ulos ja ulkoa sisälle. Koska vaadittava suojaustaso riippuu sovelluksessa tarvittavasta suojausvaimennuksesta, suunnittelija joutuu analysoimaan tarvittavat kontaktien hyvyydet, jonka jälkeen voidaan päätellä, minkä tasoinen korroosiosuojaus tarvitaan ja millaisin materiaalein se on toteutettavissa.

#### **4.4 Olosuhteiden korrosiivisuus**

Olosuhteiden korrosiivisuuden arvioinnissa on otettava huomioon laitteiden kuljetus-, varastointi- ja käyttöolosuhteiden korrosiivisuus. Näiden yhteisvaikutus ratkaisee sen, millaisia teknisiä ratkaisuja on käytettävä laitteen toimivuuden varmentamisessa. Oleellista on tiedostaa, että laitteen omalla konstruktiolla (kotelointi, lämpösuunnittelu) ja käyttöolosuhteisiin vaikuttamalla voidaan vaikuttaa huomattavasti siihen, kuinka korrosiiviset ko. olosuhteet lopulta ovat laitteen sisältämän elektroniikan kannalta.

Ilmaston korrosiivisuusluokittelua varten on eri tahoilla laadittu käyttökelpoisia menettelyjä, esim. kohdassa 5.2 *Käyttöolosuhteiden korrosiivisuus* kuvatut 4...5-portaiset korrosiivisuusluokitukset soveltuvat hyvin tähän tarkoitukseen. Olosuhteiden korrosiivisuusluokitus on tehtävä erikseen laitteen kullekin elinkaaren osalle, kuten kuvassa 4.2 on esitetty. Kun kunkin osan kesto-aika otetaan huomioon, saadaan olosuhteiden korrosiivisuudelle painotettu arvo, jota voi käyttää suunnittelun pohjana. Aiheellista on kuitenkin muistaa, että lyhytaikainen altistuminen

vaikeille olosuhteille voi vioittaa laitteita, tosin todennäköisyys tähän on yleensä melko pieni.

Jotta olosuhteiden vaikutuksen arviointi antaisi realistisemman kuvan laitteen kokemasta ympäristöstä, on olosuhteiden korrosiivisuus arvioitava erikseen laitteen ulkopuolella laitteen välittömässä läheisyydessä ja erikseen laitteen sisäosissa. Laitteen koteloinnin avoimuus vaikuttaa oleellisesti siihen kuinka ankarat laitteen sisäolosuhteet ovat ja millaiset vikamekanismit ovat merkittävimpiä.

## 4.5 Korroosioriskin suuruusluokka

Tuotteen korroosion aiheuttaman riskin fysikaalisten osatekijöiden, elinkaaren pituus, olosuhteiden korrosiivisuus, tuotteen herkkyys muutoksille, yhteisvaikutuksena voidaan saada mittaluku korroosioriskille. Tämä mittaluku on suoraan verrannollinen näihin osatekijöihin ja ne vaikuttavat samanaikaisesti, jonka vuoksi riski saadaan periaatteessa näiden osatekijöiden tulona. Ongelmana on luonnollisesti eri osatekijöiden vaikutusten yhteismitallisuuden fysikaalinen ja matemaattinen toteuttaminen. Koska esitetyt eri osatekijöiden vaikutusten luokittelut ovat luonteeltaan logaritmisia, saadaan kokonaisriski näiden luokitusten pisteytyksen summana, jos halutaan käyttää sille matemaattista ilmaisuja. Näin menetellen korroosioriski voidaan ilmaista summana

$$R_{cor} = L + C + S, \quad (4.1)$$

- $R_{cor}$  on korroosioriski  
L on elinkaaren pituus, pisteytys 1...4 (5), 5 pistettä  $\approx$  40 vuotta  
C on olosuhteiden korrosiivisuus, pisteytys 1...5, 5 pistettä erittäin korrosiivinen  
S on herkkyys muutoksille, pisteytys 1...3 (5), 5 pistettä erittäin herkkä

Tällä menettelyllä saadaan korroosioriskille esim. seuraavankaltainen kokonaisluokitus, jos käytetään kullekin osatekijälle pisteytystä 1...5.

Yhtälön (4.1) ja taulukon 4.1 antamaa korroosioriskiluokkaa on syytä tarkistaa seuraavalla lisäyksellä, jotta yhden tekijän aiheuttama poikkeuksellisen suuri korroosioriski tulisi otettua huomioon:

Jos jonkin osatekijän, elinkaaren pituus, olosuhteiden korrosiivisuus tai tuotteen herkkyys muutoksille, pisteytys on kaksi luokkaa korkeampi kuin summan osoit-

tama riskiluokka, korroosioriskiluokaksi otetaan summan osoittamaa luokkaa ylempi seuraava luokka.

*Taulukko 4.1. Korroosioriskin luokitus.*

Korroosioriskiluokka	Riskin pisteytys $R_{cor}$	Korroosioriskiluokan kuvaus
R1	3...4	Erittäin pieni korroosioriski
R2	5...7	Pieni korroosioriski
R3	8...10	Kohtalainen korroosioriski
R4	11...13	Suuri korroosioriski
R5	14...15	Erittäin suuri korroosioriski

Esim. tapauksessa, jossa elinkaaren pituuden pisteytys on 2, muutosherkkyyden pisteytys on 1 ja olosuhteiden korrosiivisuusluokka on 5, on summa kahdeksan pistettä. Tämän summan perusteella korroosioriskiluokka olisi R3, mutta koska olosuhteet ovat niin ankarat, riskiluokaksi tulee R4 annetun poikkeussäännön perusteella. Tässä esimerkissä korostuu olosuhteiden ankaruuden vaikutus korroosioriskiin, mihin periaatteessa ei voida vaikuttaa. Tähän voidaan kuitenkin käytännössä varautua konstruoimalla laitekotelo sopivasti, jolloin korroosioriski laitteen sisällä vähenee oleellisesti.

## 4.6 Suojaavat toimenpiteet

Suojaustoimenpiteistä on esitetty tietoja seuraavissa kappaleissa. Melkein jokaiselle näistä toimenpiteistä on olemassa laatu-/tasoluokittelu, joita voi sellaisenaan käyttää suojauksen tehokkuuden mittana. Yhdistämällä nämä erilaiset suojaustoimenpiteet voidaan käytettyjen suojaustekniikoiden kokonaisvaikutukselle saada kohtuullisen hyvä arvio samaan tapaan kuin edellä esitetylle korroosioriskin arvioinnille.

Korroosionsuojaustoimenpiteet kohdistetaan seuraaviin kohteisiin:

- johdinten pinnoitteet
- juotosliitosten laatu
- EMC-kontaktien laatu
- kotelon tiiviystaso
- kuljetuspakkaukset
- tuotantoprosessit
- logistiikkaketju
- kosketinten materiaalit, pinnoitteet ja mekaniikka
- johdinkuvion suojapinnoitteet (lakat ja massat)
- kotelon materiaalit ja pinnoitteet
- jäähdytysilman kierrätys, kosteus ja puhtaus.

Oleellista luonnollisesti on, että suojaavat toimenpiteet kohdistetaan estämään todellisia vikamekanismeja ja niihin kohteisiin, joiden merkitys tuotteen korroosionsiedolle on suurin. Tärkeää on myös tehdä nämä toimenpiteet riittävän laaja-alaisina, jotta niillä vaikutettaisiin niihin hyvin monenlaisiin vikamekanismeihin, jotka ovat korroosiolle tyypillisiä. Näin voidaan myös asteittain parantaa tuotteen korroosionsietoa ja laatua.

## 4.7 Vikojen luokittelu

Tuotteen vikojen luokittelulla muodostetaan kuva siitä, mikä merkitys erilaisilla vioilla on tuotteen toimivuuteen ja käytön turvallisuuteen ja mikä vaikutus niillä on tuotteen ylläpitokustannuksiin. Luokitteluun voidaan käyttää joko omia tuotteen toimintaan ja yrityksen tärkeiksi kokemuksiin arvostuksiin perustuvia luokituksia taikka standardeissa esitettyjä vikalokituksia. Esim. standardissa *IEC 60300-3-9 Dependability management. Part 3: Application guide- Section 9: Risk analysis of technological systems (1995-12)* on esitetty esimerkkinä riskitason arviointimenettely, jossa on otettu huomioon vian esiintymistäajuus sekä vian vakavuus. Tässä on esitetty em. esimerkin kaltainen menettely, jossa luokkien nimitykset ja määrät poikkeavat mallista nojautuen ehdotukseen [IEC 56(Secretariat)353] ja annetaan ohje tarvittavan analyysin ja edelleen korjaavan toimenpiteen tasosta. Taulukossa 4.2 vian laadun ja esiintymistäajuuden edellyttämät toimenpiteet on merkitty vian merkitsemää riskitasoa kuvaavin kirjaimin T, L, I ja H, joiden edellyttämät analyysitoimenpiteet kuvataan seuraavasti:

- T (F1) Merkityksetön riski, ei vaadi toimenpiteitä
- L (F2) Alhainen riski, laadullinen analyysi
- I (F3) Kohtalainen riski, puolikvantitatiivinen analyysi
- H (F4) Suuri riski, yksityiskohtainen määrällinen analyysi.

*Taulukko 4.2. Riskitason arviointi, vikojen vakavuuden ja esiintymistäajuuden vaikutus korjaavan toimenpiteen laatuun (T, L, I, H).*

Vian esiintyminen	Vian vakavuustaso			
	Katastrofi	Vakava	Lievä	Merkityksetön
Usein toistuva	H	H	H	L
Todennäköinen	H	H	I	L
Satunnainen	H	I	I	T
Harvinainen	H	I	L	T
Epätodennäköinen	I	L	L	T

Analyysin perusteella arvioidaan ja tehdään varsinaiset korjaavat toimenpiteet tuotteeseen ja tuotantoon. Taulukoissa 4.3 ja 4.4 on kuvattu vikojen vakavuuden ja esiintymistäajuuden määrittelyt.

*Taulukko 4.3. Vikojen vakavuuden luokittelu.*

<b>Kuvaus</b>	<b>Tekninen määrittely</b>	<b>Terveysriski</b>
Katastrofi	Kokonaisvika tai järjestelmän menetys	Kuolema
Vakava	Vakava vahinko tai järjestelmävika	Vakava vamma tai sairastuminen
Lievä	Lievä laitevika (ominaisuuden muutos)	Lievä vamma tai sairastuminen
Merkityksetön	Vika, josta ei ole haittaa	Vähäinen vamma tai sairaus

*Taulukko 4.4. Vikojen esiintymistodennäköisyyden luokittelu.*

<b>Vian esiintyminen <sup>1)</sup></b>	<b>Esiintyminen yksittäisen tuotteen elinkaaren aikana</b>	<b>Tilastollinen esiintyminen vikatiedoissa <sup>2)</sup></b>
Usein toistuva	Esiintyy toistuvasti	Esiintyy jatkuvasti
Todennäköinen	Esiintyy useita kertoja	Esiintyy toistuvasti
Satunnainen	Todennäköisesti joskus	Esiintyy usein
Harvinainen	Epätodennäköinen mutta mahdollinen	Epätodennäköinen mutta esiintyy kuitenkin
Epätodennäköinen	Niin epätodennäköinen ettei oletettavasti tapahdu	Epätodennäköinen mutta mahdollinen

1) Määrittelyt ja kuvausten termit voidaan sopeuttaa havaintomääriin

2) Havaintoaineiston suuruus on määriteltävä



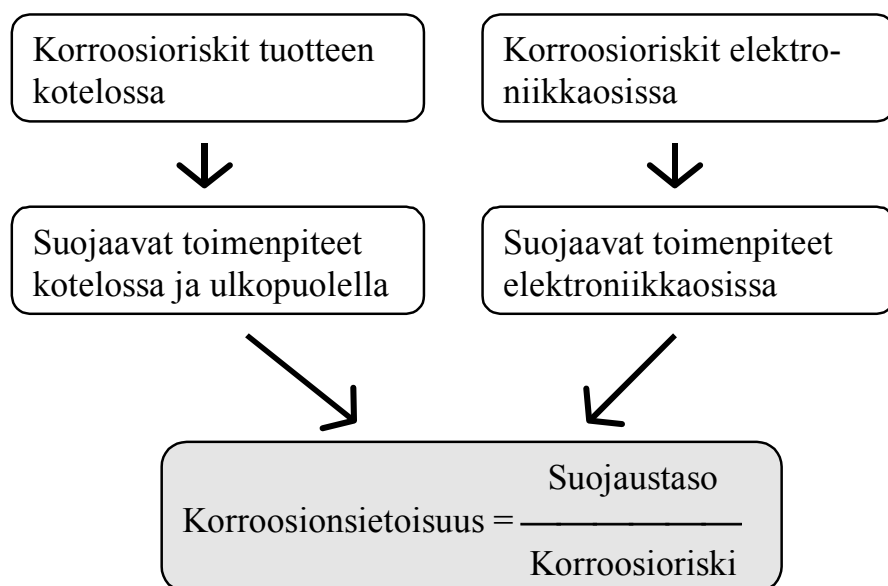
## 4.8 Korroosionsietoisuuden kokonaistaso

Korroosionsietoisuus voidaan edellä esitetyn perusteella määritellä:

“Korroosionsietoisuus on korroosiosuojauksen tehokkuuden suhde korroosioriskiin.”

Koska korroosiosuojauksen tehokkuutta ei voida määritellä kovin eksaktisti, on tässä turvauduttava kokemuseräisiin tietoihin suojaamistekniikoiden tehokkuudesta ja niissä käytetyistä luokituksista. Esimerkiksi maalauksen käytöstä ja kosketinten metallipinnoitteista on olemassa hyviä suosituksia, joissa on valmiit luokitukset (Katso esim. kohta 6.10 ISO 12944). Käytännössä näitä tietoja käyttäen voidaan saada melko hyvät arviot erilaisten suojausten tehokkuudesta sekä korroosioriskeistä.

Korroosionsietoisuutta analysoidessa ja kehitettäessä saadaan realistisempi kuva kokonaisuudesta, jos pidetään mielessä sekä riskien arvioinnissa että suojaamistoimenpiteiden toteutuksessa laitteen ulkopuolisen ja sisäisen korroosionhallinnan erilaisuus (kuva 4.3). Olosuhteet ovat erilaiset laitteen ulkopuolella ja sisällä; samoin esiintyvät vikamekanismit. Molemmat on analysoitava erikseen ottaen huomioon koko elinkaaren kattavat korroosioriskit.

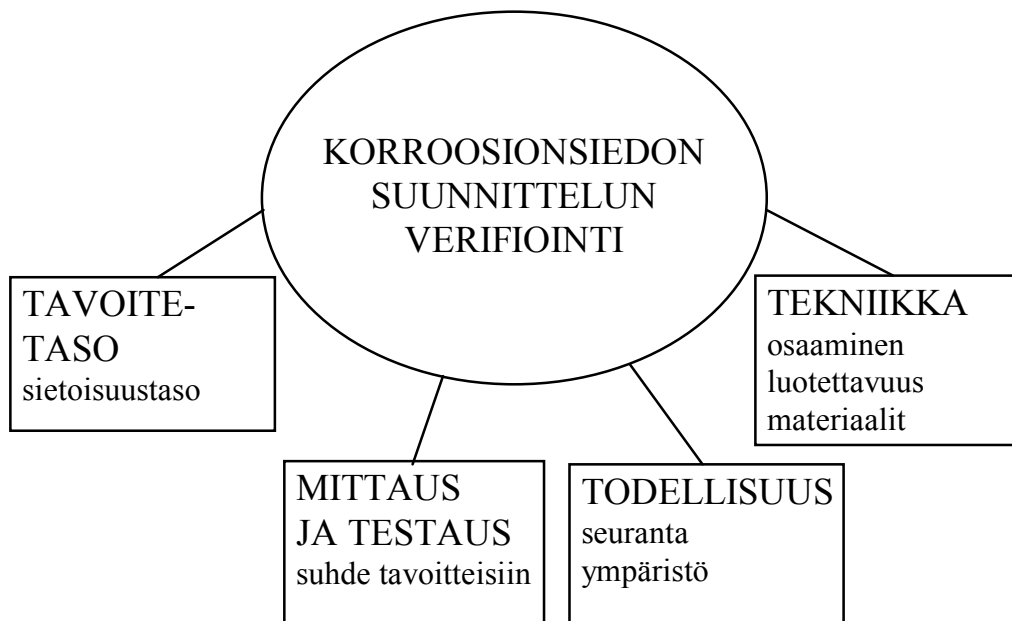


Kuva 4.3. Korroosionsietoisuuden kokonaistason määrittely.

## 5. Korroosion hallintamethodiikka

### 5.1 Korroosionsiedon verifiointi ja liittäminen tuotekehitykseen

Elektroniikkalaitteen korroosionsiedon suunnittelu on yksi tärkeä tuotesuunnittelun osa-alue, jonka avulla vaikutetaan ratkaisevasti laitteen luotettavuuteen ja käyttöominaisuuksiin. Korroosionsiedon suunnitteluun liittyy läheisesti laitteen mekaniikan ja lämpöteknisten ominaisuuksien suunnittelu sekä mittaukset ja testaus, joiden avulla todetaan saavutetut suunnittelutulokset. Varsinaisen korroosionsiedon suunnittelun verifiointilla [vrt. Hienonen et al. 1997] tarkoitetaan niitä menettelyjä (kuva 5.1 ja liite 3 *Katselmointimenettely*), joiden avulla varmistetaan, että korroosionsiedon suunnittelun tulokset vastaavat asetettuja tavoitteita ja suunnitelman mukainen fyysinen laite toimii asetettujen tavoitteiden mukaisesti niissä käyttöolosuhteissa, joihin laite joutuu elinjaksensa aikana.

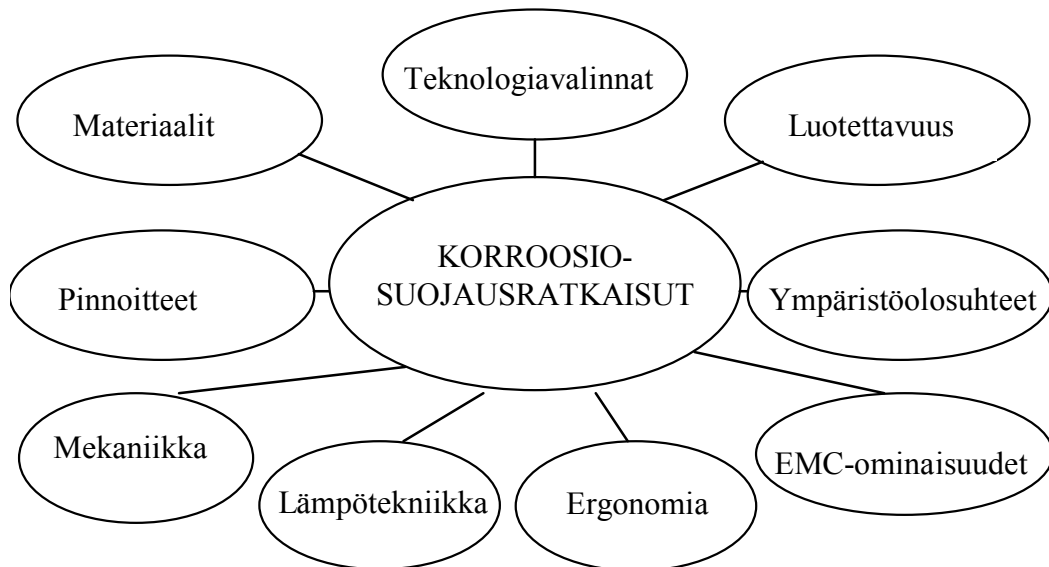


Kuva 5.1. Korroosionsiedon suunnittelun verifiointikohteet.

Verifiointin tarkoituksena on varmistaa:

- tavoitetason oikeellisuus suhteessa muihin ominaisuuksiin
- tuotesuunnittelun tarkoituksenmukaisuus ja tulosten oikeellisuus
- laitteen yhdenmukaisuus suunnittelutavoitteiden kanssa
- oikean mittaus- ja testaustekniikan käyttö
- mahdollisten luotettavuusriskien olemassaolon havaitseminen
- tuotesuunnittelun eri osa-alueiden tavoitteiden yhtensovittaminen
- suunnittelun tavoiteasettelu korjaavia toimenpiteitä varten.

Kuvaan 5.2 on merkitty niitä osa-alueita, joihin korroosionsiedon suunnittelulla on merkittävä vaikutus, sama pätee myös kääntäen ts. tavoiteltaessa tiettyä korroosionsietotasoa, on tuloksen varmistamiseksi tiedostettava, mikä merkitys eri osa-alueilla on myös korroosionsietoon.



*Kuva 5.2. Korroosiosuojaukseen vaikuttavat osatekijät.*

Verifiointi toteutetaan tuotekehityksen eri vaiheissa (kuva 5.3) asteittain etenevänä useampivaiheisena prosessina suunnittelun etenemisen myötä, jotta suunnittelua voidaan tarvittaessa muuttaa ja suunnata uudelleen. Liitteessä 3 on esitetty tarkempi katselmointimenettely, joka on suunniteltu nimenomaan elektroniikkayrityksen korroosionhallinnan apuvälineeksi. Jotta verifioinnista saataisiin täysi hyöty, tulee se ja korroosionsiedon suunnittelu sisällyttää tuotekehitysprosessiin alusta alkaen, ts. korroosioasiantuntijan tulee osallistua tuotteen määrittelyyn ja kehitystyöhön alusta alkaen.

Syynä tähän on se, että tietyt korroosionsietoisuustavoitteet saattavat muuttaa radikaalisti totuttuja tuoterakenteita ja myös laitteen jäähdytstekniikkaa sekä valmistuksessa ja alihankinnoissa sovellettavaa logistiikkaa ja kuljetuspakkauksia.

Verifiointin tulee olla luonteeltaan aktiivista suunnittelun tasoa parantavaa eikä pelkästään passiivista valmiiden ratkaisujen tarkastamista. Kun tuotteen ideointivaiheessa ja suunnittelun edetessä asetetaan kysymyksiä siitä, mitä kaikkea korroosionsiedon parantamiseksi voidaan tehdä ja mitä ei kannata tehdä, saavutetaan selvästi parempi kokonaistulos kuin vain passiivisella annettujen vaatimusten toteuttamisella.



*Kuva 5.3. Korroosionsiedon suunnittelun liittäminen tuotekehitykseen.*

Näin ollen verifiointissa tarkastellaan korroosionsiedon suunnittelun tavoiteasettelua, suunnittelua itseänsä ja sen tuloksia eri näkökulmista:

- korroosionsietovaatimukset tuotteelle
- suojaustekniikan kattava hyväksikäyttö, onko hyödynnetty erilaisia mahdollisuuksia parantaa tuotetta
- suunnittelun oikeellisuus, perusvirheiden tunnistaminen
- mittaus- ja testaustulokset
- kenttäpalautteen hyödyntäminen
- onko vielä jotain muuta parannettavaa teknisesti tai/ja taloudellisesti.

Verifiointin onnistumisen edellytyksenä on se, että verifioija perehtyy käsillä olevaan tapaukseen selvittämällä itselleen, mikä on ollut suunnittelun yleinen tavoite, millainen kyseinen tuote on, mikä on tuotekehityksen kokemusperäinen tausta, jne. Kun verifiointitehtävästä on muodostettu tarkoituksenmukainen kuva,

voidaan lähteä suunnittelemaan itse verifiointiprosessia, joka soveltuu kyseisen projektin sisältöön.

Verifiointin sisällön ja menettelytapojen määrittelyä varten on alle koottu luettelo niistä asioista, jotka olisi otettava mukaan korroosionhallinnan verifiointiin [Hienonen et al. 1997].

## Verifiointiprosessin yleinen sisältö

- 1 Verifiointikohteen määrittely
- 2 Katselmointiajankohdat
- 3 Organisaatio (osallistuvat henkilöt)
- 4 Raportointimenettely
- 5 Korroosionsiedon suunnittelu
- 6 Analyysimenetelmät ja mittaukset
- 7 Testaus
- 8 Kenttätietojen hyväksikäyttö
- 9 Suunnittelu- ja testaustulosten arviointi
- 10 Verifiointin suhde suunnittelun tavoitteisiin

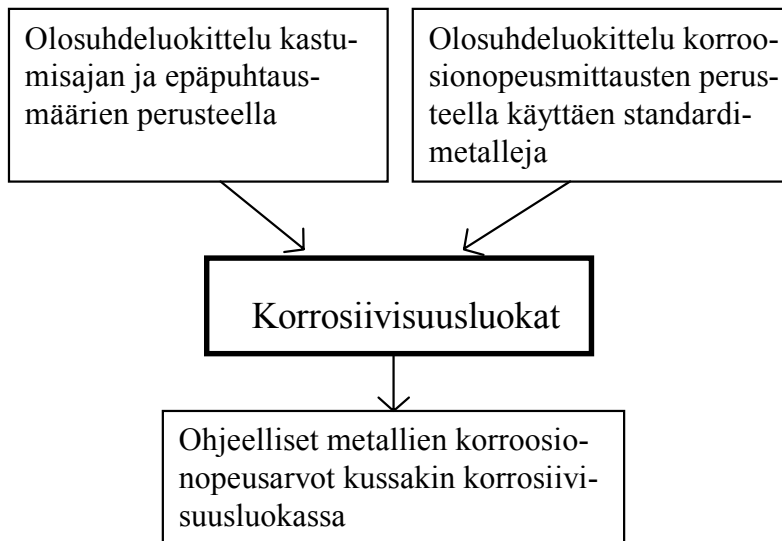
Verifiointikatselmuksiin kannattaa ottaa mukaan korroosioasiantuntijoiden lisäksi sähkö-, mekaniikka-, lämpö- ja EMC- sekä logistiikkasuunnittelijoita sekä muiden tuotekehityksen ja tuotannon osa-alueiden edustajia siten, että katetaan riittävästi ko. tuotekokonaisuuden hallintaan tarvittavat osaamisalueet. Koska huomattava osa korroosionsietoon vaikuttavasta työstä, kuten piirilevyvalmistus, metalliosat, osakokoonpanot, jne. teetetään yhä enemmän alihankkijoilla, on erityisen tärkeää tarkistaa ne spesifikaatiot, joilla ostot tehdään. Ongelmana tässä on, että vain lopputuotteen valmistajalla on se tietämys, mitä tarvitaan korroosionhallinnan kokonaisuuden hallinnassa, alihankkijat soveltavat omia hyviksi todettuja menettelyjään, jotka eivät aina ole riittävän hyviä lopputuotteen kannalta.

## 5.2 Käyttöolosuhteiden korrosiivisuus

Tuotteiden käyttöolosuhteiden korrosiivisuuden arvioimiseksi on eri tahoilla kehitetty luokitteluja, joiden avulla laitesuunnittelija voi päätellä toisaalta laitteensa aiottua käyttötapaa vastaavien olosuhteiden rasittavuuden ja toisaalta kuinka hyvää korroosionsuojausta laitteen sisä- ja ulko-osissa kannattaa käyttää.

Kuvassa 5.4 on kuvattu ne kaksi periaatetta, joiden avulla suunnittelija voi määrittellä tietyn käyttöolosuhteen ilmastollisen korrosiivisuuden. Toinen tapa on tutkia kyseiset kosteus- ja epäpuhtausolosuhteet laitteen käyttöympäristössä ja sitten

päätellä korrosiivisuusluokka. Toinen tapa on mitata standardimetallien avulla käyttöolosuhteissa korroosionopeudet ja tulosten avulla päätellä olosuhteiden korrosiivisuusluokka. Määrittelyä varten on eri tahoilla laadittu sekä olosuhdeluokituksia että korroosionopeuksien mittausten menetelmiä.

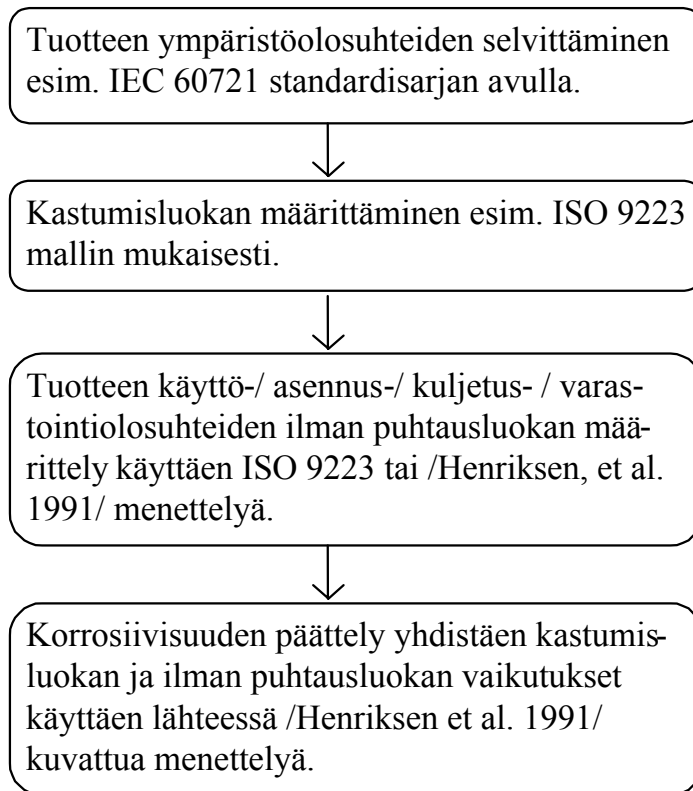


*Kuva 5.4. Korrosiivisuusluokittelun määrittely ISO 9223:n mukaan.*

## **Ympäristöolosuhdeluokituksen tekeminen**

Korrosiivisuusarviota tehdessä kannattaa menetellä esim. alla (kuva 5.5) esitettävällä tavalla, jossa edetään vaiheittain aloittaen tuotteen ympäristöolosuhteiden selvittämisestä ja päätyen olosuhteiden korrosiivisuuteen.

Koska suora mittaaminen on yleensä aikaa vievää, kannattaa olosuhteiden korrosiivisuutta arvioitaessa aluksi määritellä laitteen todennäköinen ympäristöolosuhdeluokitus ts. ne vallitsevat ympäristöolosuhteet ja niiden tasot, joihin laite todennäköisesti joutuu elinkaarensa aikana. Tähän voi käyttää esim. IEC:n julkaisemaa standardisarjaa IEC 60721 **Classification of environmental conditions**, jossa on toisaalta esitelty maapallon eri osissa vallitsevat todelliset olosuhteet ja toisaalta on laadittu valmiit rasisuusluokat kullekin ympäristöparametrille (lämpötila, kosteus, tuuli, värinä, ilman epäpuhtaudet, jne.) ja tyypillisille sijoituspaikkasovelluksille. Kun tämä luokitus tehdään ottaen huomioon laitteen kuljetus-, asennus- ja käyttöolosuhteet eri käyttöpaikoissa, saadaan hyvä kuva lähes kaikista oleellisista ympäristöolosuhteista, joita laite joutuu sietämään elinkaarensa aikana (katso kohta *Ympäristöolosuhdestandardit*).



*Kuva 5.5. Menettely korroosiivisuuden määrittämiseksi.*

IEC 60721-1 Classification of environmental conditions – Part 1: **Environmental parameters and their severities** listaa standardilukuarvot kaikille ympäristöä kuvaaville suureille kuten lämpötila, kosteus, mekaaninen värinä ja erilaisille ilman laatua kuvaaville tunnusluvuille.

IEC 60721-2 Classification of environmental conditions. Part 2: **Environmental conditions appearing in nature** kuvaa kaikkialla maapallolla luonnossa vallitsevat ympäristöolosuhderyhmät ja niiden rasitusasteiden arvot, jotka kattavat kuljetus- ja varastointi- ja käyttöolosuhteet.

IEC 60721-3 Classification of environmental conditions. Part 3: **Classification of groups of environmental parameters and their severities**. Tässä esitetään ympäristöolosuhderyhmät laitteen sijoituspaikkatyypeittäin kuljetuksen, varastoinnin ja käytön aikana. Standardi kattaa maapallon eri ilmastoalueilla seuraavassa luetellut sovellusalat:

- Varastointi
- Kuljetus
- Kiinteä asennus säältä suojatuissa tiloissa
- Kiinteä asennus säälle alttiissa tiloissa

- Maa-ajoneuvokäyttö
- Laivaympäristö
- Kannettava ja siirrettävä käyttö
- Mikroilmasto (laitteen sisätilat).

Olosuhteiden määrittelyssä on käytettävä myös omia kentältä sekä muista lähteistä saatuja tietoja, jotta osattaisiin varautua myös suhteellisen harvinaisiin luokittelumattomiin olosuhteisiin, kuten ihmisten ja eläinten toiminnasta johtuviin kemiallisiin ja fyysisiin rasituksiin.

Oleellista on tiedostaa, että laitteen ulkopuolella ja sisällä vallitsee yleensä hyvin erilaiset olosuhteet, jos käytetään suhteellisen suojattuja koteloja. Näin ollen sisäosien mikroilmaston määrittely on yhtä tärkeää kuin laitteen ulkoisten olosuhteiden määrittely. Seuraavassa standardissa on annettu laitteiden sisäosien ilmastoluokittelu, joka tosin rajoittuu vain lämpötilaan ja kosteuteen.

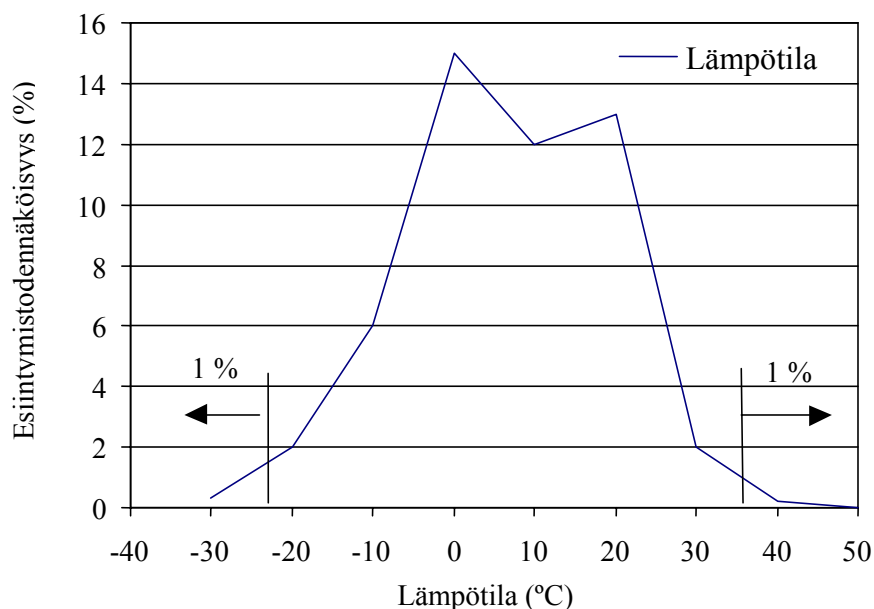
IEC 60721-3-9 Classification of environmental conditions – Section 9: **Microclimates inside products.**

Jos halutaan mitata suoraan korroosionopeuksia, voidaan käyttää valmiiksi kehitettyjä korroosionopeusluokituksia vertailukohtana omille mittauksille, jolloin saadaan myös selville, mihin korrosiivisuusluokkaan oman tuotteen olosuhteet kuuluvat. Vertailukohtana käytetään esim. teräksen, kuparin, hopean, sinkin ja alumiinin korrodoitumisnopeuksia erilaisissa ympäristöolosuhteissa [ISO 9224, ANSI/ISA, Henriksen et al. 1991].

Edellä mainitut IEC:n ympäristöluokkien rajat on yleensä valittu siten, että ko. raja-arvot ylittävät olosuhteet esiintyvät luonnossa enintään 1 % todennäköisyydellä [SFS-Käsikirja 108, Ympäristöluokitus ja -testaus]. Olosuhteiden jakautumat vaihtelevat todellisuudessa rasitelajeittain (lämpötila, kosteus, epäpuhtauspiitoisuudet, värinä) ja maantieteellisin alueittain, mutta periaatteessa ne ovat kuvan 5.6 kaltaisia.

Kuvan 5.6 esiintymistodennäköisyys voi tarkoittaa todennäköisyyttä ajan taikka maantieteellisen paikan suhteen. Ympäristöluokkien raja-arvot saavutetaan melko harvoin, mutta ne voidaan myös ylittää lyhytaikaisesti tai paikallisesti. Kun arvioidaan jonkin ympäristötekijän vaikutusta korroosion todennäköiseen määrään, on nämä olosuhteiden rasitusten esiintymistodennäköisyydet otettava huomioon.





Kuva 5.6. Ilman lämpötilan jakautuma (esimerkki).

### ISO 9223:n mukainen kastumisaikaluokittelu

Standardissa ISO 9223 Corrosion of metals and alloys – Classification of corrosivity of atmospheres annetaan metallien korroosioriskin arviointia varten seuraavan taulukon kaltainen kastumisaajan luokittelu. ISO:n luokittelussa kastumisaikaan luetetaan ne ajat, jolloin ilman suhteellinen kosteus on  $> 80\%$  ja lämpötila  $> 0\text{ °C}$ .

Periaatteessa kastumisajalla tarkoitetaan aikaa, jonka metallipinta on ilmastollista korroosiota aiheuttavan elektrolyytin ts. veden ja siihen liuenneiden ainesten peittämä. Tämä on melko yleistävä määrittely, koska pintojen kastumiseen vaikuttavat suhteellisen kosteuden lisäksi kondensoituminen, sade, metallin laatu, lämmönjohtavuus, pinnan muoto, kappaleen massa, korroosiotuotteiden määrä ja pinnalle kertyneiden epäpuhtauksien laatu.

Kastumisaikaluokassa  $\tau_1$  ei tapahdu juuri ollenkaan kondensoitumista. Myös luokassa  $\tau_2$  nestekalvon muodostumistodennäköisyys metallipinnoille on pieni. Luokissa  $\tau_3 \dots \tau_6$  voi tapahtua kondensoitumista ja/tai sataa.

Kastumisluokka ottaa huomioon sekä luonnon olosuhteet, sijaintipaikan olosuhteet että käyttäjän toimenpiteet. Luokittelijan on itse pääteltävä laatimansa tuotekohtaisen olosuhdeluokituksen ja laitteen käytön perusteella, mihin ISO:n kastumisluokkaan tuote kuuluu.

Taulukko 5.1. Kastumisajan (TOW) luokittelu [Henriksen et al. 1991] mukaillen ISO 9223:a.

Luokka	Kastumisaika TOW Time of wetness <sup>1)</sup>		Olosuhteen esiintyminen
	h/vuosi	%/käyttö- aika <sup>3)</sup>	
$\tau_1$	< 10	< 0,1	Ilmastoitu sisäilma, säädetty kosteus ja lämpötila
$\tau_2$	10...250	0,1...3	Sisäilmasto normaaleissa asuin tai työympäristössä
$\tau_3$ <sup>2)</sup>	250...1 000	3...10	Sisäilmasto varastoissa.
$\tau_4$ <sup>2)</sup>	1 000...2 500	10...30	Sisäilmasto eräissä tuotantotiloissa. Ulkoilma kylmällä vyöhykkeellä, kuivalla ilmastovyöhykkeellä ja osissa lauhkeaa vyöhykettä.
$\tau_5$	2 500...5 500	30...60	Ulkoilma muualla paitsi kylmässä ja kuivassa ilmastovyöhykkeessä. Sisäilmasto eläinsuojissa (navetta, sikala) ja varastoissa.
$\tau_6$	> 5 500	> 60	Ulkoilmasto troppiikissa. Sisäilmasto kasvihuoneissa ja ilmastoimattomissa varastoissa.

- 1) TOW määritellään aikana, jona ilman lämpötila on > 0 °C ja suhteellinen kosteus > 80 %.
- 2) ISO 9223:ssa  $\tau_3$  ja  $\tau_4$  on luettu samaan luokkaan, tässä on käytetty lähteen [Henriksen et al. 1991] luokittelua!
- 3) Prosentuaalinen osuus tarkoittaa kastumisaikaa ilmoitettuna prosentteina koko altistusajasta ko. ilmastossa.

Arvioitaessa kosteusolosuhteiden vaikuttavuutta elektroniikan korroosioon, täytyy muistaa, että korroosiota tapahtuu jo paljon alle 80 % suhteellisella kosteudella ts. alle 50 % RH. Myös lämpötilan nopea muutos aiheuttaa suhteellisen kosteuden nousua ja paikallista kondensoitumista, joten pelkkä taulukon 5.1 mukainen kastumisaikaluokittelu ei täysin riitä arvioitaessa korroosioriskejä [Henriksen et al. 1991]. Luokittelu on melko karkea, mutta ilmaston ja korroosioon vaikuttavien ilmiöiden moninaisen ja satunnaisen käyttäytymisen vuoksi paljonkaan tarkempaan luokitteluun ei ole mahdollista päästä.

## Ilman epäpuhtaustason luokittelu

Standardissa ISO 9223:ssa ja lähteessä [Henriksen et al. 1991, kohdat 4.3–4.5] on esitetty ilman epäpuhtauksien luokittelut. Siinä on myös kuvattu eri yhdisteiden lähteitä ja vaikutukset erilaisiin materiaaleihin. ISO määrittelee luokittelut vain rikkidioksidille (SO<sub>2</sub>) ja ilman suolapitoisuudelle. Nämä on esitelty taulukossa 5.2. Suolapitoisuus ilmaistaan siinä kloridilaskeumanopeuden avulla (Cl<sup>-</sup>).

*Taulukko 5.2. Ilman epäpuhtauspitoisuuksien luokittelu ISO 9223:ssa.*

SO <sub>2</sub> -luokka	SO <sub>2</sub> -laskeumanopeus (mg/(m <sup>2</sup> d))	SO <sub>2</sub> -pitoisuus ilmassa (µg/m <sup>3</sup> )	Suolapitoisuusluokka	Kloridilaskeumanopeus Cl <sup>-</sup> (mg/(m <sup>2</sup> d))
P <sub>0</sub>	≤ 10	≤ 12	S0	≤ 3
P <sub>1</sub>	10...35	12...40	S1	3...60
P <sub>2</sub>	35...80	40...90	S2	60...300
P <sub>3</sub>	80...200	90...250	S3	300...1 500

Arvot on laskettu vähintään vuoden kestäneen mittauksen keskiarvoista.

Klorideille on esitetty vain laskeuma-arvo, koska suola esiintyy ilmassa lähinnä NaCl-partikkeleina eikä kaasumaisena kloridina Cl<sup>-</sup>.

ISO 9223:n kaltainen korrosiivisuusluokittelu on esitetty myös standardissa IEC 60654-4 Operating conditions for industrial-process measurement and control equipment. Part 4: **Corrosive and erosive influences**.

Taulukossa 5.3 esitetty IEC 60654-4:n teollisuusprosessi- ja mittauslaitteiden ilmanlaatuluokittelu on seuraava:

- Luokka C1: Teollisuuden puhdas ilma
- Luokka C2: Kohtalainen epäpuhtauspitoisuus
- Luokka C3: Korkea epäpuhtauspitoisuus
- Luokka C4: Erittäin korkea epäpuhtauspitoisuus.

Ilmassa olevan merisuolan IEC 60654-4 luokittelee:

- Luokka C1: Paikat, joiden etäisyys merestä on yli 0,5 km
- Luokka C2: Merenrannikko alle 0,5 km rannasta
- Luokka C3: Meriasennukset.

Taulukko 5.3. Ilman kemiallisesti aktiivisten epäpuhtauspitoisuuksien luokittelu IEC 60654-4:ssa, arvot ovat keskimääräisiä ( $\text{mm}^3/\text{m}^3$ )<sup>1)</sup>.

Kemiallisesti aktiiviset ilman epäpuhtaudet	C1	C2	C3	C4
	Puhdas teollisuus-ilma	Kohtalainen pitoisuus	Korkea pitoisuus	(Hyvin korkea pitoisuus)
SO <sub>2</sub>	< 10	< 100	< 5 000	≥ 5 000
NO <sub>x</sub>	< 50	< 500	< 5 000	≥ 5 000
H <sub>2</sub> S	< 3	< 50	< 10 000	≥ 10 000
Kostea kloori Cl <sub>2</sub> RH > 50 %	< 0,5	< 5	< 50	≥ 50
Kuiva kloori Cl <sub>2</sub> RH < 50 %	< 2	< 20	< 200	≥ 200
Ammoniakki NH <sub>3</sub>	< 1 000	< 10 000	< 50 000	≥ 50 000
Fluorivety HF	< 1	< 10	< 100	≥ 100
Otoni O <sub>3</sub> tai muu hapetin	< 2	< 25	< 100	≥ 100
Liuottimet <sup>2)</sup> Triklloorietyyleeni	..	< 5 000	< 20 000	≥ 20 000

Öljy ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	< 5	< 50	< 500	≥ 500
----------------------------------	-----	------	-------	-------

- 1) Tässä on käytetty yksikkönä  $\text{mm}^3/\text{m}^3$ , katso taulukon 5.4 alta vastaavuudet  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow \text{mm}^3/\text{m}^3$   
 2) Liuottimet voivat sataa ympäristöön ja muodostaa pinnoille lätköitä, jotka voivat muuttua korrosiivisiksi.

Pohjoismaisessa korroosiotutkimuksessa [Henriksen et al. 1991] laadittiin taulukon 5.4 mukainen ilman epäpuhtauspitoisuuksien luokittelu. Tämä vastaa melko hyvin ANSI/ISA ja Battelle Institute'n, Columbus, Ohio, käyttämää luokittelua. Käytettäessä tätä luokittelua korrosiivisuuden arviointiin, katsotaan jonkin paikan/tilan kuuluvan esim. puhtausluokkaan P3, jos yksikin epäpuhtauspitoisuus sijoittuu tähän luokkaan. Varsinainen korrosiivisuusarviointi on tehtävä tarkastelemalla samanaikaisesti kastumisaikaa (TOW) ja ilman epäpuhtauspitoisuuksia.

Taulukko 5.4. Ilman epäpuhtauspitoisuuksien luokittelu lähteessä [Henriksen et al. 1991], pitoisuusarvot ovat viikkokeskiarvoja ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Ilman epäpuhtaudet	P1 vähäinen	P2 alhainen	P3 kohtalainen	P4 korkea	P5 erittäin korkea
SO <sub>2</sub>	< 10	10...30	30...100	100...300	> 300
NO <sub>2</sub>	< 25	25...150	150...500	500...1 000	> 1 000
H <sub>2</sub> S	< 3	3...10 <sup>1)</sup> 3...20 <sup>2)</sup>	10...50 <sup>1)</sup> 20...100 <sup>2)</sup>	50...100 <sup>1)</sup> 100...200 <sup>2)</sup>	> 100 <sup>1)</sup> > 200 <sup>2)</sup>
Kloori Cl <sub>2</sub>	< 1	1...2	2...5	5...10	> 10
NH <sub>3</sub> + NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	< 10	10...250	250...1 000	1 000...10 000	> 10 000
Kloridi Cl <sup>-</sup>	< 1	1...5	5...10	10...50	> 50
Hiukkaset	< 2	2...20	20...75	75...150	> 150

1) Hopean rajat

2) Muiden metallien kuin hopean rajat

Kaasupitoisuusvastaavuudet paino- ja tilavuusmittojen kesken ovat:

SO<sub>2</sub> 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,38 \text{ mm}^3/\text{m}^3$       NO<sub>2</sub> 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,53 \text{ mm}^3/\text{m}^3$

H<sub>2</sub>S 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,71 \text{ mm}^3/\text{m}^3$       Cl<sub>2</sub> 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,34 \text{ mm}^3/\text{m}^3$

NH<sub>3</sub> 1  $\mu\text{g}/\text{m}^3 = 1,43 \text{ mm}^3/\text{m}^3$

## Korroosionopeuksien luokittelu

Standardissa ISO 9223 annetaan ilmastollisen korroosion ohjeelliset korroosionopeusluokat muutamalle metallille: hiiliteräs, sinkki, kupari ja alumiini. Korroosionopeudet ilmaistaan siinä mikrometreinä vuotta kohden. Tämän standardin korroosionopeudet ( $\mu\text{m}/\text{vuosi}$ ) ovat hieman suuremmat kuin standardissa ISO 9224, koska edellisessä arvot ovat ensimmäisen altistusvuoden nopeuksia ja jälkimmäisessä kymmenen vuoden keskiarvoja.

Taulukossa 5.5 on esitetty tämä ISO 9223 korroosionopeusluokittelu, jossa annetaan keskimääräiset korroosionopeudet ensimmäisen altistusvuoden aikana eri metalleilla. Nopeusluokat ovat itse asiassa korrosiivisuusluokkia, jotka kuvastavat korroosion yleistä määrää. Yleensä ilmastollinen korroosio on alkuvaiheessa nopeampaa ja tasoittuu kymmenen vuoden seutuvilla lähes vakionopeudeksi.

Korroosiivisuusluokkia kuvaavat nimitykset ISO 9223:ssa ovat:

- C 1 Hyvin vähäinen korroosiivisuus
- C 2 Vähäinen korroosiivisuus
- C 3 Kohtalainen korroosiivisuus
- C 4 Korkea korroosiivisuus
- C 5 Hyvin korkea korroosiivisuus.

*Taulukko 5.5. Ohjeelliset yleisen korroosion nopeudet muutamilla metalleilla standardin ISO 9223 tarkoittamissa korroosiivisuusluokissa.*

Metalli	Korroosionopeuden $r_{\text{corr}}$ keskiarvo ( $\mu\text{m/a}$ ) altistuksen ensimmäisen vuoden aikana korroosiivisuusluokissa C1...C5 (alumiinilla kymmenen vuoden keskiarvo)				
	C1	C2	C3	C4	C5
Hiiliteräs	$\leq 1,3$	1,3...25	25...50	50...80	80...200
Sinkki	$\leq 0,1$	0,1...0,7	0,7...2,1	2,1...4,2	4,2...8,4
Kupari <sup>1)</sup>	$\leq 0,1$	0,1...0,6	0,6...1,3	1,3...2,8	2,8...5,6
Alumiini > 99,5 % <sup>2)</sup>	$\approx 0,01$	$\leq 0,025$	0,025...0,2	3)	3)

- 1) Arvot pätevät myös kupariseoksille, joissa Cu-pitoisuus on  $\geq 60$  %.
- 2) Alumiinin arvot ovat kymmenen vuoden keskiarvoja ISO 9224:n mukaan
- 3) Korroosiivisuusluokissa C4 ja C5 voi tapahtua huomattavaa korroosionopeuden lisääntymistä ja paikallinen korroosio tulee ratkaisevaksi alumiinilla.

Taulukossa 5.6 on IEC 60654-4:n mukainen korroosiivisuusluokitus ja taulukossa 5.7 on standardin Instrument Society of America (ISA) ANSI/ISA-S71.04-1985 Environmental conditions for Process and Measurement and Control Systems: **Airborne Contaminants** annettu kuparin korroosionopeuteen perustuva korroosiivisuusluokitus G1...GX. Korroosionopeuden mitta on korroosion tuottamien kupariyhdisteiden määrä ensimmäisen altistuskuukauden aikana mitattuna standardissa määriteltyä testilevyä käyttäen. Kupariyhdisteiden määrä ilmoitetaan nanometreinä (tai Ångsrömeina) kuukautta kohden. Koska korroosionopeus on lievissä olosuhteissa pieni ja ankarissa olosuhteissa suuri, suosittelee ISA lieviin olosuhteisiin useiden kuukausien altistusaikaa ja ankarissa olosuhteissa parin viikon altistusta.

Taulukko 5.6. Korrosiivisuusluokat IEC 60654-4:n mukaan kuparin reaktiivisuudella mitaten (nm/30d).

Korrosiivisuusluokka	Kuparin korroosionopeus (nm/kuukausi)	Rasitusasteen kuvaus Cu-testipinnan ulkonäön perusteella
C 1 Lievä	< 30	Ei muutoksia
C 2 Kohtalainen	< 150	Ruskeaa korroosiotuotetta
C 3 Korkea	> 150	Mustaa tai sini-mustaa korroosiotuotetta

Taulukko 5.7. Korrosiivisuusluokat ANSI/ISA-S71.04-1985.

Korrosiivisuusluokka	Kuparin korroosionopeus (nm/kuukausi)	Rasitusasteen kuvaus
G1 Lievä	< 30	Korrosiivisuus ei ole merkittävä luotettavuuden kannalta
G2 Kohtalainen	< 100	Korroosiovaikutukset ovat mitattavissa ja voivat olla merkittäviä.
G3 Korkea	< 200	Korroosiota tapahtuu suurella todennäköisyydellä. Ympäristöilman laatua tulisi kontrolloida taikka laitteen tulisi olla suunniteltu ja koteloitu korroosionsietoiseksi.
GX Erittäin korkea	≥ 200	Ainoastaan näihin olosuhteisiin suunniteltu ja koteloitu laite kestää. Spesifikaatiosta olisi sovittava valmistajan ja asiakkaan kesken.

Verrattaessa näitä ISO:n, IEC:n ja ISA:n luokituksia (taulukot 5.5–5.7) voidaan todeta, että kuparilla testattuna eri korrosiivisuusluokkien vastaavuudet ovat likimäärin taulukon 5.8 mukaiset.

ISA-S71.04 antaa seuraavan yhtälön testeissä saadun kuparin korroosiokalvon paksuuden normalisoimiseksi kuukauden altistusaikaa vastaavaksi.

$x_1 = x \left( \frac{t_1}{t} \right)^A$ , jossa  $x_1$  on kuukauden (30 päivää) altistusaikaa vastaava korroosiokalvon paksuus,  $x$  on ajan  $t$  jälkeen mitattu kalvon paksuus,  $t$  on testausaika päivinä ja  $t_1$  on 30 päivää. A:n arvo on eri korrosiivisuusluokissa: 0,3 G1:ssä, 0,5 G2:ssa, 1 G3:ssa ja GX:ssä.

*Taulukko 5.8. Korrosiivisuusluokittelujen vastaavuudet eri standardeissa käytetäessä perusteena OFHC-kuparin korrodoitumista ilmassa.*

ISO 9223	IEC 60654-4	ANSI/ISA-S71.04
C 1	..	..
C 2	C 1	G 1
C 3	C 2	G 2
C 4	C 3	G 3
C 5	..	G X

### **Erilaisten ympäristöjen korrosiivisuus**

Pohjoismaisena yhteistyönä tehdyssä tutkimuksessa [Henriksen et al. 1991] seurattiin ilman kosteutta ja epäpuhtauspitoisuuksia kaikissa pohjoismaissa yhteensä 48 eri paikassa, jotka ryhmiteltiin seuraaviin tyypillisiin olosuhteryhmiin (taulukko 5.9):

- ulko-olosuhteet, kaupunki ja teollisuus
- eläinsuojat
- laitetilat, myös puhdistettu ilma
- elintarviketeollisuus (kalan- ja lihanjalostus)
- kohtalaisen saastuneet teollisuusolosuhteet
- ankarat teollisuusolosuhteet
- meren rannikko
- auton tavarasuojat
- kasvihuoneet.



Kussakin koepaikassa oli myös ISA-standardin mukaisia metallilevynäytteitä sekä elektronisia komponentteja, joiden korrodoitumista seurattiin kuuden vuoden aikana. Näiden tulosten perusteella saatiin kuvassa 5.6 esitetty kuvaus erilaisten ympäristöjen sijoittumisesta kosteus/epäpuhtauspitoisuuden perusteella ja myös ko. olosuhteiden korrosiivisuuden aste. Kyseisten 48 testauspaikan mittaustulokset on esitetty lähteen [Henriksen et al. 1991] liitteessä 2 sisältäen lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Cl<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>+NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, Cl<sup>-</sup> sekä hiukkaslaskeuman (noki) keskiarvot kuuden peräkkäisen viikon aikana.

Näiden mittauspaikkojen tulosten yhteenvedona on taulukkoon 5.9 koottu keskiarvot kuuden viikon ajalta kussakin tyypillisessä ympäristössä.

*Taulukko 5.9. Ilman lämpötila, kosteus ja epäpuhtauspitoisuudet (µg/m<sup>3</sup>) tyypillisissä pohjoismaisissa ympäristöissä [Henriksen et al. 1991].*

	Ulko-tilat	Laite-tilat	Kala/lihat.	Eläin-suoja	Tav.teoll.	Ank.teoll.	Ran-nikko	Auto-tavar.	Kas-vih.
T °C	5	23	17	20	26	25	6,5	8	25
RH%	78	40	57	82	36	49	73	43	95
SO <sub>2</sub>	30	3,5	0,5	0,2	19	550	4,1	2	0
NO <sub>2</sub>	28	17	43	24	59	23	15	30	4
H <sub>2</sub> S	4,6	5,3	7,5	40	32	135	0,9	0,9	0,5
Cl <sub>2</sub>	0,9	0,5	2,1	0,6	3,9	15	1,6	0,3	0,8
Cl <sup>-</sup>	0,2	0,3	5,7	3,4	1,1	6,2	180	0,3	0,3
NH <sub>3</sub>	0,3	0,9	47	424	9	21	0,3	11	0,5
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1,2	1	3,7	106	3,9	14	0,5	2,3	0,5
Noki	17	2,5	15	24	38	19	5,2	17	8
Kpl	4	10	7	6	8	6	1	4	1
TOW	τ <sub>5...6</sub>	τ <sub>1/2</sub>	τ <sub>2...4</sub>	τ <sub>5...6</sub>	τ <sub>2...4</sub>	τ <sub>2...4</sub>	τ <sub>5/6</sub>	τ <sub>3</sub>	τ <sub>6</sub>
P	P2/1	P1	P2	P3	P3/4	P5	P5	P2/1	P1
ISA	G3	G1	G2	GX	G3	GX	GX	G1	G2

Kpl keskiarvoon sisältyvien paikkojen lukumäärä tässä aineistossa

TOW taulukon 5.1 mukainen kastumisaikaluokka

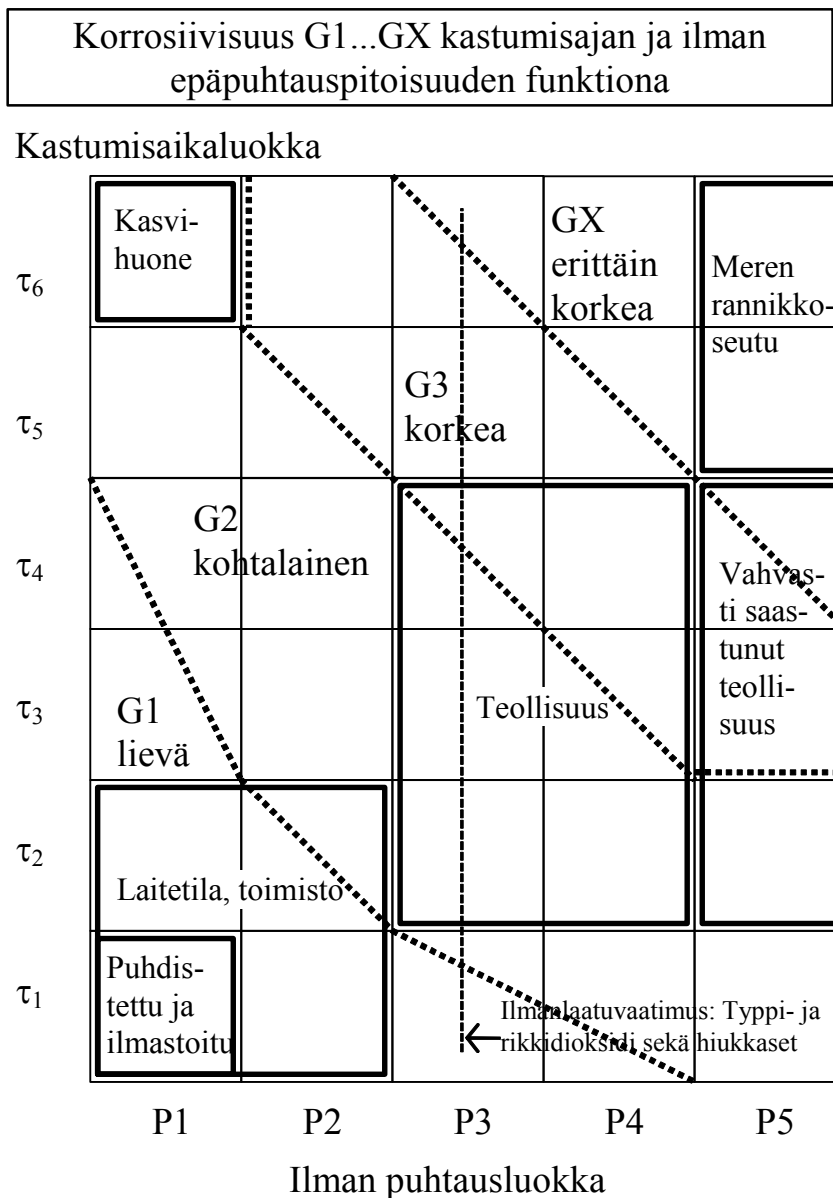
P taulukon 5.4 mukainen puhtausluokka

ISA taulukon 5.7 mukainen korrosiivisuusluokka

Kuvaan 5.7 on merkitty pääosa näistä tyypillisistä olosuhderyhmistä.

Kuvassa 5.7 luokat P1...P5 kuvaavat ilman puhtausluokkaa (P5 likaisin, taulukko 5.4) ja  $\tau_1$ ... $\tau_6$  em. ISO 9223:n TOW-kastumisaikaluokitusta (taulukko 5.1). Ilman epäpuhtauksilla tarkoitetaan tässä esim. aineita  $\text{SO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$  ja ilmassa olevaa pölyä ja nokea.

Kuten kuvasta 5.7 näkyy, huomattava osa tavanomaisista teollisuus ja toimisto-olosuhteista osuu enintään kohtalaisen G2-korroosiivisuuden alueelle.



Kuva 5.7. Tyypillisten ympäristöjen korroosiivisuus [Henriksen et al. 1991].

Kuvan 5.7 kastumisaikaluokittelu on taulukossa 5.1 ja puhtausluokittelu taulukossa 5.4.

Ankarimmat sisäolosuhteet ovat esim. paperi- ja kemiallisen teollisuuden tiloissa. Ulko-olosuhteista meren rannikot, saaret ja laivat edustavat vaikeimpia olosuhteita (vrt. luku 6.10, ISO 12944, korrosiivisuusluokka C5-M). Kasvihuoneiden korrosiivisuus on luokkaa G2 vaikka epäpuhtaustaso on pieni, koska niiden kosteustaso on jatkuvasti suuri. Eläinsuojissa kuten kanalat, sikalat, navetat ja tallit, korrosiivisuus on luokkaa G3...GX suuren ammoniakkipitoisuuden ja korkean kosteuden vuoksi.

Kuvaan 5.7 on merkitty myös Suomen valtioneuvoston 19.6.1996 antaman päätöksen mukaisten *ilmanlaadun ohjearvojen* sijoittuminen ilman puhtausluokituksen pystykatkoviivalla P3 puhtausluokan kohdalla. Ko. ohjearvot on annettu terveydellisten haittojen ehkäisemiseksi (liite 2 *Ilman laatuvaatimukset*). Ohjearvot ovat puhtausluokan P3 alueella ja vastaavat rikki- ja typpidioksidin sekä hiukkasleyjumalle asetettuja vuorokausiarvojen mediaania. Suolapitoisuudelle ei ole asetettu vaatimusta. Sallitut maksimi-arvot ulottuvat luokkaan P4. Koska ohjearvot koskevat ulkoilmaa, merkitsee tämä sitä, että tavallisissa ulko-olosuhteissa, joissa kosteus on yleensä yli 80 %, ilman korrosiivisuus on näillä ohjearvoilla luokassa *G3 korkea korrosiivisuus*.

Kuvasta 5.7 näkyy myös selkeästi kosteuden oleellinen merkitys korrosiivisuudelle. Esim. runsaasti saastuneen ilman (P4/P5) korrosiivisuus on alimmillaan G1/G2-raja-alueella, jos kastumisajat voidaan pitää  $\tau_1/\tau_2$ -luokkien seutuvilla. Vastaavasti puhtaankin ilman korrosiivisuus on suuri, jos suhteellinen kosteus on jatkuvasti yli 80 %.

Kuva 5.7 antaa lähinnä suuruusluokkatiedon, millainen korrosiivisuus voi olla erilaisissa käyttöolosuhteissa. Yksittäisissä tapauksissa paikallisten olosuhteiden vaihtelujen vuoksi havaittu korrosio voi olla huomattavasti pienempi tai suurempi kuin tyypillinen korrosiivisuusluokka (G1...GX) edellyttäisi. Toisaalta elektroniikkalaitteen korroosionsietoisuus voi poiketa oleellisesti perusmetallien (kupari, tina, teräs, sinkki, alumiini) korroosionsiedosta. Esim. hyvinkin lievissä G1-olosuhteissa, jonkin laitteen toiminta voi häiriintyä pahastikin korroosion ja kontaminaation vaikutuksesta, jos olosuhteet muuttuvat hetkellisesti tai laite on huomattavan herkkä korroosiosta johtuville kosketin- ym. vioille. Tämän vuoksi suojaustarve on aina tarkistettava tuotekohtaisesti.

### 5.3 Tuotanto- ja asennusolosuhteet

Elektroniikan tuotantotiloissa olisi oltava mahdollisimman puhdasta ja hyvä järjestys, jotta osien ja komponenttien sekä lopputuotteen kontaminoituminen olisi mahdollisimman vähäistä. Tuotantoilman tulisi olla suodatettua, pölytöntä ja mieluiten lämpötilaltaan ja kosteudeltaan säädettyä. Korroosio- ja kosteushaittoja sekä staattisen sähkön purkausriskiä ajatellen suhteellisen optimaalinen olisi 18...23 °C lämpötila ja 40...50 % RH suhteellinen kosteus tulevan tavaran varastossa, tuotantotiloissa ja tuotteiden pakkaustiloissa (vrt. SFS-EN100015-1 *Staat-tiselle sähkölle arkojen komponenttien suojaus* ja IEC 61340-5-1 *Protection of electronic devices from electrostatic phenomena*).

Kostumisriskiä ajatellen saapuvan tavaran käsittelyssä on alituisena uhkana korroosio ja veden valumajäljet, jotka aiheutuvat joko kuljetuksessa tapahtuneesta kastumisesta taikka talviaikaan kylmästä lämpimään sisätilaan tuodun tavaran pintoihin kondensoituvasta vedestä. Kastuneet tavarat olisi kuivattava mahdollisimman pian. Kylmästä sisään tuotuja kuljetuslaatikoita ei pitäisi avata heti, vaan niiden tulisi antaa lämmitä lähemmäksi vastaanottotilan lämpötilaa, jotta välte-tään veden kondensoituminen kylmiin osiin (vrt. liite 1, kohta 1.8 *Kosteuden kondensoituminen pinnoille*).

Juotettavien muovikoteloitujen komponenttien mahdollisesti absorboiman veden aiheuttaman vikariskin vuoksi, olisi tämäntyyppisten komponenttien vesitiiviit kuljetuspakkaukset, jos sellaiset ovat käytössä, pidettävä suljettuina, jotteivät komponentit absorboisi vettä varastoinnin aikana.

Varsinaisessa tuotannossa suurimmat korroosioriskiä lisäävät toimenpiteet ovat käsin latominen, juottaminen, peseminen ja testausten ja loppukokoonpanon yhteydessä tapahtuva osien käsittely. Mahdollisuuksien mukaan tuotteen osia olisi käsiteltävä suojatuin käsin kontaminoitumisen välttämiseksi etenkin komponenttilevyä koottaessa. Juottamista ja komponenttilevyn valmistamista on käsitelty tarkemmin kohdissa 6.5–6.7.

Alihankkijoille olisi myös annettava ohjeet tarvittavista tuotanto-olosuhteista, puhtaustasosta sekä kuljetuspakkausten laadusta tarkoituksella välttää osien kontaminoituminen, kastuminen ja korrodoituminen ennen niiden asentamista laitteeseen.

Tuotteiden pakkaamisessakin olisi pidettävä huoli, että pakkauslaatikoihin ei jää liian suuri kosteustaso (vrt. kohdat 5.11 ja 6.18 ja liite 1, kohta 1.7 *Ilman suhteellinen kosteus*). Tämä ongelma korostuu loppukesästä, jolloin suhteellinen kosteus saattaa olla 80...90 % sisätiloissakin. Kun pakatut tuotteet viedään lämpimästä

sisätilasta ulos, nousee pakkausten sisätilan suhteellinen kosteus nopeasti lämpimän ilman sisältämän kosteuden vuoksi. Tätä ongelmaa lievittää kuitenkin se, että pakkausten ja tuotteiden oma lämpökapasiteetti hidastaa tuotteiden lämpötilan laskua, jolloin ainakin pakkauksen uloimmat osat ehtivät haihduttaa niihin absorboitunutta vettä ennen kuin lämpötila laskee ympäristön tasolle.

Asennustyömailla olosuhteet vastaavat usein vaativia ulko-olosuhteita, jolloin asennettavien tuotteiden suojaaminen ilmastollisilta vaikutuksilta on tärkeää. Työmailla on usein rakennustyöstä johtuvaa pölyä ja hiekkaa. Tuotteiden kuljetuspakkaukset olisi vastaanottotarkastuksen jälkeen sijoitettava mahdollisimman kuivaan varastoon, ainakin sadekatos olisi järjestettävä. Erityisesti olisi varmistettava etteivät tuotteet pääse kastumaan eikä työmaan lika ja pöly kontaminoi niitä. Asennustyö olisi organisoitava mahdollisuuksien mukaan niin, että elektroniikka voitaisiin asentaa aivan viime hetkellä ennen käyttökokeita, jotta minimoitaisiin mahdollisesti vielä avoimena olevien yksiköiden altistuminen ulkoilmalle.

Asennustyön aikana olisi elektroniikkaa suojattava tilapäisin suojarusteiden suojakatoksien, lipoin, peittein ja irrotettavien suojakalvojen avulla. Kiinteän johdotuksen liittimet olisi suojattava tulpin tai muovipussein, jottei niihin pääse likaa eikä vettä rakennustyön aikana. Kaapelointeja tehdessä olisi varmistettava ettei kaapelia pitkin valuva vesi pääse suoraan liittimiin ts. kaapelit olisi tuotava liittimiin alakautta [vrt. SFS-EN 50173].

Jos laitteita joudutaan koekäyttämään keskeneräisellä rakennustyömaalla, jolla ilma on pölyistä ja ehkä muutenkin kontaminoitunut, olisi laitteiden ilmanotto- ja poistoaukkoihin asennettava koekäytön ajaksi tilapäiset ilmansuodattimet, jotteivät laitteet kontaminoituisi ennen aikaisesti sisäpuolelta eivätkä varsinaiset käyttösuodattimet menisi tukkoon (vrt. kohta 6.2 *Sijoituspaikan valitseminen*).

Jos tuotteen varsinaisen käytön aikana olosuhteet voivat ajoittain olla vaikeat, on itse tuotteen korroosio- ja kosteussuojaus suunniteltava sellaiseksi, että se sietää tällaisia vaativia olosuhteita.

## 5.4 Kuljetus ja varastointi

Kuljetus- ja varastointisuojausten tarve riippuu laitteesta, kuljetustavasta ja -matkan/varastointiajan pituudesta. Laite, jonka kuljetus kestää vain viikon tulee toimeen vähemmällä suojauksella, kuin laite, jonka kuljetus kestää useita viikkoja ja joka mahdollisesti on vielä varastoituna ulkotiloissa asennuspaikalla useitakin viikkoja ennen asentamista. Kuljetuksille on tyypillistä olosuhteiden arvaamatto-

muus, jonka vuoksi valittava toimintastrategia vaikuttaa siihen otetaanko riski ja pakataan huonosti vai pakataanko hyvin ja maksetaan hieman enemmän varmoista toimituksista.

Kuljetuslogistiikan ja pakkauksen suunnittelun tulee aina lähteä sekä kuljetusolosuhteista että vastaanottopaikan olosuhteista. Perustavoitteena on vähentää vaihtelevista kuljetusolosuhteista johtuvia kastumis- ja korroosioriskejä (vrt. kohta 6.16 *Kosteuden poisto kuljetuspakkauksista*).

Kuljetuksissa maanteitse, meritse ja lentoteitse tapahtuu melkein aina suuria lämpötilan, kosteuden ja ilman epäpuhtauspitoisuuden vaihteluja. Olosuhteet ovat yleensä melko korrosiiviset etenkin kosteuden ja mahdollisen sateen vuoksi. Kaikissa kuljetustavoissa esiintyy myös suuria mekaanisia rasituksia, jotka edistävät korroosiota esim. liitoksissa.

Täysin ilmatiiviisti suljettua kuljetuspakkausta käytetään haluttaessa minimoida kuljetukseen liittyvät riskit. Laite voi olla esim. suljettuna tiiviiseen lämpösäilytyskammioon eteenimuovikääreeseen, jonka sisätila on täytetty kuivalla typpikaasulla ja/tai josta on poistettu kaikki ylimääräinen ilma ja tilaan on laitettu **riittävä määrä** kosteutta absorboivaa materiaalia (silikageeliä, bentoniittia). Laitepaketin rikkoutumattomuus varmistetaan vielä sulkemalla se iskuja vastaan vuorattuun lauta- tai vanerilaatikkoon.

Kuljetuspakkausten suunnittelussa on pidettävä mielessä toisaalta olosuhteiden arvaamattomuus ja aina vallitseva kastumisriski ja toisaalta pakkauksen itsensä aiheuttamat riskit korroosion kehittymiselle (vrt. kohdat 3.5 ja 6.16–6.18). Komponenttien ja osien kuljetus merkitsee aina kohtalaista riskinottoa, koska niistä monet saattavat olla erityisen herkkiä ilmastoperäiselle korroosiolle.

Kosteuden ja korroosion estämisessä voidaan käyttää esim. seuraavanlaisia peruseräotteitä:

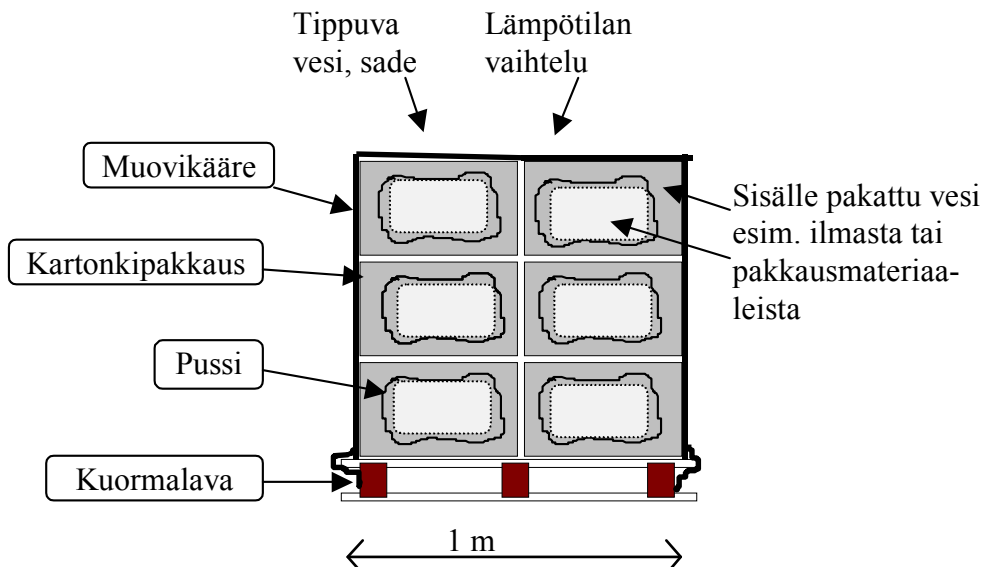
- suljetaan laite/komponentti ilmatiiviiseen pakkaukseen ja poistetaan sisältä kosteus niin ettei kondensoitumista tai huurtumista tapahdu kuljetuslämpötiloissa
- suojataan laite puolitiiviiseen pakkaukseen ja varustetaan sisätila ilmaa kuivaavilla aineilla ja/tai korroosioinhibiittoreilla
- käytetään puumassaan perustuvia pahvi- tai kartonkipakkauksia ja kylästetään ne korroosioinhibiittoreilla
- käytetään puumassaan perustuvia pakkausmateriaaleja sellaisenaan.

Ensimmäistä vaihtoehtoa käytetään melko yleisesti mikropiirien kuljetuspakkauksissa, kun halutaan estää veden absorboituminen muovikoteloon ja varmistetaan liitosjohtimien juottuvuuden säilyttäminen.

Toinen vaihtoehto on ehkä suositeltavin menettely, jonka avulla saadaan varmistettua melko hyvin laitteiden säilyvyys kuljetuksissa.

Viimeksi mainittujen kahden pakkaustavan suurin ongelma on juuri niiden taipumus läpäistä vesi ja altistaa näin laite kosteuden korroosiota kiihdyttävälle vaikutukselle. Inhibiittoreiden käyttö puumassaan perustuvien pakkausten lisäaineena on vartenotettava mahdollisuus, etenkin kierrätettäviä pakkausratkaisuja haettaessa. Menetelmän toimivuus on testattava ennen käyttöönottoa tuotekohtaisesti ai-toja laitteita käyttäen.

Kuvassa 5.8 on esitelty tavanomaiseen kuormalavakuljetukseen liittyvää ongelmatiikkaa. Siinä tuote on pakattu aaltopahvilaatikoihin käyttäen styroxia tukimateriaalina. Tuotteet on kääritty muovipusseihin, jotka ovat avoimia (ei lämpösaumattuja). Kuljetuspakkaukset on ladottu kuormalavalle, johon ne on sidottu kiertämällä pakkausten ympärille kiristemuovikalvo.



Kuva 5.8. Laitteiden kuljetus kuormalavalle sidottuna.

Tähän pakkaustapaan on sisältynyt seuraavia ongelmakohtia:

- Kuormalavat voidaan kuljettaa laivalla konteissa, jolloin ne voivat kastua kontteihin kertyneen veden vuoksi, kuljetus- ja varastointiaika yhteensä kahdesta kuuteen viikkoa.

- Lämpimässä sisätilassa pakattaessa (22 °C / 50 % RH) pakkauksiin jää vettä niin paljon, että lämpötilan laskiessa sisätilan suhteellinen kosteus nousee jopa lähelle 100 %. Näin tapahtuu, jos kuormalavan kiristemuovikalvo on kääritty tiiviisti. Käytännössä kosteus jää alemmaksi, koska osa kosteudesta adsorboituu materiaaleihin.
- Kuormalavan kiristemuovikalvo on kääritty ylhäältä alaspäin ja on yläreunasta periaatteessa auki. Valuva vesi pääsee kalvon saumoista sisään kapillaarivoimien imemänä sivuilta ja päältä. Jos käärimissuunta olisi alhaalta ylöspäin, valuva vesi ei pääsisi sivujen saumoista sisään. Tällä on merkitystä, jos kuormalavan päälle tippuu tai sataa vettä.
- Kuormalavan sidemuovi hidastaa oleellisesti suoraa veden pääsyä ulkoa sisälle (valuva vesi ongelma, jos kääritään väärässä järjestyksessä) ja sisältä ulos.
- Kartonkipakkauksissa olevien laitteiden suojana on avoin muovipussi, jonka sisällä ei ole kosteutta imevää materiaalia (kosteutta imevä materiaali on tarpeeton, koska pussi on avoin eikä ilmanpitävä).
- Osassa styrox-materiaalia on ollut virheellisen valmistusprosessin vuoksi runsaasti vettä. Vesi ylläpitää korkeaa kosteutta pakkausten sisällä.

Kuvattu pakkaus- ja kuljetusmenettely on hyvin yleinen, mutta siihen sisältyvien muutamien riskien, kuormalavan kiristemuovin kääriminen väärinpäin, laitteen suojana olevan muovipussin toimiminen vain mekaanisena suojana ja haitallisin kaikista, styroxiin valmistusprosessissa jäänyt vesi voivat aiheuttaa suuria ongelmia. Eräässä VTT Automaatiassa tutkitussa tapauksessa näiden seikkojen vuoksi laitteiden sinkityt metalliosat olivat valkoruosteen peittämät, peltien leikatut reunat ruosteiset, nikkeloidyissä liittimien vaipoissa korroosiota, merkintätarrat olivat homeiset ja laitteissa sekä kuljetuslaatikoissa oli merkkejä kastumisesta. Tuotteet olivat sähköisestä toimivuudestaan huolimatta “huonon” näköisiä. Elektroniikkaosat olivat kuitenkin päällisin puolin virheettömän tuntuisia visuaalisen tarkastelun perusteella.

Kyseistä kuormalavapakkaustapaa testattiin myöhemmin VTT:ssä lämpövaihtelutestissä sijoittamalla osaan pakkauksista vettä paperiin imeytettynä 100...300 g (aika 14 vrk, vuorokauden mittaiset jaksot: alälämpötila 5 °C / 95 % RH 10 h ja ylälämpötila 20 °C / 70 % RH 10 h, siirtymäaika 2 h). Kuivien aaltopahvipakkausten sisätilassa suhteellinen kosteus oli testin jälkeen 70 % RH ja märkien pakkausten sisätilassa lisätyn veden mukaan vaihdellen 80...93 % RH. Kun kuormalavan annettiin olla 6 vrk lämpötilassa 23 °C ja kosteus alle 40 % RH, laski pakkausten kosteus vain noin 10 %-yksikköä. Kun kuormalavan uloin muovikäre poistettiin ja laatikot jätettiin sellaisenaan kuormalavalle, laski kosteus pakkauksissa 24 tun-



nin aikana 30 %-yksikköä ts. hyvin lähelle vallitsevaa ympäristön kosteutta 30...40 % RH. Tämä kuvastaa hyvin kartonkipakkausten ominaisuutta läpäistä kosteutta nopeasti, pari-kolme tuntia riittää siihen, että pakkauksen sisäinen kosteus on sama kuin ulkoilman ja itse pakkausmateriaali saavuttaa ko. olosuhdetta vastaavan tasapainokosteutensa.

Viimeksi mainitunkin kokeen perusteella muovikääre pidättää tehokkaasti vettä. Kuormalavakuljetuksissa käytetty muovikääre olisi järkevää poistaa mahdollisimman nopeasti tavaraa varastoitaessa, jotta pakkauksiin mahdollisesti jäänyt kosteus poistuisi.

Em. kuormalavalla käytetyt aaltopahvipakkaukset olivat  $49 \cdot 50 \cdot 60 \text{ cm}^3$  kokoisia. Tällainen tyhjä pakkauslaatikko painaa lämpötilassa  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  ja 50 % suhteellisessa kosteudessa noin 1 830 g. Lämpötilassa  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  ja 93 % suhteellisessa kosteudessa ko. pakkaus painaa noin 2 040 g ts. se imee itseensä noin 200 g lisää vettä. Pahvi menettää tässä kosteudessa mekaanisen lujuutensa suurelta osin. Aaltopahvimateriaalit imevät vettä ilmasta noin 15...20 % painostaan, kun suhteellinen kosteus on 100 % huoneen lämpötilan seutuvilla. Veden määrä on lähes riippumaton lämpötilasta alueella  $5...40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kosteudessa 50 % RH vesipitoisuus on noin 8 % ja kosteudessa 90 % noin 16 % pahvin painosta [Paronen & Toroi 1959].

Jätepaperista valmistettu uusiomassa ja siitä valmistetut puristetut tuotteet ("kananmunakennot") imevät kosteutta huokoisen rakenteensa takia melko paljon. Pahoin kostuessaan ne pilaavat niihin pakatun tuotteen, mutta rakenteensa ja absorptiokykynsä puolesta ne voivat tasata suuria kosteuden vaihteluita ja jopa rajoittaa kondensoitumista tuotteen välittömässä läheisyydessä.

## **5.5 Ulkoinen suojaustekniikka, lähiolosuhteisiin vaikuttaminen**

Laitteen käyttöpaikalla sen lähiympäristön olosuhteisiin voidaan vaikuttaa mekaanisen suunnittelun avulla (vrt. kohta 6.2 *Sijoituspaikan valitseminen*). Oleellista olisi käyttää sellaisia apurakenteita kuten lippoja, apuseinämiä ja katoksia, joiden avulla voidaan rajoittaa elektroniikan ulkopintoihin kohdistuvaa suoraa auringon säteilyä, veden tippumista, sadetta, tuulta, altistusta pesukemikaaleille sekä rajoittaa ulkolämpötilan muutosten vaikutusta. Myös laitteen sisäpinnoilla voidaan käyttää lämmöneristystä, jolloin ulkoinen lämpötilan vaihtelu voimakkaan sateen tai ilman lämpötilan vaihtelun vuoksi ei välity nopeasti sisäosiin.

Enhkä kaikkein oleellisinta olisi estää valuvan veden pääseminen ja kertyminen elektroniikkalaitteen arkoihin osiin, kuten liittimiin, johdinliitoksiin ja piirilevyille. Valuvalle vedelle on aina järjestettävä poistumisreitit pitempiaikaisen altistumisen estämiseksi.

Toinen tärkeä seikka on varmistaa, että elektroniikkakotelot ovat myös riittävän hengittäviä, jolloin luonnostaan sisään tunkeutuva vesi pääsee myös poistumaan laitteen sisältä, kun laite itse lämpiää.

Katoksissa tai lämmittämättömissä rakennuksissa olevien laitteiden ulkoinen suojaus on suhteellisen helppoa, koska tarvittava lisäsuoja sateen ja auringon säteilyn vuoksi on vähäisempi kuin taivasalla.

## 5.6 Komponentit, johdotukset ja liitokset

Elektroniikan komponenttien ja johdotusten korrodoitumisriskistä huomattava osa keskittyy koskettimiin, liitosjohtimiin ja juotosliitoksiin. Kaikki aukeavat liitokset liittimissä, kytkimissä ja releissä edellyttävät mekaanisen ja sähköisen toiminnan sekä materiaalien hyvää yhteensovittamista. Koska nämä liitokset ovat usein alttiita ilman kautta tuleville vaikutuksille, on ne suunniteltava suhteellisen inerteiksi ilmastollisia vaikutuksia vastaan. Samalla on otettava huomioon käytöstä johtuvat rasitukset kuten mekaaninen kuluminen ja likaantuminen.

Huomattava kokonaisuus on kaikkien pysyvien juotettavien tai liimattavien johdinliitosten (komponenttien ulkoiset liitokset) valmistaminen ja toisaalta käytön aikainen rappeutuminen. Johdinliitoksia rasittavat esim. materiaalien erilaisista lämpölaajenemiskertoimista johtuvat mekaaniset voimat, kun lämpötila ja liitosten sähköinen kuormitus vaihtelee (vrt. liite 1, kohta 2.10 *Jännityskorroosio ja väsyminen*). Pintaliitostekniikassa, jossa johdinvälit ovat jopa alle 0,2 mm, näillä seikoilla on suuri vaikutus liitosten elinikään. Ongelma korostuu sen vuoksi että käytettävät liitosjohdinten juotemäärät ovat tavattoman pieniä, jolloin niiden mekaaninen lujuus voi olla riittämätön esiintyviin lämpörasituksiin nähden. Jännityskorroosion merkitys on suuri kaikissa rakenteissa, joissa joudutaan käyttämään monenlaisia materiaaleja toisiinsa liitettyinä. Tämä koskee kaikkia piirilevyille juotettavia komponentteja ja liittimiä. Vastaavia lämpöjännitysongelmia esiintyy komponenttien sisärakenteissa.

Komponenttien oma korroosionsietoisuus perustuu pääosin niiden koteloinnin laadunhallintaan. Nykyiset parhaat muovikotelot ovat jopa luotettavampia kuin hermeettiset kotelot johtuen hermeettisten koteloiden valmistuksen laatuongel-

mista (liite 1, kohta 1.6 *Materiaalien kosteuden läpäisevyys*) [Sinnadurai 1996] ja [British Telecom]. Vaikeissa kosteissa olosuhteissa koteloiden johdinläpiviennit ovat aina riskialueita, koska niihin jää helposti mikroskooppisia reikiä, joista vesi ja kaasut pääsevät sisälle (katso myös KOTEL 212).

Ehkä arkisin, mutta käytännössä melko yleinen korroosio-ongelma komponenttitasolla on komponenttien liitosjohdinten juottuvuuden pitäminen riittävän hyvänä. Tähän vaikuttavat liitosjohdinten pinnoitteet, kuljetuspakkausten laatu, sekä juotosprosessin monivaiheisuus ja käytettävät juotemateriaalit ja juoksutteet. Juottuvuuden varmistaminen niin komponenteissa kuin piirilevyillä on tärkeimpiä luotettavuuteen vaikuttavia alueita laitteissa.

## 5.7 Maalit, muovit ja ilmastolliset vaikutukset

Elektroniikkatuotteiden maalit ovat yleensä korotetussa lämpötilassa kovettuvia polttomaaleja tai pulverimaaleja tai kemiallisesti alhaisessa lämpötilassa verkoutuvia kaksikomponenttimaaleja. Kovettuneesta maalikalvosta ei siksi pääse jälkikäteen haihtumaan mitään ympäristöön.

Elektroniikkateollisuudessa käytetään varsin monenlaisia muoveja. Laitekoteloina käytetään mm. polykarbonaattia, erilaisia akryylimuoveja ja myös ns. mekaanisia seoksia, esim. PVC/ABS. Muoveja maalataan ja pinnoitetaan erilaisilla metallipinnoitteilla, jolloin mahdolliset päästötkin vähenevät. Muovin päästöt eivät yleensä tule peruspolymeerista – poikkeuksena ulkoisesti pehmitetty PVC – vaan muovin lisä-/apuaineista esim. UV-stabilointikemikaalit, lämpöstabilointikemikaalit ja väriaineet/pigmentit. Näiden aineiden vaeltaminen (migratoituminen) ulos muovista vie normaaliolosuhteissa vuosia (5...15 vuotta), joten hetkelliset pitoisuudet ympäristössä jäävät alle havaintorajan. Vain, jos ympäristössä luonnostaan on tai muovin pinnalle tulee liuottimia tai öljymäisiä aineita, esim. käsi-rasvoista, kiihtyvät em. prosessit niin paljon, että niillä on merkitystä. Koteloon suljetun elektroniikan kannalta ei tämäkään vielä tuo haittoja, sillä muovikuori tuhoutuu ennen kuin elektroniikan toiminta häiriintyy.

Ilmastolliset vaikutukset riippuvat siitä paljonko esim. jäähdytysilman mukana tulee epäpuhtauksia (aerosoleja) laitteen sisään. Vaikka koneellista tuuletusta ei laitteessa olisikaan, tuottaa laitteen käynti aina jonkin verran lämpöä ja laitteen ollessa käytöstä pois, jäähtyy sen sisäilma vastaavasti. Tämä johtaa aina jonkinasteiseen ilmanvaihtoon sisä- ja ulkotilan välillä ja siis aerosolien pääsemiseen laitteen sisälle, ellei kotelo ole täysin suljettu. Aerosolihiukkasten koostumuksesta ja rakenteesta riippuen hiukkasen pinnalle on adsorboituneena erilaisia

molekyylejä. Epäorgaanisten hiukkasten (esim. hiekkapölyn) pintaa peittää lähes aina yhden molekyylin paksuinen eli monomolekulaarinen vesikerros. Samanlainen vesikerros peittää yleensä myös aina metallipintoja. Kerrosta pitää paikallaan heikot ns. van der Waalsin voimat, jotka nimestään huolimatta ovat molekyyli-tasolla niin vahvoja, että yhden molekyylin vahvuinen kerros on irrotettavissa pinnalta vasta joko korottamalla lämpötilaa tai imemällä ympäristöön tyhjiö. Yksi kerros vesimolekyylejä ei vielä aiheuta korroosiota, mutta vaikuttaa liiman tavoin pölyhiukkasten kiinnipysyvyyteen metallipinnoilla. Pinnalle jääneet hiukkaset muodostavat ympärilleen kapillaarisia rakenteita, jotka edistävät kosteuden sitoutumista rakenteeseen. (ks. liite 1, kohta 3.5 *Kapillaari-ilmio* ja kohta 3.6 *Vesiliuokset ja elektrolyytit, ionien hydratoituminen*)

## 5.8 Suojauskeinojen haittavaikutukset

Elektroniikan suunnittelualueet, sähköinen-, mekaniikka-, lämpö-, EMC-, korroosionsiedon-, ergonomian ja logistiikan suunnittelu tuottavat aina toisilleen ristiriitaisia vaatimuksia ja ratkaisuja.

Mekaniikkasuunnittelija voi esim. liittimiä suunnitellessaan jättää ottamatta huomioon pinnoitteiden asteittaisen korrodoitumisen ja kosketinvoimien oikean mitoituksen. Koteloista voidaan tehdä liian avoimia tai suljettuja, lämpösuunnittelija keskittyy ehkä vain tehokkaaseen jäähtymiseen ja lisää tarpeettomasti ilman-kiertoa, EMC-suunnittelija ei ehkä ole tietoinen kontaktiensa korrodoitumisesta erilaisia materiaaleja käytettäessä eikä niistä haitoista, mitä seuraa sähköisen tiiviyden toteuttamisesta jäähtytykselle.

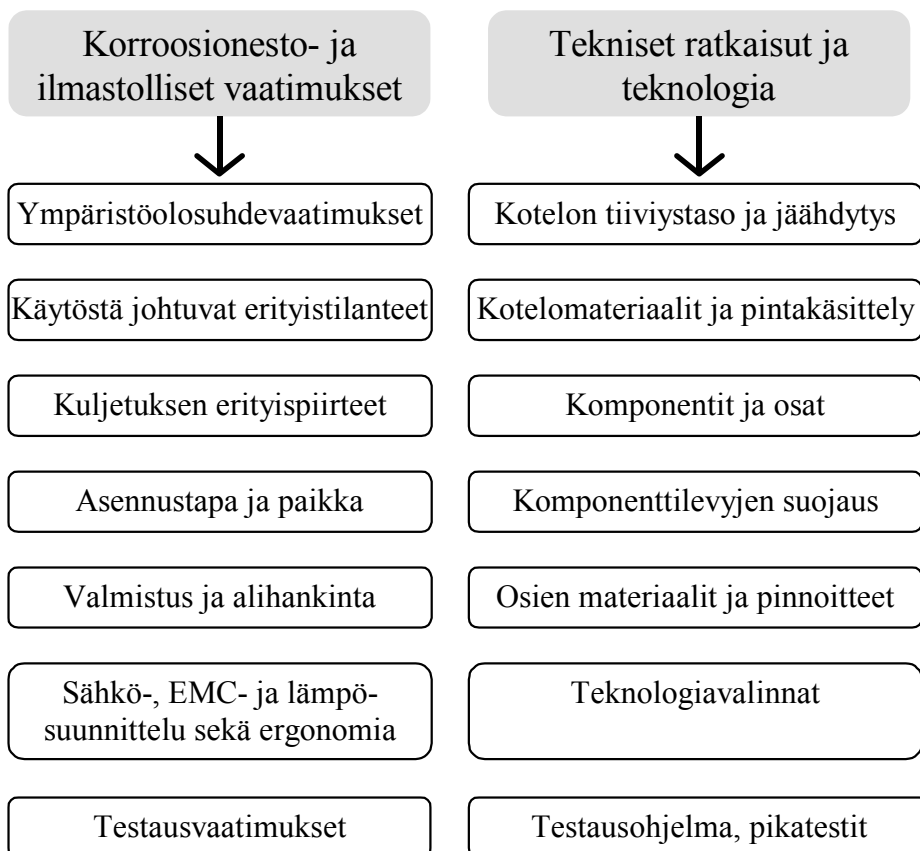
Kauniin näköinen kiiltopinta voi korrodoitua hyvin nopeasti, kun tuotetta sormeillaan. Laitteen päälle roiskahtanut vesi voi pilata tuotteen, koska laitteen pinnoilla on reikiä tai rakoja. Vastaavasti järjestelmätasolla ei ehkä oteta huomioon laitteen eri osien hyvin erilaisia ympäristöolosuhteita ja käytetään kaikkialla samaa perustekniikkaa. Myös olosuhteiden ankaruus voi yllättää taikka laitteiden käyttäjien ja huollon sekä siivouksen toimet saattavat tuottaa arvaamattomia tilanteita, jos tuotteen olosuhdekartoitusta ei ole tehty huolella.

Korroosionsiedon kehittäminen edellyttäisi ilman kierron minimoimista laitteen sisällä, korroosiota sietävien eristävien pinnoitteiden käyttämistä, hyvää kuljetus-suojausta, alhaista käyttölämpötilaa, hyvin eristettyjä metallien välisiä liitoksia, materiaalien omien päästöjen vähentämistä, jne.

Kaikilla osa-alueilla on merkittävä vaikutus laitteen hintaan, toimivuuteen ja luotettavuuteen, jonka vuoksi mitään osa-aluetta ei saa syrjäyttää laatuongelmien välttämiseksi. Tärkeintä olisi varmistaa valittujen ratkaisujen toimivuus ja haitattomuus järjestämällä näiden eri osa-alueiden suunnittelijoiden yhteisiä katselmointeja tai ainakin jakamalla tiedot toisten suunnittelijoiden ratkaisuehdotuksista kaikille muillekin.

## 5.9 Tuotteen spesifikaatio korroosion kannalta

Koottaessa tuotteen korroosionsiedon määrittämiseen ja hallitsemiseen käytettävää spesifikaatiota on paneuduttava itse tuotteen olemukseen, käyttötapaan ja siihen logistiikkaan, jolla tuote kootaan ja toimitetaan asiakkaalle. Tämä spesifiointi voidaan toteuttaa käymällä läpi edellä kohdassa 5.1 ja liitteessä 3 kuvattu katselmointimenettely ja ottamalla sen yhteydessä kantaa kuhunkin spesifioitavan asian yksityiskohtaan. Spesifikaatiossa määritellään kanta haluttuun korroosionsietotasoon (kohta 4) ja sen toteutustapaan (kohta 6) ja sovitetaan yhteen suunnittelun eri osa-alueiden tekniset ratkaisut.



Kuva 5.9. Tuotteen spesifiointi korroosionsiedon kannalta.

Käytännössä tuotteen omassa spesifikaatiossa olisi dokumentoitava ainakin kuvassa 5.9 todetut asiat, joihin sisältyvät myös kuvassa 1.7 *Korroosioriskialttiit kohdat elektroniikassa* todettujen seikkojen tarkastelu soveliaassa määrin dokumentoituna.

Laitteen varsinainen tuotespesifikaatio voi olla suhteellisen pelkistetty, mutta valmistuksessa ja osien sekä komponenttien hankinnoissa on paneuduttava huolella ao. spesifikaatioihin, jotta saavutettaisiin haluttu korroosionsietoisuus ilman vakavia riskejä jonkin spesifioimattoman seikan johdosta.

Spesifioinnin yhteydessä otetaan kantaa myös perusteknologiaan, jolla tuote toteutetaan sekä sovitaan myös sähkö-, lämpö-, EMC- ja ergonomiasuunnittelun rajat, joihin korroosioneston on sopeuduttava. Toisaalta esitetään myös korroosionestotavoitteista johtuvat rajoitukset muille teknisille ratkaisuille.

## 5.10 Korroosiotestien käyttökelpoisuus

Korroosiotestien valinnassa (taulukko 5.10) on aina otettava huomioon tuotteen lopulliset käyttöolosuhteet. Testit tulee suunnitella siten, että niillä saadaan mahdollisimman luotettava kuva tuotteen käyttäytymisestä todellisuudessa. Testien ja todellisuuden vastaavuus on vaikea saavuttaa, koska todelliset olosuhteet ovat hyvin vaihtelevat paikallisesti ja erilaiset eri puolella maapalloa. Myös ihmisten käyttäytymisen kulttuuriset erot vaikuttavat siihen kuinka korrosiivisiin olosuhteisiin tuotteet joutuvat. Toisaalta testauksessa voidaan harvoin jäljitellä vallitsevia ympäristöolosuhteita sellaisenaan; on tyydyttävä muutama perusrasitukseen kerrallaan, esim. kosteus- ja lämpö sekä 2...3 kaasua. Julkaisussa [SFS-Käsikirja 108, Ympäristöluokitus ja -testaus] on kuvattu ympäristöluokitusten ja ympäristötestauksen periaatteita sekä opastettu rasitusasteiden valintaa laitteiden testejä suunniteltaessa.

Kaikissa korroosiotesteissä on harkittava aluksi testataanko laite tai sen jokin moduuli avoimena vai suljettuna tai testataanko pelkästään yksittäisiä komponentteja ja perusmateriaaleja.

Jos halutaan näkyviin esim. liittimien, piirilevyn ja komponenttien johtimissa käytettyjen pinnoitteiden ominaisuudet, silloin kannattaa testit tehdä avoimille komponenteille ja materiaalinäytteille ilman niitä lämmittävää sähkötehoa. Näin testaten saadaan tieto eri pinnoitteiden laadusta toisiinsa nähden, mutta ei saada käsitystä, mikä vaikutus laitekotelolla on korrodoitumiseen. Tällainen avoin testaus antaa kuitenkin parhaan tuloksen korroosionsiedosta, jos vielä samanaikai-

sesti verrataan aiemmin käytettyjä ja uusia pinnoitteita ja kosketinrakenteita toisiinsa. Ongelmaksi tällaisessa komponenttitason testauksessa muodostuu helposti näytteiden ja työn suuri määrä.

Haluttaessa uudesta laitekonstruktiosta yleiskuva voidaan testeihin valita laitteen komponenttilevyjä ja moduuleja ja mahdollisesti tärkeimpiä liittimiä ja testataan näitä joko erikseen tai samanaikaisesti koteloonsa suljetun laitteen kanssa. Tällöinkin testattavien osien ja laitteen olisi oltava jännitteettämiä lämpenemisen aiheuttaman kuivumisen estämiseksi. Tällainen testaustapa antaa hyvän kuvan siitä, millainen vaikutus laitteen kotelolla on korrodoitumiseen ja samalla kertaa nähdään, kuinka erilaiset materiaalit reagoivat testausolosuhteisiin. Jännitteettömänä testaaminen vastaa hyvin laitteen ajoittaisia käyttökatkoksia, jolloin usein esim. kosteus on korkeimmillaan. Tämä menettely testata laitetta ja sen osia avoimena ja suljettuna soveltuu hyvin pienikokoisille laitteille, kuten matkapuhelimet, teholähteet, mittauslaitteet ja mikrotietokoneet, kun eräänä tiedontarpeena on suojakotelon vaikutuksen arviointi. Jos laitekotelossa on merkittäviä aukkoja, erot avoinna ja suljettuna testaamisen välillä ovat pienemmät.

Korroosiotestejä tehtäessä mainitulla tavalla kokonaisille laitteille ja niiden osille on muistettava ettei yksittäisiä testejä, esim. monikaasutestiä ja suolasumutestiä, ole tarkoitettu kaikenkattaviksi testausmenetelmiksi. Yhdistelemällä kosteus-, lämpö-, monikaasu- ja suolasumutestejä, saadaan laitteen eri osien ominaisuuksista kuitenkin kohtuullisen hyvä kuva.

Tehtiinpä ympäristörasitustestejä miten tahansa, oleellista olisi analysoida mahdollisimman tarkkaan, mitä laitteen eri osissa on todella tapahtunut testien yhteydessä. Pelkkä toimii/ei toimi kokeilu testien jälkeen ei riitä, vaan olisi tutkittava ainakin visuaalisesti kaikki metalliset pinnoitteet ja johdinvälit mahdollisten korroosiojälkien toteamiseksi. Näiden perusteella voidaan kohdistaa korjaavat toimenpiteet oikeisiin kohteisiin.

Korroosiotestit ovat usein kiihdytettyjä testejä. Kiihdyttävänä tekijänä käytetään kosteutta, kohotettua lämpötilaa ja aggressiivisiä aineita. Käytännönläheisimpiä testejä ovat lähellä käyttöolosuhteita tehtävät kenttä- ja kuljetusolosuhdetestit. Kenttätestien ongelmana on kuitenkin tarvittava pitkäkö testausaika sekä vaatimus testata tuotteita monissa ympäristöissä yhtä aikaa, jotta ne vastaisivat edes tyydyttävästi niitä hyvin monipuolisia olosuhteita, joihin elektroniikka voi joutua elinjaksonsa aikana.

Kiihdytettyjen testien rasiustasojen suhteen on muistettava, että rasiustason liian suuri ero todellisuuteen johtaa vääriin lopputuloksiin. Esim. kaasu- tai kosteuspi-

toisuuden nostaminen johtaa yleensä jonkin korroosioreaktion muuttumiseen hallitsevaksi. Todellisissa käyttöolosuhteissa reaktioita on yleensä useita, mutta yksikin reaktio riittää korroosion aikaansaamiseen. Lämpötilan liian suuri nosto testeissä voi muuttaa jotkut metallipinnat passiiviseksi ja pysäyttää koko korroosion (vrt. liite 1 kuva 1.1 ja kohta 2). Tulosten liittämiseksi käytäntöön auttaa aina, jos testeissä on mukana materiaaleja tai kappaleita, joista tiedetään, miten ne ovat käyttäytyneet todellisuudessa, ts. kokeessa on mukana sisäinen standardi.

Kosteuden, lämpötilan ja korrodoivien kaasujen yhteisvaikutuksen tutkiminen kiihdytetyllä kokeella on erittäin nopea tapa testata esim. suojapinnoitteiden kestävyttä sekä todentaa prosessikemikaalien jäämiä mm. piirilevyjen rei'istä. Koeolosuhteiden todentaminen koekammiossa – lämpötilan ja suhteellisen kosteuden mittaaminen, kaasujen pitoisuus – on edellytyksenä tällaisessa kiihdytetyssä testissä. Testiolosuhteiden hallintaa rajoittaa kaasujen analysointitekniikka. Matalilla kaasupitoisuuksilla vain fluoresenssimenetelmät ovat riittävän herkkiä, mutta ne eivät toimi, jos analysoitava kaasu sisältää liian paljon vettä. Vaarana on tällöin veden tiivistyminen analysaattorin sisälle, joka voi johtaa ääritapauksessa sen tuhoutumiseen – korroosion vaikutuksesta! Käytännössä lämpötila 30 °C ja 75 % suhteellinen kosteus ovat maksimiolosuhteet, joita kyseiset analyysilaitteet sietävät.

Testeissä käytettävien kaasujen pitoisuuksista on paljon väitelty. Peruseriaatteena voi kuitenkin pitää, että kaasuja on oltava niin paljon, että niitä on vapaana testauskammion ilmassa. Jos kaasuja on vähän, ne saattavat sitoutua testikaapin rakenteisiin ja testeissä saadaan liian hyviä tuloksia.

Kloori ( $\text{Cl}_2$ ) itsessään esiintyy harvoin saastelähteenä luonnossa paitsi esim. paperi- ja sellutehtaiden läheisyydessä. Kosteuden läsnä ollessa kloori hajoaa nopeasti hypokloriitiksi ( $\text{ClO}^-$ ) ja kloridiksi ( $\text{Cl}^-$ ). Hypokloriitti on vahvasti hapettava aine. IEC 60068-2-60 testeissä klooria käytetään sen hapettavan vaikutuksen ja kloridien muodostuksen vuoksi. Kloorilla on vahva synergistinen vaikutus rikki-vedyn  $\text{H}_2\text{S}$ :n kanssa, koska sen läsnäollessa syntyy sekä rikkihappoa että suolahappoa. Klorideilla on kyky tunkeutua metalleja suojaaviin oksideihin ja näin lisätä niiden korroosiota.

Em. IEC 60068-2-60-standardin liitteessä C todetaan kloridin sitoutuvan testikaapin seinämiin, joita on hyvin vaikea puhdistaa. Tämän vuoksi kaapilla ei saa tehdä muita testejä ellei niihin sisälly myös kloori yhtenä osana.

Toinen vaihtoehto on puhdistaa sisätilat perusteellisesti ja vaihtaa kaasuputket uusiin ennen muiden testien suoritusta.



Toinen IEC:n monikaasutestejä koskeva varoitus koskee rikkivetyä sisältäviä testejä, joiden jälkeen kammiota ei saisi käyttää puhtaisiin rikkidioksiditesteihin ennen kuin putkistot ja sisäpinnat on vaihdettu. Syynä on se, että rikkivety voi reagoida rikkidioksidin kanssa synnyttäen rikkiä. Rikin höyrynpaine on käytetyissä testausolosuhteissa jo niin suuri, että se haihtuu kaapin ilmaan seuraavissa testeissä aiheuttaen sulfidoitumisreaktioita metallipinnoilla, vaikka normaalisti sulfidoitumista aiheuttavaa rikkivetyä ei olisikaan läsnä.

Yleensä rikkiyhdisteitä pidetään korroosion kannalta vaarallisimpina, mutta vieläkin enemmän reaktioiden kulkuun vaikuttavat typen oksidit, joita esiintyy erityisesti kaupunki-ilmassa liikenteen ansiosta. Typen oksideilla on todettu olevan korroosioreaktioita katalysoiva vaikutus etenkin rikkioksidien reaktioissa. [Arroyave & Morcillo 1995]. Typen oksidit voivat esiintyä sekä pelkistävinä (suojainvina) että hapettavina (syövyttävänä) aineina riippuen pitoisuuksista, muista aggressiivisista kaasuista ja ympäristössä olevista metallipinnoista. Typen oksideita sisältäviä kokeita suunniteltaessa on siis aina saatava myös tietoa tulevista kenttäolosuhteista ja tuotteen paljaana olevista metallipinnoitteista.

Hankalimpia jäljiteltäviä seikkoja on kloridikorroosio. Kaasuatmosfäärissä kloridikorroosio saadaan aikaan vain kloorikaasulla, joka ilmassa kosteuden vaikutuksesta hajoaa hypokloriitiksi ja kloridiksi. Eräänlainen karvalakkiversio saadaan, kun pinnoille ennen altistamista muille korrodoiville kaasuille ruiskutetaan erittäin laimeata alle 5 mg/L eli  $10^{-5}$ ... $10^{-4}$  mol/L pitoista NaCl-liuosta, joka kuivataan välittömästi. Koekappaleen kaikilla pinnoilla on tämän käsittelyn seurauksena suolajäämiä.

### **Soveliaat testaus- ja analyysimenetelmät**

Kun lähdetään tutkimaan tuotetta tai sen osia ilman epäpuhtauksien ja/tai korroosion mahdollisesti aiheuttamien vikojen tunnistamiseksi, olisi oleellista tutkia tuotteen ulko- ja sisäosien ulkonäkö huolellisesti ja kirjata kaikki havainnot muistiin. Tässä ensitarkastelussa olisi varottava kaikin keinoin aiheuttamasta pintoihin uutta kontaminaatiota käsistä tai esim. pölyn puhaltelua ja leviämistä muualle kuin missä sitä on ollut (taulukko 5.10).

Yhtä tärkeää olisi ennen syvällisempiä aineanalyyseja yrittää tutkia tuotteen tai sen osan sähköistä toimivuutta ja pyrkiä paikantamaan, missä päin vika esiintyy ja onko esim. johdinten välinen vuotovirta pintojen kontaminaation tai korroosion vuoksi syynä vikaan.

Kolmas tarkistettava osa-alue on yrittää selvittää, millaisessa käyttötilanteessa ja millaisissa ympäristöolosuhteissa häiriöitä tai vikoja on esiintynyt. Tässä tiedot mahdollisesta ukkosmyrskystä, kastumisesta tai muusta poikkeuksellisesta tilanteesta olisivat arvokkaita vikojen syitä ja mahdollisen uudelleen esiintymisen riskiä arvioitaessa.

Neljäs eikä suinkaan vähäisin selvitetävä seikka on tarkistaa myös vikaantuneen tuotteen spesifikaatioista, millaisilla pinnoitteilla, materiaaleilla ja suojaustekniikoilla tuote on valmistettu ennen kuin lähdetään etsimään syytä paikallisista olosuhteista. Jos tuotteessa on käytetty jo päällisin puolin huonoja ratkaisuja, voi olla aiheellista keskittyä vikojen olemuksen havainnointiin ja kyseisten vikakohtien spesifikaatioihin ja tehdä niiden perusteella päätökset korjaavista toimenpiteistä.

Taulukossa 5.10 on luettelo sellaisista menetelmistä, jotka soveltuvat korroosioon liittyvien vikamekanismien tutkimiseen ja laadun tarkastukseen.

