



Mauno Kukkola

# Tasavirran aiheuttama korroosio 110 kV voimajohdoilla

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Sähkövoimatekniikka

Insinöörityö

12.4.2022

## Tiivistelmä

Tekijä: Mauno Kukkola  
Otsikko: Tasavirran aiheuttama korroosio 110 kV voimajohtoilla  
Sivumäärä: 31 sivua  
Aika: 12.4.2022

Tutkinto: Insinööri (AMK)  
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka  
Ammatillinen pääaine: Sähkövoimatekniikka  
Ohjaajat: Projektipäällikkö Jukka Väljä  
Lehtori Tuomo Heikkinen

---

Tässä insinöörityössä tutkittiin 110 kV voimajohtojen maadoituselektrodeissa kulkevaa tasavirtaa sekä sen muodostumisen syytä. Maadoituksissa kulkevat tasavirrat saattavat aiheuttaa maanalaisissa metalliosissa, kuten haruksissa, vaurioita niin, että pylväsrakenne saattaa sortua metalliosien syövyttyä kestoalujuuden alapuolelle.

Työssä tutustuttiin aiempien vuosien mittaustuloksien kautta, miten mitattuihin tasavirtoihin vaikuttavat alueelliset- ja rakenteelliset tekijät sekä maalajien vaikutus vaikuttavat mittaustuloksiin.

Alueellisilla tekijöillä tarkoitetaan, sijaitseeko maadoitusmitattu pylvästi tiheään asutulla alueella sekä sijaitseeko pylvästi Itä-, Länsi, Etelä-Suomessa vai sisämaassa. Rakenteellisella tekijällä tarkoitetaan pylvästi-, perustus- ja maadoitusrakenteita. Työssä tutkittiin usean verkkoyhtiön maadoitusmittaustuloksia vuosilta 2019–2021.

Tutkimustyön tarkoituksena oli selvittää tasavirran aiheuttajia mutta tutkimus osoitti, ettei tasavirran aiheuttajia voida luotettavasti todentaa suoraan maadoitusmittaustuloksista, koska tasavirtaa aiheuttaa yleensä useampi tekijä ja näiden muutokset.

Avainsanat: tasavirta, maadoituselektrodi, tasavirtakorroosio

## Abstract

Author: Mauno Kukkola  
Title: The Direct Current Corrosion on the 110 kV Transmission Lines  
Number of Pages: 31 pages  
Date: 12 April 2022

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering  
Professional Major: Electrical Power Engineering  
Supervisors: Jukka Väljä, Project Manager  
Tuomo Heikkinen, Senior Lecturer

---

This thesis study examined DC current flowing in the earthing electrodes of the 110 kV transmission lines and the reason behind the phenomenon. The purpose was to determine the reasons for the DC current. DC current might damage the underground metal parts of the transmission line tower such as guy anchors. This may result in the collapse of the tower structure if the metal parts corrode too much.

Thesis work studied earthing measurements which were done during previous years. It was studied how regional and structural factors and environmental conditions affect to DC currents. Regional factor means where the towers are located are they in densely populated areas and also which part of Finland. Structural factor refers to tower, foundation and earthing structures. The earthing measurement results examined in this thesis study were from many different power lines and owners.

The purpose of the thesis was to determine the reasons for DC current but the research illustrated that the root cause of DC current cannot be reliably verified from the earthing measurement results, because current is usually caused by several factors and their variables.

Keywords: direct current, earthing electrodes, DC corrosion

# Sisällys

1	Johdanto	1
2	Historia tasavirtahavainnoista	2
3	Maadoitusjärjestelmä	4
3.1	Yleiset vaatimukset	4
3.2	Pylväsmaadoitukset	4
3.2.1	Maaperän ominaisresistiivisyys	5
3.2.2	Maadoitusresistanssi	6
3.2.3	Pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi	8
3.2.4	Pylväsmaadoitusten rakenne	8
3.3	Maadoitusmittaukset	9
3.3.1	Käännepistemenetelmä	9
3.3.2	Sarjamittausmenetelmä	10
3.3.3	Virta- jännitemittausmenetelmä	11
3.3.4	Suurtaajuusmenetelmä	11
3.3.5	Tasavirtamittaus	11
4	Korroosio	12
4.1	Sähkökemiallinen reaktio	12
4.2	Potentiaali-PH-piirros eli Pourbaix diagrammi	13
4.3	Metallien sähkökemiallinen jännitesarja	15
4.4	Korroosion esiintymismuodot	16
4.4.1	Yleinen syöpyminen	16
4.4.2	Pistesyöpyminen	16
4.4.3	Rakokorroosio	16
4.4.4	Galvaaninen korroosio	16
4.4.5	Eroosio- ja kavitaatiokorroosio	18
4.4.6	Hiertymäkorroosio	18
4.4.7	Raerajakorroosio	19
4.4.8	Valikoiva liukeneminen	20
4.4.9	Jännityskorroosio	20
4.4.10	Korroosioväsyminen	20
4.4.11	Hajavirtakorroosio	21
4.4.12	Muita korroosioesiintymisiä	21

4.5	Suojautuminen korroosiolta	21
4.5.1	Sähköinen suojautuminen	22
4.5.2	Mekaaninen suojautuminen	23
5	Tehdyt mittaukset ja niiden tulokset	24
5.1	Maadoitusrakenteiden vaikutus	25
5.2	Pylväsrakenteen ja -materiaalin vaikutus	26
5.3	Maaperän vaikutus tasavirtaan	26
5.4	Alueellinen vaikutus	27
5.5	Ulkoiset tekijät	28
6	Yhteenveto	29
	Lähteet	31

## 1 Johdanto

Opinnäytetyö tehdään Eltel Networks Oy:lle. Eltel Networks Oy on osa Eltel konsernia, joka on johtava sähkö- ja tietoliikenneverkkoteknisten palveluiden toimittaja pohjoismaissa. Se työllistää noin 1500 työntekijää Suomessa ja toimipaikkoja sillä on 65 Suomessa, joista eteläisin on Kemiössä sekä pohjoisin Ivallossa. (1.)

Voimajohdoilla havaitaan korroosiosta aiheutuvia syöpymiä lähes vuosittain ja tasavirrat ovat yksi syy korroosiodien syntyyn. Tämän työn tarkoituksena on selvittää voimajohtojen maadoituksissa esiintyvien tasavirtojen lähteitä, tasavirroista aiheutuvia ongelmia sekä mahdollisia toimenpiteitä. Työssä on tarkoitus myös tutkia, voisiko maastossa tapahtuvien maadoitusmittauksien yhteydessä selvittää mahdolliset tasavirran aiheuttajat.