*Taulukko 5.10. Korroosion havainnointi- ja testausmenetelmät.*

<b>Menetelmä</b>	<b>Soveltamisala ja soveltuvuus</b>
Visuaalinen tarkastus <ul style="list-style-type: none"> <li>• suurennukset 2x...40x...</li> </ul>	Ulkonäkö, pintojen laatu, vesivahingot, korrodoituminen, merkinnät
Valokuvaus <ul style="list-style-type: none"> <li>• optinen tai sähköinen sekä suurennuksen käyttö mikroskoopissa</li> </ul>	Korroosion havainnointiin ja dokumentointiin suositeltava, koska ilmiöiden luonne, sijainti ja vian eteneminen/syntyminen voidaan jäljittää
Pikatestit <ul style="list-style-type: none"> <li>• veden sumutus, kosteus, veteen upotus, suolaliuos, kuumailmapuhallus, happohöyry, teippitestausta, raaputus, kemikaalit, materiaalit kontaktissa kupariin</li> <li>• tulokset välittömästi tai muutamassa tunnissa</li> </ul>	Saadaan esille tuotteen tai pinnoitteen herkkyys perusrasitteille jo suunnitteluvaiheessa, soveltuu myös vastaanottotarkastusten yhteyteen
Ihmisperäisten aineiden vaikutusten testaus <ul style="list-style-type: none"> <li>• ihmisten omat päästöt, kädet, hiukset ja ihonhoitoaineet sekä tupakointi</li> <li>• hiki, hengitysilma: hiilidioksidi, aldehydit, metaani, ihovoiteet, puuterit, parfyymit, alkoholi, terva</li> </ul>	Saadaan selville ihmisen omien eritteiden ja ihonhoitoaineiden sekä tupakan vaikutus materiaaleille, jotka ovat kosketuksissa ihmisen kanssa laitetta käytettäessä. Muovien reagointi, kontaminoituminen, metallien korroosio. Katso esim. DIN V 53160-1 sylki- ja DIN V 53160-2 hikisimulointi sekä IEC 60068-2-70 käsitetesti.

<p>Pinnoitteen paksuuden, tasaisuuden, adheesion, huokoisuuden mittausta</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tulokset saadaan osittain välittömästi, voi vaatia päiviäkin</li> </ul>	<p>Suunnittelussa ja tuotannossa kelvollinen lopullisen varmuuden hakemisessa pinnoitteen laadusta</p>
<p>Materiaalianalyysit, SEM, XRF, HS GC-MS, IR...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• tulokset välittömästi tai päivissä</li> </ul>	<p>Syvälliset korroosiotutkimusvälineet, ainekoostumukset, korroosion laatu ja mekanismit, vikojen syyt</p>
<p>Kosteustestit RH 50...100 %</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• jaksolliset testit muutamasta päivästä muutama viikkoon, staattiset testit viikosta kuukausiin</li> </ul>	<p>Pinnoitteiden, materiaalien ja komponenttien kosteudensieto ja korrosio. Antavat nopeasti ensitiedon korrosio-ominaisuuksista, vastaa melko hyvin ulko-olosuhteita</p>
<p>Teho- ja lämpötilavaihtelut</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• muutamasta päivästä kuukausiin</li> </ul>	<p>Samanaikainen lämpövaihtelurasitus ja tuotteen tehon päälle- ja poiskytkeminen paljastavat lämpölaajenemisesta aiheutuvia muutoksia ja heikkoja liitoksia. Soveltuu myös hiertymiskorroosion tutkimiseen lämmön avulla.</p>
<p>Lämpövaihtelut -40...+55 °C...</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• testausajat tunneista pariin viikkoon, elinikätesteinä muutama kuukausi</li> </ul>	<p>Rakenteiden ja liitosten lämpölaajenemisesta aiheutuvat muutokset, lievempi kuin testi, jossa tehovaihtelu mukana</p>
<p>Kohotettu lämpötila</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• muutamasta tunnista kuukausiin</li> </ul>	<p>Kiihdyttää korroosiota materiaaleissa ja pinnoitteissa sekä liitoksissa ja korreloi hyvin käytön kanssa etenkin, jos laite on kuivana käytössä. Korrosio tulee näkyviin vasta viikkoja kestävässä testeissä, elinikätestit kuukausia</p>
<p>Kohotettu lämpötila ja mekaaninen puristus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• päiviä tai viikkoja</li> </ul>	<p>Soveltuu tiivistämateriaalien elastisten ominaisuuksien testaamiseen. Muodonmuutos ja muodon palautuminen puristuksen poistamisen jälkeen on helposti mitattavissa.</p>
<p>Monikaasutestit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, Cl<sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup></li> <li>• kohotettu lämpötila ja korkea kosteus samanaikaisesti (staattinen)</li> <li>• testausajat muutamasta päivästä kuukauteen</li> </ul>	<p>Komponenttien, kontaktien ja piirilevyjen pinnoitteiden korrodoituminen, jännitteettömät komponenttilevyt</p> <p>Sopii myös kootuille laitteille, jos tiedostetaan pintojen kuivuminen laitteen oman lämmön vuoksi ja tyydytään tarkistamaan ensireaktiot eikä välitetä pitkäaikaisista vaikutuksista.</p>

<p>Suolasumutestit</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>erilaiset standardisuolat vesiliuoksina, sumutetaan laitteen päälle ja laitetta pidetään kosteassa päiviä tai viikkoja sumutusten välillä</li> </ul>	<p>Soveltuu tukirakenteiden metalliosille ja metallikoteloille. Voidaan käyttää lievässä muodossa kapillaarirakojen toiminnan tutkimiseen, koska suolavesi imeytyy rakoihin ja kulkeutuu jopa pystysuoria paljaita pintoja ylöspäin. Voidaan käyttää myös lievänä jäljittelemään pintojen kontaminaation aiheuttamaa sähkönjohtavuuden kasvamista elektroniikan komponenttilevyn johdinkuviossa.</p>
<p>Pöly- ja vesitiiviystestit</p>	<p>Näiden avulla voidaan tutkia tuotteen todellista tiivyyttä hyvin hankalissa olosuhteissa. Auttavat löytämään ilman ja kosteuden kulkeutumistavan tuotteen sisäosiin.</p>
<p>Kenttäkoetilat, katetut ja kattamattomat ulko-olosuhdetilat</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>testausajat kuukausia ja vuosia</li> </ul>	<p>Kenttäkoetiloissa saadaan aidot ulko-olosuhteet, mutta ne harvoin vastaavat käyttöolosuhteita; sopii pinnoitteiden ja materiaalien perustutkimukseen</p>
<p>Ammattityypilliset olosuhteet</p>	<p>Sijoitetaan tuotteita määrärajoiksi ammattityypillisiin olosuhteisiin, kuten maataloustyöt, traktorit, kanalat, sikalat, jne. Näiden avulla altistetaan tuote aidoille olosuhteille ko. ammattityössä.</p>
<p>Homesienten kasvutestaus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>testausajat 28...84 vrk</li> </ul>	<p>Saadaan selville materiaalien alttius homesienten kasvulle kosteissa olosuhteissa. Koskee etenkin orgaanisia materiaaleja ja pinnoitteita.</p>
<p>Tärinätestaus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>tunnista vuorokauteen, satunnaistärinä tai sinimuotoinen tärinä</li> </ul>	<p>Paljastaa kohdat, joissa kontaktien liikkuminen ja hiertyminen voivat aiheuttaa käytössä ongelmia. Edellyttää tarkempaa visuaalista analysointia testien yhteydessä, jolloin säästetään huomattavan paljon aikaa vikaherkimpien kohtien löytämiseksi pinnoitteissa. Paljastaa huonot juotokset.</p>
<p>Iskutesti, pudotustesti</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>kestoajat minuutteja tai tunteja</li> </ul>	<p>Paljastaa huonoja liitoksia ja heikkoja rakenteita ts. tuotanto- ja suunnitteluvirheitä, ei sovellu korroosion tutkimiseen ellei toistomäärä ole suurehko</p>
<p>Hiertymiskorroosion testaus</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>tunneista viikkoihin</li> <li>liikeamplitudi 1...10...100 <math>\mu\text{m}</math>, toistotaajuus 1...10.. Hz</li> <li>(hiertymiskorroosio, kitkakorroosio)</li> </ul>	<p>Soveltuu mekaanisesta liikkeestä aiheutuvan vastakkaisten metallipintojen korrodoitumisen ja kulumisen tutkimiseen, koejärjestelyt hankalat, esikokeena kannattaa käyttää tärinätestausta, josta saa nopeasti tiedon onko jokin kohta altis hankauksen syntymiselle</p>

## **Kohotettu lämpötila**

Laitteiden toimivuuden testaamisessa käytetyt kuuma- ja kylmätestit antavat suhteellisen vähän tietoa tuotteiden korroosionsiedosta, koska kuivassa ilmassa ilmastollisen korroosion nopeus on alhainen ja vikamekanismit liittyvät lämpörappeutumiseen (IEC 60068-2-1/2, testit A ja B). Jos kuumassa tapahtuvien testien aikajännettä lisätään ja laitetta kuormitetaan sähköisesti, saadaan tyypillisissä luotettavuustesteissä (kesto aika satoja tai tuhansia tunteja) näkyviin hapettumisesta ja liitosten rappeutumisesta aiheutuvia vikoja. Elinikätestien tekeminen on kuitenkin tärkeää, koska ne antavat aitoa tietoa erilaisten materiaalien ja komponenttien rappeutumisesta, onhan korkea lämpötila tärkein tuotteita rappeuttava fyysinen rasite veden ohella.

## **Lämpötilan vaihtelu**

Perustesteinä käytetyt jaksottaiset lämpövaihtelutestit, kun niiden kesto aika on vain muutamia päiviä, soveltuvat laitteen valmistusvikojen ja materiaali-, komponentti- ja liitosvikojen testaamiseen (IEC 60068-2-1/2, testit A ja B). Lämpövaihtelu on tehokas keino tuotteiden varhaisvikojen paljastamiseen ts. rasituskarshintatestatukseen [KOTEL 239 Rasituskarsinta 1999]. Lämpövaihtelulla voidaan testata juotosliitosten jännityskorroosiota ja liittimien hiertymiskorroosio-ominaisuuksia. Lämpövaihtelu paljastaa myös komponenttien koteloiden ja rakenteiden vikaantumisherkyyden, joka johtuu eri materiaalien erilaisista lämpölaajenemiskertoimista. Jos lämpövaihteluun yhdistetään myös mekaaninen värinä, saadaan näin tehokas yhdistelmätesti, jolla saadaan nopeasti esille kaikkien liitosten toimivuus ja vaurioitumisrajat (IEC 60068-2-50 Z/AFc kylmä ja -51 Z/BFc kuuma).

Usein lämpövaihtelutesti yhdistetään syklisiin kosteustesteihin, jolloin aikaan saadaan voimakas kostuminen ja sen jälkeen jäätyminen ja nopea lämpeneminen (IEC 60068-2-38/61 Z/AD ja Z/ABDM). Tämä rasittaa kaikkia materiaaleja, joihin vesi absorboituu ja paljastaa huonot kontaktit ja eristysvälit sekä materiaalien rajapintojen viat.

## **Staattiset kosteustestit**

Staattisena kosteustesteinä käytetään laitetasolla ilmassa suhteellista kosteutta esim. 93 % RH ja lämpötiloja 30, 40 ja 55 °C (IEC 60068-2-3, testi Ca). Näissä testeissä, jotka tyypillisesti kestävät viikkoja tai kuukausia, tapahtuu kosteuden absorboitumista ja korrodoitumista. Koska testeissä laite on yleensä jännitteetön, vastaa olosuhde varastointia kosteissa olosuhteissa, jonka vuoksi korroosiomeka-

nismit ilmenevät eri tavalla kuin toimivassa laitteessa. Jos laite on näissä testeissä jännitteellinen, se vastaa käyttötilannetta paremmin, mutta oman lämmöntuoton vuoksi sisäolosuhteet ovat kuivemmat kuin ilman tehoa testatuissa laitteissa.

Komponenttien testaamiseen on olemassa joukko kiihdytettyjä testejä, joissa lämpötila on esim. 110, 120 tai 130 °C ja kosteus 85 % RH (IEC 60068-2-66, testi Cx) taikka yleisesti käytetty 85 °C / 85 % RH (IEC 60068-2-67, testi Cy). Näitä on kuvattu alla tarkemmin.

### **Syklinen kosteustesti**

Syklisessä kosteustestissä on tyypillisesti vaihteleva lämpötila esim. 25/55 °C tai 25/65 °C ja korkea kosteus 90...100 % RH (IEC 60068-2-30, testi Db). Tällainen testi pumppaa tehokkaasti kosteutta materiaaleihin ja koteloihin. Testeissä tapahtuu kondensoitumista, jonka vuoksi laitteen pinnat valuvat vettä näiden testien aikana. Testien lyhytaikaisuuden vuoksi ne voivat olla hyvin tehokkaita tutkittaessa kosteuden vaikutuksia. Tällä testillä ei kuitenkaan voida jäljitellä kovin hyvin olosuhteita, joissa ei ole jatkuvasti toistuvaa kondensoitumista.

### **Suolasumutesti**

Suolasumutestit on tarkoitettu metalliosien ja laitekoteloiden testaamiseen simuloitaessa merellisiä ja rannikko-olosuhteita (IEC 60068-2-52, testi Kb ja ISO 9227). Testi ei sovellu hyvin paljaiden elektroniikkaosien, kuten komponenttilevyjen ja komponenttien korroosion testaamiseen, koska testissä ruiskutetaan suolavettä testattavien osien päälle ja se tällaisena on liian rasittava eikä vastaa todellista tilannetta kuljetuksissa ja käytössä.

Testiä voi kuitenkin käyttää epäsuorasti hyväksi.

Jos halutaan tietää, miten helposti vesi tunkeutuu kotelon rakojen läpi sisäpuolelle ja kuinka se etenee laitteen sisällä, paljastaa suolavesisumutus melko pian ne kohdat, joissa suolavesi tunkeutuu laitteeseen kapillaaristen rakojen kautta. Vielä tehokkaampi on esim. suojatun muuntajan testaus upotettuna laimeaan suolaliuokseen, jolloin käämin ollessa jännitteeltään positiivinen liuokseen nähden, eristeiden vuotokohdat paljastuvat nopeasti.

Toisessa menettelyssä suolasumutesti tehdään suljetulle laitteelle, jonka sisällä on elektroniikkaa. Oletuksena on, että sumutuksen yhteydessä myös laitteen sisään pääsee hieman suolaa. Sumutuksen jälkeen laitetta pidetään korkeassa suh-

teellisessä kosteudessa. Testin jälkeen tutkitaan myös laitteen sisäosat mahdollisen korroosion varalta.

Suolasumutestejä voi yhdistellä myös kaasutestien kanssa. Esim. [ISO 21207] määrittelee viikon mittaisia testijaksoja, joissa laite käy vuoronperään suolasumutuksessa [ISO 9227] ja pidetään sitten määrääjän kaksikaasutestissä. Tällä menettelyllä voidaan päästä lähelle vaikeissa ulko-olosuhteissa vallitsevaa korroosiorasitusta.

### **Yksikaasutestit**

Aikaisemmin ilmastollista korroosiota on testattu käyttäen joko SO<sub>2</sub> tai H<sub>2</sub>S-kaasua, 25 °C lämpötilaa ja 75 % RH kosteutta (IEC 60068-2-42/43 testit Kc ja Kd). SO<sub>2</sub> soveltuu kultapinnoitteiden vertailevaan huokoisuustestaukseen ja koteloiden suojaavuuden testaamiseen. H<sub>2</sub>S-testi on tarkoitettu hopeapinnoitteiden ja hopeaseosten vertailevaan testaamiseen ja koteloiden suojaavuuden testaamiseen. Kummassakin testissä kaasupitoisuudet ovat suuria. Näitä testejä ei suositella kenttäolosuhteiden simulointiin, koska ne antavat melko yksipuolisen tuloksen korroosiosta todellisissa olosuhteissa. Näiden sijasta suositellaan monikaasutestejä, joissa myös eri yhdisteiden synergiavaikutukset saadaan esiin.

### **Monikaasutestit**

Ilman kaasumaisten epäpuhtauksien SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub> ja Cl<sub>2</sub> aiheuttaman korroosion testaamiseen soveltuvat parhaiten monikaasutestit (taulukko 5.11), joissa korrodoivia kaasuja sisältävä ilma virtaa testaustilassa jatkuvasti tilan läpi, jolloin voidaan taata testausolosuhteiden toistettavuus. Oleellista näissä testeissä on kosteuden 70...85 % RH tietoisesti valittu taso sekä kahden tai useamman kaasun samanaikainen käyttö. Näin menetellen saadaan suhteellisen hyvin tiettyjä tyypillisiä vikamekanismeja paljastavia ja tietynlaisia ympäristöolosuhteita jäljitteleviä testejä. Testausolosuhteet eivät sellaisenaan vastaa esim. toimisto- tai liikenneolosuhteita, koska todelliset olosuhteet vaihtelevat ja sisältävä paljon muitakin yhdisteitä kuin näissä testeissä käytetyt yhdisteet. Testeillä saadaan kuitenkin esiin samankaltaisia vikamekanismeja kuin kenttäkokeissa.

Testit soveltuvat ensisijaisesti erilaisten pinnoitteiden ja sähkömekaanisten komponenttien, kuten liittimien, kytkinten ja releiden testaamiseen. Niitä voi käyttää myös piirilevyjen/komponenttilevyjen testaamiseen, jos halutaan tietää tapahtuuko niissä korroosiotuotteiden ryömimistä.

Nämä testit soveltuvat myös elektroniikkayksiköiden ja komponenttien korrosioherkkyyden yleiseen seulontaan, ts. niitä voi käyttää tutkittaessa, missä osissa ja pinnoitteissa olemassa olevissa laitekonstruktioissa ne aiheuttavat korrosiota.

Testausmenetelmässä IEC 60068-2-60 Test Ke: Flowing mixed gas corrosion test, Menetelmä 1 (H<sub>2</sub>S + SO<sub>2</sub>) vallitseva vikamekanismi on huokoskorrosio, joten se sopii kulta- ja palladiumpinnoitteiden huokoskorrosiotesteihin, joissa jäljitellään lievähköjä sisäolosuhteita. Suositellut testausajat ovat tällöin 10...21 vrk. (ks. liite 1 kohta 2.4 *Huokoskorrosio*).

Korroosiotuotteiden ryömintä voidaan saada esiin kosteus- ja lämpötesteillä sekä monikaasutesteillä. IEC 60068-2-60 Menetelmä 3 (H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>), soveltuu kultatapinnoitteiden korroosiotuotteiden ryömimistesteihin, koska siinä vallitseva vikamekanismi on korroosiotuotteiden ryömintä huokoskorrosion ohella. Testi soveltuu vaativampien teollisten olosuhteiden jäljittelyyn.

IEC 60068-2-60 testien suositellut kestoajat ovat 4, 7, 10, 14 ja 21 vrk. Testausilman vaihtuvuuden tulee olla 3...10 kertaa tunnissa.

Taulukon 5.11 mukainen IEC 60:M2 on sama kuin Battelle II ja testi IEC 60:M3 on sama kuin Battelle III. [Henriksen et al. 1991] toteaa kymmenen vuorokauden testin Battelle II olosuhteissa vastaavan kymmenen vuoden käyttöä G1-olosuhteissa ja 20 vuorokauden testauksen Battelle III olosuhteissa vastaavan kymmenen vuoden käyttöä G3-olosuhteissa (vrt. kuva 5.7). Vastaavasti NEBS GR-63-CORE kohdassa 4.5.2 sanotaan 10 vrk testin vastaavan 15 vuoden käyttöä ja 14 vrk testin 20 vuoden käyttöä.

Monikaasutestejä käytettäessä on aiheellista huomata, että testien todelliset korrosiivisuudet voivat olla aivan samat monilla eri olosuhdeyhdistelmillä. Tämän vuoksi haettaessa oikeata testiä omaan sovellukseen, on tarkistettava millaiset käyttö-/kuljetusolosuhteet ovat kyseisessä tapauksessa, minkä jälkeen tehdään ratkaisu mitä testiä käytetään. Suositeltavaa on käyttää testejä, joissa ovat mukana kaikki edellä esitetyt kaasut yhtä aikaa, jolloin saadaan monia erilaisia käyttötilanteita vastaavat testausolosuhteet.

Myös standardissa [ISO 10062] on määritelty kaksi- ja kolmikaasutestejä, joiden kaasupitoisuudet ovat hieman suuremmat kuin em. IEC testeissä. Siinä on määritelty myös testaus lämpötilassa 40 °C kosteudella 80 % RH.



Standardi [ISO 21207] puolestaan määrittelee kaksikaasutestit, joita käytetään yhdessä [ISO 9227] mukaisen suolasumutestin kanssa. Testillä jäljitellään lähinnä meren rannikolla tai maanteilla esiintyviä suolapitoisia olosuhteita vuorotellen rikkidioksidi-/typpidioksiditestin kanssa. Testi soveltuu lähinnä laitekoteloiden testaamiseen.

*Taulukko 5.11. Monikaasutestien olosuhteet [IEC 60068-2-60, Henriksen et al. 1991, NEBS GR-63-CORE]. Kaasupitoisuuden yksikkö ( $\text{mm}^3/\text{m}^3$ ).*

	T (°C)	RH (%)	SO <sub>2</sub>	NO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> S	C <sub>12</sub>	Painon lisäys <sup>1)</sup>
IEC ..60:M1	25	75	500	..	100	..	1,0...2,0
IEC ..60:M2	30	70	..	200	10	10	0,3...1,0
IEC ..60:M3	30	75	..	200	100	20	1,2...2,2
IEC ..60:M4	25	75	200	200	10	10	1,2...2,4

NEBS indoor	30	70	100	200	10	10	1,0...1,4
NEBS outdoor	30	70	200	200	100	20	3,1...4,1
Battelle II	30	70	..	200	10	10	..
Battelle III	30	75	..	200	100	20	..
IBM	30	70	350	610	40	3	..
Liikenne <sup>2)</sup>	25	85	450	650	..	..	..
Televaihde <sup>2)</sup>	25	75	250	1 800	..	..	..

Meri/liikenne ISO 21207 <sup>3)</sup>	25	95	500	1500	.	..	5,9
--	----	----	-----	------	---	----	-----

1) [ $\text{mg}/(\text{dm}^2 \cdot 24 \text{ h})$ ] IEC 60068-2-60 antaa vastaavat OFHC-kuparista (Cu-OF/ISO 431:1981 Copper refinery shapes) tehtyjen testilevyjen painon lisäysnopeudet näissä testeissä. Näiden testilevyistä mitattujen painon lisäysten (korroosiomäärä) avulla varmistetaan testien yhdenmukaisuus tämän standardin kanssa. Testilevyjen paksuus  $\leq 0,5 \text{ mm}$  ja pinta-ala  $0,1...0,2 \text{ dm}^2$ .

Katso taulukon 5.4 alta yksikkövastaavuudet  $\mu\text{g}/\text{m}^3 \rightarrow \text{mm}^3/\text{m}^3$ .

- 2) Mainitut testit Liikenne ja Televaihde ovat pohjoismaisen korroosiotutkimuksen [Henriksen et al. 1991] yhteydessä käytettyjä testejä, joiden katsottiin vastaavan tyypillisiä liikenneolosuhteita ja televaihteiden sisätilojen olosuhteita kaupunkiympäristössä.
- 3) ISO 21207 sisältää aluksi suolasumutestin, jota seuraa kuivaus olosuhteessa  $25 \text{ °C} / 50 \text{ \% RH}$ . Tätä seuraa monikaasutesti siten, että kokonaisajaksi tulee yksi viikko. Viikon mittaisia jaksoja toistetaan sitten spesifikaation mukainen määrä [Eriksson et al. 2001].

## Auringon säteily (UV)

Auringonvalolla on erittäin suuri merkitys ulkotiloissa olevien pintojen korrodoitumiselle (rappeutumiselle). Erityisesti auringonvaloon sisältyvä ultraviolettisäteily rappeuttaa kaikkia pinnoitteita ja materiaaleja. Mutta koko säteilyteho, joka on luokkaa  $1\ 000\ \text{W}/\text{m}^2$  lämmittää hyvin tehokkaasti kaikkia säteilylle alttiita pintoja. Liitteen 1 kohdassa *1.8 Kosteuden kondensoituminen pinnoille* on käsitelty auringon säteilyn vaikutusta pintojen kostumiseen ja esitelty testeissä käytetty säteilyn energiaspektri.

IEC 60068-2-5 *Simulated solar radiation at ground level* mukaisella testillä voidaan testata suoran auringon säteilyn vaikutusta maan päällä. Siinä suositeltu säteilyteho on  $1\ 120\ \text{W}/\text{m}^2$  ja testausajat ovat 3, 10 tai 56 vrk erilaisin päivittäisin altistusajoin, jotka ovat 8 h/vrk, 20 h/vrk tai jatkuva säteilytys. Ympäristölämpötilat ovat  $40\ ^\circ\text{C}$  tai  $55\ ^\circ\text{C}$ . Tähän standardiin liittyy ohje IEC 60068-2-9 *Guidance for solar radiation testing*.

## Kiihdytetty kosteustestit (85/85 ja HAST)

Näitä kiihdytettyjä staattisia kosteustestejä  $85\ ^\circ\text{C} / 85\ \% \text{RH}$  ja HAST käytetään ei-hermeettisten, tavallisesti muoviin koteloitujen komponenttien kosteuden sietoisuuden testaamiseen. Testit on määritelty mm. standardeissa IEC 60068-2-66, IEC 60068-2-67 ja EIA/JESD22-A101-B, JESD22-A102-B, JESD22-A110-B ja JESD22-A112-A, joissa annetaan tarkemmat tiedot testien soveltuvuudesta ja käytöstä. Nämä testit eivät ole varsinaisia korroosiotestejä. Niiden avulla voidaan kuitenkin hyvin arvioida koteloiden kosteuden läpäisevyyttä eli sitä, onko jollain kotelotyypillä edellytykset selvittää tiettyntyyppisissä ilmastoissa, joissa on esim. korkea lämpötila ja kosteus. Testeissä korkea lämpötila ja suhteellinen kosteus ajavat vettä kotelorakenteen läpi. Absorboitunut vesi saa koteloissa olevat ioniset epäpuhtaudet liikkeelle, ja kotelot turpoavat mekaanisesti. Vesi saa päästessään mikropiirin pinnalle ja kosketuksiin johdinten kanssa pinnan ioniset epäpuhtaudet liikkeelle ja korrodoi metalleja aiheuttaen näin vikoja ja virhetoimintoja, jotka indikoivat kotelon läpäisseen vettä näissä testeissä.

[Sinnadurai 1996, Plastic...] on vertaillut kiihdytettyjen kosteustestien käytettävyyttä komponenttien luotettavuuden arvioimisessa. Hän on esittänyt taulukon 5.12, joka perustuu hänen kehittämälleen muovikoteloiden kosteuden sietoa kuvaavalle mallille [Sinnadurai 1985, Handbook of Microelectronics Packaging and Interconnection Technologies], joka ottaa huomioon veden absorptio ja läpäisevyyden muovikoteloissa. Mallin mukaan  $1\ 000\ \text{h}$  ajan kestävä HAST-testaus vastaa 20 vuoden käyttöä lämpötilassa  $29\ ^\circ\text{C}$  ja  $86\ \% \text{RH}$  kosteudessa.

Vastaava testaus 85 °C / 85 % RH-olosuhteissa kestää noin 5 100 h. Sinnadurai toteaa myös luotettavuustestautustietojen korreloivan hyvin Intiassa kentältä koottujen tietojen kanssa. HAST ja 85/85 testeillä voidaan tutkia muoviin koteloitujen komponenttien kosteudensietoa ja vertailla erityyppisten koteloiden toimivuutta.

*Taulukko 5.12. Kiihdytettyjen luotettavuustestien testausajat muoviin koteloituille mikropiireille simuloitaessa erilaisia ympäristöolosuhteita [Sinnadurai 1996, Plastic...].*

Ilmaston laatu (keskimäärin)	85/85- testausaika (h)	HAST- testausaika (h)
	85 °C, 85 % RH	108 °C, 90 % RH
Lauhkea, laitetila (30 °C, 25 % RH)	300	60
Lauhkea, yleinen (12 °C, 72 % RH)	500	100
Trooppinen, kattavuus 95 % Intian olosuhteista (29 °C, 83 % RH)	4 100	850
Trooppinen, kattavuus 95 % Intian olosuhteista (29 °C, 86 % RH)	5 100	1 000
Trooppinen, ankara (35 °C, 90 % RH)	10 000	2 000

Oheista Sinnadurai-HAST mallia voidaan käyttää kosteustestien kestoajan arvioimiseksi muoviin koteloitujen mikropiirien kosteudenkestoisuustestejä suunniteltaessa.

$$t_s = \frac{t_{life}}{\exp\left\{0,00044[(RH_{test})^2 - (RH_{amb})^2] + 7000\left(\frac{1}{T_{amb}} - \frac{1}{T_{test}}\right)\right\}} \quad (5.1)$$

- $t_s$  on tarvittava testausaika simulointia varten (h)
- $t_{life}$  on simuloitava elinkaaren pituus (h)
- $RH_{test}$  on suhteellinen kosteus testissä (%)
- $RH_{amb}$  on suhteellinen kosteus käytössä (%)
- $T_{test}$  on testauslämpötila (K)
- $T_{amb}$  on käyttölämpötila (K).

Kosteustestien käyttöä on käsitelty myös [Peck 1987]:n julkaisussa Accelerated Testing Handbook, joka käsittelee yleensä puolijohdekomponenttien kiihdytettyjä luotettavuustestejä.

## Homesienten kasvutestaus

Homeen kasvaminen korkeassa kosteudessa on elektroniikassa yleensä lähinnä visuaalinen ongelma, mutta sellaisenaankin se on joskus hyvin kiusallinen, koska homesienet kasvavat pakkausmateriaaleissa ja muissa orgaanisissa materiaaleissa, joista ne saavat tarvitsemaansa ravintoa.

Taulukko 5.13. Testeihin suositellut homesienilajit [IEC 60068-2-10 1988].

	Homesienilaji	Vaikutuskohteet
1	<i>Aspergillus niger</i>	Kasvaa runsaasti monilla materiaaleilla ja kestää kuparisuoloja.
2	<i>Aspergillus terreus</i>	Muovimateriaalit
3	<i>Aureobasidium pullulans</i>	Maalit ja lakat
4	<i>Paecilomyces variotii</i>	Muovit ja nahka
5	<i>Penicillium funiculosum</i>	Monet materiaalit, erityisesti tekstiilit
6	<i>Penicillium ochrochloron</i>	Muovit ja tekstiili, kestää kuparisuoloja
7	<i>Scopulariopsis brevicaulis</i>	Kumi
8	<i>Trichoderma viride</i>	Selluloosatekstiilikuidut ja muovit

IEC 60068-2-10 *Test J and guidance: Mould growth*. määrittelee erilaisten homeitiöiden avulla tehtävät homesienten kasvatustestit elektroniikassa (taulukko 5.13). IEC suosittelee kahta testaustapaa, toisessa puhdas pinta altistetaan sellaisenaan homesieni-itiöitä sisältävälle vesisuspensiolle ja toisessa versiossa pinnoille levitetään joitain sieniravinteita sisältävää liuosta sienikasvun edistämiseksi, jonka jälkeen niille levitetään myös homesieni-itiösuspensio. Testauslämpötila on 28...30 °C ja ilman suhteellinen kosteus > 90 % RH. Kondensoitumista ei sallita.

## 5.11 Analyysimenetelmien käyttäminen

Korroosion tutkiminen ja toteaminen on verraten helppoa, jos tutkittavalla pinnalla on selvästi havaittavissa korroosiotuotteita. Hyvin usein jo 10...50-kertaisella suurennuksella tehty tarkastelu valostereomikroskoopilla antaa vihjeitä tapahtumien kulusta. Analyysimenetelmien käytössä on järkevintä edetä yksinkertaisista menetelmistä yhä hienostuneimpiin aina välillä saatuja tuloksia punnitien. Vikaanalyysija tehdessä kannattaa myös valokuvata esim. koko laite ja sen osat sekä korroosiokohteet, jotta korrodoitumisen syyt ja tulosten tulkinta varmistuisivat

analyysin edessä. Syntyneiden vaurioiden ja korroosiotuotteiden analysointiin soveltuvia tehokkaimpia käytettävissä olevia analyysimenetelmiä on elektronimikroskopia (SEM) ja mikroskooppiin liitetyt analytyttiset menetelmät (EDS, AFM, ESCA, SIMS).

Elektronimikroskopian haittapuolena on, että sillä ei saada juurikaan tietoa orgaanisista yhdisteistä. Näiden selvittäminen käy parhaiten infrapuna-analytyttisillä (IR) menetelmillä, nykyisin jopa suoraan näytteen pinnalta. Yhdistämällä sekä orgaanista että epäorgaanista analytiikkaa voidaan saada hyvin luotettava kuva vaurioon johtaneista korroosioilmiöistä.

Materiaalin koostumusta voidaan tutkia esim. röntgen fluoresenssimenetelmällä (XRF, X-ray fluorescence spectroscopy), jolla havaitaan fluori ja sitä raskaamat aineet.

Materiaalin mahdollisesti korrodoivia haihtuvien jaokkeiden päästöjä voidaan puolestaan mitata kaasukromatograafilla, jossa tutkittavia materiaalinäytteitä lämmitetään ampullissa halutussa lämpötilassa (esim. 60 °C ja 100 °C) haluttu aika ja analysoidaan sitten niistä massaspektrometrillä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden määrä (HS GC-MS headspace and gas chromatography).

Vaikka analytiikka tarjoaakin mahdollisuuksia, on saadut tulokset aina verifioitava käytäntöön erilaisia testausmenetelmiä käyttäen. Eritoten näitä tarvitaan, kun selviä merkkejä ei ole korroosiosta löydettävissä ja kuitenkin vikojen syyt jäävät hämäräksi.

Testausmenetelmien käytölle asettaa olosuhteiden toteamiseksi tarvittava analytiikka joskus rajoituksia. Esim. monikaasutestien suhteen on rajoituksia. Koeolosuhteiden todentaminen testikammiossa – lämpötila ja suhteellinen kosteus, kaasujen pitoisuus – on edellytyksenä testeissä. Testausolosuhteiden mittausmahdollisuuksia rajoittaa kaasujen analysointitekniikka. Matalilla kaasupitoisuuksilla vain fluoresenssimenetelmät ovat riittävän herkkiä, mutta ne eivät toimi, jos analysoitava kaasu sisältää liian paljon vettä. Käytännössä 30 °C ja 75 % suhteellinen kosteus ovat maksimiolosuhteet fluoresenssimenetelmän käytölle.

## **5.12 Olosuhdeseuranta**

Laitteiden käyttöolosuhteiden tunteminen on tarpeen, jotta olosuhdevaatimukset voitaisiin asettaa mahdollisimman realistisiksi. Tietoa tarvitaan samanaikaisesti ilman lämpötilasta, kosteudesta ja korrosiivisuudesta laitteiden lähiympäristössä

ja sisällä, jotta niiden perusteella voitaisiin tehdä päätelmiä laitteen sisäolosuhteista. Yksittäisen korrodoivan kaasun määrän jatkuva mittaaminen sen sijaan saattaa olla turhaa, koska korrodoivia aineita on ilmassa niin paljon.

Ehkä tarkoituksenmukaisin menettely laitteen olosuhdeseurantaan olisi sijoittaa sen sisätilaan lämpö-, kosteus- ja korrosiivisuusanturit ja tiedonkeruumikrofiiri, joiden avulla saataisiin tieto niistä todellisista olosuhteista, mitä laitteen sisällä vallitsee elinjakson eri vaiheissa. Korrosiivisuuden mittauksessa voidaan käyttää samoja metalleja kuin elektroniikassa käytetyt kupari, hopea, nikkeli, teräs ja sinkki. ISA-S71.04 Airborne Contaminants standardissa käytetään kuparin korrodoitumista mittana eri olosuhteiden korrosiivisuudelle (taulukko 5.7).

Purafil on toteuttanut tähän metallien korrodoitumiseen perustuvan erillisen On-Guard mittauslaitteen, jolla voidaan jatkuvasti seurata ilmatilan korrosiivisuutta. Purafil:n laitteessa anturimetalleina on kupari, hopea tai kultapinnoite, joiden korrodoitumista ja kontaminoitumista mitataan havaitsemalla anturin massan muutos ns. kvartsikide microbalance-menetelmällä (QCM) vrt. [Jaeger 1997, Muller 1999]. QCM:llä voidaan havaita ilmassa olevan alle  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  kaasupitoisuuden aiheuttama korrosio ja se mahdollistaa kokonaispitoisuuksien jatkuvan seurannan. Tämä menetelmä antaa tiedon siitä, mikä on ko. ilmatilan kokonaiskorrosiivisuus. Sen avulla ei voida suoraan erotella yksittäisiä korrodoivia aineksia ellei pinnoille tehdä aineanalyysia. Kyseistä menetelmää voidaan käyttää herkyytensä ansiosta esim. puolijohdevalmistuksessa puhdistilojen korrosiivisuuden seurannassa standardin [SEMI Standard F21-95] tarkoittamissa olosuhteissa.

## 6. Korroosionsiedon parantaminen tuotteessa

### 6.1 Mikroilmastoon vaikuttaminen

Valmiin laitteen läheisyydessä olevaan ilman laatuun voidaan vaikuttaa kolmella tasolla:

- sijaintipaikan valitseminen ulko-/sisäolosuhteissa (katso 6.3)
- lähiympäristön olosuhteisiin vaikuttaminen ja
- laitteen sisäosien olosuhteisiin vaikuttaminen.

Kussakin laite-/käyttösovelluksessa voidaan soveltuvin osin käyttää erilaisia keinoja, jotka lieventävät vallitsevan makroilmaston taikka laittilan ilman korrodoivia vaikutuksia. Kaikissa tapauksissa tavoitteena on vähentää pöly- ym. kontaminaatiota, estää kastuminen ja minimoida kaasukontaktit.

#### Lähiympäristö

Sisätiloissa tarkoituksenmukaisin keino on varmistaa soveltuvalla ohjeistolla, että laitteen käyttöolosuhteet järjestetään riittävän lieviksi, laite sijoitetaan lämmitettyihin, kuiviin tiloihin ja tarvittaessa edellytetään ilmastointia ja jopa kaasumaisien epäpuhtauksien poistamista ilmasta. Laitteen ohjeistuksessa olisi annettava puhdistusohjeet ja varoitettava erilaisten kemikaalien mahdollisesti aiheuttamista korroosioriskistä. Ilmastoimattomissakin olosuhteissa olisi varmistettava ettei laite pääse kastumaan, sitä ei pidetä taivasalla, siihen ei puhalleta pölyistä ilmaa, sen läheisyydessä ei ole voimakkaita lämpölähteitä, se suojataan suoralta auringonvalolta ja kiinteissä asennuksissa käytetään rakenteellisia suojauskeinoja pahimpien olosuhteiden välttämiseksi.

Teollisissa sovelluksissa, joissa käyttöpaikalla voi olla hyvin korkea korrodoivien aineiden määrä (prosessiteollisuus), laitteiden sijoittelua kannattaa rajoittaa ja käyttää esim. puhdasilmapuhallusta laitteen sijaintipaikalla.

Laitteiden ja komponenttien kuljetuspakkauksissa voidaan käyttää tilapäistä korroosiosuojausta (VCI-materiaalit, Volatile Corrosion Inhibitor), pakkauksen ilman kuivaamista esim. silikageelin tai bentoniitin avulla ja korrodoivia kaasuja imeviä materiaaleja (SAP Surface Active Paper). Kukin menetelmä toimii vain täysin suljetussa tilassa. Silikageeliä on oltava niin paljon, että se kykenee imeämään kaiken kosteuden tilasta. Jos näin ei käy, silikageelistä muodostuu kosteutta ylläpitävä materiaali ja tilanne on jopa pahempi kuin ilman silikageeliä. VCI-inhibiittoreiden kanssa vallitsee analoginen tilanne; liian pieni määrä inhibiittia

aiheuttaa syöpymisnopeuden kasvun, koska metallin pinta on suojattu vain paikoin – pinnalle muodostuu näin anodi-katodi pareja ja edellytykset syöpymiselle on näin luotu. SAP-materiaalien hyödyllisyys perustuu niiden kykyyn absorboida korrodoivia kaasuja päästämättä niitä takaisin suojattavaan tilaan [Kelly 1999].

Asennustyömailla tapahtuvassa varastoinnissa olisi käytettävä ainakin katoksia tai suojarakennuksia sekä olisi suojattava asennetut rakenteet välittömältä likaantumiselta ja kastumiselta.

### **Sisäosien olosuhteet**

Laitteen korroosioriskin kannalta on oleellisinta huolehtia siitä, että laitteen sisäosissa on riittävän kuivat ja puhtaat olosuhteet ja lämpötila ja sen vaihtelut minimoidaan. Ongelmaksi käytännön ratkaisuissa muodostuu usein joku seuraavista:

- liian suuri ilmanvaihto lisää kontaminaatiota ja/tai nostaa kosteustasoa
- lämpötilan korkeus tai vaihtelu lisää korroosioriskiä
- kosteutta kertyy laitteen sisälle riittämättömän ilmanvaihdon vuoksi.

Suljetussa laitekotelossa, jollainen on esim. matkapuhelin, luontevin ratkaisu on valmistaa kotelo suhteellisen tiiviiksi ja hengittäväksi, jolloin sisään pääsee vettä lähinnä kapillaariraoista ja höyryn muodossa materiaalien läpi (ks. liite 1 kohta 3.5 *Kapillaari-ilmio*). Vesihöyry tulee ulos puoliläpäisevien kalvojen kautta (vrt. liite 1 kohta 3.9 *Vettä hylkivät ja läpäisevät materiaalit* ja GORE-TEX®). Kaasut pääsevät laitteen sisään kuten vesikin, mutta pöly ja nestemäiset kemikaalit jäävät pääosin ulos. Laitteen oma lämpeneminen kuivattaa laitetta ja hidastaa oleellisesti korroosiota. Kuljetusolosuhteissa laitteen sisällä on sama kosteustaso kuin ulkopuolella.

Suljetussa tilassa oleva kosteus ja ilman epäpuhtaudet kertyvät kylmimmille pinoille. Jos jonkin pinnan lämpötila on alle kondensoitumisrajan, se kerää itseensä vettä ja kuivaa ilmatilaa. Tätä seikkaa voi käyttää hyväksi molempiin suuntiin. Toisaalta voidaan tehdä laite mahdollisimman tasalämpöiseksi, jolloin kondensoitumista ei ehkä tapahdu taikka tehdään jokin osa muita kylmemmäksi, jolloin vesi kertyy sille ja voidaan välttää arempien osien kastuminen.

Avoimessa laitekotelossa, joka voi olla esim. tehokkaasti jäähdytetty moottorin ohjain, ongelmana on liian suuri kontaminaatio elektroniikassa. Kontaminaatiota voidaan minimoida järjestämällä jäähdytys siten, että jäähdytykseen tarvittava suuri ilmamassa ohjataan vain passiivisiin jäähdytysripoihin ja muu elektroniikka suljetaan puolitiiviisti mahdollisesti käyttäen hengittäviä aukotuksia, jolloin



elektroniikka säilyy puhtaana eikä kosteuden vaikutus ole niin suuri kuin kontaminoituneessa laitteessa.

Vähäisempi, mutta kuitenkin toimiva pölysuoja voidaan toteuttaa järjestämällä arimpien osien ympärille joko suojaseinämä tai kotelo, joka estää jäähdytysilman mukanaan tuomaa kontaminaatiota.

Kaksiosaiset elektroniikkaliittimet, joissa koskettimet ovat rungon suojassa, tarjoavat melko hyvän korroosiosuojan nimenomaan ilman sisältämän pölyn ja kaasujen suhteen. Vaikutus perustuu pääosin siihen, että runko suojaa mekaanisesti kosketinaluetta, jolloin kaasukontaktit ja pölyn kulkeutumismahdollisuudet kontakteihin ovat minimaaliset.

Ulkona sijaitsevissa laitekaapeissa, joissa oma teho voi olla satoja watteja, voidaan vähentää korroosioriskejä, jos lämmönsiirto tehdään joko passiivisella tai aktiivisella lämmönvaihtimella ja laitteen sisällä kierrätetään vain puhdasta kiviä ilmaa. Ulkoilman käyttö minimoituu tässä. Lisäongelmana saattaa olla aurinkon paisteen ja öisen lämmön haihtumisen taikka vesisateen jäähdyttävästä vaikutuksesta johtuva veden kondensoituminen seiniin ja ääritapauksissa sen tippuminen elektroniikan päälle. Tätä vaikutusta voi rajoittaa käyttämällä lämmöneristeitä ulkopinnoilla. Toinen tapa on jatkuvasti toimivassa laitteessa jakaa hukkalämpöä tasaisesti laitteen ulkopinnoille, myös lattiatilaan, jolloin kondensoituminen minimoituu.

Eräs ongelma-alue ulos sijoitettavissa laitekoteloissa voi olla se, että esim. alas sijoitetut laiteliittimet ovat lähellä ilmantuloaukkoja ja ovat kylmiä, jolloin niihin kondensoituu vettä. Tätä ongelmaa voi vähentää johtamalla laitteen omaa lämpöä liittimiin, jolloin kondensoituminen estyy.

## **6.2 Sijoituspaikan valitseminen**

Laitteen sijainnilla ja paikallisella suojaustekniikalla voi olla ratkaiseva merkitys kontaminoitumisen, kastumisen tai lämmön aiheuttamiin ongelmiin sekä sisä-että ulkotiloissa.

Tyypillinen ongelma on yleensä sellainen, että osa asiakkaille toimitetuista laitteista tai sen osista vikaantuu tai alkaa toimia epätarkasti tavallista nopeammin kontaminaation ja kastumisen taikka aurinko säteilyn vuoksi. Näissä vioissa lähdetään helposti hakemaan uusia pinnoitemateriaaleja, tulkitaan ongelma pai-

kalliseksi saastuneisuudeksi, tms. vaikka perussyynä olisikin yksittäisen laitteen tai sen osan sijoittaminen epäedullisesti ko. käyttöpaikalla.

Esim. ympäristöä havainnoivan mittausanturin sijoituspaikan valinnalla ja suojaamalla sitä ulkoisen rakenteen avulla voidaan minimoida ilmasta peräisin olevan pölyn, kaasumaisten epäpuhtauksien, sateen, valuvan veden, veden tiivistymisen ja auringon suoran säteilyn vaikutuksia. Kaikki nämä haitat vaikuttavat laitteiden ulkopintoihin ja edelleen jäähdytysilman ja muiden lämmönjohtumisteiden kautta laitteen sisäosiin.

### **Kontaminaation rajoittaminen**

Koska ilmassa on aina liikenteen, tuulen ym. lähteiden nostattamaa pölyä ja muita korrodoivia aineksia, tapahtuu pintojen kontaminoitumista sisä- ja ulkotiloissa aina eniten sellaisissa paikoissa, joissa ilmavirtaus on havaittavissa ihmisenkin aistein (virtausnopeudet  $> 0,1$  m/s). Hyviä esimerkkejä sisätiloissa tällaisista paikoista ovat ilmastoinnin raitisilma-aukkojen läheisyys ja lämpöpattereiden yläpuoliset seinäpinnat, joihin hiili- ym. pöly tarttuu näkyvästi. Jos tällaisessa paikassa on jokin ympäristöä havainnoiva anturi (lämpötila, kosteus, savu, liike), voi se kontaminoitua ja vikaantua tai antaa hieman virheellisiä lukemia yllättävän nopeasti.

Ulkotiloissa voidaan tätä ilman virtauksen aiheuttamaa ongelmaa rajoittaa tuulisuojilla tai katoksilla (harvaseinäinen latokin antaa hyvän suojan).

### **Kastumisen rajoittaminen**

Kastuminen sisätiloissa voi johtua erilaisista vesivahingoista, laitteiden tai tilojen pesemisestä taikka kondensoitumisesta. Jos laitteen normaalikäyttöön kuuluu sen pintojen taikka lähiympäristön peseminen vedellä, olisi laite tai sen osa sijoitettava siten, että pinnoille tuleva vesi pääsee esteettä pois valumareittejä pitkin ja ettei laitteen kotelossa ole kapillaarirakoja, joihin vesi ja erilaiset kemikaalit imeytyvät helposti.

Joskus laitteita pestään painevedellä, jolloin voimakas ja kylmä vesivirta jäähdyttää nopeasti laitetta, mikä puolestaan syntyvän alipaineen vuoksi imee lisää ilmaa ja vettä laitekoteloon. Tällaisessa tapauksessa sijoittelu, kotelon tiiviynen valitseminen sekä tuuleutumisen varmistaminen ovat keinoja veden kertymisen minimoimiseksi.

Rakennuksissa saattaa syntyä sellainen tilanne, että lämmintä kosteaa sisäilmaa pääsee ulos seinä- tai kattorakenteiden aukkojen läpi, jolloin ilman vesi kondensoituu kaikkiin ulompana oleviin kylmempiin pintoihin. Jos tällaiseen paikkaan asennetaan elektroniikkaa tai johtoliitoksia, voivat nämä olla märkinä suuren osan ajasta, jolloin korroosioriski on erittäin suuri.

Ulkotiloissa kastuminen johtuu sateesta ja ilman lämpötilan vaihteluista. Nopeasti alkava sade jäädyttää tehokkaasti laitteiden ulkopintoja, mikä voi aiheuttaa kondensoitumista ja sadeveden imeytymistä laitteen sisään. Antureita ja erilaisia päätteitä voidaan suojata yksinkertaisesti käyttämällä niiden päällä sopivaa lippaa tai pientä katosta. Isompia laitteita käytettäessä pelkästään katos tai hupumainen irtosuoja tarjoaa melko hyvän suojan sateelta ja suoran auringonvalon sekä öisin tapahtuvan lämmönhaihtumisen aiheuttamilta kondensoitumisongelmilta (vrt. liite 1, kohta 1.8 *Kosteuden kondensoituminen pinnoille*). Lämmittämätön suojarakennus olisi näitäkin parempi vaihtoehto.

Mastorakenteissa (antenni- ym. mastot) sekä sade- että kondenssiveden valuminen pitkin rakenteita on tavallista, koska masto rakenteellisista syistä kerää aina vettä. Kondensoituminen on tavallista, koska rakenteet ovat taivasalla, jolloin ne jäähtyvät öisin ympäristöönsä kylmemmiksi ja keräävät sisä- ja ulkopinnoilleen vettä. Hyvin korkeissa mastoissa (televisio) yläosa on usein pilvessä, josta vesi tiivistyy kaikille kiinteille pinnoille.

Mastojen putkirakenteet voivat olla hyvinkin ongelmallisia, koska niissä vesi kondensoituessaan sisäpinnoille ei pääse haihtumaan eikä ehken valumaankaan pois, jolloin putken sisällä on jatkuvasti korkea kosteus ja putki syöpyy sisältäksinsä. Ongelma korostuu siitähän, että putket voivat olla huonosti pinnoitettuja sisäpinnoiltaan. Rakenteiden tulisi olla tuuleutuvia ja veden poistuminen olisi varmennettava.

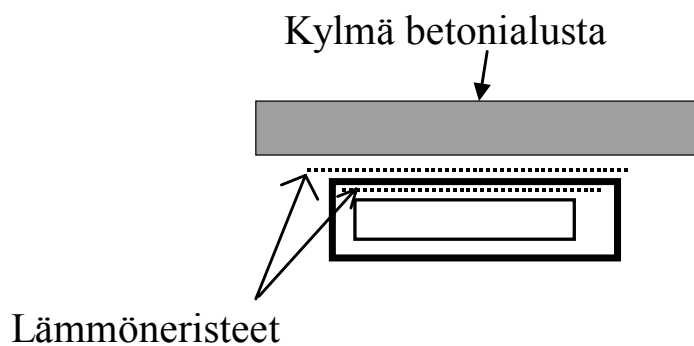
Ulos sijoitettavat kaapelit keräävät pinnoilleen ja sisäänsä vettä, jos kaapelit ovat alttiina sateelle, valuvalla vedelle ja ne ovat paljaina, jolloin myös öinen jäähtyminen kerää niihin kondenssivettä. Kaapelin ulkopinnalla ja sisällä oleva vesi valuu alaspäin ja voi korrodoida laiteliitokset ellei kaapeliin järjestetä liitoskohdasta alaspäin suuntautuvaa mutkaa ja veden poistoa [vrt. SFS-EN 50173].

### **Asennusalustan valitseminen**

Pienten laitekoteloiden, mittausantureiden, hälyttimien, jne. asentamisessa ulkotiloihin ja lämmittämättömiin sisätiloihin on syytä varoa asentamasta laitetta suoraan betoni- tai teräsalustalle ilman lämmöneristystä, koska alustan lämpötilan

muutoksen aikavakio ja lämmönjohtavuus voivat aiheuttaa voimakasta kondensoitumista ja elektroniikan kastumista.

Kuvan 6.1 tapauksessa kylmän jakson jälkeen, kun ilma lämpenee, pysyy massiivinen alusta kylmänä, jolloin vesi alkaa kondensoitua ko. pinnalle ja sitä vasten oleviin osiin. Jos laitteen kuori ja asennuspinta johtavat hyvin lämpöä, seuraa laite alustan lämpötilaa. Tämän vuoksi laitteen kylmälle sisäpinnalle kondensoituu vettä, joka valuu/tippuu elektroniikan päälle ja aiheuttaa nopeasti korroosiota ilman lämmitessä. Tällaista ilmiötä on vaikea tunnistaa, koska samat laitteet esim. puupinnalla tai muuten eristetyillä pinnoilla voivat toimia aivan virheettömästi, koska ne pysyvät kuivina, kun rakenne pysyy lämpimämpänä.



*Kuva 6.1. Ulos tai sisälle asennettava anturi kylmällä massiivisella pinnalla.*

Mikäli ko. laitteen sisään tai mieluummin ulkopinnalle järjestetään lämpöä eristävää ts. lämpöä huonosti johtavaa materiaalia, ei kondensoitumista tapahdu haittaavassa määrin, koska laite lämpiää nopeammin ulkolämpötilan noustessa.

Vastaavanlainen ongelma erilaisissa mittausantureissa tulee öisin, kun pinnat säteilevät lämpönsä taivaalle (vrt. liite 1, kohta 1.8 *Kosteuden kondensoituminen pinnoille*) ja jäähtyvät jopa parikymmentä astetta ympäristöään kylmemmiksi, jolloin kondensoituminen ja huurtuminen on säännönmukainen seuraus. Tässäkin tapauksessa hyvä tapa olisi järjestää anturin ja taivaan väliin "näkösuoja", jolloin kondensoitumisriski vähenisi oleellisesti. Tällaista tekniikkaa käytetään yleisesti säähavaintoasemilla, joissa mittausantureita ympäröi "lunnunpönttö". Pintojen lämmittäminen on kuitenkin useissa tapauksissa paras tapa välttää kondensoitumisriskiä.

### 6.3 Kotelon tiiviiden valinta

Koteloinnin perustehtävänä korroosioriskin vähentämiseksi on suojata elektronikkaosia seuraavasti:

- vähentää mekaanista räsitystä
- minimoida kaasu- ja pölykontaktit sisäosissa
- estää veden, pölyn ja eliöiden pääsy sisäosiin
- vähentää veden kondensoitumisriskiä
- vähentää lämpötilan vaihtelua sisäosissa.

Kotelorakenteiden olisi myös läpäistävä elektroniikassa kehittyvä hukkalämpö sekä taattava riittävän hyvä sähkömagneettinen suojaus (EMC-ominaisuudet).

Laitteen käyttötavan mukaan (ulkoasennus, liikkuva käyttö, ajoneuvo, sisätila) on koteloinnin tiiviys ja elektroniikkaosien oma korroosionsietotaso suhteutettava toisiinsa, jotta löydetään toimiva ja samalla hinnaltaan edullinen ratkaisu.

Kotelorakenteessa voidaan hyödyntää monikerrostekniikkaa, jossa ulkoa lähtien eri kerroksille voidaan antaa valikoidut suojaavat tehtävät:

- Uloin kerros suojaa rakennetta auringon säteilyltä (lämpö-, ultraviolettisekä näkyvän valon säteily), sateelta, tuulelta ja mekaanisesti (katos, lippa, uloin mekaaninen verhous).
- Keskikerros suojaa lämpötilan vaihteluilta ja minimoi kaasujen (vesihöyry, ym.) vaihdon ulkoa sisälle.
- Sisin kerros komponenttilevyillä ja komponenteissa suojaa varsinaisen elektroniikan laitekotelon sisään pääsevältä kosteudelta ja epäpuhtauksilta.

Ideaalisessa mallissa uloin kerros estää ulkoisten räsitysten ja saasteiden suoran pääsyn laitteen sisätilaan estäen myös ilman vaihtumisen ulko- ja sisäosien välillä. Sisäpuolella kiertää puhdas kuiva ilma, joka mahdollistaa halpojen materiaalien ja pinnoitteiden käytön elektroniikassa. Ideaaliratkaisuun kuuluu tehokas lämmönsiirtomekanismi, jonka avulla hukkalämpö siirretään sisätiloista ulkotilaan ja samalla pidetään ulkopinnat hieman ulkolämpötilaa korkeammassa lämpötilassa, jolloin ne pysyvät kuivempina.

Tätä samaa kerrostekniikkaa voidaan periaatteessa soveltaa isoissa laitteistoissa ja esim. pienissä matkapuhelimissa.

Elektroniikkalaitteen kotelon tiiviiden valinnassa (suojausluokitus IP, katso kohta 6.4) voidaan ottaa strategiseksi lähtökohdaksi kunkin sovelluksen mukaan esim.

- tiivis suljettu kotelo (vesitiivis tai IP 66, ei avoimia aukkoja)
- hengittävä avokotelo (vähintään avoimia kapillaariaukkoja, esim. IP 65)
- avoin kotelo, luonnollinen konvektio (IP 21...)
- avoin kotelo, pakotettu konvektio (IP 21...)
- avoin kehikko (IP 00 ei peittäviä kotelorakenteita).

Tiivis suljettu kotelo tarjoaa mahdollisuuden käyttää sisäosissa halpaa pinnoitustekniikkaa ja tiheää pakkaustekniikkaa. Korroosioriski vähenee oleellisesti ja sisäosissa on mahdollista käyttää myös esim. sellaisia kosketinpinnoitteita, joita käytetään yleensä vain lievissä sisäolosuhteissa. Hyvin tiheitä johdinkuvioita voidaan käyttää, koska vuotovirtariskit ja metallin vaeltaminen on vähäisempää.

Tiivis suljettu kotelo estää yleensä veden ja kaasujen pääsyn kotelon sisäpuolelle taikka hidastaa näiden kulkeutumista siten, että sisätilat säilyvät kuivina ja puhtaina. Kondensoitumisriski on vähäinen paitsi, jos valmistusvaiheessa sisätiloihin jää kosteaa ilmaa. Tiiviin kotelon valmistuksessa onkin varmistettava joko suoja-kaasun tai tyhjiön avulla ettei sisäosiin jää kosteutta, joka tiivistyy pinnoille lämpötilan laskiessa alle kastepistelämpötilan (katso kohta 1.7 *Ilman suhteellinen kosteus* ja kohta 1.8 *Kosteuden kondensoituminen pinnoille*).

Selkeä riski tällaisen kotelon käytössä on vaikeus säilyttää kotelo riittävän tiiviinä vaikeissa ulko-olosuhteissa koko tavoitellun elinkaaren ajan. On mahdollista, että aikaa myöten koteloon pääsee vettä, jolloin korroosioriski lisääntyy. Huono "tiivis" suljettu kotelo voi olla huonompi ratkaisu kuin avoin hengittävä kotelo.

Eriyisen ongelmallista kotelon riittävän tiiviiden saavuttaminen on ympäristöissä, joissa esiintyy ajoittain hyvin voimakkaita vesisuihkuja ja vesi on suolapitoista. Tällaiset olosuhteet ovat yleisiä merellä ja maanteillä, joilla jäänestoon käytetään suolaa. Suolainen vesi imeytyy kapillaariraosta koteloiden sisään ja korrodoi tehokkaasti metalliosat. Ajoneuvojen merkkivalot ja valaisimet ovat esimerkkeinä tällaisiin olosuhteisiin joutuvista tuotteista. Ongelmaa hankaloittaa vielä sekin, että muovit läpäisevät vettä kohtalaisen hyvin, jonka vuoksi ilman hyvin suojattuja ja pinnoitettuja johdinkuvioita taikka umpivalua, elektroniikkaa on vaikea saada toimimaan edes muutamaa kuukautta.

Tiiviin kotelon kaltainen ratkaisu on suojamassaan valettu laite, jossa ei ole lainkaan ilmatilaa. Pienten laitteiden ja yksiköiden kohdalla tämä on mahdollista. Huolto tapahtuu vaihtamalla tuote uuteen.

Hengittävä avokotelo suojaa sisäosia välittömältä ulkoilman vaikutukselta ja vedeltä, mutta kotelorakenteessa olevat ilmaa ja vesihöyryä läpäisevät kalvot tai tiivisteet päästävät ilman paineen (lämpötilan vaihtelut sisäosissa ja ulkona) vaihtelun vuoksi ilmaa ja kosteutta sisään, mutta myös ulos. Jos hengittävyys on riittävän suurta, syntyy sisälle riittävä ilmanvaihto ja sisäilma pääsee myös kuivumaan, mitä edistää laitteen oma lämpö. Tässä rakenteessa on varauduttava kondensoitumisen aiheuttamaan kastumiseen sisäosissa, jonka vuoksi pinnoitteiden laatuun ja johdinvälien riittävyys on kiinnitettävä huomiota. Tämä kotelotyyppi lienee paras kompromissi tiiviiden suhteen ulkotiloihin kiinteästi sijoitettaville laitteille ja kannettaville laitteille kuten esim. matkapuhelimet ja erilaiset kenttäkäyttöiset mittaus- ja radiolaitteet.

Avoin kotelorakenne vapaata konvektiota käytettäessä suojaa sisäosia lähinnä mekaaniselta kosketukselta ja mahdollisesti roiskevedeltä, mutta se sallii ulkoilman vapaan kierron laitteen sisäosien kautta. Ulkoilman kierto ei välttämättä ole kovin suurta, mutta suuritehoisissa ( $\cong 100$  W) sovelluksissa ilman kierto voi tulla kohtalaisen suureksi.

Avoimessa rakenteessa ilmassa olevat kaasut, pöly ja kosteus pääsevät melko vapaasti laitteen sisätiloihin, jonka vuoksi pinnoitteiden laatuun, paikalliseen johdinkuvion suojaukseen (juotteenestopinnoite ja lakkaus) ja komponenttien oman rakenteen tarjoamaan suojaukseen on panostettava. Ulos sijoitetuissa laitteissa on varauduttava usein toistuvaan kondensoitumiseen ja jäätymiseen talvella.

Avointa kotelorakennetta käytettäessä voidaan ottaa strategiaksi käyttää paremmin koteloituja komponentteja, hyviä liitinpinnoitteita ja hyvin suojattuja piirilevyjä, jolloin komponenttitasolla korroosionsietoisuus on riittävä.

Avoin kotelorakenne pakotettua konvektiota käytettäessä saattaa olla jäähdytyksen vuoksi välttämätön suuritehoisissa laitteissa. Tässä vaihtoehdossa käsittelemätöntä ulkoista ilmaa (huone- tai ulkoilma) imetään tai puhalletaan laitteen sisälle elektroniikan jäähdyttämiseksi. Kun ilmavirtaus pyyhkii elektroniikkaosia, kertyy pinnoille helposti pölyä, ilman kosteus vaikuttaa samanlaisena kuin ulkotilassa ja ilman epäpuhtauskaasut pääsevät suoraan kaikkiin sisäosiin. Tällainen suurehko nopeudella ( $> 1$  m/s) puhallettava ilma ylläpitää suurempaa korroosioriskiä kuin seisova ulkoilma (1 m/s vastaa n. yhden asteen lämpötilan alenemaa vedenhaihtumisasteikolla, eli ilman näennäisen suhteellisen kosteuden nousua 5 % RH). Erityisen riskialtis tällainen konstruktio on, jos laitteeseen tuleva ilma otetaan suoraan ulkoa, jolloin kosteus ja korrodoivat pölyt (hiekkä, suolat, jne.) kertyvät suoraan elektroniikkaosien pinnoille ja liittimiin.

Tällaisessa tapauksessa olisi edullisinta järjestää jäähdytys siten, että raakaa ulkoista ilmaa puhalletaan vain jäähdytysripiihin ja muu elektroniikka suojataan suoralta puhallukselta taikka sijoitetaan hengittävään koteloon. Tässä konstruktiossa laitteen lämpösuunnittelulla voidaan oleellisesti vaikuttaa siihen, ettei elektroniikkaosia tarvitse jäähdyttää ulkoisella ilmalla.

Tällaisissa voimakasta tuuletusta vaativissa rakenteissa voidaan käyttää hyväksi myös kevyitä mekaanisia suojia, jotka estävät ilmavirran suuntautumisen esim. liittimiin ja suojaamattomiin johdinkuvioihin. Näin menetellen vältetään pölyn kertyminen aroille metallipinnoille ja koskettimiin. Tavallinen kaksiosaisen levyliittimen runko tarjoaa hämmästyttävän hyvän suojan sekä ilmassa olevia korrodoivia kaasuja ja etenkin pölyä vastaan, koska ilman kierto jää vähäiseksi rungon sisäosissa, joissa koskettimet ovat.

Avoimen kehikon tapauksessa elektroniikka on täysin altis lähiympäristön olosuhteille. Tässä vaihtoehdossa vain ympäristön puhtaus ja ilman kuivuus mahdollistavat elektroniikan käytön. Tähän tapaukseen voidaan soveltaa samoja menetelyjä elektroniikkaosien suojaamiseksi kuin avorakenteisessa kotelossa.

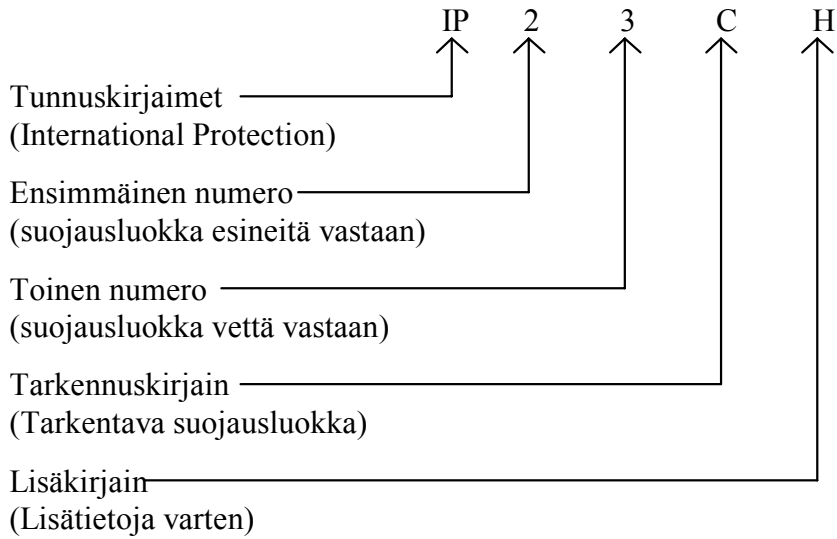
## **6.4 Kotelon suojausluokitus, IP-koodi**

Tässä esitetty suojausluokitus (kuva 6.2) on esitetty standardissa IEC 60529 Degrees of protection provided by enclosures (IP Code, IP on International Protection). Sen mukaan erilaisten koteloiden suojausluokka ilmaistaan neli-/kuusi-kirjaimisella koodilla. Suojausluokituksen avulla ilmaistaan toisaalta ihmisen mahdollisuus kosketella sähkölaitteen jännitteellisiä osia (ensimmäinen numero) kädellä tai erilaisten työkalujen avulla ja toisaalta suojausluokka veden haitallisen vaikutuksen ilmaisemiseksi.

Jos jotain merkkiä ei käytetä, se korvataan X:llä esim. IPX5; tässä mekaaninen suojausluokka on jätetty määrittelemättä. Taulukoissa 6.1 ja 6.2 on annettu IEC:n luokituksen mukaiset IP-koodit.

Jos laite täyttää suojausluokat IPX7 tai IPX8, se ei välttämättä siedä paineellisia vesisuihkuja, jonka vuoksi se on tällöin erikseen testattava suojausluokkia IPX5 ja IPX6 varten, jos näin halutaan.





Kuva 6.2. Koteloiden suojausluokan ilmaiseminen IEC:n IP-koodin avulla.

Taulukko 6.1. IP-luokituksen suojausluokat **mekaanisia** esineitä vastaan.

Ensimm. numero	Suojaustason kuvaus	Testimäärittely
0	Ei suojausta	..
1	Suojattu yli $\varnothing$ 50 mm esineitä vastaan	Testisondi $\varnothing$ 50 mm ei saa kokonaan mennä sisälle
2	Suojattu $\geq \varnothing$ 12,5 mm esineiden kosketukselta	Testisondi $\varnothing$ 12,5 mm ei saa kokonaan mennä sisälle
3	Suojattu $\geq \varnothing$ 2,5 mm esineiden kosketukselta	Testisondi $\varnothing$ 2,5 mm ei saa mennä sisälle yhtään.
4	Suojattu $\geq \varnothing$ 1,0 mm esineiden kosketukselta	Testisondi $\varnothing$ 1 mm ei saa mennä sisälle yhtään
5	Pölysuojattu	Pölyn pääsyä ei ole täysin estetty, sisälle pääsevä pöly ei saa häiritä laitteen toimintaa eikä vaarantaa turvallisuutta
6	Pölytiivis	Pöly ei saa tunkeutua sisälle

Edellä mainittua tarkentavaa kirjainta (viides merkki, esim. IP24C) käytetään ilmaisemaan henkilöturvallisuuden suojausluokkaa, jos se on suurempi kuin varsinainen mekaanisen suojauksen luokka (käytetään kirjaimia A, B, C ja D). Kuudetta merkkiä (lisäkirjain) käytetään ilmaisemaan laitteen lisäominaisuuksia (esim. H on suurjännitteinen laite), kuten IP54XH.

Taulukko 6.2. IP-luokituksen suojausluokat **vettä** vastaan, toinen numero.

Toinen numero	Suojaustason kuvaus	Testimäärittely
0	Ei suojausta	–
1	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä	Pystysuoraan tippuvat pisarat eivät saa haitata laitteen toimintaa
2	Suojattu pystysuoraan tippuvalta vedeltä, kun koteloa on kallistettu 15°	Pystysuoraan tippuvat pisarat eivät saa haitata laitteen toimintaa, kun laitetta kallistetaan 15° mihin tahansa suuntaan pystyasennosta.
3	Suojattu vesisuihkulta	Sivuille ruiskutettu vesi aina 60° kulmaan ylöspäin ei saa haitata laitteen toimintaa
4	Suojattu roiskevedeltä	Mistä tahansa suunnasta roiskutettu vesi ei saa haitata laitteen toimintaa.
5	Suojattu vesisuihkulta	Mistä suunnasta tahansa suunnasta suihkutettu vesi ei saa haitata laitteen toimintaa
6	Suojattu voimakkaalta vesisuihkulta	Mistä suunnasta tahansa voimakkaasti suihkutettu vesi ei saa haitata laitteen toimintaa
7	Suojattu tilapäistä veteenupotusta vastaan.	Vettä ei saa tunkeutua haitallisessa määrin sisään, kun testi tehdään standardin mukaisessa paineessa määrätyn ajan.
8	Suojattu jatkuvaa veteenupotusta vastaan.	Vettä ei saa tunkeutua haitallisessa määrin sisään, kun laite on jatkuvasti vedessä ostajan ja myyjän sopimassa paineessa määrätyn ajan.

Katso myös testi IEC 60068-2-68 Environmental testing – Part 2: Tests – Test L: Dust and sand.

## 6.5 Piirilevy

Piirilevyllä tarkoitetaan tässä elektroniikassa käytettyjä metallisin johdinkuvioidin varustettuja eristelevyjä, joissa on yksi tai useampi johdinkuviokerros.

Laitteiden korroosionhallinnan kannalta piirilevy on yksi tärkeimmistä komponenteista, jonka ominaisuudet vaikuttavat erittäin paljon laitteen valmistusominaisuuksiin ja luotettavuuteen käyttöolosuhteissa. Piirilevyn kriittiset ominaisuudet korroosion mahdollisia vaikutuksia arvioitaessa ovat:

- johdinkuvion ja sen liitosten sähköinen johtavuus
- eristetyksi tarkoitettujen johdinten hyvä sähköinen eristys
- materiaalien kosteuden absorptio-ominaisuudet
- johdinkuvion eristäminen ulkoista kontaminaatiota vastaan
- materiaalien korroosionsietoisuus ja kemiallinen epäaktiivisuus.

Piirilevyn valmistusprosessissa käytetään runsaasti erilaisia kemikaaleja ja vettä, mitkä levyille jäädessään aiheuttavat sekä juotosongelmia että voivat kiihdyttää korroosiota. Yksinkertaistaen hyvä piirilevy on valmiina kuiva ja puhdas, johdinkuvio on kemiallisesti ja mekaanisesti hyvin suojattu ja juotosalueet sekä muut paljaat metallikuviot on pinnoitettu hyvillä korroosiota sietävillä pinnoitteilla.

Elektroniikkasuunnittelija voi vaikuttaa hyvin paljon piirilevyn korroosionsietoon johdinkuvion mitoituksen avulla. Periaatteellinen suunnittelusääntö on yksinkertainen: Maksimoidaan eristysvälit ja johdinleveydet ja suojataan johdinkuvio ulkoista kontaminaatiota vastaan. Käytännössä olisi vältettävä mahdollisimman pitkälle hyvin ohuita johtimia ja kapeita pitkiä johdinvälejä. Huono yhdistelmä on kaksi leveää johdinta, joiden välissä on hyvin kapea eristysväli. Tällaisen yhdistelmän eristysresistanssi on pieni ja korrodoituvaa materiaalia on runsaasti. Kapeissa johdinväleissä kentänvoimakkuus on suuri, mikä nopeuttaa korroosion kehittymistä.

Piirilevyjen juottamiskestoisuuden (lämmönsiedon) varmentamiseksi ne tulisi suunnitella lämpöteknisesti mahdollisimman symmetrisiksi. Jokaisen johdotuskerroksen metallialueiden tulisi olla tasapainossa ja eri kerrosten tulisi sijaita symmetrisesti, jotta piirilevy ei taipuisi juottamisen yhteydessä.

Piirilevyn valmistusprosessi itsessään aiheuttaa lukuisia korroosiota ja veden kertymistä edistäviä ominaisuuksia. Valmistusprosessista jää levyille erilaisia ionisia epäpuhtauksia, jotka johtavat sähköä, piirilevymateriaali voi jäädä kosteaksi, johdinkuvion reikiin voi adsorboitua vettä. Levyt voidaan pakata liian nopeasti muoviin, jolloin niihin voi jäädä vettä, joka kondensoituu, kun pakkaus jäähtyy. Levyypakkaus voi myös kastua sateen vuoksi. Levyjen juottuvuus voi myös olla huono, jos juotosalueet ehtivät vanhentua liikaa, pinnat hapettuvat ja korrodoituvat aina, kun ne ovat alltiina ilman ja sen epäpuhtauksien vaikutukselle. Piirilevyihin valmistusprosessissa jäänyt kosteus voi korrodoida kuljetuksen aikana johdinkuvion juotosalueita [Erickson-Natishan et al. 1999]. Piirilevyihin jäänyt kosteus voi myös vaurioittaa piirilevyä ja sen johdinkuviota juotettaessa, kun vesi höyrystyy ja repii levyn rakenteita levyn lämmitessä yli 200 °C:seen.

Piirilevyn johtimien pinnoittamisen tarkoituksena on toisaalta suojata kuparista johdinkuviota korroosiolta ja toisaalta varmistaa juotosalueiden juottuvuusominaisuudet. Paljas kupari, sen suojana käytetty tina, hopea tai nikkeli hapettuvat ja korrodoituvat suhteellisen nopeasti käytännön kuljetus ja varastointiolosuhteissa. Lisäksi, jos juotosprosessi on useampivaiheinen ts. komponentteja juotetaan kahdessa tai kolmessa vaiheessa levyn molemmille puolille, voivat edelliset juotosvaiheet korkean lämpötilan ja/tai juoksutteen vuoksi korrodoida nopeasti juottamattomat johdinalueet. Tällöin prosessin myöhäisemmissä vaiheissa voi esiintyä juottuvuusvaikeuksia. Näiden ongelmien välttämiseksi johdinkuvion oikea pinnoittaminen ja sopivien juoksutteen käyttäminen ovat ratkaisevia.

Lähteessä [KOTEL 243] on esitelty mahdollisuutta käyttää juotosalueiden suojana orgaanisia juottuvuuden säilyttäviä pinnoitteita (OSP) perinteisen tinalyijypinnoitteen (HASL Hot air solder levelling) sijasta. Näiden etuina verrattuna tinalyijy- ja muihin metallipinnoitteisiin on ohut kerrospaksuus, hyvä pinnan tasaisuus, hyvä mittatarkkuus ja kyky estää korroosiota kuljetuksen, varastoinnin ja toistuvan juottamisen aikana. Tehdyissä kosteustesteissä (85 °C / 85 % RH, 500 h) orgaanisilla suojapinnoitteilla ei todettu luotettavuusongelmia eikä haittaavaa korroosiota. Testaustulokset olivat osin parempia kuin HASL-tekniikalla pinnoitetuilla levyillä. Koska OSP-pinnoitteita käytettäessä komponentti liitetään suoraan tinapitoisen juotospastan välityksellä kuparipintaan, on tässä riskinä, että kupari-tina-rajapintaan syntyykin mekaanisesti hauras Cu-Sn-yhdiste. Ennen OSP-pinnoitteiden käyttöä on hyvä tutkia aiotun OSP-pinnoite-, juoksute-, pasta-yhdistelmän toimivuus. Muita OSP-pinnoitelähteitä ovat mm. [Artaki 1993, De-Biase 1993, Roslund et al. 2002, Parquet et al. 1995].

Piirilevyjen johdinkuvio suojataan yleisesti juotteenestopinnoitteella, joka ohjaa juotteet vain juotosalueille ja suojaa johdinkuviota mekaanisesti (IPC-SM-840C). Juotteenestopinnoitteen paksuus on yleensä alle 25 µm.

Tällainen pinta läpäisee kosteutta hyvin. Kosteissa olosuhteissa ohut juotteenestopinnoite on verrattavissa märkään rättiin, joka on asetettu levyn pinnalle. Kuitenkin pinnoite tarjoaa jonkin verran myös korroosiosuojaa, koska hyvin tehdyn pinnoitteen läpi menevä vesi muodostaa pinnoitteen ja piirilevyn pinnan/johdinten päälle vain yhden molekyylikerroksen paksuisen vesikalvon. Koska ionien liikkuminen edellyttäisi useampaa molekyylikerrosta vettä, tapahtuu korrodoituminen ja metallin vaeltaminen hitaammin kuin paljaalla pinnalla. Koska juotteenestopinnoite läpäisee hyvin vettä, on sillä päällystettyjen johdinkuvioiden eristysresistanssi pienempi kuin päällystämättömien johdinkuvioiden (liite 1, kohta 2.19 *Kosteuden ja geometrian vaikutus piirilevyn eristysresistanssiin*). Pinnoitteen pa-

ras hyöty on kuitenkin siinä, että se suojaa jonkin verran johdinkuviota ulkoisen kontaminaation vaikutuksilta, jolloin korroosioriski vähenee.

## 6.6 Komponenttilevyn valmistus

Komponenttilevyllä tarkoitetaan piirilevyä, jolle on asennettu komponentteja. Komponenttilevyn valmistusprosessiin sisältyy ladontaa, juottamista, johdinten käsittelyä, testausta ja korjaavia toimenpiteitä sekä mahdollisesti suojalakkaus viimeistelytoimineen.

Ensimmäinen korroosioneston pääalue on huolehtia siitä, että johdinten väliset eristykset ovat hyviä, johdinväleissä ei ole tinäjäämiä eikä muuta sähköä johtavaa materiaalia.

Toinen korroosioneston kannalta oleellinen alue on varmistaa juotos- ym. liitosten hyvä laatu, koska kaikki mekaaniset ym. viat herkistävät laitteen korroosion vaikutuksille. Jos juotos on huono, se voi rappeutua nopeasti eikä kestä tavallisiakaan lämpö- ja mekaanisia rasituksia. Juotosmateriaalien laatu vaikuttaa oleellisesti juotosten pitkäaikaiseen kestävyYTEEN ja erilaisten korroosiomekanismien syntymistodennäköisyyteen. Juottuvuuden varmistaminen niin piirilevyjen juotosalueissa (vrt. kohta 6.5) kuin kaikissa levyille asennettavissa komponenteissa on parhaita keinoja välttää liitosten rappeutuminen käytössä.

Eräs suunnittelun ongelma-alue on huolehtia siitä, että komponenttilevy lämpiäisi juottamisen aikana mahdollisimman tasaisesti, jottei levyille jäisi kylmiä, huonosti juottuvia alueita eikä toisaalta lämmitettäisi toisia alueita liikaa. Komponenttilevyä suunniteltaessa tulisikin pyrkiä jakamaan komponentit mahdollisimman tasaisesti koko piirilevyn alueelle. Toisen ongelmatyyppin voi aiheuttaa komponenttien kytkeminen suuriin metallialueisiin. Näitä ovat mm. maatasot, joihin varsinkin RF-komponenteilla tulee olla hyvä kontakti. Laajat kuparialueet “imevät” tehokkaasti lämpöä, jolloin juotosalue voi jäädä liian kylmäksi ja juotos tällöin vaillinaiseksi. Samalla voi osa juoksutteesta jäädä reagoimatta, jolloin piirilevyn pinnalle jää kemikaaleja. Nämä aineet voivat myöhemmin aiheuttaa komponenttilevyn yllättävän nopean korroosion. Toisaalta liian suuri lämpömäärä voi aiheuttaa pinnoitteiden murtumia, välimetallien syntymistä sekä prosessikemikaalien kemiallisia reaktioita, jotka kaikki voivat heikentää tuotteen luotettavuutta.

Kolmas korroosioneston pääalue on tarve tehdä levyistä mahdollisimman puhtaita ts. niillä saisi olla vain vähän ionisia ja/tai vettä absorboivia epäpuhtauksia, kuten

juoksutejämiä. Huomattava määrä epäpuhtauksista tulee kokoonpanossa ihmisten käsistä ja iholta, komponenttilevyjä ei pitäisi käsitellä paljain käsin. Nämä vaatimukset ovat osittain ristiriidassa pesemättömyystavoitteen kanssa.

Juotosprosessin laadun seurannassa kannattaa tarkkailla, miten juoksutejämmät ovat levinneet piirilevyille. Jos juoksute kasaantuu selvästi joillekin alueille, esim. levyn reunaan, todennäköinen seuraus on, että tällä alueella tulee esiintymään korroosio-ongelmia ja vuotovirtoja.

Käytettäessä juotosprosessissa ns. ei-pestäviä juoksutteita (pesemätön, no-clean flux), jotka jäävät komponenttilevyille juottamisen jälkeen, olisi varmistettava etteivät juoksutejämmät ole kemiallisesti aktiivisia, vettä absorboivia eikä korrosiivisia. Jäämien tarttuvuuden levyille pitäisi olla hyvä ja niiden pitäisi olla tiiviitä, jotteivät ne muodostaisi vettä absorboivaa kerrosta johdinkuvion päälle. Jos ei-pestäviä juoksutteita aiotaan käyttää lakattavissa piirilevyissä, on lakan tarttuvuuden, pysyvyyden ja kosteuden kertymisriskin vuoksi ennen ko. yhdistelmän käyttöä tehtävä soveltuvat kiihdytetyt kosteustestit (esim. 85 °C / 85 % RH), jotta varmistettaisiin yhdistelmän toimivuus. Jos juoksutejämmät reagoivat lakan kanssa kemiallisesti, voi tämä mitätöidä lakan suojausvaikutuksen.

Mikäli komponenttilevyt suojataan lakkauksella [MIL-I-46058C] tai irtokalvoilla, on levyt pestävä hyvin ennen suojausta, koska juoksutejämmät ja muut epäpuhtaudet huonontavat suojamateriaalin adheesiota ja muodostavat suojakalvon ja levyn johteiden väliin johtavan välikerroksen, jossa etenkin veden läsnä ollessa tapahtuu ionien ja metallien vaeltamista ts. syntyy helposti korroosiota. Liimapinnalla varustettujen suojakalvojen käyttö on riskialtista, koska kalvon alle jää aina kapillaarirakoja, joihin vesi kertyy ja eikä pääse pois, tämä kiihdyttää oleellisesti korroosiota.

## **6.7 Komponenttilevyn valmistuksen puhtaus**

KOTELin raportissa [KOTEL 207] Pesumenetelmät pintaliitostekniikassa on esitelty komponenttilevyillä tavallisesti esiintyviä epäpuhtauksia. Raportin mukaan ne ovat jaettavissa hiukkasiin, kuten hiukset ja noki, orgaanisiin aineisiin, kuten ihovoiteet ja valmistusprosessissa käytettävät materiaalit, epäorgaaniset aineet, kuten suolat ja hapot, sekä mikrobit, kuten virukset, bakteerit ja sienet. Jos aineet absorboivat vettä ja läsnä on ionisoivia aineita, vuotovirrat ja elektrolyysissä syntyvät kemialliset aineet kiihdyttävät piirilevyn vanhenemista. Epäorgaaniset aineet voivat helposti ionisoitua ja johtaa sähköä.

Esimerkkinä piirilevyjen puhtausvaatimuksista mainittakoon standardin ANSI/J-STD-001D kohdassa 8 *Puhtausvaatimukset piirilevyille* annetut vaatimukset piirilevyille ennen juottamista (8.1.2) ja komponenttilevyille juottamisen jälkeen (8.3). Tämän mukaan piirilevyn ja komponenttien liitosjohdinten on oltava niin puhtaat, että ne täyttävät juottuvuusvaatimukset. Jos peseminen kuuluu vaatimukseen, on se tehtävä juottamisen jälkeen niin nopeasti kuin suinkin, mieluiten tunnin sisällä juottamisesta, jotta juoksutejäämät saadaan poistettua. Juoksutejäämien määrät luokitellaan em. standardin kohdassa 8.3.5 kolmeen luokkaan

- 1 < 200  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
- 2 < 100  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$
- 3 < 40  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ,

kun mittaus tehdään IPC-TM-650, testausmenetelmän 2.3.27 mukaisesti. Lisäksi vaatimukseen kuuluu, että komponenttilevyllä on IPC-TM-650, testausmenetelmällä 2.3.26 (dynaaminen) tai 2.3.26.1 (staattinen) mitaten enintään 1,56  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  ionisia tai ionisoituvia juoksutejäämiä laskettuna NaCl-ekvivalenteina.

Tämä ionisten epäpuhtauksien määrä vastaa IPC-A-600E/IPC-6012:ssa annettua pintaresistanssin suositusarvoa  $> 2 \cdot 10^6 \Omega\text{cm}$  [KOTEL 222]. Korroosionesto-maalauksessa pinnan katsotaan olevan puhdas, kun sillä NaCl-pitoisuus on korkeintaan 1  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  (10  $\text{mg}/\text{m}^2$ ). Standardissa SFS-EN-ISO 8502-6 esitetään ns. Bresle-menetelmä, jolla maalattavan pinnan puhtaus analysoidaan. Jos piirilevy suojataan juotteenestopinnoitteella, on kiinnitettävä huomiota siihen ettei juotteenestopinnoitteen alle jäisi ionisia epäpuhtauksia, jotka johtavat kostuessaan sähköä ja mahdollistavat korroosion.

Standardissa ANSI/J-STD-001D kohdassa 8.3.9 opastetaan käyttämään IPC-TM-650, testausmenetelmää 2.3.38, jos halutaan kontrolloida orgaanisten ei-ionisten epäpuhtauksien määrä piirilevyillä. Tämän menetelmän erotuskyky on luokkaa 10  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$  orgaanisia jäämiä komponenteissa tai levyllä. Vaatimusraja on itse päätettävä.

Juottamisen onnistumiseen käytetään joko erikseen levitettäviä juoksutteita tai pastan joukkoon sekoitettuja juoksutteita. Juoksutteet sisältävät aktivaattoreita, jotka reagoivat metallipintojen kanssa muodostaen juotoslämpötilassa kaasumaisia aineita. Juottamisen jälkeen aktivaattorit ja syntyneet reaktiotuotteet pyritään nykyisin sitomaan paikoilleen piirilevyllä. Esim. hartsipohjaisissa juoksutteissa ne jäävät loukkuun hartsiin. Jos tällaista komponenttilevyä lämmitetään uudelleen yli hartsin sulamispisteen, reaktiot käynnistyvät uudelleen ja ne saattavat johtaa lievään korroosioon. Mikäli aineita on liikaa tai käytetty lämpöenergia on

riittämätön, levyille voi jäädä reagoimattomia aktivaattoreita. Liian pitkä juotosaika tai liian suuri lämpö määrä taas voi johtaa ei-toivottuihin kemiallisiin reaktioihin, jolloin syntyvät kemialliset yhdisteet voivat aiheuttaa ongelmia.

Lasikuitulaminaatin hartsi voi reagoida juoksutteen happojen kanssa muodostaen estereitä. Pesuttomassa prosessissa voivat esterit jäädä piirilevyn pinnalle. Mikäli juoksute sisältää kloridi-ioneja, voivat ne reagoida bromattujen fenolien kanssa (palonestoaine) vapauttaen bromidi-ioneita. Nämä reagoivat juotteen pinnalla lyijyn kanssa valkeaksi lyijybromidiksi. Kosteuden ja ilmassa olevan hiilidioksidin läsnä ollessa voi lyijybromidista muodostua lyijykarbonaattia, joka voi aiheuttaa vuotovirtojen kasvua. Juoksutteet sisältävät usein glykoleja ja niiden johdannaisia, jotka voivat reagoida juotteenestopinnoitteen kanssa tyypillisissä juotosolosuhteissa. Seurauksena on pintaresistanssin pieneneminen.

Komponenttilevyn ulkonäöstä ja sen luotettavuudesta voitaneen yhteenvedona todeta, kuten raportissa [KOTEL 230] *Vesipohjaiset juoksutteet*: Visuaalinen puhtaus, ionisten jäämien määrä ja luotettavuus eivät korreloi aina keskenään matalan kiintoaineen juoksutteita käytettäessä, sillä eri jäämät ovat korroosiovaikutuksiltaan erilaisia. Epäpuhtauskasaumina ne ovat kuitenkin luotettavuusriski (katso ANSI-J-STD-004).

Aikaisemmin komponenttilevyt pestiin juottamisen ja kokoonpanon jälkeen. Tämän tarkoituksena oli poistaa komponenttilevyn pinnalta prosessijäämät. Tämä mahdollisti aktiivisempien juoksutteiden käytön, jolla taattiin helpompi juottavuus myös hankalille komponenteille. Nykyisin useimmat laitevalmistajat ovat luopuneet pesusta ja siirtyneet ns. pesuttomaan prosessiin, jolloin syntyneet epäpuhtaudet jäävät loukkuun edellä kuvatulla tavalla piirilevyn pinnalle [KOTEL 223]. Pesun käyttö ei nykyisin useimmiten onnistu kahdesta syystä. Ensinnäkin juoksutteet on suunniteltu pesuttomuutta varten, jolloin pesu ei välttämättä irrota helposti epäpuhtauksia pinnoilta, ja toiseksi tiheiden rakenteiden ja suurten komponenttien alapuolien peseminen ei aina onnistu, jolloin epäpuhtaudet voivat keskittyä tiheiden rakenteiden lähelle aiheuttaen vuotovirtoja ja muita ongelmia.

KOTELin raportissa KOTEL 222 *Komponenttilevyn epäpuhtaudet* on koottu kirjallisuudesta tietoa pesemättömän komponenttilevyn luotettavuuteen vaikuttavista tekijöistä. Raportissa on lueteltu kontaminaation lähteitä, esitelty matalan kiintoainepitoisuuden juoksutteiden sisältämiä aineita, kerrottu eri aineiden välisistä reaktioista sekä selvitetty kontaminaatioiden vaikutuksista ja piirilevyn puhtauden arvioinnista.



Kontaminaation vaikutuksesta piirilevyllä esiintyy korroosiota, vuotovirtojen kasvua, sähkökemiallista migraatiota, homeen kasvua, pinnoitteiden irtoamista ja eristävien kontaktipintojen muodostumista. Komponenttilevyn yleisin korroosiotyyppi on elektrolyyttinen korroosio, joka voi tapahtua vierekkäisten johtimien välisen sähkökentän ja kosteuden läsnä ollessa tai erilaisten metallien välille indusoituneen jännitteen takia [Lea, 1988], (vrt. liite 1). Vuotovirrat ovat korroosiota paljon yleisempi ongelma, koska johtimet ovat nykyisin tiheässä ja puolijohdeteollisuudessa on siirrytty korkean impedanssitason komponentteihin. Vuotovirtojen syntymiseen tarvitaan kosteutta ja ionisia epäpuhtauksia. Suhteellisen kosteuden ei tarvitse olla korkea, tyypillinen huoneilma 40...50 % RH riittää, koska pintaan tarttuneet hygroskooppiset aineet ja erilaiset kuidut voivat imeä riittävästi kosteutta kriittisiin alueisiin.

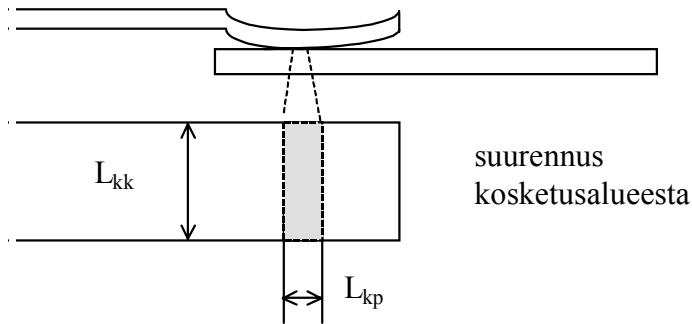
Metallien migraatiopolut tarvitsevat syntyäkseen kosteutta, epäpuhtauksia sekä jännitteen. Migraatiota esiintyy komponenttilevyllä kuparilla sekä tina-lyijyllä. Puhtaalla hopealla ilmiö on erityisen voimakas [Lea, 1992]. Homesienten aiheuttamia ongelmia esiintyy lähinnä trooppisessa ympäristössä ja se viittaa lähinnä tuotteen epätäydelliseen puhdistamiseen. (vrt. liite 1 kohta 2.18 *Homeen kasvuedellytykset*). Epäpuhtaus piirilevyn pinnalla voi aiheuttaa suojapinnoitteen huonon adheesion ja irtoamisen. Levyllä näkyvät valkoiset pisteet ovat selvä osoitus ionisista epäpuhtauksista, jotka olivat levyllä jo suojapinnoitetta laitettaessa. Eristäviä kontaktipintoja muodostuu, kun esim. hartsi jää kontaktipinnoille kuten liitinpinnoille ja piirin testikontaktialueisiin. Sähkökemiallisesta migraation aiheuttamista ongelmista piirilevyllä on olemassa julkaisu: IPC-TR-476A, Electrochemical Migration: Electrochemically Induced Failures in Printed Wiring Boards and Assemblies, July 1995.

## 6.8 Liittimet

Liitinten jousien ja kosketinalueen mekaniikkasuunnittelu, materiaalivalinnat ja pinnoitteet ratkaisevat yhdessä sen, kuinka herkkä jokin liitos on korroosiolle ts. kuinka nopeasti liitoksen sähköinen resistanssi kasvaa liian suureksi. Suuri kosketinpaine vähentää korroosion alkuvaiheen vaikutuksia ja kemiallisesti epäaktiivinen pinnoite (kulta) ei korrodoidu. Mutta ohut jalometallipinnoite ( $< 1 \mu\text{m}$ ) on aina huokoinen, jonka vuoksi sen alla olevat epäjalommat metallit (Cu, Ni) korrodoituvat suhteellisen helposti. Pieniä koskettimia ja kosketinpaineita käytettäessä ongelmaksi muodostuu helposti se, että hyvinkin pieni virhe kosketuskohdan pinnoitteessa voi aiheuttaa vähäisintuntuisen korroosion vuoksi signaalitien katkeamisen. Liitosten avaaminen ja sulkeminen kuluttavat pintoja ja voivat tila-

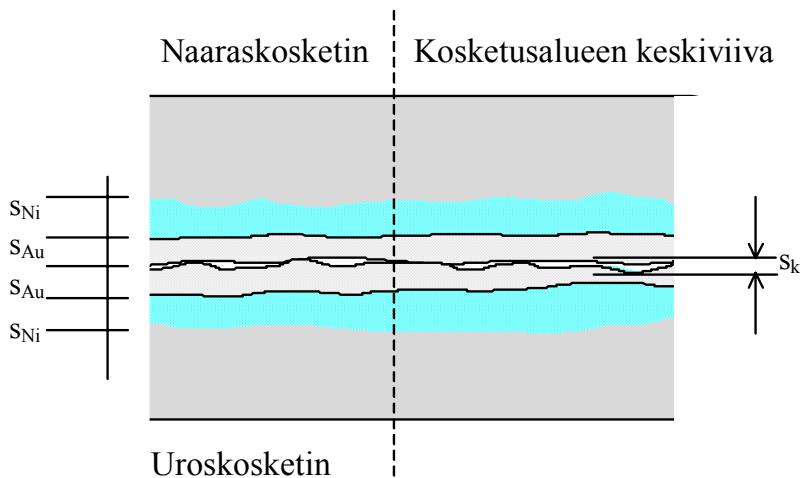
päisesti palauttaa resistanssin pieneksi, mutta kuluminen kiihdyttää korroosiota ja nopeuttaa liitoksen vioittumista.

Kuvassa 6.3 on periaatekuva kosketusalueesta. Kosketinten muotoilu ja pinnoitemateriaalin pinnan laatu sekä kovuus säätelevät, millainen on todellinen kosketusala niin sähkön kulun, lämmönjohtavuuden kuin mekaniikankin kannalta.



Kuva 6.3. Kosketuskohdan pinta-ala  $A_c$ .

Jos kosketinpinnoite on pehmeä, painautuvat kosketinpuoliskot osin toistensa sisään ja kosketusalueelle muodostuu useita kaasutiiviitä kosketuskohtia (kuva 6.4). Pinnan karheus säätelee kontaktipinnan sähkön- ja lämmön johtuvuuksia ja kulutuskestävyyttä. Karhealla pinnalla kosketuskohtien määrä on vähäinen ja virta sekä lämpö ahtautuvat pieneen osaan koko fyysisestä pinnasta. Pinnan tulisi olla mahdollisimman sileä.



$S_{Ni}$  Ni-kerrospaksuus

$S_k$  karheus, epätasaisuuden paksuus

$S_{Au}$  Au-kerrospaksuus

Kuva 6.4. Kosketusalueen rakenne.

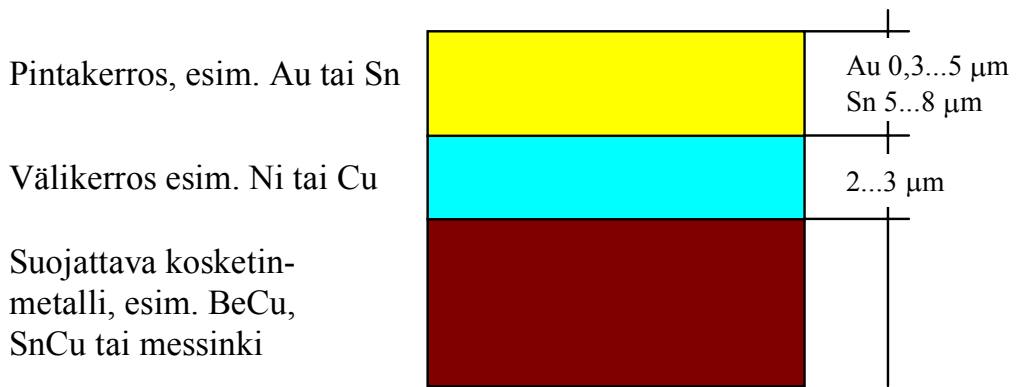
Jos pinnoilla on korroosiotuotteita, eristävät ne osan virrankulkuteistä. Lisäämällä kosketinpainetta ja/tai käyttämällä vaikka muutaman voltin jännitteitä, saadaan aikaan paikallisia läpilyöntejä, jotka läpäisevät korroosiotuotteet.

Virran ja jännitteen suuruusluokan avulla päätellään onko kyseessä piensignaali-kontakti ( $I < 100 \text{ mA}$  ja  $U < 1 \text{ V}$ ) vai suurempisignaalin kontakti. Piensignaali-sissa kontakteissa voivat hyvinkin vähäiset korroosiotuotteet pinnoilla aiheuttaa kontaktihäiriöitä, koska kontaktipinnoilla ei tapahdu sähköistä läpilyöntiä, kuten suuremmilla virroilla ja jännitteillä. Raportissa KOTEL 3 *Elektroniikan kosketin- ja johdinpinnoitteet* koskettimien sähköinen kuormitus ryhmitellään kolmeen alueeseen, joilla kullakin on omat vikamekanisminsa.

Alue 1	$U \leq 1 \text{ V}$	$I \leq 10 \dots 100 \text{ mA}$
Alue 2	$U = 1 \dots 10 \text{ V}$	$I = 10 \dots 1\,000 \text{ mA}$
Alue 3	$U \geq 10 \text{ V}$	$I \geq 1 \text{ A}$

Liitinkäytössä alueella 1 yleisin kosketinpinnoite on kulta ja sen seokset sekä platinametalleista palladium. Alueella 2 voidaan käyttää tinaa ja juotostinaa edellyttäen ettei liitintä avata kovin usein ( $< 10 \dots 25$  kertaa). Alueella 3 voidaan kullaa ja tinan ohella käyttää hopeaa ja hopeaseoksia sekä nikkeliä virran ja kuormituksen laadun perusteella.

Pinnoitemateriaalit valitaan ympäristöolosuhteiden, kosketinvirran, kosketinvoimien ja avaus/liittämiskertojen perusteella [KOTEL 3, KOTEL 13]. Käytännössä piensignaalisissa liittimissä toimivat vain Au, Ag ja AgPd:n kaltaiset pinnoitemateriaalit. Näistä Ag-pitoiset materiaalit korrodoituvat rikki-pitoisessa ilmassa helpokosti, jonka vuoksi valikoima jää suppeaksi. Suurempivirtaisissa kontakteissa käyvät Ag- ja Ni-pinnoitteet, koska jännite/virta läpäisee ainakin ohuemmat oksidi-, hopeasulfidi- ym. korroosiotuotekalvot. Ag-pinnoitteet soveltuvat suurivirtaisiin ja -jännitteisiin sovelluksiin, koska se sietää suuria virtoja ja kipinöintiä liittimissä, releissä ja kytkimissä. Sn-pinnoitettu liitin toimii hyvin, jos kosketinpaine on suuri eikä liitintä tarvitse avata muutamaa kertaa useammin. Sn sietää hyvin korrodoivia olosuhteita kuten meri-ilmastoa. Pehmeä tina muodostaa kaasutiiviin kontaktikohdan, joka ei korrodoitu, jos paine on riittävä.



Au-pinnoitteilla Ni-välikerroksen paksuuden tulee olla  $\geq$  pintakerroksen paksuus. Sn pinnoitteilla, kun lämpötila on korkea, suositellaan  $\geq 2,5 \mu\text{m}$  Ni-välikerrosta. Tässä mainitut kerrospaksuudet ovat minimipaksuuksia.

*Kuva 6.5. Liitinkoskettimen pinnoitteen rakenne ja tavallisia pinnoitteita.*

Kuvassa 6.5 on esitetty periaatteellinen kosketinpinnoitteen rakenne. Päälimmäisen kerroksen tehtävänä on muodostaa koskettimen pinnalle hyvin sähköä johtava ja korroosiota sietävä kerros. Useimmiten pelkkä kulta tai tinapinnoite koskettimen päällä ei toimi hyvin, koska alla olevan koskettimen perusmateriaalin sinkki tai kupari voivat diffundoitua pinnan huokoisten läpi. Perusmetalli voi olla myös liian epätasainen tai pinnoitteen tarttuvuus siihen on huono. Tämän vuoksi päälimmäisen kerroksen alla käytetään välikerrosta, joka on joko nikkeliä tai kuparia. Kupari tasoittaa perusmetallin pintaa ja parantaa uloimman pinnoitteen tarttuvuutta. Nikkeli sopivan paksuisena on kuitenkin useimmiten sopivin välikerrosmateriaali nimenomaan, koska se on hyvä diffuusiosulku perusmetallin aineille.

Välikerroksen tehtävät ovat:

- parantaa pinnoitteen kiinnipysyvyyttä
- tasoittaa perusmetallin epätasaisuuksia
- estää perusmetallin aineiden (Zn, Cu) diffundoituminen pinnoitteeseen
- paikata pinnoitteen reikiä
- parantaa mekaanista kulutuskestävyyttä.

Varsinaisen kosketinalueen ulkopuolisissa osissa voidaan käyttää pinnoitteita, jotka ensisijaisesti suojaavat kosketinmetallia korroosiolta ja varmistavat liitäntäjohtimien liittämisen juottamalla tai esim. kiertoliitoksen avulla. Näillä alueilla käytetään yleisesti SnPb-pinnoitteita jonka paksuus on esim. 5 tai 8  $\mu\text{m}$ . Kultaa käytettäessä pinnoitepaksuus voi olla jopa luokkaa 0,1  $\mu\text{m}$ , joka varmistaa lähinnä juottavuuden. Näidenkin alla on suositeltavaa käyttää esim. 2  $\mu\text{m}$  Ni-välikerrosta ainakin vaativammassa olosuhteissa.

Pinnoitteen kovuus ja tasaisuus vaikuttavat kulutuskestoisuuteen. Suhteellisen kova pinnoite sietää kulutusta paremmin, mutta kosketinpinta jää pienemmäksi kuin pehmeillä pinnoitteilla. Pehmeämpi pinnoite käy liittimille, jotka avataan harvoin, jolloin myös sähköisen kontaktin laatu on parempi kuin kovilla pinnoitteilla. Pehmeä pinnoite myötää ja saattaa muodostaa lähes kaasutiiviin kontaktin, joka korrodoituu hitaammin kuin kulunut kova pinnoite.

Pinnoitteiden materiaaliset perusominaisuudet ovat:

- pinnoitemateriaalin koostumus (puhtausluokka)
- mahdollisen välikerrosmateriaalin koostumus
- pohjamateriaalin koostumus
- kerrospaksuudet ja niiden tasaisuus
- pinnoitekerrosten kovuus
- pinnoitteen huokoisuus
- pinnoitteen adheesiovoima (kerrosten pysyvyys alustalla)
- pinnan karheus.

Kultapinnoitteita koskevat vaatimukset on annettu standardissa MIL-G-45204C (1983) Military specification, Gold plating, electrodeposited, joka nyttemmin on korvattu autoalan standardilla SAE Society of Automotive Engineer: AMS 2422E. Katso standardit standardiluettelosta sekä [KOTEL 3] ja [KOTEL 13].

Hyvin ohuiden pinnoitteiden käytön perusongelmana on niiden huono mekaaninen kestävyys sekä pinnoitteen huokoisuus. Elektroniikkaliittimissä ohut pinnoite on alle yhden mikrometrin paksuinen.

Metallisten pinnoitteiden prosessointitapa ja pinnoitteen jälkikäsittelyt (kiillotus, voitelu, passivointi) voivat vaikuttaa oleellisesti pinnoitteen korrodoitumiseen. Avattavissa koskettimissa käytetään joskus voiteluaineita kitkan pienentämiseksi ja kosketuskohdan suojaamiseksi. Näiden ominaisuuksien mittaaminen ja määrittely voidaan yleensä perustaa vain korroosionsietotesteihin ja käyttökokemuksiin.

Jousikontaktien jousiominaisuuksien tulee olla riittävän hyvät (riittävä kosketinpaine, pitkä kestoikä). Messinki (esim. CuZn36) myötää eikä säilytä jousivoimaa käytössä. Jo muutama liitoskerta voi aiheuttaa pysyviä muodonmuutoksia. Tämän vuoksi riittävän suurelle joustoliikkeelle mitoitettu berylliumkuparia (BeCu) tai fosforipronssia (esim. CuSn6) oleva jousi varmistaa kosketinpaineen säilymisen tuotteen koko elinajan.

Kosketinjousien liiallinen taipuminen käytössä saattaa joissain tapauksissa aiheuttaa ongelmia jousimateriaalin myötörajan ylittymisen vuoksi tai jousen kovan pinnoitteen murtumisen vuoksi. Esim. sähkösaostettuja nikkelpinnoitteita koskevan standardin SFS 4446 liitteessä C annetaan testausmenetelmä teräksen päällä olevan nikkelpinnoitteen sitkeydelle. Vähimmäisvaatimus on, että pinnoite kestää 8 prosentin venymän murtumatta. Standardin mukaan testi tehdään 25 µm paksuiselle nikkelpinnoitteelle. Tällainen venymä syntyy koskettimeen, jos taivutussäde on liian pieni. Elektroniikan komponenteille soveltuvia taivutustestejä, joita voi soveltaen käyttää myös pinnoitettujen johdinten tai koskettimien testaamiseen on standardissa IEC 60068-2-21 Environmental testing – Part 2-21: Tests – Test U: Robustness of terminations and integral mounting devices.

Liitänäkertojen lukumäärä rajoittaa pinnoitteiden paksuus- ja kovuusvalintamahdollisuuksia. Jatkuvasti avattavissa kontakteissa on käytettävä paksumpia ja kovempia pinnoitteita eikä liian suurta pintapainetta. Vain muutaman kerran avattavissa kontakteissa (< 10...25 kertaa) voidaan käyttää pehmeämpiä ja ohuempia pinnoitteita ja mahdollisesti suurempaa pintapainetta, jolloin kontaktikohta on kaasutiivis eikä korrodoidu niin helposti.

Hiertyminen (fretting), jolla tarkoitetaan kosketinpintojen hankaavaa liikettä toistensa suhteen, voi joissain kosketinrakenteissa aiheuttaa kosketuskohdan korrodoitumista (fretting corrosion, hiertymiskorroosio, hankauskorroosio, kitkakorroosio). Mekaaninen hierova liike irrottaa metallipartikkeleita pinnoitteista ja voi synnyttää esim. palladiumyhdisteillä katalyyttisesti polymeerejä ilmassa olevista kaasusta. Tinapinnoitteet ovat erityisen herkkiä hiertymiskorroosiolle, koska tina hapettuu nopeasti ja on pehmeää. Kosketuskohtaan muodostuvat oksidit ja muut yhdisteet ovat huonosti sähköä johtavia. Hyvin ohuilla tai pehmeillä pinnoitteilla hiertyminen voi paljastaa alusmetallin taikka kova pinnoite voi hieroa vastakkaisen pehmeän pinnoitteen puhki [Antler 1984, Mottine & Reagor 1984].

Koskettimien mekaaninen hankaava liike syntyy tavallisesti mekaanisesta värinästä, suurten vaihtovirtojen aiheuttamasta sähkömekaanisesta voimasta ja lämpötilan vaihteluista. Liikkeen amplitudi voi olla muutamasta mikrometristä aina sataan mikrometriin asti.

Katselmoinnissa tarkistetaan liittimien alttius (rakenteellinen) mekaaniselle hankautumiselle ja värinän, lämpötilan vaihtelujen sekä sähkömekaanisten voimien esiintymisen todennäköiset amplitudit ja määrät ja selvitetään, mitä materiaaleja ja kosketinpaineita pinnoitteissa käytetään.

Liittimen koskettimien sijainti rungossa ja rungon muotoilu tulisi tehdä siten, että pienet asentovirheet liittimiä yhteenliitettäessä eivät vahingoita (taivuta, tms.) liittintä. Samalla olisi varmistettava liitinkoskettimille riittävän suuri taivutusvara, jottei liittäminen aiheuta koskettimiin pysyviä muodonmuutoksia.

Johdinvälien pienentämistä rajoittaa tarvittava eristysresistanssi ja jännitteen kestoisuus. Riski johdinten väliseen oikosulkuun on alle 0,2 mm johdinväleillä suuri, koska jo kohtalaisen pienet irralliset partikkelit (esim. metallihiukkaset) voivat aiheuttaa oikosulun. Myös riski metallin ja korroosiotuotteiden vaeltamisesta eristysvälien yli kasvaa oleellisesti.

Liitäntä- ja irrotusvoiman suuruutta voidaan käyttää koko liitinrakenteen mekaanisen toimivuuden mittarina. Liittimen liitäntä- ja irrotusvoimat vaihtelevat kosketinmäärien ja kosketinten jousiominaisuuksien mukana. Hyvin suuret voimat aiheuttavat tavallisesti mekaanisia vaurioita niin kosketinpinnoitteille kuin runkorakenteillekin ja tekevät liittämisen vaikeaksi. Toisaalta hyvin pienet voimat ilman lukitusta voivat aiheuttaa liittimen avautumisen mekaanisessa tärinässä.

Suurivirtaisten liitinkontaktien mekaaniseen lujuuteen, pysyvyyteen ja resistanssin riittävän pieniin arvoihin on kiinnitettävä huomiota, koska huonossa kontaktissa tapahtuva pienikin resistanssin kasvu aiheuttaa helposti suuren tehohäviön kontaktissa. Esim. 10 mΩ resistanssissa on tehohäviö 1 A virralla 10 mW, 10 A:n virralla 1 W ja 20 A:n virralla 4 W. Yhden watin teho lämmittää ympäristöään niin paljon, että eristeiden ja piirilevyn syttymisriski on suuri (vrt. liite 1, kohta 2.10 *Jännityskorroosio ja väsyminen*).

Liittimien taustajohdotuksen tuenta ja vedon esto on tarkistettava mekaanisten rasiusten kuten vedon, taivutuksen ja tärinän varalta. Samassa yhteydessä tarkistetaan ettei mahdollinen johtimiin kondensoituva tai niiden pintaa pitkin valuva vesi pääse liittimiin.

## **Jousimateriaalit**

Liitinten kosketinmateriaalina käytetään paljon messinkiä, joka pinnoitetaan elektrolyttisesti tarkoitukseen sopivalla metallilla, esim. nikkelillä tai tinalla. Messingin korroosioilmiöistä ovat jännityskorroosio ja sinkinkato tunnetuimpia. Sinkinkadossa sinkki liukenee pois messingistä esim. suolaveden läsnä ollessa. Jännityskorroosio johtaa repeämään jännityksen alaisessa (esim. kylmämuokatussa) metallissa sen oltua altistettuna typpipitoisille aineille esim. ammoniakille tai amiineille. Nämä syövyttävät messingin raerajoja ja messingissä oleva vetojännitys murtaa korroosion heikentämän rakenteen. Ilmiötä vastaan suojaudutaan pin-

noittamalla messinki esim. elektrolyyttisesti nikkelillä (vähintään 15 µm) tai suoja-lakkaamalla kappale. Messingin sijasta voidaan käyttää berylliumkuparia (BeCu) tai pronssia (SnCu), jolloin varastorepeämistäipumuksesta päästään eroon.

### **Kosketinten voiteluaineet**

Koskettimien voiteluaineita (lubrication) käytetään parantamaan koskettimien toimivuutta korrodoivissa olosuhteissa. [Abbot & Antler 1995, Antler 1995]. Uu-sissa liittimissä nämä aineet toimivat hyvin. Toimintamekanismina niillä on muo-dostaa elektrolyytti, jossa tapahtuu ionien kulkeutumista koskettimesta toiseen, ne lisäävät sähköisesti johtavaa pinta-alaa, hidastavat hapettumista ja muodosta-vat metallisia dendriittejä koskettimien välille oikosulkien mahdolliset kor-roosiotuotteet. Voiteluaineina käytetään mineraaliöljyjä ja tiivistevahoja.

Käyttöongelmia näillä kosketinvoiteilla tulee niiden aikaa myöten tapahtuvasta polymerisoitumisesta, jolloin kosketinpinnoille muodostuu eristävä kalvo. Näitä aineita voidaan käyttää vain uusiin ja puhtaisiin liitinkontakteihin. Toinen haitta-tekijä on voiteluaineiden taipumus kerätä itseensä pölyä, mikä etenkin hiekkapö-lyllä voi muodostua ongelmaksi, jos laitteen liittimiä joudutaan käytön yhteydessä aukomaan usein.

Jotkut valmistajat myyvät myös korrodoituneiden kosketinten käsittelyyn tarkoi-tettuja kemikaaleja [Gao & Shangguan 1999], esim. polymeroitua glykolia (gly-col ether polymer), jonka toiminta perustuu dendriittien (vrt. liite 1, kohta 4.1 *Dendriitti*) muodostumiseen kosketinten korrodoituneiden kohtien ylitse. Kemi-kaali toimii elektrolyytinä ja liuottaa metalli-ioneja koskettimista ja muodostaa niistä johtavan polun eristävien kohtien ylitse [Gao & Shangguan 1999].

Näistä kosketinten voiteluaineista on julkaistu muutamia patenteja, joissa selos-tetaan myös aineiden toimintaperiaatetta:

US Patent 4529531: Electrical contact lubricant composition and method of lubrication. July 16, 1985. 4 s.

US Patent 4530772: Method of electrical contact lubrication. July 23, 1985. 3 s.

US Patent 4415694: Contact enhancing composition. Nov. 15, 1983. 7 s.

## **6.9 Kotelomateriaalit**

Elektroniikka- ja sähkölaitteiden kotelomateriaaleina (taulukko 6.3) yleisimmät ovat yhä edelleen teräs tai alumiini, joiden viimeistelynä ulkopinta yleensä maa-



lataan. Pienemmissä laitteissa muovit ja etenkin pinnoitetut muovit ovat useimmiten käytettyjä kotelomateriaaleja. Molemmista materiaalityypeistä korroosiolla ja sen torjunnalla on merkittävä rooli kotelon valmistuksessa. Käytetty pinnoitetekniikka ratkaisee huomattavalla osalla kotelon korroosionsieto-ominaisuudet. Korroosion ja ilmastollisten vaikutusten kannalta vaativimpia ovat toisaalta esim. matkapuhelimen kaltaiset tuotteet, joita käyttäjä käsittelee jatkuvasti ja toisaalta ulko-olosuhteisiin ja vaikeisiin teollisiin olosuhteisiin tarkoitettut tuotteet.

Ulkopintojen korkea visuaalinen laatu on välttämättömyys useimmissa tuotteissa, koska “myyvä ulkonäkö” ratkaisee usein asiakkaan halukkuuden hankkia kyseinen tuote. Pintojen ulkonäkövaatimukset ja hyvä korroosionsietoisuus eivät aina ole toteutettavissa samanaikaisesti, mutta sopivilla materiaali- ja pinnoitetekniikoilla nämä tavoitteet jopa tukevat toisiaan valmistuksessa ja lopputuloksessa ts. ulkonäöltään hyvän näköinen pinta saattaa olla hyvin korroosiota sietävä ja teknisesti korkealaatuinen. Käänteisesti tämä ei välttämättä ole näin, koska siisti ja tasaiselta vaikuttava pinta ei ole tae hyvälle korroosionsieto-ominaisuuksille.

### **Metalliset kotelomateriaalit**

Metallisia koteloita tehdään sekä ulko- että sisäkäyttöön. Ulkokäyttöä varten kotelot valmistetaan yleensä ohutlevystä, joka on joko valmiiksi pinnoitettu tai joka pinnoitetaan (maalataan) kotelon valmistuksen jälkeen. Vaativissa kohteissa voidaan käyttää alumiinipainevalettua koteloa.

Pinnoittamaton teräsohutlevy on yleisin koteloiden perusmateriaali. Normaali menettely kotelon valmistuksessa on kotelon kasaus (hitsaus, hionta, yms.), sähkösinkitys (varsinainen korroosiosuoja), kromatointi tai fosfatoiointi ja tarvittaessa vielä maalaus. Maalattun kotelon kestävyys määräytyy sekä sinkityksen että maalauksen yhteisvaikutuksena ja on yleensä yli 20 vuotta tavallisimmin käytetyillä maaleilla. Tällainen kotelo käy kaikkiin olosuhteisiin sisällä ja ulkona.

Valmiiksi pinnoitettu teräsohutlevy on lisännyt suosiotaan kotelomateriaalina. Materiaalin tuttu käyttökohde on peltikatot. Tällaisesta materiaalista tehty kotelo on pinnaltaan siisti ja sitä ei tarvitse maalata. Levyjen leikkuureunat ovat kuitenkin suojaamattomat ja niihin kehittyy melko nopeasti (1...3 kuukautta) epäedullisissa ulko-olosuhteissa ruostetta (esim. rannikoiden läheisyydessä vieläpä sisätiloissa). Tästä syystä valmiiksi pinnoitetusta teräsohutlevystä tehtyä koteloa voi suositella ensisijaisesti sisätiloihin.

Taulukko 6.3. Kotelomateriaalien ominaisuuksia.

<b>Kotelomateriaali</b>	<b>Suosittelut käyttökohteet</b>	<b>Käyttöikä</b>	<b>Huomautuksia</b>
painevalettu alumiini	ulkona ja sisällä ankarat rasittavat olosuhteet	kymmeniä vuosia, ankarimpiin olosuhteisiin suositellaan pinnan maalausta	tiivisteet kovettuvat ennen aikojaan, jos niiden materiaalivalinta on huono
alumiiniohutlevy (yleensä kromatoitu)	laitetilat, laitekaapit yms. kuivat sisätilat; maalattuna myös ulkokäytössä	maalattu kuten painevalettu alumiinikotelo, laittilan sisällä sama kuin laitteen ikä	kromatoitu alumiini johtaa hyvin sähköä
valmiiksi pinnoitettu teräsohutlevy	kaikki sisätilat; soveltuvasti myös ulkona	sisätiloissa kymmeniä vuosia, ulkona yli 20 vuotta	leikkuureunojen ruostuminen otettava huomioon sisä- ja ulkotiloissa
kuumasinkitty teräsohutlevy	laitetilat, laitekaapit yms. kuivat sisätilat	laittilan sisällä yhtä kauan kuin laitteen ikä	leikkuureunojen ruostuminen otettava huomioon; kosteus kehittää pinnoille huokoista valkoruostetta
alusinkitty teräsohutlevy	laitetilat, laitekaapit yms. kuivat sisätilat; erityisesti kohteet, joissa ulkonäön on oltava miellyttävä	laittilan sisällä yhtä kauan kuin laitteen ikä	leikkuureunojen ruostuminen otettava huomioon; kosteuden vaikutuksesta pinnoille tulee mustaa tiivistä korroosiotuotetta
teräsohutlevy sähkösinkitään ja kromatoidaan ja maalataan	laittilan sisällä kromatoituna, ulkokäyttöön maalattuna	maalattuna yli 20 vuotta, laittilan sisällä yhtä kauan kuin laitteen käyttöikä	kromatoitu sinkkipinta johtaa hyvin sähköä
muovit (pigmentoidut, lujitetut)	sisätilat ja UV-valolta (suora auringonpaiste) suojatut ulkotilat	sisällä viidestä kymmeneen vuosiin, ulkona pintakiilto häviää n. 5 vuodessa, mekaaniset ominaisuudet 10...15 vuodessa	muovimateriaalit vaativat alan erityisosaamista, vanhoja suunnitteluohjeita ei voi niiden kohdalla käyttää

Sinkityt ja alusinkityt teräsohutlevyt käyvät sellaisenaan kuiviin sisätiloihin ja muiden koteloiden sisälle tuleviin rakenteisiin. Alusinkitty levy on ulkonäöltään miellyttävämpi kuin kuumasinkitty (ja tasoitusvalssattu) pinta. Näiden korroosiokäyttäytyminen eroaa toisistaan siten, että kuumasinkitylle levyllä muodostuu kosteassa valkoruostetta – huokoista höttöistä korroosiotuotetta – ja alusinkitylle levyllä muodostuu mustaa tiivistä korroosiotuotetta. Pidemmän ajan kuluessa alusinkityn levyn kestävyys vaikuttaa siten paremmalta ilmastollisessa rasituksessa. Leikkuureunat käyttäytyvät, kuten valmiiksi pinnoitetussa teräsohutlevyissä, joten ilman lisäkäsittelyä näitäkin materiaaleja voi suositella ensisijaisesti vain sisätiloihin. Yleisin lisäkäsittely on kromatointi (joskus myös fosfatoi) ja maalaus.

Alumiinipainevalettu kotelo on sopiva ankariin käyttöolosuhteisiin ja paikkoihin, joissa ei vuosikausiin tarvitse käydä. Tällaisen kotelon seinämän paksuus on useita millimetrejä. Alumiini muodostaa luontaisesti pinnalleen suojaavan passiivikerroksen, jonka kestävyys ilmastollista korroosiota vastaan on erinomainen. Kotelon paksuissa seinämissä on lisäksi niin paljon materiaalia, että pieni syöpyminen ei vaikuta haitallisesti. Pintaa ei siksi sen erityisemmin yleensä lisäkäsittellä, mutta sen voi maalata alumiinille sopivilla maaliyhdistelmillä.

Alumiiniohutlevyä käytetään myös kotelomateriaalina. Kromatoidun alumiinin pinta johtaa hyvin sähköä ja alumiinin lämmönjohtavuus on erinomainen. Sovelluksiin, joissa nämä kaksi ominaisuutta ovat tärkeitä, alumiini onärkevin materiaali. Tällaiset sovellukset sijaitsevat yleensä aina laitekaappien sisätiloissa, jossa korroosiovaarakin on verraten vähäinen. Näissä oloissa kromatoitu alumiini kestää yhtä kauan kuin itse laitekin. Ulkokäyttöön pelkästään kromatoitua alumiinia ei voi suositella, vaan se tulee aina maalata, jolloin sähköjohtavuutta vaativat kohdat on käsiteltävä erikseen.

Metallit eivät välttämättä ole vesi- tai ilmatiiviitä. Metalleista voidaan valmistaa hermeettisiä rakenteita (katso liite 1, kohta 1.7 *Ilman suhteellinen kosteus*). Pyritäessä tekemään vesitiiviitä rakenteita, jotka eivät läpäise edes vesihöyryä eikä näin ollen myöskään ilmaa, metallit ovat hyvä vaihtoehto. Suunnittelijan on kuitenkin aiheellista tarkistaa, että kyseinen materiaali ja sen valmistustekniikka ovat sellaiset, että rakenteesta tulee todella tiivis. Jos käytetään esim. painevalettua alumiinia, riski aikaansaada vuotava, jopa juoksevaa vettä läpäisevä kotelo, on suuri. Tämä johtuu painevaletun alumiinin huokoisuudesta. Sopivalla valmistustekniikalla myös painevalulla voidaan tuottaa kaasunpitäviä koteloita.

## Muovikotelot

Pigmentoimatonta (värjäämätöntä) muovikoteloa ei voi suositella käytettäväksi ulkotiloissa, koska pigmentoimattoman muovin kestävyys ulko-olosuhteissa on rajoitettu auringon säteilyn vuoksi. Pigmentoidun muovin kestävyys määräytyy käytetyn muovimateriaalin mukaan. Pigmentoinnilla hidastetaan muovin hajoamista rajoittamalla hajoaminen materiaalin pintaosiin. Muovi voidaan myös maalata, jolloin materiaalin kestävyys määräytyy maalin kestävyuden mukaan. Maalien kestävyys on maksimissaan 10...15 vuotta hyvillä maaleilla keskimääräisissä ulko-olosuhteissa (esim. kaupunki-ilmastossa sisämaassa). Erittäin rasittavissa olosuhteissa (esim. meren rannalla tai korkealla vuoristossa) ei maalattuakaan muovikoteloa voi suositella käytettäväksi. Pigmentoinnin lisäksi muovikoteloiden materiaaleissa on yleensä (läpinäkyviä kansia lukuun ottamatta) myös lujiteaineita, jotka estävät lämpötilan vaihteluiden aiheuttamaa muovituotteen virumista ja vääntelyä.

Metalloituja muoveja käytetään vesikalusteissa, kotitalouskoneissa, koristeissa, logoissa, kosmetiikan pakkauksissa ja jopa matkapuhelimissa. Metallipinnoite antaa muovikotelolle lisää jäykkyyttä ja huolitellun ulkonäön. Metallointi kestää ilman mitään jälkikäsitelyä, kun pinnalla on kromaus tai kultaus. Muunlaiset pinnoitteet ovat koristekäyttöön tarkoitettuja ja vaativat jälkikäsitelyä aina lakkauksen tai pinnoittamisen jollain muulla metallilla. Metalloidun muovin kestävyys määräytyy ulkopinnan muodostavan metallin korroosio-ominaisuuksista ja muovin ja metallin välisen kiinnipysyvyyden laadusta. Metalloinnin laadun/kiinnipysyvyyden ratkaisee metallointiprosessin hallinta. Metallointiprosessi on pitkä ja monivaiheinen.

Oma lukunsa ovat laitteiden sisällä esiintyvät metalloidut muovikotelot (esim. EMC-suojat), joiden pinnoitteiden ominaisuudet on valittu ensisijaisesti toiminnallisten näkökohtien kautta. Näiden kotelomateriaalien kestävyys ja korroosioalttiuden tarkastelu on tehtävä kuten muunkin elektroniikan.

## 6.10 Metallien pinnoitusmenetelmät

### Pinnoittamisen perusteita

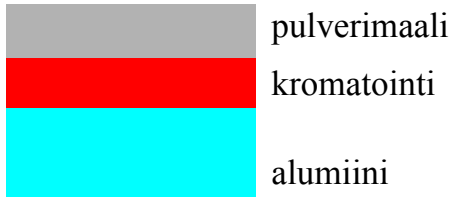
Metallien pinnoittamiseen pätevät muutamat perusasiat, jotka on otettava huomioon pinnoitteita käytettäessä. Pinnoitustyöt alkavat pinnoitettavan metallin puhdistamisella. Erityisesti elektrolyytisessä pinnoituksessa puhdistus vaikuttaa oleellisesti siihen toimiiko valmistettu pinnoite vaiko ei. Elektrolyytisessä pinnoituksessa saostetaan metallia toisen metallin päälle. Ensimmäinen pinnoitemetallin kerros asettuu alustan hilarakenteen mukaisesti, mutta seuraavat molekyylikerrokset saostuvat pinnoitemetallin oman hilarakenteen mukaisesti. Mitä nopeammin pinnoiterakenne muuttuu, sitä paremmin pinnoite tarttuu alustaan. Jos alustan pinnalla on epäpuhtauksia, pinnoitteen laatu heikkenee. Epäpuhtaudet voivat aiheuttaa pinnoitteen kuplimista ja hilseilyä pitkänkin ajan kuluttua. Esim. alkalisissa kylvyissä saostettu sinkkipinnoite voi hilseillä ja aiheuttaa oikosulkuja useiden viikkojen kuluttua [O'Grady 1999].

Usein pinnoitemetalleja ei voida suoraan saostaa toisten metallien päälle ominaisuuksien suuren eron vuoksi. Esim. kiiltokromipinnoitetta ei voida saostaa suoraan teräksen päälle. Kromi on terästä kovempaa ja jäykempää, jonka vuoksi sitä ei voi saostaa teräksen päälle ohuena kerroksena. Teräksen päälle saostetaan ensin kuparia, sen päälle nikkeliä ja viimeksi kromia, jonka mukaan pinnoitetta myös nimitetään. Vastaavasti kuparin päälle ei voida saostaa suoraan kultaa, koska kupari diffundoituu kultaan ja korrodoituu helposti. Tässä on käytettävä nikkeliä välikerroksena, joka estää kuparin diffuusion.

Monikerrospinnoitteissa ensimmäinen välikerros toimii tartuntakerroksena alustan sekä päälle tulevan pinnoitteen suuntaan. Kiiltokromissa kupari tarttuu hyvin teräkseen ja nikkeliin ja kromi puolestaan tarttuu hyvin nikkeliin, joka estää kuparin diffundoitumisen pintaan. Kuparia käytetään hyvän tarttuvuutensa ansiosta tartuntakerroksena myös muoveja metalloitaessa. Kuparin lisänä käytetään melkein aina nikkeliä estämään kuparin diffundoitumista pintaan.

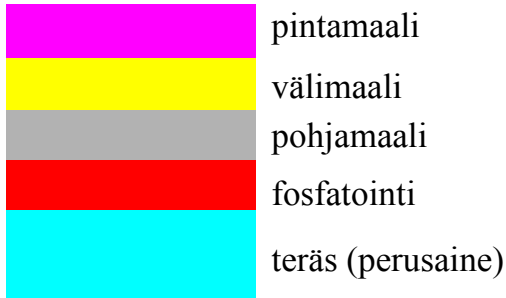
Maalaustöissä käytetään usein tartuntakerroksena erillistä pohjamaalia, primeria, joka varmistaa sen, että maalaus yleensäkin pysyy maalattavalla pinnalla. Pintakerrosten tehtävänä on suojella maalattavaa pintaa ulkoisilta vaikutuksilta, kuten vedeltä. Kerrospaksuuksia lisäämällä saadaan paremmin kemiallisia ja mekaanisia rasituksia kestäviä pintoja.

### Pulverimaali alumiinin päällä



Kromatointi toimii konversio-pinnoitteena ja lisää maalin tartuntaa ja alumiinin korroosion kestävyyttä

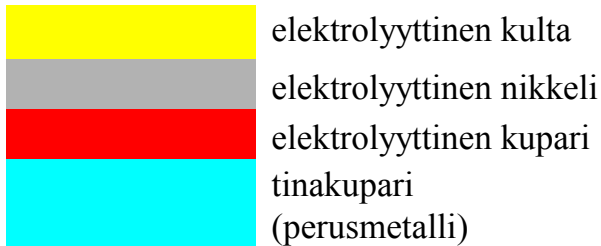
### Teräs ja perinteinen maalaustapa



Välimaali antaa suojaa ja pintamaali lisäksi ulkonäön ja lopullisen suojan.

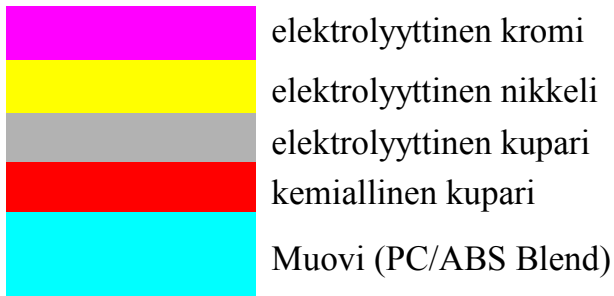
Fosfatointi toimii konversio-pinnoitteena. Se ja pohjamaali voidaan yhdistää ns. etsaavaksi tartuntamaaliksi.

### Monikerros metallipinnoite, liitinkosketin



Nikkelivälikerros estää kuparin diffuusion kullaan huokosiin

### Metalloitu muovi



Kemiallinen kupari saostetaan Pd/Sn-aktivoidun muovin päälle

Elektrolyyttistä nikkeliä voidaan saostaa kahdesta eri kylvystä, joista toinen tasoittaa pinnan ja toinen lisää kromipinnoitteen korroosion kestävyyttä

*Kuva 6.6. Metallien pinnoiterakenteita.*

Näin ollen monikerrospinnoitteissa kullakin kerroksella on oma tehtävänsä; oleellista on huolehtia kussakin vaiheessa pinnoitettavan osan puhtaudesta.

- huolella puhdistettu perusaine – pohjametalli
- tartuntakerros – tarttuu pohjametalliin ja välikerrokseen
- välikerros – tarttuu tartuntakerrokseen ja pintakerrokseen ja on ominaisuuksiltaan näiden välissä
- pintakerros – tarttuu välikerrokseen ja antaa lopullisen ulkonäön ja pintaominaisuudet.

Kuvaan 6.6 on koottu esimerkkejä erilaisista metallien pinnoiterakenteista.

### **Elektroniikan pinnoitteet ja korroosio**

Elektroniikan metalliset pinnoitteet valmistetaan pääosin sähkösaostuksella. Koteloiden ja laitekuorien EMC-suojaukseen käytetään myös johtavalla maalilla maalausta ja erilaisia tyhjiöhöyrystysmenetelmiä.

Korroosion liikkeellepanevana voimana on aina kosteuden kasautuminen pinnalle. Korroosio kiihtyy monia dekadeja, kun korroosiotuotteita alkaa kasautua pinnoille. Näin siksi, että korroosiotuotteet kykenevät pidättämään itseensä aina vain enemmän ja enemmän vettä, koska ne ovat aina huokoisempia kuin alkuperäinen materiaali.

Korroosion kannalta selväpiirteisin pinnoitusmenetelmä on tyhjiöhöyrystysmenetelmä. Näiden pinnoitteiden korroosio määräytyy yksinomaan höyrystetyn metallin ominaisuuksista, joten niiden korroosioikätyytyminen on hyvin ennustettavissa.

Johtavilla maaleilla (ja myös johtavat EMC-tiivisteet), jotka koostuvat sideaineeseen sekoitetuista metallihiukkasista, korroosio-ilmiot ovat mutkikkaampia. Korroosiokestävyyteen vaikuttaa sideaineen ja metallihiukkasten ominaisuudet. Joissakin tiivistemassoissa on myös kahta johtavaa materiaalia, jolloin myös näiden kesken voi syntyä galvaanisia pareja, jotka vähäisimmänkin kosteuden ansiosta panevat liikkeelle korroosioreaktioita ja materiaalien syöpymistä myös muissa ao. materiaalin kanssa kontaktissa olevissa materiaaleissa. Esim. tiivistemassa, jossa silikonihartsiin on seostettu kupari- ja hopeahiutaleita ja joka on kontaktissa kultapinnoitteen kanssa, korrodoituu helposti pinnaltaan.

Näissä tiivistemassoissa ja maaleissa ja ympäröivissä materiaaleissa voi tapahtua korroosiota, joka aiheutuu

- 1) kosteuden ja metallien välisistä reaktioista
- 2) kosteuden ja massan sideaineen välisistä reaktioista
- 3) metallien korroosiotuotteiden ja massan sideaineen välisistä reaktioista
- 4) sideaineen hajoamistuotteiden ja metallin välisistä reaktioista.

Sähkösaostetut pinnoitteet (elektrolyttiset pinnoitteet), esim. metalliset kotelo-rakenteet ja piirilevyt, valmistetaan monivaiheisella kemiallisella prosessilla, josta jokaisesta vaiheesta voi pinnoitteeseen jäädä pinnoitteen kestävyyteen vaikuttavia epäpuhtauksia (liitinkoskettimien pinnoitteet, katso kohta 6.8). Suurimmat virheet havaitaan heti pinnoitusprosessin jälkeen tehdyssä ulkonäön tarkastuksessa ja virheellinen tuote ei pääse eteenpäin. Piileviä vikoja aiheuttavat pinnoitteeseen jääneet epäpuhtaudet, jotka voivat aiheuttaa pinnoitteen hilseilyä tai halkeilua vasta viikkojen päästä tai ennenaikaista nopeaa korroosiota.

Onnistuneen sähkösaostetun pinnoitteen ominaisuudet ovat samat kuin ao. pinnoitemetallin ja korroosioikäytyminen on siten hyvin ennakoitavissa aivan kuten tyhjäohyrystetyillä pinnoitteillakin.

Sähkösaostetuista pinnoitteista ja niiden ominaisuuksista on saatavilla tietoa mm. seuraavista viitteissä mainituista kirjoista ja standardeista:

Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely, osa I 1996 ja osa II 1999, Suomen Galvanoteknisen Yhdistyksen julkaisuja No 5 ja No 6.

Jack, W. D. Electrodeposition, The Materials Science of Coatings and Substrates, Noyes Publications, 1993.

Mattsson, E. Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers. Second edition. The Institute of Materials. Bourne Press, 1996.

Mattsson, E. Elektrokemi och korrosionslära. Bulletin nro 100. Korrosionsinstitutet, 1987.

SFS-EN-ISO 1461 fi/en 1999.

Teräs- ja valurautatuotteiden kuumasinkkipinnoitteet kappaletavaroille. Erittelyt ja koestusmenetelmät.

SFS-EN ISO 14713 fi/en 1999.

Teräs- ja rautarakenteiden korroosionesto. Sinkki- ja alumiinipinnoitteet.

SFS-EN 22063 fi/en 1994.

Metalliset ja muut epäorgaaniset pinnoitteet. Terminen ruiskutus. Sinkki, alumiini ja niiden seokset.



## **Kotelorakenteiden pintakäsittely**

Koteloiden ulkopinnat ovat yleensä maalattuja. Maaleina käytetään korotetussa lämpötilassa kovettuvia materiaaleja, joista ei kovetusprosessin jälkeen irtoa mitään ympäristöön. Enenevässä määrin koteloita maalataan pulverimaalilla, jolla saadaan kulmiin/nurkkiin parempi suoja kuin liuotinmaaleilla. Pulverimaalit ovat entistä vähäpäästöisempiä maaleja, joten niillä maalatut kotelot ovat perinteisiä liuotinmaaleja suositeltavampia vaihtoehtoja.

Jos pintakäsittelyksi on valittu maalaus, tehdään sille rutiininomaisesti ainakin seuraavat laadunvalvontatestit. Maalikalvosta määritetään sen kiilto (SFS 3632), kalvonpaksuus (SFS 3644) ja kiinnipysyvyys. Kalvon kiinnipysyvyys voidaan määrittää yksinkertaisella taivutustestillä, jossa pystyyn tuettua maalattua koelevyä taivutetaan 90° molempiin suuntiin, kunnes maalikalvo irtoaa. Jos maalauksella tehdään ns. koristepinta (esim. kipinätyöstettyä pintaa jäljittelevä rosopinta), vain kiinnipysyvyys kannattaa määrittää taivutustestillä.

Kalvon suojaavaa vaikutusta voidaan arvioida myös testillä, jossa koekappaleen päälle valutetaan särmikästä piikarbidihiekkaa (SFS 3754). Testi on yksikertaisuudestaan huolimatta varsin toistettavia tuloksia antava. Tulosten hyödyntäminen edellyttää pinnoitteen paksuuden tarkkaa tuntemista koekohdassa, mikä ei aina ole aivan helppoa mitata.

Maalien laadunvalvonnan testauksessa käytetään yleensä viikon vanhaa maalikalvoa. Maalikalvo on kuitenkin jatkuvasti muuttuva orgaaninen pinnoite, jonka fysikaaliset ominaisuudet ja myös suojaavat ominaisuudet muuttuvat ajan mukaan. Tämä sama pätee myös piirilevyjen suojalakkoihin, juotteenestopinnoitteisiin ja kaikkiin muihinkin orgaanisiin pinnoitteisiin.

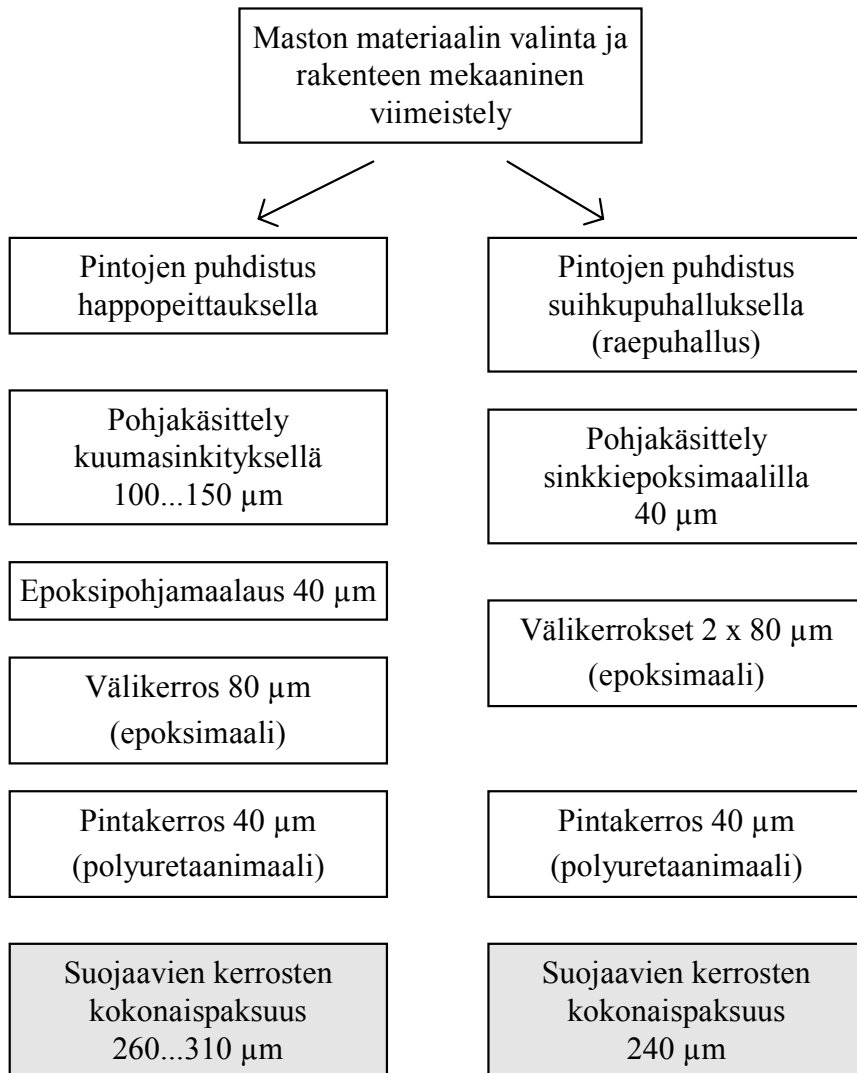
## **Mastorakenteiden pintakäsittelyt**

Kohdassa 6.2 mainittujen mastorakenteiden ja muiden ulos sijoitettavien teräsrakenteiden korroosiosuojaukseen soveltuvia pinnoitusmenetelmiä ovat sekä maalaus että kuumasinkitys. Kuumasinkitys ei yksin riitä korroosiosuojaukseen, jonka vuoksi sekin maalataan. Kuvassa 6.7 on esitetty esimerkki näiden pinnoitteiden valmistusprosesseista.

Perusmateriaali (teräs) puhdistetaan kuumasinkitysvaihtoehdossa hapossa peittaamalla ja sinkkiepoksivaihtoehdossa suihkupuhdistamalla (raepuhalluksella). Puhdistuksen jälkeen tehdään kuumasinkitys tai maalausvaihtoehdossa sinkki-

epoksimaalaus. Sinkkirikas kerros antaa teräkselle sen varsinaisen korroosiosuojan (vrt. liite 1, kohta 1.2 *Metallien sähkökemiallinen ja galvaaninen jännitesarja*).

Koska sinkin kestävyys ulkoilmassa ei ole kovin hyvä, on se suojattava maalaamalla. Sinkin kanssa kosketuksiin joutuvan maalin sideaine on valittava siten, että se kestää sekä sinkin alkalisten korroosiotuotteiden vaikutuksen että kiinnittyy hyvin metallipintaan. Kuumasinkitty pinta on lisäksi karhennettava, jotta maalille saataisiin riittävästi tartuntapintaa.



Kuva 6.7. Ulos sijoitettavan mastorakenteen pinnoitusvaihtoehdot.

Välikerroksien sideaine valitaan siten, että välikerrokset kiinnittyvät pohjamaaliin sekä pintamaaliin. Välikerroksilla kasvatetaan myös kerrospaksuutta, jotta veden ja syövyttävien yhdisteiden tunkeutuminen maalikalvojen läpi hidastuisi ts. kerroksen suojausvaikutus lisääntyisi.

Pintamaaliksi on valittava välikerrokseen hyvin kiinnittyvä sekä hyvin auringonvaloa (UV-säteilyä) kestävä maalityyppi. Koska epoksi ei kestä auringonvaloa, on se suojattava esim. polyuretaanimaalilla, joka tarttuu hyvin epoksiin.

Suojaukseen tarvittavien maalikerrosten paksuudet ovat käytännön kokemuksen ja testauksen tuloksena saatuja arvoja, joilla saavutetaan tavoiteltu suojausaika, yleensä 20...30 vuotta.

Sovelias standardi ulkotiloihin tulevien teräsrakenteiden pintakäsittelyyn on seuraava ISO 12944-standardisarja, joka koskee yli 3 mm paksujen joko ilmastollisessa tai upporasituksessa olevien teräsrakenteiden uudis- ja huolto-maalausta (kattaa myös kuuma- ja ruiskusinkityt pinnat). Standardi kattaa vain ilmakehän enintään 2 mm paksut maalipinnat. ISO 12944 luokittelee maalipintojen kestävyuden kolmeen ikäluokkaan: 2...5 vuotta, 5...15 vuotta ja yli 15 vuotta. Ilmastorasitukset ISO 12944-2:ssa jaetaan kuuteen eri korrosiivisuusluokkaan C1...C5-I ja C5-M. Luokka C5-I teollisuusilmasto ja luokka C5-M meri-ilmasto ovat rasittavimmat (vrt. taulukko 5.4).

<b>Ilmastorasitusten korrosiivisuus</b>	<b>Upotusrasitusten korrosiivisuus</b>
C1 erittäin alhainen	Im 1 makeavesiupotus
C2 alhainen	Im 2 meri- tai murtovesiupotus
C3 keskinkertainen	Im 3 upotus maahan
C4 korkea	
C5-I erittäin korkea (teollisuus)	
C5-M erittäin korkea (meri-ilmasto)	

SFS-EN ISO 12944 fi/en 1998-11-30. Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.

Osa 1: Yleistä. 16 s.

Osa 2: Ympäristöolosuhteiden luokittelu. 20 s.

Osa 3: Rakenteen suunnitteluun liittyviä näkökohtia. 30 s.

Osa 4: Pintatyypit ja pinnan esikäsittely. 38 s.

Osa 5: Suojamaaliyhdistelmät. 59 s.

Osa 6: Laboratoriomenetelmät toimivuuden testaamiseksi. 26 s.

Osa 7: Maalaustyön toteutus ja valvonta. 20 s.

Osa 8: Erittelyjen laatiminen uudisrakenteille ja huoltomaalaukseen. 76 s.

Julkaisussa [Tunturi & Tunturi 1999] on hyvin kattava käytännönläheinen esitys metallien pinnoitteiden ja erilaisten pintakäsittelyjen ominaisuuksista ja valmistuksesta.

## 6.11 EMC- ja muut tiivisteet

Sähkömagneettisen yhteensopivuuden EMC:n takaamiseksi tuotteen koko käyttöajan olisi kaikkien EMC-kontaktien resistanssin säilyttävä riittävän pienenä huolimatta erilaisten korroosiomekanismien vaikutuksista.

Tyypillisiä EMC-kontakteja ovat erilaisten koteloiden saumat pienistä komponenttien suojakoteloista, yksiköiden ja kokonaisten laitteiden ulkokuoriin, joita käytetään myös EMC-suojina. Saumat voidaan tehdä yksinkertaisimmillaan vain mekaanisen yhteenpuristamisen avulla, juottamalla tai pitsehitsaamalla taikka saumat toteutetaan käyttämällä elastisia EMC-tiivisteitä. Kaikilla näillä saumaratkaisuilla on omat korroosio-ominaisuutensa.

Toinen EMC-kontaktityyppi ovat erilaiset johtoliitokset, jotka tehdään juottamalla, hitsaamalla tai ruuviliitoksena.

Kolmas EMC-kontaktityyppi ovat jousikontaktein varustetut kaappien ja huoneiden EMC-tiiviisteiden jousikontaktit.

Perusongelmana näissä erilaisissa kontakteissa on se, että niissä liitetään toisiinsa melkein aina sähköisiltä jännitesarjaltaan erilaisia materiaaleja, mistä aiheutuu korroosiotaipumus etenkin saastuneissa ja kosteissa olosuhteissa.

Korroosionhallinnan kannalta olisi ratkaistava EMC-suunnittelussa kuinka hyvänä sähköisten liitosten on säilyttävä. Kun liitosten resistanssivaatimus tiedetään, voidaan selvittää, millaisia materiaaleja ja millaista pinnoitus- ja tiivistetekniikkaa voidaan käyttää. Tämä koskee tiivistesukkia, tiivistemassoja, kansien/ovien tiivisteinä käytettyjä elastomeerimateriaaleja, jne.

EMC-tiivisteinä käytetään paljon elastomeeritiivisteitä, jotka tehdään sähköä johtaviksi joko seostamalla niihin johtavia materiaaleja (katso seuraava kappale) tai kutomalla elastomeerisisuksen päälle metallilangoista sukka. Ongelmaksi näillä materiaaleilla voi muodostua se, että ne ajan mittaan kovettuvat ja murtuvat. Vanhojen koteloiden sisään voi siten päästä vettä.

Elastomeerien tärkeimpiä ominaisuuksia on joustokyvyn säilyminen, siksi materiaalivalinnassa on kiinnitettävä huomiota paitsi itse materiaaliin myös materiaalin koostumukseen. Esim. täyteaineen määrä vaikuttaa joustavuuteen. Enemmän täyteainetta sisältävä materiaali on aina joustamattomampi kuin vähemmän täyteainetta sisältävä. Täyteaine voi myös reagoida ulkopuolelta tulevien aineiden

kanssa. Reaktioissa tapahtuu myös aina tilavuudenmuutoksia, jotka muuttavat elastomeerin ominaisuuksia. Esimerkki herkästi reagoivasta täyteaineesta on kaliumkarbonaatti, jota lisätään halventamaan tuotetta joskus liikaakin. Täyteaineet voivat myös lisätä elastomeerin vedenabsorptiota, jolloin ne alkavat toimia (tiivisteen sijasta) vesipumppuina ulko- ja sisätilan välillä, veden imeytyessä ulkona sateessa elastomeeriin ja haihtuessa sitten kuivempaan sisätilaan.

Joidenkin elastomeerien alkalinkestävyys on muita heikompi ja tällaiset materiaalit eivät käy olosuhteisiin, jossa vallitsee korkea kosteus ja jossa ne ovat kontaktissa emäksisten korroosiotuotteiden kanssa, esim. alumiini- tai sinkkihydroksidin kanssa. Huonoimmin alkaleja kestävät elastomeereista silikoni-, uretaani- ja akryyli/butadieeni-elastomeerit ja parhaiten erilaiset fluori- ja luonnonkumin tapaiset elastomeerit [Schweitzer 1990].

EMC-suojaukseen (sähköiseen tiivistämiseen) on käytettävissä myös sähköä johtavia maaleja tavallisten metallipinnoitteiden lisäksi. Esim. Precision Painting Anaheim, Kalifornia, toimittaa maaleja, joiden avulla laitekotelot voidaan pinnoittaa kupari- tai nikkelpitoisilla maaleilla, joiden avulla saavutetaan pinnalla alle yhden ohmin resistanssi neliötä kohden, kun pinnoitepaksuus on luokkaa 50 µm. [<http://www.precisionpainting.com/conduct.htm>]

## 6.12 Johtavat muovit

Muovi voidaan tehdä johtavaksi sekoittamalla siihen johtavia partikkeleita, kuituja tai saostamalla pintaan metallia tai maalaamalla se johtavalla maalilla. Muovi voi olla myös itsessään johtavaa, kuten esim. polyasetyleeni tai polyaniliini.

Johtavuuden aikaansaaminen partikkelimaisilla lisäaineilla edellyttää, että niitä lisätään muovin sekaan niin paljon, että partikkelit muodostavat muoviin johtavia ketjuja ts. hiukkasten pitää olla kosketuksissa toisiinsa. Partikkelimaisilla hiukkasilla, kuten johtavalla noella ja metallihiutaleilla, seosmäärät voivat nousta jopa 30 %:iin muovin painosta. Muovin mekaaniset ominaisuudet, mm. joustavuus ja iskunkestävyys, alkavat tämän pitoisuuden jälkeen heikentyä voimakkaasti. Kuitumaisilla materiaaleilla esim. 5...10 µm teräskuiduilla tarvitaan vain n. 10 % pitoisuus, joka ei sanottavasti muuta muovin mekaanisia ominaisuuksia. Yleisempää on käyttää partikkelimaisia lisäaineita, sillä johtavien kuitujen huonot ominaisuudet – kallis hinta ja muovimateriaalin kierrätettävyyden heikentyminen – haittaavat suuresti niiden käytön lisääntymistä.

Korroosion kannalta metallihiukkasia sisältävät muovit ovat ongelmallisimpia. Metallihiukkasten galvaaninen yhteensopimattomuus määrää tällöin mahdollisen korroosiovaurioiden syntyprosessin. Mahdollisuuksia arvioitaessa, metallien galvaanisesta jännitesarjasta (vrt. liite 1, kohta 2 *Metallien sähkökemiallinen ja galvaaninen jännitesarja*) löytyy yleensä vastaus. Metallien galvaanisen jännitesarjan avulla on myös arvioitavissa metalloidun tai johtavalla maalilla maalatun muovin pinnoitteen korroosioriskin suuruusluokka.

Itsessään johtavien muovien suurin heikkous on niiden huonot mekaaniset ominaisuudet. Johtavat muovit voivat menettää sähköiset ominaisuutensa myös haptumis/pelkistymisreaktioiden kautta, esim. polyaniliinille voi käydä näin. Johtavat muovit ovat korroosiomielessä rinnastettavissa metalleihin. Esim. polyaniliini vastaa likimain hopeaa jalousasteeltaan ja muodostaa galvaanisen korroosioparin epäjalompien metallien kanssa. [Zipperling Kessler & Co, Ormecon™ Technical information].

### **6.13 Palonestoaineet**

Palonestoaineita käytetään hidastamaan ja estämään erilaisten materiaalien syttymistä ja palamista. Elektroniikassa niitä on käytetty piirilevyjen, koteloiden ja erilaisten tiivisteiden sekä elektrolyyttikondensaattoreiden elektrolyytin lisäaineena.

Korroosion kannalta palonestoaineiden sisältämät klooratut ja bromatut ainekset voivat olla hankalia. Kun palonestoaineita sisältävä materiaali, piirilevy tai tiiviste (elastomeeri) on kosketuksissa metalleihin esim. alumiiniin tai galvanoituun (sinkitty) tukirakenteeseen, reagoivat nämä kosketuspinnat jo ilman normaalin kosteuden vaikutuksesta palonestoaineiden sisältämien kloorin ja bromin kanssa. Galvanoidun pinnan sisältämä sinkki muodostaa palonestoaineen kanssa sinkkikloridia ja sinkkibromidia, jotka hygroskooppisina suoloina muodostavat ilman kosteuden kanssa suolaisen elektrolyytin, mikä vaeltaa palonestoainetta sisältävän materiaalin sisälle.

### **6.14 Korroosioinhibiittoreiden käyttö**

#### **Tausta**

Kaasufaasi-inhibiittoreita (haihtuvia korroosioinhibiittoreita VCI Volatile corrosion inhibitor VPCI, VPI Vapour-phase corrosion inhibitor) käytetään vähen-

tämään metallipintojen korroosiota elektroniikan kuljetuksen ja varastoinnin sekä harvemmin myös laitteiden huollon tai käytön aikana, kun ilmassa on kosteutta, happea tai korrodoivia aineksia. Erilaisten metalliosien varastoinnissa ja kuljetuksissa niiden käyttö on laajempaa kuin elektroniikassa. Oleellista on, että inhibiittoria käytettäessä suojattava kohde on umpinaisessa ja mahdollisimman ”tiivissä” pakkauksessa, jotta suoja-aine muodostaisi pintojen läheisyydessä ilmatilaan pysyvän ja riittävän korkean VCI-pitoisuuden ja tuottaisi pinnoille koko ajan uutta inhibiittoria.

Kaasufaasikorroosioinhibiittoreiden materiaalit ovat kiinteässä olomuodossa olevia kemikaaleja (inhibiittejä), jotka haihtuvat ja leviävät ilmatilaan ja adsorboituvat kaikille pinnoille esim. elektroniikkalaitteeseen. Koska kaikilla pinnoilla on aina ohut molekylaarinen kerros vettä, inhibiitit sekoittuvat/liukenevat siihen ja hidastavat siinä pinnan korroosioreaktioita. Inhibiitissä on varsinainen inhibiitiosiosa ja haihtuva/höyrystyvä osa, joka kuljettaa inhibiitiosan ilmatilan kautta suojattaville pinnoille.

Inhibiittorit voivat olla myös liuotettuina nesteeseen, josta ne voivat haihtua ympäröivään tilaan. Inhibiittorit vaikuttavat sähkökemiallisesti hidastaen sekä anodisia että katodisia korroosioreaktioita (taikka vain jompaakumpaa) [Rossi et al. 1999]. Ne voivat myös eristää pinnoille kertyvän veden inhibiittorin alla olevasta metallipinnasta ja hidastaa kosteuden aiheuttamaa korroosiota. Kaasumaisen inhibiittorin etuna muihin suojaustekniikkoihin nähden on sen kyky tunkeutua kaikkiin pieniinkin rakoihin, pinnoitteiden aukkoihin, jne. [Fiaud 1994, s. 2].

Korroosioinhibiittorit eivät muodosta sähköisesti eristävää kalvoa liitinkoskettimiin eivätkä tee oikosulkuja eristepinnoilla olevien johdinten väliin, jonka vuoksi niitä voi käyttää myös elektroniikassa, jos materiaalivalinta on tehty oikein.

Inhibiittoreiden käytössä [Menke 1997] on varmistettava, että:

- inhibiitit suojaavat kaikkia suojattavan kohteen metalleja
- inhibiittiä todella tulee riittävä määrä suojattaville pinnoille heti alkuvaiheessa (nopea alkuhaihtuvuus)
- inhibiittiä tulee pinnoille tarpeellinen määrä koko käyttöajan (ilmatilaan on tultava koko ajan riittävästi inhibiittiä)
- inhibiitin kantoaine (paperi, muovi) toimii halutulla tavalla eikä esim. kosteassa päästä syövyttäviä yhdisteitä suojattavaan tilaan
- inhibiitti ei vaikuta haitallisesti liitinkoskettimien toimintaan.

Inhibiittorit toimitetaan joko erillisinä kappaleina (tabletteina, rasioina, VCI-vahto) taikka ne on imeytetty pakkausmateriaaleihin (muovikalvo, huopa), joista inhibiittit haihtuvat asteittain ja siirtyvät ilmatilan kautta suojattaville pinnoille. Aikaisemmin VCI toimitettiin pääosin jauheena (pusseissa) tai paperiin imeytetynä. Suojaava kalvo muodostuu suljetussa tilassa jo 1...2 päivässä tai eräiden materiaalivalmistajien mukaan jopa tunneissa. Todellisuudessa inhibiittit peittävät kaikki pinnat, jonka vuoksi on varmistettava niitä valittaessa etteivät ne vaikuta haitallisesti esim. puu- ja muovipintoihin.

Haihtuvia korroosioinhibiittoreita voi käyttää lähinnä suljetussa tilassa esim. kuljetuspakkauksissa taikka erilaisina kääreinä kuljetettavan kappaleen ympärillä, koska inhibiitti haihtuu kaasuna ja adsorboituu pinnoille, joille sitä on tultava koko ajan lisää, jotta suojaava vaikutus säilyisi. Jos pinnan yllä tapahtuu ilman vaihtoa, haihtuu inhibiitti pois pinnoilta ja menettää suojaavan tehonsa. Tämä ominaisuus ilmeisesti myös vähentää mahdollisia haittoja, kun osat puretaan pakkauksistaan ja asennetaan käyttötilaansa. Kun tuote poistetaan VCI:llä suojatusta pakkauksesta, haihtuu VCI jopa muutamassa tunnissa pinnoilta [ZERUST 1999]. [Fiaud 1994] antaa inhibiittoreiden vaikutusetaisyydelle lukuarvoiksi lähteestä suojattavaan kohteeseen DICHANilla enintään 35 cm ja CHC:llä enintään 2 m.

Esim. kuljetuspakkauksissa inhibiittorin ja suojattavan pinnan välillä ei saa olla umpinaista estettä esim. laitekotelo, jonka sisällä suojattava elektroniikka sijaitsee, koska kaasun vaihto lähes umpinaisen kotelon sisätilan ja sen ulkopuolisen tilan välillä on suhteellisen vähäinen (vrt. kohta 2.6 *Korroosionestotekniikat, Kaasukontaktien minimoiminen*). Tämän vuoksi kuljetuspakkauksessa inhibiittorilähteitä tulisi sijoittaa sekä laitteen ulkopuolelle että laitekoteloiden sisälle. Tilannetta voi parantaa käyttämällä suurempia määriä inhibiittoria kuin käyttösuositukset ovat.

Inhibiittoreiden toiminta-aika voi olla suljetussa tilassa sen tiivyydestä riippuen 1...10 vuotta. Inhibiittoreiden vaikutusaikaa säädellään esim. käyttämällä pienen ( $10^{-5}$ ... $10^{-2}$  mm Hg) ja suuren höyrynpaineen ( $10^{-2}$ ...100 mm Hg) omaavia materiaaleja sovelluskohteen mukaan valikoiden. Suuri höyrynpaine haihduttaa inhibiittiä nopeasti ja muodostaa suojakerroksen nopeasti. Pienen höyrynpaineen inhibiitti muodostaa hitaammin suojakerroksen, mutta ylläpitää sitä kauemmin kuin suuren höyrynpaineen aine.

Jos höyrynpaine on suurempi kuin edellä mainittu yläraja, voivat inhibiittit haihtua liian nopeasti ja kulua loppuun liian pian. Mainittua alarajaa pienempi höyrynpaine voi haihduttaa inhibiittejä liian hitaasti eikä kykene kehittämään nopeasti riittävän hyvää suojakalvoa [Aonuma & Tamai 1981].



Esimerkkejä suuren höyrynpaineen aineista ovat cyclohexyl ammonium carbonate, diisopropylamine nitrite ja guanidine carbonate. Pienen höyrynpaineen omaavia materiaaleja ovat dicyclohexylamine nitrite, dicyclohexylamine cromate ja hexamethylenetetramine [Aonuma & Tamai 1981].

Riittävän inhibiittorimäärän varmistaminen on tärkeää, sillä liian pieni määrä voi jopa lisätä paikallista korroosiota [Fontana 1987], mikä on ominaista anodisia reaktioita estäville inhibiittoreille. Käytännön testeissä ja käytössä on todettu usein, että valmistajien antamat suositukset tarvittavasta inhibiittorimäärästä ovat liian pieniä. Tämän vuoksi inhibiittoreiden käytössä on sopivan “annoksen” määrittäminen selvitettävä itse lähinnä käytännön kokemusten ja testien kautta. Tavallaan käänteinen tälle liian vähäisen inhibiittimäärän käytölle on ilmassa ja suojattavilla pinnoilla olevien epäpuhtauksien määrän vaikutus. Jos epäpuhtauksia ja vettä on paljon, “kuluvat” inhibiitit nopeasti pinnoilta taikka niiden vaikutus ei ole riittävä kontaminoituneella pinnalla.

### **Inhibiittorit kuljetuspakkauksissa**

Elektroniikkalaitteen kuljetus-, varastointi- ja asennusolosuhteet poikkeavat tuotannon tai käytön olosuhteista usein huomompaan suuntaan. Kuljetuksessa laite ei tuota lämpöä, mikä pienentäisi suhteellista kosteutta suhteessa laitekotelon ulkopuolisiin olosuhteisiin. Kosteuden korkea taso ja ilman suolapitoisuus merellä ovat suurin ongelma mekaanisen tärinän ohella kuljetuksissa. Tämän vuoksi laite tai sen osat pyritään pakkaamaan ja suojaamaan siten, että ne kestävät kuljetuksen aikana esiintyvät rasitukset. Ihanteellisinta olisi pakata laite niin, että se on kuiva ja vapaa ilman epäpuhtauksien vaikutuksilta koko kuljetuksen ajan.

Korroosion kannalta tärkeimpiä ongelmia on ilman kosteuden ja epäpuhtauksien yhteisvaikutus. Ilman lämpötilan vaihtelut lisäävät kostumista. Kuljetuspakkaus muodostuu tavallisesti mekaanisesta suojasta, muovisesta suojakalvosta ja iskunvaimennusmateriaalista. Muovinen suojakalvo vähentää ilman vaihtumista pakkauksen sisällä, mutta ei useinkaan estä vesihöyryn tunkeutumista sisäosiin. Kosteuden vähentämiseen voidaan käyttää kuivaavia aineita (desiccants). Nämä absorboivat jossain määrin kaikkia ilmassa olevia kaasuja, myös korroosioinhibiittejä, mikä osaltaan vaikeuttaa toimivan ratkaisun löytämistä. Suuri ongelma on pakkausten pitäminen ehjänä koko kuljetus- ja varastointiketjun läpi.

Suojattavan tuotteen on oltava kuiva, vapaa liuottimista ja muista epäpuhtauksista ja suojaavia pakkausmateriaaleja käytettäessä pakkaaminen on tehtävä huoneenlämmössä. Suojaavan pakkauksen tulee olla suljettu (ei ilmatiivis), veden pääsy pakkaukseen on estettävä eikä pakkaus saa olla kosketuksissa happoja

tuottaviin aineisiin (kosteaa puu tai pahvi, käsien hiki jne.). Inhibiittien vapautumista kiihdyttäviä (käyttöikää lyhentäviä) tekijöitä ovat pitkäaikainen altistuminen yli 65 °C lämpötilalle ja kemiallisesti aggressiivinen ympäristö, joka sisältää paljon rikkidioksidia tai suolaa (merikuljetus).

Käytettäessä paperisia VCI-pakkausmateriaaleja on varmistettava ettei paperi ole halogeenipitoista (esim. suolainen), koska kostuminen vapauttaa halogeeneja, jotka puolestaan tuhoavat suojaavan inhibiittikerroksen [Menke 1997], koska pinnoille tulee runsaasti sähköä kuljettavia ioneja.

Kuljetuspakkauksiin tarkoitetut muovikalvot voidaan seostaa korroosioinhibiitilla. Näitä käytettäessä on erityisesti varmistettava, että inhibiitin määrä todella on riittävä suojattavassa kohteessa. Homogeenisen kalvon ongelmana on sen symmetrisyys ts. se vapauttaa inhibiittiä molemmille puolille, jolloin toinen puoli inhibiittistä menee hukkaan. Toisaalta kalvo voi läpäistä vettä, koska tiiviinä se ei myöskään päästäisi inhibiittiä sisältään ulos. Kalvon tulisi olla kaasutiivis, jottei vesi ja happi pääse siitä läpi suojattavaan kohteeseen ja samalla sen tulisi haihduttaa jatkuvasti uutta inhibiittiä suojattavaan kohteeseen. Tällainen kalvo voidaan toteuttaa esim. kolmikerrosrakenteella, jossa ulko- ja sisäpinta ovat pehmeitä ja sitkeitä ja keskikerros lähes kaasutiivis. Inhibiitit seostetaan tässä sisäkerrokseen, jolloin kalvo kokonaisuudessaan on mekaanisesti luja, estää veden läpikäynnin ja päästää korroosiota hidastavaa ainetta suojattavan laitteen pinnoille.

## **Monimetallisuojaus**

Inhibiittoreiden materiaalit ovat periaatteessa selektiivisiä ts. ne suojaavat vain tiettyntyyppisiä metalleja tietynlaisia kemikaaleja esim. ilmassa olevia rikkiyhdisteitä vastaan. Uudemmissa tuotteissa on käytetty joko laajavaikutteisia kemikaaleja taikka useampaa kemikaalia yhdessä täydennettynä vielä kosteutta imevillä aineksilla.

Ensimmäinen toisen maailmansodan jälkeen kehitetty tuote oli DICHAN (disykloheksyyliamiininitriitti), joka suojaa vain rautaa ja alumiinia. Sen höyrystyvä ainesosa on disykloheksyyliamiini ja varsinainen inhibiitti on nitriitti.

Haittana DICHANilla on sen lievä myrkyllisyys, kuten muillakin nitriiteillä. Sittemmin on kehitetty ympäristöystävällisempiä materiaaleja, jotka suojaavat myös kuparia ja yhtä aikaa useita muita metalleja. Valmistajat tarjoavat rautapohjaisille metalleille inhibiittorimateriaalia, joka suojaa myös muita metalleja (esim. sinkki, lyijy, tina, nikkeli, kromi), mutta ei kuparia eikä alumiinia.

Erään valmistajan ei-rautametalleille tarkoitettu inhibiittori soveltuu myös alumiinille, kuparille, messingille ja kauttaaltaan sinkitylle teräkselle. Monimetallin inhibiittorit on tarkoitettu kaikille metalleille, mutta ne eivät ole yhtä tehokkaita raudalle kuin pelkästään raudalle tarkoitettut inhibiittorit.

Korroosioinhibiittorin käyttöä harkittaessa on arvioitava:

- kyseessä olevan laitteen herkkyys korroosiolle
- todelliset ympäristöolosuhteet (lämpötila, kosteus, epäpuhtaudet)
- muiden toimenpiteiden riittävyys korroosiosuojauksen kannalta (kuljetuspakkaus, kuivaavan aineen käyttö)
- suojattavat kohteet ja niiden materiaalit ja niihin sopivien inhibiittoreiden valitseminen.

Taulukossa 6.4 on luetteloitu elektroniikassa käytettyjä metalleja. Inhibiittoreiden “valikoivan” vaikutuksen vuoksi on varmistettava käytännön kokein, onko ko. materiaaleista juuri oman tuotteen kohdalla hyötyä vai ei ja toimiiko inhibiittori toivotulla tavalla.

*Taulukko 6.4. Elektroniikkatuotteissa käytettäviä metalleja.*

Osa, komponentti	Elektroniikassa käytettäviä metalleja
Kotelot, tukirakenteet, jouset, jäähdytysrivat	Alumiini, teräs, messinki, pronssi, kupari, pinnoitteet (sinkki, nikkeli, kupari, jne.)
Piirilevy	Kupari, kupariseokset, pinnoitteet (tina, tina-lyijy, kulta)
Sähköiset kontaktit ja maadoitukset	Kupariseokset, teräs, alumiini, kontaktipinnoitteet (kulta, palladium, hopea-palladium, hopea, nikkeli, tina, tina-lyijy)
Liittimet	Messinki, beryllium-kupari, fosforipronssi, ruostumattomat teräkset, kontaktipinnoitteet
Kytkimet ja releet	Kupariseokset, teräkset, ruostumattomat teräkset, kontaktipinnoitteet
Passiiviset komponentit, puolijohdekomponentit, mikropiirit, jne.	Kulta, kupariseokset, nikkeli (yleensä välikerroksena), hopea, alumiini, kovar (nikkelirautaseos), tina-lyijy, wolframi

## Haittavaikutukset

Korroosioinhibiittoreiden käyttöön saattaa liittyä haitallisia vaikutuksia, kuten joidenkin metallien korrodoituminen, tiettyjen muovimateriaalien rappeutuminen, piirilevyjen eristeominaisuuksien huononeminen, häiritsevän kalvon muodostuminen optisille pinnoille, orgaanisten materiaalien värjäytyminen ja ohuen eristävän kerroksen muodostuminen kontaktipinnoille. Anodisiin reaktioihin vaikuttavilla inhibiiteilla on tietty minimimäärä, jonka alapuolella ne voivat lisätä paikallista korroosiota suojaamisen sijasta [Fontana 1987].

*Taulukko 6.5. Esimerkkejä inhibiittorituotteista.*

<b>Tuote</b>	<b>Käyttötapa</b>
Paperin pinnoittamiseen tarkoitettua lateksin lisäaine	Tuloksena on korroosiosuojan antava paperi tai aaltopahvi. Laboratoriokokeita suoritettu rajoitetulle valikoimalle metalleja. Valmistaja suosittelee laboratorio- tai kenttäkokeita muille materiaaleille.
Jauhe	Jauhe puhalletaan onkaloihin tai muihin monimutkaisiin rakenteisiin, jotka on muuten vaikea suojata. Monimetallisuojaa aina kahteen vuoteen saakka, jauhetta ei tarvitse poistaa ennen laitteiston käyttöä.
Spray	Kuten yllä. Ei saa suihkuttaa elektroniikan ollessa jännitteellinen.
Kapselit	Elektroniikan suojaaminen. Käyttöikä on voimassa, jos ilman vaihtuminen tapahtuu enintään kaksi kertaa päivässä.
Kiristekalvot, kutistekalvot, muovikalvo	Laitteiden tai osien pakkaamiseen kuljetusta tai varastointia varten. Muovikalvo voi inhibiittorin lisäksi olla käsitelty myös antistaattiseksi (käyttö esim. pusseina komponenttilevyjen pakkaamiseen, vrt. SFS-EN 100015-1).
Kenno-, vaahtolevy, kuplakalvo	Kuten yllä, mutta toimivat samalla pehmusteena.
VCI-käsitellyt pahvipakkaukset	Itse pakkaus antaa korroosiosuojaa.
Pinnoitemateriaali	Nesteenä toimitettava polymeerimateriaali, joka sisältää komponenttilevyn suojaukseen soveltuvaa inhibiittia. Levitetään ruiskuttamalla tai pensselillä. Syntyvä kalvo voidaan poistaa haluttaessa alkoholilla.
Rasva	Kosketinten suojaamiseen tarkoitettu rasva, joka sisältää korroosioinhibiittia.
Suojakortti	Levyn muodossa toimitettava materiaali, joka on tarkoitettu pienten laitteiden korroosiosuojaukseen (matkapuhelin, kannettava PC, jne.).

DICHAN syövyttää kuparia ja pronssia sekä hopeaa, on haitallinen sinkille, lyijylle sekä magnesiumille sekä on terveydelle ja samalla ympäristölle haitallista. Natriumnitriitti-inhibiittoria, jonka ongelmat ovat samoja, käytetään silti edelleen halpuutensa vuoksi etenkin sovelluksissa, joissa tarvitaan suuria määriä inhibiittoria.

Joihinkin materiaaleihin liittyy myös terveys- ja ympäristöongelmia niiden karsinogeenisten ominaisuuksien vuoksi. (esim. vanhemmat nitriittipitoiset aineet, DICHAN).

Koska inhibiittorimateriaalit saattavat aiheuttaa korroosiota joissain metalleissa, käyttäjän on tarkistettava aina ennen käyttöä ettei inhibiittorilla ole tällaisia haittavaikutuksia. Haittavaikutukset voi käytännössä tarkistaa vain testaamalla erilaisia inhibiittoreita lähellä todellisia kuljetus- ja käyttöolosuhteita ja käyttämällä suojattavaksi tarkoitettuja tuotteita ja niiden osia sekä pakkausmateriaaleja testiobjekteina.

### **Inhibiittorituotteet**

Inhibiittorituotteita on saatavilla mm. jauheena, pusseina, kalvoina (impregnoitu kalvo/ puoliläpäisevä kalvo), kapseleina, jne. (taulukko 6.5). Yleisiä tapoja materiaalien käytössä ovat kapselit ja tabletit (suljetuissa tai osittain suljetuissa kotoissa, kaapeissa, jne.) sekä pakkausmateriaalien käsittely inhibiiteillä (muovi/kiristekalvot, huopa, paperit, aaltopahvi).

Eräissä tapauksissa inhibiittoriin on yhdistetty vettä absorboivaa materiaalia esim. CORTEC ja [US Patent 5324448 ks. *Inhibiittoripatentteja*]. Inhibiittorin kanssa ei aina voida käyttää kuivaavia aineita, kuten silikageeliä, koska ne adsorboivat veden lisäksi myös muita kaasuja, kuten VCI-kaasuja [Fiaud 1994, s. 1].

Taulukossa 6.5 mainittujen tuotteiden valmistajia ovat mm. Contract Chemicals Ltd, Corrosion Inhibitors Inc., Century Corrosion Technologies, Inc./Cortec Corporation, Daiwa Fine Chemicals, Grofit Plastics, EXCOR GmbH, Northern Technologies International Corporation Zerust™, Zerust Oy ja Senson.

### **Inhibiittoreiden perusrakenne**

VCI:t ovat yleensä jonkin kohtalaisen voimakkaasti haihtuvan orgaanisen emäksen (perusaineen) ja heikosti haihtuvan hapon suoloja [Fiaud 1994]. Tavallisimmat perusaineet ovat:

- Sykloheksylamiini (cyclohexylamine)
- Disykloheksylamiini (dicyclohexylamine)
- Guanidiini (guanidine).

Näiden kanssa käytettävät hapot ovat:

- Hiilihappo ( $\text{CO}_3^{2-}$  ioni)
- Typpihapoke ( $\text{NO}_2^-$  ioni)
- Karboksyylihapot ( $\text{R-COO}^-$  ionit).

Varsinaiset käytetyimmät inhibiittorimateriaalit ovat [Fiaud 1994]:

#### *Benzotriazole (BTA)*

Tämä orgaaninen aine soveltuu kuparin ja sen seosten suojaamiseen. BTA:n kaasunpaine on melko alhainen ollen lämpötilassa 25 °C luokkaa  $10^{-5}$  mm Hg ( $10^{-3}$  Pa), mikä merkitsee aluksi hidasta, mutta sittemmin pitkäaikaista vaikutusta. BTA estää etenkin kuparin sulfidoitumisen ts. suojaa hyvin  $\text{H}_2\text{S}$ - ja  $\text{COS}$ -kaasuilta. BTA:n vaikutus heikkenee, jos läsnä on runsaasti klorideja.

#### *Dicyclohexylammonium nitrite (DICHAN)*

DICHAN soveltuu terästen suojaamiseen. Se korrodoi sinkkiä ja voi olla joko tehoton tai korrodoiva alumiinille ja kuparille. Sitä voidaan käyttää sellaisenaan taikka yhdessä muiden VCI-tuotteiden kanssa. DICHANin kaasunpaine eri lämpötiloissa on:  $7 \cdot 10^{-6}$  mmHg /  $-1$  °C,  $10^{-4}$  mmHg / 21 °C ja  $7 \cdot 10^{-3}$  mmHg / 60 °C. DICHAN on yhtä myrkyllistä kuin natrium-nitraatti.

#### *Cyclohexylamine carbonate (CHC)*

Tämä materiaali suojelee hyvin terästä ja monia ei-rautametalleja, mutta korrodoi voimakkaasti kuparia ja kuparilejeerinkejä. CHC:n kaasunpaine on eri lämpötiloissa: 0,4 mmHg / 25 °C ja 7,58 mmHg / 55 °C ts. paljon suurempi kuin DICHANin. CHC:n leimahduspiste on 49 °C.

Viimeksi mainitusta on Contract Chemicals Ltd valmistanut tuotteen Cyclohexyl ammonium-N-cyclohexyl carbamate, joka on valkeaa kiteistä jauhetta. Sen kaasunpaine on 0,4 mmHg / 25 °C ja 7,58 mmHg / 55 °C ja leimahduspiste on 49 °C ts. samat arvot kuin CHC:llä. Tämän tuotteen todetaan suojaavan hyvin alumiinia, valurautaa, kromia, tinaa ja sen seoksia sekä sinkkiä. Kuparille, kupariseoksille, lyijylle ja juotostinalle tuote antaa jonkin verran suojaa. Magnesiumille tuotetta ei suositella.

Kuten edellä olevasta näkyy, annetaan esim. CHC:stä ja sen kaltaisista aineista jonkin verran ristiriitaisia tietoja, mikä korostaa edelleenkin tarvetta tarkistaa aina kussakin sovelluksessa toimiiko inhibiittorimateriaali toivotulla tavalla vaiko ei.

### **Testausmenetelmiä ja standardeja:**

Korroosioinhibiittoreiden toimivuuden testaamiseksi kuljetuspakkauksissa on olemassa vain muutama standardoitu testausmenetelmä. Vaikeutena testaamisessa on mm. eri inhibiittoreiden erilaiset toimintatavat ja hyvin vaihtelevat kemialliset ominaisuudet.

Federal Standard **FED-STD-101C**, Federal test method standard test procedures for packaging materials. Method 4031, Corrosion inhibiting ability of V.C.I. vapors, procedures A and B. (March 13, 1980).

Tällä testillä tutkitaan VCI-materiaalien kykyä toimia korroosiosuojana. Menetelmä A on tarkoitettu testaamaan VCI-materiaaleja kiteisessä tai nestemäisessä muodossa. Menetelmällä B testataan VCI-materiaalilla pinnoitettuja tai kyllästettyjä tuotteita. Molemmissa testeissä voi käyttää terästä tai itse valittuja metalleja korroosioindikaattorina.

Federal Standard **FED-STD-101C**, Federal test method standard test procedures for packaging materials. Method 3005, Contact corrosivity test of solid materials in flexible, rigid, or granular forms. (March 13, 1980).

Tällä testillä tutkitaan aiheuttaako pakkausmateriaali korroosiota terästä tai alumiinipintoihin, kun ne joutuvat kosketuksiin pakkausmateriaalin kanssa. Tätä testausperiaatetta voi soveltaa myös siten, että testataan toimiiko korroosioinhibiittorilla kyllästetty pakkausmateriaali korroosiosuojana vai aiheuttaako se korroosiota tutkittaville metallipinnoille.

Käyttäjän kannalta käytännöllisintä on kokeilla inhibiittoreita esim. omien tuotteiden kuljetuspakkauksissa juuri aiotulla käytötavalla. Testattavaksi kannattaa ottaa liittimiä, piirilevyjä ja myös mikropiirejä sekä metalliosia, jotta erityyppiset metallipinnat tulisi tarkistettua kattavasti. Kuljetuspakkaukset niihin sijoitettujen tuotteiden kanssa kannattaa testata kohotetussa lämpötilassa 30...55 °C ja suurella suhteellisella kosteudella 60...98 %, jolloin korroosiomekanismit vastaavat suhteellisen hyvin kuljetusolosuhteita. Vielä lähemmäksi todellisia olosuhteita päästään, jos testausilmassa on rikkiyhdisteitä tai klorideja. Testeissä on huolehdittava siitä, että tutkittavaa inhibiittoria käytetään ao. valmistajan itse suosittelemalla tavalla ja riittävillä määrillä.

[Mercer 1994] kuvailee artikkelissaan inhibiittoreiden yleistä testaustekniikkaa. VCI-tuotteiden osalta on kerrottu muutamista tavoista tehdä suhteellisen pelkistettyjä testejä metallinäytteille. Testausjärjestelyissä on tiedostettava VCI-materiaalien toimintaperiaate, ne toimivat vain suljetussa tilassa, jonka sisälle on sijoitettu inhibiittorilähde. Näin ollen testeissä liian suuri ilmatila tai ilman vaihtuvuus laimentavat inhibiittorimääriä. Toisaalta, jos testattava laite on lähes umpinainen tai siinä on koteloituja osia, estyy kaasun vaihto laitteen sisä- ja ulkotilan välillä, jolloin inhibiittorin vaikutus laitteen sisällä jää hyvin vähäiseksi.

Myös virhemahdollisuudet tulosten tulkinnassa ovat suuret, koska korroosiomekanismit ja olosuhteet ovat niin moninaiset, VCI-perusmateriaalien suojauskyky on suhteellisen rajoittunut vaikuttaen suotuisasti vain muutamaiin metalleihin. Virhetulkintoja voi tulla myös sen vuoksi, että monista pakkausmateriaaleista (puu, pahvi) erittyy korkeassa kosteudessa halogeeneja, happoja, ym. korrodoivia aineksia, jolloin inhibiittorin teho saattaa jäädä olemattomaksi. Vastaavasti jotkin inhibiittorit haihtuvat niin hitaasti, että nopeissa testeissä inhibiittori ei ehdi ollenkaan toimia [Kraemer 1997].

Viitteessä [Jaeger 1997] on kuvattu kuinka kvartsikidemikrobalanssimenetelmällä voidaan havainnoida korroosioinhibiittoreiden toimivuutta (QCM Quartz Crystal Microbalance).

Seuraavissa standardeissa on spesifioitu joukko pakkausmateriaaleja, joissa on myös inhibiittoreita. Tärkeää kosteus ja korroosiosuojauksen kannalta on varmistaa, että käytettävät materiaalit ovat mekaanisesti riittävän sitkeitä ja lujia ja että ne estävät veden pääsyn laitteisiin. Materiaalin tulisi sietää taivutusta ja terävien esineiden pistot, jottei niihin käsittelyn ja kuljetuksen aikana tulisi reikiä tai halkeamia, kuten alumiinikalvoja käytettäessä voi käydä.

**MIL-I-46058C** (1 July 1972), Insulating Compound, Electrical (for Coating Printed circuit Assemblies). U.S. Government Printing Office, 14 s. Inactive 30 Nov 1998.

**MIL-I-46058C, Amendment 7** (14 September 1993), Insulating Compound, Electrical (for Coating Printed circuit Assemblies), Inactive 30 Nov 1998. 5 s.

**MIL-B-22020-D** (2 May 1990), Bags, transparent, flexible, sealable, volatile corrosion inhibitor treated. 11 s.



**MIL-PRF-131J** (26 August 1998), Barrier materials, watervaporproof, greaseproof, flexible, heat-sealable. 19 s.

**MIL-PRF-3420G** (11 September 1998), Packaging materials, volatile corrosion inhibitor treated, opaque. 16 s. (Used to protect steel)

**MIL-PRF-22019D** (31 August 1998), Barrier materials, transparent, flexible, sealable, volatile corrosion inhibitor treated. 16 s.

**MIL-PRF-22191E** (26 August 1998), Barrier materials, transparent, flexible, heat-sealable. 20 s.

**MIL-PRF-81705D** (3 September 1998), Barrier materials, flexible, electrostatic protective, heat-sealable. 27 s. (Replaces MIL-B-81705C).

### **Inhibiittoripatentteja**

Korroosioinhibiittoreista on julkaistu 1990-luvulla muutamia erityisesti elektronikka-alaa sivuavia patentteja, joissa tavoitteena on ollut toisaalta parantaa inhibiittorin toiminta-aikaa ja toisaalta yhdistää inhibiittori kosteutta absorboiviin materiaaleihin (US patentit), jolloin toisaalta kuivataan suojattavan pinnan ympäristö ja toisaalta peitetään pinnat suojaavalla kemikaalilla. Alla mainittu japanilainen patentti JP 9031672A koskee Butynediolin (2-butyne-1,4-diol) käyttöä autonosien kuljetuspakkauksissa.

US Patent 5324448. Combination dessiccant and vapor-corrosion inhibitor. June 28, 1994.

US Patent 5391322. Method for extending the service life of a vapor-corrosion inhibitor. February 21, 1995.

JP Patent 9031672A. Volatile corrosion inhibitor, February 4, 1997.

JP 9039907A. Packing method for metal sheet. February 10, 1997.

WO9749870A1. Anti-corrosive material. December 31, 1997.

Viimeksi mainittu patenttihakemus (WO...) koskee monikerroksista polyetyleenikalvomateriaalia, jossa ulkopuoli suojaa mekaanisesti ja kemiallisesti ja sisäpuolella on yksi tai useampi kerros, jotka on kyllästetty biosideillä ja VCI:llä taikka molemmilla estämään mikrobien kasvua ja korroosiota.

US Patent 3836077: Apparatus protector, September 17, 1974.

Tämä patentti koskee Zerust VCI-kapseleita, joissa voi olla useammanlaisia inhibiittejä ja jotka voidaan sijoittaa suojattavan laitteen sisälle.

### **6.15 Kaasuabsorbentit**

Kuljetuspakkausten ja muiden suljettujen tilojen korroosionsuojaukseen voidaan käyttää myös materiaaleja, jotka absorboivat ja sitovat kemiallisesti itseensä esim. korrodoivia kaasuja, kuten SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S ja NO<sub>2</sub> [Kelly 1999]. Näitä aineita on käytetty erilaisten kaasujätteiden poistoon suljetusta tilasta.

Tällainen paperi voi suojata monia metalleja kuten kupari, tina, juotostina, kulta, nikkeli, messinki. Suojauskeino soveltuu kaikenlaisille kuljetuspakkauksille, etenkin komponenteille, joiden liitosjohdinten juottuvuuden säilyttäminen on oleellisen tärkeää. Materiaalin tehollinen käyttöaika on riippuvainen pakkauksen tiiviyydestä, tyypilliset ajat ovat puolesta vuodesta kahteen vuoteen. Mikäli pakkaukset vuotavat, absorboiva materiaali kyllästyy ennen pitkää ja menettää tehonsa.

Paperiin imeytetyn kaasuabsorbenttin sijaan voidaan käyttää myös kapseleita, joissa on esim. rikkiyhdisteiden sitomista varten kaliumpermanganaatilla kyllästettyä silicamassaa.

Oleellista on selvittää näitä materiaaleja käytettäessä, mitä kaasuja ja kuinka paljon ne absorboivat.

## 6.16 Kosteuden poisto kuljetuspakkauksista

Viitteessä [KOTEL 236] on käsitelty yleisesti kuljetuspakkausten materiaaleja ja pakkauksille asetettavia mekaanisia, ilmastollisia, biologisia sekä staattisen sähkönsietoisuusvaatimuksia (katso myös SFS-EN100015-1 *Staattiselle sähkölle arkojen komponenttien suojaus* ja IEC 61340-5-1 *Protection of electronic devices from electrostatic phenomena*). Kosteuden ja sen vaikutuksesta tapahtuvan korroosion haittavaikutusten rajoittaminen on yksi tärkeimmistä pakkauksilta vaadittavista ominaisuuksista. Tässä kohdassa käsitellään kosteudenpoistotekniikoita.

### Silikageeli

Silikageeli (piihappogeeli) on vettä adsorboiva materiaali, joka parhaimmillaan adsorboi vettä yli 35 % painostaan, kun ilman suhteellinen kosteus on 80 %. Se on tunnetuin kuljetuspakkauksien kosteudenpoistoon käytetty kemikaali. Silikageeli on valmistettu natrium silikaatista (sodium silicate) ja rikkihaposta. Siitä käytetään nimityksiä amorphous silica, synthetic amorphous silica, amorphous silicon dioxide, (silica on kolloidista piidioksidia, SiO<sub>2</sub>).

Silikageeli toimitetaan huokoisina rakeina. Ominaispaino on n. 2,2 kg/dm<sup>3</sup>. Niimestään huolimatta silikageeli ei ole hyytelömäistä (geeli). Silikageeliä myydään ja käytetään pusseissa tai rasioissa, jotka on suojattu ennen käyttöä ilmatiiviisiin pakkauksiin. Yleensä silikageelirasiat on varustettu väriä muuttavalla indikaattoriaineella, jonka väri kuivana on esim. sininen ja kostumisen jälkeen vaaleanpunainen [Silica gel FAQ 1999]. Jos silikageelipusseja ei ole varustettu kosteusindikaattorilla, on niiden käytössä varmistettava muilla keinoilla, että materiaali on kuivaa ennen pakkaamista. Suuressa huonetilassa silikageelipussit kostuvat muutamassa tunnissa, jolloin niistä ei enää ole mitään hyötyä pakkausten kuivana pitämisessä.

Silikageelirakeet ovat täynnä mikrohuokoisia, joihin vesi adsorboituu ja kondensoituu kapillaarisesti (vrt. liite 1, kohta 3.8 *Kondensoituminen*). Silikageelin vedenpidätyskyky perustuu näiden huokoisten suureen sisäiseen pinta-alaan. Rakeiden huokoisten halkaisija on luokkaa 15 nanometriä [Silica Gel Desiccant Grade 1999] ja niiden sisäinen pinta-ala on luokkaa 600...700 m<sup>2</sup> grammaa kohden. Silikageeli on kemiallisesti epäaktiivinen, myrkytön ja sen pinta tuntuu kuivalta myös kostuneena [Silica gel FAQ 1999].

Silikageelin hyvä ominaisuus on adsorboida itseensä kosteutta niin kauan kunnes saavutetaan kyllästystila. Vesi sitoutuu lähes pysyvästi silikageeliin, jonka vuoksi se pitää ilmatilan kosteuden tietyn rajan alapuolella päästämättä siinä olevaa kosteutta ilmatilaan takaisin. Jos silikageeli on vapaassa tai liian suuressa ilmatilassa, se adsorboi itseensä vettä ilmatilan suhteellista kosteutta vastaavan määrän ja menettää muutamassa tunnissa toimintakykynsä ko. olosuhdetta alemmissa kosteuksissa.

Silikageelin tasapainokosteus, ts. suurin adsorboituva vesimäärä, ilman suhteellisen kosteuden funktiona on suuruusluokalleen taulukon 6.6 mukainen.

*Taulukko 6.6. Silikageelin tasapainokosteus ja ilman suhteellinen kosteus.*

Ilmatilan suhteellinen kosteus (%)	10	20	40	60	80
Adsorboitunut vesimäärä tasapainotilassa (paino %)	8	15	27	33	35

[Agm Container Controls, <http://www.agmcontainer.com>, MIL-D-3516 Type II Grade H]

Taulukon 6.6 perusteella voidaan arvioida tarvittava silikageelimäärä eri kokoisissa pakkauksissa. Käytännössä on otettava huomioon adsorbentin oma alkukosteus, ilmatilan suuruus, kuljetuspakkauksen alkukosteus ja kuljetuksen aikana pakkauksen läpi vuotava kosteus. Pitkäaikaisissa kuljetuksissa ja varastoinneissa riskit pakkauksen kostumiseen ovat suuret, jonka vuoksi on aiheellista laittaa pakkauksiin adsorbenttia kohtuullinen ylimäärä.

Silikageelin etuna on mahdollisuus käyttää sitä toistuvasti periaatteessa lukematonta kertojen. Käytetty kostunut materiaali kuivataan 120...150 °C lämpötilassa [Silica Gel Desiccant Grade 1999] ja säilytetään ilmatiiviissä pakkauksessa, jottei se kostu uudelleen ennen varsinaista käyttöä.

Silikageeli adsorboi ilmasta veden lisäksi kaikkia kondensoituvia kaasuja, myös öljyä. Näin ollen sen ominaisuudet toistuvassa käytössä voivat muuttua huokoisten tukkeutuessa asteittain.

**MIL-D-3464E** (21 Apr 1987) Desiccants, activated, bagged, packaging use and static dehumidification. Type I, II & III. 21 s.

**MIL-S-14374C** (11 February 1983) Silica gel, iron free. (Inactivated standard 23 June 1995). 7 s.

Piechota, Dennis. Humidity Control in Cases: Buffered Silica Gel versus Saturated Salt Solutions. WAAC Newsletter, Vol. 15, Number 1, Jan. 1992, s. 19–21.

<http://palimpsest.stanford.edu/waac/wn/wn15/wn15-1/wn15-108.html>

## **Muut vedenpoistoaineet**

Silikageelin kaltaisesti toimivia adsorbentteja ovat:

Molekyyliseula (Molecular Sieve) on zeoliitin kidemäinen ja huokoinen muoto, joka on natrium-, kalium- tai kalsium alumina-silikaattia. Se on adsorbenteista tehokkain ja myös kallein. Zeoliitti adsorboi tehokkaasti vettä, mutta sitä käytetään myös kaasusuodattimena ja katalyyttinä eri muodoissaan. Se voidaan valmistaa siten, että se adsorboi nimenomaan vettä eikä muita aineita. Tämä ominaisuus perustuu sen huokoisten tasakokoisuuteen, mitä voidaan säädellä. Muilla adsorbenteilla huokoisten koko vaihtelee, jonka vuoksi ne eivät ole yhtä selektiivisiä. Veden adsorbointi on myös nopeampaa kuin muilla aineilla ja se toimii myös korkeammassa lämpötiloissa kuin muut adsorbentit.

<http://www.gracedavison.com/>

Bentoniitti-savi (Montmorilloniitti-savi), joka on kidevesipitoinen luonnon mineraali (kalsium alumiinisilikaatti ja natrium alumiinisilikaatti  $[(Na, Ca_{0.5})_{0.33}(Al, Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 nH_2O]$ ) sisältäen kymmeniä kolloidisia silica-mineraaleja. Bentoniitti-savi on halvin adsorbentti veden poistoon. Se on väriltään valkea, vaaleanpunainen, vaalean harmaa tai vaalean vihreä taikka ruskea ja muuttuu keltaiseksi kastuessaan. Ominaispaino on noin  $2...2,7 \text{ kg/dm}^3$ . Sisäinen pinta-ala on luokkaa  $74 \text{ m}^2/\text{g}$ .

[http://www.jefo.ca/fiches\\_anglais/sodium\\_bentonite.html](http://www.jefo.ca/fiches_anglais/sodium_bentonite.html)

Bentoniittia (montmorilloniittia) käytetään myös mineraalilisäaineena joissain elintarvikkeissa, rehujen lisäaineena, viinin kirkasteena ja maanrakennuksessa vesieristekerrosten tekemiseen. Maalitekniikassa bentoniittia käytetään orgaanisesti modifioituna geelinä, jota käytetään nostamaan maalin viskositeettia niin, että raskaat pigmentit eivät laskeudu maalipurkin pohjaan.

Kuivausaineena käytetyn bentoniitin ominaisuudet on kuvattu standardissa DIN 55473, Ausgabe:1997-12 Packhilfsmittel – Trockenmittelbeutel – Technische Lieferbedingungen. Tavarantoimittaja on mm. Chemische Fabriken Oker und Braunschweig AG.

Silikageelin ohella käytettävissä on suurehko määrä vettä absorboivia aineita, kuten suoloja. Suolat poikkeavat silika geelistä vedenpidätyskykynsä suhteen siten, että ilman suhteellisen kosteuden laskiessa, ne desorboivat vettä itsestään pyrkien ylläpitämään aineelle ominaista suhteellista kosteutta suolan yllä olevassa ilmatilassa [liite 1, kohta 5 *Korroosion kulkuun vaikuttavia tekijöitä* ja Nordtest Remiss Nr 548-85 1987].

Alkali-metal partial salt of crosslinked poly (propenoic acid) on osittain neutraloidun ristosilloitetun polypropeenihapon alkalisuola. Ristosilloitus tekee aineesta veteen lähes liukenemattoman ja aine imee itseensä vettä muodostaen geelimäisen massan. [US Patent 5324448]

Alkali-metal poly(acrylate) on alkalipolyakrylaatti, tunnetuin suoraketjuinen natriumpolyakrylaatti, jota on vuosia käytetty latekseissa apuaineena, tämän aineen desiccant ominaisuudet ovat huonot ellei sitä ole ristosilloitettu polymeeriksi, jolloin se veden vaikutuksesta muuttuu geelimäiseksi massaksi. [US Patent 5324448]

Potassium poly(acrylate) on suoraketjuinen kaliumpolyakrylaatti, tätä on käytetty latekseissa. [US Patent 5324448]

Partial sodium salt of crosslinked poly(propenoic acid) on osittain neutraloidun ristosilloitetun polypropeenihapon natriumsuola, johon pätee yllä mainitut asiat. [US Patent 5324448]

Superabsorbenteiksi sanotaan aineita, joilla on kyky imeä vettä jopa tuhansia kertoja oman painonsa verran ollen tässä suhteessa silikageeliä parempia. Nämä absorbentit eivät pidätä vettä itseensä yhtä hyvin kuin silikageeli, vaan päästävät vettä ympäristöönsä hitaasti myös huoneen lämpötilassa. Käytännössä superabsorbentit ylläpitävät tiettyä kosteustasapainoa suljetussa ilmatilassa, joka voi olla myös eduksi. Nämä absorbentit muodostavat veden kanssa geelimäisen massan, jonka vedenimemiskyky on suuri. Tyypillisiä sovelluksia näille ovat esim. lasten vaipat, joissa superabsorbentit ovat pieninä polymeerirakeina.

Veden poiston lisäksi kuljetuspakkauksiin voidaan laittaa kaasuja imeviä aineita kuten aktiivihiilikapseleita, jotka adsorboivat pakkauksen omia tai siihen tunkeutuvia kaasuja. Myös hapenpoistoabsorbentteja on käytössä. Tarkoituksena on tällöin estää hapettumisreaktioita esim. elintarvikkeissa.

## Komponenttien kuljetuspakkaukset

Komponenttien kostumisriski kuljetusten aikana on hyvin suuri johtuen altistuksesta ulkoilmalle ja suurille lämpötilan vaihteluille. Muovimateriaalit absorboivat aina jossain määrin itseensä kosteutta. Absorboituminen voi tapahtua muutamassa päivässä tai viikossa sen mukaan kuinka korkeita ilman suhteellinen kosteus ja lämpötila ovat. Kosteuden imeytyminen kuljetusten ja varastoinnin aikana komponenttien koteloihin voi aiheuttaa vakavia juotosprosessin häiriöitä, koska koteloiden kosteus, joka yleensä on nestemäisessä muodossa kotelon mikrohuokosissa, voi räjäyttää kotelot hajalle tai niihin tulee mikrohalkeamia, kun ne viedään juotuskoneeseen juottamista varten. Näin tapahtuu, koska veden tilavuus kasvaa 1 200-kertaiseksi sen höyrystyessä joutuessaan yli 200 °C juotoslämpötilaan [Pecht 1995].

Tämän vuoksi erityisesti puolijohdeteollisuus käyttää kostumisen ja korroosion estämiseksi kuivapakkauksia, jotka tarjoavat periaatteessa hyvän suojan ilmastollisia vaikutuksia vastaan (standardi JEP113-B). Pakkauksiin sijoitetaan kuivavaa materiaalia ja kosteusindikaattori, jolloin sisäilman pysyminen kuivana voidaan tarkistaa pakkausta avattaessa. Standardisarjoissa IEC 60286 ja IEC 61760 on määritelty sekä kuljetuspakkauksia että kuljetusolosuhteet, jotka pintaliitoskomponenttien on siedettävä (IEC/IPC *Kosteudelle herkkien komponenttien käsittely*, katso luettelosta Korroosio- ja kosteussuojaus- sekä materiaalistandardit).

### Tyhjiöpakkaus vai kuiva typpi suojakaasuna?

Tyhjiö-/alipainepakkausten ongelmana voidaan pitää paine-eroa, joka vallitsee ulkotilan ja sisätilan välillä, mikä ajaa happea ja kosteutta suojattavaan tilaan, jonka paine on ulkotilaa alhaisempi. Toinen ongelma-alue on sisätilan saaminen riittävän kuivaksi jottei alipaineessa tapahtuisi veden kondensoitumista. Pakkausvaiheessa komponenteissa ja materiaalien pinnoilla on aina jonkin verran vettä [liite 1, kohta 3.6 *Vesiliuokset ja elektrolyytit*]. Alipaineen imeminen ja viimeisen käsittelyvaiheen aikainen ilmatilan kuivuus ratkaisevat, kuinka kuivaksi pakkauksen sisätila saadaan. Jos komponentteja ei lämmitetä ennen pakkausta, materiaaleihin absorboitunutta ja pinnoille adsorboitunutta vettä on vaikeaa saada poistumaan. Jos vettä jää sisälle, kondensoituu se suhteellisen helposti, koska vapaan tilan tilavuus on suhteellisen pieni alipainepakkauksessa. Kondensoituva vesi asettuu pinnoille, jolloin mahdollinen happi veden kanssa voi aiheuttaa korroosiota yhdessä pintojen oman kontaminaation kanssa.

Kuivaa suojakaasua, kuten typpeä, käytettäessä suojakaasu täyttää suojattavan tilan ja poistaa myös vettä tehokkaasti pinnoilta, koska suhteellinen kosteus on

alhainen. Suojakaasun ansiosta ilmatilassa ei ole happea, mikä vähentää oleellisesti korroosiota jopa veden ollessa metallipinnoilla [Fiaud 1994, s. 1]. Jos suojakaasun paine on sama kuin normaali ilmanpaine ja pakkaus on löysähkö, ei pakkauksen sisä- ja ulkopuolen välille synny suurta paine-eroa, jolloin myös kaasujen vaihto ulkotilasta sisätilaan jää hyvin pieneksi verrattuna vastaavaan alipainepakkaukseen. Kun pakkauksen sisätilan tilavuus on suurempi kuin alipainepakkauksessa, jää mahdollisesti komponentteihin ja pintoihin sitoutuneen veden määrä niin pieneksi suhteessa käytettävissä olevaan kaasutilaan ettei suhteellinen kosteus voi nousta kovinkaan korkeaksi eikä kondensoitumista pääse tapahtumaan.

IPC (The Institute for Interconnecting and packing Electronic Circuits) sekä JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) ovat julkaisseet ohjeita kuinka mikropiirien kosteuserkkyys määritellään, kuinka komponentteja on käsiteltävä ennen juottamista ja kuinka kosteuserkät komponentit on merkittävä. Periaatteessa ko. ohjeet koskevat ei-hermeettisiä pintaliitettäviä puolijohdekomponentteja (SMD), mutta niitä voi soveltaa muihinkin komponentteihin, joiden voidaan olettaa absorboivan kosteutta varastoinnin ja kuljetusten aikana ja jotka joutuvat juotosprosessissa lähelle 200 °C lämpötilaa. Tällaisia ovat esim. keraamiset pintaliitosvastukset ja kondensaattorit, jotka voivat absorboida vettä itseensä.

Standardissa JEP124 annettujen ohjeiden mukaan meneteltäessä taataan pakattujen komponenttien käytettävyys 12 kk ajan pakkaamisesta. Pakkauksen sisäisen kosteuden tulee olla < 20 % RH lämpötilassa 30 °C taatun 12 kk ajan kuluttuakin.

Vaatimuksiin kuuluu:

- MIL-PRF-81705D Type I vaatimusten mukainen pakkaus, jonka veden läpäisevyys on alle 31  $\mu\text{g}/\text{cm}^2/24\text{h}$  (0,02 g/100 in<sup>2</sup>/24 h)
- MIL-D-3464E, Type II mukaista kuivatusmateriaalia pakkauksessa
- MIL-I-8835A ja MIL-P-116, Method II mukainen kosteusindikaattorikortti
- ID-merkki, joka ilmaisee sisällön olevan kosteuserkkiä komponentteja
- varoitusmerkinnät kosteuserkistä komponenteista
- lievän alipaineen imeminen pakkaukseen ennen sen sulkemista.

Standardissa JESD22-A112-A esitetään testausmenettely komponenttien kosteuserkkyysluokan määrittämiseksi. Komponentit kuivataan ennen kosteusaltistusta vähintään 24 h ajan 125 °C lämpötilassa.



Komponenteille, joiden varastointiaika on rajoittamaton, testausolosuhteet ovat 85 °C / 85 % RH, 168 tuntia ja vuoden varastoinnin sietäville komponenteille 85 °C / 60 % RH, 168 h. Kosteusherkillle komponenteille, jotka saavat ennen juottamista pakkauksen avaamisen jälkeen olla vain 24 h olosuhteissa 30 °C / 60 % RH, ovat testausolosuhteet 30 °C / 60 % RH, 48/72 h.

Välittömästi em. altistusten jälkeen tehtävässä juottamisessa komponentit eivät saa vioittua.

Tärkeimmät pakkauksia koskevat standardit on mainittu alla. Katso tarkempi luettelo kohdasta IEC/IPC *Kosteudelle herkkien komponenttien käsittely* (luettelossa Korroosio- ja kosteussuojaus- sekä materiaalistandardit).

IEC 60286-3 (1997-12) Packaging of components for automatic handling – Part 3: Packaging of leadless components on continuous tapes. 37 s.

IEC 61760-2 (1998-02) Surface mounting technology – Part 2: Transportation and storage conditions of surface mounting devices (SMD) – Application guide. 9 s.

EIA/JEP124 (December 1995) Guidelines for the Packing, Handling and Repacking of Moisture-Sensitive Components. 14 s.

IPC/JEDEC J-STD-020A (April 1999) Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices. 21 s.

IPC/JEDEC J-STD-033 (May 1999) Standard for Handling, Packing, Shipping and Use of Moisture/Reflow Sensitive Surface Mount Devices. 20 s.

IPC-SM-786A (1995) Procedures for Characterizing and Handling of Moisture/Reflow Sensitive ICs.

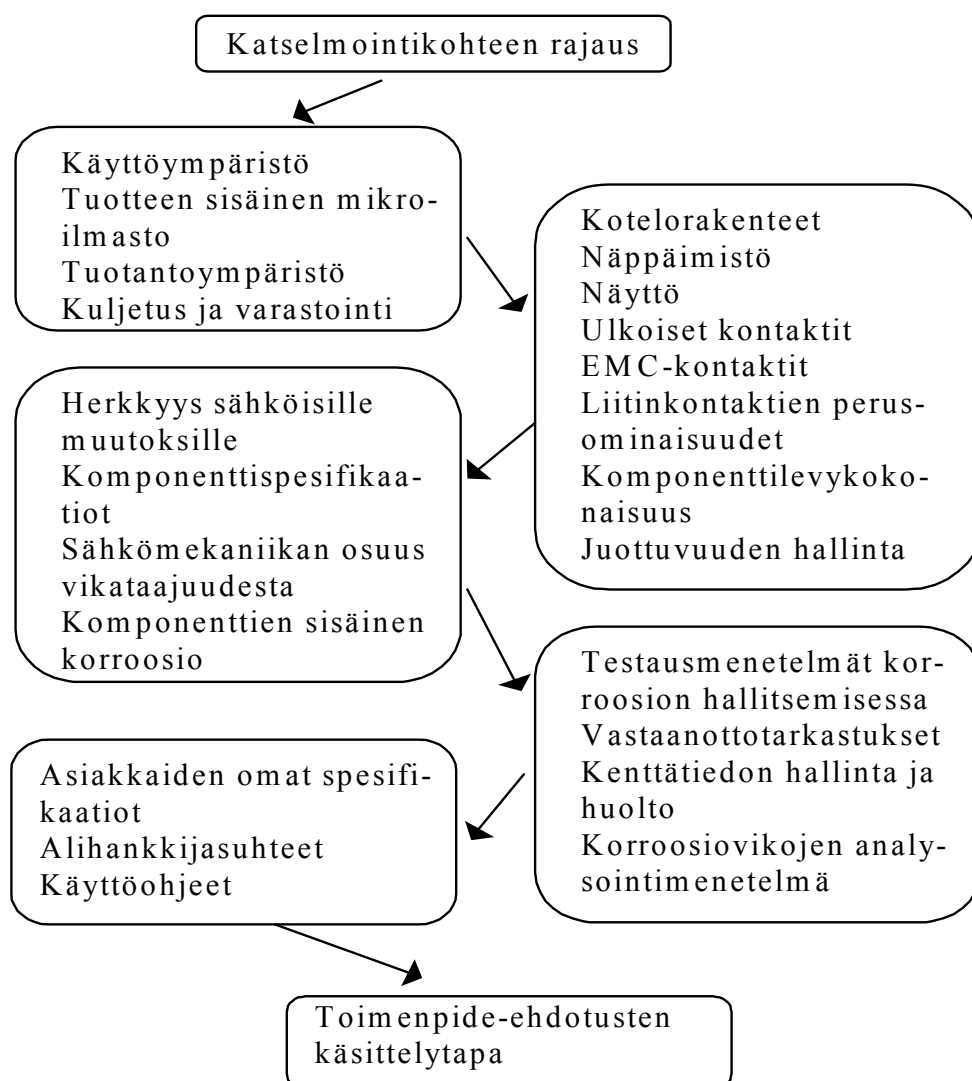
JEP113-B (May 1999) Symbol and Labels for Moisture-Sensitive Devices. 6 s.

JESD22-A112-A (November 1995) Test Method A112-A, Moisture-Induced Stress Sensitivity for Plastic Surface Mount Devices. 12 s.

# 7. Sovellusesimerkit

## 7.1 Katselmointikohteet

Elektroniikkatuotteiden korroosionsietoisuuden arvioimiseen ja kehittämiseen tähtäävässä katselmoinnissa määritellään ja rajataan aluksi tavoite, mihin katselmoinnilla pyritään ja sen jälkeen käydään läpi tuotteelle asetettavat ympäristövaatimukset, tuotteen fyysinen rakenne ja koko tuotantoprosessi sekä logistiikka sisältäen alihankinnat ja toimitukset asiakkaille. Kuvaan 7.1 on koottu listaus näistä katselmoinnin kohteista. Tarkempi kuvaus koko katselmointimenettelystä ja kunkin otsikon sisällöstä on esitetty liitteessä 3.



Kuva 7.1. Katselmointikohteet.

Katselmointikohteen rajauksessa sovitaan käsitelläänkö yrityksen koko suunnittelu-, tuotanto- ja logistiikkaketjua vaiko yksittäistä tuoteperhettä tai esim. jonkin tuotteen osaa.

Kuvatussa katselmointimenettelyssä (liite 3) käydään läpi kaikki korroosiosietoon vaikuttavat osa-alueet. Kunkin osa-alueen käsittely painotetaan käsiteltävänä olevan kohteen mukaan. Tämä liitteessä 3 esitetty katselmointimenettely on tarkoitettu käytettäväksi mallina laadittaessa elektroniikkayrityksen omaan laatu-järjestelmään sisällytettävää korroosionhallinnan menettelyä. Käytännön työssä katselmointi rajataan yleensä pienempiin osakokonaisuuksiin. Näitä osakatselmointeja tehtäessä on kuitenkin aina tarkistettava, että korjaavat toimenpiteet todella poistavat virheitä eivätkä ainoastaan kompensoi jossain muualla tehtyjä virheitä. Näin ollen jokaiseen osakatselmointiin olisi sisällytettävä ainakin lyhyt-muotoinen yleistarkastelu sen varalta, että varsinaiset suurimerkityksiset virheet koko suunnittelu-tuotanto-alihankinta-toimitusketjussa tulisivat otettua huomioon.

Tämän julkaisun laadinnan yhteydessä tehtiin joukko tuotekohtaisia katselmointeja, joiden perusteella kehitettiin liitteessä 3 kuvattu katselmointimenettely. Lopputuloksena kullekin tuotteelle/yritykselle laadittiin oma menettelymalli sekä ehdotuksia tarvittavista korjaavista toimenpiteistä. Katselmoidut tuoteperheet olivat hissielektroniikka, matkapuhelin, taajuusmuuttaja ja tehölähde.

Näiden katselmointien perusteella tultiin siihen tulokseen, että pääosaa katselmointien sisällöstä voidaan pitää kaikille tuotteille yhteisenä, mutta katselmointien tuloksena tehtävät yksityiskohtiin menevät toimenpiteet ovat aina yksilöllisiä, vaikka niiden aihepiiri olisikin sama kuin jossain toisessa tuotteessa.

Seuraavissa esimerkeissä on kuvattu lyhyesti kullekin tuotteelle ominaiset piirteet korroosionsiedon hallinnan kannalta. Tärkeää on tässä tiedostaa se suuri perusyhtenäisyys, mikä vallitsee näidenkin tuotteiden perusominaisuuksissa, nimittäin

- tuotteiden käyttö maapallon kaikissa osissa
- ulkoisten ympäristöolosuhteiden yhtenäisyys
- samankaltaisen teknologian ja komponenttien käyttö
- samankaltaisten alihankkijasuhteiden olemassaolo
- testaustekniikan ja laadunhallinnan samankaltaisuus.

## **Ympäristöolosuhteet ja käyttötapa**

Ulkoiset olosuhteet ts. ulkoilmassa esiintyvät olosuhteet ja niistä aiheutuva perusrasitus on sama kaikille tuotteille. Tämän samanlaisuuden sisältö korostuu vielä siitä, että useimpia tuotteita käytetään lähes kaikilla maapallon eri alueilla. Koska tuotteiden käyttötapa on erilainen ja lopullinen asennuspaikka on kuitenkin useimmiten sisätiloissa ja laitteiden koteloinnilla voidaan tehokkaasti vaikuttaa laitteen sisäolosuhteisiin, ovat ympäristöolosuhteet kuitenkin useimmiten melko yksilölliset eri tuotteilla.

Suurimmat erot ovat tuotteiden käyttötavassa. Hissit ovat kiinteästi rakennuksiin asennettuja ja koneisto on hajotettu ympäri taloa, matkapuhelimet kulkevat ihmisten mukana, tehollähteet asennetaan yleensä toisen laitteen sisälle ja taajuusmuuttaja toimii joko itsenäisenä laitteena tai osana isompaa kokonaisuutta.

## **Tuotteen rakenne ja komponentit**

Tuotteiden perusmateriaalit lähtien piirilevyistä ja huomattava osa komponenteista ovat hyvin samankaltaiset kaikissa esimerkeissä käsitellyissä tuotteissa. Piirilevymateriaalit ovat lähes samoja, vaikka erojakin on, monikerrostekniikka on yleistä, pintaliitostekniikkaa on kaikissa tuotteissa, peruspinnotteet tina ja kulta ovat yleisiä kontakteissa ja johdinkuvioissa, näyttöinä on nestekidenäyttöjä ja näppäimistöinä kalvonäppäimistöjä. Pääosa mikropiireistä on koteloitu muoviin ja tehotehiheydet komponenttitasolla ovat lähellä toisiaan. Johdinkuvioiden tiheyskin on suurimmillaan lähes samaa tasoa eri tuotteissa.

Suurimmat erot ovat tuotteiden koossa, kotelomateriaaleissa, koteloiden tiiviudessa sekä jäähdystekniikoissa johtuen kokonaistehotasojen eroista.

## **Tuotantoprosessi**

Kaikkien katselmoitujen tuotteiden valmistuksessa käytetään automaattiladontaa ja pintaliitostekniikkaa. Juotostekniikkoina käytetään reflow- tai aaltojuottamista. Tuotantotilat ovat melko siistit ja ilmastointi on yleistä. Suurimmat erot syntyvät sarjojen koosta kokoonpanon toteutuksessa. Matkapuhelimien suursarjoissa käsityön osuus on hyvin pieni, mutta hissikoneistojen valmistuksessa ja asennuksessa on paljon käsityötä. Johtuen sarjatyön luonteesta ei lakkausta käytetä paljoa, vaikka se suuren johdintiheyden vuoksi olisi perusteltua kosteuden ja kontaminaation aiheuttamien käyttöongelmien torjumiseksi.

## **Alihankinnat ja kuljetukset**

Lähes kaikki osat ja komponentit tulevat eri tuotteiden valmistuksessa alihankkijoilta. Tämän vuoksi näiden kuljettamisesta johtuvat ongelmat olosuhteiden korrosiivisuuden ja kosteuden vuoksi ovat samankaltaiset piirilevyjen, metalliosien ja komponenttien kuljetuksessa, varastoinnissa ja juottamisessa. Kullakin komponenttien toimittajalla ja ostajalla on erilaiset käytännöt kuljetuspakkausten spesifioinnissa. Yleisesti ottaen kuljetusten ja kuljetuspakkausten laadussa on aina kohentamisen varaa, koska kuljetettavien materiaalien kostuminen ja komponenttien juottaminen aiheuttavat ongelmia.

Yhteinen ongelma-alue on ylläpitää kuljetuspakkausten sisällä riittävän kuivia olosuhteita ja/tai käyttää apuna joko korrodoivia aineksia imeviä absorbentteja taikka korroosionhibiittoreita. Näiden merkitys korostuu yli viikon kestävässä kuljetuksissa ja varastoinneissa, merikuljetuksissa sekä trooppisissa olosuhteissa.

Toimituksissa asiakkaille on suuria eroja, osa tuotteista kulkee lentoteitse, osa maanteitse tai rautateitse ja osa meritse. Varastointiajat ovat hyvin vaihtelevat. Näin ollen tuotteiden suojaaminen kuljetuspakkauksen avulla kosteuden ja korroosion vaikutuksilta on varsin ratkaiseva ajatellen tuotteen kuntoa asiakkaan vastaanotossa. Lisäksi asennus- ja käyttöönottokäytännöt ovat hyvin erilaiset. Hissien asennustyö tapahtuu vaikeissa rakennusolosuhteissa alttiina sään vaikutuksille, taajuusmuuttaja ja teholähde saattaa joutua vaativampiin oloihin kuin ne on suunniteltu ja matkapuhelimen käyttötavat ovat yhtä moninaiset kuin elämän kirjo eri puolilla maapalloa.

## **7.2 Hissielektroniikka**

Hissielektroniikalle ominaiset piirteet johtuvat pääosin hissien perusrakenteesta. Hissit sijaitsevat rakennuksissa useassa kerroksessa, jonka vuoksi elektroniikkaa joudutaan sijoittamaan hajalleen eri paikkoihin. Elektroniikkaa on sekä suojatuissa että suojaamattomissa tiloissa. Hissin moottori ja sen ohjaus pyritään keskittämään yhdeksi kokonaisuudeksi, mutta kaikki käyttäjäopasteet ja käyttönäppäimet sijoitetaan hajalleen hissiin ja hissikuilun ulkopuolelle. Tämän vuoksi johdotuksia tulee suuri määrä ympäri hissikuilua. Hissin käyttöpaikan vuoksi (asuintalo, hotelli, tehdas) käyttäjien ja esim. siivouksen aiheuttama lisärasitus korroosion kannalta on hyvin vaihteleva.

Hissien asennus käyttöpaikalleen on ongelmallinen, koska rakentaminen aloitetaan useimmiten hissikuiluista ja hissit pyritään saamaan toimintakuntoon hyvin

varhaisessa rakennusvaiheessa, jolloin koneisto altistuu säälle ja rakennustoiminnan lialle, vedelle ja pölylle.

Hissielektroniikan katselmoinnissa joudutaan mainittujen erikoispiirteiden vuoksi paneutumaan erikseen itse elektroniseen toteutukseen, osien sijoituspaikkojen ominaisuuksien huomioonottamiseen ja asennustöiden järjestelyyn. Huomattavan paljon on kiinnitettävä huomiota niihin hyvin vaihteleviin olosuhteisiin, joihin johdotukset ja elektroniikka kulloinkin joutuvat.