Tutkimus perustuu jo olemassa oleviin mittaustietoihin, kirjallisuuteen sekä käytännöstä saatuihin tietoihin. Voimassa olevat mittaustiedot ovat pääosin vuosilta 2019–2021 sekä muutamia tasavirtamittaustietoja vuosilta 2013–2015 tasavirtamittauksien osalta.

## 2 Historia tasavirtahavainnoista

Ensimmäisiä havaintoja tasavirran aiheuttamista ongelmista havaittiin jo 1940-luvun lopussa Imatran Voiman tarkastaessa maanalaisia harusrakenteita. Tarkastusten yhteydessä suoritettiin virtamittauksia ja mittauksilla havaittiin suurimmat tasavirrat olevan 10 mA:n haruksista mitattaessa. Tarkastuksia ja mittauksia jatkettiin 1950-luvulla sekä suoritettiin tutkimuksia virtojen vaikutuksesta maanalaisiin rakenteisiin. Näiden tutkimusten perusteella tultiin tulokseen, että maadoitusten vaikutus teräksen syöpymiseen on vain noin 10 % luokkaa ja todennäköinen syy syöplymiselle on maaperä. Harusten syöpymisnopeudelle annettiin maaperän mukaan taulukon 1 mukainen ohjearvo. Taulukossa kuvataan eri maalajeissa tapahtuva syöplyminen vuoden aikana. Syöplymisnopeudessa huomioitiin lisäksi pylväällä oleva kuparimaadoitus. Jos pylväällä oli kuparimaadoitus, sinkin syöplymisnopeutta kasvatettiin kertoimella 1,4–2,0 riippuen maalajista. (2, s. 149–150.)

Taulukko 1. 1950-luvun ohje materiaalin syöplymiselle, viimeisessä sarakkeessa huomioitu pylväällä oleva kuparimaadoitus (2, s. 153).

	Rauta Painohäviö g/m <sup>2</sup> /v	Sinkki Painohäviö g/m <sup>2</sup> /v	Sinkki jos maadoi- tus Painohä- viö g/m <sup>2</sup> /v
Hiekka	90	20	40
Savi	230	110	198
Suo	210	140	196

Myöhemmin 50-luvulla kaivettiin ylös harusvartaita ja havaittiin tutkimuksen pitävän paikkaansa, koska hiekkamaassa syöplymää havaittiin noin 95 g/m<sup>2</sup>/v sekä savimaassa syöplymää havaittiin hieman vähemmän verrattuna taulukon mukaisiin arvoihin. Tutkimuksessa myös pääteltiin, että syöplymä hidastuu ajan kanssa ja näin ollen tutkimukset lopetettiin neljännes vuosisadaksi. (2, s. 151–154.)

Harusten korroosio nousi uudelleen esille, kun Imatran Voimassa aloitettiin tutkimaan 1940–1950-luvuilla rakennettujen voimajohtojen harusperustusten puuosia, joiden oletettiin olevan lahonneet. Puuosat olivat täysin ehjät mutta metallisissa osissa havaittiin isoja vaurioita syöpymisien takia. Noin vuosi syöpymishavaintojen jälkeen sortui 220 kV:n Ossauskoski - Petäjaskoski -voimajohto syöpymisten harusrakenteiden vuoksi. Tämän jälkeen alkoi tulla havaintoja myös muilta johtojaksoilta ja Imatran Voimassa alettiin ymmärtämään, että kyse on laajemmasta ongelmasta. (2, s. 151–154.)

Pylvässortumien takia Imatran Voimassa käynnistettiin tutkimuksia, mistä syöpymät johtuvat ja miten näitä voidaan estää. Korroosion syyksi todettiin galvaanisen korroosion aiheuttamia syöpymä. Yhtiössä alettiin suorittamaan kaivuutar-kastuksia sekä mittaamaan tasavirtakomponentteja harusvirroista. Kaivuutar-kastusten kohteiden määritys tehtiin maaperän ominaisvastuksen ollessa alle 200  $\Omega\text{m}$  sekä tasavirtakomponentti yli 4 mA. (2, s. 157.)

Imatran Voimassa aloitettiin tutkimus- ja kehittämisprojekti harusten korroosiosta vuonna 1985 ja hankkeesta julkaistiin noin 80-sivuinen tiedote vuonna 1987. Hankkeessa eristettiin 7849 pylvään harukset sekä mitattiin niissä kulkevat virrat. Valitut pylväät määriteltiin maaperän ominaisresistanssin ollessa 200  $\Omega\text{m}$  ja johdon yli kahdeksan vuotta vanha. Virtamittauksien perusteella harusperustuksia tarkastettiin kaivamalla sekä vaihdettiin 2213 pylvään harusperustukset. Kaivuu tarkastusten perusteeksi määriteltiin virtamittauksen lisäksi haruksista mitattavaksi virraksi yli 5 mA. 5 mA:n virta valinta perustui Faradayn lakiin ja vastaa vuodessa noin 50 gramman syöpymistä. Faradayn lain mukaan liuke-nevan massan määrään vaikuttaa virran suuruus korroosiovirtapiirissä, moolipaino, korroosioon osallistuvien elektrodien määrä ja Faradayn vakio. Tutkimus- ja kehittämisprojektissa todettiin korroosion, tasavirran sekä maanominaisvas-tuksen välissä selvä korrelaatio. Tasavirran kasvaessa ja maanominaisvastuk-sen pienentyessä korroosion voimakkuus kasvaa. (3, s. 1–29.)



### 3 Maadoitusjärjestelmä

Maadoituksella tarkoitetaan virtapiirissä olevien osien tai sähkölaitteiston sähköä johtavan osan yhdistämistä maadoituselektrodilla maahan.

Maadoitukset jaetaan käyttö- ja suojamaadoituksiin. Käyttömaadoituksessa virtapiiriin kuuluva osa maadoitetaan ja suojamaadoituksessa virtapiiriin kuulumaan osa maadoitetaan. Esimerkiksi, koneen runkoon saattaa syntyä vaarallinen kosketusjännite laitteen eristyksen pettäessä. (4, s. 5.) Myös suurjännitepylväs voi tulla jännitteiseksi esimerkiksi vikatoiminnan vuoksi.

Työssä ei ole tarkoitus perehtyä maadoitusten suunnitteluun tai maadoitusmitauksiin, joten maadoitusmääräykset, -rakenteet ja -mittaustavat ovat vain lyhyesti selostettu tutkielmassa.