Oma lukunsa korroosioneston kannalta on tarvittavan jäähdytyksen järjestely suuritehoisille puolijohteille, kun tavoitteena on samanaikaisesti suuri jäähdytysteho ja elektroniikkaan kohdistuvan ilman virtauksen minimoiminen kontaminaation estämiseksi. Tärkeitä tarkistuskohteita ovat myös kaikki suurivirtaiset liitokset ja liittimet.

### **7.3 Taajuusmuuttaja**

Käsitellyt taajuusmuuttajat olivat pienikokoisia muutaman litran kokoisia laitteita, joiden jäähdytys on toteutettu vapaan konvektion avulla. Kotelo on melko avonainen. Pienen koon, suuren pakkaustiheyden ja tehoasteiden suuren tehoitiheyden vuoksi osa elektroniikasta käy suhteellisen lämpimänä. Taajuusmuuttajat voidaan sijoittaa melko vapaasti erilaisiin sisätiloihin ja jopa toisten laitteiden sisälle.

Suuren tehotason vaatiman jäähdytyksen vuoksi taajuusmuuttajat ovat myös alttiita ilman kierrolle, jonka vuoksi laitteen sisäinen suojaus on yksi tärkeä tarkastelukohde. Korkea lämpötila vaikuttaa eristeiden ja liitosten vanhenemiseen, jonka vuoksi niiden mitoituksen tarkistaminen kaikissa suurivirtaisissa kohteissa on tärkeää. Tehovaihtelut aiheuttavat toistuvaa lämpölaajenemista, mikä vaikuttaa koko rakenteeseen ja kaikkiin liitoksiin.

### **7.4 Teholähde**

Katselmoidut teholähdetyksiköt on tarkoitettu sijoitettavaksi osaksi isompia laitekokonaisuuksia. Teholähteet ovat luonnollisella konvektiolla jäähdytettäviä moduuleja. Kotelona on yleensä peltikuori, joka voi olla avorakenteinen. Teholähteet voivat muodostaa myös erillisen teholähdetyksikön, joka on kookas laitekaappi.

Käyttötapansa vuoksi teholähteen ympäristö on yleensä kuiva ja lämmin. Koska asiakkaiden laitteiden jäähdytystapana on yleensä tehokas konvektion hyödyntäminen, osa teholähteistä joutuu suoraan isäntälaitteen ulkoisen ilman vaikutukseen. Näin ollen olosuhteet voivat olla hyvin kontaminoivat ja korrodoivat.

Korkea käyntilämpötila pitää teholähteet yleensä kuivina, mutta lämpö vaikuttaa eristemateriaaleihin ja johtoliitoksiin rappeuttavasti, minkä vuoksi nämä on katkelmoitava huolella. Teholähteiden tehokuormitus on vaihteleva, jonka vuoksi lämpötilan vaihtelut ovat suuria ja vaikuttavat korroosiomekanismeihin kiihdyttävästi.

## 7.5 Matkapuhelin

Matkapuhelimen pieni koko, valmistussarjojen suuruus, suuret toimintataajuudet, suuri pakkaustiheys ja kuljettaminen ihmisen mukana aiheuttavat suurimman osan niistä erikoispiirteistä, mitkä koskevat matkapuhelimien korroosionhallintaa. Pienen koon vuoksi monet osat tulevat mekaanisesti hennoiksi, jonka vuoksi esim. liitinkontaktien pysyvyyden varmistaminen on vaativa tehtävä.

Matkapuhelimet tehdään suhteellisen suljetuiksi sen vuoksi, että ne altistuvat ihmisten käsittelyssä koko ajan hyvin monille kemikaaleille ts. korrodoiville aineille, lämpötilan vaihtelut ovat tavallisia ja kastumisuhka on suuri. Matkapuhelimia käytetään myös ulkona, mutta suurin uhka niille ovat käyttäjän omat eritteet ja alttius erilaisille kastumisvahingoille.

Korroosionhallinnan kannalta tärkeitä osia on paljon. Näppäimistöt ja näytöt sisältävät paljon liitoksia, EMC-tiivisteet ja niiden kontaktialueet, kotelon pintakäsittely, piirilevyn tiheät johdinkuviot, akku- ja lisälaiteliitokset. Laitekotelon tiiviyden optimointi on ongelmallinen, toisaalta kotelon olisi oltava tiivis, mutta sisään pääsevän kosteuden poistuminenkin on tehtävä mahdolliseksi.

# Kirjallisuusviitteet

## LÄHTEET

Abbot, W. H. & Antler, M. Connector Contacts: **Corrosion Inhibiting Surface Treatments for Gold-Plated Finishes**. IEEE Holm conference 1995. Pp. 97–123.

**Aluminum Electrolytic Capacitors**. Data book 1999. Siemens Matsushita Components. GmbH & Co. No. B427-P2717-X-X-7600. 435 p.

Antler, M. **Fretting Corrosion of Solder-Coated Electrical Contacts**. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. Vol. CHMT-7, No. 1, March 1984. Pp. 129–138.

Antler, M. Corrosion Control and Lubrication of Plated Noble Metal Connector Contacts. IEEE Holm Conference 1995. Pp. 83–96.

Aonuma, M. & Tamai, Y. US patent 4253886, Corrosion resistant ferromagnetic metal powders and method of preparing the same. March 3, 1981. 16 p.

Arroyave, C. & Morcillo, M. **Corrosion Science**, 1995, (37) No 2, pp. 293–305.

Artaki, I. Corrosion protection of copper using organic solderability preservatives. Circuit World. Vol. 19. No. 3. 1993.

Bonis, M. R. & Crolet J. L. Elf Exploration Production, Pau Cedex, France. **An Inhibitor Policy Based on Lab and Field Experience**. NACE Corrosion/98, March, 1998, San Diego, Material Developments for Use in Exploration and Production Environments, nro. 98103.

British Telecom. British Telecom Specification M219F for “Type Approval of Encapsulating Resins, Coatings and Adhesive Materials for Semiconductor Devices and Microcircuits”. BT Group Technical Services.

Burnett, W. H., Sandroff, F. S. & D’Edigo, S. M. **Circuit Failure Due to Fine Mode Particulate Air Pollution**. (Bellcore, Red Bank, New Jersey), ISTFA ‘92 The 18th International Symposium for Testing & Failure Analysis, Los Angeles, California, USA, 17–23 October 1992. Pp. 329–333.



Chan, K. C., Chai, T. C., Wong, E. H. & Lim, T. B. **The Impact of Die Attach Material on Type II Popcorn Cracking.** 1998 IEEE/CPMT Electronics Packaging Technology Conference. Institute of Microelectronics, Singapore. Pp. 331–337.

Comizzoli, R. B., Franey, J. P., Graedel, T. E., Kammlott, G. W., Miller, A. E., Muller, A. J., Peins, G. A., Psota-Kelty, L. A., Sinclair, J. D. & Wetzel, R. C. **The Kuwait Environment and Its Effect on Electronic Materials and Components.** Journal of the Electrochemical Society. Vol. 139. No. 7. July 1992, pp. 2058–2066. ISSN 0013-4651.

Comizzoli, R. B., Frankenthal, R. P., Peins, G. A., Psota-Kelty, L. A., Siconolfi, D. J. & Sinclair J. D. **Reliability of Electronics in Harsh Environments: Electrical Leakage and Corrosion Caused by Hygroscopic Pollutant Particles.** Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99-29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 186–193.

Daiwa Fine Chemicals, <http://www.daiwafc.co.jp/en/top.html>

DeBiase, J. **No more HASL.** Circuits Assembly. October 1993.

Dini, J. W. **Electrodeposition.** The Materials Science of Coatings and Substrates, Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA. 1993.

Erickson-Natishan, M. A. & Tu, C. C. **Effects of Moisture and High temperature Exposure on manufacturability and Reliability of Solder Joints.** Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99-29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 194–204.

Eriksson, Peter, Carlsson, Bo & Odnevall Wallinger, Inger. **Design of Accelerated Corrosion tests for Electronic Components in Automotive Applications.** IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies. Vol 24 No 1, March 2001. pp. 99-107.

Feser, R. & Stratmann, M. **Werkstoffe u. Korrosion**, 42 (1991), pp. 187–195.

Fiaud, C. **Theory and Practice of Vapour Phase Inhibitors**. 1994. Corrosion Inhibitors. European Federation of Corrosion Publications, Number 11. Great Britain. Pp. 1–11. ISBN 0-901716-07-3.

Fontana, M. G. **Corrosion Engineering**. McGraw–Hill Book Co. 1987. 283 p.

Gao, G. & Shanguan, D. **Conduction mechanism of Electrical Contact Enhancing Chemicals**. Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99-29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 231–244.

Gellerstedt, N. **Om skräddarsydda provningsklimat**. Temadag om Fuktskador och Fuktskydd. SEES 10.5.1995. Celsius Materialteknik, Celsius group. 13 p.

O’Grady, J. **Uuden sukupolven sinkkikylpy**. SGY:n syyskoulutuspäivät 5.11.1999.

Henning, K. & D. & Degel, J. **Activated Carbon for Solvent Recovery**. Purification of air, water and off gas solvent recovery. Meeting of the European Rotogravure Association Engineers Group Mulhouse/France. 20/21. March 1990. <http://www.activated-carbon.com/>.

Henriksen, J., Hienonen, R., Imrell, T., Leygraf, C. & Sjögren, L. **Corrosion of Electronics – A Handbook based on Experiences from a Nordic Research Project**. Bulletin No 102; Swedish Corrosion institute. 1991. 86 p.

Hienonen, R., Karjalainen, M. & Lankinen, R. **Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi**. Espoo 1997, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, VTT Julkaisuja – Publikationer 824. 85 s. ISBN 951-38-4535-4. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/julkaisut/1997/J824.pdf>.

Hienonen, R., Karjalainen, M. & Lankinen, R. Verification of the thermal design of electronic equipment. Espoo 1997. Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 320. ISBN 951-38-5072-2. 85 p. <http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/1997/P320.pdf>.

Ishikawa, Y. & Ozaki, T. **Corrosion Failure Characteristics of Electronic Components and Perspectives for its Prevention and Control**. Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc.

Vol. 99-29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 59–66.

Jaeger, P. F. Characterization of Volatile Corrosion Inhibitors using the Quartz Crystal Microbalance and Supporting Techniques. 1997. NACE Corrosion 1997, Volatile Corrosion Inhibitors nro 97180. 6 p.

Ilmatieteen laitos. Ilmanlaadun ohjearvot, raja-arvot, kynnsarvot ja tavoitearvo. 1999. <http://www.fmi.fi/>.

Kelly, R. G. & Weyant, C. M. **Atmospheric Corrosivity Control with Surface Active Papers**. Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99–29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 10–20.

**Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely**. Osa I, Suomen Galvanoteknisen Yhdistyksen julkaisuja No 5, Vantaa, 1996. 308 s.

**Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely**. Osa II, Suomen Galvanoteknisen Yhdistyksen julkaisuja No 6, Helsinki, 1999. 347 s.

Keminytt; Plastkorrosion okänt problem. Kemisk Tidskrift 1986. Nr 10.

Kobrin, G. A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion. 1993. NACE. ISBN 1-877914-56-8. 233 p.

KOTEL 3. **Elektroniikan kosketin- ja johdinpinnoitteet**. Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1982. 25 s.

KOTEL 13-GB. **Metallic coatings on contact and conductors of electronics**. KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automation. 1981. 9 p.

KOTEL 207. **Pesumenetelmät pintaliitostekniikassa**. Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1990. 81 s.

KOTEL 210. **Puolijohdekomponenttien käytösäännöt**. Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1992. 88 s.

KOTEL 222. **Komponenttilevyn epäpuhtaudet**. Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1994. 49 s.

KOTEL 223. **Pesemättömän komponenttilevyn luotettavuus.** Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1994. 62 s.

KOTEL 230. **Vesipohjaiset juoksuotteet.** Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1996. 69 s.

KOTEL 236. **Kierrätettävien materiaalien soveltuvuus sähkölaitteiden pakkaamiseen.** Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1997. 147 s.

KOTEL 239. **Rasituskarsinta.** Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1999. 56 s.

KOTEL 243. **Orgaaniset piirilevypinnoitteet ja niiden vaikutus luotettavuuteen.** Tutkimusraportti, KOTEL ry. Espoo. c/o VTT Automaatio. 1999. 132 s.

Kraemer, C. Beratung Forschung. **A Procedure For Testing the Effect of Vapor Phase Corrosion Inhibitors on combined Multi Metals.** 1997. NACE Corrosion/97, Volatile Corrosion Inhibitors nro 97178, 12 p.

Lea, C. **A Scientific Guide to Surface Mount Technology.** Electrochemical Publications Ltd., England, 1988.

Lea, C. **After CFC? Options for Cleaning Electronics Assemblies.** Electrochemical Publications Ltd., England, 1992.

Leygraf, C. & Graedel, T. **Atmospheric Corrosion.** 2000. Wiley Interscience. ISBN 0-471-37219-6. 354 p.

Lind, L. **Telekommunikation. "Fuktens inverkan på plastkapslingars funktion"**. Temadag om Fuktskador och Fuktskydd. SEES 10.5.1995. Ericsson Telecom Ab.

Lobnig, R. E. et al. **Corrosion and Protection of Metals in the Presence of Submicron Dust Particles.** Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99-29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 97–126.

Lindroos, Veikko, Sulonen, Matti, Veistinen, Mauri. **Uudistettu Miekk-ojan metallioppi.** Teknillisten tieteiden akatemia, Otava, Helsinki. 1986. 841 s. ISBN 951-666-216-1.

Malucci, R. D. **Impact of Fretting Parameters on Contact Degredation**. 1996. 42th IEEE Holm Conference joint with 18th International Conference on Electrical Contacts, 16–20 Sept. 1996. IEEE Proceedings. Pp. 395–403.

Mattila, T. **Reliability of high–density lead–free solder interconnections under thermal cycling and mechanical shock loading**. Espoo. 2005. Helsinki University of Technology. ISBN 9951-22-7983-5. 56 p.

Mattsson, E. **Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers**. Second edition. Book 636, The Institute of Materials. Bourne Press, Bournemouth UK, 1996. ISBN 1 86125 011 8. 204 p.

Mattsson, E. **Elektrokemi och korrosionslära**. Bulletin nro 100. Korrosionsinstitutet. Stocholm, 1987. 179 s.

Menke, J. T. **Corrosion of VCI protected Components**. 1997, NACE Corrosion 97, paper No. 541. 24 p.

Mercer, A. D. **Test methods for Corrosion Inhibitors**. 1994. Corrosion Inhibitors. European Federation of Corrosion Publications, Number 11. Great Britain. Pp. 145–163. ISBN 0-901716-07-3.

MET Tekninen tiedotus 17/80. **Korroosionesto varastoinnin ja kuljetuksen aikana**. 1980. 47 s. ISBN 951-817-069-X.

Mottine, J. J. & Reagor, B. T. **Investigation of Fretting Corrosion at Dissimilar Metal Interfaces on Socketed IC Device Applications**. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. Vol. CHMT-7, No. 1, March 1984. Pp. 61–68.

Muller, C. **Reactivity Monitoring: An Alternative to Gas Monitoring in Semiconductor Cleanrooms?** September/October 1999. Journal of the IEST. Institute of Environmental Sciences and Technology, pp. 19–29.

Naval Research Laboratory: Oceanography Division. 1999. **Biodeterioration of Materials in the Marine Environment**. Code 7330: Ocean Sciences Branch Code 7333: Microbiologically Influenced Corrosion Section.  
<http://www7330.nrlssc.navy.mil/>.

Paronen, J. & Toroi, M. **The influence of atmospheric conditions on the strength properties of board**. Teollisuuden keskuslaboratorion tiedonantoja N:o 231, Helsinki 1959.

Parquet, T. et al. **Alternatives to HASL: A Users Guide for Surface Finishes**. Electronic Packaging and Production. August 1995.

Pecht, M., Ngyuyen, L. & Hakim, E. **Plastic-Encapsulated Microelectronics**. John Wiley and Sons, New York, 1995.

Pecht, M. (ed.). **Integrated Circuit, Hybrid and Multichip Module Package Design Guidelines: A Focus on Reliability**. John Wiley and Sons, New York, New York, 1994.

Peck D. S. & Trapp, O. D. **Accelerated Testing Handbook**. 5th ed. 1987. Technology Associates. USA. 280 p. ISBN 0-932787-07-X.

Porter, F. **Zinc handbook: properties, processing and use in design**. Marcel Dekker, New York. 1991. 629 p. ISBN 0-8247-8340-9.

Roberge, P. R. **Handbook of Corrosion Engineering**. 2000, McGraw–Hill. ISBN 007-076516-2; 1140 p. <http://www.corrosion-doctors.org/>.

Roberge, P. R. **Corrosion Basics: An Introduction**. 2006, 2<sup>nd</sup> Edition, NACE Press Book. 364 p. ISBN 1-57590-198-0.

Roslund T., Hansen S. A. & Zachariassen K. Reliability of lead free solder joints. Hørsholm 2002. SPM-165. Delta. 22 p. + app. 8 p.

Rossi, S. et al. **VCI-Inhibitors to Protect Electronic Products against Corrosion in Tropical Atmosphere**. Pennigton New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99–29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 21–35.

RTMG, RAC Thermal Management Guidebook, November 1995. 146 p.

Schweitzer, Philip A. **Corrosion resistance of elastomers**. Marcel Decker Inc, New York 1990.

Senson. 1999. **Atmospheric monitoring, restoration and protection of total systems**. <http://www.senson.com.au/>.

**Silica gel FAQ. Hydrosorbent Products**. MA 01222, USA. 1999.  
<http://www.dehumidify.com/FAQ.html>.

**Silica Gel Desiccant Grade**. Canada Impex. Toronto, Ontario. 1999.

Sinnadurai, N. **Plastic packages survive where hermetic packages fail**. Micro-electronics and Reliability, Vol. 36, No 7/8, 1996, pp. 1001–1018.

Sinnadurai, N. F. **Handbook of Microelectronics Packaging and Interconnection Technologies**. Electrochemical Publications Limited, 1985. 1st ed. Pp. 6–7, 150, 153–155.

STANAG 2895. **Climatic environmental conditions affecting the design of military materiel**. QSTAG No. 360. 4 February, 1980. STANAG = NATO Standardization Agreements.

Tunturi, P. J. **Korroosiokäsikirja**. Suomen Korroosioyhdistyksen julkaisuja 6. Suomen Korroosioyhdistys. Hangon Kirjapaino Oy. 1988. 966 s.

Tunturi, P. & Tunturi, P. **Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt**. MET-julkaisuja 3-1999. Metalliteollisuuden keskusliitto. Tammer-Paino Oy. 1999. Tampere. ISBN 951-817-696-5. 190 s.

Törmälä, P. Järvelä, P. & Lindberg, J. J. **Polymeeritiede ja muoviteknologia, Osa II**. Otakustantamo, 1983.

US Patent 4529531: **Electrical contact lubricant composition and method of lubrication**. July 16, 1985. 4 p.

An electric contact lubricant is disclosed which comprises a predominant amount of an evaporable solvent and a lubricant which, in turn, comprises a predominant amount of a partially crosslinked polyol ester formed by esterification of an aliphatic monocarboxylic acid with an aliphatic polyol in the presence of a dibasic acid crosslinker, a lesser amount of a phosphate ester fluid, and one or more corrosion and oxidation inhibitor compounds

US Patent 4530772: **Method of electrical contact lubrication**. July 23, 1985. 3 p.

An electric contact lubricant is disclosed which comprises a partially crosslinked polyol ester formed by esterification of an aliphatic

monocarboxylic acid with an aliphatic polyol in the presence of a dibasic acid crosslinker, a phosphate ester fluid, and one or more corrosion and oxidation inhibitor compounds.

US Patent 4415694: **Contact enhancing composition**. Nov. 15, 1983. 7 p.

A composition for coating on low pressure sliding connections to enhance electrical contact comprises an admixture of an anhydride copolymer; a flexibilizing copolymer; a hydrophobic, soluble, compatible fluoroaliphatic radical-containing composition; an antioxidant; optionally a mercaptan; and a suitable solvent system. Articles coated with the contact enhancing composition are disclosed.

Vahter, J. 1999. **Elektroniikkatuotteiden korroosioherkkyyden määrittäminen**. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Materiaalitekniikan osasto. Tampere. 81 s.

Viitanen, H. & Ritschkoff, A.-C. 1990. **Puurakenteiden homehtumiseen vaikuttavat kriittiset kosteus- ja lämpötilaolosuhteet**. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: VTT Tutkimuksia 688. VTT, Espoo. 45 s. + liitt. 18 s. ISBN 951-38-3709-2.

Viitanen, H. **Uutta Puusta** 4/1990. VTT Puulaboratorio. 4 s.

Vuorinen, V. **Interfacial reactions between Sn-based solders and common metallisations used in electronics**. Espoo. 2006. Helsinki University of Technology. ISBN 978-951-22-8526-6. 136 p.

Watkins-Borenstein, S. **Microbiologically Influenced Corrosion Handbook**. 1994. 310 p. ISBN 0-8311-3056-3.

van Westing, E. P. M., Ferrari, G. M. & de Wit, J. H. **The Determination of Coating Performance with Impedance measurement II, III**. Corrosion Science 1994, (36) No 6, pp. 957–974.

White, B. S. **Corrosion Prevention and Control**, Dec. 1992

Zipperling K. & Co, Ormecon™ **Technical information**.

ZERUST. Northern Technologies International Corporation. 1999.

[http://ntic.com/vci/zerust\\_tec.htm/](http://ntic.com/vci/zerust_tec.htm/)

<http://ntic.com/vci/zerust.htm>.



## Jukka Vahterin opinnäytetyöhön liittyviä lähteitä

Vahter, J. 1999. **Elektroniikkatuotteiden korroosioherkkyyden määrittäminen**. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Materiaalitekniikan osasto. Tampere. S. 81.

Coombs, C. F Jr. 1996. Printed Circuits Handbook. 4th Ed. McGraw–Hill. 600 p.

### Artikkelit:

1. Wu, B.-C., Pecht, M. & Jennings, D. 1992. Conductive Filament Formation in Printed Wiring Boards. 13 th IEEE/CHMT International Manufacturing Technology Symposium, 28–30 Sept. 1992. Pp. 74–79.
2. Yalamanchili, P., Al-Seikhly, M. & Christou, A. Failure Analysis of Cathode Filament Formation in Multilayer PWBs Using Combined Electron Spin Resonance and Micro-FTIR Techniques, 34th Annual IEEE International Reliability Physics Symposium, 30 Apr – 2 May 1996. IEEE Proceedings. Pp. 258–266.
3. Sandroff, F. S. & Burnett, W. H. 1992. Reliability Qualification Test for Circuit Boards Exposed to Airborne Hygroscopic Dust; 42nd Electronic Components and Technology Conference, 18–20 May 1992. Pp. 384–389.
4. Balu, R., Pecht, M. & Jennings, D. August 1994. Assessing Time-to-Failure Due to Conductive Filament Formation in Multi-Layer Organic Laminates. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Techniques – Part B, Vol. 17, no 3. Pp. 269–276.
5. Krumbein, S. J. 1988. Metallic Electromigration Phenomena. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 11, no 1, pp. 5–15.
6. Krumbein, S. J. 1995. Tutorial: Electrolytic Models for Metallic Electromigration Failure Mechanisms. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 44, no 4, December 1995, pp. 539–549.
7. Rainal, A. J. Impedance and Crosstalk of Stripline and Microstrip Transmission Lines. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part B, Vol. 20, no 3, August 1997.

8. Rainal, A. J. Performance Limits of Electrical Interconnections to a High-Speed Chip. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part B, Vol. 11, no 3, September 1988.
9. Guinn, K. V. & Frye, R. C. Flip-Chip and Chip-Scale I/O Density Requirements and Printed Wiring Board Capabilities. IEEE 1997 Electronic Components and Technology Conference.
10. Amey, D. I. Horowitz, S. J. & Keusseyan, R. L. High Frequency Electrical Characterization of Electronic Packaging Materials: Environmental and Process Considerations. International Symposium on Advanced Packaging Materials. 1998.
11. Chan, H. Anthony. Surface Insulation Resistance Methodology for Today's Manufacturing Technology. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part C, Vol. 19, no 4, October 1996, pp. 300–306.
12. Paulter, N. G. A Fast and Accurate Method for Measuring the Dielectric Constant of Printed Wiring Board Materials. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part C, Vol. 19, no 3, July 1996.
13. Rich, E. Effects of Losses on Signals in PWB's. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology – Part B: Advanced Packaging, Vol. 17, no 2, May 1994.
14. Rainal, A. J. Reflections from Bends in a Printed Conductor. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 13, no 2, June 1990.
15. Poulson, R. H., Blair, H. D. & Pan, T.-Y. Current Carrying Capacity of Copper Conductors in Printed Wiring Boards. IEEE 1993.
16. Yamada, S., Okamoto, K. & Haga, K. Fuji Electric Corporate Research & Development, Ltd. Yokosuka-City. AC and Impulse Breakdown of Polluted Surface on Printed Wiring Board. Proceedings of the Electrical/Electronics Insulation Conference. Publ. by IEEE. Piscataway, NJ. USA. 1997. Pp. 805–809. ISSN 0362-2479.

17. Abbot, W. H. & Antler, M. Connector Contacts: Corrosion Inhibiting Surface Treatments for Gold-Plated Finishes. *Electrical Contacts, Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts*. Publ. by IEEE. Piscataway, NJ. USA. 1995. Pp. 97–123. ISSN 0361-4395.
18. Caruso, H. An Overview of Environmental Reliability Testing. *Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium*. Publ. by IEEE. Piscataway, NJ. USA. 1996. Pp. 102–109. ISSN 0149-144X.
19. Gildersleeve, N. A. & Collins, K. J. Material Coupon Test Method To Simulate Contact Performance Under Automotive Conditions. *Proceedings – Electronic Components and Technology Conference*. Publ. by IEEE. Piscataway. USA. 1997. Pp. 918–927. ISSN 0569-5503.
20. Engelmaier, W. Generic Reliability Figures of Merit Design Tools for Surface Mount Solder Attachments. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 16, no 1, February 1993.
21. Timsit, R. S. A Possible Degeneration Mechanism in Stationary Electrical Contacts. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 13, no 1, March 1990.
22. Kemp, K. G., Poole, K. F. & Frost, D. F. The Effects of Defects on Early Failure of Metal Interconnects. *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 39, no 1, April 1990.
23. Hasegawa, M. & Sawa, K. Formation of Palladium Oxides by Mechanochemical Reaction on Pd and Ag-Pd Alloy Contacts. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 13, no 1, March 1990.
24. Tanii, T. Metal Oxide on the Surface of Contacts Having Excellent Contact Performance. *IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology*, Vol. 14, no 2, June 1991, pp. 304–308.
25. Osborne, M. W. Air Quality Control in Control Rooms. *IEEE Conference Record of Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference*. Publ. by IEEE. Piscataway, NJ. USA. 1994. Pp. 146–151. ISSN 0190-2172.

26. Frankel, G. S., Purushotaman, S., Petersen, T. A., Farooq, S., Reddy, S. N. & Brusic, V. Corrosion and Adhesion of Multilayer Pad Structures for Packaging Applications. IEEE Transactions on Components, Packaging, and Manufacturing Technology Part B: Advanced Packaging. Vol. 18, no 4. Date: Nov. Publ. by IEEE. Piscataway, NJ. USA. 1995. Pp. 709–714. ISSN 1070-9894.
27. Braunovic, M. Fretting in Ni-Coated Aluminum Conductors. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 14, no 2, June 1991.
28. Wang, K. & Wang, Q. Erosion of Silver-Base Material Contacts by Breaking Arcs. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 14, no 2, June 1991.
29. Lachance, R., Lavoie H. & Montanari, A. Corrosion/Migration Study of Flip Chip Underfill and Ceramic Overcoating. Proceedings – Electronic Components and Technology Conference. Publ. by IEEE. Piscataway. USA. 1997. Pp. 885–889. ISSN 0569-5503.
30. Puttlitz, K. J. Corrosion of Pb-50In Flip-Chip Interconnections Exposed to Harsh Environment. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 13, no 1, March 1990.
31. Timsit, R.S. The “Melting” Voltage in Electrical Contacts. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 14, no 2, June 1991.
32. Brox, B. & Tegehall, P.-E. Reliability of Electronics in Harsh Environments. Soldering & Surface Mount Technology, no 21, October 1995.
33. Mowrer, F. W. & Pecht, M. G. Exploratory Research on Nonthermal Damage to Electronics from Fires and Fire-Suppression Agents. Proceedings of the Annual Reliability and Maintainability Symposium. Publ. by IEEE. Piscataway, NJ. USA. 1995. Pp. 1–6. ISSN 0149-144X.
34. Frankenthal, R. P. Passivity and Corrosion of Electronic Materials and Devices. Corrosion Science, Vol. 31, 1990.

35. Gore, R. G., Witska, R., Kirby, J. Ray, C. & James, L. Corrosive Gas Environmental Testing for Electrical Contacts. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 13, no 1, March 1990.
36. Abbot, W. H. The Corrosion of Copper and Porous Gold in Flowing Mixed Gas Environments. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology, Vol. 13, no 1, March 1990.
37. Abbot, W. H. Corrosion of electrical contacts: review of flowing mixed gas test developments. British Corrosion Journal, 1989, Vol. 24, no 2.
38. Tamai, T. & Moriya, T. SO<sub>2</sub> Gas Corrosion and Contact Resistance Properties for Contact Surface of Printed Circuit Board. The Transactions of the IEICE, Vol. E 72, no 4, April 1989.
39. Tamai, T. & Moriya, T. Progress of H<sub>2</sub>S Gas Corrosion and Contact Resistance Properties for Contact Surface of Printed Circuit Board. The Transactions of the IEICE, Vol. E 73, no 4, April 1990.

## IVF-julkaisuja

Institutet för Verkstadsteknisk Forskning IVF  
<http://www.ivf.se/>.

Andersson, H., Lindblom, T., Lindgren, M. & Carlsson, P. **Silicone Contamination**. IVF Research Publication 98812.

The report evaluates the risk for silicone contamination of electronics using straightforward methods of analysis. The following areas are covered in the report: The relation between desorption and creeping of silicones in relation to the curing procedure. A method for controlled and reproducible contamination of surfaces with silicone. Limiting values for silicones to avoid contact and adhesion problems. Eight different silicone materials for electronic applications were analysed. The selection represents different preparation types, curing principles, and application areas. The desorption of low molecular siloxanes was analysed with gas chromatography/mass spectroscopy, gravimetric methods according to standards for cla for identification of condensed material on metals. Price SEK 7 200 (Approximately USD 950).

Tegehall, P.-E. **Cleanliness and Reliability**: Evaluation of Test Methods and the Impact of Contamination from Production Processes on the Reliability of Printed Circuit Board Assemblies. IVF Research Publication 96846, 1996.

The report presents results from an evaluation of various test methods for assessing the cleanliness of PCBs and PCB assemblies. These methods were used also for evaluating the cleanliness and reliability of PCBs and PCB assemblies produced by four PCB manufacturers and fourteen PCB assemblers using their ordinary production processes. Test boards specially developed for these evaluations with test patterns for measurement of surface insulation resistance between solder joints to soldered components are also described.

Tegehall, P.-E. **Evaluation of the Capability of Conformal Coatings to Prevent Degradation of Printed Circuit Assemblies in Harsh Environments**, Part Two. IVF Research Publication 96807, 1996.

The report presents the results from an evaluation of 15 conformal coatings capability to protect circuit assemblies in harsh environment. The conformal coatings were of different generic types. Also, the report gives a critical examination of environmental tests commonly used for the evaluation of the reliability of conformal coated assemblies. A test method

developed to simulate condensation of water is described. This test method combined with surface insulation resistance measurements was found to be a very useful tool for evaluating the sealing properties of an applied conformal coating. Price SEK 3 000 (Approximately USD 375).

Tegehall, P.-E. **Evaluation of the Capability of Conformal Coatings to Prevent Degradation of Printed Circuit Assemblies in Harsh Environments**, Part One. IVF Research Publication 93803, 1993.

Carlsson, P. **Solderability of Nickel/Gold Plated Printed Circuit Boards**. IVF Research Publication 98831.

The solderability of Ni/Au plated printed circuit boards has been studied extensively at IVF. The latest project has further addressed the reasons for bad solderability, and how to overcome these problems. A correlation between the surface quality of gold and poor solderability has been found. Plasma treatment and sulphuric acid cleaning change the surface properties and also has an effect on solderability. Results are presented for different soldering processes performed on PCBs from four different manufacturers. In addition, three different wetting balance methods for determining the solderability have been evaluated. Price SEK 10 000 (approx. USD 1250).

## Ympäristöolosuhdestandardit

Katso ilman korrosiivisuusstandardeja myös seuraavana olevasta kohdasta *Luo-tettavuus- ja korrosiivisuusstandardeja*.

IEC 60721-1 (1990-12).

Classification of environmental conditions – Part 1: **Environmental parameters and their severities**. 41 p.

Defines environmental parameters and a limited number of their severities within the range of conditions met by electrotechnical products when being transported, stored, installed and used.

IEC 60721-2-1 (2002-10).

Classification of environmental conditions. – Part 2: Environmental conditions appearing in nature. **Temperature and humidity**. 26 p.

Presents types of open-air climate in terms of temperature and humidity. Intended to be used as a part of the background material when selecting appropriate temperature and humidity severities for product applications.

IEC 60721-2-2 (1988-01).

Classification of environmental conditions. Part 2: Environmental conditions appearing in nature. **Precipitation and wind**. 21 p.

Presents fundamental properties, quantities for characterization and a classification of environmental conditions dependent on precipitation and wind, relevant for electrotechnical products. Defines the characteristics of precipitation and wind as background for the severities to which products are liable to be exposed during transportation, storage and use.

IEC 60721-2-3 (1987-12).

Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature. **Air pressure**. 7 p.

Indicates values of air pressure to which products are liable to be exposed during storage, transportation and use.



IEC 60721-2-4 (2002-10).

Classification of environmental conditions. Part 2: Environmental conditions appearing in nature. **Solar radiation and temperature.** 29 p.

Defines limiting severities of solar radiation to which products are liable to be exposed during transportation, storage and use.

IEC 61725 (1997-05).

**Analytical expression for daily solar profiles.** 13 p.

Provides a normative equation for analytically deriving a set of data points or a curve of irradiance versus time of day for a synthetic solar day.

IEC 60721-2-5 (1991-07).

Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature – Section 5: **Dust, sand, salt mist.** 35 p.

Presents characteristics of dust, sand and salt mist appearing in nature, and describes the influences from these environmental factors to which products are liable to be exposed during storage, transportation and use.

IEC 60721-2-6 (1990-12).

Classification of environmental conditions. Part 2: Environmental conditions appearing in nature. **Earthquake vibration and shock.** 22 p.

Deals with environmental conditions appearing in nature caused by earthquake vibration and shock.

IEC 60721-2-7 (1987-12).

Classification of environmental conditions. Part 2: Environmental conditions appearing in nature. **Fauna and flora.** 11 p.

Describes influences from fauna and flora to which products are liable to be exposed during storage, transportation and use.

IEC 60721-2-8 (1994-06).

Classification of environmental conditions – Part 2: Environmental conditions appearing in nature – Section 8: **Fire exposure**. 43 p.

Presents fundamental properties, quantities for characterization, and a description of environmental conditions in relation the occurrence, development and spread of fire within a building, and relevant to electrotechnical products exposed to fire during stationary use.

IEC 60721-3-0 (2002-10).

Classification of environmental conditions. Part 3: **Classification of groups of environmental parameters and their severities. Introduction**. 23 p.

Establishes classes of environmental parameters and their severities, covering the extreme (short-term) conditions to which a product may be subjected when being transported, installed, stored and used. Separate groups of classes are given for different product applications.

IEC 60721-3-1 (1997-02).

Classification of environmental conditions – Part 3 Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 1: **Storage**. 42 p.

Classifies groups of environmental parameters and their severities to which products together with their packaging, if any, are subjected when stored.

IEC 60721-3-2 (1997-03).

Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 2: **Transportation**. 43 p.

Defines the environmental conditions to which a product is subjected while being transported from one place to another after being made ready for dispatch from the manufacturing factory.

IEC 60721-3-3 (1994-12) and amendments 1 and 2.

Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 3: **Stationary use at weatherprotected locations**. 79 p. + 13 p. + 8 p.

Classifies groups of environmental parameters and their severities to which products are subjected when mounted for stationary use at weatherprotected locations.

IEC 60721-3-4 (1995-01) and amendment 1.

Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 4: **Stationary use at non-weatherprotected locations**. 53 p. + app. 8 p.

Classifies groups of environmental parameters and the severities to which a product may be exposed under use conditions, including periods of erection work, downtime, maintenance and repair, when mounted for stationary use at locations which are non-weatherprotected.

IEC 60721-3-5 (1997-03).

Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 5: **Ground vehicle installations**. 56 p.

Classifies the environmental conditions to which a product not forming part of the vehicle is subjected when installed in a ground vehicle. Such products are for example radios, communication systems, fare meters, and flow meters for liquids transported by the vehicle. Vehicles where products may be permanently or temporarily installed include road vehicles, rail vehicles, overland vehicles, handling and storage vehicles, and self-propelled machinery.

IEC 60721-3-6 (1987-04) and amendment 1 and 2.

Classification of environmental conditions. Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities. Section 6: **Ship environment**. 25 p. + 3 p. + 8 p.

Classifies groups of environmental parameters and their severities to which a product is subjected when installed aboard a ship. Ships where products may be permanently or temporarily installed include ships propelled by mechanical means and ships not propelled by mechanical means.

IEC 60721-3-7 (2002-10).

Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 7: **Portable and non-stationary use**. 71 p.

Classifies groups of environmental parameters and their severities to which products are subjected during portable and non-stationary use.

IEC 60721-3-9 (1993-07) and amendment 1.

Classification of environmental conditions – Part 3: Classification of groups of environmental parameters and their severities – Section 9: **Microclimates inside products**. 21 p. + app. 3 p.

Defines classes of microclimatic conditions, to which components (basic parts, assemblies, built-in units) may be subjected inside products, and which are used under the climatic conditions classified in IEC 60721-3-3 and IEC 60721-3-4. Only air temperature and air humidity are taken into account.

IEC/TR 60721-4-0 (2002-08)

Classification of environmental conditions – Part 4-0: Guidance for the correlation and transformation of the environmental condition classes of IEC 60721-3 to the environmental tests of IEC 60068 – Introduction. 37 p.

## **Luotettavuus- ja korrosiivisuusstandardit**

IEC 60050-191 (1990-12) International Electrotechnical Vocabulary. Chapter 191: Dependability and quality of service.

IEC 60300-1 (2003-06) Dependability management – Part 1: Dependability management systems.

Describes the concepts and principles of dependability management systems. Identifies the generic processes in dependability for planning, resource allocation, control, and tailoring necessary to meet dependability objectives. Deals with the dependability performance issues in the product life-cycle phases concerning planning, design, measurements, analysis and improvement.

IEC 60300-3-1 (2003-01) Dependability management – Part 3: Application guide – Section 1: Analysis techniques for dependability: Guide on methodology.

This international standard gives a general overview of commonly used dependability analysis procedures. This guide is an introduction to the available methodology.

IEC 60300-3-2 (2004-11) Dependability management – Part 3: Application guide – Section 2: Collection of dependability data from the field.

Provides guidelines for the collection of data relating to reliability, maintainability, availability and maintenance support performance of items operating in the field. Explores the related topics of data analysis and presentation of results.

IEC 60300-3-4 (1996-08) Dependability management – Part 3: Application guide – Section 4: Guide to the specification of dependability requirements.

Gives guidance on specifying required dependability characteristics in product and equipment specifications, together with specifications of procedures and criteria for verification. Includes advice on specifying quantitative and qualitative reliability, maintainability and availability requirements.

IEC 60300-3-9 (1995-12) Dependability management – Part 3: Application guide – Section 9: Risk analysis of technological systems.

Provides guidelines for selecting and implementing risk analysis techniques. The objective of this standard is to ensure quality and

consistency in the planning and execution of risk analyses and the presentation of results and conclusions.

IEC 56(Secretariat)353 18.10.1991 Requirements and guidelines for analysis of technological risks. This is a draft for IEC 60300-3-9. 29 p.

IEC 61160 (2006-02) Design review. 69 p.

This International Standard makes recommendations for the implementation of design review as a means of verifying that the design input requirements have been met and stimulating the improvement of the product's design. The intention is for it to be applied during the design and development phase of a product's life cycle.

ANSI/ISA-S71.01-1985 Environmental conditions for Process and Measurement and Control Systems: **Temperature and Humidity**. 22 p.

Establishes uniform classifications of temperature and humidity conditions for industrial process measurement and control systems. The classes of temperature and humidity conditions stated in this standard are suitable for use in activities related to process instrumentation, including design, manufacturing, sales, installation, test, use, and maintenance. The standard is compatible with IEC Publication 60654-1, 1979, Operating Conditions for Industrial Process Measurement and Control Equipment, Part 1: Temperature, Humidity, and Barometric Pressure.

ANSI/ISA-S71.04-1985 Environmental conditions for Process and Measurement and Control Systems: **Airborne Contaminants**. 18 p.

Classifies airborne contaminants that may affect process measurement and control instruments. This classification system provides a means of specifying the type and the concentration of airborne contaminants to which a specified instrument may be exposed. This standard is limited to airborne contaminants and biological influences only, covering contamination influences that affect industrial process measurement and control systems.

IEC 60654-1 (1993-03). 37 p.

Industrial-process measurement and control equipment – Operating conditions – Part 1: **Climatic conditions**.

Lists environmental climatic conditions e.g. air **temperature**, **humidity** and **air pressure** in specified locations to which land-based and offshore industrial-process measurement and control systems may be exposed during

operation, during periods when they are installed but inactive and during storage or transportation.

IEC 60654-4 (1987-07). 31 p.

Operating conditions for industrial-process measurement and control equipment.  
Part 4: **Corrosive and erosive influences.**

Considers the corrosive and erosive industrial environment to which land-based and offshore industrial-process measurement and control systems or parts of systems may be exposed during operation, during periods when they are installed but inactive, during storage or transportation. Maintenance and repair conditions are not considered.

ISO 9223 (1992). Corrosion of metals and alloys – **Classification of corrosivity of atmospheres.** 13 p.

ISO 9224 (1992). Corrosion of metals and alloys – **Guiding values for the corrosivity categories.** 5 p.

ISO 9225 (1992) Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – **Measurement of pollution.** 10 p.

ISO 9226 (1992) Corrosion of metals and alloys – Corrosivity of atmospheres – **Determination of corrosion rate of standard specimens for the evaluation of corrosivity.** 4 p.

MIL-HDBK-454A (2000) **Standard General Requirements for Electronic Equipment.**

SEMI F21-95, 18.9.1997.

**Classification of Airborne Molecular Contaminant Levels in Clean Environments.**

The purpose of this standard is to classify microelectronics clean environments with respect to their molecular (non-particulate) contaminant levels. This standard classification provides a consistent means of communicating acceptable contaminant levels of groups of specific airborne molecular contaminants.

SFS-Käsikirja 108. **Ympäristöluokitus ja -testaus.** 1989-07-01. 77 s.

# Korroosio- ja kosteussuojaus- sekä materiaalistandardit

**SFS-ISO 8044** (1989-08-22).

Corrosion of metals and alloys. Terms and definitions. Metallien ja metalliseosten korroosio. Termit ja määrittelyt (en fi fr). 18 p.

**SFS-EN ISO 8502-6** (1999-10-04, 0+3+6 p.) (ISO 8502-6:2006).

Preparation of steel substrates before application of paints and related products. Tests for assessment of surface cleanliness. Part 6: Extraction of soluble contaminants for analysis. The Bresle method.

**SFS 3632** 1977-03-14.

Paints and varnishes. Measurement of specular gloss. Maalit ja lakat. Kiillon mittaus. 7 p.

**SFS 3644** 1977-09-05.

Paints and varnishes. Determination of film thickness. Maalit ja lakat. Kalvon paksuuden määrittäminen. 12 p.

**SFS 3754** 1977-09-05.

Paints and varnishes. Determination of resistance to dry abrasion. Maalit ja lakat. Kulutuksenkestävyyden määrittäminen putoavalla hiekalla. 2 p.

**SFS-EN 50173** 1995-12-04. Information technology. Generic cabling systems. Tietotekniikka. Yleiskaapelointijärjestelmät. 63 p.

**BS EN 60352-3:1995** (IEC 60352-3:1993). Solderless connections. Solderless accessible insulation displacement connections. General requirements, test methods and practical guidance.

**BS 7545:1991** (ISO 8407:1991). Method for removal of corrosion products from corrosion test specimens of metals and alloys. 12 p.

**BS 5735:1979** (IEC 60426). Test methods for determining electrolytic corrosion with electrical insulating materials. 24 p.

**BS 7195:1989**, British Standard Guide for Prevention of corrosion of metals caused by vapours from organic materials. 16 p.



## Metallipinnoitestandardeja

**ASTM B488-01 (2006)** Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Gold for Engineering Uses. 8 p.

- 1.1 This specification covers requirements for electrodeposited gold coatings that contain not less than 99.00 mass % gold and that are used for engineering applications.
- 1.2 Specifically excluded from this specification are autocatalytic, immersion, and vapor deposited gold coatings.
- 1.3 Gold coatings conforming to this specification are employed for their corrosion and tarnish resistance (including resistance to fretting corrosion and catalytic polymerization), bondability, low and stable contact resistance, solderability, and infrared reflectivity. Several types of coatings, differing in gold purity and hardness, are covered by this specification.

**ASTM B545-97 (2004)e1** Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Tin. 8 p.

This specification covers the requirements for electrodeposited (electroplated) coatings of tin applied to metallic articles. Tin coatings are used to provide a low contact-resistance surface, to protect against corrosion (see ), to facilitate soldering, to provide anti-galling properties, and to be a stopoff coating in the nitriding of high-strength steels.

**ASTM B679-98 (2004)** Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Palladium for Engineering Use. 6 p.

- 1.1 Purity – This specification covers requirements for electrodeposited palladium coatings containing at least 99.7 mass % of palladium metal.
- 1.2 Properties – Palladium is the lightest and least noble of the platinum group metals. It has a specific gravity of 12.0, which is substantially less than gold (19.3) and platinum (21.5). This yields a greater volume or thickness of coating and, consequently, some saving of metal weight accompanied by a small sacrifice in corrosion resistance and reflectivity. The hardness range of electrodeposited palladium compares favorably with the other electroplated noble metals and their alloys.

**ASTM B920-01** Standard Practice for Porosity in Gold and Palladium Alloy Coatings on Metal Substrates by Vapors of Sodium Hypochlorite Solution.

- 1.1 This test practice covers equipment and methods for revealing the porosity of gold and palladium coatings, particularly electrodeposits and clad metals used on electrical contacts.
- 1.2 This test practice is suitable for coatings containing gold or 75 % by mass of palladium on substrates of copper, nickel, and their alloys, which are commonly used in electrical contacts.
- 1.3 A variety of full porosity testing methods is described in the literature. These porosity Test Methods are B 735, B 741, B 798, B 799, and B 809. An ASTM Guide to the selection of porosity tests for electrodeposits and related metallic coatings is available as Guide B 765.

**ASTM B700-97 (2002)** Electrodeposited Coatings of Silver for Engineering Use. 6 p.

- 1.1 This specification covers requirements for electrodeposited coatings of silver used for engineering purposes that may be mat, bright, or semibright and are not less than 98 % silver purity.
- 1.2 Coatings of silver covered by this specification are usually employed for solderable surfaces, electrical contact characteristics, high electrical and thermal conductivity, thermocompression bonding, wear resistance of load-bearing surfaces, and special reflectivity.

**ASTM B733-04** Standard Specification for Autocatalytic (Electroless) Nickel-Phosphorus Coatings on Metal. 13 p.

- 1.1 This specification covers requirements for autocatalytic (electroless) nickel-phosphorus coatings applied from aqueous solutions to metallic products for engineering (functional) uses.
- 1.2 The coatings are alloys of nickel and phosphorus produced by autocatalytic chemical reduction with hypophosphite. Because the deposited nickel alloy is a catalyst for the reaction, the process is self-sustaining. The chemical and physical properties of the deposit vary primarily with its phosphorus content and subsequent heat treatment. The chemical makeup of the plating solution and the use of the solution can affect the porosity and corrosion resistance of the deposit.

**ASTM B765-03** Standard Guide for Selection of Porosity Tests for Electrodeposits and Related Metallic Coatings. 4 p.

This guide describes some of the available standard methods for the detection, identification, and measurement of porosity in electrodeposited and related metallic coatings and provides some laboratory-type evaluations and acceptances. This guide does not apply to coatings that are produced by thermal spraying, ion bombardment, sputtering, and other similar techniques where the coatings are applied in the form of discrete particles impacting on the substrate.

**ASTM B798-95** (2005) Standard Test Method for Porosity in Gold or Palladium Coatings on Metal Substrates by Gel-Bulk Electrography. 6 p.

This test method covers equipment and techniques for determining porosity in noble metal coatings, particularly electrodeposits and clad metals used on electrical contacts.

**ASTM B799-95** (2005) Standard Test Method for Porosity in Gold and Palladium Coatings by Sulfurous Acid/Sulfur-Dioxide Vapor. 4 p.

This test method covers equipment and methods for determining the porosity of gold and palladium coatings, particularly electrodeposits and clad metals used on electrical contacts.

**ASTM B809-95** Standard Test Method for Porosity in Metallic Coatings by Humid Sulfur Vapor (“Flowers-of-Sulfur”). 5 p.

This standard covers equipment and test methods for determining the porosity of metallic coatings, where the pores penetrate down to a silver, copper, or copper-alloy substrate. This test method is suitable for coatings consisting of single or combined layers of any coating that does not significantly tarnish in a reduced sulfur atmosphere, such as gold, nickel, tin, tin-lead, and palladium, or their alloys.

**ASTM B867-95** (2003) Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Palladium-Nickel for Engineering Use. 9 p.

This specification covers requirements for electrodeposited palladium-nickel coatings containing between 70 and 95 mass % of palladium metal. Composite coatings consisting of palladium-nickel and a thin gold overplate for applications involving electrical contacts are also covered.

- BS 1872:1984**, Specification for electroplated coatings of tin. 12 p.
- BS 3597:1984**, Specification for electroplated coatings of 65/35 tin/nickel alloy. 12 p.
- BS 6137:1982**, Specification for electroplated coatings of tin/lead alloys. 12 p.
- ISO 1456:2003** Metallic coatings – Electrodeposited coatings of nickel plus chromium and of copper plus nickel plus chromium. Ed. 3. 19 p.
- ISO 1458:2002** Metallic coatings – Electrodeposited coatings of nickel. Ed. 3, 15 p.
- ISO 2093:1986** Electroplated coatings of tin – Specification and test methods. Ed. 2. 8 p.
- ISO 4523:1985** Metallic coatings – Electrodeposited gold and gold alloy coatings for engineering purposes. Ed. 1. 6 p.
- ISO 4524-1:1985** Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 1: Determination of coating thickness Ed. 1. 5 p.
- ISO 4524-2:2000** Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 2: Mixed flowing gas (MFG) environmental tests. Ed. 2. 31 p.
- ISO 4524-3:1985** Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 3: Electrographic tests for porosity. Ed. 1. 3 p.
- ISO 4524-4:1985** Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 4: Determination of gold content. Ed. 1. 2 p.
- ISO 4524-5:1985** Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 5: Adhesion tests. Ed. 1. 1 p.
- ISO 4524-6:1988** Metallic coatings – Test methods for electrodeposited gold and gold alloy coatings – Part 6: Determination of the presence of residual salts. Ed. 1. 2 p.
- ISO 4525:2003** Metallic coatings – Electroplated coatings of nickel plus chromium on plastics materials. Ed. 2. 15 p.
- ISO 4526:2004** Metallic coatings – Electroplated coatings of nickel for engineering purposes. Ed. 2. 14 p.

**ISO 9453:2006** Soft solder alloys – Chemical compositions and forms. Ed. 2. 10 p.

**ISO 9455-10:1998** Soft soldering fluxes – Test methods – Part 10: Flux efficacy tests, solder spread method. Ed. 1. 9 p.

**ISO 10713:1992** Jewellery – Gold alloy coatings. Ed. 1. 3 p.

**JEDEC JP002** (2006) Current tin whisker theory and mitigation practices guideline. 22 p.

**JEDEC JESD 22-A121** (2005) Measuring Whisker Growth on Tin and Tin Alloy Surface Finishes. 25 p.

**JEDEC JESD 201** (2006) Environmental Acceptance Requirements For Tin Whisker Susceptibility of Tin and Tin Alloy Surface Finishes. 19 p.

**MIL-G-45204C** (1983) Military specification, Gold plating, electrodeposited. 18 p. (Cancelled 1998, replaced by AMS 2422)

**QQ-S-365D** (1985) Federal specification, Silver plating, electrodeposited: general requirements for. 12 p.

**QQ-N-290A** (1971) Federal specification, Nickel plating (electrodeposited). 17 p.

**SAE AMS 2422E** Plating, Gold. 2002 (SAE Society of Automotive Engineer).

This specification covers the engineering requirements for electrodeposition of gold and the properties of the deposit. This plating has been used typically to improve the solderability, electrical conductivity, corrosion resistance, performance, and appearance of electronic and electrical parts, but usage is not limited to such applications.

**SAE AMS 2408H** Plating, Tin. 2003.

This specification covers the engineering requirements for electrodeposition of tin on metals and the properties of the deposit.

**SAE AMS P81728** Plating, Tin-Lead (Electrodeposited). 1998.

This specification covers the requirements for electrodeposited tin-lead plating.

**SAE AMS 2412G** Plating, Silver Copper Strike, Low Bake. 1999

This specification covers the engineering requirements for silver deposited on metal parts with a copper strike between the basis metal and the silver deposit.

**SAE AMS 2410J** Plating, Silver Nickel Strike, High Bake. 2004.

This specification covers the engineering requirements for electrodeposition of silver on other metals, usually with a nickel strike between the basis metal and the silver, and the properties of the deposit.

**SFS 4446** 1979-12-31. 1.

Metallic coatings. Electroplated coatings of nickel, Metallien pinnoitteet. Sähkösaostetut nikkelpinnoitteet. 1 ed. 6 p.

**ISO 248:2005**.

Rubbers, raw – Determination of volatile-matter content. 9 s.

ISO 248 specifies two methods, a hot-mill method and an oven method, for the determination of moisture and other volatile-matter content in raw rubbers. These methods are applicable to the determination of the volatile-matter content in the R-group of rubbers listed in ISO 1629 which are rubbers having an unsaturated carbon chain, for example, natural rubber and synthetic rubbers derived at least partly from diolefins.

**SFS-EN ISO 1461** fi/en 1999-08-23.

Hot dip galvanized coatings on fabricated iron and steel articles. Specifications and test methods (ISO 1461:1999)

Teräs- ja valurautatuotteiden kuumasinkkipinnoitteet kappaletavaroille. Erittelyt ja koestusmenetelmät. 28+18+15 s.

**ISO 4097:2000**. 18 s.

Rubber, ethylene-propylene-diene (EPDM) – Evaluation procedure.

**SFS-EN ISO 12944-1** fi/en 1998-11-30. 16 s.

Paints and varnishes. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems. Part 1: General introduction (ISO 12944-1:1998) Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 1: Yleistä.

SFS-EN **ISO 12944-2** fi/en 1998-11-30. 20 s.

Part 2: Classification of environments (ISO 12944-2:1998) Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 2: Ympäristöolosuhteiden luokittelu.

Part 3: Design considerations (ISO 12944-3:1998). 30 s.

Part 4: Types of surface and surface preparation (ISO 12944-4:1998). 38 s.

Part 5: Protective paint systems (ISO 12944-5:1998). 59 s.

Part 6: Laboratory performance test methods (ISO 12944-6:1998). 26 s.

Part 7: Execution and supervision of paint work (ISO 12944-7:1998). 20 s.

Part 8: Development of specifications for new work and maintenance (ISO 12944-8:1998). 76 s.

SFS-EN **ISO 14713** fi/en 1999-08-23. 64 s. + liitt. 39 s.

Protection against corrosion of iron and steel in structures. Zinc and aluminium coatings. Guidelines (ISO 14713:1999)

Teräs- ja rautarakenteiden korroosionesto. Sinkki- ja alumiinipinnoitteet.

SFS-EN **22063** fi/en 1994-04-11. 24 s.

Metallic and other inorganic coatings. Thermal spraying. Zinc, aluminium and their alloys (ISO 2063:2005)

Metalliset ja muut epäorgaaniset pinnoitteet. Terminen ruiskutus. Sinkki, alumiini ja niiden seokset.

## **IEC/IPC kosteudelle herkkien komponenttien käsittely**

### **IEC 60286-3 (1997-12).**

Packaging of components for automatic handling – Part 3: Packaging of leadless components on continuous tapes. 37 p.

Relates to the tape packaging of electronic components without leads or with lead stumps which are intended to be connected to electronic circuits. Includes only those dimensions which are essential for the taping of components for the above-mentioned purposes.

### **IEC 60286-4 (1997-12).**

Packaging of components for automatic handling – Part 4: Stick magazines for electronic components encapsulated in packages of form E and G. 23 p.

Intended to be used for storage of electronic components, for transport from the manufacturer to the customer and for in-house use in the manufacturing plant.

### **IEC 60286-5 (2003-10).**

Packaging of components for automatic handling – Part 5: Matrix trays. 27 p.

Describes the common dimensions, tolerances and characteristics of the tray. It includes only those dimensions which are essential for the handling of the trays for the stated purpose and for placing or removing components from the trays.

### **IEC 60286-6 (2004-02).**

Packaging of components for automatic handling – Part 6: Bulk case packaging for surface mounting components. 27 p.

Is applicable to bulk case packaging capable of containing surface mounting components. The bulk case is designed for transport and storage of components and the supply of components directly or by an appropriate feeder to the placement machine. The bulk case is attached to the automatic handling machine by means of a coupling interface.

### **IEC 61760-1 (2006-04).**

Surface mounting technology – Part 1: Standard method for the specification of surface mounting components (SMDs). 30 p.

Gives a reference set of process conditions and related test conditions to be used when compiling component specifications of electronic components that are intended for usage in surface mount technology.



**IEC 61760-2 (1998-02).**

Surface mounting technology – Part 2: Transportation and storage conditions of surface mounting devices (SMD) – Application guide. 9 p.

Describes the transportation and storage conditions for surface mounting devices (SMDs) that are fulfilled in order to enable trouble free processing of surface mounting devices, both active and passive. The object of this International Standard is to ensure that users of SMDs receive and store products that can be further processed without prejudice to quality and reliability.

**IPC/JEDEC J-STD-020A (April 1999).**

Moisture/Reflow Sensitivity Classification for Nonhermetic Solid State Surface Mount Devices. 21 p.

The purpose of this standard is to identify the classification level of nonhermetic solid state Surface Mount Devices (SMDs) that are sensitive to moisture-induced stress so that they can be properly packaged, stored, and handled to avoid subsequent thermal/mechanical damage during the assembly solder reflow attachment and/or repair operation. The classification procedure applies to all nonhermetic solid state Surface Mount Devices (SMDs) in packages which, because of absorbed moisture, could be sensitive to damage during solder reflow. The term SMD as used in this document means plastic encapsulated packages and other packages made with moisture-permeable materials. The categories are intended to be used by SMD producers to inform users (board assembly operations) of the level of moisture sensitivity of product devices, and by board assembly operations to ensure that proper handling precautions are applied to moisture/reflow sensitive devices.

**IPC/JEDEC J-STD-033 (May 1999).** Standard for Handling, Packing, Shipping and Use of Moisture/Reflow Sensitive Surface Mount Devices. 20 p.

The advent of surface mount devices (SMDs) introduced a new class of quality and reliability concerns regarding package cracks and delamination. This document describes the standardized levels of floor life exposure for moisture/reflow-sensitive SMDs along with the handling, packing and shipping requirements necessary to avoid moisture/reflow-related failures. Companion documents, J-STD-020, define the classification procedure and JEP113 define the labeling requirements.

Moisture from atmospheric humidity will enter permeable packaging materials by diffusion and preferentially collect at the dissimilar material

interfaces. Assembly processes, used to solder SMDs to printed circuit boards (PCBs), will expose the entire package body to temperatures higher than 200 °C. During solder reflow, the combination of rapid moisture expansion and materials mismatch can result in package cracking and/or delamination of critical interfaces within the package. The solder reflow processes of concern are convection, convection/IR, infrared (IR), vapor phase (VPR), and hot air rework tools. The use of assembly processes that immerse the component body in molten solder are not recommended for most SMD components. The purpose of this document is to provide SMD manufacturers and users with standardized methods for handling, packing, shipping, and use of moisture/reflow sensitive SMDs. These methods are provided to avoid damage from moisture absorption and exposure to solder reflow temperatures that can result in yield and reliability degradation. By using these procedures, safe and damage-free reflow can be achieved, with the dry packing process, providing a minimum shelf life capability in sealed dry-bags of 12 months from the seal date.

**JEP113-B** (May 1999).

Symbol and Labels for Moisture-Sensitive Devices. 10 p.

Certain plastic surface-mount components are subject to permanent damage due to moisture-induced failures encountered during high-temperature surface-mount processing unless appropriate precautions are observed.

**EIA/JEP124** (December 1995).

Guidelines for the Packing, Handling and Repacking of Moisture-Sensitive Components. 14 p.

This publication establishes guidelines for the packing, handling and repacking of moisture-sensitive components. The guidelines are applicable to semiconductor manufacturers for the shipment of moisture-sensitive components and anyone else who handles these components prior to shipment of moisture-sensitive components to a distributor.

**ANSI/IPC SM-786A** (1995).

Procedures for Characterizing and Handling of Moisture/Reflow Sensitive ICs.

The classification procedure applies to all integrated circuits in packages which, because of absorbed moisture, could be sensitive to damage during solder reflow. These ICs include plastic encapsulated packages and other packages made with moisture-permeable materials such as epoxies. The categories are intended to be used by IC producers to inform IC users

(board assembly operations) of the level of moisture sensitivity of product devices, and by board assembly operations to ensure that proper handling precautions are applied to moisture/reflow sensitive devices.

**IPC/JPCA-4104** (May 1999).

Specification for High Density Interconnect (HDI) and Microvia Materials.

Covers the various conductive and dielectric materials that can be used for the fabrication of HDI and microvias. The 23 specification sheets included in IPC/JPCA-4104 give the qualification and conformance requirements such materials as photoimageable dielectric dry films and liquids, epoxy blends and coated foils. IPC/JPCA-4104 also includes six new test methods developed specifically for the testing of HDI and microvia materials. 100 pages.

Related documents for IPC/JPCA-4104:

**IPC-6016** Qualification and Performance Specification for High Density Interconnect (HDI) Layers or Boards.

**IPC-4101** Specification for Base Materials for Rigid and Multilayer Printed Boards.

# Veden absorptio, höyryn ja kaasujen läpäisevyys

ASTM-lähde:<http://www.astm.org/> <http://www.nssn.org/default.aspx>

## **ASTM E96/E96M-05.**

Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.

These test methods cover the determination of water vapor transmission (WVT) of materials through which the passage of water vapor may be of importance, such as paper, plastic films, other sheet materials, fiberboards, gypsum and plaster products, wood products, and plastics. The test methods are limited to specimens not over 1 1/4 in. (32 mm) in thickness except as provided in Section 9. Two basic methods, the Desiccant Method and the Water Method, are provided for the measurement of permeance, and two variations include service conditions with one side wetted and service conditions with low humidity on one side and high humidity on the other. Agreement should not be expected between results obtained by different methods. That method should be selected which more nearly approaches the conditions of use.

## **ASTM F1249-06.**

Standard Test Method for Water Vapor Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Modulated Infrared Sensor.

This test method covers a procedure for determining the rate of water vapor transmission through flexible barrier materials. The method is applicable to sheets and films up to 3 mm (0.1 in.) in thickness, consisting of single or multilayer synthetic or natural polymers and foils, including coated materials. It provides for the determination of (1) water vapor transmission rate (WVTR), (2) the permeance of the film to water vapor, and (3) for homogeneous materials, water vapor permeability coefficient. Note 1 Values for water vapor permeance and water vapor permeability must be used with caution. The inverse relationship of WVTR to thickness and the direct relationship of WVTR to the partial pressure differential of water vapor may not always apply.

## **ASTM D1434-82 (2003).**

Standard Test Method for Determining Gas Permeability Characteristics of Plastic Film and Sheeting.

This test method covers the estimation of the steady-state rate of transmission of a gas through plastics in the form of film, sheeting, laminates, and plastic-

coated papers or fabrics. This test method provides for the determination of (1) gas transmission rate (GTR), (2) permeance, and, in the case of homogeneous materials, (3) permeability. Two procedures are provided: 1 Procedure M- Manometric. 2 Procedure V- Volumetric.

#### **ASTM D3985-05.**

Standard Test Method for Oxygen Gas Transmission Rate Through Plastic Film and Sheeting Using a Coulometric Sensor.

This test method covers a procedure for determination of the steady-state rate of transmission of oxygen gas through plastics in the form of film, sheeting, laminates, coextrusions, or plastic-coated papers or fabrics. It provides for the determination of (1) oxygen gas transmission rate (O<sub>2</sub>GTR), (2) the permeance of the film to oxygen gas (P<sub>O<sub>2</sub></sub>), and (3) oxygen permeability coefficient (P' O<sub>2</sub>) in the case of homogeneous materials.

#### **ASTM D570-98 (2005).**

Title: Standard Test Method for Water Absorption of Plastics.

This test method covers the determination of the relative rate of absorption of water by plastics when immersed. This test method is intended to apply to the testing of all types of plastics, including cast, hot-molded, and cold-molded resinous products, and both homogeneous and laminated plastics in rod and tube form and in sheets 0.13 mm (0.005 in.) or greater in thickness. Note ISO 62 is technically equivalent to this test method ASTM D570.

#### **ISO 62:1999.**

Plastics – Determination of water absorption, (gravimetric analysis, physical tests, plastics, tests, water absorption tests). 11 p.

#### **ISO 535:1991.**

Paper and board – Determination of water absorptiveness – Cobb method (paper, paperboards, tests, water absorption tests). 4 p.

#### **ISO 811:1981.**

Textile fabrics – Determination of resistance to water penetration – Hydrostatic pressure test.

#### **ISO 2896:2001.**

Rigid cellular plastics – Determination of water absorption. 11 p.

## Kuljetuspakkausstandardeja

**DIN 55473.** Ausgabe:1997-12 Packhilfsmittel – Trockenmittelbeutel – Technische Lieferbedingungen. (Bentoniitti)

**DIN 55474.** Ausgabe:1997-07 Packhilfsmittel – Trockenmittelbeutel – Anwendung, Berechnung der erforderlichen Anzahl Trockenmitteleinheiten.

**DIN 55475.** Ausgabe:1997-03 Packhilfsmittel – Klebestreifen aus Kraftpapier – Unverstärkt oder verstärkt, wasser – oder wärmeaktivierbar; Anforderungen und Prüfung.

**MIL-B-22020-D.** (2 May 1990), Bags, transparent, flexible, sealable, volatile corrosion inhibitor treated. 11 p.

**MIL-PRF-131J.** (26 August 1998), Barrier materials, watervaporproof, greaseproof, flexible, heat-sealable. 19 p.

**MIL-PRF-3420G.** (11 September 1998), Packaging materials, volatile corrosion inhibitor treated, opaque. 16 p.

**MIL-PRF-22019D.** (31 August 1998), Barrier materials, transparent, flexible, sealable, volatile corrosion inhibitor treated. 16 p.

**MIL-PRF-22191E.** (26 August 1998), Barrier materials, transparent, flexible, heat-sealable. 20 p.

**MIL-PRF-81705D.** (3 September 1998), Barrier materials, flexible, electrostatic protective, heat-sealable. 27 p. (Replaces MIL-B-81705C).

**BS 1133-6.1:**1991. Packaging code. Protection of metal surfaces against corrosion during transport and storage. Cleaning and drying of metal surfaces. 32 p.

**BS 1133-6.2:**1991. Packaging code. Protection of metal surfaces against corrosion during transport and storage. Temporary protectives and their application. 20 p.

**BS 7541:**1992. Specification for temporary protectives for the protection of metal surfaces against corrosion during transport and storage. 20 p.

**BS 7195:**1989. British Standard Guide for Prevention of corrosion of metals caused by vapours from organic materials. 16 p.

IEC/TS 61340-5-1 (1998-12).

Electrostatics – Part 5–1: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – General requirements. 157 p.

Specifies the general requirements for the protection of electrostatic discharge sensitive devices (ESDS) from electrostatic discharges and fields. It applies only to the manufacture and use of electronic devices. Gives information on how to design, use and control a protected area to ensure that electrostatic sensitive devices, having a withstand threshold voltage of 100 V (human body model) or higher, can be handled with a minimum risk of damage resulting from electrostatic phenomena.

Normal precautions given are applicable for areas with clean room types in excess of ISO 14644-1 class 5. Alternative precautions may be required in clean rooms of ISO 14644-1 class 5 or less if contamination is formed as a result of using the procedures specified in this technical report.

IEC/TS 61340-5-2 (1999-02).

Electrostatics – Part 5–2: Protection of electronic devices from electrostatic phenomena – User guide. 109 p.

Covers the protection from electrostatic discharge (ESD) damage of all electronic devices (components, assemblies and sub-assemblies) with voltage sensitivity of not lower than 100 V throughout their entire life. This is from the commencement of manufacture, through product assembly, product use and possible repair until the end of the product life. Is to be read in conjunction with IEC 61340-5-1.

SFS-EN 100015-1 (1993-03-15). Staattiselle sähkölle arkojen komponenttien suojaus. Yleiset vaatimukset. 81 p.

Standardi sisältää eurooppalaisen standardin EN 100015-1: 1992 “Basic specification. Protection of electrostatic sensitive devices. Part 1: General requirements.

## Testausmenetelmästandardit

Nordtest Remiss Nr 548-85 Calibration of instruments for measuring the relative humidity using saturated salt solutions, 1987. 31 p.

ASTM B117-03 Standard Practice for Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. 10 p.

This practice describes the apparatus, procedure, and conditions required to create and maintain the salt spray (fog) test environment. This practice does not prescribe the type of test specimen or exposure periods to be used for a specific product, nor the interpretation to be given to the results.

ASTM B810-01a (2002).

Standard Test Method for Calibration of Atmospheric Corrosion Test Chambers by Change in Mass of Copper Coupons. 6 p.

- 1.1 This test method covers the calibration of atmospheric corrosion test chambers for electrical contacts that produce an adherent film of corrosion product on copper, such as a test comprised of a mixture of flowing gases that react with copper.
- 1.2 This test method is not applicable to tests where corrosion products may be removed from a copper surface during the test by fluids.
- 1.3 This test method is not applicable to tests where airborne solid or liquid material may be deposited on a copper surface during the test, as in a test which includes particulates suspended in the atmosphere.

ASTM B827-05 (2005).

Standard Practice for Conducting Mixed Flowing Gas (MFG) Environmental Tests. 9 p.

This practice provides for the required equipment and methods for gas, temperature, and humidity control which enable tests to be conducted in a reproducible manner. Reproducibility is measured through the use of control coupons whose corrosion films are evaluated by mass gain, coulometry, or by various electron and X-ray beam analysis techniques. Reproducibility can also be measured by in-situ corrosion rate monitors using electrical resistance or mass/ frequency change methods.



ASTM B845-97 (2003).

Standard Guide for Mixed Flowing Gas (MFG) Tests for Electrical Contacts. 11 p.

The techniques described in this guide pertain to mixed flowing gas (MFG) tests containing species that are applied to evaluate devices containing electrical contacts such as slip rings, separable connectors, electromechanical relays or switch contacts. These techniques may be relevant to other devices, but it is the responsibility of the user to determine suitability prior to testing.

ASTM D257-99 (2005).

Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials. 18 p.

These test methods cover direct-current procedures for the determination of dc insulation resistance, volume resistance, volume resistivity, surface resistance, and surface resistivity of electrical insulating materials, or the corresponding conductances and conductivities. (look IPC-9201)

ASTM G16-95 (2004).

Standard Guide for Applying Statistics to Analysis of Corrosion Data. 14 p.

This guide presents briefly some generally accepted methods of statistical analyses which are useful in the interpretation of corrosion test results. This guide does not cover detailed calculations and methods, but rather covers a range of approaches which have found application in corrosion testing. Only those statistical methods that have found wide acceptance in corrosion testing have been considered in this guide.

ASTM G48-03.

Standard Test Methods for Pitting and Crevice Corrosion Resistance of Stainless Steels and Related Alloys by Use of Ferric Chloride Solution. 11 p.

These test methods cover procedures for the determination of the resistance of stainless steels and related alloys to pitting and crevice corrosion (see Terminology G 15) when exposed to oxidizing chloride environments. Six procedures are described and identified as Methods A, B, C, D, E, and F.

1.1.1 *Method A* – Ferric chloride pitting test.

1.1.2 *Method B* – Ferric chloride crevice test.

1.1.3 *Method C* – Critical pitting temperature test for nickel-base and chromium-bearing alloys.

1.1.4 *Method D* – Critical crevice temperature test for nickel-base and chromium-bearing alloys.

1.1.5 *Method E* – Critical pitting temperature test for stainless steels.

1.1.6 *Method F* – Critical crevice temperature test for stainless steels.

ASTM G102-89 (2004).

Standard Practice for Calculation of Corrosion Rates and Related Information from Electrochemical Measurements. 7 p.

This practice is intended to provide guidance in converting the results of electrochemical measurements to rates of uniform corrosion. Calculation methods for converting corrosion current density values to either mass loss rates or average penetration rates are given for most engineering alloys. In addition, some guidelines for converting polarization resistance values to corrosion rates are provided.

ASTM D968-05.

Standard Test Methods for Abrasion Resistance of Organic Coatings by Falling Abrasive. 4 p.

These test methods cover the determination of the resistance of organic coatings to abrasion produced by abrasive falling onto coatings applied to a plane rigid surface, such as a metal or glass panel.

Sections: Method A-Falling Sand Abrasion Test

Method B-Falling Silicon Carbide Abrasion Test

ASTM E1545-05.

Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperature by Thermomechanical Analysis. 4 p.

1.1 This test method describes procedures for the assignment of the glass transition temperature of materials on heating using thermomechanical measurements under prescribed experimental conditions.

1.2 This test method is applicable to amorphous or to partially crystalline materials that are sufficiently rigid below the glass transition to inhibit indentation by the sensing probe.

1.3 The normal operating temperature range is from 100 to 600 °C. This temperature range may be extended depending upon the instrumentation used.

1.4 SI units are the standard.

- 1.5 This test method is related to ISO 11359-2. ISO 11359-2 additionally covers the determination of coefficient of linear thermal expansion not covered by this test method. This test method is related to IEC 61006 but uses a slower heating rate.

ASTM E1824-02.

Standard Test Method for Assignment of a Glass Transition Temperature Using Thermomechanical Analysis Under Tension. 3 p.

- 1.1 This test method covers a procedure for the assignment of a glass transition temperature of materials on heating using thermomechanical measurements under tension under prescribed experimental conditions.
- 1.2 This test method may be used as a complement to Test Method E 1545 and is applicable to amorphous or to partially crystalline materials in the form of films, fibers, wires, etc. that are sufficiently rigid to inhibit extension during loading at ambient temperature.
- 1.3 The generally applicable temperature range for this test method is – 100 to 600 °C. This temperature range may be altered depending upon the instrumentation used.

DIN V 53160-1, Ausgabe:2002-10

Bestimmung der Farblässigkeit von Gebrauchsgegenständen - Teil 1: Prüfung mit Speichelsimulanz.

DIN V 53160-2, Ausgabe:2002-10

Bestimmung der Farblässigkeit von Gebrauchsgegenständen - Teil 2: Prüfung mit Schweißsimulanz.

IEC 60068-1 (1988-06).

Environmental testing – Part 1: General and guidance. 53 p.

Enumerates a series of environmental tests and appropriate severities, and prescribes various atmospheric conditions for measurements for the ability of specimens to perform under normal conditions of transportation, storage and operational use.

IEC 60068-2-1 (1990-05).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test A: Cold. 43 p.

Concern cold tests on both non-heat-dissipating and heat-dissipating specimens.

IEC 60068-2-2 (1974-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test B: Dry heat. 63 p.

Contains Test Ba: Dry heat for non-heat-dissipating specimen with sudden change of temperature; Test Bb: Dry heat for non-heat-dissipating specimen with gradual change of temperature; Test Bc: Dry heat for heat-dissipating specimen with sudden change of temperature; Test Bd: Dry heat for heat-dissipating specimen with gradual change of temperature.

Amendments am1 (1993-02) and am2 (1994-05).

IEC 60068-2-5 (1975-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Sa: Simulated solar radiation at ground level. 11 p.

Determines the thermal, mechanical, chemical, electrical, and other effects on equipment and components as a result of exposure to solar radiation at the surface of the earth.

IEC 60068-2-6 (1995-03).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Fc: Vibration (sinusoidal). 87 p.

Gives a method of test which provides a standard procedure to determine the ability of components, equipment and other articles to withstand specified severities of sinusoidal vibration.

IEC 60068-2-9 (1975-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Guidance for solar radiation testing. 34 p.

Describes methods of simulation designed to examine the effect of solar radiation on equipment and components at the surface of the earth. Should be used with IEC 68-2-5.

IEC 60068-2-9-am1 (1984-01). 5 p.

IEC 60068-2-9-am1 Corr. 1 (1989-08). 1 p.

IEC 60068-2-10 (2005-06).

Environmental testing – Part 2-10: Tests – Test J and guidance: Mould growth. 49 p.

Provides a test method for determining the extent to which electrotechnical products support mould growth and how any mould growth may affect the performance and other relevant properties of the product. Since mould growth conditions include high relative humidity, the test is applicable to electrotechnical products intended for transportation, storage and use under humid conditions over a period of some days at least.

IEC 60068-2-11 (1981-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Ka: Salt mist. 11 p.

Compares resistance to deterioration from salt mist between specimens of similar construction. May be used to evaluate the quality and the uniformity of protective coatings.

IEC 60068-2-13 (1983-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test M: Low air pressure. 13 p.

Determines the ability of components, equipment and other articles to be stored, transported or used under low air pressure conditions.

IEC 60068-2-14 (1984-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test N: Change of temperature. 29 p.

Determines the ability of components, equipment and other articles to withstand rapid changes of ambient temperature. The exposure times to accomplish this depend upon the nature of the specimen.

IEC 60068-2-17 (1994-07). (look also IEC 60529)

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Q: Sealing. 103 p.

Includes a number of tests which use different conditioning procedures appropriate for different application. The standard includes tests for air tightness, gas leakage (bubble test), liquid seepage, pressure rise, tracer gas with mass spectrometer, tracer gas with internal pressurization, immersion and bomb pressure.

IEC 60068-2-18 (2000-10).

Environmental testing – Part 2-18: Tests – Test R and guidance: Water. 75 p.

Provides methods of test applicable to products which, during transportation, storage or in service, may be subjected to falling drops, impacting water or immersion. The primary purpose of water tests is to verify the ability of enclosures, covers and seals to maintain components and equipment in good working order after and, when necessary, under a standardized dropfield or immersion in water. These tests are not corrosion tests and should not be considered and used as such. The effects of a large temperature difference between the water and the specimen, such as increased water ingress resulting from pressure changes, as well as thermal shock, are not simulated. Established water tests in other standards are not intended to simulate natural rainfall and their quoted intensities are too high

to be adopted for that purpose. Therefore, in addition to the high-intensity severities, Test R includes an artificial rain test based upon natural conditions but not taking into account high wind speeds generally associated with natural rain. Guidance is given on the applicability of the tests and the severities to be selected.

IEC 60068-2-21 (2006-06).

Environmental testing – Part 2-21: Tests – Test U: Robustness of terminations and integral mounting devices.

Applicable to all electrical and electronic components whose terminations or integral mounting devices are liable to be submitted to stresses during normal assembly or handling operations.

IEC 60068-2-30 (2005-08).

Environmental testing – Part 2-30: Tests – Test Db: Damp heat, cyclic (12 h + 12 h cycle). 27 p.

Determines the suitability of components, equipment or other articles for use, transportation and storage under conditions of high humidity – combined with cyclic temperature changes and, in general, producing condensation on the surface of the specimen. If the test is being used to verify the performance of a specimen whilst it is being transported or stored in packaging then the packaging will normally be fitted when the test conditions are being applied. For small, low mass specimens, it may be difficult to produce condensation on the surface of the specimen using this procedure; users should consider the use of an alternative procedure such as that given to IEC 60068-2-38. The main changes with respect to the previous edition are listed below: – editorial changes, – addition of normative references, – addition of guidance for temperature tolerances, – period for recovery has been extended.

IEC 60068-2-33 (1971-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Guidance on change of temperature tests. 13 p.

Gives guidance to designers and testing personnel on the specification and use of change of temperature tests. A change of temperature test is intended to determine the effect on the specimen of a change of temperature or a succession of changes of temperature.

IEC 60068-2-38 (1974-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Z/AD: Composite temperature/humidity cyclic test. 20 p.

Applies to component-type specimens and is a test to determine in accelerated manner to the effects of high temperature, humidity and cold.

IEC 60068-2-39 (1976-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Z/AMD: Combined sequential cold, low air pressure, and damp heat test. 9 p.

Applies to aircraft components and equipment, particularly to those installed in unheated or unpressurized conditions.

IEC 60068-2-40 (1976-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Z/AM: Combined cold/low air pressure tests. 17 p.

Applies to heat-dissipating and non-heat-dissipating specimens and is a test to determine the ability of components, equipment and other articles to be stored and used under simultaneous combination of low temperature and low air pressure.

IEC 60068-2-41 (1976-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Z/BM: Combined dry heat/low air pressure tests. 19 p.

Applies to heat-dissipating and non-heat-dissipating specimens and is a test to determine the ability of components, equipment and other articles to be stored and used under simultaneous combination of high temperature and low air pressure.

IEC 60068-2-42 (2003-05).

Environmental testing – Part 2-42: Tests – Test Kc: Sulphur dioxide test for contacts and connections. 15 p.

Provides an accelerated means of assessing the corrosive effect of atmospheres polluted with sulphur dioxide on contacts and connections.

IEC 60068-2-43 (2003-05).

Environmental testing – Part 2-43: Tests – Test Kd: Hydrogen sulphide test for contacts and connections. 14 p.

Provides accelerated means to assess the effects of the tarnishing of silver and silver alloys used for contacts and connections.

IEC 60068-2-45 (1980-01).

Environmental testing. Part 2: Tests. Test XA and guidance: Immersion in cleaning solvents. 20 p.

Applies to electronic components and other parts mounted on printed circuit boards which may be subjected to cleaning operations. Also gives information on test solvents and test temperatures. Amendment am1 (1993-02)

IEC 60068-2-46 (1982-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Guidance to Test Kd: Hydrogen sulphide test for contacts and connections. 23 p.

Gives guidance on the effect of hydrogen sulphide on electrical contacts and the significance of the test in IEC 60068-2-43 on the behaviour of contacts exposed to such atmospheres.

IEC 60068-2-48 (1982-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Guidance on the application of the tests of IEC 68 to simulate the effects of storage. 11 p.

In this guidance, the term “storage” describes the keeping of components, equipment or other articles for relatively long periods of time (ranging from some weeks to many years) in a non-operating mode.

IEC 60068-2-49 (1983-01).

Environmental testing – Part 2: Tests. Guidance on the application of the tests of IEC 68 to simulate the effects of storage. 11 p.

In this guidance, the term storage describes the keeping of components, equipment or other articles for relatively long periods of time (ranging from some weeks to many years) in a non-operating mode.

IEC 60068-2-50 (1983-01).

Environmental testing. Part 2: Tests. Tests Z/AFc: Combined cold/vibration (sinusoidal) tests for both heat-dissipating and non-heat-dissipating specimens. 21 p.

Combination of test Fc: Vibration (sinusoidal) and test A: Cold.



IEC 60068-2-51 (1983-01).

Environmental testing. Part 2: Tests. Tests Z/BFc: Combined dry heat/vibration (sinusoidal) tests for both heat-dissipating and non-heat-dissipating specimens. 21 p.

Combination of Test Fc: Vibration (sinusoidal) and Test B: Dry heat.

IEC 60068-2-52 (1996-02).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Kb: Salt mist, cyclic (sodium, chloride solution). 21 p.

Determines the suitability of components and equipment for use or exposure in a salt-laden atmosphere.

IEC 60068-2-53 (1984-12).

Environmental testing. Part 2: Tests. Guidance to Tests Z/AFc and Z/BFc: Combined temperature (cold and dry heat) and vibration (sinusoidal) tests. 10 p.

Gives guidance on the use of Tests Z/AFc and Z/BFc when testing components, equipment and other electrotechnical products.

IEC 60068-2-60 (1995-12).

Environmental testing – Part 2: Tests – Test Ke: Flowing mixed gas corrosion test. 41 p.

Determines the corrosive influence of operating and storage indoor environments on electrotechnical products components, equipment and materials, particularly contacts and connections, considered separately, integrated into a subassembly or assembled as a complete equipment.

IEC 60068-2-61 (1991-07).

Environmental testing – Part 2: Test methods – Test Z/ABDM: Climatic sequence. 33 p.

Specifies a ‘climatic sequence’ for products, primarily components, that is based on clause 7, and annex B of IEC 60068-1. Includes guidance for specification writers and those performing the test. Includes sequences Dry heat, Damp heat cyclic, Cold, Low air pressure, Damp heat cyclic.

IEC 60068-2-64 (1993-05).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Fh: Vibration, broad-band random (digital control) and guidance. 85 p.

Determines the ability to withstand specified severities of broad-band random vibration. Applies to specimens which may be subjected to vibration of stochastic nature by transportation or operational environments, for example in aircraft, space vehicles and land vehicles.

IEC 60068-2-66 (1994-06).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Cx: Damp heat, steady state (unsaturated pressurized vapour). 33 p.

Provides standard test procedure for the purpose of evaluating, in an accelerated manner, the resistance of small electrotechnical products, primarily non-hermetically sealed components (e.g. plastic encapsulation), to the deteriorative effect of damp heat. The test is not intended to evaluate external effects, such as corrosion and deformation. Test conditions are temperature 110, 120 or 130 °C and relative humidity 85 %. Test durations are 24, 48, 96, 192 or 408 hours.

IEC 60068-2-67 (1995-12).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test Cy: Damp heat, steady state, accelerated test primarily intended for components. 17 p.

Provides standard test procedure for the purpose of evaluating, in an accelerated manner, the resistance of small electrotechnical products, primarily non-hermetically sealed components (e.g. plastic encapsulation), to the deteriorative effect of damp heat. The test is not intended to evaluate external effects, such as corrosion and deformation. Test conditions are temperature 85 °C and relative humidity 85 %. Test durations are 168, 504, 1000 or 2000 hours.

IEC 60068-2-68 (1994-08).

Environmental testing – Part 2: Tests. Test L: Dust and sand. 127 p.

Specifies test methods to determine the effects of dust and sand suspended in air, on electrotechnical products.

IEC 60068-2-69 (1995-12).

Environmental testing – Part 2: Tests – Test Te: Solderability testing of electronic components for surface mount technology by the wetting balance method. 43 p.

Describes two wetting balance methods. These methods determine quantitatively the solderability of terminations on surface mounted devices. The procedures describe the solder bath wetting balance method and the

solder globuwetting balance method and are both applicable to components with metallic termination and metallized solder pads.

IEC 60068-2-70 (1995-12).

Environmental testing – Part 2: Tests – Test Xb: Abrasion of marking and letterings caused by rubbing of fingers and hands. 19 p.

Is intended to provide a standard method to determine the resistance of markings and letterings on flat or curved surfaces against abrasion as it may occur by manually operating actuators and keyboards. The method is also suitable to test the resistance against fluid contamination as it may occur under normal use.

IEC 60068-2-78 (2001-08).

Environmental testing – Part 2-78: Tests – Test Cab: Damp heat, steady state. 13 p.

Provides a test method for determining the suitability of electrotechnical products, components or equipment for transportation, storage and use under conditions of high humidity. The test is primarily intended to permit the observation of the effect of high humidity at constant temperature without condensation on the specimen over a prescribed period. This test provides a number of preferred severities of high temperature, high humidity and test duration. The test can be applied to both heat-dissipating and non-heat dissipating specimens. The test is applicable to small equipment or components as well as large equipment having complex interconnections with test equipment external to the chamber, requiring a set-up time which prevents the use of preheating and the maintenance of specified conditions during the installation period.

IEC 60068-3-1 (1974-01).

Environmental testing – Part 3: Background information – Section one: Cold and dry heat tests. 59 p.

IEC 60068-3-2 (1976-01).

Environmental testing – Part 3: Background information – Section Two: Combined temperature/low air pressure tests.

Gives background information for Test Z/AM and Z/BM.

IEC 60068-5-1 (1991-07).

Environmental testing – Part 5: Guide to drafting of test methods. General principles. 23 p.

Provides a framework for the drafting and presentation of test methods in Part 2 of IEC 60068 and guidance on its adaptation to particular situations.

IEC 60093 (1980-01).

Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials. 44 p.

Gives test procedures and calculations for the determination of volume and surface resistivity. Establishes recommendations for: values of voltage and time of application; nature and geometry of electrodes temperature and humidity of atmosphere and test specimens; conditioning of test specimens.

IEC 60216 (2001-07).

Electrical insulating materials – Properties of thermal endurance – Part 1: Ageing procedures and evaluation of test results. 79 p.

Specifies the general ageing conditions and procedures to be used for deriving thermal endurance characteristics and gives guidance in using the detailed instructions and guidelines in the other parts of the standard. Simplified procedures are also given, with the conditions under which these procedures may be used.

IEC 60426 (2007-01).

Electrical insulating materials – Determination of electrolytic corrosion caused by insulating materials – Test methods. 26 p.

This standard determines the ability of insulating materials to produce electrolytic corrosion on metals being in contact with them under the influence of electric stress, high humidity and elevated temperature.

IEC 61006 (2004-01).

Electrical insulating materials – Methods of test for the determination of the glass transition temperature. 47 p.

Specifies procedures for test methods for the determination of the glass transition temperature of solid electrical insulating materials. They are applicable to amorphous materials or to partially crystalline materials containing amorphous regions which are stable and do not undergo decomposition or sublimation in the glass transition region. Changes from the first edition are as follows: – the standard has been completely revised

from an editorial point of view and adapted to the state of the art; – a figure to demonstrate the dynamic mechanical analysis has been introduced.

IEC 61086-1 (2004-01).

Coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings) – Part 1: Definitions, classification and general requirements. 13 p.

Gives the definitions, classification and general requirements for electrical insulating materials suitable for application as coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings). This standard excludes requirements for compatibility between such coatings and printed wire boards, this characteristic being evaluated in individual applications. Surface modifiers are not classified as conformal coatings. They only provide a thin film that does not cure and has low mar resistance. They are excluded from this standard. Materials which conform to this standard meet established levels of performance.

IEC 61086-2 (2004-02).

Coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings) – Part 2: Methods of test. 37 p.

Gives the methods of test for electrical insulating materials suitable for application as coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings). The tests are: visual assessment, properties after thermal cycling, resistance to organic liquids, coating removal, dissipation factor and permittivity, insulation resistance after damp heat, mould growth, shelf life, flammability, tackiness, loss of volatile matter, thermal ageing, insulation resistance after salt mist, extreme altitude and temperature test, electric strength. In these methods the IPC Multipurpose test board pattern No. IPC-B-25 is used as test pattern.

IEC 61086-3-1 (2004-02).

Coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings) – Part 3-1: Specifications for individual materials – Coatings for general purpose (Class 1), high reliability (Class 2) and aerospace (Class 3). 19 p.

Gives the property requirements for electrical insulating materials suitable for application as coatings for loaded printed wire boards (conformal coatings). Materials which conform to this specification meet established levels of performance. However, the selection of a material by a user for a specific application should be based on the actual requirements necessary for adequate performance in that application and not based on this

specification alone. This edition includes the following significant technical changes from the previous edition: a) requirements for cleaning have been added; b) new properties based on modifications to IEC 61086-2 have been added; c) a Class 3 material for aerospace applications has been included.

IEC 60287-2-2 (1995-05).

Electric cables – Calculation of the current rating – Part 2: Thermal resistance – Section 2: A method for calculating reduction factors for groups of cables in free air, protected from solar radiation.

Is applicable to any type of cable and group running horizontally, provided that the cables are of equal diameter and emit equal losses. This publication supersedes IEC 61042.

IEC 60319 (1999-09).

Presentation and specification of reliability data for electronic components. 39 p.

Describes the information needed for characterizing reliability and the detailed requirements for reporting reliability data.

IEC 60512-11-7 (2003-05).

Connectors for electronic equipment – Tests and measurements – Part 11-7: Climatic tests – Test 11g: Flowing mixed gas corrosion test. 9 p.

Defines a standard test method to assess the effects of a controlled atmosphere polluted by gases at very low concentration on electrical contacts or connections.

IEC 60529 (2001-02). (look also IEC 60068-2-17)

Degrees of protection provided by enclosures (IP Code). 91 p.

Applies to the classification of degrees of protection provided by enclosures for electrical equipment with a rated voltage not exceeding 72,5 kV. Has the status of a basic safety publication in accordance with IEC Guide 104.

IEC 61189-3 (1997-04).

Test methods for electrical materials, interconnection structures and assemblies – Part 3: Test methods for interconnection structures (printed boards). 105 p.

Provides a catalogue of test methods representing methodologies and procedures that can be applied to test materials used for manufacturing interconnection structures (printed boards) and assemblies. It mainly covers chemical, mechanical and electrical test methods.

IEC 61300-2-30 (1995-06). 9 p.

Fibre optic interconnecting devices and passive components – Basic test and measurement procedures – Part 2-30: Tests – Solar radiation.

---

IPC TM-650 Test Methods Manual. 1999.

Contains industry approved test techniques and procedures for chemical, mechanical, electrical, and environmental tests on all forms of printed boards and connectors. There have been 111 new or revised test methods added to IPC-TM-650 in the last two years./

<http://ipc.org/html/testmethods.htm/>.

IPC-A-600E Acceptability of Printed Boards. USA 1995. 113 p.

Contains visual illustrations of preferred, acceptable, and rejectable conditions for: plated through-holes; surface plating; solder coating; base materials; etching; conductors; mechanical processes; flexible and multilayer boards; bow/twist; flat cable and other conditions of printed wiring boards.

IPC-6011 Generic Performance Specification for Printed Boards. 10 p.

This specification establishes the general requirements and responsibilities for suppliers and users of printed boards. Describes quality and reliability assurance requirements that must be met. For use with IPC-6012 through IPC-6018. Released July 1996.

IPC-6012 Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards (With IPC-6011, Supersedes IPC-RB-276). 27 p.

This specification covers qualification and performance of rigid printed boards. The printed board may be single-sided, double-sided, with or without plated through-holes, multilayer with or without buried/blind vias and metal core boards. Covers finishes, plating, traces, holes/vias, electrical, mechanical and environmental requirements. For use with IPC-6011. Released July 1996.

IPC-6015 Qualification and Performance Specification for Organic Multichip Module (MCM-L) Mounting and Interconnecting Structures. 17 p.

This specification establishes the specific requirements for organic mounting structures used to interconnect chip components, which in combination form the completed functional organic single-chip module (SCM-L) or organic multichip module (MCM-L) assembly and the quality and reliability assurance requirements that must be met for their acquisition. For use with IPC-6011. Released February 1998.

IPC-9201 Surface Insulation Resistance Handbook, July 1996. 65 p.

This document is intended to cover the broad spectrum of temperature-humidity (TH) testing, associated terminology, and suggested techniques for proper testing. This Handbook covers the test methods used in the United States. (look ASTM D257).

IPC-TR-476A. Electrochemical Migration: Electrochemically Induced Failures in Printed Wiring Boards and Assemblies, July 1995.

IPC-A-610B. Acceptability of Electronic Assemblies, USA December 1994 Includes Amendment 1, January 1996. 134 p. (Revised November 2000).

A must for all quality assurance departments, IPC-A-610B illustrates industry-accepted workmanship criteria through full-color photographs and schematic illustrations. The topics covered include component orientation and soldering criteria for through-hole, SMT and discrete wiring assemblies.

IPC-A-610C is valuable for all inspectors, operators and trainers; this visual guide provides each company with a clear representation of electronics acceptability criteria based on the consensus of industry experts.

### **Related documents for IPC-A-610B:**

EIA ANSI/J-STD-001D:2005, Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies.

This standard prescribes practices and requirements for the manufacture of soldered electrical and electronic assemblies. Historically, electronic assembly (soldering) standards contained a more comprehensive tutorial addressing principles and techniques. For a more complete understanding of this document's recommendations and requirements, one may use this document in conjunction with IPC-HDBK-001, IPC-A-610 and IPCHDBK-610.



ANSI/IPC PC-90-1990 General Requirements for Implementation of Statistical Process Control.

**Desk Reference Manual DRM-SMT.** IPC The Institute for Interconnecting and Packaging Electronic Circuits, Illinois 1998. ISBN 1-580984-28-2. 37 p.

ANSI/EIA-557-A-1995 Statistical Process Control Systems, ANSI approved May 10, 1995. 35 p.

EIA-557-1 Statistical Process Control Guidance for the selection of Critical Manufacturing Operations for Use in Implementing an SPC System for Passive Components.

CECC 00016, 1990

Basic specification: Basic requirements for the use of Statistical Process Control (SPC) in the CECC system.

ISO 12302:1993

Plain bearings – Quality characteristics – Statistical process control (SPC). 3 p.

EIA-625 Requirements to Handling Electrostatic-Discharge Sensitive (EEDS) Devices.

**GR-63-CORE**, (Issue 2, April 2002), NEBS Requirements, Physical protection, Telcordia Technologies, Generic Requirements. (Chapter 5.5 Airborne Contaminants Test Methods).

IPC-SS-615 Assembly Board Quality Evaluation Slide Set.

IPC-QE-615 Electronic Assembly Evaluation Handbook.

IPC-DRM-SMT Surface Mount Solder Joint Evaluation Desk Reference Manual.

IPC-A-25A Multipurpose 1 Sided Test Pattern.

Artwork for standard test boards as referenced in IPC-CC-830 and the newly released IPC-SM-840C. This is used primarily for surface insulation resistance testing. Price is for film or data. Available in film, electronically in Gerber and IPC-D-350 formats. If ordering Gerber or IPC-D-350, please specify the format. Revised February 1996.

IPC-SM-840C Qualification and Performance of Permanent Solder Mask, January 1996. 52 p.

Streamlines solder mask classes into two classifications: H (high reliability) and T (telecommunications). IPC-SM-840C also integrates Bellcore requirements (class T) and provides minimum voltage breakdown, defines mask formulation latitude, adds new mask chemistries and more.

Related documents for IPC-SM-840C:

IPC J-STD-001D:2005 Requirements for Soldered Electrical and Electronic Assemblies.

IPC J-STD-004A:2004 Requirements for soldering fluxes.

IPC-A-25 Multipurpose 1 & 2 Sided Test Pattern

IPC-A-25A Multipurpose 1 Sided Test Pattern

IPC-A-600 Acceptability of Printed Boards

IPC-6012 Qualification and Performance Specification for Rigid Printed Boards

---

ISO 4611 (1987) Plastics – Determination of the effects of exposure to damp heat, water spray and salt mist. 7 p.

ISO 4623-1:2000 Paints and varnishes – Determination of resistance to filiform corrosion – Part 1: Steel substrates. Ed. 1. 7 p.

ISO 4623-2:2003 Paints and varnishes – Determination of resistance to filiform corrosion – Part 2: Aluminium substrates. Ed. 1. 6 p.

ISO 7384 (1986) Corrosion tests in artificial atmosphere – General requirements. 4 p.

ISO 8407: (1991) Corrosion of metals and alloys – Removal of corrosion products from corrosion test specimens. 7 p.

ISO 8565 (1992) Metals and alloys – Atmospheric corrosion testing – General requirements for field tests. 8 p.

ISO 9227: (2006) Corrosion tests in artificial atmospheres – Salt spray tests. 20 p.

Specifies the apparatus, the reagents and the procedure to be used in conducting the neutral salt spray (NSS), acetic acid salt spray (AASS) and copper-accelerated acetic acid salt spray (CASS) tests for assessment of the corrosion resistance of metallic materials, with or without permanent or temporary corrosion protection.

ISO 10062: (2006) Corrosion tests in artificial atmosphere at very low concentrations of polluting gas(es). 12 p.

Specifies tests which are intended to determine the influence of one or more flowing polluting gas(es) at volume fractions less than or equal to 0,000001 on test samples and/or articles of metals and alloys with or without corrosion protection under determined conditions of temperature and relative humidity. These tests apply to metals and their alloys, metallic coatings (anodic and cathodic), metals with conversion coatings, metals with anodic oxide coatings, and metals with organic coatings.

ISO 11359-2:1999 Plastics – Thermomechanical analysis (TMA) – Part 2: Determination of coefficient of linear thermal expansion and glass transition temperature. 10 p.

ISO 11907-1 (1998) Plastics – Smoke generation – Determination of the corrosivity of fire effluents – Part 1: Guidance. 6 p.

ISO 11907-2 (1995) Plastics – Smoke generation – Determination of the corrosivity of fire effluents – Part 2: Static method. 12 p.

ISO 11907-3 (1998) Plastics – Smoke generation – Determination of the corrosivity of fire effluents – Part 3: Dynamic decomposition method using a travelling furnace. 21 p.

ISO 11907-4 (1998) Plastics – Smoke generation – Determination of the corrosivity of fire effluents – Part 4: Dynamic decomposition method using a conical radiant heater. 22 p.

ISO 11997-1:2005 Paints and varnishes – Determination of resistance to cyclic corrosion conditions – Part 1: Wet (salt fog)/dry/humidity. 13 p.

ISO 11997-2:2000 Paints and varnishes – Determination of resistance to cyclic corrosion conditions – Part 2: Wet (salt fog)/dry/humidity/UV light. 5 p.

ISO 10062: 2006 Corrosion tests in artificial atmosphere at very low concentrations of polluting gas(es).

ISO 21207: 2004 Corrosion tests in artificial atmospheres – Accelerated corrosion tests involving alternate exposure to corrosion-promoting gases, neutral salt-spray and drying. 10 p.

SAE J2334 Laboratory Cyclic Corrosion Test (Cosmetic corrosion test). 2003.

---

Seuraavat testausmenetelmät ja niihin liittyvät ohjeet on tarkoitettu ei-hermeettisesti koteloitujen (kotelo tavallisesti muovia) komponenttien kosteusdentsiedon ja luotettavuuden testaamiseen.

JESD22-A100-A (January 1989). Test Method A100-A Cycled Temperature Humidity Bias Life Test. 6 p.

The Cycled Temperature Humidity Bias Life Test is performed for the purpose of evaluating the reliability of non-hermetic packaged solid-state devices in humid environments. It employs conditions of temperature cycling, humidity, and bias which accelerate the penetration of moisture through the external protective material (encapsulant or seal) or along the interface between the external protective material and the metallic conductors which pass through it.

The test condition consists of a temperature, relative humidity, and duration used in conjunction with an electrical bias configuration specific to the device. Cycled temperature from 30 °C to 65 °C, humidity 90...98 %, cycle time 12 hours, total test time 1008 hours.

EIA/JESD22-A101-B (April 1997). Test Method A101-B, Steady State Temperature Humidity Bias Life. 6 p.

The Steady-State Temperature Humidity Bias Life Test (85/85) is performed for the purpose of evaluating the reliability of non-hermetic packaged solid-state devices in humid environments. It employs conditions of temperature, humidity, and bias which accelerate the penetration of moisture through the external protective material (encapsulant or seal) or along the interface between the external protective material and the metallic conductors which pass through it. This revision enhances the ability to perform this test on a devices which cannot be biased to achieve very low power dissipation. Test conditions are 85 °C / 85 % RH, test time 1000 hours.

JESD22-A102-B (March 1991). Test Method A102-B Accelerated moisture resistance – unbiased autoclave. 3 p.

The test is performed for the purpose of evaluating the moisture resistance of non-hermetic packaged solid state devices. It employs severe conditions of pressure, humidity and temperature that accelerate the penetration of moisture through the external protective material (encapsulant or seal) or along the interface between the external protective material and the metallic conductors that pass through it. This test is **destructive**; it may \* be used for qualification, lot acceptance and as a product monitor. Test conditions are 121 °C / 100 % RH, test times are 24 h, 48 h, 96 h, 168 h, 240 h, 336 h.

JESD22-A110-B (February 1999) Test Method A110-B, Highly-Accelerated Temperature and Humidity Stress Test (HAST). JEDEC Solid State Technology Association. 11 p.

The test is performed for the purpose of evaluation the reliability of non-hermetic packaged solid-state devices in humid environments. It employs severe conditions of temperature, humidity, and bias which accelerate the penetration of moisture through the external protective material (encapsulant or seal) or along the interface between the external protective material and the metallic conductors which pass through it. The stress usually activates the same failure mechanisms as the “85/85” Steady-State Humidity Life Test (JEDEC Standard No. 22-A101-B) but in a much shorter time. Test conditions of HAST are 130 °C / 85 % RH, 96 hours or 110 °C / 85 % RH, 264 hours

JESD22-A112-A (November 1995) Test Method A112-A, Moisture-Induced Stress Sensitivity for Plastic Surface Mount Devices. 12 p.

The purpose of this test method is to identify the potential classification level of plastic Surface Mount Devices (SMDs) that are sensitive to moisture-induced stress so that they can be properly packaged, stored, and handled to avoid subsequent mechanical damage during the assembly solder reflow attachment and/or repair operation. This test method may be used to determine what classification level should be used for initial reliability qualification. Test conditions of moisture chamber are 85 °C / 85 % RH, 168 h, 85 °C / 60 % RH, 168 h, and 30 °C / 60 % RH, 6...192 h.

IPC/JEDEC J-STD-035 (May 1999). Acoustic Microscopy for Nonhermetic Encapsulated Electronic Components.

This method provides users with an acoustic microscopy process flow for detecting anomalies (delamination, cracks, mold component voids, etc.).

## **Liite 1**

### **Korroosion perusteita ja vikamekanismit**

# Korroosion perusteita ja vikamekanismit

## Sisältö

1	Korroosio, vesi ja kosteus .....	3
1.1	Happamuuskäsite .....	3
1.2	Metallien sähkökemiallinen ja galvaaninen jännitesarja .....	4
1.3	Korroosio kaasuissa .....	6
1.4	Veden absorboituminen materiaaleihin .....	7
1.5	Veden imeytyminen muoveihin .....	9
1.6	Materiaalien kosteudenläpäisevyys .....	14
1.7	Ilman suhteellinen kosteus .....	18
1.8	Kosteuden kondensoituminen pinnoille .....	20
1.9	Lämpötilan vaikutus kotelon ilmanvaihtoon .....	24
2	Korroosiotyypit ja vikamekanismit .....	26
2.1	Galvaaninen ja metalliparikorroosio .....	26
2.2	Yleinen korroosio .....	29
2.3	Hapettuminen kaasuympäristössä .....	29
2.4	Huokoskorroosio .....	29
2.5	Pistekorroosio .....	30
2.6	Rakokorroosio .....	31
2.7	Piilokorroosio .....	31
2.8	Sinkinkato ja tinakato .....	32
2.9	Lankamainen korroosio .....	32
2.10	Jännityskorroosio ja väsyminen .....	32
2.11	Pinnoitteiden jännitykset .....	33
2.12	Korroosiotuotteiden ryömiminen .....	34
2.13	Elektrolyyttinen korroosio ja ionien vaeltaminen (migraatio) .....	35
2.14	Hiertymiskorroosio, fretting .....	35
2.15	Metallien diffuusio ja korroosio .....	38
2.16	Välimetallit .....	39
2.17	Mikrobiologinen korroosio .....	40
2.18	Homeen kasvuedellytykset .....	42
2.19	Kosteuden ja geometrian vaikutus piirilevyn eristysresistanssiin .....	43
2.20	ESD-purkaukset ja korroosio .....	50
2.21	Virranahto (skin effect) ja korroosio .....	51
2.22	Lämpöpaukahtelu, popcorn-ilmiö .....	53
2.23	Materiaalien korrosiivisuuden testaaminen .....	53

3	Vesiliuokset ja pintajännitys .....	57
3.1	Ionisoituminen .....	57
3.2	Höyryn tiivistyminen nesteeksi.....	57
3.3	Pintajännitys.....	60
3.4	Pintajännitystasapaino kolmen faasin tapauksessa.....	61
3.5	Kapillaari-ilmiö .....	64
3.6	Vesiliuokset ja elektrolyytit .....	67
3.7	Vesiliuokset ja pintajännitys .....	69
3.8	Kondensoituminen .....	70
3.9	Vettä hylkivät ja läpäisevät materiaalit.....	71
4	Metallipintojen ilmiöitä.....	74
4.1	Dendriitti .....	74
4.2	Säikeet (whiskers).....	75
4.3	Tinarutto.....	77
4.4	Elektromigraatio.....	77
5	Korroosion kulkuun vaikuttavia tekijöitä .....	78
6	Pintojen kontaminaatio ja ilman epäpuhtaudet .....	81
	Liitteen 1 kirjallisuusviitteet.....	84



# 1 Korroosio, vesi ja kosteus

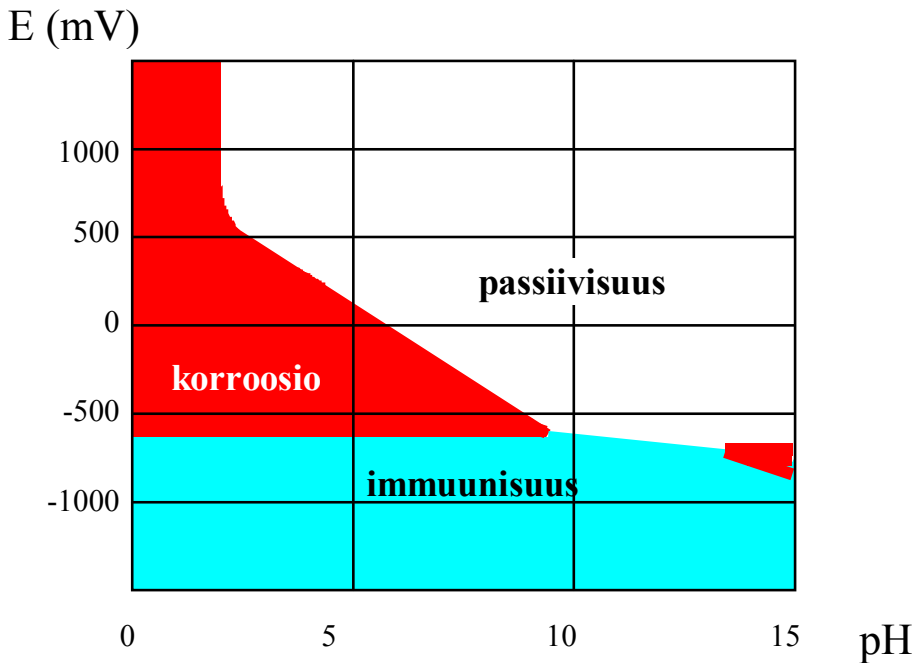
## 1.1 Happamuuskäsite

Vesiliuosten happamuudella on suuri vaikutus siihen, minkä tyyppisiä reaktioita neste-metalli rajapinnoissa tapahtuu. Toisaalta happamuuden avulla voidaan kuvata korroosion kannalta sitä tilaa, missä jokin metallipinta on. Onko tila korroosiota edistävä, syöpyvä, muodostuuko tilassa pinnalle syöpymistuotteita, jotka osittain suojaavat pintaa (passiivitila) vai onko tila inertti (immuunitila), jossa metallin korroosiota ei tapahdu.

Liuoksen happamuus ja emäksisyys ilmaistaan sen vety-ionikonsentraation suuruuden avulla. Mitä suurempi konsentraatio on, sitä happamempi liuos on. Vetyioni-konsentraatio ilmaistaan yleensä pH-luvulla. Liuoksen pH on liuoksen vetyionikonsentraation  $C_{H^+}$  logaritmin vastaluku.

Kaavana: 
$$pH = -\log C_{H^+}$$

Liuoksen sanotaan olevan hapan, kun sen pH on alle 7 ja emäksisen, kun pH on yli 7. Puhtaan veden pH on 7. Sadevesi on siihen imeytyneen hiilidioksidin takia normaalisti hiukan hapanta, koska ilman hiilidioksidi muodostaa vedessä hiilihappoa. Astianpesukoneissa käytettävän pesuaineen pH on yli 10, ts. pesuaineliuos on hyvin emäksistä. Näin emäksiseen veteen liukenee jo alumiinikin helposti.



Kuva 1.1. Raudan yksinkertaistettu Pourbaix-diagrammi [Tunturi 1988].

Pourbaix-diagrammi eli **pH-potentiaalidiagrammi** on metallin sähkökemiallinen tasapainopiirros (kuva 1.1). Nollapotentialin kohta on vetyelektrodin potentiaali, jolle on sovittu arvo 0 V. Tähän vertaamalla määritetään metallin (korroosioreaktion) potentiaali. Kun potentiaali piirretään mittausliuoksen pH:n funktiona saadaan Pourbaix-diagrammi. Kun piirrokseseen merkitään vain metallin korroosio- (metalli reagoi ja syöpyy), immuunisuus- (metalli ei reagoi) ja passiivisuusalueet (metalli on reagoinut ja pinnalle muodostunut reaktiotuote suojaa metallia) saadaan piirroksesta havainnollisempi. Esim. muuttamalla metallin potentiaalia ulkoisen jännitelähteen avulla voidaan metallipinnan käyttäytyminen siirtää korroosioalueelta passiivi- tai immuunisuusalueelle. Tätä käytetään hyväksi esim. maakaasuputkilinjojen ja laivojen sähköisessä suojauksessa (katodinen ja anodinen suojaus) [Mattsson 1996, Pp. 95–103].

## 1.2 Metallien sähkökemiallinen ja galvaaninen jännitesarja

Metallien sähkökemiallinen jännitesarja tarkoittaa puhtaiden metallien jännitteitä suhteessa standardivetyelektrodiin. Jännitesarja saadaan, kun eri metallien jännitteet mitataan samanlaisessa suolaliuoksessa standardivetyelektrodiin nähden. Sähkökemiallinen jännitesarja luokittelee virheettömien, puhtaiden, täysin ilman oksidi- ja passiivikerrosta olevien metallien “jalouden” [*Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely*, osa 1, 1996, s. 65]. Kun eri metallit pannaan yhtä aikaa samaan liuokseen, syntyy niiden välille liuoksessa jännite-ero, koska metallit ovat jaloustasultaan erilaisia. Tähän perustuu mm. akkujen kyky varata ja purkaa sähköä. Korroosion kannalta sähkökemiallinen jännitesarja ei ole mielenkiintoinen, koska se ei vastaa luonnossa esiintyviä olosuhteita ja metallien järjestys poikkeaa todellisista metalleista ja olosuhteista.

Todellisten metallien jaloustasojen järjestys riippuu mm. metallien koostumuksesta, pinnan passivoitumisesta ja liuoksista, jotka vaikuttavat metallien pinnoilla. Esim. kromin, kromiteräksen ( $\text{Cr} > 12\%$ ), alumiinin ja titaanin pinnalle muodostuu ilmassa nopeasti passiivikerros (oksidikerros), jolloin niiden jaloustasojen järjestys on toinen kuin puhtaiden metallien sähkökemiallisessa jännitesarjassa.

Todellisista metalleista, jotka ovat olleet kosketuksissa ilman kanssa ja jotka ovat todellisissa liuoksissa, mitattuja jännitesarjoja nimitetään galvaanisiksi jännitesarjoiksi. Eniten käytetty galvaaninen jännitesarja on ns. merivesisarja. Merivesi on pääasiassa NaCl:a sisältävä liuos ja NaCl on yleisin ja ikävin kaikista korroosiota aiheuttavista aineista. NaCl:a löytyy myös hiestä, mikä merkitsee sitä, että kaikissa ihmisen koskettelemisissa pinnoissa on myös suolaa.

Arvioitaessa eri metallien tai niiden seosten keskinäisiä jalouseroja, ne olisi upotettava samaan nesteeseen kuin todellisissa korroosio-olosuhteissa, ennen kuin voidaan sanoa, mikä niiden jalousjärjestys on ao. tilassa. Myös metallien muokaus ja seossuhteiden erot sekä erilaiset pintakäsittelyt vaikuttavat sähkökemialliseen potentiaaliin, jonka vuoksi saman metallin pinnan eri kohdilla voi olla erilaiset potentiaalit. Tämä epähomogeenisuus lisää korroosioalttiutta käytännön olosuhteissa.

Taulukossa 1.1 on esitetty eräiden metallien galvaaninen jännitesarja merivedessä. Mitä positiivisempi metallin potentiaali on sitä jalompi se on.

*Taulukko 1.1. Metallien galvaaninen jännitesarja merivedessä, 25 °C, pH 7,5, potentiaali (mV) standardivetyelektrodiin nähden.*

Metalli	Potentiaali (mV)	Jaloustaste
Kulta	+420	Jaloin
Grafiitti	+200	
Hopea	+190	
CrNi-teräs 18/8, passiivitulassa	+90	
Nikkeli 99 % Ni	+46	
Kupari	+20	
Messinki Ms63	(+13)	
Monel K	+12	
Titaani	(-111)	
Tina 98 % Sn	-260	
CrNi-teräs 18/8, aktiivitulassa	-290	
Teräs + kovakromi 50 µm	-291	
Lyijy 99,9 % Pb	-310	
Teräs	-460	
Kadmium anodimetalli	-490	
Alumiini 99,5 % Al	-510	
Teräs + sinkki (syaniidinen) 100 µm	-810	
Sinkki 98,5 % Zn	-860	
Magnesium	-1 360	Epäjalo

Lähde: [Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely, osa 1, 1996, s. 65]

Galvaaninen kenno muodostuu liuokseen, elektrolyyttiin, upotetuista metalleista, joista epäjalompi toimii anodina ja jalompi katodina. Anodilla tapahtuu hapettuminen (syöpyy) ja katodilla tapahtuu pelkistyminen (pinnalle kertyy metallia). Näin ollen epäjalompi metalli (anodi) syöpyy korroosioprosessissa.

Galvaanisen jännitesarjan avulla näkee helposti, mitä tapahtuu, kun kaksi erilaista metallia joutuvat kontaktiin toistensa kanssa. Joidenkin metallien kohdalla on mainittu kaksi eri vaihtoehtoa: aktiivitilan (korroosiotilan) ja passiivitilan potentiaali. Nämä metallit kykenevät muodostamaan pinnalleen tiiviin passiivikerroksen. Yleensä passiivikerrokseksi käsitetään metallin pinnalle ilmassa syntyvä oksidikerros. Aktiivitilassa metalli syöpyy. Aktiivitila syntyy yleensä kapeissa raoissa, joista happi ja siis myös metallin oksidikerros vähitellen häviää korroosioreaktioiden vaikutuksesta. Tämä johtaa metallin voimakkaaseen paikalliseen syöpymiseen, joka on erittäin huonosti havaittavissa ja on siksi vaarallinen luonteeltaan (ks. liite 1, kohta 2.8 *Rakokorroosio*).

Esimerkkinä korroosion edellytysten syntymisestä mainittakoon, että teräksen ruostumiseen tarvitaan samanaikaisesti sekä happea että vettä. Rautanaula ei juurikaan ruostu tilassa, jossa suhteellinen kosteus on alle 40 % RH. Vaikka happea on, ei korroosio etene, koska pinnalla ei ole kondensoitunutta vettä, jossa korroosioprosessi voisi tapahtua. Vastaavasti lämpöpatteri ei ruostu sisäpuolelta, vaikka se on hiiliterästä ja se on täynnä vettä. Vettä on, mutta kun siinä ei ole happea, ei korroosio etene.

### 1.3 Korroosio kaasuissa

Metallin pinnalle muodostuu ilmassa hapen vaikutuksesta oksidikerros. Joillakin metalleilla oksidikerros on hyvin tiivis ja suojaa metallia enemmältä korroosiolta, esim. alumiini on tällainen metalli. Joillakin metalleilla oksidikerros on huokoinen eikä suojaa metallia, esim. rauta on tällainen metalli. Tina ja lyijy hapestuvat suhteellisen alhaisessa lämpötilassa, mikä on esim. komponenttien liitosjohdinten juottuvuusominaisuuksien kannalta vahingollista. Juotostinojen (SnPb) rappeutuminen kuivassa ilmassa on merkittävän nopeaa jo 100 °C lämpötilassa, mikä puolestaan rajoittaa tuotteiden elinikää oleellisesti kuumissa johdoliitoksissa.

Ilmassa olevat korrodoivat kaasut eivät ilman veden (kosteuden) läsnäoloa pysty juurikaan reagoimaan metallipinnan kanssa, esim. alumiini kestää erinomaisesti absoluuttisen kuivaa rikkidioksidia! Vasta korotetuissa lämpötiloissa, > 300 °C, kaasut alkavat reagoida suoraan metallien kanssa. Tämä selittää osaltaan, miksi laitteiden sisätilojen ollessa kuivat korkean käyttölämpötilan vuoksi, korroosio voi olla hidasta. Pienikin määrä kosteutta muuttaa korrodoivat kaasut joko syövyttäviksi hapoiksi (rikin oksidit, typen oksidit, etikkahappo, kloorikaasu) tai emäksiksi (ammoniakki, amiinit). Lisäksi korrodoivat kaasut voivat lisätä toistensa aggressii-

visuutta, esim. jos ilmassa on samanaikaisesti NO<sub>x</sub> ja SO<sub>x</sub> sekä HCl:a, voi veden läsnä ollessa syntyä kuningasvettä, joka syövyttää useimpia materiaaleja.

#### 1.4 Veden absorboituminen materiaaleihin

Eri materiaalit absorboivat, ts. imevät sisään, eri tavoin vettä. Metalleilla vesi esiintyy pinnalle muodostuvana kondenssivetenä – vesikerroksena, jossa korroosioilmiöt tapahtuvat. Jos vesi ei mitenkään reagoi metallipinnan kanssa ja ai-noastaan tarttuu pintaan, ilmiötä kutsutaan nimellä adsorptio. Adsorboitunut vesi haihtuu pois lämpötilan kohotessa, mitä nimitetään desorptioksi.

Muoveihin vettä absorboituu yleensä 0...0,5 % niiden kuivapainosta (epoksilla 0,08...0,15 %). Poikkeuksena ovat selluloosapohjaiset muovit ja polyamidit (nai-lonit). Nailon PA6 voi sitoa itseensä vettä maksimissaan n. 10 % veteen upotettuna.

[Kosbar & Gelorome 1997] mukaan elektroniikassa käytetyin piirilevymateriaali FR-4 absorboi vettä 0,3...2,2 % painostaan. [Rudra & Jennings 1994, Vahter 1999] antaa FR-4:n vesiabsorptiolle arvon 0,85 % lämpötilassa 50 °C ja ilman suhteellisella kosteudella 60 %.

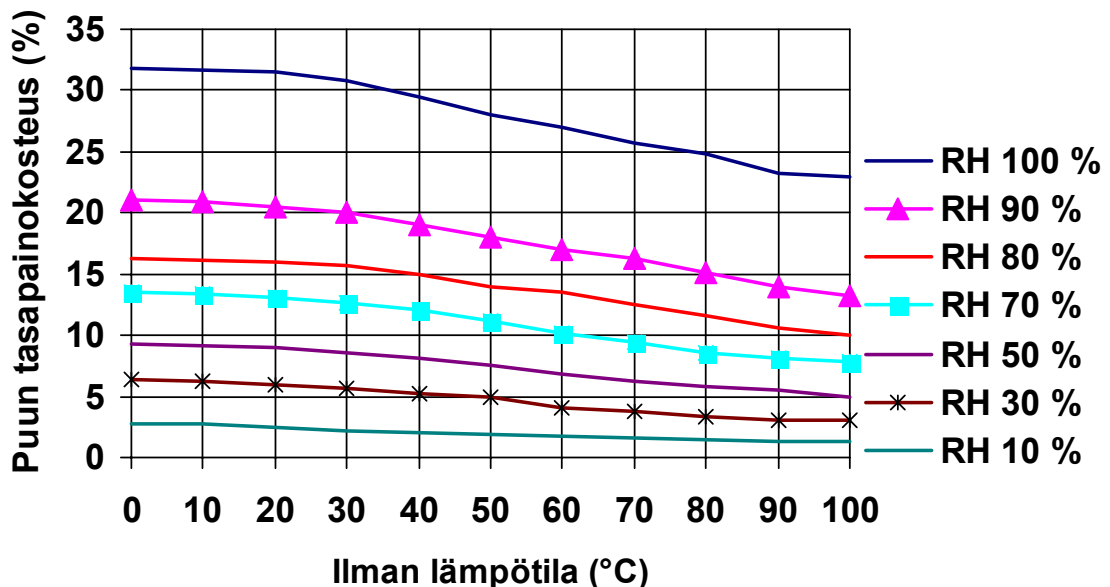
*Taulukko 1.2. Veden absorptio kaksikomponenttiseen epoksihartsiin lämpötilassa 100 °C.*

Aika (h)	Veden määrä (paino %)
2	0,02...0,09
4	0,08...0,17
6	0,11...0,22
8	0,13...0,25

Lähteen [Palmén 1990] mukaan (taulukko 1.2) kaksikomponenttiseen epoksi-hartsiin absorboituu vettä 23 °C lämpötilassa noin 0,1 % painosta ja lämpötilassa 100 °C noin 0,2 % painosta kahdeksan tunnin veteen upotuksen jälkeen.

Puumateriaaleihin, kartonkeihin ja papereihin voi absorboitua vettä 10...30 % niiden painosta, jos ilman suhteellinen kosteus on yli 70 %. Puuhun absorboituvan veden määrä laskee hieman lämpötilan noustessa, jos ilman suhteellinen kosteus on vakio (kuva 1.2).

Kuvan 1.2 mukaan puuhun absorboituvan veden määrä laskee selvästi lämpötilan noustessa, vaikka suhteellinen kosteus pidetään vakiona. Oleellista on tiedostaa se, että materiaaleihin absorboituvan veden määrä on riippuvainen ensisijaisesti ilman suhteellisen kosteuden arvosta (% RH) eikä ilman absoluuttisesta vesipitoisuudesta ( $\text{g}/\text{m}^3$ ). Korkeammissa lämpötiloissa materiaaleihin absorboituneesta vedestä pienempi osa on nesteinä materiaalin kapillaariraoissa ja suurempi osa vesihöyryinä, jolloin materiaaliin ei mahdu yhtä paljon vettä kuin alemmissa lämpötiloissa.



Kuva 1.2. Puun kosteustasapainoarvo ilman suhteellisen kosteuden (RH) ja lämpötilan funktiona [MET 17/80].

Aaltopahvimateriaalit imevät vettä ilmasta noin 15...20 % painostaan, kun suhteellinen kosteus on 100 % huoneen lämpötilan seutuvilla. Veden määrä on lähes riippumaton lämpötilasta alueella 5...40 °C. Kosteudessa 50 % RH vesipitoisuus on noin 8 % ja kosteudessa 90 % noin 16 % pahvin painosta. [Paronen & Toroi 1959].

Näin ollen veden absorboitumisen kannalta tärkeintä on esim. tuotteita pakattaessa, että pakkaustilan suhteellinen kosteus on mahdollisimman alhainen, jolloin pakkausmateriaaleihin ei jää paljoa vettä olipa lämpötila mitä tahansa. Ilmassa olevan veden absoluuttinen määrä ( $\text{g}/\text{m}^3$ ) vaikuttaa lähinnä pakkaukseen jäävän ilmatilan kautta veden kertymiseen. Kun ilmatila on suurehko verrattuna kappaleen ja pakkausmateriaalien kokoon, nousee pakkauksen sisäosien suhteellinen kosteus korkeaksi, kun lämpötila laskee, jolloin pakkauksen ilmatiloissa oleva kosteus absorboituu pakkausmateriaaleihin ja ääritapauksessa myös kondensoituu laitteen pinnoille aiheuttaen korroosioriskin.

Kosteustestauksessa on oleellista varmistaa, että nimenomaan ilman suhteellinen kosteus on kaikissa lämpötiloissa halutun suuruinen. Jos alemman lämpötilan ilmaa lämmitetään korkeampaan lämpötilaan, laskee suhteellinen kosteus väijäämättä, eikä kosteudella ole enää sitä korrosiivista ja eristeitä huonontavaa vaikutusta, mitä on tavoiteltu. Kosteustestistä tulee tällöin kuiva lämpötesti, jossa viikaantumismekanismit ovat toisenlaisia.

## 1.5 Veden imeytyminen muoveihin

Ilmassa oleva vesihöyry imeytyy melko nopeasti lähes kaikkiin muovimateriaaleihin. Muoveihin vettä absorboituu yleensä 0...0,5 % (epoksilla 0,08...0,15 %). Poikkeuksena on selluloosapohjaiset muovit ja polyamidit (nailonit). Nailon PA6 voi sitoa itseensä vettä maksimissaan n. 10 % veteen upotettuna. Mikäli muovi itsessään ei juurikaan absorboi vettä, lisää lasikuitulujite veden absorptiota. Jos muovi absorboi runsaasti vettä (PA6 10 %), lasikuitulujite vähentää veden absorptiota [Törmälä et al. 1983]. Taulukossa 1.3 on eräiden muovien vesipitoisuuksien arvoja, kun muovit ovat olleet kosteassa ilmassa.

Piirilevy on yleensä laminoitua lasikuituvahvistettua epoksia. Periaatteessa levyn reunan kautta voi vesi imeytyä levyyn lasikuituja pitkin. Vaaraa voi kuitenkin pitää vain teoreettisena, sillä levyssä ei saa olla virheitä (epätasaisuutta, ilmakuplia jne.), mikä takaa sen, että epoksihartsin ja lasikuidun välinen rajapinta on tiivis. Veden kulkeutuminen levyn sisäosiin on siten lähes mahdotonta. Vasta yli 70 % suhteellisella kosteudella alkaa vettä jäädä epoksihartsiin. Hartsiin tunkeutuva vesi heikentää lasikuidun ja epoksin välistä sidosta, mikä voi johtaa koko laminaattirakenteen hajoamiseen [Lefebvre et al. 1991].

Absorboituneen veden määrä muoveissa annetaan usein ISO 62 mukaisesti mitattuna lämpötilassa 23 °C. Mittausmenetelmällä saadaan joko absorptio määrättyä aikana (esim. 24 h) ja/tai absorptio kylläisyysarvo, jonka määrittäminen voi kestää viikkoja. Absorptio kylläisyysarvo on usein moninkertainen lyhytaikaiseen absorptioarvoon nähden, jonka vuoksi on aiheellista varmistaa, mitä absorptioarvoa spesifikaatiossa tarkoitetaan. Samaten mittauslämpötila vaikuttaa tuloksiin.

Taulukko 1.3. Veden imeytyminen ilmasta muoveihin.

Muovi	Muovin vesipitoisuus % (lähde 1)	Muovin vesipitoisuus % (lähde 2)
fenoli/formaldehydi/asbesti (bakeliitti)	0,1–0,3	0,1–0,5
urea/formaldehydi/alfa-sellu	0,4–1,3	0,4–0,8
melamiini/formaldehydi/asbesti	0,1–0,3	0,08–0,14
epoksi		0,08–0,15
epoksi/lasikuitukatko		0,05–0,20
polyesteri(tyydyttämätön)	0,2–0,3	0,06–0,28
polyesteri(tyydyttämätön)/lasikuitumatto	0,1–1,0	0,05–0,50
selluloosa-asetaatii/-butyraatti	1,3–2,1	0,9–2,2
polystyreeni	0,03–0,05	0,03–0,1
akryyliniiriili/butadieeni/styreeni ABS	0,05–0,3	0,20–0,45
HD-polyeteeni HDPE	alle 0,01	0,01
polypropeeni PP	0,1	0,01–0,03 (0,17 upotus) <sup>5)</sup>
polymetymetakrylaatti PMMA (pleksilasi)		0,15
pehmitetty PVC	0,02	0,15–0,75
kova PVC	0,01	0,07–0,4
PA 6 (nailon 6)	2,5–3,0 3,5 <sup>4)</sup> (10 upotus)	
PA 6 (nailon 6)/ 30 % lasikuitua	2 <sup>4)</sup>	
PA66 (nailon 66)	2,5–3,0 n. 8 (upotus) <sup>4)</sup>	1,1–1,5
PA66/30 % lasikuitua		1,8 <sup>4)</sup>
PA66/35 % lasikuitua		0,9
PA 12 (nailon 12)	0,5–0,9; 0,19 <sup>4)</sup>	0,25
PA12/30 % lasikuitua		0,07
polykarbonaatti PC		0,15–0,18
PC/10–40 % lasikuitua		0,07–0,20
PC/ABS blend Bayblend T45	0,2 <sup>3)</sup> 0,7 (upotus) <sup>3)</sup>	
polyasetaaali POM		0,22–0,25
polyesteri (tyydytetty) PETP		0,02
PETP/18 % lasikuitua		0,02
polyfenyleenioksidi PPO	0,07	0,066
PPO/20–30 % lasikuitua		0,06
polytetrafluorieteeni PTFE (teflon)	0	0

1) [Pohjanpalo 1972]

2) [Törmälä et al. 1983]

3) Bayer Info

4) Muovit konstruktioaerialina, INSKO 176-86

5) Hostalen PP. Info



## ISO 62 mukainen veden absorptio mittaustapa

Veden imeytymisnopeutta kuvastaa hyvin standardissa ISO 62 Plastics – Determination of water absorption esitetty testausmenetelmä, jossa testausajat ovat vain yksi tai muutama vuorokausi. Testattava materiaali on näissä testeissä tyypillisesti neliön muotoinen joko 1 mm tai 2 mm paksu pala muovilevyä, jonka sivun pituuden on oltava ainakin epähomogeenisilla materiaaleilla (esim. lasikuituvahvisteinen epoksilevy, piirilevymateriaali) suurempi kuin 100 kertaa levyn paksuus. Testi antaa tulokseksi levyn pintaa vasten kohtisuoraan diffundoituvan veden määrän ja sitä voidaan käyttää muovien lasisiirtymälämpötilaa pienemmissä lämpötiloissa diffuusiokertoimen määrittämiseen.

ISO 62:ssa on neljä absorptiotestiä, joissa näytteet kuivataan ennen testiä 50 °C lämpötilassa 24 h ajan ja punnitaan paino ennen ja jälkeen kuivauksen. Kuivausta toistetaan 24 h jaksoin, kunnes massa ei enää muutu yli 0,1 mg. Näin saatu jäännösmassa on näytteen alkumassa ( $m_1$ ):

### ***Menetelmä 1***

Näytteet upotetaan 23 °C tislattuun veteen aluksi 24 h ajaksi. Näytteet punnitaan testin jälkeen ( $m_2$ ) ja painoeroa lasketaan absorboituneen veden määrä. Materiaalin kyllästymiskosteus saadaan toistamalla tämän jälkeen veteen upotus ja punnitus aina 24 h, 48 h, 96 h, 192 h, jne. ajankohdilla, kunnes näytteiden painon muutos on enintään 0,1 mg verrattaessa viimeistä ( $m_2$ ) edelliseen mittaukseen. Massan muutos ilmoitetaan prosentteina alkupainosta:

$$c = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1.1)$$

Testausaika kasvaa materiaalin paksuuden neliössä (yhtälö 1.3), joten suositeltavaa on käyttää esim. 1 mm paksuista levyä, jolla tavanomaisilla materiaaleilla pääsee noin viikon – parin testausaikaan.

### ***Menetelmä 2***

Näytteet upotetaan 100 °C (kiehuva) tislattuun veteen 30 min ajaksi. Näytteet punnitaan upotuksen jälkeen ( $m_2$ ). Kyllästymiskosteus saadaan toistamalla upotus 30 min jaksoin, kunnes todetaan punnituksissa ettei paino enää kasva yli 0,1 mg.

Menetelmä 2 antaa veden absorptioin noin vuorokauden – kahden testausajassa, mutta veden absorptio vastaa tällöin lämpötilaa 100 °C, jossa absorptio voi olla moninkertainen verrattuna lämpötilaan 23 °C.

### ***Menetelmä 3***

Jos tiedetään tutkittavan materiaalin sisältävän veteen liukenevia aineita, kuivataan näytteet menetelmien 1 ja 2 upotuskokeiden jälkeen, kuten ennen testejä ja punnitaan massa. Jos näin saatu massa ( $m_3$ ) on pienempi kuin alkuperäinen kuivauksen jälkeinen massa, pidetään tästä laskettua massaerotusta veteen liuenneen aineen määränä ja otetaan huomioon absorptiota laskettaessa yhtälön (1.2) mukaisesti.

$$c = \frac{m_2 - m_3}{m_1} \times 100 \quad (1.2)$$

### ***Menetelmä 4***

Näytteet sijoitetaan kuivauksen jälkeen aluksi 24 h ajaksi tilaan, jonka ilman lämpötila on 23 °C ja suhteellinen kosteus 50 % ja punnitaan tämän jälkeen ( $m_2$ ). Materiaalin kyllästymiskosteus saadaan toistamalla tämän jälkeen punnitus aina 24 h, 48 h, 96 h, 192 h jne. ajankohdilla, kunnes näytteiden painon muutos on enintään 0,1 mg verrattaessa viimeistä edelliseen mittaukseen.

Menetelmä 4 antaa olosuhtetta 23 °C / 50 % RH vastaavan kosteuden absorptioin. Vaihtelemalla lämpötilaa ja suhteellista kosteutta, on mahdollista mitata näin materiaalin todellinen veden absorptio eri olosuhteissa, jotka vastaavat todellisia käytössä vallitsevia olosuhteita. Menetelmä vaatii kuitenkin kohtalaisen paljon aikaa.

ISO 62:ssa opastetaan edelleen laskemaan muovimateriaalien veden absorptioin diffuusio kertoimet perustuen siihen olettamukseen, että muovien lasisiirtymälämpötiloja alhaisemmissa lämpötiloissa veden absorptio noudattaa hyvin Fickin lakia.

Muovien tyypillinen diffuusio kertoimen arvo lämpötilassa 23 °C on noin  $10^{-6}$  mm<sup>2</sup>/s, jonka perusteella 1 mm paksuinen testilevy saavuttaa 70 % kyllästymiskosteudestaan noin vuorokaudessa ( $t_{70} = 10^5$  s) ja itse kyllästymiskosteuden vajaan viikossa. Diffuusio kerroin saadaan yhtälöstä (1.3)

$$D = \frac{d^2}{\pi^2 t_{70}}, \quad (1.3)$$

missä

D on veden diffuusiokerroin muovissa ( $\text{mm}^2/\text{s}$ )

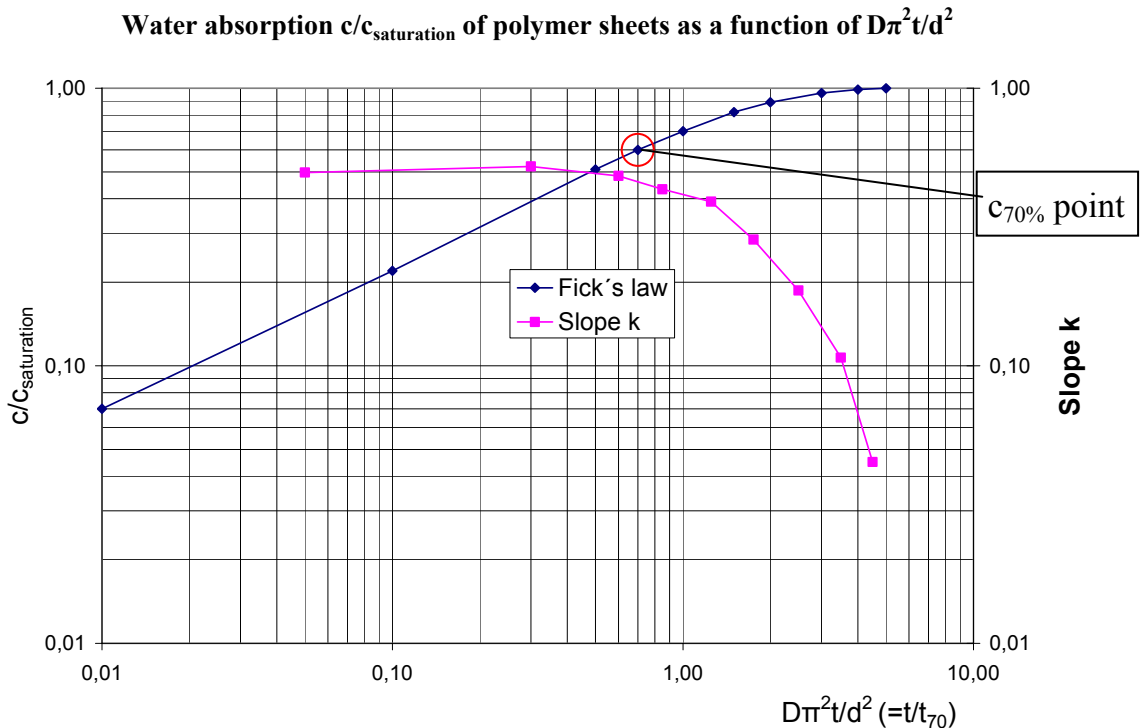
d on testilevyn paksuus (mm)

$t_{70}$  on aika (s), jona testilevyn kosteus nousee 70 % tasolle sen kyllästymiskosteudesta.

Kun oletettiin Fickin lain olevan voimassa, voidaan kyllästymiskosteus saada tietien perusteella mitatusta 70 % kosteudesta:

$$c_s = \frac{c_{70\%}}{0,7} \quad (1.4)$$

Kuvaan 1.3 on piirretty ISO 62:n taulukossa 1 esitetty levymäisen näytteen teoreettinen Fickin lain mukainen veden absorptio. Kuvan 1.3 aika-akseli on itse asiassa veteen upotusajan suhde aikaan, jona veden absorptio saavuttaa 70 % kyllästymisarvostaan. Kuvaan on piirretty myös absorptiokäyrän kulmakerroin k, joka on  $\approx 0,50$ , kun  $c \leq 0,51 \cdot c_s$ , tämän jälkeen kulmakerroin laskee alle 0,5.



*Kuva 1.3. Fickin lain mukainen veden absorptiokäyrä (ISO 62).*

## 1.6 Materiaalien kosteudenläpäisevyys

Materiaalien kosteuden (vesihöyryn) läpäisevyys on elektroniikassa tärkeä ominaisuus etenkin komponenttien pakkauksissa, vesitiiviiksi tarkoitetuissa laitteissa ja kaikenlaisissa kuljetuspakkauksissa.

Kuvaan 1.4 on piirretty suuruusluokkatiedot komponenttien koteloissa käytettyjen materiaalien veden läpäisevyydestä. Kyseisissä artikkeleissa [Traeger 1976 ja 1977, Schneider 1988] sekä [Palmén 1990] on tarkasteltu ei-metallisten materiaalien kelpoisuutta hybridipiirien hermeettisiksi pakkauksiksi. Kuten kuvasta voidaan päätellä, muoveilla kestää vain muutamia tunteja tai viikkoja, jotta vesi läpäisee millimetrin paksuisen kerroksen.

Traegerin artikkelissa annetaan seuraava Jonesin [1969] ja Kassen [1974] kehittämä yhtälö (1.5) orgaanisten tiivisteiden kosteuden läpäisevyydelle.

$$t = \frac{V \cdot L}{P \cdot A \cdot R \cdot T} \ln \left[ \frac{p_o - p_1}{p_o - p_2} \right], \quad (1.5)$$

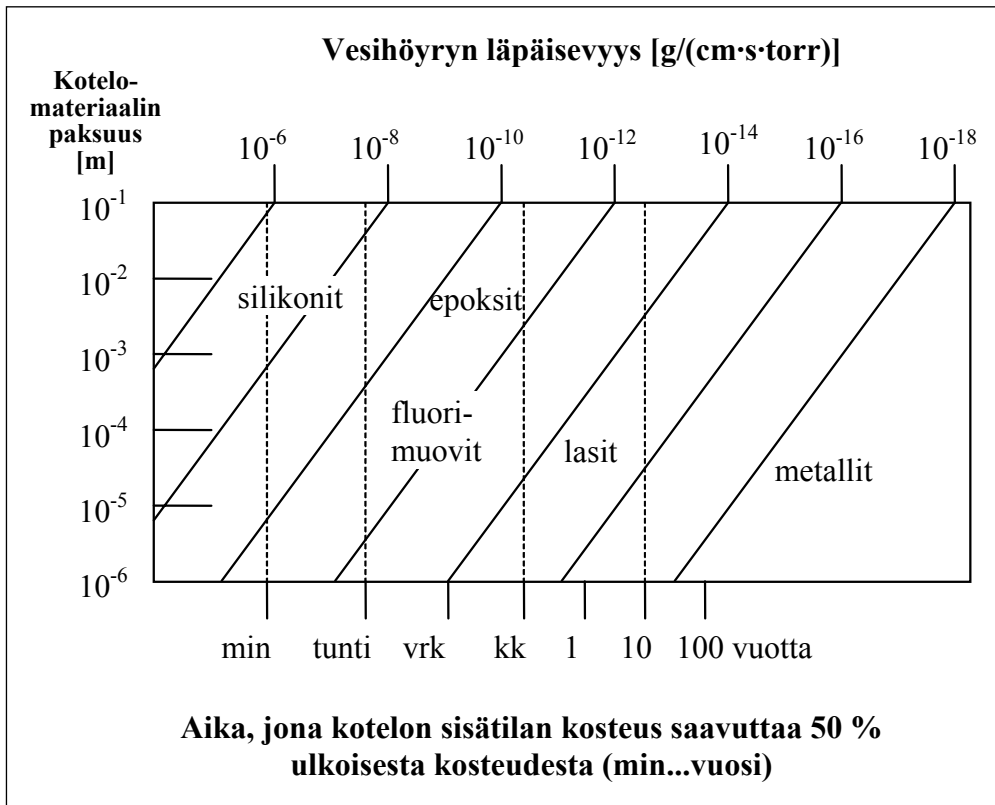
missä

- t on aika, jolloin osapaine  $p_2$  saavutetaan (s)
- V on kotelon vapaa sisätilavuus ( $\text{cm}^3$ )
- L on diffuusiotien pituus (cm)
- P on tiivistemateriaalin veden läpäisevyys (permeabiliteetti) ( $\text{g}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{torr}$ )
- A on tiivisteiden poikkipinta-ala ( $\text{cm}^2$ )
- R on kaasuvakio ( $3\,465 \text{ Torr cm}^3/\text{K g}_{\text{H}_2\text{O}}$ )
- T on lämpötila (K)
- K on Kelvin
- $p_o$  on ulkotilan vesihöyryn osapaine (Torr)
- $p_1$  on kotelon alkutilan vesihöyryn osapaine (Torr)
- $p_2$  on kotelon lopputilan vesihöyryn osapaine (Torr).

Yhtälö (1.5) antaa kosteuden läpäisevyydelle vain suuruusluokkakuvan, koska materiaalien ominaisuuksia ei yleensä tunneta kovin hyvin.

Todella hermeettisiä pakkauksia ja niiden saumoja voidaan valmistaa vain metalleista, lasista ja keraameista. Laitekotelona käytetty metallikin voi olla huokoista ja läpäistä ilmaa ja vettä kuin seula, esim. huokoiseksi jäänyt painevalettu alumiini ei ole vesitiivis. Hyvälaatuinenkin muovi läpäisee aina jonkin verran vettä.

Veden läpäisevyydestä huolimatta komponenttien hyvät muovikotelot toimivat hyvin myös korkeaa luotettavuutta vaativissa kohteissa.



Kuva 1.4. Kotelomateriaalien veden läpäisevyys [Traeger 1976 ja 1977, Schneider 1988].

Komponenttien koteloiden hermeettisyyden rajana on pidetty arvoa 0,01 Pa cm<sup>3</sup>/s (10<sup>-7</sup> bar cm<sup>3</sup>/s), joka ei kuitenkaan ole riittävä, koska tällöin esim. ympäristön kosteudella 80 % RH kotelon sisätilan kosteus saavuttaa jo 100 vrk aikana kastepistelämpötilan 0 °C [Schneider 1988].

IEC 60068-2-17 luokittelee vuodot suuriin ja pieniin käyttäen rajana 1 Pa cm<sup>3</sup>/s (10<sup>-5</sup> bar cm<sup>3</sup>/s). Pienten vuotojen (hermeettiset kotelot) testaamiseen IEC-standardissa käytetään menetelmää Qk, jossa indikaattorikaasuna on helium, jonka vuoto todetaan massaspektrometrillä. IEC:n testausvaatimukset luokittelevat tiiviydet alle 0,1 cm<sup>3</sup> tilavuuksilla vuotoihin välillä 10<sup>-1</sup>...10<sup>-5</sup> Pa cm<sup>3</sup>/s.

Elektroniikassa etenkin muoveja käytetään kaikissa rakenneosissa ja komponenteissa. Kuljetuspakkauksissa muoveja käytetään lähinnä kosteus- ja likaantumissuojana. Tässä käytössä muovien vesihöyryn läpäisevyyden alhaisuus on yksi tärkeistä ominaisuuksista. Taulukkoon 1.4 on koottu tietoja muutamien perusmuovimateriaalien vesihöyryn ja kaasun läpäisevyydestä. Huomattakoon, että vesihöyryn läpäisevyys on riippumaton paine-erosta kalvon eri puolilla.

*Taulukko 1.4. Muovien vesihöyryn ja kaasun läpäisevyyksiä [Plastics 1995].*

Materiaali	Vesihöyryn läpäisevyys (38 °C, 90 % RH)	Hapen läpäisykerroin (23 °C, 0 % RH)
	(g·mm/m <sup>2</sup> ·vrk)	(cm <sup>3</sup> ·mm/m <sup>2</sup> ·vrk atm)
polyvinylideenikloridi (PVDC)	0,01...0,08	0,0152...0,2533
polyklooritrifluorieteeni (PCTFE)	0,015	4,458
orientoitu polypropeeni	0,16	44,58
polypropeeni	0,26	82,07
orientoitu polyetyleenitereftalaatti (PET)	0,8	1,621
polyvinyylidikloridi (PVC)	0,88	3,141
nailon MXD6	1,1	0,2533
nailon 66	1,5	2,027
nailon 6	4,3	2,027
etyleeni-vinyylialkoholi-kopolymeeripohjaiset materiaalit (EVOH)	1,3...3,4	0,0041...0,0608
polyvinyylialkoholi	750	0,0025
nitriilihartsit	1,6	0,304
sellofaani	137	0,4458

Lähde: [Plastics 1995] viite Food Contact Polymeric Materials, review report. RARPA Technology Ltd, 1992. ISSN 0889-3144.

Kaasujen ja höyryjen kulkeutuminen kalvomateriaalien läpi [Plastics, 1995 s. vi] tapahtuu kolmessa vaiheessa: liukenemisena läpäistävään materiaaliin, liuenneiden aineiden diffundoitumisena materiaalin läpi pitoisuuserojen vaikutuksesta ja sitten läpi päässeen aineksen haihtumisena materiaalin pinnalta toisella puolen olevaan tilaan. Aineiden läpäisyä voidaan kuvata Fickin ensimmäisellä lailla, jonka mukaan läpäisevän aineksen (kaasu) tilavuus ( $V$ ) on suoraan verrannollinen kalvon pinta-alaan ( $A$ ), kaasun osapaineen eroon ( $p$ ) kalvon eri puolilla ja aikaan ( $t$ ) sekä kääntäen verrannollinen kalvon paksuuteen ( $s$ ), jos kalvo on homogeeninen läpäisy-suunnassa.

$$V = P \cdot \frac{A \cdot p \cdot t}{s} \quad (1.6)$$

Kerroin  $P$ , joka edustaa Fickin ensimmäistä lakia, yhtälössä (1.6) on kaasun läpäisykerroin (permeabiliteetti).

Fickin ensimmäinen laki pätee vain pysyville kaasuille, jotka nesteytyvät sellaisissa lämpötiloissa ja paineissa, jotka ovat kaukana normaaleista olosuhteista, jollainen on esim. 0 °C, 1 atm. Tällaisia Henryn lakia noudattavia kaasuja ovat typpi, happi, argon ja hiilidioksidi (ilma).

Vesihöyry ja asetonit eivät noudata Henryn lakia, koska ne tiivistyvät ja nesteytyvät tavallisissa lämpötiloissa ja paineissa. Tämän vuoksi niiden läpäisykerroin ei ole riippuvainen höyryn osapaine-erosta kalvon ylitse. Fickin ensimmäinen laki höyryille esitetään tämän vuoksi muodossa:

$$W = VTR \cdot \frac{A \cdot t}{s} \quad (1.7)$$

Tässä läpäissyt ainemäärä (massa) on  $W$  ja  $VTR$  on höyryn läpäisevyys (läpäisy-nopeus).

Kaasujen läpäisykerroimen yksikkö on  $(\text{cm}^3 \cdot \text{mm}) / (\text{m}^2 \cdot \text{vrk} \cdot \text{atm})$  ja vesihöyryn läpäisevyyden yksikkö on  $(\text{g} \cdot \text{mm}) / (\text{m}^2 \cdot \text{vrk})$ .

Kaasujen läpäisykerroimia mitataan yleisesti standardien ASTM D1434 ja ASTM D3985 mukaan ja höyryn läpäisevyyksiä standardien ASTM E96 ja ASTM F1249 mukaan.

Kaasun läpäisykerroin voidaan esittää yhtälönä  $P = D \cdot S$ , jossa  $D$  on kaasun diffuusiokerroin ja  $S$  on kaasun liukenemiskerroin läpäistävään materiaaliin. mo-

lempien kertoimien arvot ovat riippuvaisia lämpötilasta, jonka vuoksi kertoimet on aina ilmoitettava mittauslämpötiloineen. Liukenemiskerroin (S) yleensä kasvaa lämpötilan noustessa, mutta helposti kondensoituvien höyryjen, kuten rikki-dioksidi ja ammoniakki, liukenemiskerroin pienenee lämpötilan noustessa.

Pysyvien kaasujen liukenemiskerroin (S) on verrannollinen kaasun osapaineeseen, jonka vuoksi kaasun läpäisykerroin ilmaistuna vakioaineessa on riippumaton paineesta.

Niukasti liukenevien höyryjen, kuten vesihöyryn, läpäisykerroin polyolefiineissa voi olla verrannollinen paine-eroon kalvon eri puolilla. Helposti liukenevilla höyryillä on aina ilmoitettava paine, jolla läpäisykerroimen mittaus on tehty.

Adsorboitunut vesi voi pehmittää joitain materiaaleja, mikä nostaa kaasun läpäisevyyttä. Toisaalta veden diffuusionopeus on riippuvainen vesihöyrypitoisuudesta, jonka vuoksi höyryn läpäisevyyksimittauksissa on tunnettava vallitseva suhteellinen kosteus.

Pysyvät kaasut eivät yleensä reagoi muovikalvojen kanssa, niiden läpäisykerroin on kääntäen verrannollinen niiden molekyylikokoon. Muiden kaasujen ja höyryjen läpäisevyyserroin on vahvasti riippuvainen niiden kondensoitumisesta ja yhtymistäipumuksesta ko. kalvomateriaaliin. Helposti liukenevat höyryt aiheuttavat materiaalien turpoamista, mikä kasvattaa höyryjen läpäisykerrointa (ja läpäisevyyttä).

Polymeerimuovien rakenne vaikuttaa huomattavasti läpäisevyyteen. Kaasun ja muovin kemialliset reaktiot voivat pienentää läpäisevyyttä. Muovin tiivistäminen ja kiteisyyden kasvattaminen pienentävät läpäisykerrointa.

Muovin lisäaineet vaikuttavat myös kaasujen läpäisevyyteen, pehmittimet kasvattavat läpäisevyyttä, koska ne "löysäävät" muovirakennetta. Myös täyteaineet etenkin suurin määrin käytettynä lisäävät muovin huokoisuutta ja näin ollen kaasujen läpäisevyyttä.

## 1.7 Ilman suhteellinen kosteus

Kuvassa 1.5 on käyrästä (klimatogrammi, Molliér diagrammi), joka kuvaa ilman vesipitoisuuden riippuvuutta suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. Kukin käyrä esittää ilman tiettyä absoluuttista vesipitoisuutta vastaavan suhteellisen kosteuden arvot eri lämpötiloissa.



Absoluuttisen kosteuden arvot ( $\text{g/m}^3$ ) on annettu yläreunassa, ilman suhteellinen kosteus vasemmalla pystyakselilla (%) ja ilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ) on annettu alhaalla vaaka-akselilla. Alareunan vaaka-akselilta saadaan myös tiettyä ilman vesipitoisuutta vastaavat kastepistelämpötilat, ts. lämpötilat, joilla ilman suhteellinen kosteus on 100 % ja tapahtuu kondensoituminen.

Kuvan kosteuskäyrät on piirretty käyttäen yhtälöä (1.8), joka pätee 100 kPa ilman paineessa [IEC 60721-2-1 Amendment 1, Appendix B].

$$\rho(t, \varphi) = 0,007932 \frac{273,16 \cdot e \cdot \varphi}{(t + 273,16) \cdot 100}, \quad (1.8)$$

missä

$\rho$ on	ilman absoluuttinen vesipitoisuus ( $\text{g/m}^3$ )
$e$ on	veden kyllästymistilan osapaine (Pa)
$\varphi$ on	ilman suhteellinen kosteus (%)
$t$ on	ilman lämpötila ( $^{\circ}\text{C}$ ).

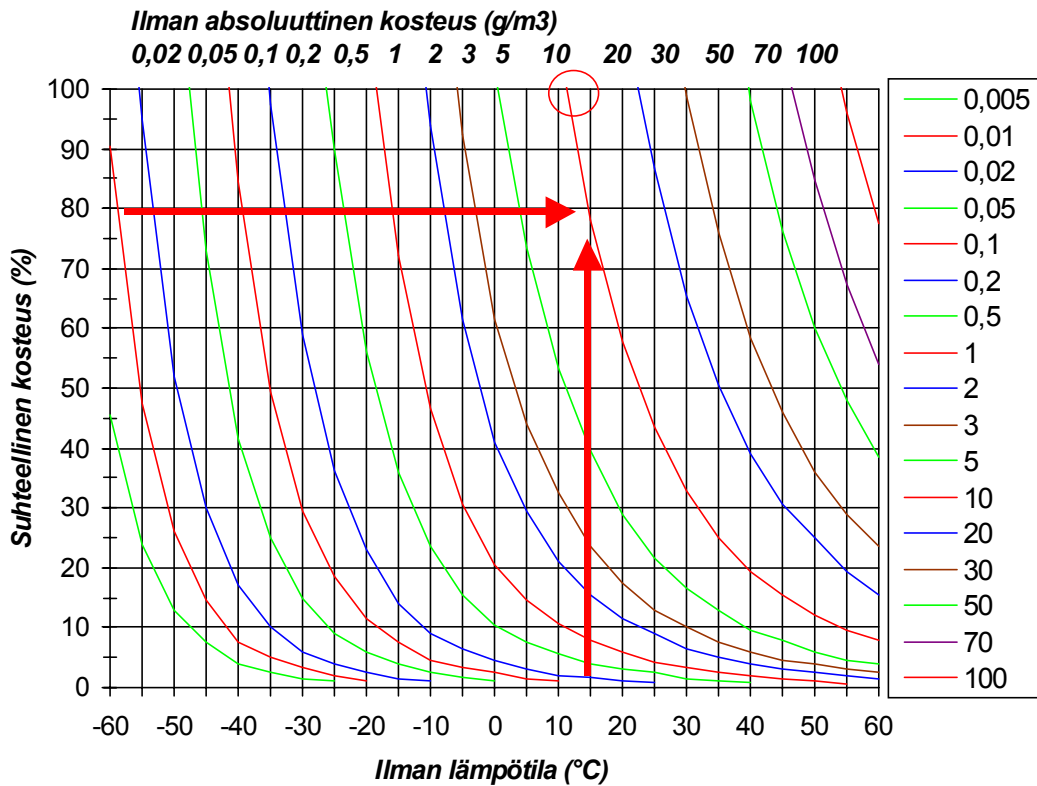
Kuvan 1.5 käyrästä luetaan seuraavasti:

Kun halutaan ulkoilman suhteellista kosteutta 80 % lämpötilassa  $14,5^{\circ}\text{C}$  vastaava ilman absoluuttinen vesipitoisuus, lähdetään vasemmalta suhteellisesta kosteudesta 80 % pystyakselilla ja sitten haetaan alareunan lämpötila-asteikolta  $14,5^{\circ}\text{C}$ . Seurattaessa nyt risteyspisteen kautta kulkevaa käyrää ylöspäin saadaan yläreunan asteikolta ilman absoluuttinen vesipitoisuus  $10 \text{ g/m}^3$ . Kastepistelämpötila, joka vastaa ilman 100 % suhteellista kosteutta, saadaan samalla tästä yläreunan lukeman kohdalta katsomalla vastaava lämpötila suoraan alareunan asteikolta. Ko. vesipitoisuudella ( $10 \text{ g/m}^3$ ) kastepistelämpötilaksi saadaan tässä  $11,5^{\circ}\text{C}$ .

Kun tällä samalla käyrällä ( $10 \text{ g/m}^3$ ) tullaan alaspäin suhteelliseen kosteuteen 50 %, on tätä vastaava lämpötila noin  $23^{\circ}\text{C}$  ja kosteutta 30 % vastaa lämpötila  $32^{\circ}\text{C}$ . Suhteellinen kosteus 80 % vastaa tavallista ulkoilman kosteutta ja 50 % kosteus sisätilan ilman kosteutta. Näiden pisteiden (80 % ja 50 %) välinen lämpötilaero on vain noin  $8,5^{\circ}\text{C}$  em. käyrällä  $10 \text{ g/m}^3$ . Lämpötilan nousu  $8,5^{\circ}\text{C}$  kuvastaa tavanomaisen laitteen aiheuttamaa ilman lämpenemistä taikka ulkoa huonetilaan tulevan ilman kosteustilan muuttumista.

Luonnossa (Bahrain) havaittu ilman vesipitoisuuden suurin arvo on ollut  $34 \text{ g/m}^3$  lämpötilassa  $32^{\circ}\text{C}$ . Tämä vastaa suhteellista kosteutta 97 % em. lämpötilassa. Kyseistä korkeampia ilman absoluuttisia vesipitoisuuksia ei luonnossa voi

esiintyä, koska se edellyttäisi veden pinnalla korkeampaa lämpötilaa laajalla alueella.



Kuva 1.5. Ilman suhteellinen kosteus absoluuttisen kosteuden ja lämpötilan funktiona [IEC 60721-2-1, Amendment 1, Appendix B ja SFS 5767, liite B].

## 1.8 Kosteuden kondensoituminen pinnoille

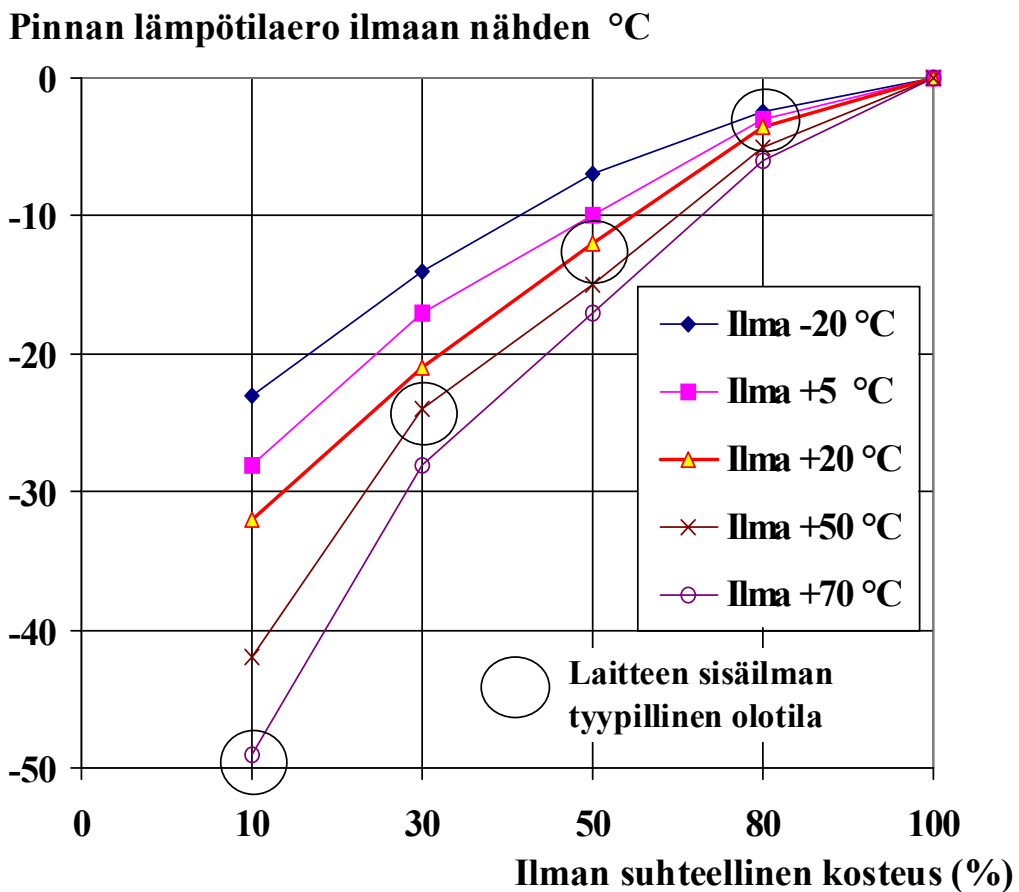
Kuvassa 1.6 on esitetty käyrästä, jossa kuvataan kondensoitumiseen tarvittavaa lämpötilaeroa metallipinnan ja ilman välillä erilaisilla ympäristöilman suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoilla. Käyrästä on poimittu kuvan 1.4 tiedoista.

Kuvasta 1.6 nähdään, että suhteellisella kosteudella 80 % tapahtuu kondensoituminen vain 2...6 °C ilmaa viileämmillä pinnoilla. Suhteellisella kosteudella 50 % vesi kondensoituu 7...16 °C ilmaa viileämmillä pinnoilla. Kuvasta 1.5 nähdään myös, ettei kondensoitumista tapahdu, jos pinnat ovat edes hieman ympäristöään lämpimämpiä.

Koska korrosio kiihtyy huomattavasti jo yli 50 % suhteellisilla kosteuksilla, merkitsee tämä sitä, että laitteen sisäosien pintojen pitäisi olla ainakin 10...20 °C

(jopa enemmänkin) ympäristöään lämpimämpiä, jotta kaikissa tilanteissa pintoja pyyhkivän ilman kosteus pysyisi alle 50 % suhteellisen kosteuden.

Laitteessa kosteuden alentuminen ei ole aivan suoraviivaista. Harvoissa laitteissa jäädytykseen käytetyn ilman lämpötila nousee yli 10 °C kulkiessaan laitteiston läpi. Näin ollen ilman suhteellinen kosteus jää melko korkeaksi. Jos laitteen sisään puhalletaan tai imetään ulkoilmaa, jonka vesipitoisuus on 10 g/m<sup>3</sup>, kohtuullisella nopeudella (≈0,3 m/s), kohtaavat sisääntulokohtaan läheisyydessä olevat pinnat ulkoilman sellaisenaan, jolloin kosteus on vielä lähes 80 %, koska ilma ei ehdi lämmentä.



*Kuva 1.6. Laitteen pinnan lämpötilaero ilmaan nähden, kun saavutetaan ilman kastepiste pinnalla ilman eri lämpötiloilla ja kosteuksilla.*

Tuloilma viilentää myös ko. rakenteita. Jos ilma osuu lämpöä tuottamattomiin kohteisiin, kuten piirilevylähtiin, on näiden lämpötila ja suhteellinen kosteus lähes sama kuin ulkoa tulevan ilman, mikä aiheuttaa melko suuren korroosiorisikin. Tätä sisääntulevan ilman kosteushaittariskiä voidaan vähentää levittämällä laitteen sisälämpötiloja tasaisemmin sisärakenteisiin (kuumat osat lähelle ilman

ottoaukkoja) ja toisaalta minimoimalla ulkoilman puhaltamista arimpiin alueisiin (paljaisiin johtimiin ja koskettimiin).

Kuvaan 1.6 on merkitty renkailla tyypilliset laitteen sisäilmastot arvopareina: RH 10 % / 70 °C, RH 30 % / 50 °C, RH 50 % / 20 °C ja RH 80 % / 5 °C.

Ulko-olosuhteissa on tavallista, että kirkkaalla ilmalla yötaivaan lämpösäteily on vain 130...300 W/m<sup>2</sup> ts. taivaan lämpötila on alhaisempi kuin maan pinnan, jonka vuoksi taivasta kohden osoittavat pinnat jäähtyvät voimakkaasti, koska ne säteilevät lämpöään suoraan kylmälle taivaalle.

Esim. maasta eristetyn pinnan lämpötila voi olla -14 °C, kun ilman suhteellinen kosteus on lähellä 100 % ja ilman lämpötila on 0 °C. Tällöin kaikilla taivaaseen suuntautuneilla pinnoilla tapahtuu veden kondensoitumista ja huurtumista [IEC 60721-2-4 **Solar radiation and temperature**, sivu 13]. Metallirakenteissa, jotka johtavat hyvin lämpöä, ulkopinnan jäähtyminen aiheuttaa kondensoitumista myös sisäpinnoilla, minkä vuoksi vettä kertyy myös laitteen sisäosiin.

Vertailun vuoksi todettakoon, että kirkkaana aamupäivänä auringon paisteessa subtrooppisilla alueilla kaupungeissa taivaan säteilyn maksimiarvo on luokkaa 700 W/m<sup>2</sup>, joka vastaa teoriassa noin 60 °C pintalämpötilaa niillä pinnoilla, jotka osoittavat taivaalle. Vuoristoissa tämä säteily on aamupäivisin luokkaa 1 180 W/m<sup>2</sup>. Standardissa IEC 60068-2-5 *Simulated solar radiation at ground level* auringon säteilyä simuloivassa testissä käytetään taulukon 1.5 mukaista tehonjakautumaa:

*Taulukko 1.5. Auringon säteilytehon jakautuma testissä IEC 60068-2-5.*

Spektrialue	UV B	UV A	Näkyvä valo			Infrapuna
Aallonpituusalue (µm)	0,28 ...0,32	0,32 ...0,40	0,40 ...0,52	0,52 ...0,64	0,64 ...0,78	0,78 ...3,00
Säteilytehotiheys (W/m <sup>2</sup> )	5	63	200	186	174	492

UV = ultravioletti (alue B ja alue A)

Näin ollen testissä säteilytehosta (1 120 W/m<sup>2</sup>) tulee ultravioletille alueelle 6 %, näkyvän valon alueelle 50 % ja lämpösäteilyn alueelle 44 %. Vastaavaa tietoa on standardissa IEC 61725 Analytical expression for daily solar profiles.

Taulukkoon 1.6 on laskettu IEC 60721-2-4:ssä annettua yhtälöä (1.9) käyttäen teoreettisia pintalämpötiloja yöllä taivasalla kuivalla ja kostealla ilmalla.

$$T_0 = \left(\frac{A}{\sigma}\right)^{1/4}, \quad (1.9)$$

missä

- $T_0$  on pinnan tasapainolämpötila (K)  
 $\sigma$  on Stefan-Bolzmännin vakio  $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$   
 $A$  on ilmakehän säteilytehoitiheys ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

Käytännössä pintojen lämpötilat ovat huomattavasti tämän yhtälön antamia korkeampia johtuen lämmön johtumisesta, pinnan emissiokertoimesta, konvektiosta (tuulesta) ja veden tiivistyessä tapahtuvasta faasimuutoslämmön vapautumisesta.

*Taulukko 1.6. Kirkkaan yötaivaan alla olevien pintojen teoreettisia lämpötiloja (°C) maan pinnalla [IEC 60721-2-4, kuva 1].*

Ilman lämpötila 2 m korkeudella maasta °C	Hyvin kuiva ilma		Hyvin kostea ilma	
	Taivaan säteilyteho yöllä W/m <sup>2</sup>	Pinnan teoreettinen lämpötila °C	Taivaan säteilyteho yöllä W/m <sup>2</sup>	Pinnan teoreettinen lämpötila °C
30	296	-4	..	..
20	260	-13	323	+2
10	227	-21	270	-10
0	196	-31	220	-23
-10	168	-40	180	-36
-20	143	-49	148	-47
-30	123	-57	124	-57

Käytännössä pinnat jäähtyvät (säteilevät avaruuteen lämpöään) sitä enemmän mitä suurempi on se avaruuskulma, jossa kylmä taivas näkyy ko. pinnalta käsin. Tästä syystä myös pystysuorat sivut, joihin taivas näkyy, jäähtyvät lähes yhtä paljon kuin vaakasuorat pinnat. Jos pinnan edessä on jokin rakennelma tai kasveja, joiden lämpötila on käytännössä sama kuin ilman lämpötila, ei pinta jäähdy, vaan pysyy ympäröivän ilman lämpötilassa, koska pinta “näkee” vain ympäröivän ilman lämpöisiä pintoja. Tästä johtuu tuttu ilmiö auton ikkunoiden pysymisestä kirkkaina autokatoksessa, kun taas taivasalla ikkunat huurtuvat. Vastaavasti

tähän perustuu kasvien hallasuojina käytettyjen harsojen tehokkuus paleltumisen estämisessä.

Auringon säteilylämpö voi aiheuttaa yllättäviäkin tilanteita kondensoitumisen suhteen. Jos ulkosalla oleva laitekaappi lämpiää auringon lämmittäessä sen toista sivua, voi käydä niin, että laitteen sisällä ilman lämmitessä vesi haihtuu lämpimältä sivulta nostaen ilman vesipitoisuutta ja vesi alkaakin kondensoitua kylmälle sivulle aiheuttaen varjon puoleisen seinän korrodoitumisen nopeammin kuin auringon puoleisen sivun [Gellerstedt]. Suljetussa tilassahan kosteus kertyy aina kylmimmille pinnoille. Tätä seikkaa voidaan käyttää hyväksi myös eräänä laitesuunnittelun keinona järjestämällä johonkin kohtaan muita pintoja kylmempi alue ja keräämällä vedet sinne, missä siitä on vähiten haittaa.

## 1.9 Lämpötilan vaikutus kotelon ilmanvaihtoon

Ilman lämpötilan vaihtelu aiheuttaa laitekotelossa olevan ilman paineen vaihteluita, mikä vuoroon imee ja vuoroon poistaa ilmaa kotelosta. Ilman vaihtuvuus on melko suurta jo aivan tavallisilla lämpötilan muutoksilla, jos kotelossa on avoimia aukkoja.

Suljetussa tilassa, jossa lämmön siirtyminen on vähäistä seinämien läpi, on voimassa ideaalikaasujen (ihannekaasujen) tilanyhtälö:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} = nR = \text{vakio}, \quad (1.10)$$

missä

- p on ilman paine (Pa)
- V on tilavuus ( $\text{m}^3$ )
- T on lämpötila (K)
- n on ainemäärä mol (vedellä 1 mol = 0,018 kg)
- R on yleinen kaasuvakio = 8,314510 J/(mol·K).

Vakio riippuu siis vain ainemäärästä n. Kun ainetta on 1 mooli eli n = 1 mol, on  $pV/T = 1 \text{ mol} \cdot 8,314510 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K}) = 8,314510 \text{ J/K}$ .

Isotermisessä muutoksessa lämpötila on vakio ja  $pV = nRT = \text{vakio}$ , isobaarisessa muutoksessa  $V/T = nR/p = \text{vakio}$  ja isokoorisessa muutoksessa  $p/T = nR/V = \text{vakio}$ .

*Taulukko 1.7. Ilman paine ja tilavuus lämpötilan muuttuessa.*

<b>Lämpötila</b> °C	<b>Ilman paine, kun tilavuus on vakio</b> kPa	<b>Ilman tilavuus, kun paine on vakio</b> dm <sup>3</sup>
-10	89,8	0,898
0	93,2	0,932
10	96,6	0,966
20	100,0	1,000
40	106,8	1,068
60	113,7	1,137
80	120,5	1,205

Taulukon 1.7 mukaan lämpötilan muuttuminen 10 °C aiheuttaa lämpötilasta 20 °C lähdettäessä ilman paineessa 3,4 % muutoksen, jos tilavuus on vakio ja samoin 3,4 % tilavuusmuutoksen, jos paine on vakio. Lämpötilan muutos 30 °C aiheuttaa jo 10 % muutoksen paineeseen/tilavuuteen. Tämä vastaa normaalia ulkoilman paineen vaihtelualuetta 92...108 kPa merenpinnan tasolla.

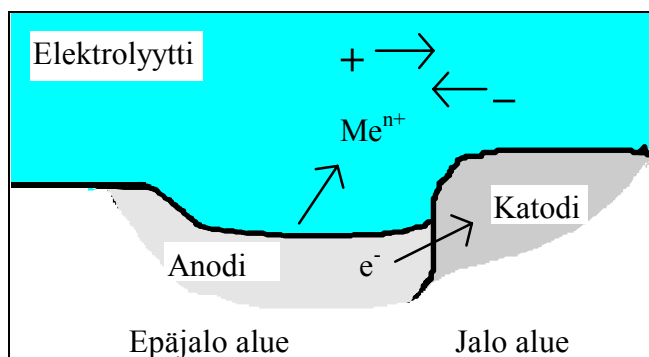
## 2 Korroosiotyypit ja vikamekanismit

### 2.1 Galvaaninen ja metalliparikorroosio

Galvaanista korroosiota tapahtuu, mikäli metallit tai sähköä johtavat materiaalit muodostavat jonkin elektrolyytin kanssa galvaanisen kennon. Galvaaniseen kennon kuuluu esim. metallinen anodi ja katodi sekä kemialliset reaktiot mahdollistava elektrolyytti, joka yhdistää anodin ja katodin toisiinsa.

Galvaanisia kennoja syntyy seuraavissa tilanteissa [Mattsson 1996]:

- metalliparikenno (bimetallikenno), jossa anodi ja katodi ovat eri metalleja
- konsentraatiokenno, jossa anodi ja katodi ovat samaa materiaalia, mutta aineiden, jotka osallistuvat reaktioihin eri elektrodeilla, konsentraatiot ovat erilaiset
- lämpö-galvaaninen kenno, jossa anodi ja katodi ovat samaa materiaalia ja elektrolyytin koostumus on sama kaikkialla, mutta lämpötilat ovat erilaiset eri elektrodeilla.



Kuva 2.1. Oikosuljettu galvaaninen korroosiopari [Kemiallinen..., osa I, 1996, s. 66].

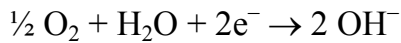
Metalliparikorroosio (laajemmassa merkityksessä galvaaninen korroosio) syntyy, kun kaksi jalousasteeltaan erilaista metallia on **samassa elektrolyytissä** sähköisessä kontaktissa toisiinsa ts. kaksi eri metallia muodostavat metalliparikennon yhdessä elektrolyytin kanssa. Jalompaa materiaalia oleva osa toimii katodina ja epäjalompi osa anodina. Anodilla tapahtuu hapettuminen ja katodilla pelkistyminen. Metalliparikorroosiota syntyy myös, jos metallin kanssa on kosketuksissa sitä jalompi tai epäjalompi muu sähköä johtava materiaali, esim. hiili, grafiitti tai sähköä johtava muovi (vrt. liite 1, kohta 1.2 *Metallien sähkökemiallinen ja galvaaninen jännitesarja*). Kuvassa 2.1 on esitetty metalliparikorroosion syntyminen, kun toisiinsa liitetyt (oikosuljetut) metallit ovat samassa elektrolyytissä.



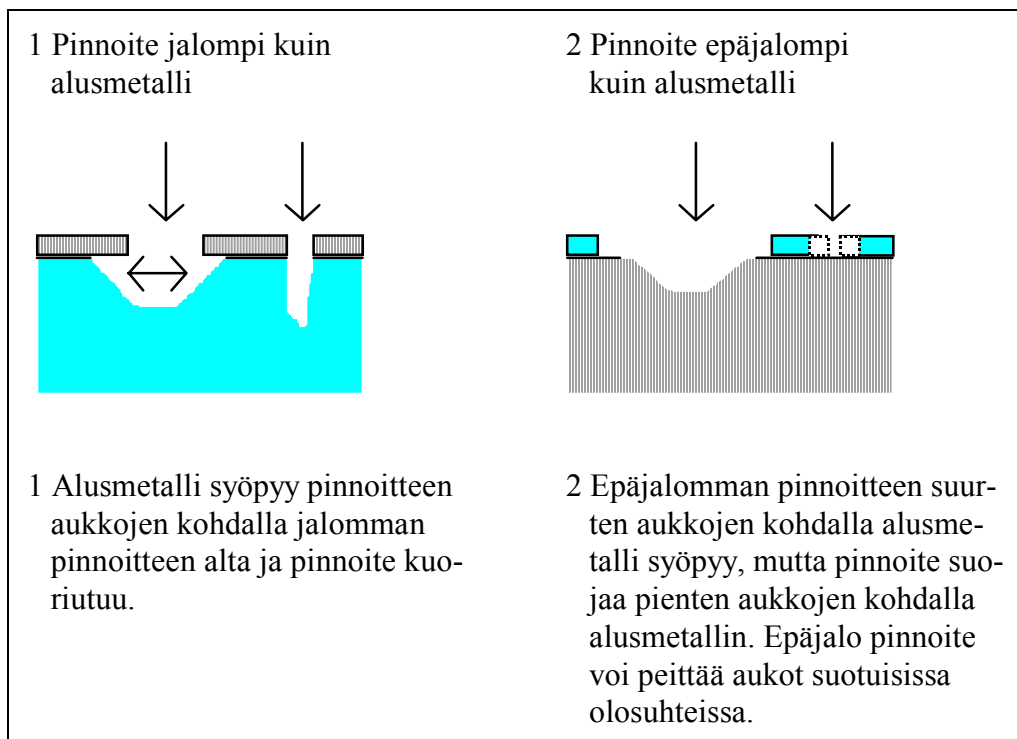
Anodireaktiossa metalli hapettuu ts. syntyy metalli-ioneja ja vapaita elektroneja.



Katodireaktiossa tapahtuu pelkistyminen ts. tavallisesti happi liukenee elektrolyyttiin ja syntyy hydroksyyli-ioneja.



Kun nämä jaloustasteeltaan erilaista metallia olevat osat, jotka ovat yhteydessä toisiinsa, upotetaan samaan elektrolyyttiin, syntyy ns. oikosuljettu galvaaninen kenno. Galvaaniseen kennoon kuuluu anodi, katodi ja elektrolyytti. Tällaisessa kennossa (parissa) tapahtuu sähkökemiallista korroosiota ts. anodi (epäjalompi materiaali) syöpyy (kuva 2.2).



Kuva 2.2. Pinnoitteen jalouden vaikutus metallin korrodoitumiseen.

Elektroniikassa galvaanisen korroosion riski on erittäin suuri, koska elektroniikassa tarvitaan runsaasti sähköisiä kontakteja, joissa on teknisten seikkojen vuoksi käytettävä erilaisia materiaaleja, joiden välille on saatava sähköinen kontakti. Galvaanisen korroosion riski on sitä suurempi mitä suurempi on toisiinsa kosketuksissa olevien materiaalien jalousero mitattuna galvaanisen jännitesarjan avulla (vrt. liite 1, kohta 1.2 *Metallien sähkökemiallinen jännitesarja*).

Elektroniikkalaitteissa tavallisin galvaanisen korroosion riski syntyy, kun osien pinnoille kondensoituu tai valuu vettä ja vesi pääsee pintojen välisiin kapillaarirakoihin.

Ilmastollinen korroosio tapahtuu metallien pinnoilla, joihin muodostuu veden läsnäolon vuoksi galvaanisia kennoja (anodi- ja katodialueita), joissa vesi ja siihen liuenneet aineet toimivat elektrolyytinä. Pinnalla olevien epäpuhtauksien konsentraatioerot sekä pinnoitteiden koostumuksen vaihtelut vaikuttavat näiden kennojen kemialliseen aktiivisuuteen, mitä suuremmat erot sitä suurempi on korroosioriski.

Ilman suhteellinen kosteus (liite 1, kohta 1.7 *Ilman suhteellinen kosteus*) vaikuttaa voimakkaasti ilmastollisen korroosion nopeuteen. Eri metalleilla korroosionopeus kiihtyy voimakkaasti noin 60 % suhteellisen kosteuden arvoilla, jota sanotaan myös kriittiseksi kosteudeksi. Veden määrä metallipinnoilla on suuruusluokalleen lähteiden [Mattsson 1996, s. 80] ja [Barton et al. 1974] mukaan:

<b>Tilanteen kuvailu</b>	<b>Vesimäärä</b> <b>g/m<sup>2</sup></b>
– kriittinen kosteus ilmassa (luokkaa 60 % RH)	0,01
– ilman suhteellinen kosteus 100 %	1
– pinnalla kondensoitunutta vettä	10
– pinta on sateen kastelema	100

Galvaanista korroosiota voi vähentää välttämällä jaloudeltaan hyvin erilaisten metallien liitoksia, eristämällä liitettävät metallit toisistaan ja/tai estämällä veden pääsy liitosalueille.

Pinnoitetuissa rakenteissa metalliparikorroosio esiintyy periaatteessa kuvan 2.2 kaltaisina mekanismeina, joissa jalon ja epäjalon pinnoitteen virheet käyttäytyvät eri tavoin. Alusmetallia jalompi pinnoite (esim. kromi teräksen päällä) ei suojaa alusmetallia virheiden kohdalla, mutta alusmetallia epäjalompi pinnoite “uhrautuu” (esim. sinkki teräksen päällä) ja suojaa suhteellisen kauan myös virhekohdissa alusmetallia korroosiolta [Tunturi & Tunturi 1999, s. 8, kuva 2.1] (vrt. liite 1, kohta 2.4 *Huokoskorroosio*).

## 2.2 Yleinen korroosio

Yleinen korroosio (uniform attack) on tavallisin korroosimuoto. Tässä materiaali korrodoituu tasaisesti koko pinnalta. Pinnalla anodiset (syöpyvät) ja katodiset (syöpymättömät) alueet vaihtavat jatkuvasti paikkaa, jolloin materiaali syöpyy tasaisesti. Yleisen korroosion mittana käytetään pinnan keskisyöpymistä mikrometreinä vuotta kohden.

## 2.3 Hapettuminen kaasuympäristössä

Hapettuminen on määritelmänsä mukaan reaktio, jossa reagoiva aine luovuttaa elektroneja. Anodireaktiossa metalli hapettuu ts. syntyy metalli-ioneja ja vapaita elektroneja. Näin myös metallin liukeneminen korroosio-tapahtumassa on metallin hapettumista. Arkipäiväisesti käsitettynä hapettuminen on aineen reagoimista ilman hapen kanssa (palamista, oksidoitumista). Ilmassa metallien pinnoille syntyy hapen ja metallin kemiallisen reaktion kautta oksidikerros, jonka ominaisuudet vaihtelevat metallista riippuen. Jaloilla metalleilla, esim. kulta ja platina, happi ei normaaleissa oloissa juurikaan reagoi metallipinnan kanssa ja oksidikerros muistuttaa enemmän pinnalle adsorboitunutta happikerrosta kuin varsinaista oksidikerrosta.

Oksidikerrokset voidaan jakaa kolmeen tyyppiin:

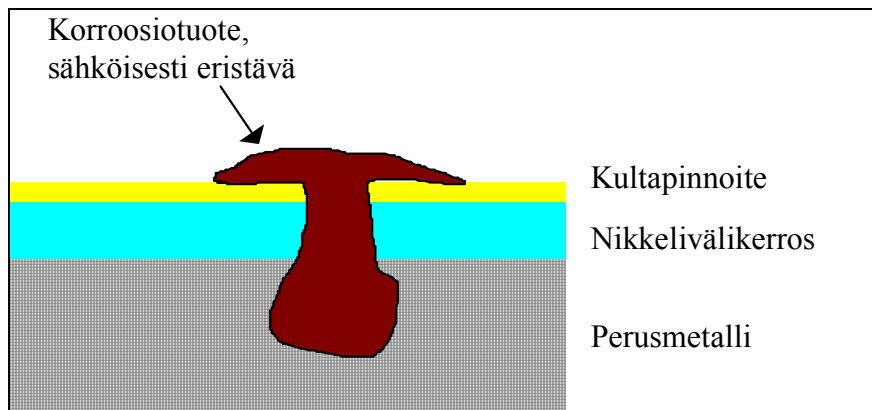
- huokoiset, kuten tantaalin oksidikerros,
- puolitiiviit, kuten kuparin ja raudan ja tinan oksidikerrokset ja
- tiiviit, kuten alumiinin oksidikerros.

Tiiviillä kerroksella hapettuminen pysähtyy kerroksen saavutettua tietyn paksuuden, puolitiiviillä kerroksella hapettuminen on jatkuvasti hidastuvaa ja huokoisilla kerroksilla hapettuminen jatkuu, kunnes metalli on kokonaisuudessaan muuttunut oksidiksi.

## 2.4 Huokoskorroosio

Huokoskorroosioksi sanotaan tyypillisesti jalometallipinnoitteessa olevien mikrokooppisten reikien, huokoisten ja virheiden, kohdalla syntyvää korroosiotuotetta (kuva 2.3). Korroosio on periaatteessa metalliparikorroosiotuotetta, jossa epäjalompi alusmetalli korrodoituu ja työntää korroosiotuotteen kohden jalompaa pintaker-

rosta ja levittää tuotteet sitten pitkin pintaa. Tämän seurauksena esim. kullattujen liitinkoskettimien resistanssi kasvaa.



Kuva 2.3. Huokoskorrosio koskettimen pinnalla [Henriksen et al. 1991].

Huokoskorrosiota esiintyy myös muilla jalometallipinnoitteilla, kuten hopea ja palladium. Huokoskorrosion riski on suuri alle 1  $\mu\text{m}$  pinnoittepaksuuksilla. Sen esiintymistä voidaan tehokkaasti rajoittaa käyttämällä nikkelivälikerrosta kullan alla.

Testausmenetelmä IEC 60068-2-60 Test Ke: Flowing mixed gas corrosion test, Method 1 ( $\text{H}_2\text{S} + \text{SO}_2$ ) soveltuu kulta- ja palladiumpinnoitteiden huokoskorrosiotesteihin. Vastaavanlainen menetelmä on ASTM B799-95 Standard Test Method for Porosity in Gold and Palladium Coatings by Sulfurous Acid/Sulfur Dioxide Vapor.

## 2.5 Pistekorroosio

Pistekorroosio, (pistesyöpyminen, pitting corrosion) on paikallinen korrosiomuoto, joka aikaansaa metallin pinnalle piste- tai kuoppamaisia syvänteitä. Anodialue on reiässä ja katodialue tavallisesti sen ympärillä olevalla pinnalla. Pinta näyttää olevan täynnä pieniä reikiä pääosan pinnasta ollessa kuitenkin lähes virheetön. Ohuissa rakenteissa syöpymä voi edetä materiaalin läpi hyvinkin nopeasti aiheuttaen yleistä korrosiota pahempaa vahinkoa. Pistesyöpyminen on tyypillistä metalleille, joiden korrosionkestävyys perustuu pinnalle suojaa antavaan passiivikerrokseen kyseisissä olosuhteissa, esim. alumiini tai ruostumaton teräs ovat tällaisia. Myös jalot pinnoitteet epäjalon perusmateriaalin päällä, esim. nikkelipinnoite teräksellä, voivat pinnoitteen vaurioituessa luoda edellytyksen pistekorroosiolle. Pistekorroosion määrä riippuu siitä onko ko. ympäristössä riittävän aggressiivisiä aineksia (esim. tyypin 304 ruostumaton teräs korrodoituu  $\text{Cl}^-$ ioneja sisältävässä neutraalissa hapekkaassa vesiliuoksessa). Ulkoilmassa alumiini-

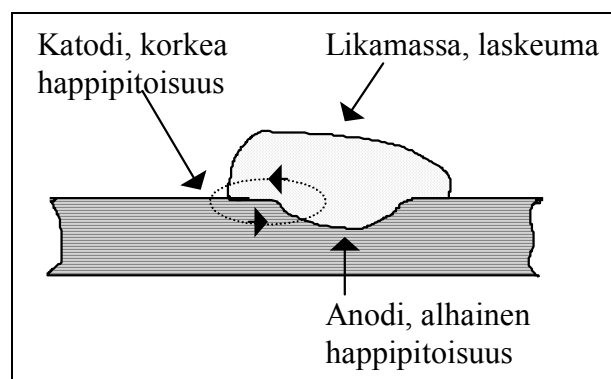
niseoksien pistekorrosio yleensä pysähtyy asteittain, mutta jos pinnalla on seisovaa vettä, joka sisältää kloridia ja happea, syöpyminen voi jatkua voimakkaana.

## 2.6 Rakokorrosio

Rakokorroosiota tapahtuu nimensä mukaisesti ahtaissa raoissa, joissa elektrolyyttiliuos ei pääse vaihtumaan samalla nopeudella kuin muilla metallipinnan alueilla. Tyypillisiä rakokorroosiolle alttiita rakoja ovat 0,025...0,1 mm raot. Metallit, joiden korroosionkestävyys perustuu passiivikerrokseen (katso Pourbaix-diagrammi Liite 1, kuva 1.1), ovat erityisen alttiita rakokorroosiolle, koska kapeisiin rakoihin syntyy happivajausta ja metallin pinta ei kykene ylläpitämään näissä oloissa enää passiivikerrosta. Passiivikerroksen hävitessä metallista tulee anodinen ympäristöönsä nähden.

## 2.7 Piilokorrosio

Piilokorroosiolla [Mattsson 1996, Kemiallinen... 1996] tarkoitetaan korroosiota, joka kehittyy jollekin pinnalle tulleen epäpuhtauden alla tai välittömässä läheisyydessä (kuva 2.4). Esim. kostean hiilipölyn, maantieltä irtoavan lian, saven, hiekan, lehtien ja laivoissa fouling-kasvuston alle kehittyy helposti piilokorroosiota. Ilman pääsy pinnalla olevien epäpuhtauksien alle estyy veden myötävaikutuksella ja ko. kohtaan syntyy happikaasurikastumiselementti (ilmaelementti).



Kuva 2.4. Piilokorroosion syntyminen [Mattsson 1996].

Korroosion syntyminen johtuu kosteudesta, joka jää likamassan (laskeuman) ja metallipinnan väliin ja pysyy siinä. Koska veden liikkuvuus on huono tässä välissä, korrosio kehittyy samaan tapaan kuin rakokorroosiossa. Lian alla on vähähappinen alue ja vieressä runsashappinen alue ts. lopputuloksena syntyy korroosiokenno, jonka syöpyvä anodi on likamassan alla ja katodi sen vieressä.

Samantapainen korroosioilmiö voi tapahtua kastuneiden lasikuituvillaisten lämpöeristeiden ollessa kosketuksissa metallipinnan kanssa.

## **2.8 Sinkinkato ja tinakato**

Sinkinkato on korroosioilmiö, jossa sinkki liukenee pois messingistä (valikoiva korroosio, selektiivinen liukeneminen) [Mattsson 1996, Kemiallinen... Osa 1 1996]. Sinkinkato tapahtuu ennen kaikkea messingissä, jonka sinkkipitoisuus on korkea. Siinä runsassinkkisistä rakeista tulee anodipintoja ja runsaskuparisista rakeista tulee katodipintoja. Anodipinnat syöpyvät ts. sinkki korrodoituu. Messingin kupari jää huokoiseksi massaksi, jonka lujuus on huono. Ilmiötä esiintyy suolaiseen veteen tai kuumaan veteen kosketuksessa olevissa messingeissä. Ilmiö saadaan torjuttua seostamalla messinkiin arseenia(As), antimonia (Sb), booria (B) tai fosforia (P).

Tinapronssilla esiintyy vastaavasti tinakatoa, kun tinarakeet epäjalompana metallina toimivat anodeina ja syöpyvät.

## **2.9 Lankamainen korroosio**

Lankamainen korroosio (filiform-korroosio) on maalatun metallipinnan korroosiotyyppi, jossa korroosio etenee maalipinnan alla lankamaisina (matomaisina kohoumina) muodostumina maalipinnan alla satunnaisesti suuntiin (filament formation) esim. suolaveden päästessä kosketuksiin metallin kanssa maalin huokosen tai reikien kautta. Kokeellisesti lankamainen korroosio saadaan helposti esiin esim. maalatuilla alumiinipinnoilla suolasumutesteissä [Nakayama et al. 1998 ja ISO 4623]. Kuivuneiden kohoumien sisältä voi löytyä kiteistä suolaa. Pitkälle kehittynyt lankamainen korroosio voi käytännössä irrottaa maalin metallista laajoillakin alueilla, jolloin lankamaisuus muuttuu isommaksi kupruilemiseksi.

## **2.10 Jännityskorroosio ja väsyminen**

Jännityskorroosion (stress corrosion cracking) edellytyksenä on, että metallin pinnalla on vetojännitystä ja että metalli on samanaikaisesti altistunut tietyille kemikaalille. Esim. muokattu messinki, joka altistuu ammoniakille, on herkkä jännityskorroosiolle. Esimerkkinä voi mainita puolipallon muotoisen kellon kuvun, joka saattaa lohjeta kappaleiksi jännityskorroosion vuoksi, vaikka se on päällisin puolin virheettömän näköinen.

Jännityskorroosion eräs muoto, vetyhauraus, on otettava huomioon elektrolyyttisiä pinnoitteita valmistettaessa. Koska katodilla kehittyy aina jonkin verran myös vetyä, joka jää pinnoitteeseen, on pinnoitetulle metallille tehtävä tarvittaessa vedynpoistohehkkutus, jotta vety ei ryömisi pinnoitteesta perusmateriaaliin ja aiheuttaisi siinä murtumia. Erityisesti ruuvien yms. kiinnikkeiden valmistuksessa vedynpoisto on prosessin viimeinen vaihe. Vetyhauraus voi olla seurauksena myös metallin syöpmisestä happamassa liuoksessa!

Metallirakenteissa, jotka ovat jatkuvan mekaanisen rasituksen alaiset voi tapahtua metallin väsymisestä johtuvaa jännityskorroosiota. Elektroniikassa tämä on merkittävin juotosliitoksissa, kun liitokseen kohdistuu suuria staattisia voimia johtuen esim. liitinrunгон, metallijohdinten ja piirilevyn erilaisista lämpölaajenemiskertoimista. Kun laitteen lämpötila vaihtelee tehovaihteluiden, laitteen päällekytkennän ym. seikkojen vuoksi, voi huonosti mitoitetussa tapauksessa tapahtua liitoksen asteittainen murtuminen, mikä edelleen johtaa liitosresistanssin kasvuun ja edelleen, etenkin suurivirtaisissa ( $> 1$  A) kontakteissa, liitoksen lämpötilan nousuun jopa piirilevyn syttymispisteeseen asti. Piirilevyn syttymiseen riittävä teho on  $1...2$  W/cm<sup>2</sup> ja syttymislämpötila on noin 400 °C. VTT:ssä tehdyn simuloinnin perusteella saatiin FR4-materiaalista tehdyssä johdinkuviossa piirilevyn juotosliitoksen lähiympäristön lämpötilaksi 1 W:n teholla liitoksessa yli 500 °C ja kuumimman kohdan lämpötilaksi yli 700 °C. Tämä vastaa eräissä elektroniikan vahinkoselvityksissä todettua tilannetta.

## 2.11 Pinnoitteiden jännitykset

Pinnoitettaessa metalleja toisilla metalleilla esim. sähkökemiallisilla menetelmillä, pinnoitteisiin jää sisäisiä jännityksiä, jotka aiheuttavat jännityksen suuruudesta ja paikkajakaumasta riippuen monenlaisia vikailmiöitä. Tällaisia pinnoitteita ovat nikkeli, tina, tinalyijy, nikkeli-kulta, hopea, sinkki, kromatointi, jne.

Pinnoitteen jäännösjännityksiin voidaan vaikuttaa pinnoitettavan perusaineen-, pinnoitekylvyn- ja kylpyjen lisäaineiden valinnalla sekä kohottamalla kylvyn lämpötilaa. Taulukossa 2.1 on muutamien sähkökemiallisten pinnoitteiden jäännösjännityksien arvoja.

Metallien kemiallisessa pinnoituksessa pinnoiterakenteeseen jää aina jonkin verran sisäisiä jännityksiä, jotka voivat myöhemmin aiheuttaa pinnoitteen murtumisen. Jännityksen alaisena metalli on reaktiivisempi ja siis korroosioherkempi kuin jännityksettömässä tilassa. Jännitykset syntyvät, kun pinnoitusprosessissa saostettavan metallin joukkoon kersaostuu erilaisia epäpuhtauksia: kylvyn lisä-

aineita, metallisia tai ei-metallisia kylvyn epäpuhtauksia, saostuvan metallin hydroksideja ja katodilla kehittyvää vetykaasua. Kerasaostuvat epäpuhtaudet vaikuttavat myös pinnoitteen sähköisiin ominaisuuksiin. Jännitys voi saostettavasta metallista riippuen olla vetojännitystä tai puristusjännitystä. Vetojännitystä pidetään haitallisempana, sillä se heikentää materiaalin väsymiskestävyyttä (altistaa tärinävaurioille). Pinnoitteisiin jääneet jännitykset aiheuttavat myös puhtaassa tiinassa tinasäikeiden (liite 1 kohta 4.2 Säikeet) kasvua.

*Taulukko 2.1. Metallisten pinnoitteiden sisäisiä jäännösjännityksiä [Dini 1993].*

Pinnoite	Jännitys MPa	Pinnoite	Jännitys MPa
Cadmium, Cd	-3,4 ... -20,7	Koboltti, Co	138
Sinkki, Zn	-6,9 ... -13,8	Rauta, Fe	276
Hopea, Ag	± 13,8	Palladium, Pa	413
Kulta, Au	-3,4 ... 10,3	Kromi, Cr	413
Kupari, Cu	13,8	Rhodium, Rh	689
Nikkeli, Ni	68,9		

Positiiviset arvot tarkoittavat vetojännitystä ja negatiiviset puristusjännitystä.

## 2.12 Korroosiotuotteiden ryömiminen

Korroosiotuotteet voivat ryömiä pitkin metallipintoja. Korroosion ulkoisesti näkyvät seuraukset ovat korroosiotuotteet. Esim. raudalla keltainen/ruskea rauta-hydroksidi (ruoste), sinkillä valkoinen karbonaatti/hydroksidi (valkoruoste) ja kuparilla vihertävä karbonaatti/hydroksidi (patina). Korroosiotuotteet saostuvat jonnekin anodisen ja katodisen alueen välille, jonne korroosiovirta kuljettaa elektrolyyttiin liuenneet ionit reagoimaan. Korroosiotuotteet ovat veteen liukenevia ja ne voivat liuoksen mukana vaeltaa pitkiäkin matkoja syntymäpaikastaan. Liuoksen kuivuessa ne jäävät uuteen paikkaan, josta ne voivat aloittaa vaelluksensa uudelleen vesiliuoksen jälleen muodostuessa. Pinnalle syntyy näin ilmiölle tyypillinen haihtumis/kostumis alueiden vuorottelun aiheuttama vuosirengasmaisuus. Kapeissa raoissa ja huokosissa syntyvät korroosiotuotteet näyttävät myös pursuavan ulos raostaan, jolloin syntyy vaikutelma, että korroosiota tapahtuukin raon edessä. Korroosiotuotteiden kulkeutumisesta kiihdyttävät sähkökentät ja vuotovirrat, mitkä voivat johtaa nopeasti oikosulkuun jännitteisissä laitteissa.



Elektroniikassa kuparin korroosiotuotteet ryömivät pitkin kulta- ja hopeapinnoitteita. Hopean korroosiotuotteet ryömivät pitkin kultapinnoitteita. Välikerroksena käytettävä nikkeli kullan ja hopean alla vähentää ryöminnän määrää. Hyvin korrodoivissa olosuhteissa, joissa on läsnä rikkidioksidia ja klooria, nikkeli korrodoituu ja sen korroosiotuotteet ryömivät enemmän kuin kuparin [Henriksen et al. 1991].

Korroosiotuotteiden ryömintä voidaan saada esiin kosteus- ja lämpötesteillä sekä monikaasutesteillä. IEC 60068-2-60 Method 3 (H<sub>2</sub>S, NO<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>), soveltuu kultapinnoitteiden korroosiotuotteiden ryömimistesteihin.

### **2.13 Elektrolyyttinen korrosio ja ionien vaeltaminen (migraatio)**

Elektrolyyttistä korroosiota ja ionien vaeltamista [Henriksen et al. 1991 ja Schweigart 1999] (electrolytic corrosion and ionic migration, electrolytic migration) tapahtuu esim. piirilevyllä sähköjohdinten välillä, kun johtimia yhdistää toisiinsa hygroskooppinen elektrolyytin peittämä tai kyllästämä materiaali (vrt. liite 1, kohta 3.6 *Vesiliuokset ja elektrolyytit*). Elektroniikassa tavallisen 2...5 V jännitteen olemassaolo johdinten välillä riittää käynnistämään elektrolyysin ja ionien vaeltamisen. Mitä kapeammat johdinvälit ovat sitä suurempi kentänvoimakkuus on ja todennäköisyys ionien vaeltamiseen kasvaa. Positiivisemmassa jännitteessä oleva johdin liukenee (korrodoituu) ja ionit vaeltavat kohden negatiivisempaa johdinta. Elektrolyyttinen korrosio voi katkoa ohuita johtimia ja ionien vaeltaminen voi aiheuttaa oikosulkuja johdinten välille joihin muodostuu puumaisia sähköä johtavia kuvioita. Katodin puolella kuviot ovat yleensä metallisia ja anodin puolella suoloja. Johtavien aineiden koostumus ja esiintymistavat vaihtelevat jännitteen suuruuden ja pintojen epäpuhtauskonsentraation mukana. Pintojen kontaminaatio ja ilmasta pinnalla olevaan veteen liukenevat kaasut, kuten typpi- ja rikkiyhdisteet sekä hiilidioksidi edistävät elektrolyyttistä korroosiota ja ionien vaeltamista (vrt. 4.3 *Elektromigraatio*).

### **2.14 Hiertymiskorrosio, fretting**

Kun metallipinnat hankautuvat toisiaan vasten, tapahtuu kosketuspinoilla hiertymiskorroosiota (fretting corrosion, hankauskorrosio, kitkakorrosio) kaikilla pintamateriaaleilla. Hankautumisen aiheuttaa esim. voimakas värinä, sähkövirran aiheuttama lämpeneminen (teho päälle ja pois), suuren vaihtovirran aiheuttama sähkömekaaninen voima tai ympäristölämpötilan vaihtelun aiheuttaman liike materiaalien erilaisten lämpölaajenemiskertoimien vuoksi.

Mekaaninen hankaaminen kuluttaa pintoja ja irrottaa metallipinnoilta pieniä partikkeleita, jotka myös korrodoituvat, esim. hapettuvat, helposti. Hierova liike voi synnyttää esim. palladium- ja rhodiumpinnoitteilla katalyyttisesti polymeerejä ilmassa olevista kaasuista. Lopputuloksena liitoksen kosketusresistanssi vaihtelee liikkeen aikana ja kasvaa myös pysyvästi aiheuttaen toimintahäiriöitä elektronikkalaitteelle. Kosketinjärjestelmissä esiintyy aina jonkin verran mekaanista liikettä värinän tai materiaalien lämpölaajenemiskerrointen erojen vuoksi lämpötilan muuttuessa. Lämpölaajenemiskertoimien erot vaikuttavat etenkin pitkissä piirilevyliittimissä. Jos kosketinsysteemi on joustava, se voi vähentää hiertymistä [van Dijk & van Meijl 1996].

Pintojen mekaanisen kulumisen määrä ja korrodoituminen ovat riippuvaisia pintojen materiaaleista, kovuudesta, pintoja yhteen puristavasta voimasta, kitkakerroimesta ja liikkeen amplitudista ja liikenopeudesta. Hierovan liikkeen amplitudi voi olla 0,1...100  $\mu\text{m}$  [Antler 1984]. Liikkeen toistotaajuus voi olla esim. kerran muutamassa tunnissa lämpöliikkeen ollessa syynä hiertymiseen taikka sata hertsiä, kun kyseessä on mekaanisen värinän aiheuttama liike. Herkimmillään hiertymiskorroosio voi esim. tinapinnoitteisilla liittimillä kaksinkertaistaa kosketusresistanssin jo parin tuhannen jakson jälkeen ja edelleen resistanssi voi satakertaistua, jos jaksoja on 4...10 tuhatta [van Dijk & van Meijl 1996 ja Lees & Williams 1991]. Toisaalta muutama sata kerta voi riittää resistanssin kasvattamiseen useiksi ohmeiksi.

Tinapinnoitteet ovat erityisen herkkiä hiertymiskorroosiolle, koska tina hapettuu nopeasti ja on pehmeää. Tinaoksidi on kovaa ja haurasta ja tunkeutuu hankauksessa pehmeän tinan sisään kasvattaen pintaresistanssia. Kosketuskohtaan muodostuvat oksidit ja muut yhdisteet ovat huonosti sähköä johtavia. Myös koskettimissa kulkeva virta vaikuttaa hiertymiskorroosion haitallisuuteen, kun jo kohtalaisesti korrodoituneessa liitoksessa pinnoitemateriaali (esim. tina) sulaa tai kaasuuntuu virran aiheuttaman lämpenemisen johdosta. Tinalla sulamista tapahtuu 0,13 V ja alumiinilla 0,3 V jännitteellä kosketuspinnan yli [Braunovic 1989, Lee 1986, Kohlrausch 1900]. Hyvin ohuilla tai pehmeillä pinnoitteilla hiertyminen voi paljastaa alusmetallin taikka kova pinnoite voi hieroa vastakkaisen pehmeän pinnoitteen puhki. Hiertymiskorroosiota tapahtuu kaikissa avattavissa kontakteissa, liittimissä, releissä ja kytkimissä, joissa kontaktipinnat liukuvat toistensa suhteen. Jopa niin pieni liike kuin 0,1  $\mu\text{m}$  voi aiheuttaa korroosiota. Jos mekaaninen hankausliike saadaan poistettua, voivat myös pehmeät pinnoitteet, kuten tina, toimia aivan hyvin myös pienillä virroilla ja jännitteillä [van Dijk & van Meijl 1996].

Lämpötilan vaihtelusta johtuvan hiertymiskorroosion aiheuttamaa liittimen kontaktiresistanssin muutosta voi arvioida viitteessä [Malucci 1996, Vahter 1999] esitetyn tinapinnoitteille laaditun kaavan avulla, jonka mukaan resistanssin muutos on verrannollinen lämpötilan muutoksen potenssiin 2,28 ja vaihtelujaksojen lukumäärän toiseen potenssiin.

$$\Delta R = k(\Delta T)^{2,28} C^2, \quad (2.1)$$

missä

- $\Delta R$  on resistanssin muutos ( $m\Omega$ )
- $k$  on kokeellisesti määritetty vakio  $2,36 \cdot 10^{-10}$  ( $m\Omega / K^{2,28}$ )
- $\Delta T$  on lämpötilan vaihtelualue (K)
- $C$  on lämpötilan vaihtelujen lukumäärä.

Robert D. Malucci on tullut kaavaa kehittäessään johtopäätökseen, että hiertymiskorroosio on lähinnä riippuvainen lämpötilan vaihtelun laajuudesta eikä niinkään korkeimmasta lämpötilasta, jossa liitos käy. Näin ollen hän on päätellyt, että em. yhtälöstä johdettua kaavaa (2.2) voidaan käyttää etsittäessä esim. tiettyä käyttöolosuhdetta vastaavaa testauksen lämpövaihtelualueutta ja toistomäärää:

$$C_2 = (\Delta T_1 / \Delta T_2)^{1,14} C_1, \quad (2.2)$$

missä  $C_1$  ja  $C_2$  ovat lämpötilan vaihtelujen lukumäärät olosuhteissa 1 ja 2  $\Delta T_1$  ja  $\Delta T_2$  ovat lämpötilan vaihtelualueet olosuhteissa 1 ja 2.

Jos esim. liittimen käytössä 10 vuoden ajan päivittäinen lämpötilan vaihtelu on  $25\text{ }^\circ\text{C}$  ja testissä käytetään  $100\text{ }^\circ\text{C}$  lämpötilan vaihtelua, tarvitaan käyttöolosuhteita vastaavassa testissä vain 752 testausjaksoa.

$$C_2 = C_1(25/100)^{1,14} = 3650 \cdot 0,206 = 752 \quad (2.3)$$

Kaavaa voi myös käyttää kahden käyttöolosuhteen vertailuun arvioitaessa hiertymiskorroosion merkitystä.

Laitteen liitosten herkkyyttä hiertymiskorroosiolle voi helposti tutkia tavallisen mekaanisen värinätestin avulla. Testissä kannattaa käyttää signaalina satunnaiskohinaa esim. taajuusalueella 10...150 Hz ja samaa amplitudia kuin mekaanista lujuuutta testattaessa. Testin aikana seurataan esiintyykö liitoksissa katkoksia ts. laitteen toimintahäiriöitä ja testin jälkeen avataan liittimet ja katsotaan näkykö niiden koskettimissa ja kuorissa kulumajälkiä tai värin muutoksia. Liittimien vi-

suaalinen tarkastus voidaan yhdistää myös lämpövaihtelutesteihin (elinikätestit), jolloin saadaan samalla tieto, onko myös hiertymiskorroosio ko. laitteessa merkittävä vikamekanismi. Jos laitteessa on resonoivia kohtia tärinässä, voi tämä olla varsinainen vikaantumisten syy, mikä tulee esiin liittimissä hiertymiskorroosiona, vaikka liittimet olisivatkin hyvälaatuisia.

Kun esim. liittimen rungon muovin ja koskettimien metallin lämpölaajenemiskertoimien välinen ero on yhtälön (2.4) mukaisesti luokkaa  $40 \cdot 10^{-6} \text{ 1/K}$ , on 100 K lämpötilan muutosta (vastaa esim. lämpötila-aluetta  $-40\dots+60 \text{ }^\circ\text{C}$ ) vastaava pituusero  $\Delta L$  noin  $40 \text{ }\mu\text{m}$ , kun liittimen rungon paksuus on 10 mm.

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{muovi}} - \alpha_{\text{metalli}} \approx 40 \cdot 10^{-6} \quad (2.4)$$

$$\Delta L = \Delta\alpha \cdot \Delta T \cdot L, \quad (2.5)$$

joissa

- $\Delta L$  on pituuden muutosero (mm)
- $\Delta\alpha$  on lämpölaajenemiskertoimien ero (1/K)
- $\Delta T$  on lämpötilan muutos (K)
- L on pituus (mm).

Koskettimien taipumusta hiertymiskorroosiolle voidaan vähentää tekemällä liitinjärjestelmä joustavaksi [van Dijk & van Meijl 1996] ts. sellaiseksi ettei hiertymistä tapahdu, lisäämällä kosketinpainetta [Braunovic 1989] tai käyttämällä kosketinalueen voitelua [van Dijk & van Meijl 1996]. Kosketinpaineen lisääminen voi lisätä kulumista, jos liikevoimat ovat suuria eikä näin ollen ole aina sovelias keino. Kosketinten voitelu voi vähentää korrodoitumista, mutta koska se helpottaa hankaavien pintojen liukumista toistensa suhteen (kitka pienenee), se lisää hankaavaa liikettä ja aikaa myöten huonontaa kontaktia hiertymiskorroosion vuoksi.

## 2.15 Metallien diffuusio ja korroosio

Metalliset materiaalit ja metalliseokset muodostuvat rakeista, joiden rajapinnoilla atomit kykenevät vaeltamaan matalissakin lämpötiloissa. Rajalämpötilana on noin  $400 \text{ }^\circ\text{C}$ , jonka yläpuolella vaeltaminen tapahtuu pääasiassa rakeiden sisällä. Tämä ns. diffuusioilmio, jossa eri metallit sekoittuvat asteittain toisiinsa, voi olla merkittävä jo alle  $100 \text{ }^\circ\text{C}$ :n lämpötiloissa. Esim. tinan ja kuparin välistä diffuusiota tapahtuu jo näin alhaisessa lämpötilassa.

Diffuusio muuttaa metallien koostumusta ts. syntyy uusia koostumukseltaan erilaisia faaseja, jotka usein ovat hauraita ja mekaanisesti heikkoja. Äärimmäisessä tapauksessa metallisen pinnoitteen alle voi syntyä suurta huokoisuutta ja lopulta kontaktikin voi hävitä. Tällaisia elektroniikassa käytettyjä yhdistelmiä ovat esim. Al-Au, Au-Sn, Au-Pb, Au-Sn/Pb, Cu-Au, Cu-Pt ja Pt-Ir. Esimerkiksi juotostinan ja kullan välinen sidos tuhoutuu 120 °C lämpötilassa viidessä minuutissa. Tämän vuoksi juotettavien kultapinnoitteiden tulisikin olla alle 0,5 µm paksuisia, jotta kulta liukenisi täysin juotostinaan. Kuparimetalleilla käytetään kuparin diffuusion estämiseksi pinnoitteen alla nikkeli- ja nikkelivälikerrosta. Esim. 2...3 µm paksu nikkeli-kerros riittää fosforipronssin ja 60Sn40Pb-juotteen välissä estämään kuparin ja tinan seosfaasien muodostumisen [Dini 1993].

## 2.16 Välimetallit

Kahden metallin liitokseen syntyy diffuusion johdosta välimetallikerros, joka yhdistää erilaiset metallit toisiinsa. Elektroniikassa välimetallien muodostumisella on suurin merkitys liitoksissa esim. juotosliitoksissa, joissa johdinkuvion kupari diffundoituu juotostinaan ja juotostina diffundoituu kupariin muodostaen kaksi välimetallikerrosta. Kuparin puolelle muodostuu juotosvaiheessa ohut Cu<sub>3</sub>Sn-kerros ja tinan puolelle paksumpi Cu<sub>6</sub>Sn<sub>5</sub> kerros [Vuorinen 2006]. Jälkimmäinen kerros on karkeampaa ja rakenteeltaan epäsäännöllistä. Välikerrosten kokonaispaksuus on tyypillisesti 0,5...0,7 µm (...3 µm). Kuparin ja tinan välimetallit ovat kiteisiä rakeita, joiden määrä ja rakenne riippuu juotosajasta ja lämpötilasta. Lyhyellä juotosajalla saadaan hienorakenteinen välimetallikerros, mikä parantaa liitoksen lujuutta. Pitkä altistus korkealle lämpötilalle kasvattaa raekokoa ja välikerroksen paksuutta. Paksun välimetallikerroksen lujuus on huonompi kuin ohuen kerroksen. Tämän vuoksi juottaminen mahdollisimman alhaisessa lämpötilassa tuottaa lujempia liitoksia.

Välimetallikerroksen paksuuskasvu jatkuu myös elektroniikan käyttölämpötiloissa, koska tinan sulamispiste on niin alhainen. Tästä johtuu osa juotosliitosten rappeutumisesta käytössä esim. lämpötiloissa 80...120 °C. Tällä välimetallin kasvamisella (kuparin diffundoituminen tinaan) on merkittävä vaikutus myös tinapinnoitettujen liitäläytöjohdinten juotettavuuden heikkenemiseen pitkässä varastoinnissa huoneen lämpötilassakin, koska kupari diffundoituu tinakerroksen pinnalle ja korrodoituu siinä heikentäen juottuvuutta [SMT Terms and Definitions <http://www.smtnet.com/library>].

Kultapinnoitteisten johdinten juottaminen saattaa tuottaa huonompia juotoksia kuin tina-lyijypinnoitteiset johtimet kultan ja tinan muodostaman välimetallin

vuoksi. Jos kultakerroksen paksuus on yli 1,5  $\mu\text{m}$ , juote ei liuota kaikkea kultaa pinnoitteesta, jolloin syntyy runsaasti kultaa sisältävä välimetallikerros ja juotos voi olla huonolaatuinen. Jos juotostinan kultapitoisuus on suurempi kuin 5 %, välimetallikerros ja koko liitos on hauras. Noin 0,5  $\mu\text{m}$  paksuinen kultapinnoite liukenee kokonaan juotostinaan (kultapitoisuus välimetallissa jää vähäiseksi) ja liitoksesta tulee luja edellyttäen, että kultapinnoitteen alla oleva metalli (esim. nikkeli) ei ole hapettunut.

Nikkeli muodostaa tinan kanssa välimetallikerroksia huomattavasti hitaammin kuin kupari. Tämän vuoksi nikkeliä käytetään välikerroksena (luokkaa 2...3  $\mu\text{m}$ ) kuparia sisältävien johdinten ja kulta- sekä tinapinnoitteiden välissä. Nikkeli estää tehokkaasti kuparin ja sinkin diffundoitumisen ulompien pinnoitteiden läpi.

Mikäli nikkelöintiprosessissa (electroless nickel plating solution) nikkelin pintaan jää liikaa fosforia ( $P > 10\%$  painosta), pinnoitteen juottuvuus heikkenee oleellisesti. Tämä voi vaikuttaa myös sellaisten johdinten juottuvuuteen, joissa perusmetallin (messinki, berylliumkupari, pronssi) päällä on nikkelivälikerros ja ohut kerros kultaa tai tinaa. Uloimman kerroksen liuetessa juotteeseen ei fosforipitoiseen nikkelipintaan saadakaan hyvää lujaa sidosta. Kyseinen nikkelipinnan fosfori diffundoituu korkeissa lämpötiloissa ( $> 80\text{ }^\circ\text{C}$ ) ylempiin pinnoitekerroksiin ja heikentää tätä kautta juotosten lujuutta [Santangelo 1999, Vuorinen 2006].

Hopeapinnoitteita käytettäessä suositellaan kuparilejeerinkien ja hopean väliin nikkelivälikerroksen käyttöä. Jos hopealla pinnoitetaan terästä, sinkkiä ja sinkkilejeerinkejä, suositellaan näiden päälle ensin kuparikerrosta ja tämän päälle vielä nikkeliä välikerrokseksi, jonka päälle hopeapinnoite tarttuu hyvin [ASTM B700, <http://www.electroplating.com/>, Hoban 1997].

## 2.17 Mikrobiologinen korroosio

Termiä mikrobiologinen korroosio käytetään ilmaisemaan korroosiota, johon vaikuttaa mikrobien läsnäolo ja aktiivisuus materiaalien pinnoilla olevissa biokalvoissa. Mikrobiologinen korroosio (MIC microbiologically influenced corrosion) vaikuttaa kaikilla veden kanssa kosketuksissa olevilla pinnoilla, niin metallien kuin muidenkin materiaalien. Ennen kaikkea se vaikuttaa ei-metallisiin aineisiin, kuten puu, teipit, tiivisteet, maalit, pinnoitteet, kumi, muovi, jne. Vaikuttavina biologisina eliöinä toimivat bakteerit, levät, homeet, sienet, jäkälät ja sammaleet sekä erilaiset eläimet ja niiden päästöt. Näistä peräisin olevat kemikaalit yhdessä veden ja ilman aiheuttaman kontaminaation kanssa korrodoivat niiden alla olevia pintoja. [<http://www.meic.com/Newsletters/1999/Summer99.htm>].

Mikrobiologinen korroosio on paikallista ja näkyy monina korroosiotyyppeinä kuten: pistekorroosio (pitting), selektiivinen liukeneminen (selective leaching), rakokorroosio (crevice corrosion), pinnoitteen alle syöpyminen (underdeposit corrosion) ja eroosikorroosio (erosion corrosion). Mikrobiologinen korroosio vaikuttaa eniten olosuhteissa, joissa vesi on jatkuvasti pinnoilla joko sateen tai kondensoitumisen vuoksi taikka veden alla sijaitsevilla pinnoilla. Tällaiset olosuhteet vallitsevat tyypillisesti merellä ja trooppisissa ympäristöissä [<http://www7330.nrlssc.navy.mil/>].

Seuraavassa on aiheeseen liittyvää kirjallisuutta.

Kobrin, G. **A Practical Manual on Microbiologically Influenced Corrosion**. 1993. NACE, ISBN 1-877914-56-8. 233 p.

Little, B., Wagner, P., Ray, R., Pope, R. & Scheetz, R. 1991. **Biofilms: An ESEM Evaluation of Artifacts Introduced During SEM Preparation**. *J. Industrial Microbiology* 8, pp. 213–222.

Little, B., Wagner, P. & Mansfeld, F. 1991. **Microbiologically Influenced Corrosion of Metals and Alloys**. *International Materials Reviews* 36(6), pp. 253–272.

Prasad, R. Selection of Corrosion Inhibitors to Control Microbiologically influenced Corrosion. NACE 1998. Corrosion 1998. Paper No. 98276. P. 12.

Wagner, P., Ray, R., Little, B. & Tucker, W. C. 1994. **MIC-Degradation of Fiber-Reinforced Polymeric Composites**. *Materials Performance* 33(4), pp. 46–49.

Watkins-Borenstein, S. **Microbiologically Influenced Corrosion Handbook**. 1994. 310 p. ISBN 0-8311-3056-3.