#### 3.1 Yleiset vaatimukset

Standardeissa 6001 ja EN50341 määritellään kriteerit maadoitusjärjestelmien suunnitteluun, asennuksille, testaamiselle ja kunnossapidolle siten, että se toimii kaikissa tilanteissa ja varmistaa henkilöturvallisuuden kaikissa paikoissa, joihin henkilöillä on pääsy. Standardit määrittää kriteerit myös maadoitusjärjestelmän sekä lähellä olevien laitteiden eheyden varmistamiseksi. Maadoitusjärjestelmän olennaiset mitoitusvaatimukset ovat vikavirran suuruus, viankesto aika sekä maaperän ja maadoituselektrodin ominaisuudet. Lisäksi standardit määrittelevät maadoitusjärjestelmille korroosiokestävyyden ja mekaanisen lujuuden. (5, s. 87–89.)

#### 3.2 Pylväsmaadoitukset

Pylväsmaadoitussuunnittelussa on lähtökohtana pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi, maaperän ominaisresisttiivisyys sekä maadoitusresistanssin tavoitearvo, joka määritellään jokaiselle pylväälle tapauskohtaisesti maadoitustavan ja maan ominaisresisttiivisyyden mukaan. (6, s. 21.)

Pylväiden maadoitusmateriaalina käytetään lähes poikkeuksetta kupariköysiä, jotka ovat poikkipinnaltaan vähintään 16 mm<sup>2</sup> (6, s. 17).

### 3.2.1 Maaperän ominaisresistiivisyys

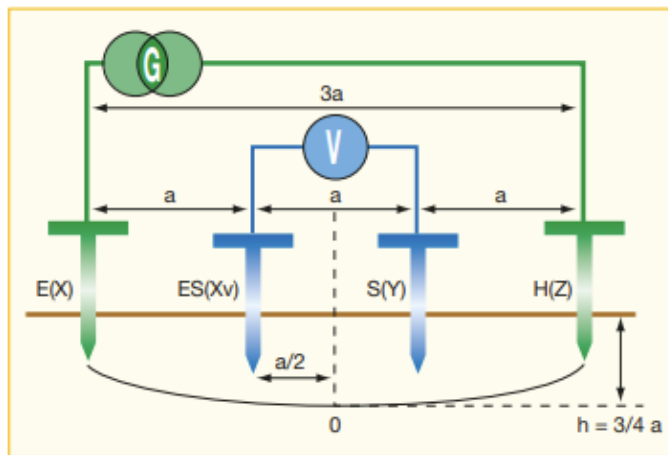
Suomessa maaperän resistiivisyys  $\rho_E$  vaihtelee huomattavasti eri paikoissa maaperän tyyppin, raekoon, tiheyden ja kosteuden mukaan. Maanperän resistiivisyys saattaa vaihdella myös eri syvyyksillä johtuen maan kerrostumisista sekä lämpötilasta (jäätymisestä) johtuen. Maaperän resistiivisyyden arvo ilmoitetaan  $\Omega\text{m}$ :lle. Taulukossa 2 on esitetty maaperän, betonin ja veden resistiivisyydet. (5, s. 147.)

Taulukko 2. Maaperän, veden ja betonin ominaisresistiivisyys (5, s. 147).

Aine	Keskimäärin $\Omega\text{m}$	Tavallisimmat vaihteluvälit $\Omega\text{m}$
Savi	40	25 ... 70
Saven sekainen hiekka	100	40 ... 300
Lieju, turve, multa	150	50 ... 250
Hiekka, hieta	2000	1000 ... 3000
Moreenisora	3000	1000 ... 10000
Harjusora	15000	3000 ... 30000
Graniittikallio	20000	10000 ... 50000
Betoni tuoreena tai maassa	100	50 ... 500
Betoni kuivana	10000	2000 ... 100000
Järvi- ja jokivesi	250	100 ... 400
Pohja- kaivo- ja lähdevesi	50	10 ... 150
Merivesi (Suomenlahti)	2,5	1 ... 5

Maaperän resistiivisyys on syytä mitata jokaisessa maadoitettavassa kohteessa maaperän vaihteluista johtuen. Mittauksiin on käytettävissä useita menetelmiä, joista yleisin on Wennerin menetelmä. Wennerin menetelmässä käytetään 4-

elektrodia tasaisella välillä. Alla Wennerin menetelmästä periaatekuva 1. (7, s. 4.)



Kuva 1. Wennerin menetelmän periaate (7, s. 4).

Menetelmästä saadaan maadoitusvastusarvo  $R$ , jonka avulla voidaan laskea maanperän resistiivisyys kaavalla 1:

$$\rho E = 2\pi a R \quad (1)$$

$\rho E$  on maaperän ominaisresistanssi syvyydessä  $\frac{3}{4} a$ .

$a$  on piikkien mittaussäili

$R$  on mittauslaitteesta saatava maadoitusarvo. (7, s. 4.)

### 3.2.2 Maadoitusresistanssi

Maadoitusresistanssi  $R_E$  riippuu maaperän resistiivisyydestä, maadoituselektrodin mitoista sekä asennustavoista. Maadoitusresistanssiin vaikuttavin tekijä on maadoituselektrodin pituus. Taulukko 3 mukaan voidaan maadoituksen

muotojen vaikutusta arvioida elektrodin kokonaispituuden pysyessä vakiona sekä sen avulla voidaan laskea maadoituselektrodien pituuksia. (5, s. 148.)

Taulukko 3. Erilaisten maadoituselektrodien maadoitusresistanssi laskentakaavoja (5, s. 148).

Elektrodin laatu	Kaava	Huomautukset
Pallo pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	
Levy pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi D}$	$s \ll D$
Pystysuora tanko tai putki pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Pystysuora tanko tai putki upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{4L}{1,36 \times d} \times \frac{2h+L}{4h+L}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin pinnassa	$R_E = \frac{\rho_E}{\pi L} \ln \frac{2L}{1,36 \times d}$	$d \ll L$
Vaakasuora johdin upotettuna	$R_E = \frac{\rho_E}{2\pi L} \ln \frac{L^2}{1,85 \times h \times d}$	$d \ll 4h$
Ruudukko	$R_E = \frac{\rho_E}{2D} + \frac{\rho_E}{L}$	

$L$  Elektrodin pituus (m)

$D$  Pallon, levyn tai ruudukon halkaisija (m)

$d$  Johtimen halkaisija tai puolet nauhan leveydestä (m)

$s$  Levyn paksuus (m)


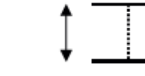






$\rho_E$  Maaperän resistiivisyys ( $\Omega\text{m}$ )

$h$  Elektrodin upotussyvyys (m)

Maadoitusresistanssin arvoon voidaan vaikuttaa myös vaakamaadoituksen kuvioinnilla. Esimerkiksi vierekkäiset maadoituksilla saadaan parempi resistanssiarvo kuin pitkällä maadoituksella kun maadoituselektrodien kokonaispituus on

sama. Taulukossa 4 samalla maadoituselektrodin kokonaispituudella suhde vaakasuoraan maadoituselektrodiin nähden. (5, s. 149.)