Thierry, D. **Aspects of Microbially induced corrosion**. 1997. EUROCORR '96. European Federation of Corrosion Publications Number 22. 162 p.

The Electrochemical Society, Inc: ECS Symposia:

Mechanistic Aspects of Microbiologically Influenced Corrosion (MIC). May 1993.

Microbiologically Induced Corrosion. May 1989.

## 2.18 Homeen kasvuedellytykset

Kosteissa olosuhteissa, jollaisia esiintyy etenkin kuljetusten aikana ja trooppisilla seuduilla, homesienten kasvaminen on alituisena uhkana elektroniikalle ja sen pakkausmateriaaleille. Homesienten kasvamisen edellytyksenä on yleensä vain riittävän kosteat ja sopivan lämpöiset olosuhteet. Homeet saavat ravinteita myös ilmasta, mutta runsas orgaanisen aineen olemassaolo luonnollisesti kiihdyttää kasvua. Homehtuminen ei välttämättä ensimmäisenä aiheuta toimintavikoja laitteisiin, mutta home vaikuttaa ainakin laitteiden ulkonäköön, koska home kehittyy orgaanisessa materiaaleissa, kuten kuljetuspakkauksissa ja laitteiden merkintätarroissa. Lähteessä [Viitanen & Ritschkoff 1990] kuvataan puun home- ja lahovaurioita rakennuksissa, mutta siinä esitetyt tiedot homeen kehittymisedellytyksille pätevät myös elektroniikan pakkauksiin ja muihin puupohjaisiin materiaaleihin.

Homeet kasvavat männyn ja kuusen pinnalla parhaiten, kun ilman suhteellinen kosteus on yli 95 % ja lämpötila on +20...+40 °C. Home käyttää puuta ravintonaan ja lahottaa sen. Kasvunopeus hidastuu selvästi, kun kosteus laskee alle 90 %:n. Alin kosteus, jolla puun pinoilla tapahtuu homehtumista on noin 80 % RH. Jos lämpötila on yli 30 °C, alkaa homehtuminen jo 80 % RH kosteuksilla kuudessa viikossa. Kasvu on tällöin vielä mikroskooppista eikä sitä voi havaita silmin. Alle 20 °C lämpötilassa puun pinnalla ei alle 80 % RH:n ole havaittavissa homeen kasvua edes vuoden aikana. Lämpötilan ollessa +5...+10 °C silmin havaittavaa homeetta esiintyy 12 viikon kasvatusaikana vain 96...98 % RH:n kosteudella, puun kosteus on tällöin 27...33 %. Silmin havaittavaksi home tulee tällöin noin 5...6 viikon kuluttua. Korkeammissa lämpötiloissa (+20...+40 °C) puun homehtumista tapahtuu ilman suhteellisen kosteuden ollessa 86...89 % (tällöin puun kosteus on 16...18 %) noin 4...9 viikon kuluttua kosteusaltistuksen alkamisesta.

Homeet voidaan havaita mikroskooppitarkastelussa jo varhaisessa vaiheessa. Jos kosteus on yli 96 %, alkaa homeen kasvu välittömästi ja muuttuu silmin näkyväksi jo parissa viikossa. Kosteudella 86...88 % RH kasvu alkaa noin 3...4 viikon kuluttua. Homeet voivat kasvaa hitaasti vielä lähellä 0 °C:n lämpötilaa, yli +50...+55 °C:n lämpötiloissa homeen kasvu pysähtyy ja sienirihmastot kuolevat. Itiöt kuolevat vasta yli 80...100 °C:n lämpötiloissa. Pitkäaikainen yli 80 %:n suhteellinen kosteus on suuri riski puumateriaalien homehtumiselle yli +10 °C:n lämpötiloissa. Alle +5 °C:n lämpötiloissa homeiden kasvu puussa vaatii yli 90 %:n suhteellisen kosteuden ilmassa.

Puhtaan puun pinnalla tapahtuva homehtuminen alkaa suhteellisen hitaasti. Selvästi nopeammin homehtumista tapahtuu myös elektroniikan merkinnöissä käytettyinä materiaaleina.



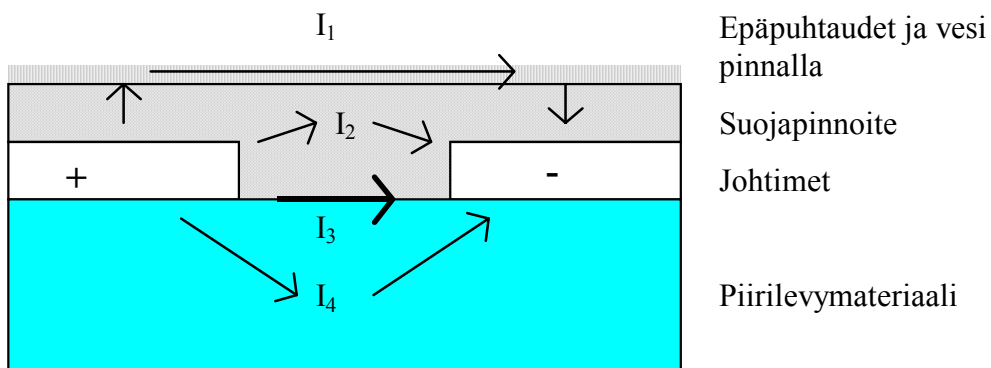
tetyissä orgaanisissa liimoissa, jotka voivat sisältää luujauhoa (proteiineja) taikka selluloosaa.

## 2.19 Kosteuden ja geometrian vaikutus piirilevyn eristysresistanssiin

Piirilevyjen johdinkuviossa yksi tärkeimpiä vikamekanismeja on johdinten välisen eristysresistanssin pieneneminen ts. vuotovirtojen kasvaminen kosteuden ja epäpuhtauksien vaikutuksesta. Eristysresistanssin muutoksiin piirilevyn pintarakenteessa vaikuttavat periaatteessa kuvaan 2.5 merkityt neljä osa-alueetta, joissa kulkevien vuotovirtojen arvot ovat riippuvaisia myös ympäristön ja itse piirilevyn kosteudesta [Hvims & Jørgensen 1998]. Luonnollisesti pinnassa kulkevat virrat muuttuvat myös pintaan kertyvien sähköä johtavien epäpuhtauksien (kuten suolat) ja erilaisten korroosiomekanismien vaikutuksesta.

Kahden johtimen välillä vuotovirta kulkee neljää reittiä (kuva 2.5). Virta  $I_1$  lähtee toisesta johtimesta (+) kulkien suojapinnoitteen läpi sen pinnalle ja kulkee sitten pintaa pitkin siinä olevien epäpuhtauksien ja veden muodostamaa reittiä pitkin ja edelleen suojapinnoitteen läpi toiseen johtimeen (-).

Koska virta  $I_1$  kulkee suojapinnoitteen läpi kahdesti, eivät pinnalla olevat runsaat epäpuhtaudet ja vesi vaikuta kovin paljon tämän virran suuruuteen, ts. suojapinnoite vähentää oleellisesti epäpuhtauksien ja pintaveden haitallista vaikutusta vuotovirtoihin.



Kuva 2.5. Piirilevyn johdinten väliset virrankulkureitit [Hvims & Jørgensen 1998].

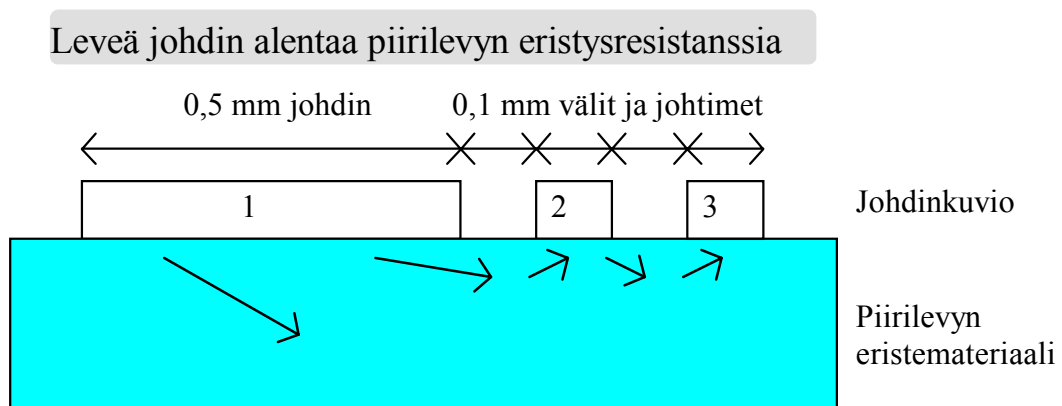
Jos suojapinnoite on vettä hylkivää materiaalia, se vähentää huomattavasti jatkuvan vesikalvon muodostumista pinnalle. Mahdolliset pinnoitteen aukot ja halkeamat vaikuttavat huomontavasti suojaukseen ja aiheuttavat etenkin kosteassa lisääntyvän vuotovirran.

Virta  $I_2$  kulkee suojapinnoitteen sisällä toiseen johtimeen (-). Pinnoitteen laatu, geometria ja kosteuspitoisuus vaikuttavat tämän virran suuruuteen. Samaten suojapinnoitteen ionisoituminen ja täyteaineet vaikuttavat virran suuruuteen.

Virta  $I_3$  lähtee toisesta johtimesta (+) kulkien suojapinnoitteen ja piirilevymateriaalin rajapinnalla siinä olevien epäpuhtauksien ja veden muodostamaa reittiä pitkin toiseen johtimeen (-). Pinnoitteen ja piirilevymateriaalin välinen adheesio vaikuttaa siihen, muodostuuko tähän rajapintaan onteloita, joihin vesi voisi kertyä kapillaarisesti. Samoin suojapinnoitteen ja metallijohdinten välinen adheesio vaikuttavat siihen syntykö rajapinnalle vettä kerääviä onteloita.

Hyvin kosteutta sietävien ja kemiallisesti epäaktiivisilla pinnoitteilla saattaa olla huonot adheesio-ominaisuudet (silikoni ja eräät halogenoidut pinnoitteet, esim. vinyylipinnoite (PVC)), jonka vuoksi niitä käytettäessä voi olla tarvetta käyttää adheesiota parantavaa pohjapinnoitetta (vrt. pohjamaalaus). Suojapinnoitteita käytettäessä on tärkeää, että suojattavat pinnat puhdistetaan hyvin ennen pinnoitusta, jotta adheesio olisi mahdollisimman hyvä.

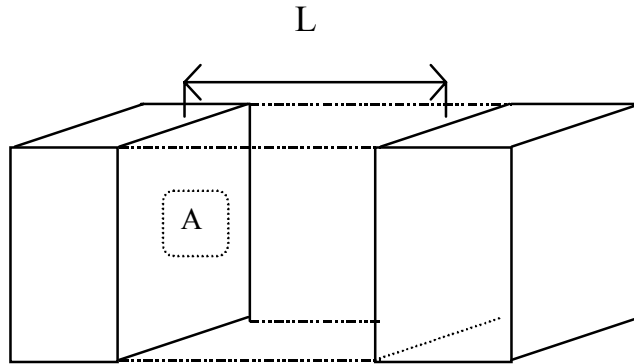
Virta  $I_4$  lähtee toisesta johtimesta (+) kulkien piirilevymateriaalin läpi toiseen johtimeen (-). Sen suuruus on riippuvainen lähinnä piirilevymateriaalin resistanssista ja siihen absorboituneesta vedestä. Myös piirilevyn erilaiset täyteaineet vaikuttavat tämän virran suuruuteen.



*Kuva 2.6. Piirilevyn johdinten leveys vaikuttaa eristysresistanssiin.*

Käytännön johdinkuvioissa esiintyy aina hyvin erilaisia johdinleveyksiä ja eristysvälejä. On hyödyllistä tiedostaa kuvan 2.6 mukaisen tapauksen fysikaalinen tausta, kun suunnitellaan ja testataan piirilevyjen johdinkuvioita ja eristysresistansseja.

Eristysresistanssi samanlevyisten eristysalueiden ylitse ei suinkaan aina ole sama, vaan vierekkäisten johdinalueiden pinta-ala vaikuttaa siihen huomattavasti. Kapeiden johdinten (2–3) välinen resistanssi on suurempi kuin leveän ja kapean (1–2) johtimen välinen resistanssi, kun johdinvälit ovat samat.



Kuva 2.7. Tasopintojen ( $A$ ) välinen eristysresistanssi.

Kuvan 2.7 tasopintojen välinen eristysresistanssi on yhtälön (2.6) mukaan kääntäen verrannollinen poikkipinta-alaan.

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}, \quad (2.6)$$

missä

- $R$  on tasopintojen välinen resistanssi ( $\Omega$ )
- $\rho$  on eristemateriaalin ominaisresistanssi ( $\Omega\text{m}$ )
- $L$  on tasopintojen välimatka (m)
- $A$  on tasopintojen poikkipinta-ala ( $\text{m}^2$ ).

Leveistä johtimista lähtevällä vuotovirralla on suurempi poikkipinta-ala kulkea piirilevymateriaalin lävitse kuin kapeilla johtimilla. Johdinten ja eristealueiden geometria määrää kuinka suuri tämä vuotovirta/eristysresistanssi on, joka vastaa virrankulkureittiä  $I_4$  kuvassa 2.5. Tämä eristysresistanssia kasvattava geometria-vaikutus jää kuitenkin vähäisemmäksi verrattuna pintaa pitkin kulkevaan vuotovirtaan, jos johdinvälit ovat likaantuneet ja niissä on runsaasti vettä. Kuitenkin useissa kosteustesteissä saadaan tämänkaltaisen tulos, että kapeammilla johdinleveyksillä, joissa myös johdinvälit ovat kapeammat kuin toisessa kuviossa, saadaankin suuremmat eristysresistanssit kuin leveissä johdinkuvioissa etenkin suojaamattomilla piirilevyillä. Ts. yhdistelmä leveät johtimet ja kapea johdinväli on huonompi yhdistelmä kuin kaksi kapeaa johdinta kapein johdinväleihin rinnakkain. Eristyksen kannalta olisi parasta käyttää kapeita johtimia ja leveitä johdinvälejä.

Mikäli johdinkuvion metalliset johtimet hapettuvat, kuten esim. kuparijohtimet lämpötilan ja kosteuden vaikutuksesta, tämä vaikeuttaa virran kulkua johtimesta toiseen ja lisää tehollista eristysresistanssia. Metallin pinnalla oleva tiivis oksidikerros toimii johdinten päällä tällöin ikään kuin erillisenä suojapinnoitteena, joka johtaa huonosti sähköä [Vahter 1999].

Melko usein piirilevyn johdinkuvion eristysresistanssia testataan IPC:n testikuvioita käyttäen. Esim. standardissa IPC-SM-840C kuvattu testilevy IPC-A-25 Multipurpose 1 & 2 Sided Test Pattern (IPC B-25) on paljon käytetty. Seuraavissa standardeissa on kattava kokoelma eristysresistanssin ja pintaresistanssin (SIR surface insulation resistance) mittaus- ja testausmenetelmiä.

ASTM D257-99 Standard Test Methods for DC Resistance or Conductance of Insulating Materials.

IEC 60093 Methods of test for volume resistivity and surface resistivity of solid electrical insulating materials.

IPC-9201 Surface Insulation Resistance Handbook.

Pintaresistanssi määritellään seuraavan yhtälön mukaan pinnan resistiivisyyden  $\rho_p$  avulla [esim. Nieminen 1999].

$$R_p = \rho_p \cdot \frac{L}{W}, \quad (2.7)$$

missä

$R_p$ on	pintaresistanssi ( $\Omega$ ) kahden johtimen välillä
$\rho_p$ on	pinnan resistiivisyys eli neliöresistanssi ( $\Omega/\square$ )
$L$ on	johdinten välimatka pintaa pitkin (m)
$W$ on	johdinten pituus pintaa pitkin (m).

Kun käsitellään piirilevyn johdinkuvion eristysresistanssia taikka johdinten välisiä vuotovirtoja, on tiedostettava, ettei esim. IPC:n testikuvioita käytettäessä mitauksilla saatava pintaresistanssi ole tarkalleen yhtälön (2.7) tarkoittama pintaresistanssi, vaan siihen sisältyy myös edellä kuvatulla tavalla määrätyt muut piirilevyn ja pinnoitteiden osaresistanssit. Kuitenkin pääosa vuotovirroista kulkee yleensä pitkin piirilevyn pintaa ja pinnoitteiden rajapintoja pitkin, jonka vuoksi IPC:n testikuviomittauksissa saatava resistanssi on suhteellisen lähellä todellista pintaresistanssia. Jos jokin ilmiö testeissä muuttaa tilannetta, ei enää voida puhua pelkästä pintaresistanssista, vaan on puhuttava johdinten välisestä eristysresistanssista, joka kattaa kaikki osatekijät.

Kaiken kaikkiaan piirilevyn johdinkuvion vuotovirtoihin (eristysresistanssiin) vaikuttavat ainakin seuraavat seikat, jotka on tiedostettava piirisuunnittelussa sekä testaustulosten tulkinnassa:

- johdinkuvion geometria, ts. eristysvälit ja johdinleveydet
- eristysväleihin jääneet metallipartikkelit
- suojapinnoitteen paksuus
- materiaalien ominaisresistanssit
- materiaalien koostumus, epäpuhtaudet ja lisäaineet
- pintojen likaantumisen ja veden aiheuttamat johtuvuustiet
- veden absorboituminen piirilevy- ja suojamateriaaleihin
- veden adsorboituminen materiaalien välisiin rajapintoihin (kapillaarinen adsorptio)
- suojapinnoitteen tiiviys ja adheesio suojattaviin pintoihin
- metallijohdinten pintojen hapettuminen/korrodoituminen.

Käyttöolosuhteissa, kun elektroniikkalaitte on jännitteettömänä, laitteen osien, mm. piirilevyjen, kosteus asettuu laitteen ulkopuolisen ilman määräämään tasapainotilaan. Jos kosteustaso on korkea, saattaa piirilevymateriaali (ja yleensä muovit) kostua siten, että laitteen käynnistymisessä tulee aluksi häiriöitä ennen kuin laite on kunnolla kuivunut. Tämän ilmiön takana on eristemateriaalin sähköjohtavuuden muuttuminen kosteuden muuttuessa ja ionien liikkuvuuden muuttuminen lämpötilan nousun vuoksi.

Kun kostunutta laitetta lämmitetään kuivassa ympäristössä, sen piirilevyjen kosteus alkaa alentua, jonka vuoksi kosteudesta johtuva vuotovirta pienenee. Kuitenkin samanaikaisesti laitteen lämmitessä ionien (pinnan ja materiaalin epäpuhtaudet, vesi) liikkuvuus kasvaa, mikä lisää vuotovirtaa. Näiden mekanismien yhteisvaikutuksesta materiaalin eristysresistanssi voi aluksi lyhytaikaisesti alentua alle kostean materiaalin resistanssin, kun laite lämpenee. Lämmitettyään ja kuivuttuaan kunnolla resistanssi palaa normaaliin kuivan materiaalin resistanssiin [Hvims & Jørgensen 1998].

Esimerkkinä vaikeasti tulkittavista kosteustestaustuloksista on kuvaan 2.8 poimittu Vahterin opinnäytetyössä saatu tulos, jossa eristysresistanssia mitattiin piirilevyn johdinkuviosta staattisessa kosteustestissä 85 °C / 85 % RH noin 496 h:n ajan pinnoittamattomista ja juotteenestopinnoitteella suojatuista piirilevyistä.

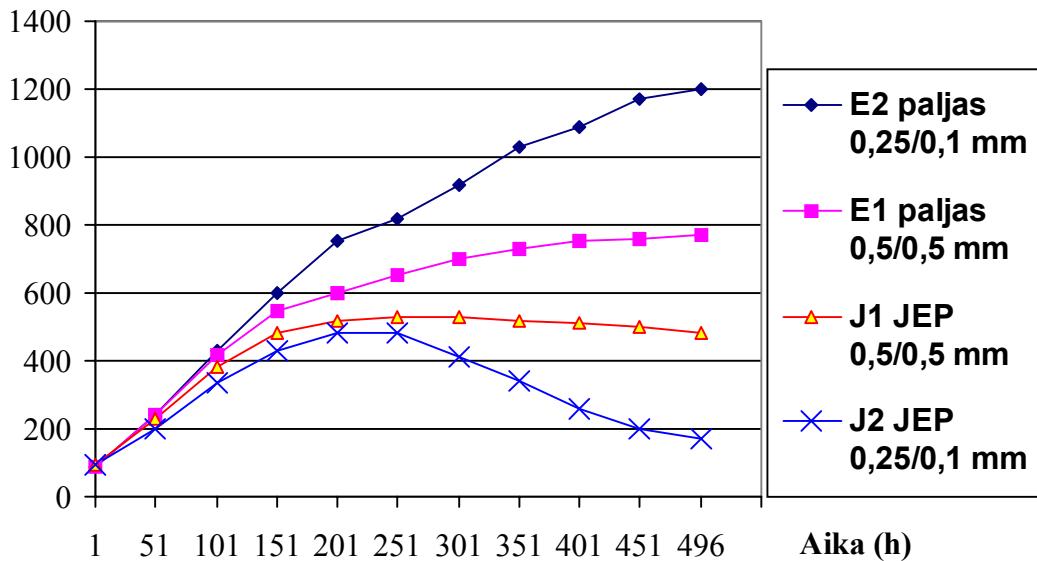
Siinä olivat johdinten leveyksinä ja eristysväleinä mm. taulukossa 2.2 mainitut yhdistelmät. Perustavoitteena oli tutkia johdin- ja eristysvälien sekä juotteenestopinnoitteen (JEP) vaikutusta piirilevyn eristysresistanssiin, jotta voitaisiin arvioida pintailmiöiden vaikutusta laitteiden toimintahäiriöihin ja sitä kautta korroosioherkkyyteen.

Taulukko 2.2. Johdinleveydet ja eristysvälit kosteustestissä [Vahter 1999].

Näyte	Johdinleveys *) (mm)	Eristysväli (mm)	Suojapinnoite	Määrä (kpl)
E1	0,5	0,5	Paljas	5
E2	0,25	0,1	Paljas	5
J1	0,5	0,5	JEP	5
J2	0,25	0,1	JEP	5

\*) Johdinkuvioiden pituus oli noin 29 cm, jossa oli kolme johdinta rinnakkain. Keskimääräinen johdin oli nollapotentiaalissa, toinen reunajohdin +5 V -jännitteessä ja toinen -5 V -jännitteessä.

#### Eristysresistanssi (Mega ohmia), mittaus- ja testaustasajännite 5 V



Kuva 2.8. Eristysresistanssin muutos kosteustestissä 85 °C / 85 % RH paljailla ja juotteenestopinnoitteella suojatuilla piirilevyillä (kukin piste on viiden piirilevyn mittauksen keskiarvo) [Vahter 1999].

Kuvan 2.8 näytteen E2, paljas johdinkuvio, 0,25/0,1 mm eristysresistanssi (pinta-resistanssi) kasvaa koko kosteustestin ajan. Periaatteessa odottaisi resistanssin pienenevän kosteuden ja korroosion vaikutuksesta. Näin ei kuitenkaan ole, vaan resistanssin kasvaminen voidaan selittää seuraavasti. Varsinaisen piirilevymateriaalin eristysresistanssi (pinta-resistanssi) kuivana on erittäin suuri ja tässä johdinkuviossa mitattuna em. näytteen E2 eristysresistanssi on alkutilanteessa ollut luokkaa 5 000 MΩ. Piirilevyn pinnan kostuessa heti testin alussa ei itse piirilevyn eristemateriaalin eristysresistanssilla ole suurta merkitystä, vaan pinnan epäpuhtaudet ja sillä oleva vesikerros määräävät eristysresistanssin arvon, joka tässä tapauksessa on luokkaa 100 MΩ.

Kun aika kuluu testissä, piirilevymateriaalin pinnalla voi tapahtua epäpuhtauksien haihtumista, ionien kulkeutumista pois eristysväleistä ja myös kuparisten johdinten hapettumista, jotka kaikki vaikeuttavat virran kulkua johtimesta toiseen. Tässä tapauksessa eristysresistanssi on 496 h:n kuluttua noussut arvoon 1 200 M $\Omega$ . Mikäli testiä olisi jatkettu, resistanssin arvo olisi alkanut laskea materiaalin sisällä mahdollisesti olevien ionien lähtiessä liikkeelle kosteuden vaikutuksesta.

Näyte E1, paljas johdinkuvio 0,5/0,5 mm, käyttäytyy samaan tapaan kuin näyte E2, mutta eristysresistanssin arvo nousee hitaammin. Osittain tämä resistanssin hitaampi kasvu voi johtua levyn pinnan epäpuhtauksien suuremmasta määrästä kuin näytteessä E2, mutta huomattavan paljon resistanssiin vaikuttaa tässä johdinten suurempi leveys, mikä leventää virran kulkutietä niin pinnalla kuin johdinten allakin.

Juotteenestopinnoitteella suojatuilla piirilevyillä johdinkuvion virrankulkutiet lisääntyvät, koska juotteenestopinnoite ja sen rajapinnat piirilevymateriaalin ja johdinkuparin välillä tulevat lisäksi, kuten kuvassa 2.5 on todettu.

Testin alussa juotteenestopinnoitteella varustettujen näytteiden J1 ja J2 eristysresistanssit ovat luokkaa 100 M $\Omega$ . Testin kuluessa näytteen J2 JEP 0,25/0,1 eristysresistanssi nousee aluksi, mutta alkaa noin 220 h:n kuluttua laskea ja on noin 180 M $\Omega$  496 h:n kohdalla. Tässä juotteenestopinnoitteeseen kertyvä vesi, pinnoitteen ja rajapintojen epäpuhtaudet ja piirilevymateriaalin johtuvuuden kasvaminen sekä hyvin kapea eristysväli 0,1 mm alentavat resistanssia, kun kosteuden vaikutus etenee. Aivan ilmeistä on, että ohut juotteenestopinnoite kosteassa heikentää eristystä verrattuna paljaaseen pintaan, mutta jos sen adheesio on hyvä, se suojaa alla olevia metallipintoja korroosiolta ja ulkoisen kontaminaation vaikutuksilta.

Miksi sitten leveämmällä johdinkuviolla varustetun näytteen J1 resistanssi on nyt suurempi kuin ohuemmin johtimin varustetun näytteen J2? Syy tähän on ilmeisesti leveämpi eristysväli, jossa juotteenestopinnoite haittaa virran kulkua johtimesta toiseen ja resistanssin pieneneminen tapahtuu nyt hitaammin kuin ohuella johdinvälillä. Tässäkin tapauksessa itse piirilevymateriaalin kautta tapahtuva virrankulku on vähäisempää kuin juotteenestopinnoitteessa ja pinnoilla.

Kuten tästäkin esimerkistä näkyy, on piirilevyn johdinkuvion eristysresistanssin (eristeen pintaresistanssin) arvo seurausta monista yhtäaikaista tekijöistä, joiden tulkinta on tehtävä huolellisesti paneutuen erilaisten vikamekanismien ilmenemistapoihin. Testien suorituksessa niin kuin piirilevyjen valmistuksessakin on

työn puhtaudella suuri vaikutus yksittäisiin testaustuloksiin, koska pintailmiöt kehittyvät sen mukaan, millaisia epäpuhtauksia pinnoilla on.

## 2.20 ESD-purkaukset ja korrosio

Staattisen sähköön purkaukset on yleinen ongelma elektroniikkatuotannossa, koska komponenttien vikaherkkyys suurienergisille virtapulsseille on suuri ja lisääntyy mikropiirien johdintiheyden kasvaessa. ESD-pulssit ovat tyypillisesti useita kilovoltteja tai muutamia kymmeniä kilovoltteja. Pulssien nousuajat voivat olla alle nanosekunnin ja pulssin kestoaikakin on nanosekuntien luokkaa. Tämän johdosta ESD-häiriöt etenevät laitteissa suurtaajuisina 1...2 GHz signaaleina, joiden etenemiseen vaikuttavat johtuvuusteiden aaltoimpedanssit ja pintojen ominaisuudet. Suuren taajuuden vuoksi ESD-häiriöt etenevät sekä rakenteiden välisen sähkömagneettisen säteilyn (rakenteet toimivat lähetys- ja vastaanottoantenneina) että pintoja pitkin etenevän virtapulssin muodossa.

Suuritaajuinen ESD-pulssi kulkee johtavilla alueilla lähinnä niiden pinnoilla ns. virranahdoilmiön, skin efektin, vuoksi. Tämän vuoksi piirilevyn ja komponenttien metallisten johdinalueiden pinnan laatu vaikuttaa siihen, miten ESD-häiriö etenee ja käyttäytyy laitteen sisällä.

Korrosio aiheuttaa ESD-pulssin etenemisen kannalta kahdentyyppisiä vikailmiöitä [Franey 1999]:

- Korrosio lisää metallialueiden pintaresistanssia ja vaikuttaa pintojen eristysominaisuuksiin pinnan dielektrisyysvakion muutosten kautta.
- Korrosio synnyttää metallialueiden pintaresistanssiin epäjatkuvuuskohdita katkaisten hyvin johtavan metallipinnan.

Esim. kuparin pinnalle muodostuu korroosion vaikutuksesta tyypillisesti oksidi tai kuparisulfidikerros, joiden resistanssi on alkuvaiheessa piko- tai mikro-ohmien luokkaa. Suurempi vaikutus ESD:n kannalta on kuitenkin pinnan kapasitanssin muuttumisella, koska oksidien ja sulfidien dielektrisyysvakio on paljon suurempi kuin ilman. Metallin pintaan muodostuu kapasitanssi, joka eristää ja nostaa sitä jännitettä, jolla nopea ESD-pulssi purkautuu ao. pinnalle. Mitä suurempi purkausjännite on, sitä suurempi vikaantumisriski myös on.

Metallialueiden pintaresistanssin epäjatkuvuuskohdat syntyvät korrodoituneisiin kohtiin. Koska ESD-pulssi etenee metallien pinnoilla virranahdon vuoksi, tapahtuu näistä epäjatkuvuuskohdista virtapulssin heijastuksia, jotka edestakaisin liik-



kuessaan nostavat pulssin amplitudia ja aiheuttavat enemmän vikoja kuin, jos kulkuteiden impedanssit olisivat hyvin sovitettuja koko matkalla. Korroosio saattaa näin ollen muuttaa ESD-pulssien kulkureittejä (maadoitukset) ja pilata hyvin suunnitellun suojauksen.

Kuvatut suurtaajuisten ESD-pulssien käyttäytymiseen vaikuttavat korroosion aiheuttamat pintailmiöt vaikuttavat laitteiden vikaantumisriskiin huomattavasti aikaisemmin kuin tavanomaiset kontaktiviatiat, eristysresistanssin muutokset ja johdinten poikkisyöpyymiset. Tämän vuoksi komponenttien pakkaustiheyden kasvataminen vaatii parempaa korroosiosuojausta kuin mihin on totuttu. Myös toimintataajuuksien nouseminen yli 1 GHz edellyttää suunnittelijoilta parempaa pintailmiöiden ja korroosiomekanismien huomioonottamista.

## 2.21 Virranahho (skin effect) ja korroosio

Elektroniikassa käytetään yleisesti taajuuksia alueella 1,0...2 000 MHz. Myös pääosa laitteiden EMC/ESD-ongelmista esiintyy tällä taajuusalueella. Taajuuden noustessa sähkövirta keskittyy virranahhoilmiön vuoksi johteiden pinnoille. Tämän vuoksi metallipintojen korroosio vaikuttaa myös virranahhoilmiön kautta laitteiden sähköiseen toimivuuteen. Korroosio kasvattaa metallipintojen resistansseja, pienentää niiden poikkipinta-aloja ja kehittää johdinten välille johtavuuspolkua. Näiden seurauksena johdinten impedanssiin tulee paikallisia epäjatkuvuuskohtia, mikä lisää heijastuksia virtojen kulkuteillä ja vääristää signaalien muotoja ja vaihekulmia. Tämä näkyy signaalikohinana sekä nopeiden häiriöiden, kuten ESD-pulssien, hitaampana vaimenemisena hyvätuntuisesta maadoitustekniikasta huolimatta.

Tasavirta jakaantuu tasaisesti homogeeniseen sähköjohteeseen, mutta vaihtovirta keskittyy virranahhoilmiön vuoksi sähköä johtavien materiaalien pinnan läheisyyteen, kun virran taajuutta nostetaan. Virta keskittyy sille pinnan puoliskolle, josta se syötetään johtimelle, taikka säteilyn tapauksessa sille puolelle, josta säteily tulee. Näin ollen koaksiaalisissa tapauksissa virta voi keskittyä joko ulko- tai sisäpinnoille riippuen syötön ja kytketymisen laadusta. Virranahhoilmiön ilmaistamiseen [Ramo 1953, s. 237...238] käytetään virran tunkeutumissyvyyttä ( $\delta$ ), joka tarkoittaa johteen pinnasta laskettua syvyyttä, jossa virran tiheys on laskenut  $1/e$ -osaan sen arvosta pinnalla ( $e = 2,71828$ ). Kaava 2.8 on johdettu tasomaiselle johtimelle; se soveltuu kuitenkin käytännössä minkä tahansa muotoisen johtimen tunkeutumissyvyyden laskemiseen.

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}, \quad (2.8)$$

missä  $\delta$  on virran tunkeutumissyvyys (m)

$\pi$  on 3,14159

$f$  on virran taajuus (Hz)

$\mu$  on materiaalin magneettinen permeabiliteetti (H/m)

$\sigma$  on materiaalin johtuvuus ( $1/\Omega\text{m}$ ).

Virran tunkeutumissyvyyden pieneneminen nostaa vastaavasti johdinten impedanssia. Impedanssin reaaliosaa, pintaresistanssia  $R_s$ , kuvaa yhtälö

$$R_s = \sqrt{\frac{\pi f \mu}{\sigma}}, \quad (2.9)$$

missä  $R_s$  on pintaresistanssi ( $\Omega/\square$ , ohmia/neliö)

Materiaalin impedanssin reaktiivisen osan ( $2\pi f \cdot L_i$ ) itseisarvon suuruus on kaikilla taajuuksilla samansuuruinen kuin reaaliosa  $R_s$ . Näin ollen impedanssin vaihekulma materiaalissa on aina  $45^\circ$ .

Taulukkoon 2.3 on koottu muutamien metallien tunkeutumissyvyyttä ja pintaresistanssia kuvaavat likiarvoyhtälöt.

Diamagneettisilla metalleilla, kuten kupari, alumiini, hopea, messinki ja tina magneettinen permeabiliteetti  $\mu$  on  $4\pi \cdot 10^{-7}$  H/m.

Esim. kuparilla virran tunkeutumissyvyys on taajuudella 10 MHz n. 20  $\mu\text{m}$  ja taajuudella 1 000 MHz enää n. 2  $\mu\text{m}$ . Juotostinalla tunkeutumissyvyys on noin 2,8-kertainen kupariin verraten. Pintaresistanssit ovat kuparilla taajuudella 10 MHz n. 0,8  $\text{m}\Omega/\square$  ja taajuudella 1 000 MHz n. 8  $\text{m}\Omega/\square$ . Tätä taustaa vasten piirilevyillä käytetyn johdinkuvion pinnan korrodoitumisella alkaa olla huomattavampi merkitys virranhahtoilmiön tuomiin haittoihin yli 100 MHz taajuuksilla.

Taulukko 2.3. Eräiden diamagneettisten metallien virran tunkeutumissyvyys ja pintaresistanssi taajuuden funktiona [Ramo & Whinnery 1953, s. 240].

Materiaali	Johtuvuus, $\sigma$	Tunkeutumissyvyys, $\delta$	Pintaresistanssi, $R_s$
	$10^7/\Omega\text{m}$	m	$10^{-7}\Omega/\square$
Hopea	6,17	$\frac{0,0642}{\sqrt{f}}$	$2,52 \cdot \sqrt{f}$
Kupari	5,80	$\frac{0,0660}{\sqrt{f}}$	$2,61 \cdot \sqrt{f}$
Alumiini	3,72	$\frac{0,0826}{\sqrt{f}}$	$3,26 \cdot \sqrt{f}$
Messinki	1,57	$\frac{0,127}{\sqrt{f}}$	$5,01 \cdot \sqrt{f}$
Juotostina	0,706	$\frac{0,185}{\sqrt{f}}$	$7,73 \cdot \sqrt{f}$

$$\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

## 2.22 Lämpöpaukahtelu, popcorn-ilmiö

Eräs elektroniikan juottamiseen liittyvä ilmastoperäinen ongelma-alue on esim. komponenttien muovikoteloiden taipumus absorboida itseensä vettä kuljetusten ja varastoinnin aikana. Vettä voi päästä sisään myös johdinten ja kotelon rajapinnasta. Tämän seurauksena komponentit voivat jopa paukahdella (räjähdellä, popcorning) juotettaessa aivan kuin paukkumaissi, koska juotoslämpötilassa veden tilavuus kasvaa 1 200-kertaiseksi sen höyrystyessä [Pecht 1995 ja 1994]. Koteloidun komponentin eri osiin päässyt vesi aiheuttaa murtumia ja voi repiä komponentin eri osia irti toisistaan esim. puolijohdepalan alustastaan ja kotelosta. Vauriot eivät välttämättä ulotu kotelon pinnalle asti vaan voivat jäädä piileviksi vioiksi.

## 2.23 Materiaalien korrosiivisuuden testaaminen

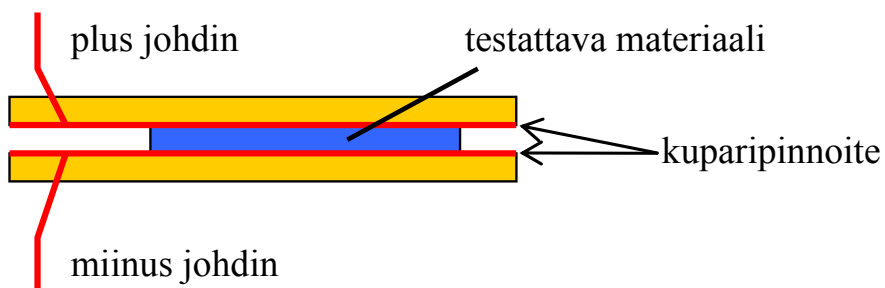
Monet elektroniikassa käytettävät materiaalit voivat sisältää aineita, jotka sellaisenaan tai kemiallisesti muuttuessaan, voivat aiheuttaa korroosiota. Korrosio voi tapahtua materiaalin kaasumaisten tai nestemäisten päästöjen johdosta taikka suorasta kontaktista kyseisen materiaalin kanssa (kohta 3.4).

Korroosioriskin arvioimiseksi voidaan käyttää erilaisia kemian analyttisiä menetelmiä, mutta nämä eivät välttämättä anna suoraa tietoa siitä, onko jokin korrodoiva aines todellinen riski vaiko ei. Lisäksi olisi oltava jonkinlainen näkemys siitä, mitä ollaan etsimässä. Havaitut vieraiden aineiden määrät ovat yleensä niin pieniä, ettei niiden vaikutusta kyetä varmuudella arvioimaan todellisissa olosuhteissa.

Riippumatta siitä onko kyseessä haihtuva yhdiste tai materiaaliin pysyvämmiin sitoutunut yhdiste, voidaan seuraavalla yksinkertaisella keinolla tarkistaa, minkä tasoinen ja tyyppinen korroosioriski kyseisen materiaalin käytöllä on. Periaatteena on asettaa tutkittava aine kontaktiin kuparipinnan kanssa, altistaa se halutuille olosuhteille ja katsoa sitten, mitä kontaktipinnoissa tapahtuu.

Menettely soveltuu esim. rakenne-, tiiviste- ja täyttemateriaalien testaamiseen, jolloin kokeillaan kuinka tutkittava aine korrodoi kuparia korkeassa lämpötilassa ja kosteudessa. Jos korroosiotapahtuu, voidaan analysoida syntyneet korroosiotuotteet ja verrata niiden koostumusta kyseisen materiaalin koostumukseen, jolloin kyetään jäljittämään todellisia korroosioriskejä. Testausolosuhdetta kannattaa aluksi kokeilla vahvasti kiihdytettyinä, jolloin saadaan nopeasti selvä reaktio. Kun saadaan näyttöä korroosioriskistä, lievennetään olosuhteita kohti tavallisempia olosuhteita ja testataan, tapahtuuko sama ilmiö myös näissä olosuhteissa.

Kuvissa 2.9 ja 2.11 on esitetty kaksi tapaa liittää tutkittava materiaali kosketuksiin kuparin pinnan kanssa. Oleellista on käyttää myös sopivaa tasajännitettä, jotta saadaan selkeästi näkyviin anodi- ja katodireaktiot sekä vaeltaminen. Yleensä erilaisissa elektroniikan rakenteissa johdinten välillä on jännite, mikä osaltaan kiihdyttää korroosiomekanismeja.

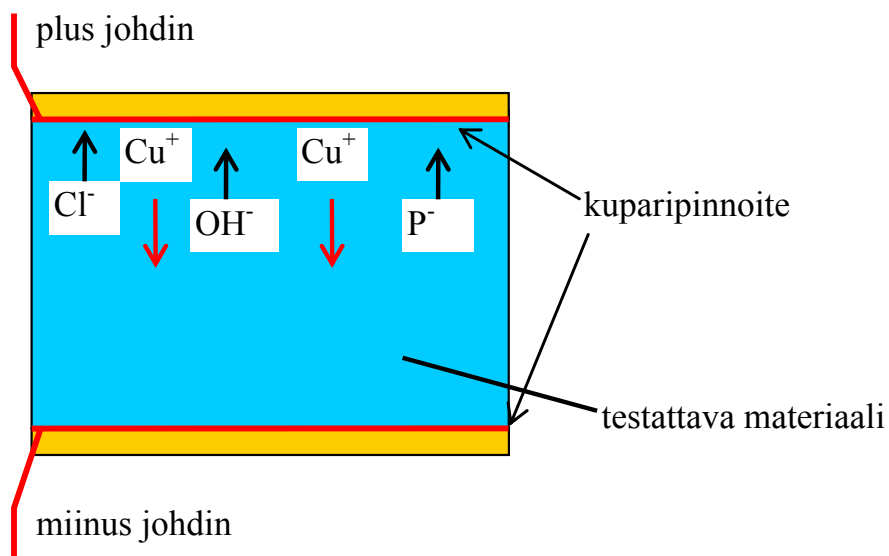


*Kuva 2.9. Materiaalin korrosiivisuuden testaaminen käyttäen kaksipuolista kuparipintaa.*

Testausolosuhteena voidaan aluksi käyttää esim.  $T = 85\text{ }^{\circ}\text{C}$  ja  $\text{RH} = 85\%$ , jolloin muutaman päivän tai viikon aikana on mahdollista saada aikaan näkyvää kor-

roosiota. Jännitteeksi riittää 10...15 V. Osat on puristettava yhteen testin ajaksi sopivalla sähköisesti eristetyllä jousimekanismilla. Suurijännitteisiä sovelluksia tutkittaessa on aiheellista käyttää lähellä käytännön sovellusta olevaa jännitettä, koska se saattaa olla ratkaiseva ko. materiaalin käyttäytymisen kannalta.

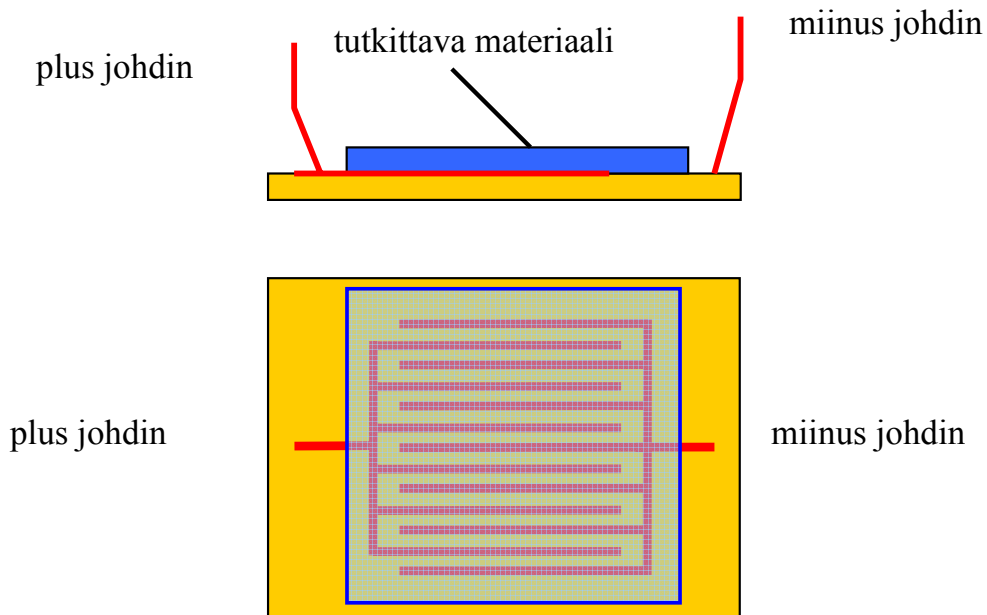
Kuvan 2.9 rakenteessa tapahtuva korroosiomekanismi on kuvan 2.10 kaltainen. Plus-johtimen ja testattavan materiaalin raja-alueella tapahtuu korroosioreaktioita, kun materiaalissa olevat mahdolliset korrodoivat aineet kulkeutuvat sähköjännitteen ajamina plus-johtimelle, josta puolestaan kupari-ionit vaeltavat tutkittavaan materiaaliin. Analysoimalla plus- ja miinus johtimien puoleisia tutkittavan materiaalin pintoja, löydetään niitä ainesosia, jotka voivat aiheuttaa korroosiota. Kuvan 2.9 tapauksessa pääosa korroosiosta tapahtuu plus johtimen puolella. Analyysi on helppoa, koska tutkittavat pinnat ovat laajoja. Jo visuaalinen tarkastus osoittaa korroosioherkkyyden ko. materiaalilla. Menettelyä voi käyttää eri materiaalien korroosioherkkyyden arviointiin. Luonnollisesti on varmistettava ettei tutkittaville Cu-pinnoille ole jäänyt epäpuhtauksia, jonka vuoksi ne on syytä puhdistaa ennen testiä. Samaten on varmistettava ettei testausolosuhteista tule korrodoivia aineita.



*Kuva 2.10. Materiaalin korrosiivisuuden testaaminen, korrodoituminen tapahtuu pääosin plusjohtimen ja materiaalin raja-alueella.*

Kuvassa 2.11 on käytetty tavanomaista eristysresistanssin mittaukseen tarkoitettua piirilevyn testikuviota standardista: IPC-9201 Surface Insulation Resistance Handbook/IPC-B-25A Multi-purpose Test Board.

Kuvassa 2.11 tutkittava materiaali asetetaan testikuvion päälle ja jännite kytketään kuvion plus ja miinus johtimiin. Tämän sormikuvion käyttäminen vaatii tarkempaa paikallista analyysitekniikkaa, mutta se mahdollistaa myös paremmin kuin kuvassa 2.9 esitetty menettely jäljittämään korroosioriskejä, joissa ko. materiaali on kosketuksissa johdinkuvion kanssa. Tässä näkyvät myös puhtaan metallin että korroosiotuotteiden vaeltaminen.



*Kuva 2.11. Materiaalin korrosiivisuuden testaus käyttäen yksipuolista kuparipintaa ja IPC:n testikuviota.*

Em. tavalla tehdyn testialtistuksen jälkeen tehdään yleensä visuaalinen pintojen tarkastus ja valokuvaus, joiden jälkeen analysoidaan esim. röntgen fluoresenssimenetelmällä syntyneiden korroosiotuotteiden koostumus.

Tärkeätä on varmistaa ennen johtopäätösten tekoa, että tutkittavassa materiaalissa on samoja aineita kuin korroosiotuotteissa. Tässä voidaan käyttää mm. seuraavia menetelmiä.

Materiaalin koostumusta voidaan tutkia esim. röntgen fluoresenssimenetelmällä (XRF, X-ray fluorescence spectroscopy), jolla havaitaan fluori ja sitä raskaamat aineet.

Materiaalin mahdollisesti korrodoivia haihtuvien jaokkeiden päästöjä voidaan puolestaan mitata kaasukromatograafilla, jossa tutkittavia materiaalinäytteitä lämmitetään ampullissa halutussa lämpötilassa (esim. 60 °C ja 100 °C) haluttu aika ja analysoidaan sitten niistä massaspektrometrillä haihtuvien orgaanisten yhdisteiden määrä (HS GC-MS headspace and gas chromatography).

### 3 Vesiliuokset ja pintajännitys

#### 3.1 Ionisoituminen

Atomit ja molekyylit ovat sähköisesti neutraaleja aineen elementtejä. Kun niistä kemiallisen tai fysikaalisen reaktion kautta poistuu varautuneita hiukkasia (elektroneja tai protoneita), syntyy ioni. Poistuvat varautuneet hiukkaset voivat olla myös ioneja.

Atomi	$\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^{-}$	rauta
Molekyyli	$\text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^{-} + \text{H}^{+}$	etikkahappo
Molekyyli	$\text{NaCl} \rightarrow \text{Na}^{+} + \text{Cl}^{-}$	suola ( $\text{Cl}^{-}$ = kloridi)

Suuret orgaaniset molekyylit voivat ionisoitua sisäisesti, niin että molekyylin eri päihin syntyy vastakkaismerkkiset varaukset. Tällaiset makro-ionit ovat yleisiä biologisissa toiminnoissa ja voivat näytellä merkittävää osaa mikrobiologisessa korroosiossa (MIC microbiologically influenced corrosion).

Korroosioreaktioissa sähkövirtaa välittävät elektrolyytissä (liuoksessa) siihen liuenneet ionit. Näiden ei tarvitse olla korrodoituvasta metallista peräisin, eivätkä usein olekaan, vaan pinnalle tulleista epäpuhtauksista. Esim. suolaliuos sisältää jo sinällään natrium- ja kloridi-ioneja. Veden ominaisuuksiin myös kuuluu, että se ionisoituu itsessään jonkin verran.

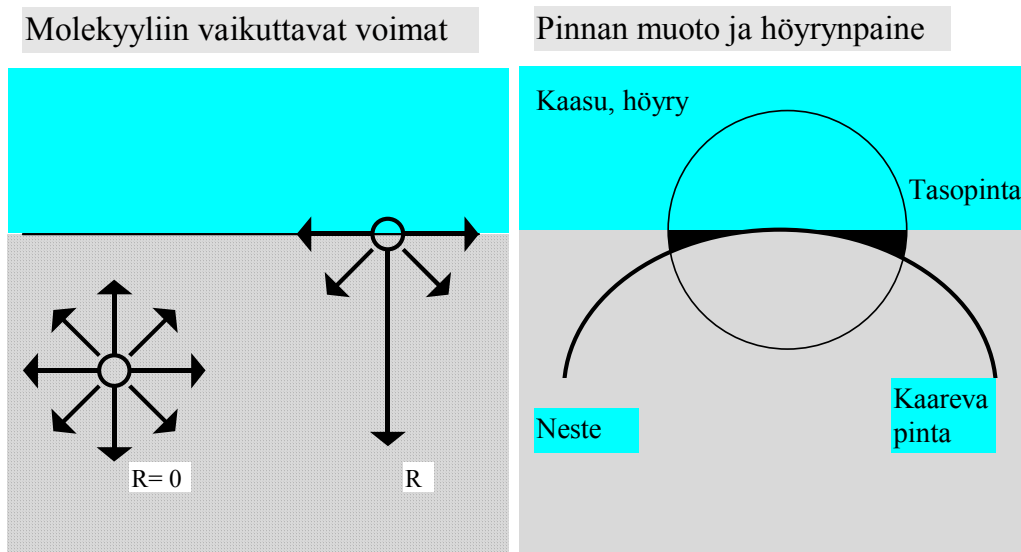


Neutraali puhdas vesi sisältää  $10^{-7}$  mol/dm<sup>3</sup> vety-ioneja (pH = 7). Veden ionisoituminen tekee mahdolliseksi hajottaa sitä sähkövirran avulla.

#### 3.2 Höyryn tiivistyminen nesteeksi

Kuvaan 3.1 on merkitty ympyrällä nestemolekyylit nesteen ja kaasun rajapinnassa [Tommila 1965]. Nesteen sisällä kokonaan oleviin molekyyleihin kohdistuvat naapurimolekyyliden koheesivoimat eri suunnista samansuuruisina, kun molekyylit ovat keskellä nestettä. Vasemmanpuoleisessa kuvassa R on molekyyliin kohdistuvien koheesivoimien resultantti. Nesteen ja kaasun rajapinnalla molekyyliin kohdistuu suurempi voima nesteestä kuin yllä olevasta kaasusta, tästä syntyy nesteen pintajännitys.

Myös pinnan muoto vaikuttaa nesteen ja kaasun rajapinnalla nestemolekyylien välisten koheesivoimien kokonaisarvoon. Tasopinnalla nestemolekyyliin kohdistuvien koheesivoiman suuruutta kuvastaa ympyrän alapuoliskon pinta-ala (oikean puoleinen kuva 3.1). Jos molekyyli on kuperalla pinnalla, on nesteen molekyylien koheesivoima oikeanpuoleiseen kuvaan mustalla merkittyä pinta-alaa vastaavasti pienempi kuin tasopinnalla. Kuperapintaisen nesteen höyrynpaine on suurempi kuin tasopintaisen, koska molekyylien välisten koheesivoimien resultantti on nesteeseen päin pienempi. Vastaavasti koveralla pinnalla nesteen höyrynpaine on pienempi kuin tasopinnalla.



*Kuva 3.1. Molekyyli voimat ja kuperan pinnanmuodon vaikutus nesteen höyrynpaineeseen.*

Näin ollen molekyyli irtautuu pinnasta sitä helpommin mitä kuperampi rajapinta on. Tästä seikasta seuraa, että nestepisarassa (joka on pyöreähkö) höyrynpaine on suurempi kuin tasopintaisen nesteen höyrynpaine. Tavallisella höyrynpaineella tarkoitetaan juuri tasopintaisen nesteen höyrynpainetta.

Tämä rajapinnan kaarevuuden vaikutus höyrynpaineeseen tulee näkyviin vasta hyvin pienillä pisaroilla, halkaisijaltaan 1  $\mu\text{m}$  pisarassa höyrynpaineen suhde tasopinnan höyrynpaineeseen on vain 1,0011 ja 10 nm pisarassa 1,11. Pisanan säteen ollessa 1 nm suhde on jo lähes 3, ts. pisanan höyrynpaine on noin kolminkertainen tasopintaan verraten.

Näin ollen pienet pisarat hajoavat höyryksi helpommin kuin neste tasopinnalta. Tämä näkyy esim. vedellä, jolla kiehumispisteessä höyrynpaine on luokkaa 100 kPa. Lämpötilaltaan juuri höyrystymispisteen alapuolelle jäädytetyssä vesihöyryssä ei voi tapahtua veden tiivistymistä pisaroiksi, koska molekyylien läm-



pöliikkeen tuottamissa törmäyksissä syntyy vain hyvin pieniä pisaroita, joiden höyrynpaine on paljon suurempi kuin 100 kPa, jonka vuoksi ne haihtuvat höyryksi saman tien ja höyry ylikyllästyy.

Jotta nestepisaroiden koko voisi kasvaa, on ympäristön paineen oltava vähintään pisaran höyrynpaineen suuruinen. Näin ollen tiivistymiskeskuksiksi kelpaavia pisaroita voi syntyä vain vahvasti ylikyllästetyssä höyryssä. Käytännössä ylikyllästetyksen (höyryn määrän) on oltava 4...5-kertainen, jotta syntyisi kasvamis-kykyisiä tiivistymiskeskuksia riittävän usein.

Kun kylläinen höyry on astiassa, adsorboituu astian seiniin molekyylikerros. Koska pinnalla olevan molekyylikerroksen höyrynpaine pienenee seinämateriaalin adheesion vuoksi, tiivistyy seinämään jatkuvasti lisää nestettä. Tämä edistää osaltaan esim. veden kondensoitumista kiinteille pinnoille.

Mikäli höyryn seassa on ilmaa (typeä), tämä ehkäisee höyrymolekyylien tuloa seinämälle ja höyry ylikyllästyy helposti, koska tiivistymistä ei tapahdu.

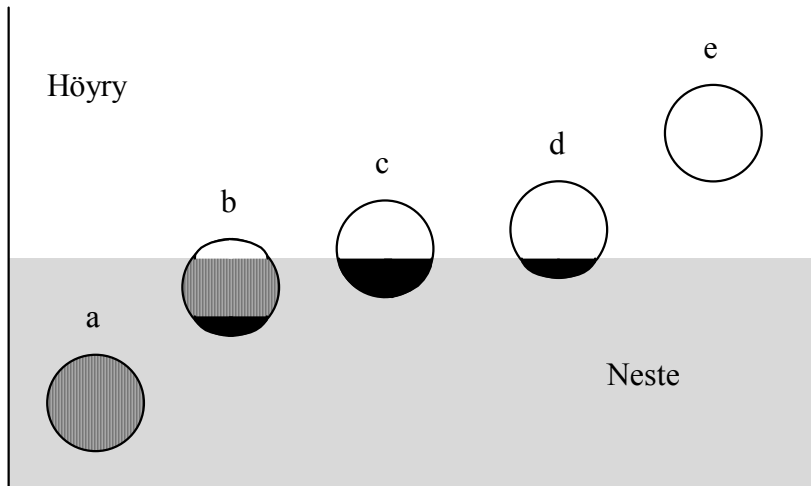
Jos höyryn seassa on pölyhiukkasia, adsorboituu niiden pintaan nestemolekyyliä, jolloin niistä muodostuu tiivistymiskeskuksia. Sähköllä varautuneiden pisaroiden höyrynpaine on alhaisempi kuin varauksettomien pisaroiden. Tämän vuoksi vesionien ympärille muodostuu vesipisara vähäisemmällä ylikyllästetyksellä kuin ionisoitumattomassa höyryssä. Pölyllä ja ionisoitumisella on näin ollen suuri merkitys veden tiivistymiselle esim. pilvissä ja sateen muodostuksessa samoin kuin laitteiden sisällä ja niiden ympäristössä.

Kuten edellä todettiin, höyrynpaine on koveralla pinnalla pienempi kuin tasopin-  
nalla. Tämän vuoksi kapillaariputkissa höyrynpaine on normaalia pienempi eikä neste höyrysty niistä niin helposti kuin kuperilta ja tasopinnoilta. Tällöin ohuetkin vesikerrokset säilyvät kapillaarisissa oloissa. Onkin siksi hyvin ymmärrettävää, että korroosio kapillaareissa on paljon voimakkaampaa kuin avoimilla pinnoilla.

Nestettä lämmitettäessä se ylikuumenee helposti, koska pienen nesteessä olevan höyrykuplan pinnassa nesteen höyrynpaine on alhaisempi pinnan koveruuden vuoksi eikä höyrykuplia pääse muodostumaan. Ts. nesteessä olevan höyrykuplan höyrynpaine on suurempi kuin nesteen höyrynpaine, jonka vuoksi nesteestä ei siirry ainetta kuplaan. Kiehumisen käynnistymistä edistävät vedessä olevat epäpuhtaudet ja esim. astian pinnan epätasaisuudet, joissa terävät kärjet toimivat kuplien muodostuskeskuksina.

### 3.3 Pintajännitys

Pintajännitys [Tommila 1965] on aineen molekyylien välinen voima, joka vetää esim. nestepintaa kasaan ja saa esim. painottomassa tilassa nestepisaran muotoutumaan palloksi. Pintajännityksen suuruus vaihtelee nesteen laadun ja siihen liuenneiden aineiden mukaan. Nesteillä, kaasuilla ja kiinteillä aineilla on kullakin oma pintajännityksensä, mikä vaikuttaa toisiinsa kosketuksissa olevien rajapintojen käyttäytymiseen ja esim. nesteen imeytymiseen huokoisen kiinteän aineen sisään.



Kuva 3.2. Pintajännityksen syntyminen [Tommila 1965].

Kiinteän aineen, nesteen ja kaasun molekyylien välillä vallitsee koheesivoima, jonka suuruus pienenee nopeasti etäisyyden kasvaessa. Jokaista molekyyliä voidaan sanoa ympäröivän vaikutuspallo, jonka suuruus ja suuntautuminen riippuu molekyylin sijainnista muihin molekyyliin nähden.

Molekyyliin, joka on nesteen sisällä, kohdistuvien muiden molekyylien koheesivoimat kumoavat toisensa (tilanne a kuvassa 3.2). Kun molekyyli siirtyy keskeltä nesteen rajapinnalle ja siitä ulos, muuttuu siihen kohdistuvan voimaresultantin suuruus ja suunta kuvaan merkittyjen tummennettujen tilavuuksien suhteessa (sijainnit a...e).

Nesteen sisällä vaikutuspallossa vain varjostettua tilaa vastaavat voimat kumoavat toisensa ja mustaa alaa vastaavat voimat jäävät kumoamatta, koska kaasutilaan (höyry) ulottuvaan osaan kohdistuu yläpuolelta paljon pienempi voima.

Näin ollen pinnalla oleviin molekyyliin kohdistuu nesteeseen suuntautuva voima, joka on suurimmillaan juuri pinnan tasossa olevalla molekyylillä. Nestepinnan yläpuolella tämä voima pienenee ja häviää lopulta kokonaan (asema e).

Nesteen pintaan syntyy tämän resuloivan voiman ansiosta ikään kuin jännitetty kalvo, joka pyrkii supistumaan mahdollisimman pieneksi. Tätä pinnan ominaisuutta nimitetään pintajännitykseksi. Nestepisara, joka putoaa vapaasti, hakeutuu lähes pallomaiseen muotoon pintajännityksen ansiosta. Todellisuudessa pisara litistyy putoamissuunnassa ilman virtausvastuksen vuoksi.

Pintajännityksen suuruus on aineominaisuus, joka on sekä kiinteillä aineilla, nesteillä ja kaasuilla. Pintajännityksen suuruus riippuu vastakkain olevista aineista, seossuhteista, lämpötilasta jne.

Veden pintajännitys ilmaa vasten on  $72,8 \cdot 10^{-3}$  N/m lämpötilassa 20 °C. Orgaanisilla aineilla huoneen lämpötilassa se on luokkaa  $20...30 \cdot 10^{-3}$  N/m. Kiinteätä ainetta tai toista nestettä vasten pintajännityksen arvo muuttuu, koska rajapinnassa toisesta aineesta kohdistuvat voimat vaikuttavat pintajännityksen suuruuteen. Elohopean pintajännitys lämpötilassa 15 °C on  $436 \cdot 10^{-3}$  N/m ja sulassa tilan olevien metallien noin  $1\,000 \cdot 10^{-3}$  N/m (esim. Zn:llä  $782 \cdot 10^{-3}$  N/m).

### 3.4 Pintajännitystasapaino kolmen faasin tapauksessa

Jos nesteen (B) pinnalle laitetaan pisara toista nestettä (C) ja sen yläpuolella on ilmaa (A), voi tilanne muistuttaa kuvassa 3.3 esitettyä [Tommila 1965]. Oletetaan ettei neste C liukene nesteeseen B. Tällöin nesteiden ja ilman yhteiseen rajaviivaan vaikuttaa kolme pintajännitystä ja tasapainotilassa on voimassa yhtälö:

$$\gamma_{AC} \cos \alpha + \gamma_{BC} \cos \beta = \gamma_{AB} \quad (3.1)$$

Koska kulman kosini on aina enintään yksi, tasapaino muodostuu vain, jos

$$\gamma_{AC} + \gamma_{BC} > \gamma_{AB} \quad (3.2)$$

Tällöin pisara (C) asettuu lissimäiseksi nesteen B pinnalle.

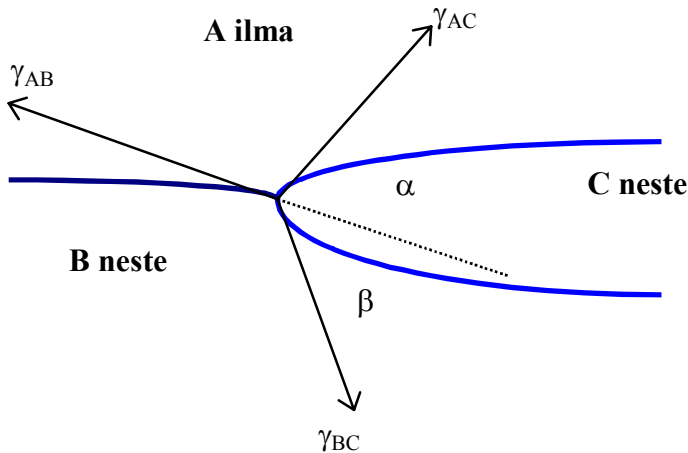
Jos

$$\gamma_{AC} + \gamma_{BC} < \gamma_{AB} \quad (3.3)$$

nestepisara (C) leviää rajattomasti pitkin pintaa.

Jos esim. C on pitkäketjuinen hiilivety ja B on vesi,  $\gamma_{AC}$  on n. 30,  $\gamma_{AB} = 73$  ja  $\gamma_{BC} = 57$  ( $10^{-3}$  N/m). Tällöin  $\gamma_{AC} + \gamma_{BC} = 87$ , mikä on  $> \gamma_{AB}$  ja hiilivety C asettuu pisaraksi veden pinnalle. Jos C on öljyhappo,  $\gamma_{AC} = 32$ ,  $\gamma_{BC} = 16$  ja  $\gamma_{AC} + \gamma_{BC} = 48$  ( $10^{-3}$  N/m), mikä on paljon pienempi kuin  $\gamma_{AB} = 73$ , joten öljyhappo leviää veden pinnalle.

### Pintajännitykset kolmen aineen yhteisellä rajaviivalla



Kuva 3.3. Pintajännitystasapaino nesteiden B ja C sekä ilman A välillä.

Myös kiinteillä aineilla on pintajännityksensä. Jos tasaisella pinnalla on nestepisara, sen muoto on kuvan 3.4 tapausten 1 ja 2 mukainen sen mukaan, mikä on tasomateriaalin ja nesteen pintajännitysten suhde [Tommila 1965, Kalliorinne et al. 1990]. Kiinteän aineen ja nesteen C välinen pintajännitys on tasopinnan suuntainen, koska pinta ei taivu. Kuvaan on merkitty myös nestepinnan muoto astiassa esim. kapillaariraossa. Tapauksessa 1 neste kastelee kiinteän pinnan ja nousee myös pintaa ylöspäin astiassa, mutta kun tapauksessa 2 neste asettuu pisaraksi, se pyrkii myös loitontumaan (hylkimään) astian kiinteältä pinnalta. Tapauksessa 1 nesteen ja kiinteän aineen adheesiovoimat ovat suuremmat kuin nesteen koheesiovoimat ja tapauksessa 2 taasen nesteen koheesiovoimat ovat suuremmat kuin adheesiovoimat.

Nyt reunakulma  $\Theta$  määräytyy seuraavasti:

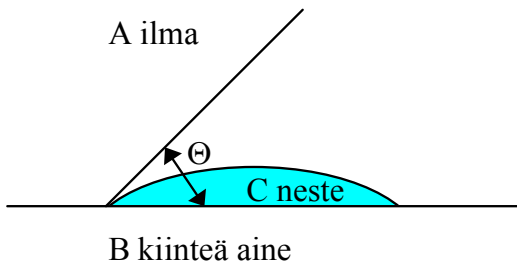
$$\gamma_{AC} \cos \Theta + \gamma_{BC} = \gamma_{AB} \quad (3.4)$$

Kun pintajännitys välillä kaasu-kiinteä ( $\gamma_{AB}$ ) on suurempi kuin välillä neste-kiinteä ( $\gamma_{BC}$ ),  $\cos \Theta$  on positiivinen ja  $\Theta$  pienempi kuin  $90^\circ$  ts. tilanne on tapauksen 1 mukainen ja nestepisara leviää alustalle ja kastelee sen hyvin ts. rajapinta pyrkii kasvamaan.

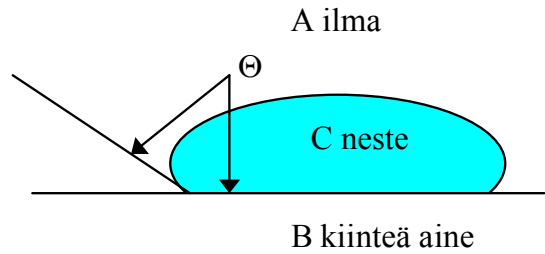
Jos pintajännitys välillä neste-kiinteä ( $\gamma_{BC}$ ) on suurempi kuin välillä kaasu-kiinteä ( $\gamma_{AB}$ ),  $\Theta$  on välillä  $90 \dots 180^\circ$  ja tilanne on tapauksen 2 mukainen, jossa neste ei kastele kiinteää alustaa ts. nesteen ja kiinteän alustan rajapinta pyrkii pienene- mään ja neste vetäytyy kokoon.

### Neste ja kiinteän aineen pinta

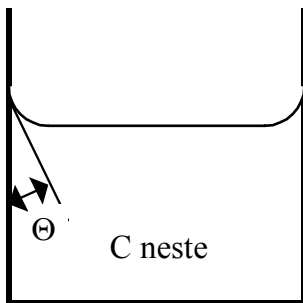
Tapaus 1  $\gamma_{AB} > \gamma_{BC}$



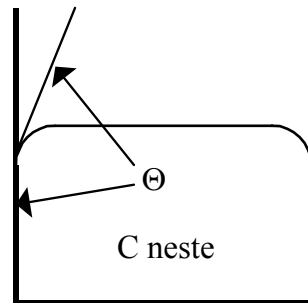
Tapaus 2  $\gamma_{AB} < \gamma_{BC}$



Neste C nousee astian seinille



Neste C karttaa astian seinää



*Kuva 3.4. Nestepisara kiinteällä alustalla ja vastaava neste astiassa [Tommila 1965].*

Kun kyseessä on neste ja kaasu (esim. vesi ja ilma), on nesteen kosketuskulma lasipintaan yleensä nolla ( $\Theta = 0^\circ$ ) paitsi elohopealla, jolla kosketuskulma on noin  $140^\circ$  [Levine 1981, s. 326].

Pienen pintajännityksen omaavat nesteet, kuten alkoholit, kastelevat usein pinnan paremmin kuin vesi.

Piirilevyjen juottamisessa tavoitteena on aina mahdollisimman hyvä juottuvuus ja näin ollen tapauksen 1 mukainen tilanne. Tätä tietoa juotteen (juotostina) ja juotettavan metallin rajapinnan muodosta käytetään hyväksi juotteen laadun visuaalisessa tarkastuksessa. Jos juotteen muoto on tapauksen 1 mukainen, todennäköisesti myös koko juotos on onnistunut. Jos muoto on tapauksen 2 mukainen, todennäköisesti juotokset ovat huonoja eikä juotettava pinta ole kastunut hyvin ja juotosten kestävyys ja toimivuus käytössä on todennäköisesti huono. Piirilevyn juotosalueiden ja komponenttien johdinten kastuvuuden takaamiseksi juoksutteet valitaan juotosprosessissa siten, että kastuminen on mahdollisimman hyvä ts. tavoitellaan alhaista pintajännitystä juotostinan ja juoksutteen kasteleman metallin välillä.

Edellä kuvassa 3.4 kuvatussa tapauksessa 1, jossa nesteen ja kiinteän aineen välinen pintajännitys on **pieni**, ts. yhteinen pinta pyrkii kasvamaan, nousee neste ohuessa kapillaariputkessa ylöspäin. Jos nesteen pintajännitys on **suuri, kuten elohopealla**, pinta laskee alaspäin ohuessa kapillaariputkessa.

Voidaan osoittaa, että kahden aineen pallomaisella rajapinnalla (tässä ilma A ja vesi C) aineiden välinen paine-ero saadaan yhtälöstä:

$$p^A - p^C = \frac{2\gamma}{R}, \quad (3.5)$$

jossa  $\gamma$  on nesteen pintajännitys kaasua vasten ja  $R$  on ko. pallopinnan säde [Levine 1981, s. 324, yhtälö 13.9]. Yhtälöstä (3.5) laskien lämpötilassa  $20^\circ\text{C}$  vesi-ilma rajapinnassa kyseinen paine-ero on 13 Pa, kun rajapinnan säde on 1 cm ja 1330 Pa, kun  $R$  on 0,1 mm.

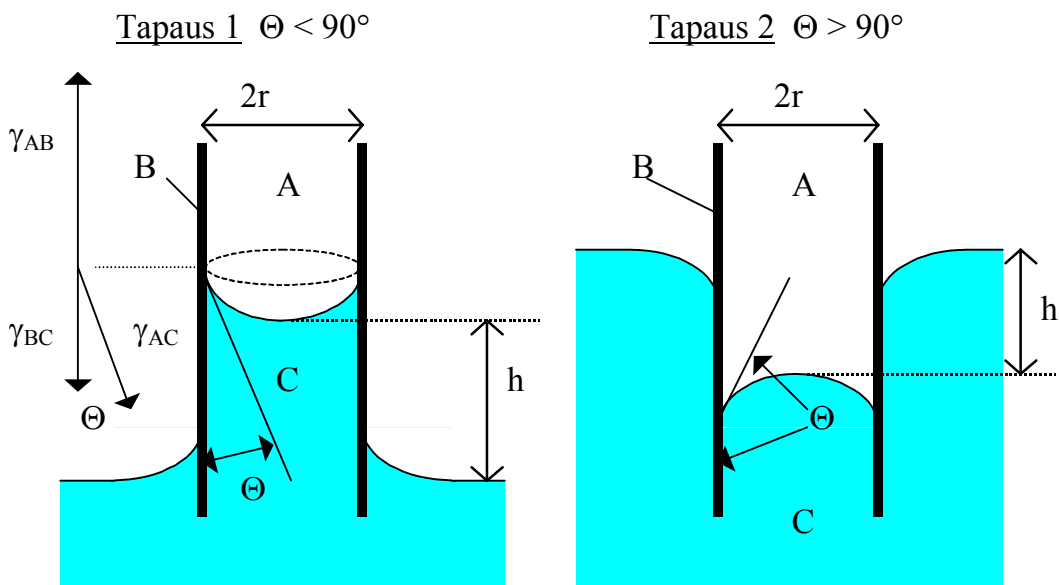
### 3.5 Kapillaari-ilmio

Kapillaari-ilmioilla tarkoitetaan nesteen kulkeutumista (imeytymistä, nousemista) ahtaisiin rakoihin nesteen pintajännityksen voimasta. Kapillaarirako on alle 0,5 mm (1 mm) rako kahden pinnan välillä taikka ohuen putken sisätila. Kapil-

laarirakoja on käytännössä myös kaikissa huokoisissa materiaaleissa (imupaperi, tekstiilit), joissa ne ovat alle 0,1 mm suuruisia.

Yhtälöä (3.5) voidaan käyttää perustana mitattaessa neste-kaasu ja neste-neste rajapintojen pintajännitystä kapillaariputken avulla. Mittaus on mahdollinen vain, jos  $\Theta = 0^\circ$ , koska kastumiskulman mittaus on vaikeaa. Kuvassa 3.5 kulma  $\Theta > 0$ , mutta kun putki on lasia ja neste vettä  $\Theta = 0$ , jolloin pintajännityksen mittaus on mahdollinen.

Neste nousee kapillaariputkeen, koska kapillaariputkessa, jossa nestepinta on kovera, nesteen sisäinen paine on pienempi kuin yläpuolisen kaasun paine. Koska kapillaarin ulkopuolella nestepinnan paine on sama kuin yläpuolella olevan kaasun paine, paine työntää nestettä kapillaariputkeen, kunnes nestepatsaan hydrostaattinen paine vastaa yhtälön (3.5) mukaista paine-eroa kapillaarissa olevan nesteen ja ilman välillä.



Kuva 3.5. Nesteen käyttäytyminen kapillaariputkessa.

Kuvassa 3.5 olevan lasisen kapillaariputken oletetaan olevan niin kapea, että kaasun A ja nesteen C rajapinta on muodoltaan pyöreä, jolloin siihen voidaan soveltaa yhtälöä (3.5) ja pallopinnan säde  $R$  on yhtä suuri kuin kapillaariputken sisäpuolinen säde  $r$ . Koska tässä neste (vesi) -lasi rajapinnassa  $\Theta = 0^\circ$ , kuten edellä todettiin ja neste-kaasu rajapinta on puolipallo, voidaan osoittaa, että neste-kaasu pintajännitys  $\gamma_{AC}$  voidaan laskea yhtälöstä

$$\gamma_{AC} = \frac{(\rho_C - \rho_A)ghr}{2}, \quad (3.6)$$

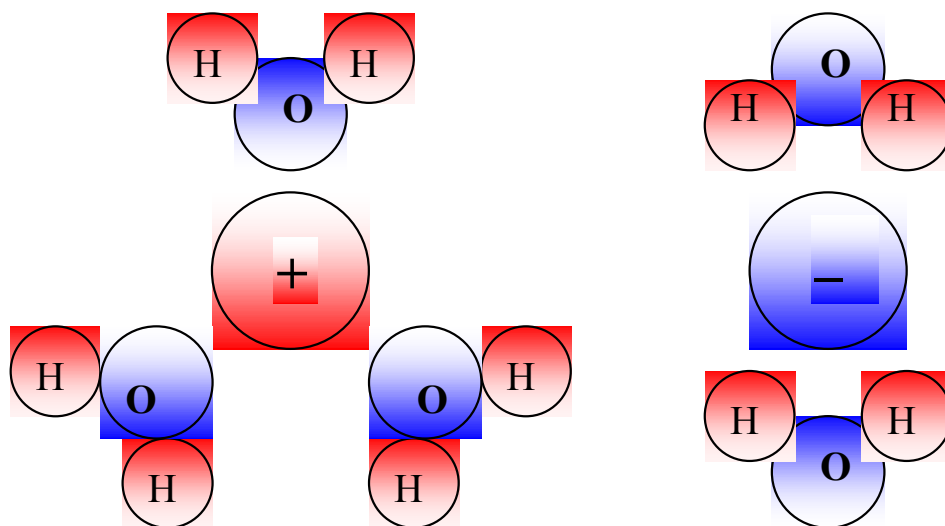




### 3.6 Vesiliuokset ja elektrolyytit

Elektrolyytiksi sanotaan ainetta, joka tuottaa ioneja liuokseen, mikä näkyy liuoksen sähkönjohtavuutena. Johonkin tiettyyn liuottimeen (esim. vesi) liuennutta elektrolyyttiä sanotaan vahvaksi tai heikoksi sen mukaan onko syntynyt liuos hyvin vai huonosti sähköä johtava kohtuullisilla elektrolyyttipitoisuuksilla. Esim. vedellä heikkoja elektrolyyttejä ovat ammoniakki  $\text{NH}_3$ , hiilidioksidi  $\text{CO}_2$  sekä etikkahappo  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ja vahvoja elektrolyyttejä ovat natriumkloridi  $\text{NaCl}$ , vetykloridi eli suolahappo  $\text{HCl}$  ja magnesiumsulfaatti  $\text{MgSO}_4$ .

Elektrolyytit voidaan niiden rakenteen perusteella ryhmitellä [Levine 1981, 1978] todellisiksi elektrolyyiteiksi ja potentiaalisiksi elektrolyyiteiksi. Todellisessa elektrolyytissä on ioneja sen puhtaassa olomuodossa ilman liuotinta. Useimmat suolat ovat todellisia elektrolyyttejä ts. ne ovat sähköä johtavia. Esim.  $\text{NaCl}$ ,  $\text{CuSO}_2$  ja  $\text{MgS}$ -kiteet muodostuvat positiivisista ja negatiivisista ioneista. Puhtaina ja nesteinä todelliset elektrolyytit ovat hyviä sähkönjohteita ja potentiaaliset elektrolyytit huonoja.



*Kuva 3.6. Ionien hydratoituminen vedessä, kuvassa positiivinen ja negatiivinen ioni.*

Kun ioninen kide liukenee liuotteeseen, ionit irtoavat kiderakenteesta ja liittyvät liuotteeseen solvatoituneina ioneina. Termi solvatoitunut tarkoittaa, että jokaista liuotteessa olevaa ionia ympäröi muutama liuotteen molekyylit, joita sitoo ioniin sähköstaattinen vetovoima. Tämä ionin ja liuotteen molekyylien muodostama “pysyvä” ryhmä liikkuu liuotteessa yhtenä kokonaisuutena. Kuvassa 3.6 on kuvattu tällaisia solvatoituneita positiivisia ja negatiivisia ioneja. Koska liuotteena on vesi, sanotaan näitä hydratoituneiksi ioneiksi.

Potentiaalinen elektrolyytti muodostuu varautumattomista partikkeleista sen puhtaassa olomuodossa. Kun se liukenee liuotteeseen, se reagoi kemiallisesti liuotteen kanssa ja muodostaa ioneja.

Esim. etikkahappo reagoi veden kanssa:



jossa tuloksena on  $\text{H}_3\text{O}^+$ - ja asetaatti-ioneja.

Suolahappo HCl reagoi veden kanssa:  $\text{HCl} + \text{H}_2\text{O} \Leftrightarrow \text{H}_3\text{O}^+ + \text{Cl}^-$ , jossa tuloksena on  $\text{H}_3\text{O}^+$ - ja kloridi-ioneja.

Vahvalla elektrolyytillä, kuten suolahapolla, tasapainopiste on vahvasti yhtälön oikeassa puoliskossa ts. kloridi-ioneissa. Heikoilla hapoilla, kuten etikkahapolla, tasapaino on yhtälön vasemmassa puoliskossa, paitsi hyvin pienillä pitoisuuksilla.

Koska elektrolyytit sitovat kuvan 3.6 tilanteessa itseensä liuotteen, veden, molekyylijä, merkitsee tämä hyvin ohuissa vesikerroksissa etteivät ionit pääse kulkemaan siinä (eikä myöskään korroosiovirta), koska vesi on sitoutuneena ioneihin eivätkä muodostuneet ainesryhmät pääse liikkumaan toistensa ohitse. Tämän vuoksi pintoihin adsorboituvan vesikerroksen on oltava noin viiden molekyylikerroksen paksuinen (noin  $10^{-9}$  m) ennen kuin korrosio pääsee kehittymään merkittäväksi. Tämä vesikerroksen paksuus vastaa esim. metallipinnalle adsorboituvaa vesikerrosta, kun pinnan läheisyydessä olevan ilman suhteellinen kosteus on 60...80 % RH [Johansson 1995].

*Taulukko 3.1. Vesikerroksen paksuus metallipinnalla.*

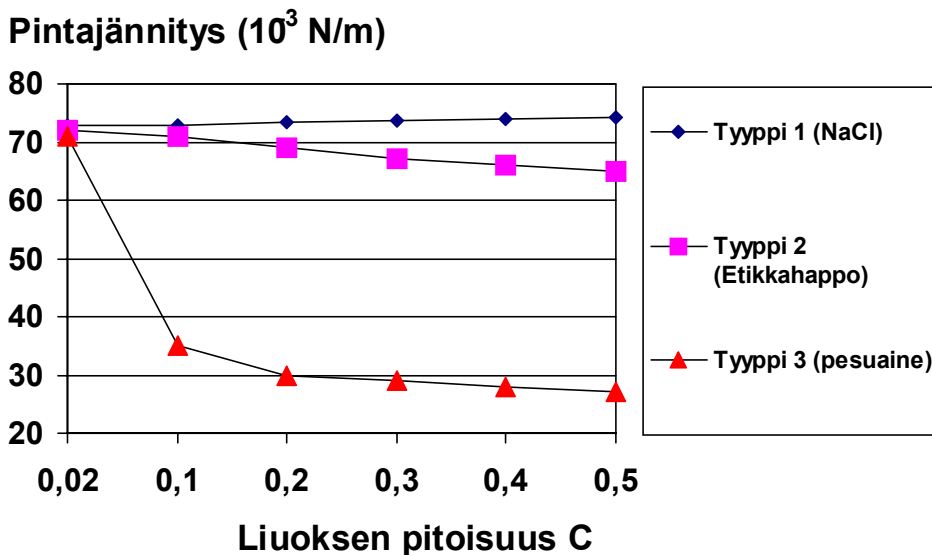
Suhteellinen kosteus (%)	Vesimolekyylikerroksia $\text{H}_2\text{O}$ (kpl)
20	1
40	1,5...2
60	2...5
80	5...10

Käytännön olosuhteissa aineiden pinnoilla on aina muutaman molekyylikerroksen paksuinen vesikerros [Johansson 1995]. Esim. metallien päältä on mitattu taulukon 3.1 mukaiset määrät vettä eri kosteuksilla ilmassa. Tämä selittää osaltaan, miksi korrosio nopeutuu voimakkaasti, kun ilman suhteellinen kosteus ylittää 60 %.

### 3.7 Vesiliuokset ja pintajännitys

Laikeiden vesiliuosten pintajännityksen käyttäytyminen voidaan luokitella kolmeen tyypilliseen luokkaan [Levine 1981, s. 333] lisättäessä liuoksen elektrolyyttipitoisuutta.

Tyyppi 1 elektrolyyttien vesiliuoksilla (kuva 3.7) pintajännitys kasvaa jatkuvasti hieman, kun liuoksen väkevyys kasvaa. Tällä tavalla käyttäytyvät useimmat epäorgaaniset suolat ja sakkaroosi. Metallien korroosiotuotteet ovat useimmiten epäorgaanisia suoloja, joten ne lisäävät vesiliuoksen pintajännitystä. Pintajännityksen lievä jatkuva kasvaminen selittyy sillä, että nesteen sisällä vastakkaismerkkisten ionien keskinäinen vuorovaikutusmahdollisuus on suurempi kuin pintakerroksissa, jonka vuoksi pinnan ionipitoisuus pienenee ja pintaan nesteen sisäosista kohdistuvat adsorptiovoimat kasvavat, jonka seurauksena liuoksen pintajännitys kasvaa.



Kuva 3.7. Vesiliuoksen väkevyyden vaikutus pintajännitykseen [Tommila 1965, Levine 1981].

Tyyppi 2 elektrolyyttien vesiliuoksilla pintajännitys pienenee jatkuvasti suhteellisen nopeasti liuoksen väkevyyden kasvaessa. Tällaisia ovat useimmat vesiliukoiset orgaaniset aineet, esim. etikkahappo. Vesiliukoiset orgaaniset yhdisteet sisältävät tavallisesti polaarisen osan (kuten OH tai COOH ryhmän) ja ei-polaarisen hiilivetyosan. Tällaiset ionisoituneet molekyylit kertyvät nesteen pintakerrokseen, jossa niiden polaariset osat osoittavat ja vuorovaikuttavat polarisoituneisiin vesimolekyyleihin. Näiden molekyyliden ei-polaariset osat suuntautuvat poispäin vedestä. Tällöin pintaan nesteestä vaikuttava adsorptio pienenee ja pienentää pintajännitystä vesiliuoksen väkevyyden kasvaessa.

Tyypin 3 elektrolyyttien vesiliuoksien pintajännitys pienenee aluksi hyvin nopeasti ja asettuu sitten lähes vakiotasolle, kun liuoksen väkevyys kasvaa. Tyypin 3 elektrolyytit adsorboituvat vahvasti rajapintoihin (ilma-vesi). Tällaisia ovat esim. keskipitkän molekyyliketjun omaavien orgaanisten happojen suolat ts. saippuat ja muut pinta-aktiiviset aineet (mm. mäntysuopa ja shampoot sisältävät näitä). Pintajännityksen jyrkkä putoaminen tapahtuu tietyllä kriittisellä elektrolyyttipitoisuudella.

Aineita, jotka pienentävät voimakkaasti nesteen pintajännitystä, sanotaan pinta-aktiivisiksi aineiksi. Tällaisia ovat esim. tavalliset veteen liukenevat pesuaineet, jotka irrottavat tehokkaasti likaa erilaisilta pinnoilta. Pesuaineet alentavat pintajännitystä pinta-aktiivisten aineiden eli tensidien avulla. Tällöin vesi pääsee helpommin kankaan ja likahiukkaseen väliin. Pinta-aktiivisen aineen toinen pää on hydrofobinen ja toinen hydrofiilinen. Veden pinnassa tensidin hydrofiilinen pää työntyy veteen ja hydrofobinen ilmaan, josta on seurauksena pintajännityksen pieneneminen. Rasvahiukkaseen kohdatessaan, tensidin hydrofobinen pää työntyy rasvahiukkaseen ja hydrofiilinen veteen. Useat tensidimolekyylit ympäröivät näin rasvahiukkaseen ja saavat aikaan sen irtoamisen pestävän kappaleen pinnasta [Haavisto et al. 1985].

Edellä olevan perusteella voidaan pelkistään todeta, että vesiliuoksen pintajännitys pienenee sitä enemmän mitä suurempi on elektrolyyttipitoisuus nesteen pinnassa. Elektrolyytin kertyminen nesteen pintaan on aineominaisuus, jonka avulla voidaan myös vaikuttaa pintojen korroosio-ominaisuuksiin.

### **3.8 Kondensoituminen**

Veden kondensoitumisella tarkoitetaan vesihöyryn tiivistymistä nesteeksi joidenkin partikkeleiden taikka yhtenäisen materiaalin (neste tai kiinteä) pinnalle, kun ilman suhteellinen kosteus saavuttaa 100 % (katso kohdat 1.5 ja 1.6). Tarkkaan ottaen tämä ei pidä täysin paikkaansa, koska kondensoitumista pinnoille ja veden höyrystymistä pinnoilta tapahtuu koko ajan kaikissa lämpötiloissa ja ilman paineissa. Olosuhteista riippuu hallitseeeko tiivistyminen vai höyrystyminen. Pääsääntöisesti ilman paine, veden osapaine ja ilman sekä pintojen lämpötilat säätelevät kondensoitumista. Myös pintojen laatu, ilmassa olevat hiukkaset ja pintojen kontaminoitumisen aste vaikuttavat kondensoitumisen voimakkuuteen (katso liite 1, kohta 3.2 *Höyryn tiivistyminen nesteeksi*).

Kondensoitumisen ja höyrystymisen tasapainotila riippuu tosiasiallisesti siitä, mikä on aineen molekyylien lämpöliikkeen määrä. Nesteenä vesimolekyylit liik-

kuvat hitaammin kuin kaasuna. Molekyylien liikemäärä kasvaa lämpötilan noustessa. Ilmassa olevan vesihöyryn määrä, lämpötila ja paine säätelevät sitä, milloin tiivistyminen nesteeksi tai höyrystyminen hallitsee. Vesi höyrystyy suoraan sekä nestemäisen että jäätyneen veden pinnoilta ja vastaavasti tiivistyy näihin samoihin tiloihin riippuen olosuhteista.

Veden tiivistyminen (kondensoituminen) on eksoterminen tapahtuma ts. se vapauttaa lämpöä saman lämpömäärän, mikä veteen on sitoutunut sen höyrystyessä. Kun alusta on hyvin lämpöä johtavaa materiaalia esim. metallia, kulkeutuu vapautunut lämpö nopeasti pois ja pinta pysyy kylmänä. Jos metalli pinnoitetaan (maalataan), tulee pinta huonommin lämpöä johtavaksi ja kondensoituminen hidastuu. Kondensoituminen on siis kiinteästi yhteydessä myös alustan lämmönjohtavuuteen.

Erityisen voimakasta kondensoitumista tapahtuu, jos lämpöä poistavia pintoja on lähistöllä useita, kuten esim. kapeissa raoissa ja kapillaareissa. Rakenne, jossa on kapillaareja ja/tai metallisia pintoja vastakkain, on siis kondensoitumisen estämisen suhteen kaikkein huonoin rakenne.

### 3.9 Vettä hylkivät ja läpäisevät materiaalit

Kun veden ja kiinteän materiaalin välinen pintajännitys ( $\gamma_{BC}$ ) on suurempi kuin välillä kaasu-kiinteä aine ( $\gamma_{AB}$ ), kastumiskulma  $\Theta$  on välillä  $90...180^\circ$  (liite 1, kohta 3.4 *Pintajännitystasapaino kolmen faasin tapauksessa*), jolloin vesi jää pisaroiksi ko. kiinteän materiaalin pinnalle, ei leviä pinnalle eikä myöskään absorboidu helposti materiaaliin.

Vettä hylkivistä materiaaleista valmistetaan esim. ulkoiluvaatetekstiilejä, joiden täytyy toisaalta hylkiä sadevettä ja likaa, mutta niiden tulee myös olla huokoisia ja läpäistä ihmisen hikeä ja muutenkin vaatteen sisään päässyttä vettä höyryn muodossa, jotta vaatteen sisäpuoli ei kastuisi, kuten vettä läpäisemättömät sadetakit. Ulkoiluvaatetuksessa halutaan myös materiaalin sietävän kohtalaista ulkoista vedenpainetta, voimakkaan sateen tai mekaanisen voiman vuoksi esim. istuttaessa märässä maassa, jolloin istumisen aiheuttama paine on luokkaa  $0,2 \text{ kg/cm}^2$ . Esimerkkinä tällaisesta materiaalista on W.L. Gore & Associates, Inc:n GORE-TEX®, jolla veden kastumiskulma on luokkaa  $140^\circ$  ja se läpäisee vettä lähinnä diffuusion avulla. <http://www.gore-tex.co.uk/>

Kyseinen materiaali on polytetrafluoroetyleenistä (TEFLON®) valmistettua huokoista kalvoa, jonka huokoisten koko ja rakenne on valittu siten, että se läpäisee vettä vain diffuusion avulla [US Patent 4194041]. Patenttiselityksen mukaan materiaali absorboi vettä (on hydrofiilinen, vettä imevä), päästää sen lävitseen diffuusiomekanismin avulla molekyyleitäin ja sitten desorboi tai haihduttaa veden toiselta pinnaltaan, jossa suhteellinen kosteus on alempi kuin toisella puolen. Vesihöyry läpäisee kalvon, mutta neste ei pääse suoraan läpi kalvon. Kalvosta on saatu hengittävä ja isompimolekyyllisiä aineksia suodattava. Näin ollen se soveltuu estämään veden ja pölyn pääsyn kalvon toiselle puolelle. Kyseisen kaltaisia materiaaleja ja niiden valmistusmenetelmiä koskevia patenteja on suuri määrä. Alla on mainittu muutama peruspatentti. Muita samankaltaisia hydrofiilisiä materiaaleja ovat esim. W. R. Grace & Co valmistama Hypol® ja E. I. duPont de Nemours & Co:n Nafion® [US Patent 4194041].

GORE-TEX®:n kaltaiset materiaalit soveltuvat myös elektroniikkalaitteiden ilmanvaihtoaukkoihin, joissa ne estävät esim. roiskeveden sisäänpääsyn, mutta mahdollistavat myös sisään päässeeseen vesihöyryn poistumisen laitteesta, ts. laitekotelo on "hengittävä". Jotta hengitysmekanismi toimisi kunnolla, on suojattavan tilan lämpötilan oltava korkeampi kuin ympäristön lämpötila ainakin osan ajasta. Sisätila kuivuu niin kauan kuin vesihöyryn osapaine sisätilassa on suurempi kuin ulkopuolella.

Tekstiilejä testataan standardin ISO 811:1981 Textile fabrics – Determination of resistance to water penetration – Hydrostatic pressure test mukaisilla testeillä.

### **Patentteja:**

US Patent 4187390: Porous products and process therefore, Feb. 5 1980, Robert W. Gore, Delaware.

This invention provides a tetrafluoroethylene polymer in a porous form which has an amorphous content exceeding about 5 % and which has a micro-structure characterized by nodes interconnected by fibrils. The material has high porosity and high strength. It can be used to produce all kinds of shaped articles such as films, tubes, rods, and continuous filaments. Laminations can be employed and impregnation and bonding can readily be used to produce a large variety of articles. Compressed articles of very high strength can also be produced from these porous forms.

US Patent 4194041: Waterproof laminate, March 18, 1980, Robert W. Gore & Samuel B. Allen, Jr., Delaware.

A waterproof article for use in, for example, protective clothing. The article prevents liquid water from penetrating through to undergarments while at the same time permitting moisture vapor such as perspiration to pass out through the article. The article is thus both breathable and waterproof. The article is layered: a microporous hydrophobic outer layer which permits the passage of moisture vapor but resists penetration by liquid water at pressures up to about  $345 \text{ Kn/m}^2$ ; a hydrophilic inner layer permitting the transfer of moisture vapor but preventing surface tension lowering agents such as those contained in perspiration and/or body oils from reaching the hydrophobic layer.

US Patent 5143783: Porous film of polytetrafluoroethylene and preparation thereof, Sept 1, 1992, Shimizu; Tetsuo, Osaka, Hosokawa; Kazutaka, Osaka, Japan.

A polytetrafluoroethylene porous film obtainable by applying an aqueous dispersion of emulsion polymerized polytetrafluoroethylene particles having an average minor particle size of 1 to 500 nm and an average aspect ratio of at least 10 on a substrate, drying the applied dispersion and optionally sintering the dried polytetrafluoroethylene particles on the substrate to obtain the polytetrafluoroethylene porous film, which has a uniform thin thickness.

US Patent 5869156: Porous products manufactured from polytetrafluoroethylene treated with a perfluoroether fluid and method of manufacturing such products, February 9, 1999, Hoo Young Chung, Minneapolis.

Porous materials suitable for a variety of uses including waterproof/breathable fabrics, air filters, liquid filters, liquid/liquid separation membranes, vascular grafts, mechanical seals, etc. which comprises an intimate combination of about 50 to 99.9 wt % polytetrafluoroethylene polymer and about 0.1 to 50 wt % of a fluorinated organic polymer which is liquid ambient conditions, such as the perfluoroether fluids, in the material has a microstructure characterized by nodes connected by fibrils.

## 4 Metallipintojen ilmiöitä

### 4.1 Dendriitti

Elektroniikan johtimina käytetään paljon kuparia lähes puhtaana taikka seosmetallina. Kupari saattaa otollisissa olosuhteissa, joissa on kohtuullisesti kosteutta ja jännite eri osien välillä, kasvattaa havumaisia dendriittejä eri osien välille. Dendriitti on puumaisesti (kuviona havun näköinen) kasvanut metallikide, joka etenee esim. piirilevyllä jännitteellisten kuparijohdinten välissä ja huonontaa johdinten välistä eristystä, jopa oikosulkuun asti. Dendriittejä voi syntyä puhtailla kuparipinnoilla taikka jonkin pinnoitteen virheistä (esim. kultapinnoitteen aukoista) esiin tunkeutuvina säikeinä, jotka haarautuvat puumaisesti. Suuri jännite kiihdyttää dendriittien kasvua.

Dendriitit syntyvät elektrolyyttisesti jonkin ionisen kontaminaation ja kosteuden läsnä ollessa esim. piirilevyn pinnalla. Sen syynä voi olla pinnoiteprosessin liuoksen koostumus, reflow-juottaminen tai juoksutejäämä, jota on jäänyt liikaa piirilevyille.

Tämä dendriittien muodostumistapa korostaa puhtauden merkitystä piirilevyjen valmistuksessa ja käsittelyssä, ja myös tukee tarvetta suojata piirilevyjen johdinkuviota kosteuden välittömältä vaikutukselta. Ilmasta peräisin olevaa kontaminaatiota on vaikea välttää, jonka vuoksi levyjen pinnoille kertyy aikaa myöten aina epäpuhtauksia ja niiden mukana elektrolyyttejä (katso elektrolyytit liite 1, kohta 3.6 *Vesiliuokset ja elektrolyytit*), jotka yhdessä kosteuden kanssa synnyttävät erilaisia korrodoivia ilmiöitä.

Dendriittikasvua esiintyy myös mikropiirien sisällä, joissa johdinliitosten välillä on todettu tämä sama vikamekanismi, jos kotelon sisään pääsee kosteutta.

Myös hermeettisten komponenttien johdinten lasitiivisteissä, jotka ovat lyijyypitoisia, on todettu lyijydendriittien kasvua joitain juoksutteita käytettäessä.

Dendriittimuotoista kiteytymistä tapahtuu metallien sisällä sulan metallin jäähtyessä samoin kuin veden kiteytyessä lumihiutaleiksi. Näitä ilmiöitä ei pidä sotkea komponenttien, piirilevyjen, johdinten ja liittimien johdinten välissä esiintyviin dendriitteihin.



## 4.2 Säikeet (whiskers)

Metalleilla on usein taipumus kasvattaa pinnalleen ohuita hiuksen kaltaisia säikeitä, jotka kasvavat spontaanisti metallin pinnalta ikään kuin hammastahnasäiliötä puristettaessa. Säikeiden pituus voi olla jopa useita millimetrejä. Säikeiden haittavaikutus on oikosulku, joka voi joko häiritä hetkellisesti tai tuhota elektroniikkalaitteen riippuen vikakohdasta. Säikeiden kasvu on elektroniikassa haitallisin puhdasta tinaa käytettäessä, mikä korostuu nyt, kun Euroopan yhteisö päätti rajoittaa eräiden haitallisten metallien, kuten lyijyn, elohopean ja kuusiarvoisen kadmiumin käyttöä vuoden 2006 heinäkuun alusta alkaen julkaisemalla ns. [RoHS] direktiivin.

Lähteessä [<http://nepp.nasa.gov/whisker/>] on runsaasti aineistoa tinasäikeiden esiintymisestä ja ongelman rajoittamisesta. Vastaava ilmiö on havaittu kadmium Cd, indium In ja sinkki Zn pinnoilla [Galyon & Gedney 2004, Su et al. 2005].

Elektroniikassa käytetään melko paljon puhtaalla tinalla päällystettyjä komponentteja ja rakenteita. Puhtaalle tinalle on ominaista kasvattaa pinnalleen säikeitä (tin whisker). Tällainen tinasäie oikosulkee helposti vierekkäin olevat paljaat komponentin johtimet. Tinasäie voi kasvaa mihin tahansa tinapinnalla ja se on 1...2 mm ja jopa 4...10 mm pitkä ja paksuudeltaan 0,3...50 mikrometriä. Tyypillinen paksuus on 1  $\mu\text{m}$ .

Laitteiden kannalta tinasäie on harmillinen, koska se aiheuttaa satunnaisia oikosulkuja paljaiden tinalla päällystettyjen johdinten välille. Tinasäikeiden katkeamiseen tarvittava virta on yleensä suurempi kuin 10 mA, joskus tarvitaan jopa 50 mA oikosulun polttamiseksi. Jos oikosulkuun ei tule tarpeeksi virtaa, oikosulku voi jäädä pysyväksi.

Tinasäie on yksikiteistä puhdasta tinaa, se kasvaa satunnaisesti tarvitsematta kosteutta tai jännitettä kasvaakseen ja sen kasvu on riippumatonta ilman paineesta (kasvaa myös tyhjiössä). Tinasäikeen kasvu johtuu metallin sisäisistä jännityksistä, jotka saavat atomit liikkeeseen.

Tinasäie voi olla suora, mutkainen, koukkumainen tai jakaantunut ja joskus niissä on aukkoja ja ulkopinta voi olla uurteinen.

Tinasäikeen kasvu voi käynnistyä heti tinapinnoituksen valmistamisen jälkeen taikka sen kasvu voi alkaa vuosien kuluttua.

Tinasäikeiden syntyminen liittyy jännityksiin seuraavasti:

- tinapinnoitteisiin valmistuksessa syntyneisiin jännityksiin (sähkökemiallinen pinnoitus jättää eniten jännityksiä pinnoitteisiin)
- puristusjännitykset ruuvien tai pulttien alla
- pinnan taivuttaminen tai venyttäminen pinnoituksen jälkeen
- käsittelyssä syntyneet naarmut
- alustan ja tinan lämpölaajenemiskertoimien erilaisuus
- välimetallien syntyminen esim. kuparin ja tinan välillä  $\text{Cu}_6\text{Sn}_5$
- korroosio voi kiihdyttää säikeiden kasvua
- tinasäikeet syntyvät helpoiten noin  $+50\text{ °C}$  lämpötilassa (tinan uudelleenkiteytymislämpötila), säikeiden kehittyminen lakkaa alle  $-40\text{ °C}$  ja yli  $+140\text{ °C}$  lämpötiloissa.

Kirkkaat tinapinnoitteet vaikuttavat alttiimmilta tinasäikeiden kehittymiselle kuin mattapintaiset tinat.

Jossain määrin on käytetty tinapinnoitteiden päällä erilaisia suojakerroksia, kuten lakkapinnoite, mutta tinasäikeiden on raportoitu kasvavan myös niiden läpi [Woodrow & Ledbury, 2006].

JEDEC ja IPC ovat julkaisseet muutamia standardeja tinasäieriskin hallitsemiseksi:

JEDEC JP002 (2006) Current tin whiskers theory and mitigation practices guideline.

JEDEC JESD 22-A121 (2005) Measuring Whisker Growth on Tin and Tin Alloy Surface Finishes.

JEDEC JESD 201 (2006) Environmental Acceptance Requirements For Tin Whisker Susceptibility of Tin and Tin Alloy Surface Finishes.

Eräs suositus [Brusse 1998] tinasäieriskin välttämiseksi on välttää puhtaan tinan käyttöä elektroniikan pinnoitteissa. Tinasäikeiden kasvua voidaan ehkäistä käyttämällä tinassa jotain seosmetallia, kuten vismuttia Bi, tinan alla välikerroksena nikkeliä Ni, lämpökäsittelyä, paksumpaa tinakerrosta, jne. [JEDEC JP002].

### 4.3 Tinarutto

Tinalla on kaksi olomuotoa metallinen valkea  $\beta$ -tina ja harmaa ei-metallinen  $\alpha$ -tina.  $\beta$ -tina on stabiili yli  $+13,2\text{ }^{\circ}\text{C}$  lämpötiloissa ja  $\alpha$ -tina on stabiili tämän alapuolella. Pitkäaikaisessa alhaisessa lämpötilassa puhdas metallinen tina ( $\beta$ -tina) haurastuu ja lopulta hajoaa palasiksi muuttuen harmaaksi jauheeksi ( $\alpha$ -tina). Muutosnopeus on suurin  $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  seutuvilla. Tinaruttoa ei yleensä ole esiintynyt elektroniikassa, koska tinalyijyssä rutto alkaa vasta alle  $-50$  asteen lämpötiloissa. Tinan seosaineet kuten lyijy, antimoni ja vismutti vähentävät tinaruttoriskiä.

Lyijyttömien juotteiden käyttö [RoHS] saattaa lisätä tinaruton esiintymistä elektroniikassa ellei huolehdi sopivien seosaineiden käytöstä tinajuotteissa.

Tinaruttoa ei pidä sekoittaa korroosion ja hapettumisen aiheuttamaan tinapintojen harmaantumiseen. Katso myös [ASTM B545-97].

[Alan Bruzel, <http://dwb.unl.edu> and Bob Weintraub & E. J. Cohen <http://www.weizmann.ac.il/ICS/booklet/9/pdf/weintraub.pdf>].

### 4.4 Elektromigraatio

Elektromigraatio (electromigration) tarkoittaa sähköjohtimessa tapahtuvaa materiaalin kulkeutumista sähkövirran vaikutuksesta. Elektromigraatio on tullut hyvin merkittäväksi vikamekanismiksi suuritiheyksisten mikropiirien alumiini- ja kuparimetalloinneissa. Sähkövirta on elektronien liikettä materiaaleissa. Elektronit liikkuaan materiaalissa pommittavat samalla materiaalin atomeja, jotka saattavat siirtyä paikaltaan kidehilassa. Näin tapahtuu häiritsevässä määrin esim. mikropiirien ohuissa alumiinijohtimissa, kun virran tiheys nousee hyvin suureksi. Atomien siirtyminen metallissa voi synnyttää ohuisiin johtimiin aukkoja ja katkoksia taikka toisaalta johtimeen voi syntyä atomikasaantumia, joiden sisäinen paine pullistaa metallijohdinta ulospäin ja murtaa samalla metallin päällä olevan eristekerroksen, jolloin metalli tulee esiin kuin hammastahna puhjenneesta putki-  
lostasta [<http://www.research.ibm.com/>].

Elektromigraatio on merkittävä vikamekanismi jo, kun alumiinijohtimen virta on suuruusluokkaa  $1\text{...}5\text{ mA}$  ja johdinleveydet ovat suuruusluokkaa alle  $5\text{ }\mu\text{m}$  ts. ai-  
van tavallinen tilanne mikropiireissä. Kun johdinleveyksiä kavennetaan, elektromigraatio on varteenotettava vikamekanismi kaikilla metalleilla (vrt. liite 1, kohta 2.13 *Elektrolyyttinen korroosio ja ionien vaeltaminen*).

## 5 Korroosion kulkuun vaikuttavia tekijöitä

Korroosioreaktiot ovat sähkökemiallisia reaktioita, jotka tapahtuvat vesiliuoksessa. Vesiliuos syntyy korrodoituvalle pinnalle ilman sisältämän kosteuden adsorboituessa ja tiivistyessä pinnalle. Tiivistyneeseen vesikerrokseen liukenee pinnalta epäpuhtauksia (suoloja), jolloin vesiliuoksesta tulee johtava elektrolyytti. Edellytykset korroosiolle on näin luotu.

Pinnalle tiivistyneeseen vesikerrokseen liuennet suolat ja ympäröivän ilman suhteellinen kosteus määräävät pysyykö vesikerros pinnalla vai kuivuuko se. Haitallisimpia epäpuhtauksia on tavallinen suola NaCl, jota esiintyy kaikkialla ympäristössämme aina jonkin verran (mm. hiki sisältää suolaa). Oheisessa taulukossa 5.1 on eri kloridien (suoloja) kylläisten vesiliuosten yllä vallitseva suhteellinen kosteus 25 °C lämpötilassa.

*Taulukko 5.1. Ilmatilan suhteellinen kosteus metallikloridien kylläisten vesiliuosten yllä suljetussa tilassa lämpötilassa 25 °C \*).*

Metallikloridi	RH %
lyijykloridi	99
tina-lyijy juotteen kloridit	96
tinakloridi	77
natriumkloridi	75
kuparikloridi	62
nikkelikloridi	59
rautakloridi	52
alumiinikloridi	48
magnesiumkloridi	33
sinkkikloridi	21

\*) Kosteuslaitteiden kalibroinneissa on käytetty kylläisiä suolaliuoksia esim. [Nordtest Remiss Nr 548-85 1987].

Jos ympäristön suhteellinen kosteus on pienempi kuin kylläisen liuoksen yllä vallitsevan suhteellisen kosteuden arvo, kuivuu liuos ja mahdollinen korroosiokin pysähtyy. Toisaalta, kun ympäristön kosteus nousee, kuivunut suola pyrkii heti palauttamaan kylläisen liuoksen adsorboimalla ilmasta kosteutta. Näin tapahtuu mm. yöllä, jolloin ilman lämpötila laskee ja sen suhteellinen kosteus nousee.

Taulukon perusteella voidaan ymmärtää myös, miksi korroosiotesteissä käytetään sellaisia suhteellisen kosteuden arvoja kuin 75 % tai 95 %. Nämä kosteudet han vallitsevat sellaisten kloridien yhteydessä, joita esiintyy runsaasti luonnossa (NaCl) ja elektroniikassa (tina-lyijyjuotteen kloridit). Näillä kosteuksilla saadaan aikaan kiihdytettyjä testejä, jotka vastaavat melko hyvin todellisia ympäristöolosuhteita.

Korroosioreaktioissa anodilla eli syöpyvällä alueella metalli liukenee positiivisina ioneina. Positiivisen ionin syntyessä metalliin jää elektroneja, jotka kuluvat katodilla eli syöpymättömällä alueella. Hyvin happamissa oloissa katodilla kehittyy vesiliuoksessa vetyä. Lievästi emäksisissä ja neutraaleissa oloissa, jotka ovat normaalimpia kuin voimakkaasti happamat olot, vedynkehityksen sijasta hapen läsnä ollessa tapahtuu myös veden hajoamista hydroksyyli-ioneiksi. Syntyvät hydroksyyli-ionit reagoivat liuenneen metallin kanssa muodostaen metalleille tyypillistä korroosiotuotetta – metallihydroksidia, muuttaen näin korroosion näkyväksi.

Korroosioreaktiot sisältävät siis aina elektronien siirtymistä molekyylisistä/atomista toiseen. Siirtyminen merkitsee elektronin hyppäämistä aineiden/tilojen välisen potentiaalikuilun yli. Katodin reaktiot neutraaleissa ja emäksisissä oloissa merkitsevät elektronien siirtymistä noin 0,4 V potentiaalikuilun yli. Tällä on merkitystä yhdistettäessä eri metalleja toisiinsa. Jos metallien välinen ero ns. galvaanisessa jännitesarjassa on pienempi kuin em. 0,4 V galvaaninen pari ei anna elektroneille riittävästi energiaa, jotta ne pääsisivät katodisen potentiaalikuilun yli.