Taulukko 4. Maadoituselektrodin suhde vaakasuoraan maadoitukseen (5, s. 149).

Elektrodin pituus L (m)		20	60	200	600
Elektrodin muoto		Maadoitusresistanssin suhde vaakasuoran johtimen maadoitusresistanssiin			
		100	100	100	100
0,2 m		133	144	155	159
2 m		109	123	135	143
20 m		92	98	109	119
		103	103	102	102
		107	106	106	105
		116	115	114	112
		136	135	132	129
		159	158	154	148
		109	108	107	106

### 3.2.3 Pylvään luonnollinen maadoitusresistanssi

Pylvään luonnollisella maadoitusresistanssilla tarkoitetaan pylvään perusmaadoitusta ja teräspylväillä johtavasti yhdistettyjen betoniraudoitusten yhteistä maadoitusresistanssia. (6, s. 20–22.)

### 3.2.4 Pylväsmaadoitusten rakenne

Pylväsmaadoitukset koostuvat perusmaadoituksesta, sekä tarvittaessa lisätään säteis- tai pystymaadoituksia, potentiaalin ohjauselektrodeja, pylväältä pylväälle meneviä maadoituksia ts. läpi meneviä maadoituksia. Perusmaadoitukseen kuuluu yleensä perustuksen alle menevä J-lenkki sekä jalkojen yhdistävä maadoitus. Lisämaadoitukset suunnitellaan pylväille tapauskohtaisesti. (6, s. 20–22.)

### 3.3 Maadoitusmittaukset

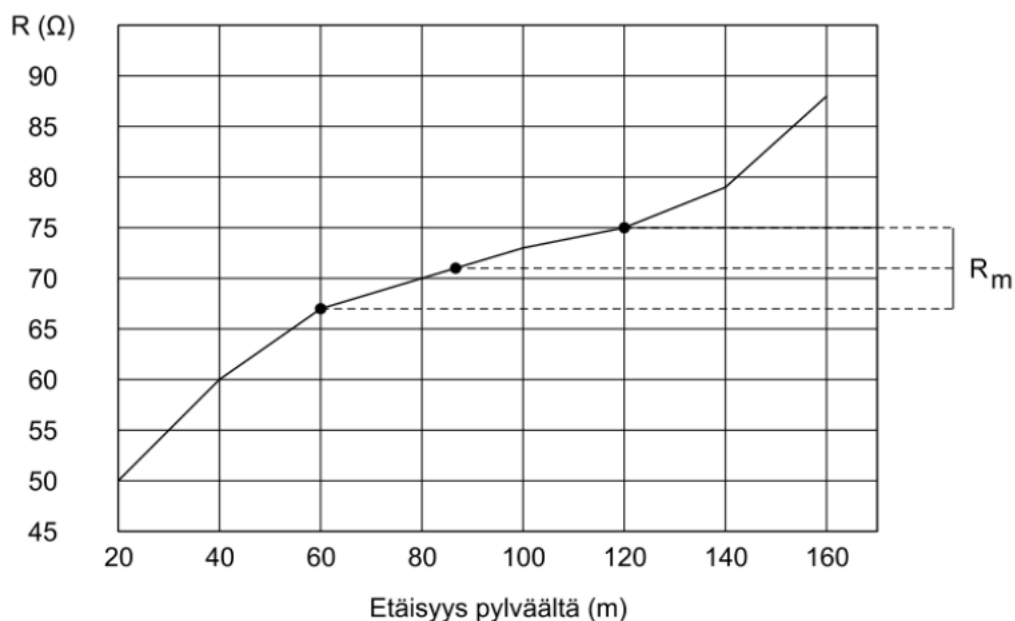
Voimassa oleva sähköturvallisuuslaki velvoittaa, että sähkölaitteisto on turvallinen sekä määrittelevät laitteistojen tarkastuksista ja kunnossapitoa koskevista velvoitteista. Sähköturvallisuuslaki velvoittaa toimimaan myös standardien mukaan tai vastaavan turvallisuustason mukaisesti. Standardissa 6001 on suositus maadoitusmittausten määrärajoista, jos laitteisto ei ole galvaanisesti yhteydessä toiseen maadoitusjärjestelmään. (5, s. 145.)

Maadoitusresistanssimittausten tarkoituksena on selvittää maadoituselektrodien fyysinen kunto sekä varmistaa suunnittelussa ja laskennassa käytettävien maadoitusresistanssien arvojen oikeellisuuden. Arvoja käytetään maadoitusjännitteiden laskemiseen vikatilanteissa. Mittaustapana käytetään hyväksytyjä menetelmiä ja mittausmenetelmä valitaan pylvästyypin, maadoituksen laajuus ja rakenne sekä ympäristössä häiriötä tai virheitä aiheuttavat tekijät huomioiden. Mittaustapoja ovat käännepiste-, sarjamittaus-, virta- jännitemittaus- ja suurtaajuusmenetelmät. Jokaisella mittausmenetelmällä on rajoituksia, jotka myös täytyvät huomioida menetelmää valittaessa. (8, s. 4.)

Poiketen standardin lyhenteestä sisäisessä ohjeessa maadoitusresistanssi on lyhenteeltä  $R_m$ .

#### 3.3.1 Käännepistemenetelmä

Käännepistemenetelmässä mitataan jännitepiikin avulla maahan tunkeutuvan virran aiheuttamaa maapotentiaalia mittaussuoran eri kohdista. Mittaukset suoritetaan tavallisesti 20 metrin välein ja resistanssiarvot taulukoidaan. Taulukon arvot piirretään kuvaajaksi resistanssi/mitattu pituus sekä luetaan käännepisteiden keskikohta. Kuvassa 2 esitetty kuvaaja ja käännepisteiden keskikohta. (8, s. 5.)



Kuva 2. Käänne pisteen kuvaajaesimerkki (8, s. 5).