Korroosioreaktioissa virta kulkee siis metallissa elektronien muodossa ja vesiliuoksessa ionien muodossa. Ionit keräävät vesiliuoksissa ympärilleen eli assosioivat kerroksen vesimolekyylejä. Tämä johtuu siitä, että vesimolekyyli on dipoli. Vesimolekyyli asettuu negatiivinen pää positiiviseen metalli-ioniin päin (vrt. liite 1, kohta 3.6 *Vesiliuokset ja elektrolyytit*). Näin muodostunut makro-ioni vaatii paljon tilaa ja liikkuu paljon hitaammin kuin pelkkä metalli-ioni tekisi. Tämä merkitsee myös sitä, että pinnalle pitää adsorboitua useamman (vähintään noin viiden) vesimolekyylin paksuinen kerros eli noin nanometrinen verran vettä ennen kuin korrosio lähtee voimakkaammin liikkeelle. Nanometrin paksuisen vesikerroksen höyrinpaine on kuitenkin suurempi kuin ympäristön ilmanpaine, joten tällainen kerros ei ole pysyvä, vaan se pyrkii avoimessa tilassa kuivumaan nopeasti. Vasta noin mikrometrin paksuinen vesikerros on pysyvä, sillä sen höyrinpaine vastaa 100 % suhteellista kosteutta.

Edellä on pelkistetysti viitattu tekijöihin, jotka säätelevät korroosiotapahtumia. On muistettava, että tiedot perustuvat fysikaalis-kemiallisiin ilmiöihin, jotka on mitattu laboratorion kontrolloiduissa olosuhteissa. Todellisissa olosuhteissa lämpötilan muutokset, useamman kuin yhden aineen läsnäolo liuoksissa ja mekaaniset rasitteet tuovat oman osansa tapahtumien kulkuun, vuoroin hidastaen ja vuoroin kiihdyttäen ilmiöitä. Korroosion taustalla oleva perustietämys on kuitenkin tunnettava, sillä se määrittää lopputuloksen – kokemus määrittää, missä ajassa siihen päädytään.

## 6 Pintojen kontaminaatio ja ilman epäpuhtaudet

Ilmasta peräisin oleva pöly ja kaasupäästöjen synnyttämät partikkelit [Burnett et al. 1992] ovat hygroskooppisia, vettä imeviä ja ovat taikka muuntuvat kosteissa olosuhteissa sähköä johtaviksi.

Sen lisäksi että ilmasta peräisin olevat epäpuhtaudet aiheuttavat metalliosissa korroosiota, tätäkin nopeampi vaikutus voi olla pinnoille kertyvien aineiden muuttumisella sähköä johtaviksi, jolloin kontaminoituneiden pintojen altistuminen kostealle ympäristöilmalle aiheuttaa välittömästi suurehkoja vuotovirtoja paljaiden metallialueiden välille ja näin aiheuttaa laitteisiin toimintavikoja. Burnettin, jne. julkaisemien tietojen mukaan Yhdysvalloissa 1990 luvun alussa havaittiin esim. tietoliikennelaitteistoissa suurehko joukko laitevikoja parin tunnin aikana. Nämä viat esiintyivät usein ukkosen aikana ja ne tulkittiinkin salamaniskun aiheuttamiksi taikka maadoitusongelmiksi. Myöhemmin asiaa tutkittaessa kävi ilmi, että kyseiset komponenttilevyt olivatkin kontaminoituneita ja viat esiintyivät, kun sisätilojen suhteellinen kosteus nousi yli 75 % RH ts. vioilla ei ollut mitään tekemistä EMC-ongelmien kanssa.

Kontaminaatiopartikkelit (pöly, jne.) sisälsivät paljon rikkiä riippumatta siitä, missä päin USA:ta havainnot tehtiin. Tämän perusteella pääteltiin kontaminaation olevan peräisin lähinnä “teollisista saastepäästöistä”.

Aineksia analysoitaessa ne ryhmiteltiin isoihin yli 2,5 µm ja tätä pienempiin kooltaan luokkaa 0,5 µm oleviin partikkeleihin. Isommat partikkelit sisälsivät tyypillisesti Fe, Ca, Si, Na, Cl ja Al. Niiden oletettiin olevan peräisin hankautumisen tuloksista, kuten mineraalipöly, tekstiilipöly, eläimet ja kasvikuidut.

Pienet partikkelit olivat peräisin polttamisesta taikka kaasu-partikkeli-muuntumisesta vapaassa ilmatilassa (esim. rikkidioksidin hapettuminen erilaisiksi sulfaateiksi). Pienet partikkelit sisälsivät  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , Pb ja C [Walker 1980].

Pääosa näistä aineksista on peräisin ihmisen omasta toiminnasta [Finlayson-Pitts et al. 1986]

E erityisen kiinnostavia olivat pienet alle 1 µm partikkelit, jotka sisälsivät vesiliukoisia suoloja, kuten sulfaatteja, jotka syntyvät rikkidioksidipäästöistä. Nämä ovat hygroskooppisia ja absorboivat vettä niille ominaisissa ilman “kriittisissä kosteuksissa” ja muuttavat pintakontaminaation sähköä johtavaksi.

Pienet partikkelit kulkeutuvat sisätiloihinkin ilmastointijärjestelmien kautta ja kontaminoivat kaikki pinnat ts. myös laitteiden sisäosat, kun niissä kierrätetään huoneilmaa esim. jäädytyksen vuoksi [Hinds 1982, 1998].

Elektroniikkalaitteissa pintojen johtavuuden kasvaminen näkyy kahdentyyppisinä vikoina:

Suurijännitteisissä sovelluksissa johtavuuden lisäys aiheuttaa satunnaisia läpilyöntejä, jolloin se voi myös tuhota komponentteja. Läpilyönneistä jää jälkiä levyille, joten vian syyt ovat jäljitettävissä.

Pienijännitteisemmissä sovelluksissa esim. 5 V digitaalisovelluksissa, johtavuuden lisääntyminen kasvattaa asteittain johdinten välisiä vuotovirtoja, joiden haitallisuus riippuu ko. signaalitien herkkyydestä vuotovirroille. Johtavuuden kasvu näkyy erityisesti kohdissa, joissa esim. juotteenestopinnoite on reikäinen tai liian ohut tai sitä ei ole taikka komponenttien johdinvälit ovat hyvin pienet. Ongelmat näkyvät jo tavallisilla vanhoilla mikropiireillä, joissa johdinten jakoväli on ollut yleisesti 2,54 mm.

Kasvaneen vuotovirran aiheuttamat viat voivat olla satunnaisia ja niitä on vaikea jäljittää, koska vioista ei jää mitään merkkejä, jotka voitaisiin paikantaa sähköisillä testeillä ja huollossa. Oireilun selvittämiseksi ainoastaan vikojen mahdollisimman tarkka paikantaminen ja pintojen huolellinen analysointi voi johtaa vikojen syiden selvittämiseen.

Pintojen epäpuhtauksien aiheuttamat viat tulevat helpommin näkyviin suurilla jännitteillä, joilla myös kuivempi pöly voi toimia purkaustienä.

Kontaminoituneiden levyjen eristysresistansseja mitattiin johdinten välillä. Tämän perusteella eristysresistanssi putosi tasolta  $10^{10} \Omega$  yli 60 % RH arvoilla hyvin jyrkästi ja oli 80 % RH:lla enää luokkaa  $< 10^6 \Omega$ . Kun kontaminoitu pöly puhallettiin pois kuivalla typpikaasulla, oli eristysresistanssi alle 60 % kosteuksilla luokkaa  $10^{11} \Omega$  ja putosi loivahkosti 95 % RH:lla arvoon  $> 10^8 \Omega$ . Näin ollen pelkkä pölyn poisto paransi resistanssia pari dekadia suurillakin kosteuksilla.

[Burnett et al. 1992] tutkivat myös, millaisia vuotovirtoja taikka parasiittisia resistansseja johdinten välillä 5 V CMOS-piirit sietävät. Tulosten mukaan johdinten välinen resistanssi voi olla 100 k $\Omega$  ennen kuin lähdön kohinamarginaali ylittyy ja looginen tila muuttuu. Analogiapiireissä häiriintymisraja on epämääräisempi; häiriintymisrajaksi pääteltiin noin 1 M $\Omega$  resistanssi tulojohdinten välillä.



Pintojen kontaminaatioherkkyyden testaamiseksi sähköä johtavilla aineksilla on varsin vaikeaa, mutta auttava ja kohtalaisesti todellisuuden kanssa korreloiva menettely on suihkuttaa levyjen päälle ennalta määriteltävä määrä suolaliuosta ja tehdä sitten levyille sähköisiä ja kosteustestejä [Sandroff 1992]. Huomio on tällöin kiinnitettävä nimenomaan eristysresistanssien ja vuotovirtojen havainnointiin ja levyjen toimintahäiriöiden kontrollointiin, jotta syntyvät vikatilat saadaan selville. Levyjen toimintaa seurataan päivä tai kaksi, jolloin saadaan tieto kuinka paljon vikoja esiintyy. Jos testeistä ei ole kokemuksia, kannattaa aloittaa pienemmillä suolapitoisuuksilla ja sitten lisätä asteittain määriä ja testausaikoja, jolloin jossain vaiheessa löydetään selkeä vikaantumisraja.

## **Liitteen 1 kirjallisuusviitteet**

Antler, M. **Survey of Contact Fretting in Electrical Connectors**. IEEE Holm conference 1984. Pp. 3–22.

Antler, M & Drozdowicz, M. H. **Fretting Corrosion of Gold Plated Connector Contacts**. *Wear*, 74, (1981–1982), pp. 27–30.

ASTM B545-97 (2004)e1 Standard Specification for Electrodeposited Coatings of Tin.

ASTM B799-95. Standard Test Method for Porosity in Gold and Palladium Coatings by Sulfurous Acid/Sulfur-Dioxide Vapor. 4 p.

Barton, K., Bartonova, Z. & Beranek, E. **Werkst. Korros.**, 25, 1974. 659 p.

Braunovic, M. **Effect of fretting in aluminum-to-tin connections**. IEEE Holm conference 1989. Pp. 221–228.

Brusse, J. **Tin Whiskers: Revisiting an Old Problem.**, EEE Links Newsletter, Dec 1998. 4 p.

Burnett, W. H., Sandroff, F. S. & D'Edigo, S. M. **Circuit Failure Due to Fine Mode Particulate Air Pollution**. (Bellcore, Red Bank, New Jersey), ISTFA '92 The 18th International Symposium for Testing & Failure Analysis, Los Angeles, California, USA, 17–23 October 1992. Pp. 329–333.

van Dijk, P. & van Meijl, F. **A Design solution for Fretting Corrosion**. AMP Technology, Netherland, IEEE Holm conference 1996. Pp. 375–382.

Dini, J. W. **Electrodeposition, The Materials Science of Coatings and Substrates**. Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, California. Noyes Publications, Park Ridge, New Jersey, USA. 1993. 367 p. ISBN 0-8155-1320-8.

Finlayson-Pitts, B. J. & Pitts, J. N. **Atmospheric chemistry: fundamentals and experimental techniques**. John Wiley & Sons, New York. 1986. 1098 p.

Franey, J. P. **Corrosion Induced Electrostatic Damage Potential**. 1999. Pennington New Jersey 1999. Corrosion and reliability of electronic materials and devices. Proc. Vol. 99–29. Hawaii The 1999 Joint International meeting, 196th meeting of The Electrochemical Society. Pp. 277–281.

Galyon, G.T. & Gedney, Ron. **Avoiding Tin Whisker Reliability Problems**, Circuits Assembly, August 2004, pp 26-31.

Haavisto, A., Nikkola, J. & Viljanmaa, L. Kemia II 2. kurssi, **Elinympäristöme kemiaa**. Kirjayhtymä. 1985. 138 s. ISBN 951-26-1997-0

Henriksen, J., Hienonen, R., Imrell, T., Leygraf, C. & Sjögren, L. **Corrosion of Electronics – A Handbook based on Experiences from a Nordic Research Project**. Bulletin No 102; Swedish Corrosion institute. 1991. 86 p.

Hinds, W. C. **Aerosol Technology**. John Wiley & Sons, New York 1982. 424 p.

Hinds, W. C. **Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles**. 2nd ed. John Wiley & Sons, New York. 1998. 483 p.

Hoban, M. J. [mjhoban@caedm.byu.edu](mailto:mjhoban@caedm.byu.edu) and Lunt, Barry M. **Soldering**. Brigham Young University. 2000.

<http://et.nmsu.edu/~etti/spring97/electronics/solder/solder.html>

Hvims, H. L. & Jørgensen, T. **Conformal Coatings Resistance to Humidity**. SPM-146. 1998, DELTA Danish Electronics, Light & Acoustics. 50 p.

**IEC 60068-2-5** (1975-01). Environmental testing – Part 2: Tests. Test Sa: **Simulated solar radiation at ground level**. 11 p.

**IEC 60068-2-60** (1995-12). Environmental testing – Part 2: Tests – Test Ke: **Flowing mixed gas corrosion test**. 41 p.

**IEC 60426** (2007-01). Electrical insulating materials – **Determination of electrolytic corrosion caused by insulating materials** – Test methods. 26 p.

**IEC 60721-2-1** (2002-10). Classification of environmental conditions. – Part 2-1: Environmental conditions appearing in nature – **Temperature and humidity**.

**IEC 60721-2-1-am1** (1987-01) Amendment No. 1. 15 p.

Appendix A: Geographical survey of statistical open-air climates.

Appendix B: Constitutional diagram for humid air.

**IEC 60721-2-4** (2002-10). Classification of environmental conditions. Part 2-4: Environmental conditions appearing in nature – **Solar radiation and temperature**. 9 p.

**ISO 4623-1:2000** Paints and varnishes – **Determination of resistance to filiform corrosion** – Part 1: **Steel substrates**. Ed. 1. 7 p.

**ISO 4623-2:2003** Paints and varnishes – **Determination of resistance to filiform corrosion** – Part 2: **Aluminium substrates**. Ed. 1. 6 p.

Johansson, E. **Korrosion på elektronik i inomhusmiljö**. Temadag om Fuktskador och Fuktskydd. SEES 10.5.1995. Stockholm. Korrosionsinstitutet.

Jones, D. C. et al. **Water Ingression and Condensation in Sealed Systems**. Proc. of Nat. Tech. Conf. on Plastics in Packaging. 1969. 45 p.

Kalliorinne, K., Kankaanperä, A., Kivinen, A. & Liukkonen, S. **Fysikaalinen kemia 3, Dynamiikka**. Kirjayhtymä. Helsinki 1990. 189 s. ISBN 951-26-3502-x.

Kass, W. J. Unpublished work. (**Model for permeation of moisture through organic seals**). Sandia labs/Albuquerque, New Mexico, May 1974. (Reference of Traeger 1976).

**Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely**. Osa I, Suomen Galvanoteknisen Yhdistyksen julkaisuja No 5, Vantaa, 1996. 308 s.

**Kemiallinen ja sähkökemiallinen pintakäsittely**. Osa II, Suomen Galvanoteknisen Yhdistyksen julkaisuja No 6, Helsinki, 1999. 347 s.

Kohlrausch, F. Über den stationären Temperaturzustand eines elektrisch geheizten Leiters. Ann. Phys. 1, 1900. 132 p.

Kosbar, L. L. & Gelorome, J. **Biobased Epoxy Resins for Computer Components and Printed Wiring Boards**. 1997. IEEE International symposium on Electronics and the Environment, 5–7 May 1997. IEEE Proceedings. Pp. 28–32.

Lee, A. & Mamrick, M. **Fretting Corrosion of Tin-plated Copper-alloy**. IEEE Holm Conference, (1986). Pp. 45–50.

Lees, P. W. & Williams, D. W. M. Fretting Behavior of Gold Flashed Palladium, Palladium Nickel and Palladium Silver Contact Materials. IEEE Holm Conference 1991. Pp. 203–215.

Levine, I. N. **Physical chemistry**. New York, 1978. – XVI. ISBN 0-07-037418-X. 847 p.

Levine I. N. **Physical Chemistry**. Tokyo 1981, 2nd printing. ISBN 0-07-066388-2.

Lefebvre, D. R., Takahashi, K. M., Muller, A. J. & Raju, V. R. **Degradation of epoxy coatings in humid environments: the critical relative humidity for adhesion loss**. J. Adhesion Sci. Technol. 1991. Vol. 5, No 3, pp. 201–227.

Lindberg, J. J. [et al.]. **Polymeeritiede ja muoviteknologia**. Osa 1. Otakustantamo. Espoo. 1984. 369 s. ISBN 951-671-365-3.

Malucci, R. D. **Impact of Fretting Parameters on Contact Degredation**. 1996 42th IEEE Holm Conference joint with 18th International Conference on Electrical Contacts, 16–20 Sept. 1996. IEEE Proceedings. Pp. 395–403.

Mattsson, E. **Basic Corrosion Technology for Scientists and Engineers**. Second edition. Book 636, The Institute of Materials. Bourne Press, Bournmouth UK, 1996. 204 p. ISBN 1-86125-011-8.

MET 17/80. **Korroosionesto varastoinnin ja kuljetuksen aikana**. 1980. MET Tekninen tiedotus 17/80. Suomen Metalliteollisuuden Keskusliitto. 47 s. ISBN 951-817-069-X.

Mottine, J. J. & Reagor, B. T. **Investigation of Fretting Corrosion at Dissimilar Metal Interfaces on Socketed IC Device Applications**. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufacturing Technology. Vol. CHMT-7, No 1, March 1984. Pp. 61–68.

Nieminen, M. **Pesemättömien aaltojuotosjuoksuotteiden käyttö elektroniikkateollisuudessa**. No-clean wave soldering fluxes in electronic industry. 1999. Teknillinen korkeakoulu, Materiaali- ja kalliotekniikan osasto, Elektroniikan valmistustekniikan laboratorio. Espoo. 75 s.

Nordtest Remiss Nr 548-85 Calibration of instruments for measuring the relative humidity using saturated salt solutions. 1987. 31 p.

Palmén, H. **Muovikoteloitujen elektroniikan komponenttien laadun ja luotettavuuden arviointi**. 1990. VTT, Muovien uudet sovellukset sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa. Tekes Muovitekniikan tutkimusohjelma 1990. Espoo. 18 s.

Paronen, J. & Toroi, M. **The influence of atmospheric conditions on the strength properties of board**. Teollisuuden keskuslaboratorion tiedonantoja N:o 231, Helsinki 1959.

Plastics Design Library. Permeability And Other Film Properties of Plastics and Elastomeres. 1995. New York. 706 p.

Pohjanpalo, J. **Muovit ja me**. Muoviyhdistys. 1972.

Ramo, S. & Whinnery, J. R. **Fields and Waves in Modern Radio**. 1953. New York. Second edition. John Wiley & Sons Inc. 576 p.

RoHS: Directive 2002/95/ec of the European parliament and of the council of 27 January 2003 on the **restriction of the use of certain hazardous substances in electrical and electronic equipment**.

Rudra, B. & Jennings, D. 1994. **Tutorial Failure Mechanism Models for Conductive Filament Formation**. IEEE Transactions on Reliability, Vol. 43, no. 3. Pp. 354–360.

Sandroff, F. S. & Burnett, W. H. **Reliability Qualification Test for Circuit Boards Exposed to Airborne Hygroscopic Dust**. IEEE Electronic Components Conference Proceedings of the 42nd Electronic Components and Technology Conference May 18–20 1992, Jan 1992 San Diego, CA, USA. Pp. 384–389.

Santangelo, S. Semiconductor Component Lead Tinning and Solderability. Kester Solder Co. Chicago 1999.

Schneider, G. **Non-metal hermetic encapsulation of a hybrid circuit**. Microelectronics and Reliability, Vol. 28, No 1. 1988. Pp. 75–92.

Schweigart, H. **Humidity and pollution effects on electronic equipment**. 1999. Climatic and air pollution effects on materials and equipment. Publication No 2, CEEES. Pp. 65–70. ISBN 3-9806167-2-X.

Su, Peng, Ding, Min, and Chopin, Sheila. **Effects of Reflow on the Microstructure and Whisker Growth. Propensity of Sn Finish**. Proceedings of the 55th ECTC. 2005. Pp. 434–440.

Takenori, N., Shige, H., Ikeda, K. & Ueda, T. Kobe Steel Ltd, Kobe, Japan; Vega, L.F. & Colvin, Edward L. Alcoa, Alcoa Center, Pennsylvania, **Filiform Corrosion of Painted Aluminum Alloys in Outdoor Environments**. NACE Corrosion/98, March, 1998. San Diego, Advances in Motor Vehicle Corrosion Resistance, No 98551.

Tommila, E. **Fysikaalinen kemia**. Tiedekirjasto N:o 18, Otava, Helsinki 1965. 612 s.

Traeger, R. K. **Hermeticity of Polymeric Lid Sealants**. Author Affiliation: Sandia Lab, Albuquerque, New Mexico. Proceedings 26th Electronic Components Conference 1976. Pp. 361–367.

Traeger, R. K. **Nonhermeticity of polymeric lid sealants**. Author Affiliation: Sandia Lab, Albuquerque, New Mexico. Source: IEEE Transactions on Parts, Hybrids and Packaging vol. PHP-13 nro 2 Jun 1977. Pp. 147–152.

Tunturi, P. J. **Korroosiokäsikirja**. Suomen Korroosioyhdistyksen julkaisuja n:o 6. Suomen Korroosioyhdistys. Hangon Kirjapaino Oy. 1988. 966 s.

Tunturi, P. & Tunturi, P. J. **Metallien pinnoitteet ja pintakäsittelyt**. MET-julkaisuja 3-1999. Metalliteollisuuden keskusliitto. Tammer-Paino Oy. 1999. Tampere. 190 s. ISBN 951-817-696-5.

Törmälä, P., Järvelä, P. & Lindberg, J. J. **Polymeeritiede ja muoviteknologia**. osa 2. Otakustantamo. ISBN 951-671-334-3. 1983. 328 s.

Vahter, J. 1999. **Elektroniikkatuotteiden korroosioherkkyyden määrittäminen**. Tampereen teknillinen korkeakoulu, Materiaalitekniikan osasto. Tampere 1999. 81 s.

Viitanen, H. & Ritschkoff, A.-C. 1990. **Puurakenteiden homehtumiseen vaikuttavat kriittiset kosteus- ja lämpötilaolosuhteet**. Valtion teknillinen tutkimuskeskus: VTT Tutkimuksia 688. VTT, Espoo. 45 s. + liitt. 18 s. ISBN 951-38-3709-2.

Vuorinen, V. **Interfacial reactions between Sn-based solders and common metallisations used in electronics**. 2006 Espoo. Helsinki University of Technology. ISBN 978-951-22-8526-6. 136 p.

Walker, M. V. & Weschler, C. J. **Environmental Science & Technology**, 14. 1980. 594 p.

Woodrow, T. A., & Ledbury, E. A. **Evaluation of conformal coatings as a tin whisker mitigation strategy, part II**. The Proceedings of SMTA International Conference, Rosemont, IL, September 24–28, 2006. 33 p.





## **Liite 2**

### **Ilman laatuvaatimukset**

# Ilman laatuvaatimukset

## Ilmatieteen laitos

[[http://www.fmi.fi/ilmanlaatu/ilakaupu\\_10.html](http://www.fmi.fi/ilmanlaatu/ilakaupu_10.html)]

Ilmanlaatuun vaikuttaa päästöjen määrä ja luonne sekä päästökorkeus. Suomessa ja muissa EU-maissa viranomaiset antavat määräyksiä ja tavoitteita suurimmista sallituista päästöistä ja päästökorkeuksista (piippujen mitoitus). Liikenteen päästötä valvotaan pakokaasumääräyksin.

Suomen Valtioneuvoston päätös ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeuman tavoitearvosta on annettu 19. kesäkuuta 1996.

*Taulukko 1. Ilmanlaadun ohjearvot terveydellisten haittojen ehkäisemiseksi, Suomen valtioneuvoston päätös, 19.6.1996.*

Aine	Ohjearvo (20 °C, 1 atm)	Tilastollinen määrittely
Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> )	250 µg/m <sup>3</sup>	kuukauden tuntiarvojen 99. prosenttipiste kuukauden toiseksi suurin
	80 µg/m <sup>3</sup>	vuorokausiarvo
Typpidioksidi (NO <sub>2</sub> )	150 µg/m <sup>3</sup>	kuukauden tuntiarvojen 99. prosenttipiste kuukauden toiseksi suurin
	70 µg/m <sup>3</sup>	vuorokausiarvo
Hiilimonoksidi (CO)	20 mg/m <sup>3</sup>	tuntikeskiarvo
	8 mg/m <sup>3</sup>	8 tunnin keskiarvo
<b>Hiukkaset</b>		
Kokonaisleijuma (TSP)	120 µg/m <sup>3</sup>	vuoden vrk-arvojen 98. prosenttipiste
	50 µg/m <sup>3</sup>	aritmeettinen vuosikeskiarvo
Hengitettävät hiukkaset (PM10)	70 µg/m <sup>3</sup>	kuukauden toiseksi suurin vuorokausiarvo
Haisevien rikkinyhdisteiden kokonaismäärä (TRS)	10 µg/m <sup>3</sup> (rikkinä)	kuukauden toiseksi suurin vuorokausiarvo, TRS ilmoitetaan rikkinä

## **Ohjearvot kasvillisuuden ja ekosysteemin suojelemiseksi**

Ilman epäpuhtauksien aiheuttaminen suorien vaikutusten ehkäisemiseksi kasvillisuuteen ja ekosysteemiin laajoilla maa- ja metsätalousalueilla ja luonnon suojelun kannalta merkityksellisillä alueilla on ohjeena, että typen oksidien vuosikeskiarvo, jolla tarkoitetaan typpioksidin ja typpidioksidin yhteenlaskettua pitoisuutta, ei ylitä  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 atm) typpidioksidiksi laskettuna ja että rikkidioksidin vuosikeskiarvo ei ylitä  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ , 1 atm).

## **Tavoitearvo rikkilaskeumalle**

Ilman epäpuhtauksista järvi- ja metsäekosysteemeissä aiheutuvien vaikutusten ehkäisemiseksi Suomen metsätalousalueilla on pitkän ajan tavoitteena, ettei rikkilaskeuman vuosiarvo rikkinä ylitä  $0,3 \text{ g}/\text{m}^2$ . Tavoitearvoon tulee pyrkiä kansainvälisin ja kansallisin toimin.

## **Ilmanlaadun raja-arvot ja kynnysarvot**

Valtioneuvosto on ilmanlaatuasetuksella (9.8.2001//711) antanut päätöksen ilmanlaadun raja-arvoista ja kynnysarvoista. Päätöksen tarkoitus on panna täytäntöön Euroopan yhteisön ilmanlaatua koskevat direktiivit.

## **Raja-arvot terveydellisten haittojen ehkäisemiseksi**

Valtioneuvoston päätöksessä annetaan raja-arvot typpidioksidille ( $\text{NO}_2$ ), rikkidioksidille ( $\text{SO}_2$ ), kokonaisleijumalle (TSP) ja lyijylle (Pb). Raja-arvot ovat samat kuin direktiiveissä lukuun ottamatta lyijyä, jolle on annettu direktiiviä tiukempi raja-arvo perustuen Maailman terveysjärjestön (WHO) ilmanlaatua koskevaan suositukseen. Raja-arvot koskevat alueita, joilla asuu tai oleskelee ihmisiä. Raja-arvot määrittävät suurimmat hyväksyttävät ilman epäpuhtauksien pitoisuudet, joiden ylittyminen ilmansuojeluviranomaisten on käytettävissä olevin keinoin estettävä. Raja-arvon ylittyessä kunnan tai alueellisen ympäristökeskuksen on ryhdyttävä toimenpiteisiin ilmanlaadun parantamiseksi. Raja-arvojen ylittymisen valvonnasta, raja-arvojen ylityksistä sekä suunnitelmista ja toimenpiteistä ilmanlaadun parantamiseksi alueilla, joilla raja-arvot toistuvasti ylittyvät, on jäsenmaiden raportoitava EU:n komissiolle.

*Taulukko 2. Ilmanlaadun raja-arvot, Valtioneuvoston päätös, 9.8.2001.*

Aine	Raja-arvo $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (20 °C, 1 atm)	Keskiarvon laskenta-aika
Rikkidioksidi (SO <sub>2</sub> )	350 125	1 h 24 h
Typpidioksidi (NO <sub>2</sub> )	200 40	1 h kalenterivuosi
Hiukkaset, PM <sub>10</sub> *)	50 40	24 h kalenterivuosi
Lyijy (Pb)	0,5	kalenterivuosi
Hiilimonoksidi (CO)	10 000	8 h
Bentseeni (C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> )	5	kalenterivuosi

\*) PM<sub>10</sub> hengitettävät hiukkaset, joiden aerodynaaminen halkaisija on alle 10  $\mu\text{m}$ .

### Otsonin kynnysarvot

Kynnysarvot on annettu (voimaantulo 9.9.2003) otsonin aiheuttaman ilman pilaantumisen selvittämiseksi EU:n jäsenmaissa sekä arviointiperusteiksi suunnitelmille, toimille ja ohjelmille, joita voidaan päättää joko EU:n jäsenmaissa tai EU:ssa. Tiedotus- ja varoituskynnysten ylittyminen edellyttää lisäksi välitöntä tiedottamista väestölle terveydelle haitallisista pitoisuuksista.

#### Otsonin tavoitearvot vuodelle 2010

Terveyden suojelemiseksi: 120  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo, saa ylittyä 25 kertaa vuodessa kolmen vuoden keskiarvona.

Kasvillisuuden suojelemiseksi: AOT40 18 000  $\mu\text{g}/\text{m}^3\text{h}$ , viiden vuoden keskiarvo. AOT40-otsonialtistusindeksi lasketaan 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ylittävien otsonin tuntipitoisuuksien ja 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  erotuksen kumulatiivisena summana. Summa kertyy vuosittain 1.5.–31.7. välisenä aikana, ja sitä laskettaessa huomioidaan klo 9.00–21.00 mitatut tuntipitoisuudet.

Katso myös: <http://www.epa.gov/p2/>

An Organizational Guide to Pollution Prevention. August 2001, U.S. Environmental Protection Agency (EPA), EPA/625/R-01/003. 158 p.

## **Liite 3**

# **Korroosionhallinnan katselmointimenettely**

# Korroosionhallinnan katselmointimenettely

## Sisältö

1	Korroosion hallinta elektroniikkayrityksessä .....	2
2	Korroosionsiedon verifointiprosessi .....	2
3	Katselmoinnin tekniset osa-alueet .....	10
4	Elektroniikan katselmointimenettely .....	15
4.1	Katselmointikohteen rajausta .....	15
4.2	Käyttöympäristö .....	15
4.3	Tuotteen sisäinen mikroilmasto .....	17
4.4	Tuotantoympäristö .....	17
4.5	Kuljetus ja varastointi .....	19
4.6	Kotelorakenteet .....	20
4.7	Näppäimistö .....	21
4.8	Näyttö .....	22
4.9	Ulkoiset kontaktit .....	22
4.10	EMC ja korroosio .....	23
4.11	Liitinkontaktien perusominaisuudet .....	24
4.12	Komponenttilevykokonaisuus .....	28
4.13	Juottaminen ja korroosio .....	29
4.14	Herkkyys sähköisille muutoksille .....	30
4.15	Komponenttispesifikaatiot .....	31
4.16	Sähkömekaniikan osuus vikataajuudesta .....	31
4.17	Komponenttien korroosio .....	31
4.18	Testausmenetelmät korroosion hallitsemisessa .....	34
4.19	Vastaanottotarkastukset .....	35
4.20	Kenttätiedon hallinta ja huolto .....	36
4.21	Korroosiovikojen analysointimenetelmä .....	37
4.22	Asiakkaiden omat spesifikaatiot .....	38
4.23	Alihankkijasuhteet .....	38
4.24	Käyttöohjeet .....	39
4.25	Toimenpide-ehdotusten käsittelytapa .....	40

## 1 Korroosion hallinta elektroniikkayrityksessä

Korroosion hallintaa varten käydään elektroniikkayrityksen katselmoinneissa läpi tuotteiden ympäristövaatimuksia, tuotannon ja kuljetusten vaikutuksia korroosiokäyttämiseen sekä tuotteiden teknisiä ratkaisuja komponenttitasolta valmiisiin tuotteisiin.

Katselmointi lähtee ympäristöolosuhteiden määrittelystä käytössä, kuljetuksissa ja tuotannossa.

Huomattava osa katselmoinneista kohdistuu sähkömekaanisiin ratkaisuihin erilaisissa liittimissä, piirilevyllä sekä komponenttien liitännäjohtimissa unohtamatta EMC-kontaktien toimivuuden varmistamista.

Toinen pääkohde on materiaalien, komponenttien ja tuotteen kuljetuksista ja alihankinnoista aiheutuvien korroosio-ongelmien selvittäminen.

Mikäli yrityksellä ei ole aikaisempaa korroosionhallintaan sovellettua katselmointimenettelyä, kannattaa tässä esitettyä menettelyä kokeiltaessa asettaa tavoitteeksi yrityskohtaisen katselmointimenettelyn luominen. Katselmointien tulisi johtaa myös konkreettisiin toimenpiteisiin korroosionsiedon kehittämiseksi, joita koskevat ehdotukset kannattaa listata erikseen muistiin aina, kun sellaisia tulee esiin katselmoinnin aikana.

Toimenpide-ehdotukset kannattaa käsitellä järjestelmällisesti katselmointimenettelyn lopussa esitetyllä tavalla.

## 2 Korroosionsiedon verifiointiprosessi

Korroosionsiedon suunnittelun verifiointimenettely kannattaa suunnitella projekti-kohtaisesti ja kytkeä osaksi muuta tuotekehitysprosessia. Kunkin tuotekehitysprojektin luonne, laajuus ja olemassa olevat tiedot aikaisemmista tuotteista vaikuttavat siihen, miten verifiointi kannattaa tehdä.

Koska korroosion hallinnan teknisillä ja logistisilla ratkaisuilla on suuria vaikutuksia elektroniikkatuotteen mekaniikkaan, pinnoitteisiin, komponenttivalintaan sekä valmistuksen ja alihankintojen logistiikkaan, on *ensimmäiset katselmuks*et sovittava jo tuotteen varhaiseen *ideointi- ja määrittelyvaiheeseen* ja suunnittelutyön alkuosaan. Näissä alkuvaiheen katselmuksissa tarkistetaan korroosioteknisten ominaisuuksien yleiset vaikutukset tuotteeseen ja tuotekehitykseen. Tärkeää

on sopia suunnittelun organisoinnista sekä niistä katselmuksista, joissa käsitellään korroosionsiedon suunnittelun tuloksia ja vaikutuksia tuotteeseen. Katselmointi ulotetaan myös alihankkijoihin ja materiaalien toimittajiin. Samalla sovi-  
taan myös korroosionsiedon suunnittelun tavoitteet ja sisällön laatu ja laajuus se-  
kä otetaan alustavasti kantaa siihen, millaisia kokeellisia mittauksia ja testejä  
käytetään verifiointin tukena.

*Verifiointin sisällön* ja menettelytapojen määrittelyä varten on alle koottu luettelo  
niistä asioista, jotka olisi otettava mukaan katselmuksiin. Sen mukaan, mihin  
tuotteen kehitysvaiheeseen ao. katselmus liittyy, käsitellään eri asiakohtia tar-  
peellisessa laajuudessa.

Samalla on pidettävä mielessä *verifiointikohteen oma olemus* eli se, onko kyse  
suppeasta komponenttilevytason vai laajasta järjestelmätason taikka jostain näi-  
den välillä olevasta verifiointista. Hahmotellaan, kuinka kyseisessä tapauksessa  
verifiointi olisi tehtävä, määritellään, kuinka tarkka verifiointin on oltava, minkä  
tyyppisiä mittauksia ja testejä on käytettävä ja ketkä osallistuvat verifiointin to-  
teutukseen.

Tarkistetaan, mitä *aikaisempaa suunnittelu- ja testaustietoa* ko. tuotteesta on  
olemassa ja ovatko tiedot edelleenkin käyttökelpoisia uuden suunnittelutyön veri-  
fiointin yhteydessä. Tässä vaiheessa määritellään verifiointin itsensä kustannus-  
taso ja se riskitaso, jolla tuote kelpuutetaan tuotantoon.

*Verifioijan rooliin* ei kuitenkaan kuulu tuotteen suunnittelu, koska suunnittelija  
vastaa suunnitteluprosessista ja sen tuloksista ja myös huolehtii työnsä organi-  
soinnista. Verifioija auttaa toiminnallaan suunnittelutyön edistymistä kohti tavoit-  
teltua lopputulosta.



## Verifiointiprosessin yleinen sisältö

### 1 Verifiointikohteen määrittely

Rajataan se osa tuotekehityksestä, johon verifiointi kohdistuu, ja perehdytään ao. kohteeseen ja sille asetettuihin yleisiin tavoitteisiin. Sekä tuotteen suunnittelijoiden että verifioijien on perehdyttävä riittävässä laajuudessa kyseiseen tuotteeseen, jotta voitaisiin rajata itse verifiointiprosessin sisältö tarkoituksenmukaiseen laajuuteen suhteessa tuotekehitysprojektiin ja voitaisiin myös suunnata se teknisesti tärkeisiin kohteisiin.

### 2 Katselmointiajankohdat

Korroosionsiedon suunnittelun verifiointi aloitetaan tuotteen tai tuotekehitysprojektin ideointi- ja määrittelyvaiheessa, jossa asetetaan kehitystyön tavoitteet. Katselmoinnit sovitetaan ao. projektin ratkaisuvaiheisiin, joita voivat olla esim. tavoiteasettelu, korroosionsietotason määrittely, materiaali- ja komponenttitietojen valinta, suunnitteluperiaatteiden valinta, kotelointiluokan valinta, IP-luokitus, mittausten ja testien käyttö, valmiin suunnittelutuloksen arviointi ja kenttätietojen keruun suunnittelu. On tärkeää sovittaa katselmuksat riittävän varhaisiin vaiheisiin, jotta tuotekehityksen eri haaroissa tehtävien ratkaisujen vaikutukset voitaisiin ottaa huomioon mahdollisimman hyvin.

Mahdollisuuksien mukaan määritellään myös alihankkijoiden kanssa pidettävien katselmointien ajankohdat ja sisältö.

### 3 Organisaatio

Sovitaan niistä henkilöistä, jotka osallistuvat suunnitteluprosessiin ja korroosionsiedon suunnittelun verifiointiin. Osallistujina on oltava eri vaiheiden katselmuksissa soveltuvin osin tuotekehitysprojektin päällikkö, korroosionsiedon suunnittelun projektipäällikkö ja laatuvaastaava sekä tarpeellisessa määrin muita suunnittelijoita ja laatuvaastuuhenkilöitä, joille kuuluu vastuu muista suunnittelun osa-alueista kuten, sähköinen, mekaaninen, lämpö-, EMC-, logistiikka- ja ympäristösietoisuuden suunnittelu.

Myös komponenttien ja materiaalien valinnasta vastaavien henkilöiden on osallistuttava soveltuviin katselmoointeihin. Suotavaa on käyttää etenkin korroosionsiedon suunnittelussa käytettyjen periaatteiden ja testausmenettelyjen katselmoinnissa mahdollisia ulkopuolisia asiantuntijoita, joilla on riittävä osaaminen korroosionhallinnasta tai sen osa-alueista.

Kun tuotekehitys on jaettu eri organisaatioyksiköille tai delegoitu osittain alihankkijoille, olisi varmistettava, että näiden kanssa sovitaan riittävässä määrin

korroosion hallinnan suunnittelua sivuavien tietojen (spesifikaatioiden) vaihdosta ja mahdollisista katselmoinneista. Erityisen tärkeää tällöin on huolehtia niistä toimitusrajapintojen määrittelyistä, joista kukin organisaatioyksikkö vastaa. Projektipäällikön tehtävänä on varmistaa, että näissä rajapinta-asioissa toteutetaan riittävä päällekkäisyys, jottei olennaisia asioita jää kahden vastuuyksikön välimaastoon.

Korroosionsiedon suunnittelutyön jäsentämisestä työn sisällön mukaan on sovitettava alkuvaiheen tuotekatselmusten yhteydessä, jotta eri suunnittelijoilla olisi riittävä kuva kunkin tehtävä- ja vastuualueesta. Tämänkin osa-alueen rajapintojen toimivuus on varmistettava riittäväillä henkilöiden välisillä kontakteilla, jottei suunnitteluun jää "harmaita ei kenenkään alueita".

#### **4 Raportointimenettely**

Verifointitulosten dokumentointi on välttämätöntä tehtyjen ratkaisujen, testaus- tulosten ja niihin mahdollisesti liittyvien korjaavien toimenpiteiden varmentamiseksi. Verifointiraporteissa tulisi mainita käsiteltyjen asioiden ohella erilaiset ongelmat ja niiden käsittely, korjaavat toimenpiteet perusteluineen ja uusintatarkastusten tulokset sekä verifointiin osallistuneiden henkilöiden nimet.

Varsinaisen korroosionsiedon suunnittelun yhteydessä on hyödyllistä ylläpitää päiväkirjaa (lokiä) suunnittelun yksityiskohdista. Tällainen muistiinmerkitseminen auttaa kokemusperäisen suunnittelutiedon kertymistä. Lisäksi näiden muistiinpanojen tulisi varmistaa se, että toinen suunnittelija voi niiden avulla päätellä, millä perusteilla tietyt ratkaisut on tehty. Tämä vähentää myös kesken projektin tapahtuvasta suunnittelijan vaihtumisesta aiheutuvaa häiriötä.

Testit ja niihin liittyvät mittaukset on syytä suunnitella etukäteen. Hyvät ennakkosuunnitelmat vähentävät riskiä testausvirheiden vuoksi menetettävästä tiedosta, samoin testien uusimistarve vähenee oleellisesti. Myös dokumentointityötä ja tulosten analysointityötä voidaan vähentää hyvällä ennakkosuunnittelulla.

## 5 Korroosionsiedon suunnittelu

Varsinaisen korroosionsiedon suunnittelun verifiointissa käsittely suunnataan ainakin seuraaviin osa-alueisiin:

- korroosionsietotavoitteet käytössä, kuljetuksessa, varastoinnissa
- ympäristösietoisuus, mekaniikka, lämpösuunnittelu, EMC, yms.
- luotettavuustavoitteet ja riskialttiit johdinkuviot ja komponentit
- viranomaismääräykset ja yrityksen soveltamat standardit
- materiaali- ja komponenttiedot (pinnoitteet, vikamekanismit)
- korroosiotekniset perusratkaisut
- alihankkijoiden tuotteiden korroosionsietoisuus ja kuljetuslogistiikka
- mittausten ja testaustarpeiden huomioon ottaminen suunnittelussa
- suunnitteludokumentit ja loki sekä tiedostojen varmuuskopioinnit.

Suunnittelussa huomio kiinnitetään valittujen perusratkaisujen ja todellisten ympäristöolosuhteiden keskinäiseen yhteismitallisuuteen.

## 6 Analyysimenetelmät ja mittaukset

Korroosio- ja ilmastollisissa testeissä käytettävien analyysimenetelmien avulla saadaan laitteesta todellista tietoa, joka kuvaa melko hyvin myös käytön olosuhteita. Verifiointissa tarkistetaan suunniteltujen analyysimenetelmien (visuaalinen tarkastus, mikroskopia, kontaktiresistanssin ja eristysresistanssin mittaaminen, SEM, toiminnalliset testit, jne.) sekä mittausten laadulliset ja määrälliset tarpeet suhteessa ao. tuotekehitystehtävään. Analyysitarpeet on tiedostettava jo suunnittelun yhteydessä, ja suunnittelijan olisi määriteltävä ne kohteet, joita testataan ja miten korroosiota ja ilmastollisia vaikutuksia testattavissa tuotteissa analysoidaan.

Analyysien verifiointi sisältää mm. seuraavat tarkistuskohteet:

- analyysikohteiden valinta käyttökelpoisen tiedon saamiseksi
- analyysimenetelmien valinta ja tekniset tarkkuudet
- mahdolliset pinnoitteiden, materiaalien ja komponenttilevyjen mittaukset
- analyysitulosten mahdolliset virhetulkinnot
- analyysitulosten kerääminen ja talletus sekä dokumentointi.

Analyysien ja mittausten ennakoivalla suunnittelulla vältetään mittaus-tilanteessa helposti syntyviä virheitä ja varmistetaan, että suunnittelun verifiointissa tarvittavat tiedot saadaan ao. mittausten yhteydessä. Tässä auttaa mittausdokumenttien harkittu valmistelu ennen mittauksia.

## 7 Testaus

Testauksessa tuotteen protomalli tai valmis tuote altistetaan halutuille ympäristö- ja käyttötilannetta vastaaville rasituksille. Perustestejä voidaan tehdä laboratorio-olosuhteissa käyttämällä laitetta sen normaaleilla ja/tai maksimaalisilla kuormilla. Sen mukaan, kuinka paljon tietoa halutaan ja tarvitaan, laite altistetaan myös niihin erilaisiin ääriolosuhteisiin, joihin se joutuu käyttöolosuhteissaan. Tyypillisiä korroosionsiedon suunnitteluun liittyviä testejä ovat staattiset ja dynaamiset kosteus- ja lämpötestit sekä erilaiset kemikaali- ja kaasutestit. Myös mekaanista tärinää voidaan käyttää korroosio-ominaisuuksien testaukseen. Tärkeää on varmistaa näiden testien avulla, että tuote

- toimii erilaisissa ääriolosuhteissa
- ei vaurioidu testausolosuhteissa
- ei korrodoidu liikaa ko. testeissä
- toimii luotettavasti suunnitellun käyttöiän.

Testien rasiustasoa voidaan nostaa myös tarvittaessa esim. asteittain niin korkealle, että saadaan laite vikaantumaan, jolloin saadaan selville kuinka kaukana ollaan vikaantumisrajasta normaalin spesifikaation rajoilla.

Korroosionsiedon suunnittelun itsensä kannalta oleellista on varmistaa, että tuotteen korroosiosuojausominaisuudet, koteloinnin tiiviys, maalipinnoitteet, liitinpinnoitteet, jne. ovat testeissä suunnitelmien mukaiset. Samalla on pidettävä huoli, että myös testausympäristön arvot ovat testauspesifikaation mukaiset.

Testeissä on aiheellista mitata todellisia korroosiota ja tuotteen sähköistä toimintaa kuvaavia parametreja, (toimintahäiriöt, pintojen kontaminaatio, pintojen korroosio, jne.), jotta voitaisiin nähdä, kuinka lähellä suunnittelutavoitteita ollaan. Pelkkä toimii/ei toimi tiedon kerääminen testeistä saattaa aiheuttaa suuria virhearviointeja tuotteen toimivuuden arvioinnissa. Jos laitteen sisäosien pintoja ja koteloiden läpi kulkeutuvia aineksia ei analysoida, menetetään oleellista tietoa laitteen toimivuudesta käytössä. Vastaavasti tärinätesteissä olisi tutkittava erilaisten liittimien kontaktipintoja (koskettimet ja vaippa), onko niissä selviä kulumajälkiä, mikä voisi vaikuttaa korroosionsietoon.

Tuotannon yhteydessä voidaan käyttää joitain pelkistettyjä testejä ja etenkin visuaalista tarkastusta haluttaessa varmistaa kriittisimpien osien ja alihankintojen oikea laatutaso.

Verifiointissa käydään läpi testaus suunnitelmat ja testien tulokset sekä arvioidaan, ovatko testit riittäviä kuvaamaan ao. tuotteen ympäristörasituksia. Samoin tarkistetaan mahdollisten puutteiden aiheuttamat korjaavat toimenpiteet sekä arvioidaan testien uusimistarve.

## 8 Kenttätietojen hyväksikäyttö

Tarkistetaan suunnitelmat korroosionhallintaan liittyvien kenttätietojen hyväksikäyttöön. Selvitetään onko suunniteltu tiedon keruuta ja miten se aiotaan toteuttaa. Onko huolto-organisaatiolle annettu ohjeistusta korroosion tunnistamiseksi ja vikailmoitusten laatimiseksi?

Verrataan kentältä saatavia seuranta- ja vikatietoja suunnittelun ja testien tuloksiin ja analysoidaan, mistä mahdolliset erot johtuvat, olosuhteiden poikkeuksellisuudesta, suunnittelun virheistä, komponenttien tai materiaalien ominaisuuksista, kuljetuslogistiikasta vaiko laitekonstruktion tehdyistä muutoksista tuotannon yhteydessä?

Kenttätietoihin liittyy myös palaute koskien mm. seuraavia osa-alueita: ympäristöolosuhteet, mekaniikka, ergonomia, turvallisuus, inhimilliset tarpeet, EMC, sähkösuunnittelu ja materiaalien vanheneminen. Kaikilla näillä seikoilla on oma vaikutuksensa suunnitteluun.

Varmistetaan, onko olemassa palautedokumentteja, jotka soveltuvat myös korroosion aiheuttamien ongelmien selvittämiseen.

Varmistetaan, että kentältä saatuja kokemuksia hyödynnetään seuraavassa tuotekehitysvaiheessa ja uusien tuotteiden suunnittelussa.

## 9 Suunnittelu- ja testaustulosten arviointi

Käytännössä tuotekehitysprojektin valmistuessa olisi järjestettävä lopputuloksen varmentamiseksi katselmus, jossa käydään läpi yhteenvedonmaisesti saavutetut suunnittelutulokset sekä ao. laitteelle tehtyjen testien tulokset sekä verrataan niitä asetettuihin tavoitteisiin. Harvoin suunnittelussa saavutetaan aivan kaikkia tavoitteita osittain teknisten syiden vuoksi ja osittain erilaisten aikataulu-, kustannus- yms. rajoitusten vuoksi. Toisaalta vasta tuotannosta asiakkaalle menneistä tuotteista voidaan saada relevanttia tietoa tuotteen käyttäytymisestä käyttöolosuhteissa. Tähän esim. takuuajaksiin korjauksiin liittyvän kenttäpalautteen hyväksikäyttöön kannattaa kiinnittää huomiota, koska vain tällä tavalla suunnittelija voi saada tietoa kuinka suunnittelu toimii todellisissa käyttöolosuhteissa ja voi kehittää teknisiä ratkaisujaan.

Loppukatselmoinnissa käytäviä tarkistuskohteita ovat mm.

- suunnittelutavoitteiden toteutuminen
- tavoitteiden muutostarve tulevaisuuden tarpeita silmällä pitäen
- suunnitteluratkaisujen toimivuus ao. tuotteessa
- testaustulokset ja niiden aiheuttamat toimenpiteet
- korjaavat toimenpiteet koskien tuotetta ja korroosionsiedon suunnittelua
- kentältä saatavan palautetiedon kerääminen ja käsittely
- erilaisten suunnitteluun ja tuotteeseen liittyvien uusien mahdollisuuksien avaavien ideoiden kirjaaminen tulevia tarpeita varten.

## 10 Verifiointin suhde suunnittelun tavoitteisiin

Verifiointi keskittyy yleensä asetettujen tavoitteiden ja tiettyjen hyväksi tunnettujen suunnittelusääntöjen noudattamisen tarkistamiseen. Verifiointia voidaan viedä tätä pitemmälle ja parantaa tuotekehityksen tuloksia, mikäli siinä myös kyseenalaistetaan totuttuja ratkaisuja ja etsitään aktiivisesti parempia keinoja tuotteen ominaisuuksien parantamiseksi.

Tuotekehityksen tavoiteasettelun uudelleenarviointia on syytä tehdä suunnittelun edetessä, jolloin voidaan päästä alkuperäisiä tavoitteita parempaan kokonaistulokseen tuotteen laadussa. Tämän vuoksi olisi hyödyllistä käydä nämä uudelleenarvioinnit läpi yhdessä eri suunnittelualueisiin keskittyneiden suunnittelijoiden kesken.

Tavoiteasettelun itsensä arviointi on tärkeä osa tuotteen verifiointia. Siinä käydään läpi itse korroosionsietotavoite, kotelointiluokka, pinnoitteet, tehot, lämpötilat, mekaniikka, materiaalit, käyttöolosuhteet ja testattavuus. Lisäksi tarkistetaan erilaisiin ympäristötekijöihin, materiaalien vanhenemiseen, turvallisuusvaatimukseen, EMC-rajoituksiin, ergonomiaan, energian säästöön, yms. liittyvien asioiden vaikutus suunnittelun tavoitteisiin.

Komponenttilevyjen ja komponenttien rasiustason hallitsemiseksi on tunnistettava vikaherkimmät pinnoitteet, komponentit ja niihin kohdistuvien poikkeuksellisten rasiusten, kuten kosteuden ja ilman epäpuhtauksien, ylijännitteiden, lämpötilan vaihtelun, mekaanisen jännityksen, jne. aiheuttamat rajoitukset ja vaatimukset suunnittelulle.

Esimerkkinä riskialttiista tekniikasta on suuren ilmamäärän puhaltaminen elektroniikkakaapin läpi, mikä voi aiheuttaa jatkuvaa kontaminaatiota, ylläpitää korkeata kosteutta ja aiheuttaa jatkuvaa lämpötilan vaihtelua. Kaikki nämä kiihdyttävät erilaisia korroosiomekanismeja.

### 3 Katselmoinnin tekniset osa-alueet

Korroosion hallinta tuotteissa perustuu tuotteen ominaisuuksien, materiaalien ja erilaisten ympäristövaikutusten tuntemiseen. Korroosion kannalta tärkeimmät ympäristövaikutukset ovat kosteus, lämpö, ilman epäpuhtaudet ja valmistuksessa sekä käytössä esiintyvät kemikaalit sekä mekaaninen värinä. Kuvaan 1 on hahmoteltu niitä osatekijöitä, joihin katselmoinnissa tulisi kiinnittää huomio.

Koska korroosiovaikutukset ovat aina yhdistelmä monista samanaikaisista vaikutuksista ja vaikutus tuotteen käyttäytymiseen on usein epämääräisen tuntuinen, olisi erilaisten vikamekanismien tunnistaminen eräs tärkeimmistä katselmoinnin tuloksista konkreettisten korjaavien toimenpide-ehdotusten ohella.

Fysikaalisesti yksi tärkeimmistä osa-alueista elektroniikkatuotteen korroosion hallinnassa on tiedostaa lämpötilan ja ilman kosteuden yhteinen vaikutus kastumiseen ja sen kautta tapahtuvaan korroosion voimakkaaseen kiihtymiseen lievisäkin ilmasto-olosuhteissa. Erityisesti juokseva tai pinnoille tiivistyvä vesi yhdessä ilman ja pintojen epäpuhtauksien kanssa nopeuttaa oleellisesti korroosiota ja muodostaa sähköä johtavia siltoja johdinten välille.

Katselmoinnin lähtökohtana on rajata se kokonaisuus, johon katselmointi kohdistuu. Näin ollen ensimmäinen tehtävä katselmoinnin rajaamisessa on valita ja kuvata tämä todellinen kohde (tuote, tuotanto, käyttöympäristöt) ja luonnehtia se ymmärrettävällä tavalla, jotta katselmoinnin kelpoisuusalue on sen tuloksia arvioitaessa tunnistettavissa selkeästi.

Katselmointi kohdistuu yksittäiseen tuotteeseen ja sen suunnitteluun, valmistukseen, alihankintoihin, välivarastointeihin, kuljetuksiin sekä käyttöön asiakkaalla.

Kaikissa näissä kohteissa arvioidaan, millaisia ympäristövaikutuksia (korrodoivia vaikutuksia) siinä esiintyy ja millaisia keinoja voidaan käyttää korroosionsiedon parantamiseksi (optimoimiseksi). Tärkeää kunkin yksityiskohdan käsittelyssä on arvioida, mikä todellinen merkitys mahdollisella korroosiolla on tuotteen käyttöominaisuuksiin.

Seuraavassa esitetty katselmoinnin sisältörunko on tarkoitettu elektroniikan katselmointiin. Sitä voidaan soveltaa kaikenlaisiin elektroniikkatuotteisiin.

# Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa



Kuva 1. Korroosion hallinnan katselmointiin liittyvät osa-alueet.

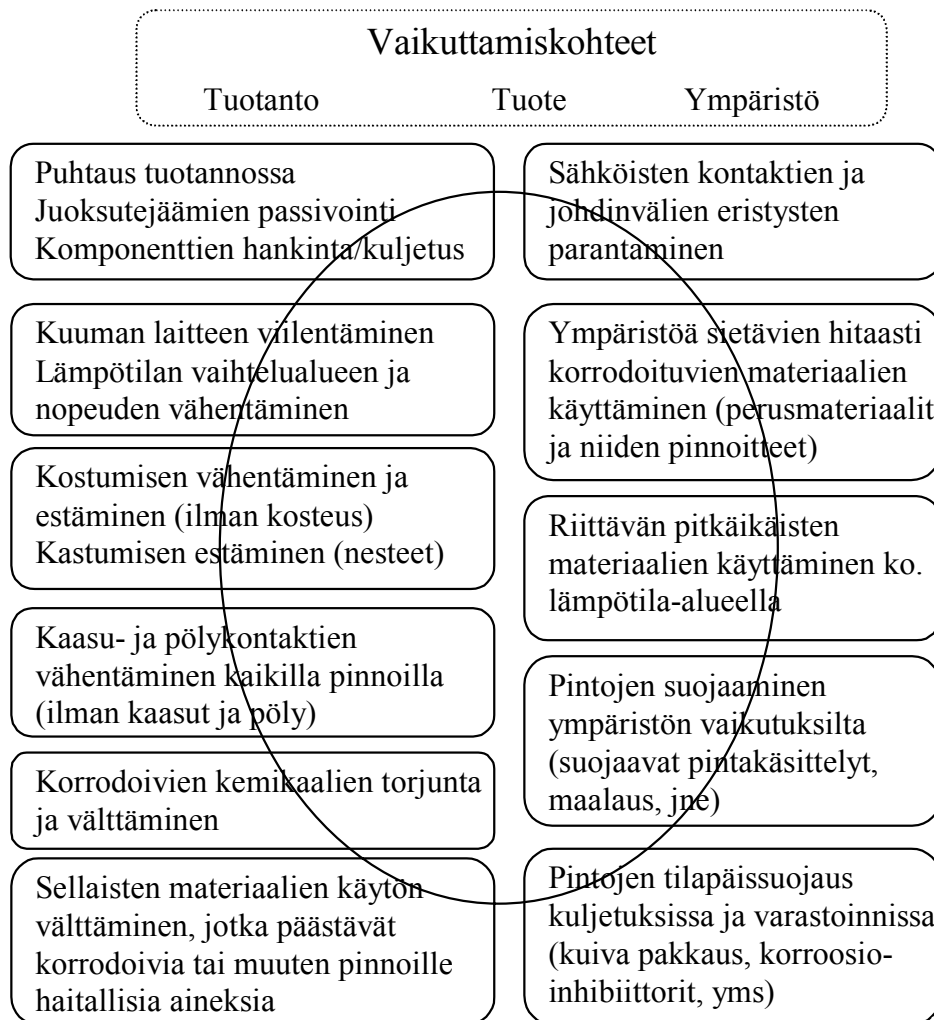


Huomattakoon tässä, että **katselmointi on rajattu pääsääntöisesti komponenttien ulkopuolisiin osiin**, jonka vuoksi tässä komponenteista käsitellään yleensä vain niiden liitosjohtimien ja suojakotelon ominaisuuksia. Tämän vuoksi ei käsitellä esim. mikropiirien sisäistä korroosiota.

Katselmoinneissa käydään läpi seuraavat osa-alueet

- ympäristövaikutukset
- tuotteen rakenteen yksityiskohdat korroosioalttiuden perusteella
- tuotteen ja sen osien spesifikaatiot
- logistiikka tuotannossa, osavalmistuksessa ja tuotteen jakeluketjussa.

Katselmoinneissa syntyy aina joitain toimenpide-ehdotuksia, näiden ehdotusten käsittelytavasta on alempana oma ehdotuksensa.



Kuva 2. Fyysiset keinot korroosion hallitsemiseksi.

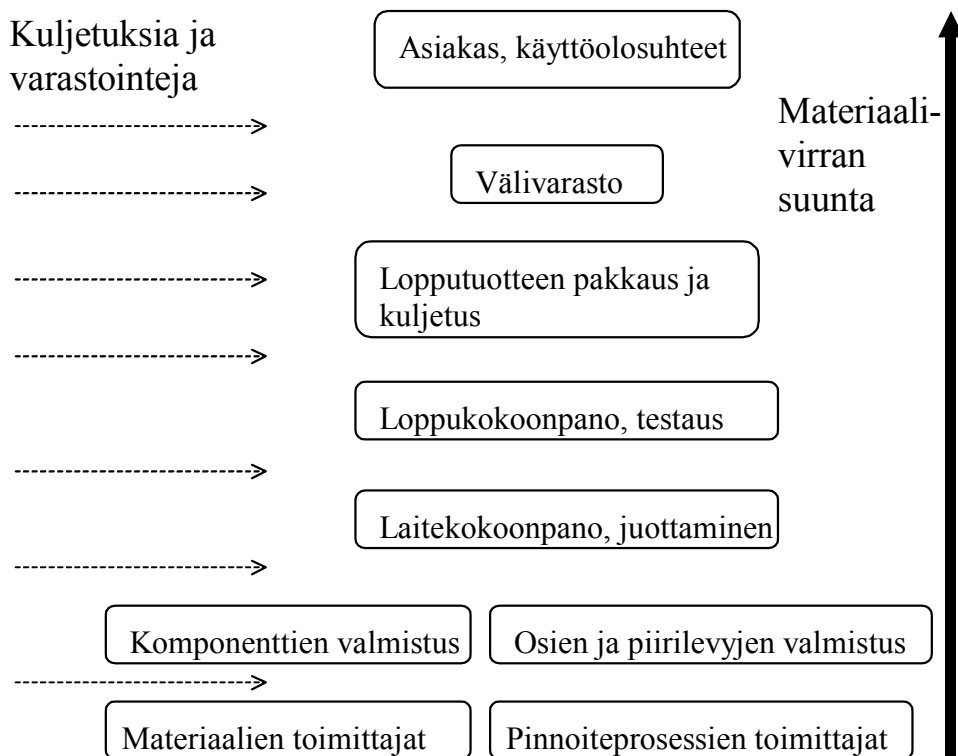
Katselmoiteja tehtäessä olisi kiinnitettävä huomiota kuvassa 2 esitettyihin fyysisiin periaatteellisiin keinoihin vähentää korroosioriskejä. Katselmoinnissa haetaan argumentteja valintojen tueksi, vaikutetaanko tuotteeseen (ns. rakenteelliset keinot), tuotantomenetelmiin ja/vai olosuhteisiin.

Toimenpiteitä harkittaessa on tiedostettava keinot ja niiden fysikaalinen vaikutus tuotteen ominaisuuksiin ja tässä tapauksessa nimenomaan korroosionsietoon. Samalla on koko ajan tarkkailtava ettei ko. toimenpide huononna esim. jonkin kontaktin sähköistä tai termistä resistanssia siten, että siitä syntyy EMC- tai lämpöteknisiä ongelmia.

Katselmointiin on otettava mukaan soveltuvasti suunnittelijoita ja vastuuhenkilöitä seuraavilta alueilta (kuva 3):

- myynti
- komponenttien hankinta
- sähkö-, lämpö-, mekaniikka- ja EMC-suunnittelu
- kuljetuslogistiikka ja pakkaussuunnittelu.

### Korroosion hallinta koko logistiikkaketjussa



Kuva 3. Koko logistiikkaketju mukana korroosion torjunnassa.

Kuvassa 3 on esitetty periaatteellinen kuva laitevalmistukseen sisältyvästä logistiikkaketjusta. Korroosionestossa ja sen katselmoinnissa on välttämätöntä ulottaa toimenpiteet myös alihankkijoihin, koska pääosa korroosionsietoon vaikuttavasta tuotteiden pintakäsittelystä ja muusta materiaalin käsittelystä teetetään alihankkijoilla.

Kuljetusolosuhteet ovat usein hallitsemattomia, jonka vuoksi kuljetuksessa ja varastoinneissa tapahtuu helposti korroosiota, millä on oleellinen vaikutus esim. juottuvuuteen ja tuotteen ulkonäköön. Tuotteen osien yksittäisten valmistusvaiheiden väliset kuljetukset aiheuttavat selviä riskejä kuljetuksen aikana esiintyvien hallitsemattomien ilmastollisten vaikutusten vuoksi. Ihanteellisinta olisi kuljettaa kaikki osat kuivissa ja ympäristön saasteilta suojatuissa olosuhteissa.

Joissain tapauksissa valmiit tuotteet kuljetetaan ja välivarastoidaan todella huonoissa olosuhteissa, jollaisten tilanteiden varalta tuotteiden hyvä pakkaaminen (typpikaasu- tai tyhjiöpakkaus) on ainoa suojaava keino.

## 4 Elektroniikan katselmointimenettely

### 4.1 Katselmointikohteen rajaus

Valitaan tuote taikka tuoteperhe, johon katselmointi kohdistuu. Kuvataan sille ominaisia piirteitä, kuten sen

- käyttäjäkunta ja maantieteellinen käyttöalue ympäristöolosuhteineen
- tekniset erikoispiirteet ja perusteknologia
- käyttötapa (kannettava, liikkuva)
- tuotantotapa ja alihankintasuhteet.

Muodostetaan näistä vaikka summittainen toimintaverkko ja sen avulla mielikuva siitä, mitä missäkin tapahtuu korroosion kannalta. Oleellista on tiedostaa kuinka tuotetta käsitellään alihankinnoissa, tuotannossa, kuljetuksissa ja asiakkaan käyttöpaikalla ja millaisia korroosioon vaikuttavia rasituksia niissä esiintyy.

Kohteen rajauksessa kannattaa aluksi tarkastella korroosiota mahdollisimman laajasti, koska saattaa olla, että jokin teknologinen, rakenteellinen taikka toimintatapamuutos voivat yllättäen synnyttää oleellisia korroosioriskejä. Kun yleiskuva korroosioon liittyvistä asioista on muodostettu, voidaan pääkatselmointi rajata tiukastikin vain johonkin oleelliseen osa-alueeseen.

Katselmoinnissa olisi luotava saumaton yhteistyö sähkö-, mekaniikka-, lämpö- ja EMC-suunnitteluryhmien kesken. Myös logistiikasta, myynnistä ja markkinoinnista vastaavat tahot olisi saatava mukaan korroosionhallinnan katselmointeihin. Myynti saattaa vaatia ratkaisuja, jotka ovat teknisesti huonosti toimivia. Jos jossain näistä ryhmistä tehdään muutoksia vain ao. osa-alueen ehdoilla, syntyy melko helposti uusia korroosioriskejä.

### 4.2 Käyttöympäristö

Tarkastetaan tuotteelle määritetty ulkoinen ympäristöolosuhdespesifikaatio, jossa on otettu huomioon tuotannon, kuljetusten, varastoinnin ja käytön aikana esiintyvät ympäristöolosuhteet. Ympäristön luokittelussa on mahdollista käyttää esim. International Electrotechnical Commission, IEC:n määrittelemiä ympäristöluokituksia (IEC 60721 Classification of environmental conditions), joita voidaan täydentää tuotekohtaisilla tarkennuksilla.

Tarkastellaan lopputuotteen ympäristön kokonaisrasittavuutta ja sen erikoispiirteitä ottaen huomioon inhimillisen käyttäytymisen tuomat seikat. Määritellään mahdollisimman kattavasti elektroniikkalaitteen ulkokuoreen kohdistuvat ns.

- “normaalit” käyttöolosuhteet, joihin joka tapauksessa varaudutaan ja
- “poikkeusolosuhteet” sekä ihmisten/eläinten aiheuttamat lisärasitteet.

Elektronikkaa käytetään kaikkialla maapallolla, mutta sille on mahdollista tehdä joitain aluekohtaisia vaatimuksia (lievennyksiä/tiukennuksia), koska tuotantokin tapahtuu alueittain erillisissä tehtaissa.

Sekä normaaleista että poikkeusolosuhteista olisi hyvä laatia tarkemmat spesifikaatiot, joita voidaan määrääjain tarkistaa.

Tätä tuotteen ulkoista ympäristöolosuhdespesifikaatiota voidaan käyttää sekä asiakasspesifikaationa että tuotteen ulkoisten osien valmistuksessa alihankintaspesifikaatioina.

Korroosion kannalta merkittäviä rasituksia ovat

- lämpötila ja sen vaihtelu
- kosteus ja sade sekä jäätyminen
- ilman epäpuhtaudet kaasut ja pölyt (myös metallipöly, siitepöly)
- biologiset vaikutukset kosteassa ympäristössä: homeet, levät, pieneliöt
- eläinsuojien kemikaalit esim. ammoniakki, sikalat, kanalat, kalan käsittely
- prosessiteollisuuden päästöt
- nestemäiset, yms. kemikaalit
- mekaaninen tärinä.

Koska tuotteita käytetään kaikessa inhimillisessä toiminnassa, on aiheellista tarkistaa, miten ympäristöspesifikaatioissa otetaan huomioon erilaisiin ammatteihin liittyvät tyypilliset olosuhteet, joita kaupunkiympäristössä ei yleensä esiinny. Esim. maansiirtotöiden kosteus ja pöly, karjankasvatuksessa lisäksi eläinsuojien ammoniakkipäästöt, metsurin ja urheilijan hikoilu, sellutehtaan märän pään päästöt, laiva- ja kaivosympäristöt, jne.

Ympäristöspesifikaatioita laadittaessa ja testattaessa on aina tarkistettava sallitaanko kondensoituminen ja onko kondensoituminen kaikissa muodoissaan otettu huomioon. Useimmiten pahemmin korrodoituneissa kohteissa on jossain vaiheessa ollut vettä nestemäisessä muodossa, jolloin korroosionopeus kasvaa useita dekadeja verrattuna kuiviin (RH < 40 %) olosuhteisiin.

### 4.3 Tuotteen sisäinen mikroilmasto

Tarkastetaan tuotteelle määritellyn tuotteen sisäinen olosuhdespesifikaatio käyttäen pohjana ulkoista ympäristöspesifikaatiota. Tarkistetaan onko siihen lisätty laitteen omasta toiminnasta aiheutuvat rasitukset tai olosuhteiden lievennykset. Tämän avulla voidaan tarkistaa komponenteilta vaadittava todellisten ympäristörasitusten sietoisuus. Tuotteen kotelointi osin suojaa komponentteja ja osin lisää rasituksia esim. nostaa niiden käyttölämpötiloja.

Tarkastellaan tuotteen kotelorakenteen ja tuotteessa käytettyjen materiaalien vaikutusta tuotteen tiiviyyteen, sisäilmaston laatuun ja erilaisten sisäisten päästöjen (akku, muovit, liimat, jne.) esiintymisen vaikutuksia. Tarkastellaan myös nesteiden, kaasujen ja pölyn kulkeutumista ja kertymistä tuotteen sisään. Tarkistetaan onko näistä mahdollisesti tulevia vaatimuksia lisätty olosuhdespesifikaatioon.

Tarkistetaan osana sisäilmastoa, onko tuotteen mekaaninen rakenne ja pintojen laatu sellainen, että veden kondensoituminen pinnoille ja ahtaisiin rakoihin (kappilaariraot) on helppoa. Jos näin on, on sisäinen kondensoituminen ja veden kertyminen rakoihin otettava mukaan tuotteen sisäisen mikroilmaston määrittelyyn. Tämä vaikuttaa edelleen pinnoite-, suojaus- ja materiaalivalintoihin.

Tuotteen sisäisiin olosuhteisiin on tässä otettava mukaan myös mekaaniset olosuhteet. Esim. värinä ja iskuilla on taipumus aiheuttaa pinnoitteisiin ja osiin muutoksia, jotka edistävät korroosion etenemistä.

Näin ollen sisäisissä olosuhteissa on tarkistettava, varaudutaanko edellä kuvattujen ilmiöiden aiheuttamaan korroosioriskiin vaiko ei.

### 4.4 Tuotantoympäristö

Tuotantoympäristön aiheuttamat ympäristörasitukset käydään läpi kaikissa tuotantoportaissa niin loppukokoonpanossa kuin eri osia valmistavilla alihankkijoillakin.

Tuotteen osat ovat korroosioherkempiä kuin varsinainen lopputuote, johtuen siitä että osat voivat olla paljaina ilman suojaa sekä kuljetuksissa, varastoissa että tuotannossa. Korroosio näkyy tuotannossa yleensä huonona juottuvuutena, toimintahäiriöinä taikka vain visuaalisena haittana. Tuotannossa jää tuotteiden pinnoille kuitenkin erilaisia jäämiä (likaa) ja pintavirheitä (naarmuja, kolhuja) jotka voivat lisätä paljonkin korroosioalttiutta käytössä.

Tuotteiden piirilevyillä voi olla laajoja kontaktialueita (näppäimistö, EMC-kontaktit, liittimet), jotka alueet saattavat olla jo valmiiksi korrodoituneita kuljetus tai varastointiolosuhteiden vuoksi. Näiden pintojen puhtaana pitäminen kaikissa vaiheissa on tärkeää koko tuotteen toimivuudelle.

Tarkistetaan määritellyt tuotanto-olosuhteet ja millaiset kuljetuksen lastaus- ja purkutilat ja osien sekä tuotteiden välivarasto-olosuhteiden on oltava.

Tarkistetaan tuotantoympäristössä mahdollisesti esiintyvät korrodoivat kemikaalit, kaasut, pölyt ja ilman kosteus sekä yleinen puhtaustaso.

Piirilevyjen juotosalueiden juottuvuus voi heikentyä kuljetuksissa tai varastoinnissa, mutta myös itse juotosprosessin aikana tapahtuu juotosalueiden korrodoitumista. Monivaiheisessa juotosprosessissa, jossa komponentteja asennetaan useassa eri vaiheessa juottamisten välissä levyn molemmille puolille, korkea juotoslämpötila ja/tai juoksutteet korrodoivat niitä juotosalueita, jotka ovat paljaita ja jotka on tarkoitus juottaa seuraavassa vaiheessa (katso 4.13 Juottuvuuden hallinta).

Juotosprosessissa komponenttilevyille jää monenlaisia jäämiä etenkin juoksutteista, joiden tarkoitus on mahdollistaa juottaminen. Tarkistetaan ettei komponenttilevyille jää liikaa ionisia sähköä johtavia epäpuhtauksia ja etteivät juoksutejäämät, etenkin pesemättömissä prosesseissa aiheuta myöhemmin korroosio-ongelmia.

Tuotannossa pinnoille jää helposti rasvoja ym. epäpuhtauksia käsiteltäessä tuotteita paljain käsin. Erityisen haitallisia ovat voiteet ja parfyymit, jotka voivat sisältää silikonia, joka huonontaa juottuvuutta ja heikentää suojapinnoitteiden adheesiota suojattaville pinnoille. (IPC-A-610B Acceptability of Electronic Assemblies, USA December 1994 Includes Amendment 1, January 1996, pp. 5–6).

Myös varsinaiset tuotantoprosessit, kuten ladonta ja juottaminen ja kokoonpano saattavat jättää tuotteisiin korrodoivia epäpuhtauksia (esim. ladontakoneen öljyt ja juottamisen juoksutejäämät). Tarkistetaan onko näiden vaikutus otettu huomioon suunnittelussa. Tällaiset jäämät voivat olla myös korroosiota lisääviä.

Mekaaniset rasitukset, iskut, väännöt ja värinä voivat aiheuttaa komponentteihin ja piirilevyihin mikrohalkeamia (pintaliitoskomponentit), joiden vaikutus saattaa tulla näkyviin vasta asteittain, kun halkeamien kautta tapahtuva korroosio alkaa vaikuttaa. Vastaavasti erilaisiin pinnoitteisiin voi tulla eri syistä naarmuja, joista korroosio lähtee helposti liikkeelle. Näin ollen osa korroosiovaikutusten torjuntaa on välttää liian suuria mekaanisia rasituksia.

Tarkistetaan tuotannossa sovellettavat menettelyt, osien käsittelyn puhtaus, mahdollisuudet vahingoittaa erilaisia kontakteja ja liittimiä mekaanisesti. Esim. joudutaanko tuotannossa avaamaan ja sulkemaan joitain liittimiä useita kertoja, vaikka liittimien spesifikaatio sallisi vain muutaman avaamis-/sulkemistoimenpiteen? Näiden arviointi auttaa paikantamaan riskejä tuotteen kokoamisessa tapahtuville korroosiota edistäville ja muillekin haitallisille vaikutuksille.

Katselmoinneissa käydään läpi em. seikkoja ja tarkistetaan, millaiset käsittelytavat ovat soveliaita ja mitkä tulisi muuttaa.

#### **4.5 Kuljetus ja varastointi**

Tuotteen valmistuksessa tarvittavien komponenttien ja osien kuljetuksissa on aina suuri riski altistua kaikille mahdollisille ympäristön ilmastollisille ym. rasituksille, kuten kylmä ja kuuma, lämpötilan vaihtelu, kastuminen, pölytyminen, altistuminen meri-ilmalle ja mekaaninen vaurioituminen.

Kontti- ja merikuljetuksissa on aina suuri riski kuljetuslavojen altistumiselle tippuvalle suolaiselle vedelle ja lähes 100 % suhteelliselle kosteudelle. Lentokuljetuksissa esiintyy suuria lämpötilan, kosteuden ja ilmanpaineen vaihteluita.

Myös valmiin tuotteen kuljettamiseen asiakkaalle sisältyy selviä korroosioriskejä jo tehtaalla tapahtuvasta pakkaamisesta ja kuljetuslavojen kokoamisesta lähtien. Vastaavasti vastaanottopäässä tapahtuvat pakkausten käsittely, kastuneiden pakkausten kuivausmenettely ja varastointi ehkä epämääräisissä olosuhteissa voivat vahingoittaa tuotetta ja aloittaa näkyvän korrodoitumisen.

Pakkaustekninen perusongelma on löytää sellainen menettely, jonka avulla vältettäisiin sulkemasta pakkauksen (tuotepakkaus, kuljetuslava) sisään suurta kosteusmäärää ilman ja pakkausmateriaalien mukana. Viileämmissä kuljetuslämpötiloissa vesi kondensoituu pinnoille, etenkin metallipinnoille, ja aiheuttaa helposti korroosiota ja esim. tarroissa homeen kasvua. Yksi keino on käyttää hyvin hengittäviä pakkauksia, toinen keino on käyttää tyhjiö- tai suojakaasupakkausta ja kolmas keino on käyttää vettä absorboivia aineita (silikageeli) riittävän tiiviissä tuotteen kuljetuspakkauksissa.

Perusongelmana on kuljettaa osat ja lopputuote siten pakattuna, että tuotteen pinnat säilyvät kuivina ja puhtaina huolimatta ulkoisista rasituksista. Ongelmallista on kuljettaa tuote siten ettei veden kondensoituminen kastelisi tuotteen osia jossain vaiheessa. Kondensoituminen kiihdyttää korroosiota niin paljon, että jo



muutamana tunnin märkänä olo voi pilata tuotteen tai esim. huonontaa oleellisesti juottuvuutta.

Jos esim. osien kuljetuksissa lähietäisyydellä tehtaalta toiselle tuotteita ei pakata suojaavasti, olisi tällöin kuljetus tehtävä nopeasti katetuin lastauslaiturein ja autoin varmistuen vielä ettei lastia seisoteta yön tai viikonlopun yli alttiina kosteuden vaikutuksille.

Myös komponenttien ja osien oma varastointimenettely ja sallitut varastointiajat on tarkistettava. Tähän sisältyy saapuvan tavaran valmistuspäivän tarkistus liian vanhan tavaran välttämiseksi.

Katselmoinnissa tarkistetaan kuljetus- ja varastointimenettelylle ja olosuhteille sekä materiaalien kiertonopeudelle asetetut vaatimukset.

#### **4.6 Kotelorakenteet**

Käyttötavasta johtuen ulkokuori joutuu usein alttiiksi monenlaisille kemikaaleille. Kannettavia laitteita voidaan pitää myös vaatteiden sisäpuolella, jolloin kosteus voi nousta hyvinkin suureksi etenkin lämpimässä ilmastossa ja liikuntaa harjoitettaessa.

Katselmoinnissa tarkistetaan, millaiseksi kotelon tiiviys on suunniteltu, avoin, hengittävä vai suljettu rakenne? Todennäköisesti puoliavoin hengittävä rakenne on hyvä. Kotelon avonaisuuden/tiiviynen perusteella voidaan arvioida sisään pääsevien aineiden määrää ja päätellä tästä kuinka hyviä suojauksia tarvitaan sisäarakenteissa ja millaisia aukotuksia sallitaan?

Veden kondensoituminen kotelon ulko- ja sisäpinnoille sekä muihin osiin on aina mahdollista jossain vaiheessa tuotteen elinkaarta. Kondensoituminen tapahtuu helpoiten paljailla metallipinnoilla ja kapillaariraoissa ts. paikoissa, jotka muutenkin ovat yleensä alttiita korroosiolle. Paljas metallipinta voi jäähtyä (mutta tällöin myös lämpenee) nopeammin kuin maalattu lämpöä hieman eristävä pinta. Maalikerros voi myös hieman absorboida kosteutta, jonka vuoksi maalattu pinta kastuu hitaammin kuin paljas metallipinta.

Kapillaariset raot keräävät vettä eikä vesi poistu raoista kovin helposti. Koska ilmassa ja pinnoilla on aina jonkin verran epäpuhtauksia, kuten suoloja, kulkeutuu kondensoituvaa vettä hyvin herkästi rakoihin ja jää sinne.

Tarkistetaan em. rakenteiden vettä keräävät ominaisuudet ja ulkoisen kotelon herkkyys korroosiolle ja/tai UV-valolle. Lisäksi tarkistetaan miten herkkiä rakenteet ja ulkokuori ovat ihmisen omasta toiminnasta pinnoille tuleville aineksille.

Tarkistetaan, miten runkorakenne tukee sisäosia, aiheutuuko sen elämisestä esim. toistuvaa liitosten ja liittimien rasittumista ja vääntöjä. Ylläpitääkö runkorakenne riittävän hyvin suurien EMC-kontaktialueiden kosketuspaineita?

Sietääkö runkorakenne mekaanista tärinää esim. ajoneuvoasennuksessa. Aiheuttaako tämä käyttötapa ylimääräistä hankausta ja rasiutusta erilaisille kosketinpinnoille ja liitoksille?

Ovatko mahdolliset tiivisteet elastisia myös esim. viiden vuoden kuluttua?

Voiko lämpövaihtelusta johtuva lämpölaajeneminen aiheuttaa rakenteissa ja kontakteissa hankaavaa liikettä ja sitä tietä esim. hiertymiskorroosiota liittimissä? Ovatko eri materiaalien lämpölaajenemiskertoimet riittävän lähellä toisiaan (kotelo, runko, EMC-tiivisteet, piirilevy)?

#### **4.7 Näppäimistö**

Näppäimistö on suuren osan ajasta kontaktissa käyttäjään ja se on myös kuluva komponentti, jonka sisärakenteet ja ulkoinen kuori kuluvat ja rappeutuvat jo pelkän mekaanisen rasituksen vuoksi. Näppäimistö muodostaa myös suuren osan kotelorakenteesta (sen ulkokuoresta). Näin ollen siihen vaikuttavat samat kemikaalit kuin muuhunkin ulkokuoreen.

Tarkistetaan näppäimistön ulkokuoren vanhenemisominaisuudet silmälläpitäen kosteuden ja juoksevan veden läpäisevyyttä. Otetaan myös huomioon merkintöjen pysyvyys. Kestääkö materiaali mekaanisesti, kemiallisesti ja myös UV-valon vaikutuksen. Kulkeutuvatko ihmisen ihoeritteet ja ihovoiteet näppäimistön sisäosiin, jossa ne voivat korrodoida tai mekaanisesti estää näppäimistön toiminnan. Vaikuttavatko nämä aineet näppäimistömateriaalien ominaisuuksiin?

Tarkistetaan näppäimistön tiiviys suhteessa muuhun koteloon, ovatko liitossaumat halutunlaisia? Voiko näppäimistön sisälle tai ympäristöön kertyä vettä kapillaari-ilmiön vuoksi?

Näppäimistön kontaktien korrodoituminen ja kuluminen käytössä kasvattavat kontaktiresistansseja ja vuotovirtoja. Ovatko pinnoitteet yhteensopivia eri kontaktipuoliskoissa? Kestävätkö pinnoitteet suunnitellun käyttöajan?

Miten näppäimistöä voidaan huoltaa? Voiko sitä puhdistaa mekaanisesti tai puhdistusaineilla, onko tästä ohjeistusta huollolle?

## 4.8 Näyttö

Näyttö on periaatteessa suhteellisen hyvin suojattu ja liikkumaton osa tuotteen kotelorakenteessa.

Näytön oma tiiviys ja arkuus kosteuden vaikutukselle sekä taipumus koota vettä sisälleen olisi tarkistettava. Jos laitteeseen pääsee vettä (kondensaatio, vahinko), imeytyykö vesi itse näyttöön taikka näytön ulkoisiin liittimiin.

Näytön liitin piirilevyille voi olla avattavissa. Liittimen korroosionsietoon pätevät samat seikat kuin muissakin vastaavissa liittimissä. Liittimen johdintiheys saattaa joskus olla liian suuri, oikosulkuvaara johdinten välillä voi syntyä metallin vaeltamisesta taikka sähköä johtavista lika- yms. partikkeleista.

Miten näyttö voidaan puhdistaa, onko sille huolto- ja käyttöohjetta? Jos puhdistuksessa käytetään nesteitä, siitä voi olla haittaa näytön toiminnalle.

## 4.9 Ulkoiset kontaktit

Tuotteen ulkoisina kontakteina voi olla erilaisia liittimiä lisälaitteita yms. varten.

Toistuvasti avattavissa liittimissä korroosio-ongelmat liittyvät pinnoitteiden mekaaniseen kulumiseen. Samaten eri liitinpuoliskojen metallipinnoitteiden yhteensopivuus toistensa kanssa vaikuttavat korroosion etenemiseen. Näin ollen kulumiskestävyys ja sähköisesti/mekaanisesti hyvin toimivat materiaalit ovat ratkaisevia liitosten toimivuudelle.

Perusongelmana näissä kaikissa on alttius likaantumiselle johtuen käyttäjien omasta toiminnasta ja ulkoilman suorasta pääsystä kontaktipinnoille. Asiaan voidaan vaikuttaa mm. suunnittelemalla kontaktit siten, että käyttäjä ei pääse kosketelemaan ollenkaan arimpia kontakteja.

Matkapuhelimen antenni, akku- ja SIM-korttiliitoksia avataan harvemmin, joten niissä saattaa hidas korrodoituminen olla vallitseva, mikä korjaantuu tilapäisesti, kun liitokset avataan ja suljetaan muutama kerta.

Pinnoitteiden kulutuskestävyys, sähköisen toimivuuden pysyvyys, mahdollisten jousikontaktien mekaaninen joustavuus, riittävän suuret liikkumavarat (jottei pieni asentovirhe tee kosketuspintaa liian pieneksi) ja pinnoitteiden kemiallinen epäaktiivisuus ovat seikkoja, joiden avulla korroosioalttiutta voidaan kontrolloida. Tarkistetaan myös, onko liittimien yhteenliittämismekanismi sellainen, että se estää kontaktialueiden vaurioitumisen normaalissa käytössä.

Ulkoiset kontaktit toimivat myös osittain avoimina aukkoina laitteen ulkopinnalla. Näillä on merkitystä sekä sisäosien tuulettumisen että vahingossa tapahtuvan kastumisen yhteydessä.

#### **4.10 EMC ja korroosio**

Laitteen EMC ominaisuudet ovat riippuvaiset siitä kuinka hyvin laitteen EMC-suojaukseen käytetyt johtimet, kontaktit, suojakotelot ja metalliset pinnoitteet säilyttävät sähköiset ominaisuutensa laitteen korrodoituessa asteittain sitä käytettäessä.

Korroosion aiheuttamat EMC-ominaisuuksien heikentymiset perustuvat kontaktiresistanssien kasvamiseen ja eristysresistanssin pienenemiseen. Suuritaajuisissa piireissä (luokkaa 1 GHz) EMC-ongelmat voivat korostua sen vuoksi, että sähkö kulkee virranahdon vuoksi aivan johteiden pinnoilla. Tällöin vähäinkin metallipinnan korrodoituminen, joka muuttaa sen pintaresistanssia ja kapasitanssia, saa esim. suurtaajuiset ESD-pulssit heijastelemaan näistä korroosion aiheuttamista epäjatkuvuuskohdista ja lisää täten ESD-herkkyyttä.

Elektroniikkalaitteessa voi olla suuripintaisia EMC-suojauksen kontaktialueita, joissa voi olla vastakkain myös eri materiaaleja, kuten eri metalleja (Al, Cu, Ag, Au, Sn, Zn, Fe), piirilevypinnoitteita, johtavia maaleja, jne.

Tarkistetaan millaisia vaatimuksia (resistanssi/kontaktikohta/pituus) EMC-suunnittelijat ovat asettaneet kontaktiresistansseille. Tämän perusteella varmistetaan materiaalien ominaisuuksien riittävyys: materiaalien yhteensopivuudet, resistanssit ja korroosioalttumukset sekä esim. joustavien materiaalien elastisuuden säilyminen.

EMC-tiivisteitä käytettäessä tarkistetaan, että kontaktipintojen/alueiden muotoilu on sellainen että pintojen väliin ei kertyisi vettä tai ainakin keskialue säilyisi kaikissa olosuhteissa kuivana.

Jos EMC-tiivisteiden valmistuksen jälkeen osia kuljetetaan tehtaalta toiselle, tarkistetaan sekä osien kuljetuspakkaus että käsittelyn ohjeistus siltä varalta etteivät tiivisteet vaurioitu eivätkä korrodoitu näiden vaiheiden aikana.

EMC-kontakteja ei yleensä avata, joten niissä ei tapahdu mekaanista kulumista. Korroosio voi olla hitaasti etenevää suhteellisen suojatun tilan ansiosta. Tarkistetaan, jääkö eri pintojen väliin kapillaarirakoja, joihin voisi kertyä vettä ja epäpuhtauksia. Jos käytetään eri materiaaleja toisiaan vasten, on korrodoituminen suurempaa kuin samoja materiaaleja käytettäessä.

Mikäli EMC-kontaktiresistanssin on oltava milliohmeja kontaktikohdittain, ja käytetään esim. Al tai Cu pitoista materiaalia vasten Au-pinnoitetta, on riski galvanisen korroosion aiheuttamalle suojauksen heikkenemiselle melko suuri.

Tarkistetaan ovatko EMC-suojaukset jatkuvia ts. onko niihin jäänyt jo suunnitteluvaiheessa niin suuria rakoja ettei varsinaisilla EMC-kontakteilla ole suurta merkitystä.

Tarkistetaan laitteen kotelon kiinteät saumat, joiden aukeaminen ja korroosio saattaa muuttaa ne rakoantenneiksi, jotka huonontavat laitteen EMC-ominaisuuksia.

#### **4.11 Liitinkontaktien perusominaisuudet**

Liitinten mekaniikkasuunnittelu, materiaalivalinnat ja pinnoitteet ratkaisevat yhdessä sen, kuinka herkkä jokin liitos on korroosiolle ts. kuinka paljon ja kuinka nopeasti liitoksen sähköinen resistanssi kasvaa liian suureksi. Suuri kosketinpaine vähentää korroosion alkuvaiheen vaikutuksia, kemiallisesti epäaktiivinen pinnoite (kulta) ei korrodoitu, mutta ohut jalometallipinnoite ( $< 1 \mu\text{m}$ ) on aina huokoinen, jonka vuoksi sen alla olevat epäjalommat metallit (Cu, Ni) korrodoituvat suhteellisen helposti. Pieniä koskettimia ja kosketinpaineita käytettäessä ongelmaksi muodostuu helposti se, että hyvinkin pieni virhe kosketuskohdan pinnoitteessa voi aiheuttaa vähäisintuntuisen korroosion vuoksi signaalitien katkeamisen. Liitosten avaaminen ja sulkeminen kuluttavat pintoja ja voivat tilapäisesti palauttaa resistanssin pieneksi, mutta kulumisen kiihdyttää korroosiota ja nopeuttaa liitoksen vioittumista.

Liittimistä tarkistetaan seuraavat perusasiat:

Virran ja jännitteen suuruusluokan perusteella tarkistetaan onko kyseessä piensignaalikontakti ( $I < 100 \text{ mA}$  ja  $U < 1 \text{ V}$ ) vai suurempisignaalin kontakti. Piensignaalisissa kontakteissa voivat hyvinkin ohuet korroosiotuotteet pinnoilla aiheuttaa kontaktihäiriöitä, koska kontaktipinnoilla ei tapahdu sähköistä läpilyöntiä, kuten suuremmilla virroilla ja jännitteillä.

Pinnoitemateriaalit valitaan ympäristöolosuhteiden, kosketinvirran, kosketinvoimien ja avaus/liittämiskertojen perusteella. Käytännössä piensignaalisissa liittimissä toimivat vain Au, Ag ja AgPd:n kaltaiset pinnoitemateriaalit. Näistä Ag-pitoiset materiaalit korrodoituvat helpohkosti, jonka vuoksi valikoima jää suppeaksi. Suurempivirtaisissa kontakteissa käyvät Ag- ja Ni-pinnoitteet, koska jännite/virta läpäisee ainakin ohuemmat oksidi- ym. korroosiotuotekalvot. Sn-pinnoitettu liitin toimii hyvin (sietää korrodoivia olosuhteita, pehmeä tina muodostaa kaasutiiviin kontaktikohdan), jos kosketinpaine on suuri eikä liitintä tarvitse avata muutamaa kertaa useammin.

Pinnoitteen kovuus ja tasaisuus vaikuttavat kulutuskestoisuuteen. Suhteellisen kova pinnoite sietää kulutusta paremmin, mutta kosketinpinta jää pienemmäksi kuin pehmeillä pinnoitteilla. Pehmeämpi pinnoite käy harvoin avattaville liittimille, jolloin myös kontaktin laatu on parempi kuin kovilla pinnoitteilla. Pehmeä pinnoite myötää ja saattaa muodostaa lähes kaasutiiviin kontaktin, joka korrodoituu hitaammin kuin kulunut kova pinnoite.

Pinnoitteiden perusominaisuudet ovat:

- pinnoitemateriaalin koostumus
- mahdollisen välikerrosmateriaalin koostumus
- pohjamateriaalin koostumus
- kerrospaksuudet ja niiden tasaisuus
- pinnoitekerrosten kovuus
- pinnoitteen huokoisuus
- pinnoitteen adheesiovoima (kerrosten pysyvyys alustalla)
- pinnan karheus.

Hyvin ohuiden pinnoitteiden käytön perusongelmana on niiden huono mekaaninen kestävyys sekä pinnoitteen huokoisuus. Elektroniikkaliittimissä ohut pinnoite on alle yhden mikrometrin paksuinen.

Metallisten pinnoitteiden prosessointitapa ja pinnoitteen jälkikäsittelyt (kiillotus, voitelu, passivointi) voivat vaikuttaa oleellisesti pinnoitteen korrodoitumiseen. Avattavissa koskettimissa käytetään joskus voiteluaineita kitkan

pienentämiseksi ja kosketuskohdan suojaamiseksi. Näiden ominaisuuksien mittaaminen ja määrittely voidaan yleensä perustaa vain korroosionsietotesteihin ja käyttökokemuksiin.

Jousikontaktien jousiominaisuuksien tulee olla riittävän hyvät (riittävä kosketinpaine, pitkä kestoikä). Messinki myötää eikä säilytä jousivoimaa käytössä. Jo muutama liitoskerta voi aiheuttaa pysyviä muodonmuutoksia. Tämän vuoksi riittävän suurelle joustoliikkeelle mitoitettu berylliumkuparia (BeCu) tai fosforipronssia (SnCu) oleva jousi varmistaa kosketinpaineen säilymisen tuotteen koko elinajan.

Kosketinjousien liiallinen taipuminen käytössä saattaa joissain tapauksissa aiheuttaa ongelmia jousimateriaalin myötörajan ylittymisen vuoksi tai jousen kovan pinnoitteen murtumisen vuoksi. Esim. sähkösaostettuja nikkeli-pinnoitteita koskevan standardin SFS 4446 liitteessä C annetaan testausmenetelmä teräksen päällä olevan nikkelipinnoitteen sitkeydelle. Vähimmäisvaatimus on, että pinnoite kestää 8 prosentin venymän murtumatta. Standardin mukaan testi tehdään 25 µm paksuiselle nikkelipinnoitteelle. Tällainen venymä syntyy koskettimeen, jos taivutussäde on liian pieni. Elektroniikan komponenteille soveltuvia taivutustestejä, joita voi soveltaen käyttää myös pinnoitettujen johdinten tai koskettimien testaamiseen on standardissa IEC 60068-2-21 Environmental testing – Part 2-21: Tests – Test U: Robustness of terminations and integral mounting devices.

Liitântäkertojen lukumäärä rajoittaa pinnoitteiden paksuus- ja kovuusvalintamahdollisuuksia. Jatkuvasti avattavissa kontakteissa on käytettävä paksumpia ja kovempia pinnoitteita ja eikä liian suurta pintapainetta. Vain muutaman kerran avattavissa kontakteissa voidaan käyttää pehmeämpiä ja ohuempia pinnoitteita ja mahdollisesti suurempaa pintapainetta, jolloin kontaktikohta on kaasutiivis eikä korrodoidu niin helposti.

Hiertyminen (fretting), jolla tarkoitetaan kosketinpintojen hankaavaa liikettä toistensa suhteen, voi joissain kosketinrakenteissa aiheuttaa kosketuskohdan korrodoitumista (fretting corrosion, hiertymiskorroosio, hankauskorroosio, kitkakorroosio). Mekaaninen hierova liike irrottaa metallipartikkeleita pinnoitteista ja voi synnyttää esim. palladiumyhdisteillä katalyyttisesti polymeerejä ilmassa olevista kaasusta. Tinapinnoitteet ovat erityisen herkkiä hiertymiskorroosiolle, koska tina hapettuu nopeasti ja on pehmeää. Kosketuskohtaan muodostuvat oksidit ja muut yhdisteet ovat huonosti sähköä johtavia. Hyvin ohuilla tai pehmeillä pinnoitteilla hiertyminen voi pal-

jastaa alusmetallin taikka kova pinnoite voi hieroa vastakkaisen pehmeän pinnoitteen puhki.

Koskettimien mekaaninen hankaava liike (fretting) syntyy tavallisesti mekaanisesta tärinästä, suurten vaihtovirtojen aiheuttamasta sähkömekaanisesta voimasta ja ympäristölämpötilan vaihteluista. Liikkeen amplitudi voi olla muutamasta mikrometristä aina sataan mikrometriin asti.

Katselmoinnissa tarkistetaan liittimien alttius (rakenteellinen) mekaaniselle hankautumiselle ja tärinän, lämpötilan vaihtelujen sekä sähkömekaanisten voimien esiintymisen todennäköiset amplitudit ja määrät ja selvitetään, mitä materiaaleja ja kosketinpaineita pinnoitteissa käytetään.

Liittimen koskettimien sijainti rungossa ja rungon muotoilu tulisi tehdä siten, että pienet asentovirheet liittimiä yhteenliitettäessä eivät vahingoita (taivuta, tms.) liittintä. Samalla olisi varmistettava liitinkoskettimille riittävän suuri taivutusvara, jottei liittäminen aiheuta koskettimiin pysyviä muodonmuutoksia.

Johdinväljen pienentämistä rajoittaa tarvittava eristysresistanssi ja jännitteen kestoisuus. Riski johdinten väliseen oikosulkuun on alle 0,2 mm johdinväleillä suuri, koska jo kohtalaisen pienet irralliset partikkelit (esim. metallihiukkaset) voivat aiheuttaa oikosulun. Myös riski metallin ja korroosiotuotteiden vaeltamisesta eristysvälien yli kasvaa oleellisesti.

Liitäntä- ja irrotusvoiman suuruutta voidaan käyttää koko liitinrakenteen mekaanisen toimivuuden mittarina. Liittimen liitäntä- ja irrotusvoimat vaihtelevat kosketinmäärien ja kosketinten jousiominaisuuksien mukana. Hyvin suuret voimat aiheuttavat tavallisesti mekaanisia vaurioita niin kosketinpinnoitteille kuin runkorakenteillekin ja tekevät liittämisen vaikeaksi. Toisaalta hyvin pienet voimat ilman lukitusta voivat aiheuttaa liittimen avautumisen mekaanisessa tärinässä.

Suurivirtaisten liitinkontaktien mekaaniseen lujuuteen, pysyvyyteen ja resistanssin riittävän pieniin arvoihin on kiinnitettävä huomiota, koska huonossa kontaktissa tapahtuva pienikin resistanssin kasvu aiheuttaa helposti suuren tehohäviön kontaktissa. Esim. 10 mΩ resistanssissa on tehohäviö 1 A virralla 10 mW, 10 A:n virralla 1 W ja 20 A:n virralla 4 W. Yhden watin teho lämmittää ympäristöään niin paljon, että piirilevyn ja muiden eristeiden syttymisriski on suuri.



Liittimien taustajohdotuksen tuenta tarkistetaan mekaanisten rasiusten kuiten vedon, taivutuksen ja tärinän varalta. Samassa yhteydessä tarkistetaan ettei mahdollinen johtimiin kondensoituva tai niiden pintaa pitkin valuva vesi pääse suoraan liittimiin.

#### **4.12 Komponenttilevykokonaisuus**

Tuotteen piirilevyt voivat olla varustetut tiheillä johdinkuvioilla ja siihen on mahdollisesti valmistettu sekä juotettavia että kosketuspaineen avulla ylläpidettäviä liitoksia ja kontakteja. Etenkin EMC-suojaukseen tarvittavat kontaktialueet ovat suuria ja niissä käytetään vaihtelevia materiaaleja. Eri materiaalien yhteensopivuus tarkistetaan.

Kriittisin vaihe on piirilevyn valmistus, mistä levyille jäävät liian pienet johdinvälit, epäpuhtaudet ja huonosti onnistuneet metalliset- ja juotteenestopinnoitteet aiheuttavat vaikeuksia korroosion vuoksi. Piirilevyn olisi myös oltava kuiva ennen pakkaamista kuljetusta varten, jottei se korrodoidu kuljetuksissa.

Korrodoitumista voi tapahtua jo kuljetuspakkauksessa ennen komponenttien ladontaa ja juottamista sekä myöhemmin käytössä. Piirilevyn pinnoitteiden ja yleisen puhtauden laadunvarmistus ovat ratkaisevia.

Komponenttien ladonnassa ja käsittelyssä puhtauden ylläpitäminen ja juottamisessa sellaisen juoksutteen käyttäminen, joka ei myöhemmin aiheuta korroosio-ongelmia, ovat ratkaisevia korrodoitumisen kannalta.

Käytetäänkö komponenttilevyllä sellaisia liimatarroja tai merkintävärejä, joista jää pinnoille korrodoivia tai muuten haitallisia materiaaleja (esim. kloridit merkintäväreistä)?

Juotteenestopinnoite ja lakkaus vähentävät myös kondensoitumisvaaraa, mutta ennen kaikkea suojaavat metallikerroksia ja johdinvälejä mekaanisesti ja suoralta veden kosketukselta. Onko johdinkuvio suojattu riittävästi mekaanista ja kosteusrasitusta vastaan? Riittääkö metallipinnoite ja juotteenestopinnoite vai olisiko jossain kohdin käytettävä paksumpia suojalakkoja?

Komponenttien ja piirilevyjen väliin syntyy luonnostaan kapillaarirako, kun komponentti on vasten piirilevyä. Jos komponentin ali viedään paljaita johtimia, voi tähän kapillaarirakoon mahdollisesti imeytyvä vesi aiheuttaa johdinten korrodoitumisen. Tämän vuoksi johdinkuvio on parasta suojata juotteenestopinnoit-

teella tai lakalla. Hyvin tiheillä johdotuksilla (flip-chip) komponentin alle olisi laitettava eristemassa, joka täyttää tyhjät johdinvälit.

Käytettäessä keskiaktiivisia juoksuotteita (RMA-flux) juotosprosessissa juoksuotteen jäämiä ei yleensä pestä pois. Näistä jäämistä ei yleensä ole haittaa, mutta vaikeissa ympäristöoloissa, joissa joskus tapahtuu pintojen kostumista, saattaa esim. levyyn reuna-alueille tai joihinkin katveisiin kertynyt runsaampi juoksuotteen jäämämäärä aiheuttaa kohtalaista korroosiota. Näin ollen piirilevyn juotosprosessin eräänä laatukriteerina voisi olla varmistaa ettei levyille tule tällaisia jäämäkerrostumia.

### 4.13 Juottaminen ja korroosio

Komponenttien ja piirilevyjen juottuvuuden säilyttäminen on suurin tuotantoon ja kuljetuksiin liittyvistä ongelmista, joiden perussyynä on usein juotettavien pintojen korroosio.

Katselmoinnissa tarkistetaan kuinka komponenttien ja piirilevyjen juottuvuusominaisuudet on varmistettu ja miten komponentteja kuljetetaan ja käsitellään tuotantoketjun eri vaiheissa. Tarkistetaan millaiset spesifikaatiot on olemassa komponenttien liitännäjohtimille ja piirilevypinnoitteille.

Komponenttien johtimet päällystetään erilaisista tuotannollisista syistä joskus tinayhdisteillä, joskus hopeayhdisteillä ja joskus kullalla. Yleensä pinnoitteet ovat halpoja ja näin ollen käytännössä yleensä myös helposti hapettuvia ja korrodoituvia, koska komponenttien hinta ja myös erilaiset valmistustekniset syyt rajoittavat pinnoitteen valintaa. Näitä pinnoitteita voidaan käyttää, mutta tällöin on sekä kuljetusolosuhteiden että varastointiolosuhteiden oltava riittävän hyvät ja lyhyet.

Tina- ja hopeayhdisteet ovat aina pinnaltaan ohuen metallioksidin tai muiden korroosiotuotteiden peitossa, jonka vuoksi niiden juottuvuus kärsii hieman. Kuljetuspinnoitteet ovat usein marginaalisen ohuita ( $< 0,3 \mu\text{m}$ ), jonka vuoksi ne eivät siedä kosteutta ja pitkäaikaista varastointia eikä pinnan raapimista. Jos korroosio on vähäistä, hoituvat juottamisongelmat lievästi aktivoitujen juoksuotteiden avulla, mutta aina joskus esiintyy komponenttieriä, jotka juottuvat liian heikosti.

Piirilevyjen juotosalueet on suojattu perinteisesti juotostinalla (HASL-pinnoite), jonka juottuvuus heikkenee ajan myötä korrodoitumisen vuoksi. Uudemmat orgaaniset juottuvuuden säilyttävät pinnoitteet (OSP) mahdollistavat tiheimmät johdinkuviot ja osin paremman juottuvuuden kuin tinapinnoitteet.

Mikäli juotosprosessi on moniportainen, ts. komponentteja juotetaan levyille useammassa vaiheessa, altistuvat juotosalueet aina edellisessä vaiheessa korkealle juotoslämpötilalle, mikä korrodoi (oksidoi) piirilevyn juotosalueiden pintoja ja/tai juotosalueisiin kertyy edellisten juotosvaiheiden juoksutejäämiä tms. jolloin juottuvuus voi oleellisesti heikentyä. Näiden ongelmien välttämiseksi on tarkistettava sekä piirilevyn juotosalueiden pinnoitteiden että juoksutteiden toimivuus moniportaisessa juotosprosessissa.

Tarkistetaan ovatko eri pinnoitteet, juoksutteet ja juotteet sopivia kyseiseen juotosprosessiin.

Komponenttien muovikotelot imevät yleensä itseensä jonkin verran vettä (alle 0,15 % painosta) jo muutamassa päivässä. Jos esim. mikropiirien kotelot ovat liian kosteita tapahtuu juotoksessa jopa räjähdyksiä, joiden seurauksena komponentit vioittuvat tai niihin jää mikromurtumia, joiden kautta ilma pääsee kotelon sisään. Onko komponenttien kuivana pysyminen varmistettu?

Tämän vuoksi olisi rajoitettava komponenttien ja piirilevyjen kuljetus- ja varastointiaikoja, huolehdittava kuljetuspakkausten kuivana pysymisestä, vältettävä komponenttien likaamista (koskettelua) käytössä, käytettävä riittävän hyvälaatuisia pinnoitteita johtimissa, jne.

#### **4.14 Herkkyys sähköisille muutoksille**

Laitteen häiriöherkkyys sen signaaliteiden ja virransyötön liitoksien resistanssin kasvamiselle tarkistetaan sähkösuunnittelun yhteydessä. Tarkoitus on saada tietoa kuinka suuria resistanssin muutoksia sallitaan eri johdinreiteillä ilman, että laitteen toiminta häiriytyy (näppäimistö, näyttö, ulkoiset liitokset). Tämän avulla voidaan päätellä, miten paljon korroosiota voidaan sallia eri liitoksissa.

Vastaavasti tarkistetaan, miten pieniä eristysresistansseja ja kuinka pieniä jännitekestoisuuksia sallitaan komponenttilevyn eri kohdissa johdinten välillä. Tämän avulla arvioidaan kosteuden ja korroosiotuotteiden johtuvuuden vaikutusta tuotteen toimintaan.

EMC-kontaktien osalta arvioidaan kuinka hyvä sähköisen kontaktin on oltava, ts. kuinka suurta EMC-vaimennusta tavoitellaan kussakin kohdassa.

#### **4.15 Komponenttispesifikaatiot**

Erilaiset komponentti-, piirilevy-, pinnoite-, ym. spesifikaatiot tarkistetaan mahdollisten määrittelyheikkouksien paikantamiseksi, kun otetaan huomioon oleelliset korroosionhallintaan tähtäävät osaset. Näihin sisältyvät kaikkien rakenneosien pinnoite ja materiaalivaatimukset myös alihankinnoissa.

Onko spesifikaatioissa otettu huomioon laitteen sisäiset olosuhteet riittävän pitkälle. Onko mekaniikan rakennevaatimukset ja pintakäsittelyt spesifioitu riittävästi?

#### **4.16 Sähkömekaniikan osuus vikataajuudesta**

Tuotteen luotettavuustarkastelun osana on hyvä tarkistaa sähkömekaniikan osuus tuotteen kokonaisvikataajuuteen. Osuus on ilmeisen merkittävä, jos erilaisia liitoksia on suuri määrä ja käytetään miniatyyrirakenteita kaikissa mahdollisissa osissa. Mikäli osat on räätälöity vain ko. tuotteeseen sopiviksi, voi vikariski kasvaa tai laskea. Jos esim. räätälöity liitin suunnitellaan huonosti (mekaniikka, jousiominaisuudet, pinnoitteet) tai sen valmistuslaatu vaihtelee liikaa, voi tällainen osa huonontaa luotettavuutta. Jos taas räätälöinnin avulla voidaan optimoida liittimen kaikki ominaisuudet yhteensopiviksi muiden osien kanssa ja se on myös korroosion suhteen kestävä, luotettavuus voi olla parempi kuin standardikomponentteja käytettäessä.

#### **4.17 Komponenttien korrosio**

Komponenttien korroosioriskin kannalta komponentit voidaan jakaa seuraaviin ryhmiin, joissa kussakin ryhmässä vallitsevat vikamekanismit kannattaa selvittää viimekädessä komponenttien valmistajien kanssa. Katselmoinnissa selvitetään, mitkä ryhmät tai yksittäiset komponentit omassa sovelluksessa ovat riskialttiimpia korroosion kannalta ja sen perusteella otetaan kantaa, millaisiin toimenpiteisiin kannattaa ryhtyä komponenttispesifikaatioiden, hankintaohjeiden, komponenttien käytön ja testauksen suhteen.

Laittevalmistaja voi vaikuttaa komponenttien korrodoitumiseen lähinnä lieventämällä komponenttien kokemaa mikroilmastoa laitteessa. Suurin vaikutus korroosion vähentämisessä on mikroympäristön liiallisen kosteuden ja liian korkean lämpötilan välttämällä niin toimivassa kuin käyttöseisokissa olevissakin laitteissa. Rannikko- ja meri-ilmastoissa ilman suola-/kloridi-pitoisuus voi tulla merkittäväksi tekijäksi, kuten myös hyvin epäpuhtauspitoiset ja pölyiset tehdas- tai luonnon olosuhteet.