Mittauksen voi suorittaa myös lyhyellä käänne pistemenetelmällä, jos maadoitus on riittävän suppea. Lyhyessä käänne pistemenetelmässä mitataan maapotentiaali yhdestä pisteestä, jossa jännitepiikin etäisyys on 63 % virtapiikin ja mitattavan elektrodin välisestä etäisyydestä. (8, s. 6.)

### 3.3.2 Sarjamittausmenetelmä

Sarjamittaus menetelmässä hyödynnetään ukkosjohtimien ja niiden kautta mitattavan pylvään rinnalle kytkeytyvän pylväsketjun impedanssia. Mitattavan pylvään maadoitusresistanssi  $R_m$  saadaan, kun vähennetään mitatusta summaresistanssista  $R_{mit}$  johdon ketjuimpedanssi  $R_x$  kaavan 2 mukaisesti. (8, s. 7.)

$$R_m = R_{mit} - R_x \quad (2)$$

Summaresistanssilla tarkoitetaan johdon impedanssiketjun ja mitattavan pylvään maadoitusresistanssin sarjakytkentää. Ketjuimpedanssin suuruuteen vaikuttaa ukkosjohtimen materiaali ja viereisten pylväiden maadoitusresistanssiarvot. (8, s. 7.)

### 3.3.3 Virta- jännitemittausmenetelmä

Virta- jännitemittausmenetelmä on pääpiirteitään sama kuin sarjamittausmenetelmä. Erona sarjamittausmenetelmään on, että hyödyksi käytetään virtajohtimien ukkosjohtimiin indusoituvan latausjännitteen aikaansaamaa virtaa mittausvirtana. Mittauksessa saaman virran ja jännitteen avulla lasketaan summaresistanssi  $R_{mit}$  ja Resistanssi  $R_x$  on johdon ketjuimpedanssi. Pylvään maadoitusresistanssi  $R_m$  saadaan laskettua sarjamittauskaavaa vastaavalla kaavalla 3. (8, s. 8.)

$$R_m = R_{mit} - R_x \quad (3)$$

Virta -jännitemittauksia ei pidä sekoittaa standardissa 6001 mainittuun voltti-amppeerimittamenetelmään, joka on tarkoitettu laajempien maadoitusmittausjärjestelmien mittaukseen.

### 3.3.4 Suurtaajuusmenetelmä

Suurtaajuusmenetelmän periaate on sama kuin käännepistemetelmässä, jossa virtapiikki viedään riittävän etäälle maadoituksesta ja jännitepiikki viedään näiden väliin. Erona käännepistemetelmään suurtaajuusmenetelmässä mitausvirran taajuus on hyvin suuri, että ukkosjohtimien kautta rinnalle kytketyn pylväsketjun maadoitukset jäävät automaattisesti pois mittauksesta. (8, s. 9.)

### 3.3.5 Tasavirtamittaus

Maadoitusmittausten ja -tarkastuksen yhteydessä mitataan myös maadoituselektrodeissa kulkeva tasavirta. Tasavirrat voivat olla merkki galvaanisesta korroosiosta tai hajavirtakorroosiosta. Tasavirtojen aiheuttajat pyritään selvittämään, jos virta on yli 5 mA. (8, s. 10.)

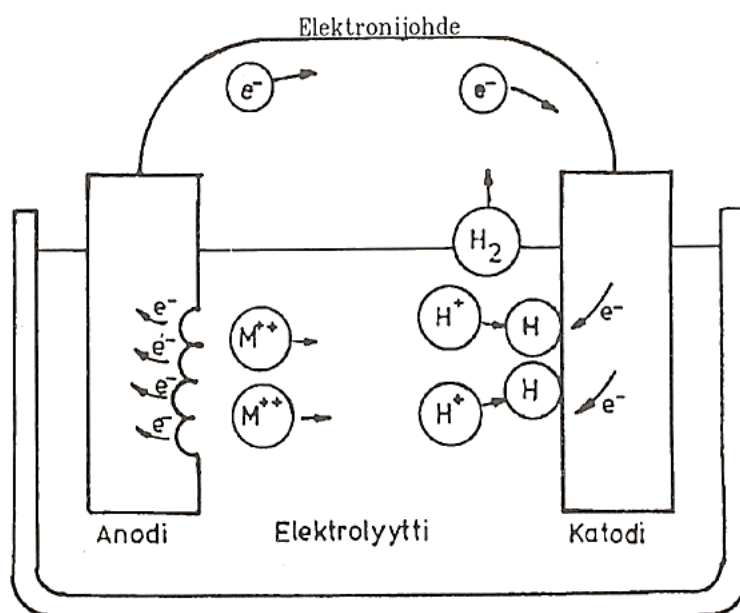


## 4 Korroosio

Korroosio sanaa käytetään yleisesti kuvaamaan ympäristön vaikutuksesta johtuvan erilaisten metallimateriaalien muuttumista kemiallisen tai sähkökemiallisen prosessitapahtuman seurauksena (9, s. 17–18).

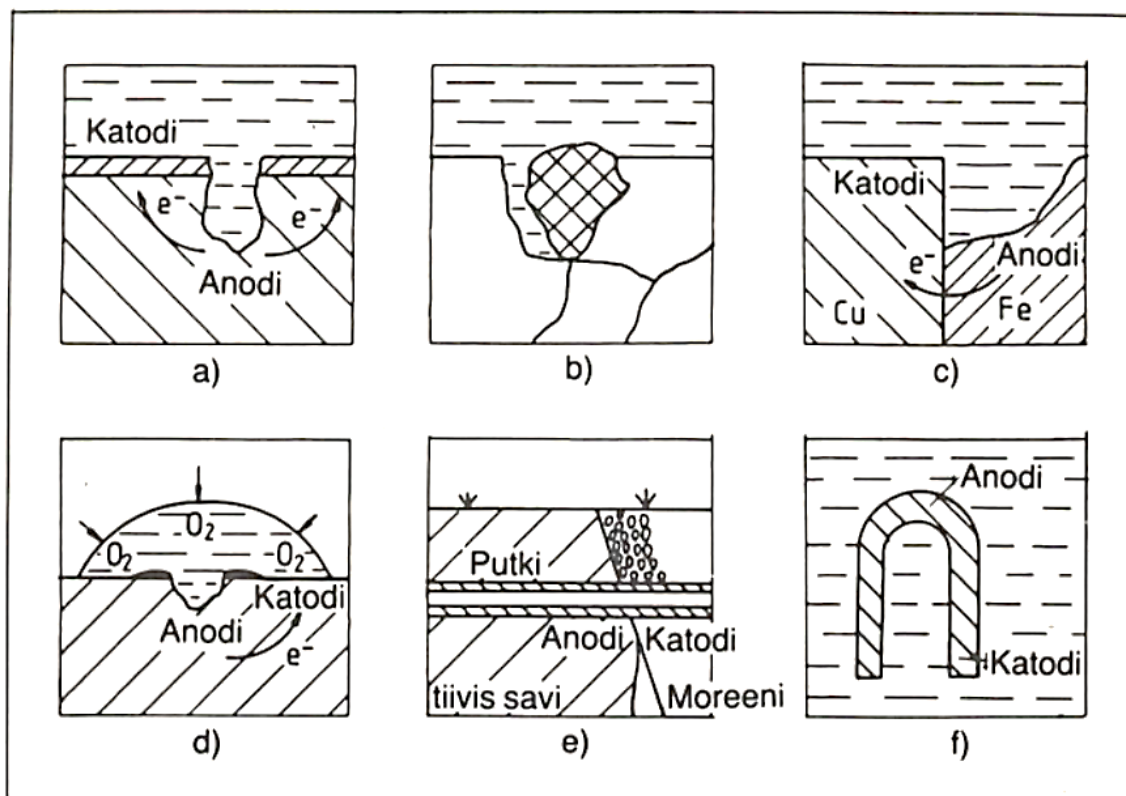
### 4.1 Sähkökemiallinen reaktio

Korroosion perusajatus perustuu korroosioparin syntymiseen kahden eri potentiaalin omaavan metallin osan tai kahden eri metallin välille, jotka ovat johtavassa väliaineessa (elektrolyytti). Kuvassa 3 esitetään kahden eri metallin galvaninen pari elektrolyytissä. (9, s. 29–41.)



Kuva 3. Kaksi eri metallia elektrolyytissä (9, s. 30).

Myös saman kappaleen metalliset pinnat voivat muodostaa eri potentiaalin rakenne- tai pintaeroista johtuen. Myös elektrolyytinä toimiva väliaineen muutoskohdassa voi muodostua korroosiota, esimerkiksi sähkönjohtavuudeltaan erilaisten maalajien muutoskohdassa. Kuvassa 4 on kuvattu kohteita, joissa korroosiota muodostuu. (9, s. 22–23.)

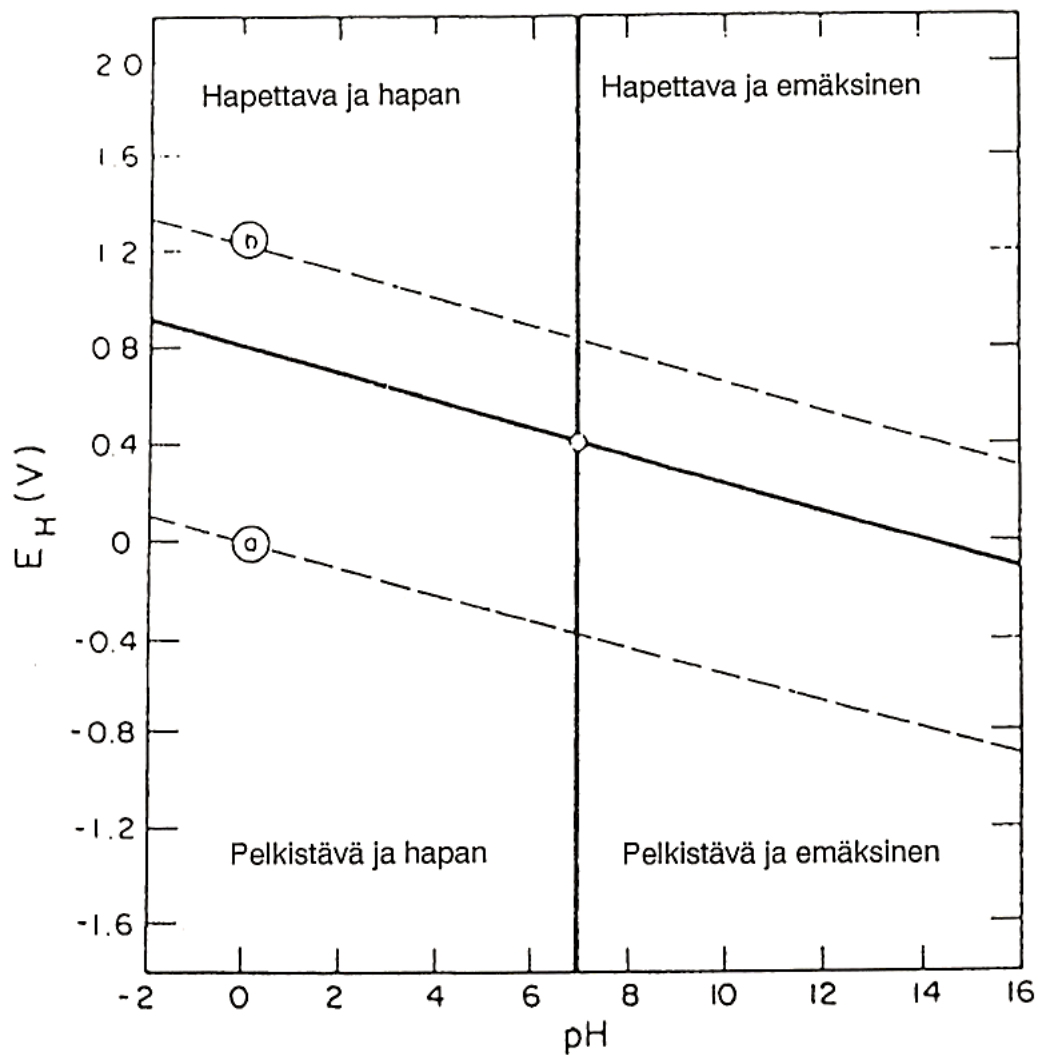


Kuva 4. Eri kohdissa muodostuva korrosio, a) perusmateriaalia jalommassa pinnotteessa reikä, b) jalo erkauma rakenteessa, c) kahden eri metallin muodostama galvaaninen pari, d) pinnalla oleva vesipisara muodostaa erilaisen happipitoisuuden, e) maalajit aiheuttavat eri happipitoisuudet, f) voimakkaammin muokkaantunut alue muuttuu anodiksi. (9, s. 33.)