Komponenttilaji	Tyypilliset korroosio-ongelmat
Juotosliitokset	Materiaalin rappeutuminen ajan kuluessa ja etenkin korkeassa lämpötilassa. Mekaanisesti heikkojen seosmetallien syntyminen juotosprosessissa. Mekaaninen väsyminen lämpölaajenemiskerrointen eroavuuksien vuoksi. Kylmät juotokset lian, korroosion ja materiaalien vuoksi. Suurivirtaisten liitosalueiden pieni pinta-ala.
Puristusliitokset	Liitostappeihin, liittimiin, ym. tehtävät johdinten puristusliitokset ovat hyvin tehtyinä sisäisesti kaasutiiviitä nimenomaan kosketuskohdassa. Mikäli liitos jää löysäksi kuluneen työkalun, virheellisten johdinpaksuuksien, liittimen pienuuden, tms. vikojen vuoksi, on liitoksen korrodoitumisriski melko suuri. Myös käytössä esiintyvä tärinä vanhentaa nopeasti löysiä ja mekaanisesti liian heikkoja liitoksia.
Liittimet	Laiteliittimet ovat yleensä avorakenteisia, jolloin ilmassa olevat ainekset pääsevät kontakteihin, hyvä liitinrunko suojaa kuitenkin melko hyvin, ulkoisissa liittimissä rakenteen tiiviys ja pinnoitteiden korroosionsietoisuus ovat ratkaisevia.  Hiertymiskorroosio (fretting) on tyypillinen vikamekanismi, mihin vaikuttaa eniten mekaaninen suunnittelu ja materiaalien valinta sekä pinnoitteet.
Kalvokytkimet	Veden tunkeutuminen kytkimen sisärakenteisiin saumoista tai kalvomateriaalin läpi, kosketusalueen korrodoituminen. Mekaaninen kulumisen ja kalvomateriaalien vanheneminen.
Kytkimet, vipu, kierto	Usein avorakenteisia, jonka vuoksi metallipintojen korroosioriski on kuten liittimissä. Jos kontaktialue on suojattu, kaasukorroosio ja vesi eivät haittaa. Koskettimien mekaaninen kulumisen ja mahdollinen kipinäointi koskettimissa lisäävät korroosiota.
Näppäimistöt	Näppäimistöt ovat suorassa kontaktissa käyttäjiin, mikä lisää erilaisten vahinkojen ja kemikaalien aiheuttamien ongelmien riskiä. Vikamekanismit ovat samoja kuin muillakin kytkimillä.

Piirilevyt	<p>Piirilevyn johdinkuvion tiheys ja sen suojaamisessa käytetyt pinnoitteet ja levyille valmistuksessa jäävät epäpuhtaudet vaikuttavat siihen kuinka herkkä piirilevy on kosteuden ja kontaminaation aiheuttamille korroosioreaktioille. Heikosti kiinnittyneet suojapinnoitteet etenkin kosteassa ympäristössä lisäävät korroosiota veden kertymisen vuoksi.</p> <p>Läpivientien pinnoittaminen on hankalaa, jonka vuoksi suojaava tinapinnoite voi puuttua tai olla liian ohut, jonka vuoksi läpiviennin katkeamiseen johtava korroosioriski kasvaa tuntuvasti.</p>
Releet, kontaktorit	Usein avorakenteisia, kuten kytkimet, relekoskettimien ja korrodoituminen mekaanisen kulumisen, sähköisen kuorman ja ilman epäpuhtauksien ja kosteuden yhteisvaikutuksesta. Tärinän aiheuttamat kosketinhäiriöt.
Nestekidenäytöt	Rakenne saattaa olla puolitiivis, veden tunkeutuminen sisäosiin olisi estettävä, ulkoiset liitäntäjohtimet tiheällä johdinvälillä lisäävät oikosulun ja vuotovirran vaaraa
Mikropiirit	<p>Mikropiirit ovat yleensä koteloitu muoviin, joka hyvin tehtynä suojaa puolijohteen pintaa. Pitkällä tähtäyksellä kotelon sisäiset epäpuhtaudet, johdotuksen korrodoituminen ja puolijohde-epäpuhtauksien ryömiminen sekä metallin migraatio aiheuttavat puolijohdeeseen ja sen metallointiin vikoja. Hermeettiset metalli- ja keraamiset kotelot sietävät parhaiten kosteita olosuhteita</p> <p>Tyypillinen ulkoinen korrodoituminen tapahtuu liitäntäjohtimissa, joiden pinnoite tai sen alla oleva metalli voi korrodoitua ja muodostaa dendrittejä kotelon pinnalle johdinväleihin aiheuttaen näin vuotovirtoja ja oikosulkuja.</p>
Tehopuolijohteet	Tehopuolijohteet vaurioituvat useimmiten suurten virtojen ja puolijohdevalmistuksessa tulleiden virheiden vuoksi. Kotelot ovat usein metallia tai hyviä lämpöä sietäviä muoveja. Näin ollen kotelot ovat yleensä melko tiiviitä eivätkä ulkoiset olosuhteet vaikuta paljoa (paitsi lämpö).

RCL-komponentit	<p>RCL-komponentit ovat yleensä muoviin koteloituja tai maalattuja (vastukset). Kosteuden asteittainen tunkeutuminen sisäosiin lisää korroosion kautta vikoja.</p> <p>Pintaliitostekniikassa korkea juotoslämpötila voi aiheuttaa mikrohalkeamia pintoihin.</p> <p>Keraamiset palakondensaattorit ovat herkkiä mekaanisille- ja lämpörasituksille, jotka voivat synnyttää mikrohalkeamia ja edelleen edesauttaa korroosiota sisäosissa, joka tuo esiin katkokset.</p>
Elektrolyyttikondensaattorit	<p>Elektrolyyttikondensaattorit ovat osin itsekorjautuvia, ts. syntynyt paikallinen vika saattaa korjaantua itsestään. Kosteissa kondensaattorityypeissä elektrolyytin kuivuminen pienentää kapasitanssia. Kotelot ovat yleensä tiiviitä juuri elektrolyytin säilymisen vuoksi, jolloin myöskään ulkoinen vesi ja ilma eivät pääse sisään. Kuivissa elektrolyyttikondensaattoreissa virtapiikit voivat aiheuttaa asteittain etenevän rappeutumisen. Suuren ylivirran vuoksi tapahtuva räjähtäminen on varteenotettava riskitekijä isoja kondensaattoreita käytettäessä.</p>
Tiivisteet	<p>Koteloiden tiivisteet, kuten muutkin materiaalit, voivat päästää korkeassa lämpötilassa (&gt; 40 °C) korrodoivia kaasumaisia tai nestemäisiä aineita. Ongelmat korostuvat, kun laite on tiivis eikä ilmanvaihtoa tapahdu, mikä muuten poistaisi korrodoivat aineet. Näin ollen tiiviissä rakenteissa on erityisesti varmennettava ettei päästöjä tapahdu käyttölämpötiloissa.</p>
Täytemassat	<p>Komponenttien suojaukseen ja lämmönsiirron parantamiseen käytetään usein erilaisia täytemassoja. Täytemassat sisältävät mm. palonestoaineita, joissa voi olla pieniä määriä korrodoivia aineita ja sitoutunutta vettä. Täytemassa on kontaktissa johdinkuvioon ja komponentteihin, mikä voi aiheuttaa jännitteellisten osien korrodoitumista. Mikäli täytemassan ja piirilevyn pinnan väliin jää rakoja, voivat raot toimia veden kertymisreitteinä ja lisätä korroosioriskiä.</p>

#### 4.18 Testausmenetelmät korroosion hallitsemisessa

Tarkastetaan käytössä olevat tuotekehityksen, vastaanottotarkastusten ja tuotannon testaus- ja mittausmenettelyt, joiden avulla voidaan varmistaa tuotteen korroosio-ominaisuudet ja korroosionsieto. Tarkistetaan, soveltuvatko ja ovatko nämä riittävät korroosio-ominaisuuksien tarkastamiseen?

Onko käytössä nopeita pikatestejä, joiden avulla saadaan alustavaa tietoa esim. jonkin piiriratkaisun herkkyydestä korroosion (kosteuden) vaikutuksille.

Onko tuotteen herkkyydestä liitosten ja johdotusten sekä eristysvälien resistanssimuutoksille (korroosioherkkyys, vuotovirrat) analysoitua tietoa, joka olisi tarkistettu sähkösuunnittelijoiden kanssa.

Suunnitteluvaiheen ympäristötestit, mitä käytetään ja miten niitä sovelletaan. Käytetäänkö kosteus- ja korroosiotestejä, onko niissä lämpötilan ja kosteuden vaihtelut mukana, onko kondensaatiota ja kapillaari-ilmiötä tutkittu? Onko täri- nän vaikutusta liittimiin ja kosketuspintoihin tutkittu? Tehdäänkö luotettavuus- testejä kohotetussa lämpötilassa?

Onko käytössä sellaisia testejä, jotka ovat periaatteessa sopimattomia kyseisen tuotteen korroosionsiedon testaamiseen? Mikä on näiden käyttöarvo?

Tyypit testit perustuvat hyväksytyihin olosuhdespesifikaatioihin, tehdäänkö näitä tuotesarjojen alussa ja myöhemmin mahdollisten muutosten yhteydessä.

Tuotantotestaus, mahdolliset ympäristötestit osana tuotantoa, onko niitä mahdollista tehdä?

#### **4.19 Vastaanottotarkastukset**

Päähuomio vastaanottotarkastuksissa pitäisi kohdistua kuljetuksessa syntyvien vikojen tarkkailuun ja oikean tyyppisen tavaran määriin. Tarkastetaan pakkaus- ten kunto ja tarvittaessa osien ja komponenttien ulkonäkö, kosteusvauriot, pinto- jen laatu, sähköiset ominaisuudet.

Komponenttien pakkauksien (jos ovat alkuperäispakkauksia) pakkauspäivämää- rät olisi aiheellista kirjata muistiin, jotta nähtäisiin kuinka vanhaa tavaraa eri toi- mittajilta tulee ja voitaisiin jäljittää mahdollisia syitä esiintyviin juotosongelmiin ja johdin- ym. pinnoitteiden laadunvaihteluun.

Tarkistetaan toimitetaanko komponenttien ja osien vastaanottotarkastustuloksia jalostettuna soveliaaseen muotoon suunnittelijoiden käyttöön, jotta näille tulisi parempi kuva komponenttien ja osien todellisesta laadusta ja tarvittavista kom- ponenttispesifikaatioiden ja mahdollisesti myös kyseisen tuotteen suunnittelun korjaamisesta.



## 4.20 Kenttätiedon hallinta ja huolto

Katselmoinnissa tarkastetaan, onko olemassa ja millainen menettely on korroosiota koskevan kenttätiedon kokoamisesta ja korroosion huomioonottamisesta yhtenä vikailmiönä?

Millaista tietoa kenttäpalautteesta saadaan? Onko palautteessa tietoa vikaantumisten laadusta, laitteen lähiympäristön siisteydestä, vikaantumisajankohdan ympäristöolosuhteista, poikkeuksellisista tilanteista, kuten vesivahinko, myrsky tai ukkonen tapahtuma-aikana, onko tuotetta kuljetettu tai muuten käsitelty tuotetta poikkeuksellisesti?

Onko laitteen huolto-organisaatiolle annettu ohjeita vikojen laadun ilmaisemiseksi myös korroosioperäisten vikojen suhteen. Kiinnittääkö huolto yleensä huomiota vikaantumisten taustatietoihin ja toimitetaanko näitä tietoja laitteen valmistajalle?

Onko asiakkaan (suurasiakkaat) mahdollisesti tekemiä vastaanottotarkastuksien tuloksia käytetty nimenomaan aina riskialttiin kuljetusvaiheen aiheuttamien vahinkojen tarkastamiseen. Onko asiakkaiden kanssa tehty sopimusta palautetiedon saamisesta ja kulkeutuuko tietoa suunnittelijoille?

Olisiko kehitettävissä menettely palautteen saamiseksi myös tuotteen käyttäjiltä?

Kulkeutuuko huollosta ja asiakkailta saatava palautetieto suoraan tuotekehitykseen käyttökelpoisessa muodossa ja hyödynnetäänkö kenttäpalautetta uusissa tuotesukupolvissa.

Onko olemassa vikahavaintolomaketta, jolla saataisiin ainakin huollosta käyttökelpoista tietoa myös korroosiovikojen tunnistamista varten.

Korroosion tunnistamista varten laadituista palautedokumenteista tulisi käydä ilmi ainakin seuraavat perusasiat:

- Onko osa vaihdettu vikaantumisen vuoksi vai muusta syystä huollon yhteydessä?
- Missä kunnossa laite tuli huoltoon? Onko se avattu, onko laitetta puhdistettu tai yritetty korjata, onko se kuljetettu hyvin pakattuna ts. onko siinä vaurioita johtuen kuljetuksesta huoltoon?
- Millainen vikaantunut tuote on ulkonäöltään? Onko siinä silmin havaittavia pintavirheitä, onko vieraita aineksia ulko- tai sisäpinnoilla, onko

värin muutoksia, onko pölyä tai nesteitä pinnoilla, onko laite mahdollisesti räjähtänyt, onko se palanut, haiseeko laite? Onko katkenneita johtimia, jotka ovat selkeästi korrodoituneet, onko selvästi vioittuneita komponentteja? Onko liittimissä havaittavissa kuluneita tai ulkonäköään muuttaneita pinnoitteita.

- Millaisessa tilanteessa toimintavika esiintyi, mikä oli lämpötila, oliko paikallinen ilman laatu poikkeuksellinen, ukkonen, kosteaa, pölyistä, kaasuja, vesivahinko, tulipalo, tuote/pakkaus kastunut?
- Miten toimintavika ilmeni? Laite oikkuili, lakkasi toimimasta, kuuluiko erikoisia ääniä, onko vikoja esiintynyt pitemmän aikaa, onko aikaisemmin ollut jotain häiriöitä, onko häiriöiden määrä lisääntynyt viime aikoina? Miten laitetta on käytetty vian ilmaannuttua?

Varmistetaan, miten menetellään sellaisten laitteiden kanssa, jotka ovat tulleet huoltoon “viallisena” eikä niistä ole löydetty mitään toimintavikaa. Onko huoltoa opastettu käsittelemään tällaisia “viattomia laitteita, jottei niissä olevia vikaantumisen taustalla olevia jälkiä hävitetä?

Jos tällaisia huoltoon tulleita ei-viallisia laitteita on huomattavan paljon, on aiheellista epäillä jotain korroosioon, lämpösuunnitteluun ja/tai EMC-suunnitteluun liittyvää ongelmaa, mitkä esiintyvät käytössä, mutta eivät ehkä näy huollossa. Taustalla voi olla myös komponenttivika, ohjelmistovika tai yksinkertaisesti epäonnistunut sähköinen suunnittelu. Tällaisten piiloviallisten laitteiden tutkimisessa on käytettävä hyviä analyysimenetelmiä, jotta voitaisiin saada selville, vikojen todelliset syyt. Korroosiota, kosteusvaikutuksia ja kontaminaatiota epäiltäessä olisi tärkeää tutkia komponenttilevyt, liittimet ja näppäimistöt tarkemmin mahdollisten vikojen paikantamiseksi.

#### **4.21 Korroosiovikojen analysointimenetelmä**

Tarkistetaan, onko kentältä palautuneiden vialliseksi ilmoitettujen laitteiden analysointiin olemassa riittävää ohjeistusta, jotta korroosion mahdollinen osuus vioittumisessa tulisi tarkistettua.

Analyysin tärkein tavoite on selvittää vikaantumisen todellisia syitä, mikä edellyttää mahdollisimman tarkkaan asiaan vaikuttaneiden jälkien tallentamista sekä tapahtumien taustan selvittämistä.

Tarkistetaan sisältyykö analyysimenettelyyn:

- korroosion tunnistamisen opastus ja ymmärrettävien menettelyjen ja termien käyttäminen vikojen ensihavainnoinnissa
- ohjeet vioittuneen osan pakkaamisesta ja kuljetuksesta vika-analyysiin
- ohje ettei tuotetta saa puhdistaa eikä pintoja kosketella ennen kuin analyysit on tehty
- tuotteen varovainen käsittely vikojen havaitsemisen jälkeen, korroosioviat ovat usein kontaktivikoja, jotka voivat poistua, jos liittimet avataan ja kytkimiä käännellään.
- vian ilmenemistä koskevan taustatiedon sisällön taltiointi ja hankinta ennen vika-analyysia (aika, paikka, olosuhteet, mitä poikkeuksellista)
- visuaalinen tarkastus aluksi ulkopuolisista osista edeten asteittain sisempiin osiin, valokuvaus on hyvä keino dokumentoida esim. korroosion, pölyn ja vesitahrojen esiintyminen ja kulkeutuminen eri paikkoihin
- toiminnalliset kokeet, viallisuuden ja vian luonteen varmentamiseksi
- johdinvälien mahdollisten oikosulkujen tunnistaminen
- löysien kontaktien tunnistaminen, heikot mekaaniset rakenteet
- liitinpintojen kunto, onko korroosion merkkejä, viimekädessä tähän tarvitaan mikroskooppi aluksi 10...20-kertaisella suurennuksella
- näkyvien korroosiotuotteiden koostumuksen analysointimenetelmät
- spesifikaatioiden ja vioittuneen tuoteyksilön vertailu, onko havaitut vialliset osat valmistettu spesifikaation mukaan.

#### **4.22 Asiakkaiden omat spesifikaatiot**

Jos huomattava osa tuotteista toimitetaan suurasiakkaille, voi näillä olla joitain yleisiä vaatimuksia tuotteelle. Tarkistetaan, onko nimenomaisesti korroosioon ja ympäristösietoisuuteen liittyviä vaatimuksia ja poikkeavatko ne yrityksen omasta käytännöstä vaativampaan suuntaan.

#### **4.23 Alihankkijasuhteet**

Alihankinnoissa tarkistetaan onko korroosionsietoon kiinnitetty huomiota alihankkijalle esitetyissä tuotespesifikaatioissa ja onko pakkauksiin, kuljetuksiin ja

prosessointimenetelmiin sekä puhtauteen otettu riittävästi kantaa. Vastaavatko alihankkijan menettelyt edellä kuvattuja vaatimuksia omassa tuotannossa? Onko alihankkija tietoinen korroosiosuojauksen merkityksestä? Onko alihankkijan tuotantoprosessi ja käytössä olevat työ- ja laadunvarmistusmenettelyt sellaisia, että voidaan odottaa tuloksen vastaavan haluttua laatutasoa korroosionsiedon suhteen.

Korroosiosuojauksessa erilaiset pintakäsittelyt ovat avainasemassa. Pintakäsittelyprosessit ovat yleensä vaikeasti hallittavissa, jonka vuoksi olisi määriteltävä, minkä tasoisin toimenpitein jonkin prosessin pysyvyys tarkastetaan. Tämän vuoksi olisi mietittävä hankittavien materiaalien ja osien todelliset laatutavoitteet ja pyrittävä muotoilemaan ne sellaisiksi, että sekä suunnittelija, alihankkija, oma tuotanto että yrityksen asiakas voisivat puhua näistä pinnoiteasioista samaa kieltä.

Koska pinnoitteen todellinen laatu on riippuvainen prosessin sisällöstä, olisi alihankkijoiden kanssa pyrittävä kehittämään pinnoitteiden hankintaspesifikaatiota siten, että siinä otettaisiin huomioon myös välttämätön tieto millä menetelmällä ja millä parametreillä ao. pinnoite toteutetaan.

Alihankkijoille (pinnoittajat, metalli- ja muoviosat) ei välttämättä spesifioida muuta kuin jotkin pinnoitteiden nimelliset arvot, puutteelliseksi voi jäädä tieto varsinaisesta tavoitteesta esim. kestävyys koko maapallolla, ihmisen taskussa, käyttöaika viisi vuotta. Alihankkija puolestaan yrittää tulkita saamansa spesifikaation omista lähtökohdistaan ja optimoi omaa tuotantoprosessiaan. Yhteistä tietoa siitä millaisella pinnoitteella lopputuote toimisi parhaiten ei välttämättä ole tuotteen suunnittelijoilla ja alihankkijoilla.

Erilaisia pinnoitteita käytetään myös sekaisin vaihtelevista syistä. Päällimmäisenä on tuotannon sujuvuus (esim. juotettavuus), mutta kestävyys kenttäolosuhteissa jää taustalle, koska siihen ei ole kunnon otetta.

#### **4.24 Käyttöohjeet**

Pahimpien käyttövirheiden välttämiseksi tuotteen käyttöohjeen katselmoinnissa kannattaa kiinnittää huomiota siihen onko ohjeeseen sisällytetty varoituksia olosuhteista, jotka lisäävät korroosioriskiä.

Ohjeet voisivat sisältää tietoja kastumisen torjunnasta, kondensoitumisen välttämisestä ja erilaisten nesteiden ja kemikaalien käytön rajoittamista laitteen puhdistamisessa. Myös huomion kiinnittäminen käyttöön ulko-olosuhteissa ja yleensä

ulkoilussa, joissa kastuminen (kostuminen lähellä ihoa) ja altistus auringon päisteelle (UV-valo) ovat tyypillisiä korroosiolähteitä.

#### 4.25 Toimenpide-ehdotusten käsittelytapa

Korroosioherkkyyden kannalta tärkeitä toimenpidekohteita on tuotteessa useita. Nämä ehdotukset ryhmitellään katselmoinnin sisältörungon mukaisesti. Ehdotusten käsittelyssä edetään mahdollisuuksien mukaan seuraavasti:

### TOIMENPIDE-EHDOTUSTEN KÄSITTELYTAPA

**Listataan** kunkin osa-alueen **ehdotukset** sitä mukaa kuin niitä syntyy

Kirjataan **perustelu** toimenpiteelle, **miksi** se on aiheellinen

Selostetaan taustalla olevia **vikamekanismeja** siten, että sen perusteella voidaan arvioida keinoja

Tarkennetaan **toimenpiteen sisältöä** ja toteutustapaa

**Valmistaja** arvioi toimenpiteen teknisen ja taloudellisen **kannattavuuden**

**Valmistaja** määrittelee ja **toteuttaa** lopullisen toimenpiteen

**Liite 4**

**Korroosiosanasto**

# Korroosiosanasto

Korroosioon ja ilman laatuun liittyvää sanastoa on seuraavissa lähteissä, joita on käytetty apuna tätä sanastoa laadittaessa.

Sanaston loppuun on lisätty muutamia anglosaksisessa kirjallisuudessa yleisesti käytettyjen suureiden lyhenteitä ja niiden vastaavuuksia SI-järjestelmässä.

**SFS-ISO 8044** (1989-08-22, 1. p.)

Corrosion of metals and alloys. Terms and definitions. Metallien ja metalliseosten korrosio. Termit ja määrittelyt (en fi fr).18 s.

**SFS 5348** (1987-09-21, 2. p.)

Quantities and units. Moisture. Suureet ja yksiköt. Kosteus. 3 s.

ASTM E673-03

**Standard Terminology Relating to Surface Analysis.** 10 p.

The definitions listed apply to (a) Auger electron spectroscopy (AES), (b) X-ray photoelectron spectroscopy (XPS), (c) ion-scattering spectroscopy (ISS), (d) secondary ion mass spectrometry (SIMS), and (e) energetic ion analysis (EIA).

EPA United States Environmental Protection Agency. **Terms of Environment.** <http://www.epa.gov/OCEPAterms/index.html>.

InterCorr International, Inc. **Glossary of Corrosion Related Terms.** <http://www.corrosionsource.com/handbook/glossary/>.

Goosey, Martin, T. **Plastics for Electronics.** 1986. Elsevier Applied Science Publishers. London. ISBN 0-85334-338-1. (Lasisiirtymälämpötila). 380 p.

OK International. Glossary of Terms. Soldering and fume extraction definitions. <http://www.okinternational.com/>.

Vornamo, Hannu. **Ilmansuojelun ja yhdyskuntailmatutkimuksen perusteet.** Kunnallinen terveydenhoitoyhdistys. Painoprint Oy. 1975. Helsinki. 151 s.

<b>Termi</b>	<b>Merkitys</b>
Absoluuttinen kosteus, höyryn osatiheys <i>Absolute humidity</i>	Höyryn massan ja kokonaistilavuuden suhde [SFS 5348]. Esim. ilman sisältämän vesihöyryn massa tilavuusyksikköä kohden ( $\text{g}/\text{m}^3$ ).
Absorbentti <i>Absorbent</i>	Aine, esim. imupaperi, johon toinen aine imeytyy eli absorboituu.
Absorboida <i>Absorb</i>	Imeä itseensä, pidättää sisälleen. Esim. kaasun absorptio aktiivihieleen (vrt. adsorboida). Huom. absorptio, absorboida.
Absorptio <i>Absorption</i>	Aineen imeytyminen toisen aineen (absorbentti) sisään. Esim. kaasu imeytyy (absorboituu) nesteeseen tai kiinteään aineeseen tai neste imeytyy kiinteään aineeseen.
Adheesio <i>Adhesion</i>	Adheesio on kahden pinnan välinen vetovoima, mikä voi olla peräisin valenssivoimista (kemiallinen adheesio), lukkiutumismekanismista (mekaaninen adheesio), van der Waalsin voimista taikka näiden yhdistelmistä. <a href="http://palimpsest.stanford.edu/don/dt/dt0042.html">http://palimpsest.stanford.edu/don/dt/dt0042.html</a>
Adiabaattinen <i>Adiabatic</i>	Lämpötekkinen prosessi, jossa lämpötila muuttuu ilman, että lämpöenergiaa siirtyy järjestelmään tai siitä pois. Adiabaattinen lämpeneminen tapahtuu esim. kun ilman painetta nostetaan lämpöeristetyssä tilassa.
Adsorbaatti <i>Adsorbate</i>	Toisen aineen pinnalle adsorboitunut aine.
Adsorbentti <i>Adsorbent</i>	Adsorboiva aine, joka sitoo toisen aineen pintaansa.
Adsorboida <i>Adsorb</i>	Imeä itseensä, kiinnittää pinnalleen. Käytetään yleensä pintakemiallisten ilmiöiden yhteydessä (vrt. absorboida). Huom. adsorptio, adsorboida
Adsorptio <i>Adsorption</i>	Nesteen tai kaasun aineiden kiinnittyminen jähmeän aineen pinnalle. Jähmeän aineen pintavoimat sitovat muita aineita pintaansa. Hienojakoinen aine (esim. hieno hiekkapöly) adsorboituu paremmin kuin karkeampi aine. Adsorptio on suurinta alhaisissa lämpötiloissa. Suuren molekyyliainon omaava aine adsorboituu helpommin pintoihin kuin pienen molekyyliainon omaava aine.
Advektio <i>Advection</i>	Advektio tarkoittaa meteorologiassa ilmassa liikumista vaakatasossa. Esim. lämpimällä advektioilla tarkoitetaan sitä, että lämmin ilmassa siirtyy



	<p>kylmemmän ilmassa paikalle vaakatasossa. Vastaavasti kostean ilmassa liikkuminen kuivemmalle alueelle tai kääntäen kuivemman liikkuminen kostealle alueelle.</p>
<p>Aerosoli <i>Aerosol, gas dispersoid</i></p>	<p>Kaasun (esim. ilma) ja siihen täysin sekoittuneiden nestepisaroiden (sumu) tai kiinteiden hiukkasten (savu) muodostama seos (lat. aero = ilma, solu'tum = hajotettu).</p>
<p>Aerosolihiukkanen <i>Aerosol particle</i></p>	<p>Kaasuun, yleensä ilmaan, täysin sekoittuneet kiinteät hiukkaset tai pisarat. Karkeat hiukkaset ovat yleensä peräisin mekaanisista prosesseista, hienot syntyvät kaasusta kemiallisista reaktioista tai lämpötilan laskusta aiheutuvan tiivistymisen seurauksena.</p>
<p>Agglomeroituminen, kasaantuminen <i>Agglomeration</i></p>	<p>Hiukkasten, esim. sadepisaroiden, kasvaminen suuremmiksi niiden keskinäisissä törmäyksissä taikka liittyminen muihin hiukkasiin.</p>
<p>Aktiivihiili <i>Activated carbon</i></p>	<p>Huokoinen hyvät adsorptio-ominaisuudet omaava hiilimateriaali. Aktiivihiili on huokoista hiiltä, jolla on erittäin suuri sisäinen pinta-ala luokkaa 400...1 600 m<sup>2</sup>/g ja huokostilavuus on yli 30 cm<sup>3</sup> / 100 g. Tavoitepinta-ala on yli 1 000 m<sup>2</sup>/g. Huokoisten halkaisijat ovat luokkaa 0,2...10 000 nm, Alle 2 nm huokoisia on runsaasti, samoin luokkaa 25...5 000 nm. Keskikokoisia 2...25 nm huokoisia on vähiten tyypillisessä aktiivihiilessä. Aktiivihiili on periaatteessa vettä hylkivää; se adsorboi orgaanisia ja muita ei-polaarisia kaasumaisia ja nestemäisiä aineita. Aktiivihiili toimitetaan jauheena, rakeina tai pelletteinä. [Henning &amp; Degel 1990]. <a href="http://www.activated-carbon.com/solrec2.html">http://www.activated-carbon.com/solrec2.html</a></p>
<p>Alle syöpyminen <i>Underdeposit corrosion</i></p>	<p>Katso pinnoitteen alle syöpyminen.</p>
<p>Alusinkitty <i>Aluminum zincified</i></p>	<p>Teräsohutlevy, jonka pinnoitteen koostumus on 55 % Al ja 45 % Zn</p>
<p>Ammoniakki <i>Ammonia</i></p>	<p>NH<sub>3</sub>; syövyttää kaikkia kupariseosmetalleja.</p>
<p>Ammonium, ammonium-ioni <i>Ammonium</i></p>	<p>NH<sub>4</sub><sup>+</sup>; syövyttää kaikkia kupariseosmetalleja.</p>

Anodinen suojaus <i>Anodic protection</i>	Anodisessa suojauksessa suojattava kohde tehdään ulkoisen jännitelähteen avulla positiiviseksi erilliseen apuelektrodiin nähden. Jännite valitaan siten, että suojattava kohde on passiivialueella. (vrt. katodinen suojaus ja Pourbaix diagrammi)
Anodisointi, anodinen oksidointi <i>Anodic oxidation</i>	Menetelmä, jossa kappaleen pintaa hapetetaan sopivassa liuoksessa sähkövirran avulla. Menetelmässä voidaan käyttää sekä tasa- että vaihtovirtaa.
Atomi <i>Atom</i>	Aineen pienin rakenneosa, joka voidaan kemiallisin menetelmin todeta. Muodostuu positiivisesta ytimestä ja ydintä ympäröivästä elektroniverhosta.
Bentoniitti-savi <i>Bentonite</i>	Bentoniittisavi (montmorilloniitti-savi) on kidevesipitoinen luonnon mineraali (kalsium alumiinisilikaatti) sisältäen kymmeniä kolloidisia silica-mineraaleja ollen halvin adsorbentti veden poistoon. Sitä käytetään myös mineraalilisäaineena joissain elintarvikkeissa, rehujen lisäaineena, viinin kirkasteena ja maanrakennuksessa vesieristekerrosten tekemiseen. Maalitekniikassa bentoniittia käytetään orgaanisesti modifioituna geelinä, jota käytetään nostamaan maalin viskositeettia niin, että raskaat pigmentit eivät laskeudu maalipurkin pohjaan.
Biosidi <i>Biocide</i>	Mikrobien kasvua estävä aine, joka toimii kemiallisesti tai biologisesti. Estää bakteerien, sienien (homesienien), levien ja erilaisten itiöiden kasvua. Esim. otsoni ja kloori toimivat myös biosidinä.  Biosidejä käytetään hyvin laajasti elintarvikkeista ja juomavedestä alkaen kaikenlaisten materiaalien säilymistä edistämiseen. Esim. limoittumisen estämiseen niitä käytetään erilaisissa teollisuuden vedenkiertojärjestelmissä, kuten paperiteollisuudessa. Käytetään myös leikkuunesteissä konepajateollisuudessa. Osa biosideistä ärsyttää silmiä ja hengityselimiä ja ne ovat lisäksi voimakkaita allergeeneja.
Diffuusio <i>Diffusion</i>	Aineen (kiinteä, neste, kaasu) leviäminen toiseen aineeseen sekoittumalla. Diffuusiomekanismi pyrkii levittämään aineen tasaisesti toiseen aineeseen. Diffuusio tarkoittaa myös aineatomien ja molekyylien satunnaista siirtymistä aineessa. Myös energia voi levitä diffuusion avulla.

Dispersio <i>Dispersion</i>	Epäpuhtauden laimeneminen diffuusion tai turbulenssin kautta.
Elektrolyytti <i>Electrolyte</i>	Todelliseksi elektrolyytiksi sanotaan ainetta, jossa on ioneja sen puhtaassa olomuodossa ilman liuotinta. Näin ollen elektrolyytiksi sanotaan ainetta, joka tuottaa ioneja liuokseen, mikä näkyy liuoksen sähkönjohtavuuden muutoksina. Yleensä elektrolyytillä tarkoitetaan liuosta, jonka muodostaa tietty liuotin (esim. vesi) ja siihen liuennut elektrolyytti (esim. suola). Elektrolyyttiä sanotaan vahvaksi tai heikoksi elektrolyytiksi sen mukaan onko syntynyt liuos hyvin vai huonosti sähköä johtava kohtuullisilla elektrolyyttipitoisuuksilla.
Elektrolyyttinen korroosio <i>Electrolytic corrosion</i>	Elektrolyyttinen korroosio syntyy sähköjohteisiin, kun johteita yhdistää elektrolyyttiä (esim. suolaa) sisältävä materiaali ja johdinten välillä on jännite. Korkeammassa potentiaalissa oleva johdin liukenee (korrodoituu) asteittain ja voi lopulta katketa. Katso ionien vaeltaminen.
Elektromigraatio <i>Electromigration</i>	Metalliatomien vaeltaminen sähköjohtimessa johtimessa kulkevan sähkövirran vaikutuksesta. Johtimessa kulkevat elektronit pommittavat atomeja, jotka siirtyvät paikasta toiseen, jolloin seurauksena on johtimen paikallinen ohentuminen ja metallin kasaantuminen toiseen paikkaan. Elektromigraatio on erityisesti suuritiheyksisten alumiinijohtimien varustettujen mikropiirien tyypillinen vikamekanismi.
EMC <i>Electromagnetic compatibility</i>	Sähkömagneettinen yhteensopivuus tarkoittaa sitä, että laite ei saa tuottaa liikaa muita laitteita häiritseviä sähkömagneettisia häiriöpäästöjä ja toisaalta laitteen on toimittava, vaikka ympäristössä esiintyykin kohtuullinen määrä sähkömagneettisia häiriöitä tai toisten laitteiden hyötysignaaleja (esim. radiopuhelinten lähetteitä).
Emissio <i>Emission</i>	Epäpuhtauslähteistä tapahtuva kaasun tai hiukkasten päästö ilmaan (meteorologia).
Emäksinen <i>Alkalic</i>	Liuos, jonka pH on yli 7, katso pH-arvo
Epäpuhtaus <i>Air impurity, pollutant</i>	Puhtaan ilman peruskoostumukseen kuulumaton aines tai normaalikoostumuksesta poikkeava osa.

Eristysresistanssi <i>Insulation resistance</i>	Kahden toisistaan eristetyksi tarkoitetun sähköjohtimen välinen resistanssi. Eristysresistanssi mitataan tietyllä tasajännitteellä, joka vastaa ko. käyttösovelluksen olosuhteita. (katso ominaisresistanssi).
Eroosiokorroosio <i>Erosion corrosion Impingement attack</i>	Ilmiö, joka syntyy, kun syövyttävä liuos/kaasu liikkuu erittäin nopeasti pinnan yli. Korroosio kiihtyy koska nesteen nopea liike sekä vaihtaa pinnalla olevaa nestettä/kaasua että pitää pinnan puhtaana sitä mahdollisesti suojaavista korroosiotuotteista. Nesteessä olevat kaasukuplat kiihdyttävät korroosiota.
Etikkahappo <i>Acetic acid</i>	Etikkahappo (CH <sub>3</sub> COOH) on orgaaninen happo, jota syntyy luonnossa etikkahappobakteerien aineenvaihdunnan tuloksena. Happoa voidaan valmistaa myös synteettisesti. Mm. kosteuden avulla kovettuvista silikonihartseista vapautuu etikkahappoa kovetusreaktiossa.
Filiform-korroosio	Katso lankamainen korroosio
<i>Fretting</i>	Katso hiertymiskorroosio, hiertyminen
Fosfatoiointi <i>Phosphating</i>	Menetelmä, jossa metallin pinnalle saostetaan korroosiolta suojaava metallifosfaattikerros. Menetelmiä on useita, joista tavanomaisemmat ovat rautafosfatoiointi ja sinkkifosfatoiointi. Fosfatoiointi lisää myös orgaanisten pinnoitteiden tartuntaa.
Fotokemiallinen sumu <i>Smog</i>	Ilman epäpuhtauksien valokemiallisen hapetusprosessin seurauksena muodostunut ilman saastuneisuus, joka aiheuttaa kyynelvuotoa, kasvivaurioita ja otsonin kaltaisen luonteenomaisen pistävän hajun.
Galvaaninen jännitesarja <i>Galvanic series</i>	Metallien galvaaninen jännitesarja tarkoittaa metallien jännitteitä suhteessa standardivetyelektrodiin, kun todellisten metallien jännitteet on mitattu todellisessa liuoksessa, esim. merivedessä, tietyssä lämpötilassa. Jännitesarja kuvastaa metallien keskinäisiä jalouseroja. Galvaaninen jännitesarja pätee vain a.o. mittausolosuhteissa (vrt. sähkökemiallinen jännitesarja). Jalousteeltään hyvin erilaiset metallit korrodoituvat helposti joutuessaan kosketuksiin keskenään (metalliparikorroosio).
Galvaaninen korroosio	Katso metalliparikorroosio
Getteri-materiaali	Kaasujätteen poistamiseen soveltuvat aineet, joita käytetään poistamaan esim. typpikaasun epäpuhtauksina

<i>Getter</i>	<p>olevaa vettä, happea, vetyä, hiilidioksidia, jne.          Getterimateriaalit toimivat yleensä korkeissa yli 200 °C lämpötiloissa. On myös olemassa huoneen lämpötilassa toimivia getterimateriaaleja esim. Zr-V-Fe. Tyypillinen getterin käyttö on tyhjiökuvaputkien valmistus, jossa putkesta poistetaan jäännöskaasut lämmittämällä induktiivisesti putken sisälle asetettua getterimateriaalia.  <a href="http://www.getters.com/">http://www.getters.com/</a>          Puolijohdeteollisuudessa käytetään getterimateriaaleja esim. sputterointiprosessissa poistamaan ei toivottuja hiukkasia kammista, jossa mikropiirin metallointi valmistetaan.</p>
Hajuraja <i>Odor treshold</i>	Alin ihmisen aistein havaittava epäpuhtauden pitoisuus ilmassa, joka aiheuttaa epäpuhtaudelle luonteenomaisen hajun.
Hapan <i>Acid, acidic</i>	Liuos, jonka pH on alle 7, katso pH-arvo
Hapettuminen <i>Oxidation</i>	Reaktio, jossa aineen positiivisten varausten määrä kasvaa tai negatiivisten vähenee (aine luovuttaa elektroneja). Hapettuminen tapahtuu esim. anodisella alueella, jossa metalli ionisoituu luovuttaessaan elektroneja (hapettuu ioneiksi, vrt. korrosio).
HASL, juotepinnoite <i>Hot air solder levelling</i>	HASL-pinnoite on piirilevyn juotosalueiden juotepinnoite, jossa piirilevy kastetaan juotteeseen juotosalueiden pinnoittamiseksi ja sitten poistetaan liika pinnoite kuumailmapuhalluksen avulla.
Hiertymiskorrosio <i>Fretting corrosion</i>	Hiertymisen (fretting) aiheuttama vastakkaisten pintojen kosketuskohdan korrodoituminen (fretting corrosion, hiertymiskorrosio, hankauskorrosio, kitkakorrosio). Mekaaninen hierova liike irrottaa metallipartikkeleita, jotka korrodoituvat helposti. Kosketuskohtaan muodostuvat oksidit ja muut yhdisteet ovat usein huonosti sähköä johtavia. Lisäksi hiertyminen voi synnyttää esim. palladiumpinnoilla katalyyttisesti ilmassa olevista kaasuista polymeerejä.
Hiertyminen <i>Fretting</i>	Hiertyminen tarkoittaa pintojen edestakaista hankaavaa liikettä toistensa suhteen, jolloin metallipinnoilla tapahtuu pinnan muokkaantumista ja metallipartikkeleiden irtaantumista, mihin vaikuttavat mm. pintapaine, pinnan tasaisuus ja pintamateriaalien kovuus. Hiertymisen syynä voi olla mekaaninen värinä taikka lämpötilan vaihtelun aiheuttama liike. Hiertyminen voi aiheuttaa esim. liitinkoskettimissa pintojen korrodoitumista

	(hiertymiskorroosio). Hiertymisliike elektroniikan liittimissä on suuruusluokaltaan mikrometristä muutamaan kymmeneen mikrometriin.
Hiukkasjakoiset ainekset <i>Particulates</i>	Nestepisaroista ja kiinteistä hiukkasista koostuva ilman epäpuhtaus.
Huokoskorroosio <i>Pore corrosion</i>	Huokoskorroosioksi sanotaan tyypillisesti jalometallipinnoitteessa olevien mikroskooppisten reikien, huokoisten ja virheiden, kohdalla syntyvää korroosiota. Korroosio on periaatteessa metalliparikorroosiota, jossa epäjalompi alusmetalli korrodoituu ja työntää korroosiotuotteet kohden jalompaa pintakerrosta ja levittää tuotteet sitten pitkin pintaa.
Hydrofiilinen <i>Hydrophilic</i>	Vettä "suosiva" (vettyvä) aine, joka turpoaa ja muodostaa vedessä kolloidisen liuoksen. Esim. arabikumi on hydrofiilinen.
Hydrofobinen <i>Hydrophobic</i>	Vettä hylkivä (vesipakoinen) materiaali.
Hygroskooppinen <i>Hygroscopic</i>	Vettä sitova ja absorboiva materiaali. Hygroskooppisia ovat mm. ruokasuola, kalsiumkloridi, alkoholit kuten glyseroli, propyleeniglykoli ja sorbitoli sekä rikkihappo, jotka absorboivat vettä ilmasta ja sitovat sen kemiallisesti.
Härmistystä <i>Sublimate</i>	Aineen muuttuminen suoraan kaasumaisesta olotilasta kiinteäksi aineeksi. Esim. veden muuttuminen kiinteään olomuotoon alhaisessa lämpötilassa.
Höyryn läpäisevyys <i>Vapour transmission rate</i>	Esim. jonkin kalvon vesihöyryn läpäisevyys, joka on riippumaton paine-erosta kalvon ylitse. Höyryn läpäisevyys on kerroin VTR modifioidussa Fickin ensimmäisessä laissa $W = VTR (A t)/s$ , jossa W on kalvon läpi kulkenut höyrymäärä (vrt. läpäisykerroin).
Ilmastollinen korroosio <i>Atmospheric corrosion</i>	Materiaalien korroosio ilmassa olevien ainesten, kuten hapen, veden, suolan ja rikkiyhdisteiden sekä lämpötilan ja auringon säteilyn vaikutuksesta. Laajemmin ymmärrettynä siihen voidaan lukea myös osa mikrobiologisesta korroosioista, mikä tapahtuu ilman kautta leviävien ainesten ja mikrobien myötävaikutuksella.
Inertti materiaali <i>Inert material</i>	Tässä merkityksessä: Luonnostaan korroosiota sietävä pysyvä materiaali, joka korrodoituu hyvin hitaasti tavallisissa ympäristöolosuhteissa.  Tietyissä olosuhteissa kemiallisesti passiivista ts. pysyvää materiaalia sanotaan inertiksi. Esim. typestä sanotaan, että

	se on hajuton, väritön ja <u>inerti</u> kaasu, esiintyy N <sub>2</sub> -molekyyleinä. Samoin jalokaasut, kuten helium, ovat inerttejä kaasuja. Muoveista esim. polypropeenä ja teflonia voidaan sanoa inerteiksi. Jäte on pysyvää (inertiä), jos sille ei tapahdu biologisia, fysikaalisia tai kemiallisia muutoksia (esim. lasi, mineraalimaa).
Ioni <i>Ion</i>	Sähköisesti varautunut atomi- tai molekyylikokoinen hiukkanen (esim. metalli-ioni vesiliuoksessa, vety-ioni)
Ionien vaeltaminen <i>Ionic migration, electrochemical migration</i>	Ionien vaeltamisella tarkoitetaan ionien kulkeutumista sähköjohteesta toiseen, kun johdinten välillä on jännite. Vaeltamisen edellytyksenä on kosteuden läsnäolo ionien syntymistä ja kulkutien olemassaoloa varten. Vaeltavat ionit alentavat eristysresistanssia ja voivat lopulta oikosulkea johtimet. Katso elektrolyyttinen korrosio.
IP-suojausluokka, IP-koodi <i>IP code, International protection</i>	IP-suojausluokka tarkoittaa IEC 60529:ssä määriteltyä laitekotelon suojausluokitusta. Luokitus kattaa tiiviydeltään erilaiset kotelorakenteet alkaen avoimista kosketussuojatuista rakenteista ja ulottuen pöly-/vesitiiviisiin rakenteisiin.
Juotteenestopinnoite, JEP <i>Solder resist, solder mask</i>	Piirilevyillä käytettävä tilapäinen tai pysyvä suojamateriaali, jonka tarkoituksena on estää juotteen ja epäpuhtauksien tarttuminen muualle kuin varsinaisille juotosalueille. Juotteenestopinnoitetta käytetään myös estämään dendriittien kasvua piirilevyn johdinkuviossa (IPC-SM-840C).
Jännityskorrosio <i>Stress corrosion cracking</i>	Jännityskorrosio (jännityskorrosiomurtuma, jännityskorrosion aiheuttama rakoilu, halkeilu tai murtuminen.) on korrosioilmiö, joka syntyy syövyttävien kemikaalien ja metallin vetojännityksen yhteisvaikutuksesta tai metalliin absorboituneen vedyn vaikutuksesta. Metallin murtuu jännityskorrosion takia ennen sen rakenteellisen lujuusrajan saavuttamista.
Kaasu <i>Gas, vapour</i>	Aineen olomuoto, jossa molekyylit ovat irrallaan toisistaan. Monet syövyttävät aineet kulkeutuvat kaasumaisina pitkiäkin matkoja (SO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> )
Kapillaari-ilmiö <i>Capillary phenomenon</i>	Nesteen kulkeutuminen (imeytyminen, nouseminen) ahtaisiin rakoihin nesteen pintajännityksen voimasta. Kapillaarirako on alle 1 mm väli kahden pinnan välillä tai reikä taikka ohuen putken sisätila.

Kapillaarinen imeytyminen <i>Wicking</i>	Kapillaarinen nesteen imeytyminen pitkin pohjamateriaalin kuituja (esim. piirilevyllä).
Kastepiste-lämpötila <i>Dew point</i>	Lämpötila, jossa ilman suhteellinen kosteus on 100 %
Kastumisaika TOW <i>Time of wetness</i>	ISO 9223:ssa kastumisajaksi määritellään se aika, jonka metallipinta on korroosiota aiheuttavan elektrolyytin ts. veden ja siihen liuenneiden aineiden peittämä. Ilmastojen luokittelussa kastumisajaksi on määritelty ajat, jonka ilman suhteellinen kosteus on > 80 % ja lämpötila on > 0 °C.
Katalysaattori <i>Catalyst</i>	Aine, joka vaikuttaa kemialliseen reaktioon aineen itsensä muuttumatta.
Katodinen suojaus <i>Cathodic protection</i>	Katodisessa suojauksessa suojattava kohde tehdään ulkoisen jännitelähteen avulla negatiiviseksi suhteessa erilliseen anodiin (liukeneva tai inertti). Suojattavan kohteen potentiaali tulee immuunialueelle eikä korroosiota tapahdu. Toinen katodisen suojauksen tapa on käyttää uhrautuvaa anodia vedessä esim. sijoittamalla sinkkianodi kontaktiin veneen perämoottorin kanssa. Sinkki, joka on epäjalompi kuin moottorissa käytetyt metallit, toimii uhrautuvana anodina (galvaninen anodi) ja moottori katodina.  (vrt. anodinen suojaus ja Pourbaix-diagrammi)
Kemiallinen pinnoitus, virraton pinnoitus <i>Electroless plating</i>	Pinnoitusmenetelmä, jossa metallipinnalle saostuu liuoksesta toista metallia, joko liuoksessa olevan pelkistävän aineen ja perusmetallin yhteisvaikutuksesta tai yksinomaan perusmetallin liukenemisen takia. Esimerkiksi rautanaulan kuparoituminen kuparисуolaliuoksessa on virratonta pinnoitusta.
Kerasaostus <i>Coprecipitation</i>	Kerasaostuminen tarkoittaa sitä, että esim. pinnoiteprosessissa varsinaisen saostuvaksi tarkoitetun aineen mukana saostuu muuta ainetta. Tämä voi tapahtua joko tahattomasti (epäpuhtauksia saostuu) tai tarkoituksellisesti, kun saostetaan timanttihiukkasia nikkelimatriisiin timanttityökaluja esim. timanttilaikkaa valmistettaessa.
Kiinteä olomuoto <i>Solid phase</i>	Aineen olomuoto. Piidioksidi ja useimmat metallit ovat tyypillisiä kiinteän olomuodon aineita lämpötilassa 23 °C.



Kloridi <i>Chloride</i>	Kloridi $\text{Cl}^-$ ; kloridi-ioni syövyttää useimpia metalleja. Klorideille esitetään yleensä vain laskeuma-arvo, koska suola esiintyy ilmassa lähinnä NaCl-partikkeleina eikä kaasumaisena kloridina $\text{Cl}^-$
Kloori <i>Chlorine</i>	Kloori ( $\text{Cl}_2$ ) itsessään esiintyy harvoin saastelähteenä luonnossa paitsi esim. paperi ja sellutehtaiden läheisyydessä. Kosteuden läsnä ollessa kloori hajoaa nopeasti hypokloriitiksi ja kloridiksi. Hypokloriitti on vahvasti hapettava aine. Kloori syövyttää useimpia metalleja hyvin pieninäkin pitoisuuksina. Kloorilla on vahva synergistinen vaikutus rikkivedyn $\text{H}_2\text{S}$ :n kanssa, koska sen läsnä ollessa syntyy sekä rikkihappoa että suolahappoa. Klorideilla on kyky tunkeutua metalleja suojaaviin oksideihin ja näin lisätä niiden korroosiota.
Koheesio <i>Cohesion</i>	Aineen sisäinen vetovoima. Voima, jolla aineen sisällä olevat atomit vetävät toisiaan puoleensa.
Kolloidi <i>Colloid</i>	Nesteeseen tai kaasuun hienojakoisena jakautunut aine (esim. vesi, maito, jne.). (Advances in Colloid and Interface Science)
Kondensaatio <i>Condensation</i>	Tiivistyminen. Esim. ilmassa oleva kosteus tiivistyy vedeksi – kondensoituu – lämpötilan aletessa.
Kontaminaatio <i>Contamination</i>	Epäpuhtaudeksi luettavien kiinteiden ja nestemäisten aineiden kertyminen toisen aineen pinnalle. Myös hapettuminen ja muut kemialliset reaktiot tuottavat uusia yhdisteitä materiaalien pinnoille, jotka voidaan tässä lukea kontaminaation piiriin. Samoin mikrobiologiset ilmiöt tuottavat pinnoille kontaminaatiota.  Ilman epäpuhtauksia ts. puhtaaseen ilmaan kuulumattomia aineita (kaasuja, pölyä) sanotaan ilman kontaminaatioksi (vesihöyryä ei lueta ilman kontaminaatioon) tai epäpuhtauksiksi.
Konvektio <i>Convection</i>	Väliaineen virtaus. Lämmön siirtyminen väliaineen esim. ilman mukana tai välityksellä. Väliaine voi olla neste, kaasu tai kiinteä aine. Vapaa eli luonnollinen konvektio tarkoittaa lämmön siirtymistä ilman virratessa pintojen, joista lämpö siirtyy ilmaan, ohitse lämpötilaerojen aiheuttaman nosteen ansiosta. Pakotettu konvektio tarkoittaa puhaltimen avulla aikaansaadun ilman virtauksen toimimista lämmönsiirtimenä.

<p>Korroosio <i>Corrosion</i></p>	<p>Aineen tuhoutuminen erilaisten kemiallisten reaktioiden kautta. Metallien korroosio on metalliatomien hapettumista ioneiksi (vrt. hapettuminen). Tunnetuin korroosioilmiö on raudan ja teräksen ruostuminen. Samanlaisia prosesseja tapahtuu muissakin metalleissa ja myös ei-metallisissa materiaaleissa, kuten muovi, betoni ja keramiikka.</p>
<p>Korroosio- tuotteiden ryöminen <i>Creep of corrosion products</i></p>	<p>Kultapinnoitteille tyypillinen vikailmiö on korroosiotuotteiden ryömiminen pitkin pintaa olosuhteissa joissa ilmassa on kosteutta ja H<sub>2</sub>S-, NO<sub>2</sub>- tai Cl<sub>2</sub>-kaasuja. Tyypillisiä ryömiviä korroosiotuotteita ovat eri metallien suolat, jotka ovat myös hygroskooppisia edistäen veden kertymistä korroosioalueille.</p>
<p>Kosteuspitoisuus, w, (kiinteän aineen) <i>Humidity of solid material</i></p>	<p>Kiinteässä aineessa olevan veden massan ja kokonaisuuden suhde [SFS 5348].</p>
<p>Kromatointi <i>Chromating</i></p>	<p>Tiettyjen metallien, esim. Al ja Zn, pinnan muuttaminen korroosiota paremmin kestäväksi antamalla kromaatteja sisältävän liuoksen reagoida pinnan kanssa. Pinnalle syntyy metallikromaatteja sisältävä kerros, joka on sähköä johtava.</p>
<p>Kuumasinkitys <i>Hot galvanized, hot-dip zinc coated</i></p>	<p>Sinkkipinnoite, joka on valmistettu upottamalla teräs sulaan sinkkiin.</p>
<p>Lankamainen korroosio <i>Filiform corrosion, filament formation</i></p>	<p>Maalattun metallipinnan korroosiotyyppi, jossa korroosio etenee lankamaisina muodostumina maalipinnan alla satunnaisesti suuntiin. Muodostumat näkyvät lankamaisina tai paikallisina kohoumina maalipinnan päältä katsoen. Kokeellisesti se näkyy esim. maalatuilla alumiini- tai teräspinnoilla suolasumutesteissä, jolloin ko. muodostumista löytyy mm. kiteytyneitä suolarakeita.</p>
<p>Lasiirtymä- lämpötila <i>Glass transition temperature</i></p>	<p>Muovien lasiirtymälämpötila T<sub>g</sub> on lämpötila, jossa jäähtyvä pehmeä amorfinen muovi jäähmettyy lasimaisen kovaksi, hauraaksi ja lujaksi. Muovin ominaisuudet esim. lämpölaajenemiskerroin muuttuu siinä voimakkaasti. Tätä lämpötilaa ei saa ylittää käytössä. Lämpötilaa nostettaessa yli lasiirtymälämpötilan muovi pehmenee, se käyttäytyy kuin viskoosi neste tai kumi. Lasiiirtymälämpötila on polystyreenillä noin +100 °C, PVC:llä +81 °C, nylon</p>

	66:lla +50 °C, polyetyleenillä (HDPE) –100 °C ja PTFE:llä –147 °C [Goosey 1986, p. 28]. Mittausmenetelmänä käytetään mm. differentiaalista pyyhkäisykalorimetriaa (DSC). Katso myös ISO 11359-2, IEC 61006, ASTM E1545 ja ASTM E1824.
Laskeuma <i>Deposit, dust fall</i>	Ilmassa olevan hiukkasjakoisen aineksen laskeutumismäärä maahan painovoiman vaikutuksesta (koko yli 10 µg). Mittaus tehdään määräkorkeudelle asetetun keräimen avulla. Yksikkönä on mg/(m <sup>2</sup> ·h) taikka mg/(m <sup>2</sup> ·vrk).
Leijuma <i>Suspended matter, – particles</i>	Ilmassa leijuvia hiukkasjakoisia aineksia (koko alle 10 µg) luonnehtiva epäpuhtauspitoisuus (aineksilla ei ole selvää putoamisnopeutta). Yksikkö on µg/m <sup>3</sup> .
Liuos <i>Solution</i>	Neste ja nesteeseen liuenneet aineet muodostavat liuoksen, esim. suolaliuos ja rikkihappoliuos.
Luontainen korroosionsietoisuus <i>Inherent corrosion resistance</i>	Aineen tai komponentin tai laitteen ominaisuus, joka tekee siitä sellaisenaan ilman erityisiä lisätoimenpiteitä korroosionsietoisen tietyissä ympäristöolosuhteissa. Esim. lähes inertit aineet ja hermeettiset kotelot sisäosiltaan ovat luontaisesti korroosionsietoisia. Laitetasolla koteloiden tiiviiden, ilmankierron ja lämpötilojen sopiva hallinta voivat tehdä laitteesta luontaisesti korroosionsietoisen.
Lämpölaajenemis-kerroin, <i>Thermal expansion factor, coefficient</i>	Materiaalin laajenemista osoittava suhteellinen mittaluku lämpötilan muuttuessa tietyllä alueella.
Lämpöpaukahtelu <i>Popcorning</i>	Lämpöpaukahtelua, poksahdusta, tapahtuu kostuneita komponentteja juotettaessa, kun komponentin sisälle päässyt vesi höyrystyy juotoslämpötilassa (noin 230 °C) noin 1 200-kertaiseksi ja repii komponentin sisärakenteita räjähdysmäisesti.
Läpäisykerroin, läpäisevyyskerroin <i>Permeability coefficient</i>	Fickin ensimmäisen lain ( $V = P (A p t)/s$ ) tarkoittama kerroin P, joka ilmaisee kaasun läpäisevyyden jossain materiaalikalvossa tietyllä paine-erolla (p) kalvon ylitse. Fickin ensimmäinen laki pätee vain pysyville kaasuille, jotka eivät tiivisty lähellä ao. painetta ja lämpötilaa (vrt. höyryn läpäisevyys)
Maalaus <i>Painting</i>	Pinnan peittämistä orgaanisilla pinnoitteilla, esim. liuotin-, pulveri- ja lateksimaalaus

Metalliparikorroosio <i>Bimetallic corrosion</i>	Metalliparikorroosio syntyy, kun kaksi jalousasteeltaan erilaista metallia on samassa elektrolyytissä sähköisessä kontaktissa toisiinsa. Ks. liite 1, kohta 2.1 Galvaaninen ja metalliparikorroosio.
Mikrobiologinen korroosio <i>Microbiologically influenced corrosion, MIC</i>	Korroosio, johon vaikuttaa mikrobien läsnäolo ja aktiivisuus materiaalien pinnoilla olevissa biokalvoissa. Mikrobiologinen korroosio vaikuttaa kaikilla veden kanssa kosketuksissa olevilla pinnoilla, niin metallien kuin muidenkin materiaalien. Biologisina vaikuttajina toimivat bakteerit, levät, homeet, sienet, jäkälät ja sammaleet sekä erilaiset eläimet ja niiden päästöt.
Mikro-organismi <i>Microorganism, microbe</i>	Bakteerit, homesienet, hiivat, levät, alkueläimet, virukset sekä niiden lepomuodot, esim. itiöt. bacteria, fungi, algae, protozoa, and viruses
Molekyyli <i>Molecule</i>	Aineen osanen, joka on muodostunut useammasta yhteensitoutuneesta atomista.
Molekyyliseula <i>Molecular sieve</i>	Zeoliitin kidemäinen ja huokoinen muoto, joka on natrium-, kalium- tai kalsium alumina-silikaattia. Se on adsorbenteista tehokkain ja myös kallein.
Montmorilloniitti-savi <i>Montmorillonite</i>	Katso bentoniitti-savi. Nimi tulee vuonna 1847 tapahtuneen löytöpaikan mukaan Montmorillonissa Ranskassa.
Muurahaishappo <i>Formic acid</i>	Muurahaishappo (HCOOH) korrodoi useita metalleja, kuten esimerkiksi kuparia, alumiinia, lyijyä ja valurautaa. Se on vahva happo, pistävänhajuinen ja vapauttaa metallien kanssa reagoidessaan vetyä.
Noki <i>Soot</i>	Hiilipöly, joka on usein peräisin huonosti toimivista palamisreaktioista autoissa, lämmityslaitoksissa, jne. Käytännössä termiin noki (soot) sisältyvät kaikki ilmassa leijuvat hiukkasmaiset kiintoaineet (ks. pöly). Noki adsorboi itseensä muita ilman saasteita ja vettä ja edistää bimetallikorroosiota.
Ominaisresistanssi <i>Resistivity</i>	Materiaalin ominaisresistanssi, jonka yksikkönä on $\Omega\text{m}$ .
Orgaaniset juottuvuuden säilyttävät pinnoitteet, OSP <i>Organic solderability preservatives</i>	Orgaaniset materiaalit, joita käytetään ylläpitämään piirilevyn juotosalueiden juottuvuutta kuljetusten ja monivaiheisen juotosprosessin aikana. OSP-pinnoitteet korvaavat perinteisen tina-lyijypinnoitteen juotosalueilla.

Otsoni <i>Ozone</i>	Hapen allotrooppinen muoto (O <sub>3</sub> ), jota syntyy ultraviolettivalon vaikutuksesta ilman hapesta. Otsoni on hyvin voimakkaasti hapettava ja näin ollen myös korrodoiva aine.
Passiivikerros <i>Passive layer</i>	Metallin pinnalle usein ilmassa syntyvä reaktiotuotekerros, joka estää metallin edelleen syöpmisen.
Patina <i>Patina</i>	Kuparin korroosiotuotteesta, joka on vihertävä kuparikarbonaatti/hydroksidi, käytetty nimitys.
Pesemätön juoksute <i>No-clean flux</i>	Juottamisessa käytettävä juoksute, jota ei tarvitse pestä pois piirilevyiltä sen kemiallisen epäaktiivisuuden ansiosta. Juoksutteen suhteellisen alhainen korrosiivisuus mahdollistaa sen jättämisen piirilevyille juottamisen jälkeen.
pH-arvo <i>pH value</i>	Liuoksen happamuusasteen kertova luku. pH-luku on liuoksen vetyionien pitoisuuden logaritmin vastaluku. Neutraalissa vedessä pH-arvo on 7 ja vetyionien pitoisuus siis 10 <sup>-7</sup> mol/dm <sup>3</sup> .
Pii <i>Silicon</i>	Pii on alkuaine (Si), jonka tunnetuin kemiallinen yhdiste on kvartsi (SiO <sub>2</sub> ). Tunnetuin orgaanisten piiyhdisteiden joukko ovat erilaiset silikonit.
Piilokorroosio (saostumakorroosio) <i>Deposit corrosion</i>	Piilokorroosiolla tarkoitetaan korroosiota, joka kehittyy jollekin pinnalle tulleen epäpuhtauden alla tai välittömässä läheisyydessä happivajeen johdosta. Esim. kostean saven, maantieltä irtoavan lian ja laivoissa fouling-kasvuston alle kehittyy helposti piilokorroosiota
Pinnan eristysresistanssi <i>Surface Insulation Resistance, SIR</i>	Jollain pinnalla olevien kahden rinnakkaisen metallijohtimen välinen resistanssi. Todellisuudessa ei voida ilmaista pelkästään pinnalta mitattua resistanssia, koska se on aina yhdistelmä pinnan ja materiaalin sisäisen resistiivisyyden sekä geometrian yhteisvaikutuksesta (vrt. eristysresistanssi).
Pinnan resistiivisyys <i>Surface resistance</i>	Materiaalin pinnan resistiivisyys eli neliöresistanssi, jonka yksikkö on Ohmi/neliö (Ω/□).
Pinnoitteen alle syöpyminen <i>Underdeposit corrosion</i>	Useimpien pinnoitteiden alla vallitsevat korroosiota kiihdyttävät olosuhteet, jolloin perusaine syöpyy pinnoitteen alla (vrt. passiivikerros).

Pinnoitus <i>Plating</i>	Materiaalin päällystämistä toisella. Esim. kemiallinen ja sähkökemiallinen pinnoitus
Pinta-aktiivinen <i>Surface active</i>	Aineita, jotka pienentävät voimakkaasti nesteen pintajännitystä, sanotaan pinta-aktiivisiksi aineiksi. Tällaisia ovat esim. tavalliset veteen liukenevat pesuaineet, jotka irrottavat tehokkaasti likaa erilaisilta pinnoilta.
Pinta-aktiivinen paperi <i>Surface Active Paper, SAP</i>	Paperi, joka on imeytetty kaasuja absorboivalla materiaalilla.
Pintajännitys <i>Surface tension</i>	Aineen molekyylien välinen voima, joka vetää esim. nestepintaa kasaan ja saa esim. painottomassa tilassa nestepisaran muotoutumaan palloksi. Pintajännityksen suuruus vaihtelee nesteen laadun ja siihen liuenneiden ainesten mukaan. Nesteillä, kaasuilla ja kiinteillä aineilla on kullakin oma pintajännityksensä, mikä vaikuttaa toisiinsa kosketuksissa olevien rajapintojen käyttäytymiseen ja esim. nesteen imeytymiseen huokoisen kiinteän aineen sisään.
Pitoisuus <i>Concentration</i>	Esim. ilman sisältämien siihen kuulumattomien ainesten pitoisuus ilmaistaan joko massana tilavuusyksikössä ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tai tilavuussuhteena $\text{mm}^3/\text{m}^3$ taikka $\text{cm}^3/\text{m}^3$ .
Pistekorroosio, kuoppakorroosio, pistesyöpyminen <i>Pitting corrosion, pit corrosion, pitting</i>	Paikallinen korroosionmuoto, jossa pintaan syöpyy nopeasti ainoastaan pistemäisiä, syviä reikiä tai kuoppia pääosan pinnasta ollessa lähes virheetön. Pistekorroosiota esiintyy eri muodoissaan lähes kaikilla metalleilla ja niiden seoksilla (vrt. yleinen korroosio).
Popcorn-ilmiö <i>Popcorning</i>	Katso lämpöpaukahtelu
Pourbaix-diagrammi <i>Pourbaix diagram</i>	Pourbaix-diagrammi eli pH-potentiaalidiagrammi on metallin sähkökemiallinen tasapainopiirros, jonka avulla kuvataan metallipinnan tilaa (korrodoituva, passiivinen, immuuni, liite 1, kuva 1.1)
Pulverimaalaus <i>Powder painting</i>	Maalausmenetelmä, jossa maali on jauhemaista ja sen levitys tapahtuu pistoolin ja pinnoitettavan kappaleen välillä vallitsevan sähkökentän avulla. Maali "paistetaan" alustansa kiinni kohotetussa lämpötilassa.
Päästö	Katso emissio.

Pöly <i>Dust</i>	Ilman hiukkasjakoinen kiintoaines läpimitaltaan noin 1...150 µm. Vrt. IEC 60721-2-5, Annex A. Kiintoaines voi sisältää lähes mitä tahansa materiaaleja (tavallisin lienee hiilipöly, noki). Pinnoille laskeutunutta pölyä sanotaan myös laskeumaksi.
Rakokorroosio <i>Crevice corrosion</i>	Korroosiomuoto, jossa syöpyminen tapahtuu kapeassa raossa. Katso myös piilokorroosio, lankamainen korroosio ja pistekorroosio.
Rikkihappo <i>Sulphuric acid</i>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Rikkidioksidi <i>Sulphur dioxide</i>	SO <sub>2</sub> ; syövyttää kaikkia metalleja paitsi jalometalleja.
Rikkivety <i>Hydrogen sulphide</i>	H <sub>2</sub> S; syövyttää hopeaa kaikilla ilman kosteuksilla ja kaikkia kupariseoksia.
Sievesi, lusikkavesi typpihappo <i>Nitric acid</i>	Sievesi johtuu saksankielen sanasta Scheidewasser johdetusta ruotsinkielen skedvatten sanan suomalaisesta käännöksestä. Typpihappo liuottaa hopeaa, mutta ei platinää, jolloin nämä samannäköiset metallit voi erottaa toisistaan "sieveden" avulla.  Lusikkavesi on typpihapon kansanomainen nimitys, joka johtuu sanan skedvatten (erotusvesi, sievesi) väärinymärtämisestä (sked on lusikka).
Silikageeli, piihappogeeli <i>Silica gel</i>	Silikageeli (piihappogeeli) on vettä absorboiva materiaali, joka parhaimmillaan absorboi vettä yli 35 % painostaan, kun ilman suhteellinen kosteus on 80 %. Se on tunnetuin kuljetuspakkauksien kosteudenpoistoon käytetty kemikaali. Silikageeli on valmistettu natrium silikaatista (sodium silicate) ja rikkihaposta. Silikageeliä on saatavissa eri tarkoituksiin amorfisena jauheena, lasimaisina paloina, vesipitoisena hyytelönä ja kiteisenä. Siitä käytetään nimityksiä amorphous silica, synthetic amorphous silica, amorphous silicon dioxide.
Silikoni, <i>polysiloksaani</i> <i>Silicone</i>	Ryhmä orgaanisia polymeerisiä piiyhdisteitä, jotka voivat esiintyä kaasuna, nesteinä tai kiinteinä aineina polymeeriketjun pituudesta riippuen. Elektroniikassa käytetään silikonihartseja (piihartsi) ja silikonikumeja eristeinä, jotka kestävät korkeita lämpötiloja (200 °C). Silikonihartseja käytetään myös lakkojen ja maalien valmistuksessa. Silikoniöljyt ovat värittömiä, vettä hylkiviä nesteitä, joita käytetään esim. voiteiden, papereiden ja tekstiilien lisäaineena. Silikoniöljy ryömii pitkin pintoja ja voi

	levittäytyä koskettimiin muodostaen niihin eristävän kalvon.
Sinkinkato <i>Dezincification</i>	Katso valikoiva korroosio.
Sinkitys <i>Zinc coating, galvanization</i>	Yleisnimitys sinkillä pinnoittamiselle, katso sinkitty, alusinkitty levy.
Skin-efekti	Katso virranahto.
Sublimoitua	Katso härmistystä.
Suhteellinen kosteus, $\phi$ , suhteellinen höyryosuus <i>Relative humidity</i>	Kuivan vesihöyryn mooliosuuden suhde enimmäismooliosuuteen, jonka kaasu voi sisältää kuivaa vesihöyryä eli höyryn osapaineen suhde kyllästymispaineeseen ko. lämpötilassa. [SFS 5348] Esim. ilman sisältämä vesimäärä ilmaistuna prosentteina siitä vesimäärästä, mikä enintään voi olla ilmassa ko. lämpötilassa ja paineessa.
Suola <i>Salt</i>	Emäksen ja hapon välisen reaktion reaktiotuote.
Suolahappo (kloorivetyhappo) <i>Hydrochloric acid</i>	HCl.
Suspensio <i>Suspension</i>	Kiinteän aineen ja nesteen seos.
Sähkökemiallinen jännitesarja <i>Electrochemical series</i>	Metallien sähkökemiallinen jännitesarja tarkoittaa puhtaiden metallien jännitteitä suhteessa standardivetyelektrodiin. Jännitesarja saadaan, kun eri metallien jännitteet mitataan samanlaisessa suolaliuoksessa standardivetyelektrodiin nähden. Sähkökemiallinen jännitesarja luokittelee virheettömien, puhtaiden, täysin ilman oksidi- ja passiivikerrosta olevien metallien "jalouden" (vrt. galvaaninen jännitesarja).
Säie <i>Whisker</i>	Säie on metallin pintaan kasvava karvamainen säie, joka saattaa aiheuttaa oikosulkuja vierekkäin olevien johdinten tai pintojen välille. Säikeiden kasvu on riippuvainen pinnan sisäisistä jännityksistä ja puhtaudesta (vrt. tinasäie).
Tinakato <i>Selective dissolution of tin</i>	Katso valikoiva korroosio.



Tinarutto <i>Tin disease,</i> <i>tin pest</i>	Puhtaalla metallisella tinalla ( $\beta$ -tina) on ominaisuus muuttua hauraaksi, murenevaksi, harmaaksi jauheeksi ( $\alpha$ -tina) alle +13 °C lämpötilassa. Muuttumisnopeus on suurimmillaan –30 °C lämpötilassa. Tinarutto on tuttu kirkkojen vanhoista uruista, joissa tinapillit ovat olleet lämmittämättömissä tiloissa vuosia alle +13 °C lämpötiloissa. <a href="http://dwb.unl.edu">http://dwb.unl.edu</a>
Tinasäie (tinaviiksi, tinakarva) <i>Tin whisker</i>	Tinasäie on puhtaaseen tinapinnoitteeseen kasvava karvamainen säie, joka saattaa aiheuttaa oikosulkuja vierekkäin olevien johdinten tai pintojen välille. Tinasäikeiden kasvu on riippuvainen tinapinnoitteen sisäisistä jännityksistä ja tinan puhtaudesta. (tin whisker, tinaviiksikarva).
Tunkeutumissyvyys <i>Depth of penetration,</i> <i>skin depth</i>	Virranähtöilmiossa tarkoitettu syvyys, jolla virran tiheys on 1/e-osa pinnalla olevasta virran tiheydestä hyvässä tasomaisessa sähköjohteessa ( $e = 2,71828$ ).
Typpidioksidi <i>Nitrogen dioxide</i>	Typen oksideja ovat mm. typpidioksidi $\text{NO}_2$ ja typpimonoksidi $\text{NO}$ . Typen oksidit ilmaistaan usein merkinnällä $\text{NO}_x$ . Koska esim. palamisreaktioissa syntyy typen useita eri oksideja, joista $\text{NO}_2$ :n määrä on vain 5...10 %. Ilmassa typpidioksidin määrä on yleensä noin puolet kaikkien typen oksidien määrästä. Typpidioksidi syövyttää joitain metalleja, kuten kuparia ja messinkiä. Typpidioksidi yhdessä rikkidioksidin kanssa syövyttää useita materiaaleja. Yhdessä kloorin kanssa se syövyttää jopa kultaa.
Typpihapoke <i>Nitrous acid</i>	Typpihapoke on vesiliuos, jossa on $\text{NO}_2^-$ -ioneja. Typpihapokkeen suolat ovat nitriittejä.
Typpihappo <i>Nitric acid</i>	$\text{HNO}_3$ . Typpihapon suolat ovat nitraatteja.
Valikoiva korroosio <i>Selective corrosion,</i> <i>selective leaching</i>	Korroosioilmio, jossa jonkin seosmetallin aineksista osa korrodoituu/liukenee pois; esim. messingin sinkinkato ja tinapronssin tinakato.

Valkoruoste <i>White rust, wet storage stain</i>	Kuumasinkitylle levyille muodostuu kosteassa valkoruostetta – huokoista höttöistä korroosiotuotetta, sinkkikarbonaattia/hydroksidia.
van der Waalsin voimat <i>van der Waals forces</i>	Heikkoja sähköisiä vuorovaikutusvoimia, jotka vaikuttavat molekyylien välillä sitoen niitä toisiinsa. Voimat ovat fyysisiä veto- ja hyljintävoimia, joiden mukana nesteiden ja molekulaaristen kiteiden koheesivoimat muodostuvat. Voimat ovat peräisin osin dipoli-dipoli ja osin dipoli induced dipoli (dispersio) vuorovaikutuksista. Kuitenkin jopa ei-polaarisilla molekyyliellä ja atomeilla on jonkinasteinen keskinäinen vetovoima. Van der Waalsin voimat vaikuttavat vain suhteellisen lyhyen matkan päästä ja voimien suuruus on kääntäen verrannollinen molekyylien välisen etäisyyden seitsemänteen potenssiin. Näillä voimilla on tärkeä osa adheesiomekanismissa. <a href="http://palimpsest.stanford.edu/don/dt/dt3669.html">http://palimpsest.stanford.edu/don/dt/dt3669.html</a>
Vettä hylkivä materiaali <i>Durable water repellent, DWR</i>	Materiaali, jonka pinnalla veden kastumiskulma $\Theta$ on $90...180^\circ$ . Jos pintajännitys ( $\gamma_{BC}$ ) välillä neste–kiinteä aine on suurempi kuin välillä kaasu–kiinteä aine ( $\gamma_{AB}$ ), $\Theta$ on $90...180^\circ$ . Esim. GORETEX®-kankailla kastumiskulma on $140^\circ$ , jonka ansiosta vesi jää pisaroiksi materiaalin pinnalle eikä tunkeudu helposti sen sisään.
Virranahto <i>Skin effect</i>	Virran ahtautumista sähköjohtimen pinnalle tapahtuu, kun signaalin taajuutta nostetaan. Ilmiöllä on merkitystä, kun taajuudet ovat megahertsejä. Elektroniikan komponenttien ja piirilevyjen johtavilla metallipinnoilla virranahto lisää korroosion haitallista vaikutusta, koska korroosio kasvattaa pintaresistanssia ja aiheuttaa pintaan epäjatkuvuuskohtia. Suurilla, yli 100 MHz taajuuksilla virranahtoilmiö korostaa vähäisenkin korroosion aiheuttamia häiriöitä.
Välikerros <i>Barrier layer</i>	Johdinten, koskettimien ja liittimien metallipinnoitteen (Au, Sn, Ag) alla käytetään erillistä välikerrosta, jonka tarkoitus on estää alusmetallin ainesten (kupari, sinkki) diffundoitumista pinnoitteen huokoisten läpi. Välikerros parantaa myös pinnoitteen tarttumista ja tekee alustan tasaiseksi. Välikerrosmateriaalina käytetään usein nikkeliä.

Välimetalli <i>Intermetal</i>	Välimetalli on metallien rajapintaan syntyvä metalliseos, joka syntyy metallien diffundoituessa toistensa sisälle. Välimetalleja syntyy esim. juotoksessa kullan ja kuparin diffundoituessa juotostinaan ja toisaalta juotostinan diffundoituessa kupariin ja sen pinnalla mahdollisesti olevaan kultaukseen. Välimetalli on yleensä haurasta ja murtuu helposti. Juotoksessa sen määrä kasvaa logaritmisesti juotosajan ja lämpötilan ja juotettavien johdinten pinnoitteiden paksuuden kasvaessa.
Yleinen korroosio <i>Uniform corrosion</i>	Korroosiomuoto, joka ilmenee pinnan paikallisesti ja ajallisesti tasaisena syöpymisenä aineen kaikilla pinnoilla (vrt. pistekorroosio).

## Suuremuunnoksia anglosaksisesta käytännöstä SI-yksiköihin

Kirjallisuudessa esiintyy vielä runsaasti vanhoja anglosaksisia yksiköitä, jonka vuoksi seuraavassa esitetään niistä muutamia, joilla kuvataan mm. ilman laatua ja sen eräitä muita ominaisuuksia. Vanhojen yksiköiden käyttö ei ole suositeltavaa. On kuitenkin tärkeää tietää näiden yksiköiden oikeat vastaavuudet SI-mittajärjestelmässä.

### Massa ja paine

psi = pounds (pressure) per square inch (naulaa neliötuumaa kohden)

1 lb = 16 oz = 0,45359244 kg (lb = pound = naula)

1 lb = 16 oz      1 oz = 28,35 g (oz = ounce = unssi)

(jalometalleille käytetään ns. troy-unssia = 31,10 g)

1 psi = 0,453592 kp/in<sup>2</sup> = 0,453592 kp/ 6,4516 cm<sup>2</sup> = 0,07031 kp/cm<sup>2</sup>

1 psi = 6894,8 Pa

1 kp/cm<sup>2</sup> = 735,56 torria = 0,980665 bar

15 psi = 1,055 kp/cm<sup>2</sup>, 1 atm = 760 torria = 760 mm Hg = 1013,25 mb

1 bar = 100 kN/m<sup>2</sup> = 100 kPa (Pa = Pascal)

### Pituus ja kerrospaksuus

in = inch = tuuma, 1 in = 25,4 mm, 1 mils = 1 in /1000 = 25,4 μm

1 Å = Ångström = 10<sup>-10</sup> m, 1 nm = 10<sup>-9</sup> m

micron = (mikroni) = mikrometri = 1 μm = 0,001 mm

## Tilavuus ja tilavuussuhde

$1 \text{ cm}^3 = 1 \text{ mL}$  millilitra,  $1 \text{ mm}^3 = 1 \text{ }\mu\text{L}$  mikrolitra

ppm (parts per million) =  $10^{-6}$  = miljoonasosa = 1 mo ( $1 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ )

ppb (parts per billion) =  $10^{-9}$  = biljoonasosa Yhdysvalloissa (tilavuussuhteena  $1 \text{ mm}^3/\text{m}^3$ ). Tätä lyhennettä ppb ei pitäisi käyttää, koska se voi johtaa väärinkäsityksiin, koska Englannissa ja muualla biljoona on  $10^{12}$ .

Englannissa billion = miljoona miljoonaa ja Yhdysvalloissa tuhat miljoonaa.

Ilmaisuja ppm ja ppb pitäisi käyttää vain pitoisuuksien (massasuhde) ilmaisemiseen, mutta niitä on joskus käytetty myös tilavuussuhteiden (vol/vol) ilmaisemisessa.

Esim. seuraavat kaasupitoisuuksien (massasuhde ilmassa) muunnossuhteet on hyvä tietää:

SO <sub>2</sub> $1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,38 \text{ mm}^3/\text{m}^3$	1 ppm SO <sub>2</sub> $\approx 2\,630 \text{ }\mu\text{g SO}_2/\text{m}^3$
H <sub>2</sub> S $1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,71 \text{ mm}^3/\text{m}^3$	1 ppm H <sub>2</sub> S $\approx 1\,410 \text{ }\mu\text{g H}_2\text{S}/\text{m}^3$
NH <sub>3</sub> $1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 = 1,43 \text{ mm}^3/\text{m}^3$	1 ppm NH <sub>3</sub> $\approx 700 \text{ }\mu\text{g NH}_3/\text{m}^3$
NO <sub>2</sub> $1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,53 \text{ mm}^3/\text{m}^3$	1 ppm NO <sub>2</sub> $\approx 1\,880 \text{ }\mu\text{g NO}_2/\text{m}^3$
Cl <sub>2</sub> $1 \text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 = 0,34 \text{ mm}^3/\text{m}^3$	1 ppm Cl <sub>2</sub> $\approx 2\,940 \text{ }\mu\text{g Cl}_2/\text{m}^3$

International System of Units (SI): The modern metric system

<http://physics.nist.gov/cuu/index.html>

# Hakemisto

# Hakemisto

Oheisia Internet-osoitteita on käytetty tätä julkaisua tehtäessä.

Katso myös sisältöluettelo sivuilla 7...9 ja liitteen 1 *Korroosion perusteita ja vi-kamekanismit* ja liitteen 3 *Korroosionhallinnan katselmointimenettely* sisältöluet-telot sekä liitteen 4 *Korroosiosanasto*.

## Patentit ja standardit Internetissä

Delphion / Thomson Corporation <http://www.delphion.com/>.

Patentti- ja rekisterihallitus. <http://www.prh.fi/>.

ANSI American National Standards Institute. <http://web.ansi.org/>.

ASTM American Society for Testing and Materials.

<http://www.astm.org/>.

BSI British Standards. <http://www.bsi-global.com/>.

CENELEC European committee for electrotechnical standardization.

<http://www.cenelec.org/Cenelec/Homepage.htm>.

DIN Deutsches Institut für Normung e.V. <http://www2.din.de/>.

EIA Electronic Industries Alliance. <http://www.eia.org/>.

IEC International Electrotechnical Commission.

<http://www.iec.ch/index.html>.

IEEE The Institute of Electrical and Electronics Engineers.

<http://standards.ieee.org/>.

IPC – Association Connecting Electronics Industries <http://www.ipc.org/>.

ISA International Society for Measurement and Control. <http://www.isa.org/>.

ISO International Organization for Standardization. <http://www.iso.ch/>.

JEDEC Solid State Technology Association (Is the semiconductor engineering standardization body of the Electronic Industries Alliance (EIA)).

<http://www.jedec.org/>.

SAE Society of Automotive Industry. <http://www.sae.org/>.

SESKO Suomen Sähköteknillinen Standardisoimisyhdistys SESKO r.y.

<http://www.sesko.fi/>.

SFS Suomen Standardisoimisliitto. <http://www.sfs.fi/>.

US Patent and Trademark Office. <http://www.uspto.gov/>.

## Aakkosellinen hakemisto

**Numero**  
85/85-testi, 112–113, 242–243

### A

aaltopahvipakkaus, 93–95  
aerosoli, 97  
Ag-pinnoite, 109, 137  
Ag-Pd-pinnoite, 193  
aikajänne, 47  
aineiden päästöt, 54  
akkujen päästöt, 57  
alihankinnat, 43, 179  
alkalinkestävyys (elastomeeri), 155  
alumiini, 48, 56–58, 61, 78, 83–84, 89, 142–145, 148, 155–156, 160, 161, 164–166, 171, 213  
alumiini (ohutlevy), 144–145  
alusinkitty, 144–145  
AMS 2422E, 139, 211  
analyysimenetelmät, 103, 114–115  
analyttinen lähestymistapa, 28, 29  
anodinen suojaus, liite 1, kohta 1.1  
ANSI/ISA-S71.04, 84–86, 116, 204  
ANSI/J-STD-001D, 133, 238  
ANSI/J-STD-004, 134, 240  
asennusalustan valitseminen, 121  
asennusolosuhteet, 90, 159  
asennustyö (maa), 91, 118, 179  
aurion (valo, paiste, säteily), 13, 18, 95–96, 112, 117, 119–123, 146, 153, liite 1 kohta 1.8.  
avoin kotelo, 125

### B

bentoniitti, 92, 117, 171, 220  
bimetalli → metallipari  
Bresle-menetelmä, 133, 206

bromattu fenoli, 134  
BS 7195, 54, 58, 206, 220

### D

dendriitti, 142, liite 1 kohta 4.1  
DICHAN, 158, 160–164, 167  
DIN 55473, 171, 220  
direktiivi, 61, liite 1 kohta 4.2, liite 2

### E

ei-ioniset epäpuhtaudet, luku 6.7  
ei-pestävä juoksute, luku 6.7  
EMC-kontakti, -tiiviste, 25–26, 33, 68, 154, liite 3 kohta 4.10  
EMC-suojaus, 66, 149, 155  
elastomeeritiiviste, 154  
elektromigraatio, 20, liite 1 kohta 4.3  
elektroniikan korrodoituminen, 3, 11, 18, 58, 80  
elektroniikan pinnoitteet, 149  
elektroniikkaromun kierrätys, 61  
elinkaaren pituus, 63–68, 113  
epäorgaaninen hiukkanen, 33, 47, 98, 132  
epäpuhtaus, 76, 81–92, 125, 134–135  
eristykset, 131  
eristävät pinnoitteet, 43  
EU-direktiivi, 61, liite 1 kohta 4.2, liite 2

### F

FED-STD-101C, 167, 168  
Fickin 1. laki, liite 1, kohta 1.6  
filiform-korroosio → lankamainen korroosio  
fosfori – nikkelpinnoite liite 1 kohta 2.16

fretting → hiertymiskorroosio

## G

galvaaninen korroosio → metallipari-  
korroosio liite 1 kohta 2.1

GORE-TEX®, 118, liite 1 kohta 3.9

## H

haihtuva inhibiittori, 157

halogenoidut hiilivedyt, 58

halogenoidut palonestoaineet, 61

hankauskorroosio → hiertymiskorroo-  
sio

hartsi, 55–56, 133–135, 149, liite 1  
kohta 1.4

HASL-pinnoite, 130, 183, 188

HAST-testi, 112, 113, 237, 243

herkkyys muutoksille, 34, 64

hengittävä, 98, 118, 124–126

hiekkapöly, 19, 30, 98, 128,  
142, 151

hieroutua, hiertyminen, 19, 35, 140

hiertymiskorroosio, 14, 19, 35, 106–  
107, 140, 187, 194, 207, liite 1 kohta  
2.14

hiki, 19, 53, 104, 160

hilse, 53

hilseily (pinnoite), 147, 150

hissielektroniikka, 179

homesienten kasvu (testaus), 106, 114,  
135, liite 1, kohta 2.18

hopeapinnoite, 109, 208, 211–212

HS GC-MS headspace, 115, liite 1,  
kohta 2.23

huokoskorroosio, 110, liite 1 kohta 2.4

hydratoituminen, 98, liite 1 kohta 3.6

## I

IEC 60068-2-10, 114, 226

IEC 60068-2-21, 140, 228

IEC 60068-2-60, 102, 110–111, 231

IEC 60286, 173, 175, 214

IEC 60654-4, 81–82, 84–86, 205

IEC 60721, 17, 33, 77–78, 198–202

IEC 61760, 173, 175, 214–215

ihmisen päästöt, 19, 53, 104

ihmisen toimet, 19, 20, 52

ilman epäpuhtaustaso, 81–83

ilman epäpuhtauspitoisuus, 18, 30, 41,  
45, 47, 81–83, 92, 125

ilman laatuvaatimukset, 89, liite 2

ilmanpaine, liite 1 kohta 1.9

ilman suhteellinen kosteus, 16–17, 32,  
47, 79–89, 169–174, liite 1 kohta 1.7

ilmastollinen korroosio, 47, 83

ilmastollinen testaus, 39

ilmastolliset vaikutukset, 12, 13, 34,  
36, 97

ilmastoluokitus, 81, 153

ilmastorasituksen korrosiivisuus 153

inerti materiaali, 21, 41

inhibiitti, 117, 156–167

inhibiitin höyrynpaine, 158

inhibiittoreiden haittavaikutukset, 162

inhibiittoreiden testaus, 165

inhibiittorin toiminta-aika, 158, 167

inhibiittoripatentteja, 167

inhibiittoristandardit, 165–167

inhibiittorituotteet, 162

IP-koodi, IP-luokitus, 126–128

IP-suojausluokka, 127

IPC-6012, 133, 237, 240

IPC-A-600E, 133, 237

IPC-A-610, 54, 238

IPC-SM-840C, 130, 239

IPC-TM-650, 133, 237

irrotusvoima, 141

ISA-S71.04, 84–86, 116, 204

ISO 8502-6, 133, 206

ISO 9223, 77, 79–88, 205

ISO 12944, 71, 89, 153, 212

## J

JEP113-B, 173, 216



johdineristykset, -välit, 25, 96, 101, 125, 129–131, 141  
johdinpinnoite, 24, 137–138, 185  
johdinväli, 141, liite 1 taulukko 2.2  
johdotukset, 59, 96  
johtavat muovit, 155  
jousi (ominaisuus), 37, 59, 139–141, 156  
juoksutejäämä, 48, 132–133  
juote 35, 96–97  
juottaminen, 26, 45, 90, 129–134, 174–175  
juotteenestopinnoite, 43, 48, 125, 130–134, 151  
jännityskorroosio, 25, 35, 96, 141, liite 1 kohta 2.10  
jätepaperi, 95  
jäähdytysmenetelmä, 23, 27, 42, 97, 99

## K

kaasuabsorbentit, 168  
kaasufaasi-inhibiittori, 156–157  
kaasukontakti, 22, 41, 117  
kalvokytkin, 51, 59, 65  
kananmunakenno, 95  
kapillaari, 25, 48, 51, 94, 118–124  
kapillaari-ilmio, 51, liite 1 kohta 3.5  
kastepistelämpötila, 124, liite 1 kohdat 1.7 ja 1.8  
kastuminen (juote), 26, 130  
kastumisaikaluokittelu, 79–89  
kastumisen rajoittaminen, 120  
kastunut (puu, tavara), 90–94, 120–122  
kastunut suola, 50  
katodinen suojaus, liite 1, kohta 1.1 ja liite 4, sanasto  
katselmointimenettely, 11, liite 3, 72, 99, 176–180  
keltakromatointi, 60–61  
kemiallinen pintakäsittely, 150, 185  
kenttäpalaute, 26, 38, 43, 45, 74  
kerasaostus, liite 1, kohta 2.11  
kierrätys, 61, 93, 186

kiihdytetyt kosteustestit, 105, 112  
kiristemuovikalvo, 93–94  
kirjallisuusviitteet, 182  
klooratut hiilivedyt, 57, 156  
kloridikorroosio, 103  
kohotettu lämpötila, 105, 107  
komponentit, 12, 16, 20–26, 34–45, 54, 60, 87, 90–96, 105, 185  
komponenttilevy, 131–135  
kondensoituminen, kondensaatio, 42, 79–80, 120–125, liite 1 kohta 1.8  
kondensaattoreiden päästöt, 57  
kondensaattorit ja halogenoidut hiilivedyt, 57  
konvektio, 42, 124–125, 180–181  
kontaminaatio, 12, 14, 16–19, 24–25, 30–32, 120, 134, liite 1 kohta 6  
kontaminaation rajoittaminen, 120  
korrodoitumisaika, 48  
korrodoivat olosuhteet, 16, 75–89  
korroosio, 11–13, 36, 39, 47  
korroosioinhibiittori, 92, 156–168  
korroosiomekanismit, 34–39  
korroosion aikajänne, 47–51  
korroosion hallinta, 15, 21, 23, 29, 72–116  
korroosion kulku, 51, liite 1 kohta 5  
korroosionestomaalaus, 133, 147–153  
korroosionestotekniikat, 40–43  
korroosionopeusluokittelu, 83–86  
korroosionsiedon suunnittelu, 27, 72–75  
korroosionsietoisuus, 26, 41, 62–72  
korroosion vaikutukset, 14, 21, 27, 35–36, 63, 102, 131, 179  
korroosiosuojauksen haitat, 98  
korroosiosuojaus, 37, 73, 117  
korroosioreaktio, 12, 32, 47, 102–103, 149, 157  
korroosioriski, 18, 24, 28, 42–43, 62–63, 67–71, 79, 90–91, 100, 117–121, 124–125, 156  
korroosiotestaus, 39, 100–115  
korroosiotyypit, 11, 135, liite 1

korrosiivisuus (ulkotilat, eläinsuojat, teollisuus, rannikko), 87–91  
korrosiivisuusluokka, 66, 76, 84–87  
kosketin, 35, 37, 58–59, 71, 135–142  
kosketinjousi, 37, 140  
kosketinten voiteluaine, 142  
kosketinpinnoite, 136–140  
kosketinpaine, -voima, 135–140  
kosteudelle herkät komponentit, 75, 214  
kosteuden absorptio, liite 1 kohta 1.4 ja 1.5  
kosteuden läpäisevyys, liite 1 kohta 1.6  
kosteuden poisto pakkauksista, 92, 169  
kosteuden vaikutus, 32, 37, 47, 51–53, 66, 103, 144, 156  
kosteus, 47–61  
kosteus ja korrosio, 47–61  
kosteuspitoisuus, liite 1, kohdat 1.4 ja 1.5  
kosteustestit, 39, 105, 107–108, 112–114  
KOTEL 3, 137, 139, 185  
KOTEL 13, 136, 139, 185  
KOTEL 207, 132, 185  
KOTEL 222, 133–134, 185  
KOTEL 223, 134, 186  
KOTEL 230, 134, 186  
kotelo, 42–43, 60–61, 66–68, 97–100, 108, 111–112, 118–128  
kotelointiluokka, 23, 126–128  
kotelomateriaalit, 60, 143–146  
kotelon suojausluokitus, 126–128  
kotelon tiiviys, 22, 68, 123–124, 126–128  
kotelorakenteen pintakäsittely, 147–153, 185  
kromatointi, 37, 60–61, 144–148  
kromatoitu alumiini, 61, 145–148  
kuivana pitäminen, 42  
kuivausaineet, 171–172  
kuljettaminen, 45, 90–95  
kuljetuslogistiikka, 90–95  
kuljetusmenettely, 94–95

kuljetuspakkaus, 47, 52, 56, 90–95, 117, 158–161, 165, 168–175  
kultapinnoite, 109, 139, 149, liite 1 kohta 2.4  
kuormalava, 93–95  
kuumasinkitys, 60, 144, 150–153  
kylmä pinta, 122  
kytkimet, 59, 161  
käyttäjät ja tuotanto, 33  
käyttökytkimet, 59  
käyttöolosuhteiden korrosiivisuus, 76–89

## L

laatu järjestelmän kehittäminen, 23, 28, liite 3  
lakkaus, 125, 131  
lankamainen korrosio, 51, 240, liite 1 kohta 2.9  
lasisiirtymälämpötila, sanasto  
liitinkontakti, 65, 141, liite 3 kohta 4.11  
liitinkosketin, 138–140  
liitokset, 59, 65, 96, 135–136  
liitosmateriaalien yhteensopivuus, 42  
liittimet, 91, 135–142  
liitäntä- ja irrotusvoimat, 141  
liuotinmaali, 60, 151  
liuottimet, 53, 82  
logistiikka, 15, 28–29, 44, 68, 73, 75, 92, 98–99, 176  
luontainen korroosionsietoisuus → inertti, 21, 41  
luotettavuustestaus, 104–107, 113–114  
lyijyn käyttökielto/EU, 61  
lähiympäristö, 33, 117  
lämpöpaukahtelu, 26, liite 1 kohta 2.22  
lämpötila taivasalla, 96, 121, liite 1 taulukko 1.6  
lämpötilan vaihtelu, 18, 45, 51, 59, 65, 93, 107, 121, 123, 125, 140, 159, liite 1 kohta 1.9

## M

maali, maalaus, 60, 97, 133, 143, 147–153  
maali, sähköä johtava, 154  
mastorakenteen pintakäsittely, 121, 151–153  
materiaalianalyysit, 103, 105  
materiaalien päästöt, 54–59  
matkapuhelin, 181  
merivesi, 18  
metallien pinnoitteet, 147–153  
metalliparikorroosio, 60, liite 1 kohta 2.1  
metalloitu muovi, 146  
migraatio, 20, 97, 135  
mikrobiologiset vaikutukset, 33, liite 1 kohta 2.17  
mikroilmasto, 17, 61, 78, 117  
mikroilmastoon vaikuttaminen, 117–119  
mikropiirien kuljetuspakkaus, 93  
mikropiirien kosteusherkyys, 174  
MIL-G-45204C, 139, 211  
MIL-I-46058C, 132, 166  
molekyyliseula (zeoliitti), 171  
monikaasutesti, 103, 105, 109  
monikerrospinnoite, 147–150  
monimetallisuojaus, 160  
montmorilloniitti-savi (bentoniitti), 92, 117, 171, 220  
muovien päästöt, 54, 97  
muovikotelo, 24, 51, 90, 96, 146  
muovikääre, 92–95  
muovit, 55, 97

## N

NaCl, 81, 103, liite 1 kohta 1.2, kohta 3.1, kohta 3.6, kohta 3.7 ja kohta 5  
NaCl-pitoisuus, 133  
nikkelipinnoite, 140, 212  
nikkelipinnoitus – välimetalli liite 1, kohta 2.16

nikkelivälikerros, 138, 148, liite 1 kohta 2.4  
noki, 31, 47, 87, 132

## O

ohut pinnoite (< 1µm), 139  
olosuhdeluokittelu, 76–91  
olosuhdeseuranta, 115  
olosuhteiden korroosiivisuus, 62, 66, 75  
olosuhteiden tunteminen, 30  
olosuhteisiin vaikuttaminen, 95, 117  
orgaanisten materiaalien päästöt, 54, 58, 162  
orgaaninen pinnoite, 130, 151, 186  
OSP-pinnoite, 130  
ostot, 44–45

## P

pakkauslaatikko, 90, 95  
pakkausmateriaalit, 56, 93, 160, 163, 165–166  
pakkausstandardit, 220  
pakotettu konvektio, 125  
palonestoaine, 61, 134, 156  
pehmeä vika, 14  
perusmetalli, 89, 138  
pesumenetelmät, 132, 185  
pesemätön juoksute, 132  
pesuton juotosprosessi, 134  
piensignaalikontakti, 137  
piilokorroosio, liite 1 kohta 2.7  
piirilevy, 128  
pikatestit, 104  
pinnan karheus, 136  
pinnoittaminen, 147–153  
pinnoitemateriaali, 137  
pinnoitteen kovuus, 139  
pinnoitteen ominaisuudet, 139  
pintajännitys, 49–53, liite 1 kohta 3  
pintaliitostekniikka, 96  
pintaresistanssi, 34, 133–134  
polymeroitu glykoli, 142

Popcorning → lämpöpaukahtelu  
Pourbaix-diagrammi, liite 1, kohta 1.1  
puhtauden testaus, 133  
puhtaus, 81, 132  
puhtausvaatimukset, 133  
pulverimaali, 60, 97, 151  
puu, 56, 92, 122, 158, 160, 166, 190  
puun päästöt, 56  
PVC-muovi, 55–56, 97  
päästöt, 54–59  
pöly, 30–32, 41, 47

## Q

QCM, 116

## R

rakennustyömaa, 91  
rakokorroosio, liite 1, kohta 2.8  
runkorakenne, 60–61  
ruoste (punaruoste), 47, 61  
ruoste → valkoruoste  
ryömiminen (korroosiotuotteen), liite 1  
kohta 2.12

## S

saaste → epäpuhtaus, 81  
SAE AMS 2422E, 139, 211  
sarjaresistanssi, 65  
SFS 3632, 151, 206  
SFS 3644, 151, 206  
SFS 3754, 151, 206  
SFS-EN-ISO 1461, 150, 212  
SFS-EN-ISO 8502-6, 133, 206  
SFS-EN ISO 12944, 71, 89, 153, 212  
SFS-ISO 8044, 12, 206  
sijoituspaikan valitseminen, 119–122  
silikageeli, 169–170  
silikoni (öljy), 54  
silikonikumi, 55  
sinipassivointi, 61  
sinkitty metalli, 144–145

Sinnadurai-HAST-testi, 113  
sisäosien olosuhteet, 118  
skin effect liite 1 kohta 2.2  
solvatoituminen, liite 1, kohta 3.6  
spesifikaatio, 99  
staattiset kosteustestit, 107  
suhteellinen kosteus, 16–17, 32, 52,  
79–81, 170, liite 1 kohta 1.7  
suojaavat toimenpiteet, 68  
suojakaasu, 173–174  
suojauksen haittavaikutukset, 98  
suojausluokitus, 126  
suolan hygroskooppisuus, 51  
suolan kulkeutuminen, 49–51  
suolapitoinen vesi, 49, 124  
suolasumutesti, 108  
superabsorbentti, 172  
suunnittelu, 26–27  
suurivirtainen, 141  
syklinen kosteustesti, 108  
sähköinen tiivistäminen, 155  
sähkökemiallinen pintakäsittely, 150,  
185  
sähkömagneettinen suojaus, 66  
sähkön johtavuus, 32  
sähkösaostetut pinnoitteet, 150  
sähkösinkitys, 60–61  
säikeet liite 1 kohta 4.2

## T

taajuusmuuttaja, 180  
teholähde, 180  
tekstiilipöly, 47  
tensidi, liite 1, kohta 3.7  
teräsohutlevy, 143–145  
testaus, 38, 103–116  
testausmenetelmät, 103–116, 165  
tiiviste, 154  
tiiviyys, 123–128  
tina, 43, 57–58, 61, 130, 137, 139–140,  
161  
tinalyijypinnoite (HASL), 130, 183,  
188

tinarutto, liite 1 kohta 4.3  
tinasäie (tinaviiksi), liite 1 kohta 4.2  
toiminnallinen vika, 25  
toimintahäiriö, 36–37  
toleranssitarkastelu, 25  
TOW kosteana oloaika, 47, 80, 87–88  
tunkeutumissyvyys, liite 1 kohta 2.21  
tuntematon vika, 37, 39  
tuotanto- ja asennusolosuhteet, 90  
tuotantoprosessi, 178  
tuotteen spesifikaatio, 99  
tyhjiöpakkaus, 173

## U

ulkonäkö, 36  
upotusrasituksen korrosiivisuus, 153  
uusiomassa, 95

## V

valkoruoste, 61, 94, 144–145, liite 1  
kohta 2.12  
vapaa konvektio, 125  
varastointi, 91  
VCI, 157–158, 163  
VCI-pakkausmateriaali, 160  
veden absorptio, 60, 112, 218, liite 1  
kohta 1.4 ja 1.5  
veden merkitys, 32  
veden tiivistyminen, 19, 102, 120  
verifiointi, 72–74  
vesi ja kemikaalit, 52  
vesihöyryn läpäisevyys, liite 1 kohta  
1.6  
vesikerros, 47, 98, liite 1 taulukko 3.1  
vesiliuokset, 31, 48, liite 1 kohta 3  
vesipohjaiset juoksutteet, 134, 186  
vesitiivis kotelo, 124, 145, liite 1 kohta  
1.6  
vikaherkkyys, 34

vikamekanismit, 11, 14, 21, 28, 34–35,  
63–64, 69, 104, liite 1  
vikasietoinen, 21, 40  
vikojen luokittelu, 69  
vikojen vakavuus, 62, 69  
virranahdo, liite 1 kohta 2.2  
voiteluaine, 56, 142  
voiteluainepatentteja, 142  
VPCI, 156  
VPI, 156  
vuotovirta, 37, 65, 135  
välikerros, 138  
välimetalli, 131, liite 1 kohta 2.16  
väritön kromatointi, 61  
väsyminen, liite 1, kohta 2.10

## X

XRF, 105, 115, liite 1, kohta 2.23

## Y

yksikaasutesti, 109  
yleinen korrosio, liite 1 kohta 2.2  
ympäristöolosuhdeluokitus, 76–89  
ympäristöluokitus, 33, 78  
ympäristöolosuhdestandardit, 17, 198  
ympäristöjen korrosiivisuus, 86–89  
(ulkotilat, eläinsuojat, teollisuus, ran-  
nikko)

## Z

zeoliitti (molekyyliseula), 171

Tekijä(t) Hienonen, Risto & Lahtinen, Reima		
Nimeke <b>Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa</b>		
Tiivistelmä Elektroniikan korroosion hallinnasta ja erilaisten suojaustapojen tuntemisesta on tullut yksi tärkeistä suunnittelun osa-alueista, koska elektroniikkaa käytetään yhä enemmän integroituna erilaisiin laitteisiin olosuhteissa, joiden korrosiivisuus on suuri. Toisaalta elektroniikan pakkaustiheyden kasvaminen on tehnyt elektroniikan herkäksi ympäristön korrodoiville vaikutuksille myös lievemmissä olosuhteissa. Projektissa kartoitettiin niitä vaikutusmekanismeja, joilla ilmasto ja muut ympäristötekijät, laitteiden käyttötapa ja rakenne sekä valmistusprosessi vaikuttavat elektroniikan korrodoitumiseen ja vikaantumiseen. Näiden ongelmien ratkaisemiseen kehitettiin menettely, jonka avulla sekä kokenut että aloitteleva suunnittelija voi tarkistaa käyttämänsä korroosiontorjuntatekniikan kelvollisuuden sekä osaa ennakoita mahdollisia korroosio-ongelmia laitteen rakenteessa ja osaa myös löytää uusia lähestymistapoja ratkaista niitä. Julkaisussa esitetään myös käyttöolosuhteiden korrosiivisuuden arviointimenettely. Lisäksi kuvataan erilaisia korroosiotyyppejä ja suojautumista niitä vastaan, korroosion analyysi- ja mittausmenetelmiä sekä korroosioalttiuden tutkimisessa ja laadunvarmistuksessa käytettäviä testausmenetelmiä. Julkaisuun sisältyvät laajakot luettelot korroosiota ja ilmastollisia vaikutuksia koskevista standardeista ja kirjallisuudesta. Tämä julkaisu on saatavissa sekä suomen- että englanninkielisenä (VTT Publications 626, <a href="http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P626.pdf">http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P626.pdf</a> ).		
ISBN 978-951-38-6882-6 (nid.) 978-951-38-6990-8 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Avainnimeke ja ISSN VTT Publications 1235-0621 (nid.) 1455-0849 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinumero 4856/A8SU00348
Julkaisuaika Helmikuu 2007	Kieli Suomi, engl. tiiv.	Sivuja 243 s. + liitt. 172 s.
Projektin nimi		Toimeksiantaja(t)
Avainsanat corrosion, electronics, electronic equipment, design, verification, atmosphere, climate, moisture, humidity, pollution, quality, quality control, temperature, corrosive gas, measurement, tests, environmental tests, Finland		Julkaisija VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374



Series title, number and  
report code of publication

VTT Publications 623  
VTT-PUBS-623

Author(s) Hienonen, Risto & Lahtinen, Reima		
Title <b>Corrosion and climatic effects in electronics</b>		
Abstract <p>Corrosion control in electronics and know-how concerning various protection methods have become an important field of design since electronics is increasingly used as integrated into different devices in highly corrosive conditions. On the other hand, the increase of the packaging density of electronics has resulted in electronics that is sensitive to the corrosive effects of the environment even in milder conditions.</p> <p>The project charted the mechanisms through which the climate, other environmental factors, the way of use of the device and its structure as well as the manufacturing process affect the corroding and faults of the electronics. A method was developed for solving these problems by which both the experienced and the beginning designer can check the feasibility of the applied corrosion protection technique and foresee possible corrosion problems in the structure of the device as well as find new approaches for solving them.</p> <p>The report also presents an evaluation method for the corrosive effect of the usage environment. In addition, various types of corrosion and protection against them are described, corrosion analysis and measurement methods introduced and testing methods used for quality assurance regarding corrosion discussed. Comprehensive lists of standards and literature concerning corrosion and climatic effects are appended to the report.</p> <p>This report is available in Finnish and in English (VTT Publications 626, <a href="http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P626.pdf">http://virtual.vtt.fi/inf/pdf/publications/2007/P626.pdf</a>).</p>		
ISBN 978-951-38-6882-6 (nid.) 978-951-38-6990-8 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		
Series title and ISSN VTT Publications 1235-0621 (nid.) 1455-0849 (URL: <a href="http://www.vtt.fi/publications/index.jsp">http://www.vtt.fi/publications/index.jsp</a> )		Projektinumero 4856/A8SU00348
Date February 2007	Language Finnish, engl. abstr.	Pages 243 p. + app. 172 p.
Name of project		Commissioned by
Keywords corrosion, electronics, electronic equipment, design, verification, atmosphere, climate, moisture, humidity, pollution, quality, quality control, temperature, corrosive gas, measurement, tests, environmental tests, Finland		Publisher VTT PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 4404 Faksi 020 722 4374

Korroosio ja ilmastolliset vaikutukset elektroniikassa -julkaisu on tarkoitettu elektroniikkasuunnittelun ja sen laadunvarmistuksen apuvälineeksi. Siinä esitetään, minkälaisia ongelmia korroosio ja ilmastolliset rasitukset aiheuttavat elektroniikkalaitteille, mitä korroosio on ja kuinka korroosiota voidaan hallita yritystoiminnassa. Korroosion hallinta on tässä kytketty osaksi yrityksen laatujärjestelmää, johon liittyen on suunniteltu yleispätevä katselmointimenettely, jonka avulla voidaan löytää korroosioon vaikuttavat osat yrityksen omassa toiminnassa ja tuotteen käytössä asiakkaan ympäristössä.

Korroosion hallintaan kuuluu ympäristörasitusten, kuten lämmön, kosteuden ja ilman epäpuhtauksien sekä ihmisten ja eliöiden toiminnan, aiheuttamien korroosioriskien ja ilmiöiden tunteminen sekä näiden korroosiota aiheuttavien vaikutusten torjuntakeinojen osaaminen. Julkaisu opastaa käyttäjänsä löytämään ne keinot, joiden avulla tietynlaiset korroosio-ongelmat ovat hoidettavissa, ja opastaa myös kehittämään yrityksen suunnittelumenetelmiä siten, että korroosio ja ilmastolliset vaikutukset osataan ottaa huomioon riittävän kattavasti koko toiminnassa.

Hanke oli osa Tekesin - Teknologian ja innovaatioiden kehittämiskeskusten - tutkimusohjelmaa Elektroniikka tietoyhteiskunnan palveluksessa - ETX, jossa se liittyi aihealueeseen Prosessien hallinta ja siinä Elektroniikkajärjestelmien kokonaisluotettavuuteen. Hanke toteutettiin VTT:ssä yhteistyössä ABB Industry Oy:n Teknologiaosaston, Benefon Oyj:n, Efore Muuntolaite Oy:n, KONE Oyj:n, Nokia Matkapuhelimet Oy:n ja Tampereen teknillisen korkeakoulun Mikroelektroniikan kanssa.

---

Julkaisu on saatavana

VTT  
PL 1000  
02044 VTT  
Puh. 020 722 4404  
Faksi 020 722 4374

Publikationen distribueras av

VTT  
PB 1000  
02044 VTT  
Tel. 020 722 4404  
Fax 020 722 4374

This publication is available from

VTT  
P.O. Box 1000  
FI-02044 VTT, Finland  
Phone internat. + 358 20 722 4404  
Fax + 358 20 722 4374

---