#### 4.2 Potentiaali-PH-piirros eli Pourbaix diagrammi

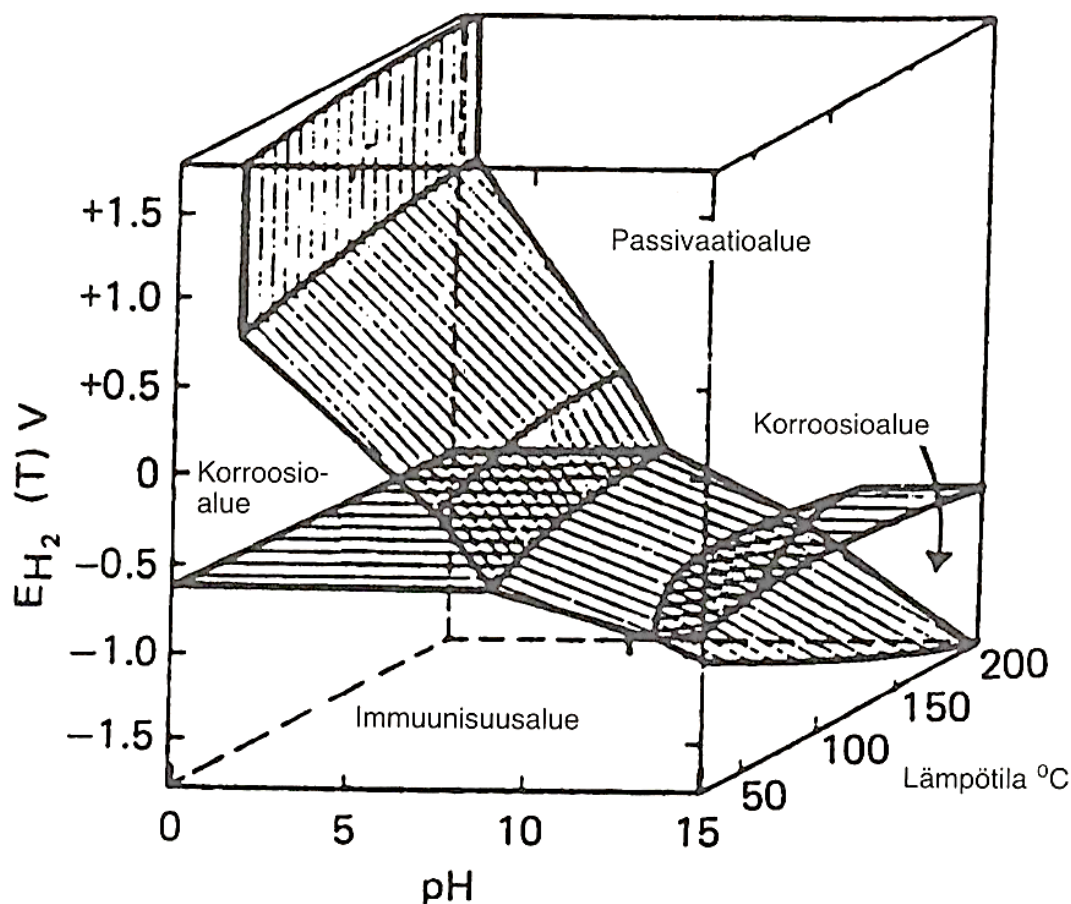
Nernstin yhtälön avulla voidaan laskea kennopotentiaali sekä kuvata lämpötilan ja konsentraatio (liuennut aine liuoksessa) vaikutus syntyvään potentiaaliin. Yhtälön mukainen termodynaaminen tieto voidaan esittää potentiaali ( $E_H$ ) Ph-koordinaateissa, jotka kuvaavat korroosioreaktion tasapainopiirroksia erilaisilla metalleilla. Piirroksia nimitetään keksijänsä Marcel Pourbaixin mukaan Pourbaix diagrammeiksi. Diagrammeissa esitetään potentiaali pH-koordinaateissa. Lämpötilan sekä hapan/emäksinen muutoksilla voidaan vaikuttaa korroosioreaktioon sekä ohjata korroosioreaktio passiiviseksi tai immuuniseksi.

Kuvassa 5 on esitetty veden tasapainopiirroksessa hapettavat, pelkistävät, happamat ja emäksiset alueet. (9, s. 43–47.)



Kuva 5. Veden termodynaaminen tasapainopiirros. (9, s. 47).

Kuvassa 6 on esitetty Fe-H<sub>2</sub>O potentiaali-pH-piirros nousevassa lämpötilassa, josta huomaa, että alueet muuttuvat aineiden ja lämpötilojen mukaan. Myös elektrolyyttiin liuenneet epäpuhtaudet vaikuttavat alueisiin. (9, s. 43–47.)



Kuva 6. Fe-H<sub>2</sub>O potentiaali-pH-piirros nousevassa lämpötilassa (9, s. 50).

#### 4.3 Metallien sähkökemiallinen jännitesarja

Korroosiparien syntymiseen vaikuttaa metallisten anodina sekä katodina toimivien kappaleiden standardipotentiaali sekä näiden välinen potentiaaliero. Standardipotentiaali mitataan normaalivetyelektrodia käyttäen ja tulokset asetetaan kasvavan potentiaalin mukaiseen järjestykseen.

Sähkökemiallinen jännitesarja kuvaa myös metallien jalousjärjestystä. Jalompi metalli saostuu epäjalompaan metallin pintaan. Saostuksella tarkoitetaan metallin ioniliuoksen siirtymistä toisen metallin pintaan. (10.)

## 4.4 Korroosion esiintymismuodot

### 4.4.1 Yleinen syöpyminen

Yleinen korroosio on sähkökemiallinen korroosio, jossa syöpyminen tapahtuu koko pinnalla tasaisesti. Korroosion tasaisesti johtuva syöpyminen tapahtuu, kun anodi ja katodi vaihtavat paikkaa jatkuvasti. Yleistä syöpymistä voidaan seurata helposti painohäviö- ja seinäpaksuusmittausten avulla. (9, s. 102.)

### 4.4.2 Pistesyöpyminen

Pistesyöpyminen keskittyy yleensä pienille alueille metallin pinnalle muodostaen paikallisia kuoppamaisia syvänteitä. Pistesyöpyminen pysähtyy yleensä, kun kuopat ovat saavuttaneet tietyn syvyyden. Pistesyöpyminen syntyy yleensä pinnan urista, rakennevirheistä, pinnalla olevista elektrolyyttipisaroista tai erilaisien liuoksien voimakkaasta pintaan törmäyksestä. (9, s. 103.)

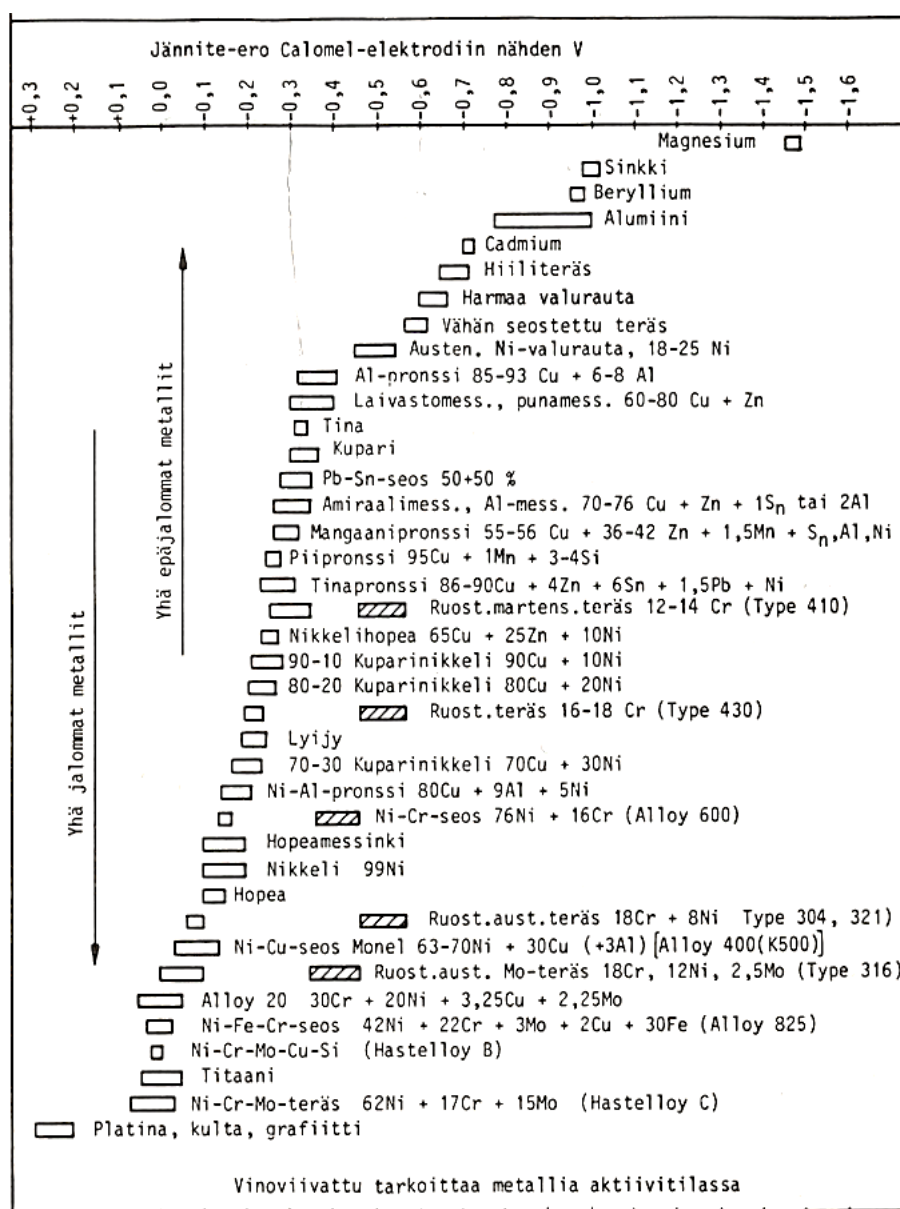
### 4.4.3 Rakokorroosio

Rakokorroosio esiintyy ahtaissa koloissa tai raoissa, joihin liuos pääsee tunkeutumaan mutta ei pääse vaihtumaan samalla nopeudella kuin muilla metallin pinoilla. Tämänlaisia paikkoja ovat esimerkiksi hitsausaumamat, levyjen liitosaumojen välit niittauksissa eli pienien rakojen väliin muodostuva korroosio. Rakokorroosiota esiintyy epäjaloista metalleista jaloihin metalleihin. (9, s. 104–105.)

### 4.4.4 Galvaaninen korroosio

Galvaanisessa korroosiossa kaksi metallia on samassa elektrolyytissä sekä ovat sähköisessä kosketuksessa toisiinsa. Galvaanisessa korroosiossa epäjalommasta tai alemman potentiaalinen omaavasta metallista muodostuu anodi, joka syöpyy sekä jalomman metallin syöpyminen puolestaan pysähtyy lähes täysin. Galvaanisen parin muodostuminen on todennäköisempää mitä isompi

materiaalien potentiaaliero on tai mitä kauempana kontaktissa olevat metallit ovat toisistaan jännitesarjassa. Kuvassa 7 on esitetty jännitesarja eri metalleille Calomel-elektrodiin nähden + 20 °C asteisessa merivedessä. Galomel-elektrodiä käytetään vertailuelektrodina ja se koostuu lasisesta ulkokuoresta, jonka sisällä on kaliumkloridiliuosta. Galvaaninen pari voi muodostua, jos metalli on kosketuksissa jalomman ei-metallisen sähköä johtavan materiaalin kanssa, esimerkiksi teräs on kosketuksissa grafiitin kanssa. (9, s. 109.)



Kuva 7. Eri metallien galvaaninen jännitesarja + 20 °C merivedessä, vertauspotentiaali Calomel-elektrodiin (9, s. 32).

Galvaanisen korroosion nopeuteen vaikuttaa seuraavat tekijät:

- Metallien potentiaaliero korroosio-olosuhteessa. Mitä suurempi on potentiaaliero, sitä todennäköisemmin on epäjalomman metallin syöpyminen. Potentiaaliero ei määrää korroosionopeutta, vaan katodi- ja anodipinnoilla tapahtuva reaktioiden muutos vaikuttaa korroosionopeuteen.
- Metallien pinta-alojen suhde. Mitä pienempi anodi on suhteessa katodiin, sen vaarallisempi korroosiotilanne syntyy. Esimerkiksi, jos niittauksessa käytetään epäjalompaa metallia niittiä, korroosioriski kasvaa.
- Elektrolyytin luonne ja sen johtavuus. Kun elektrolyytin johtavuus on suuri, epäjalompi materiaali syöpyy tasaisemmin koko pinta-alalla. Jos johtavuus on huono, korroosio keskittyy metallien rajapinnan läheisyyteen. (9, s. 110.)

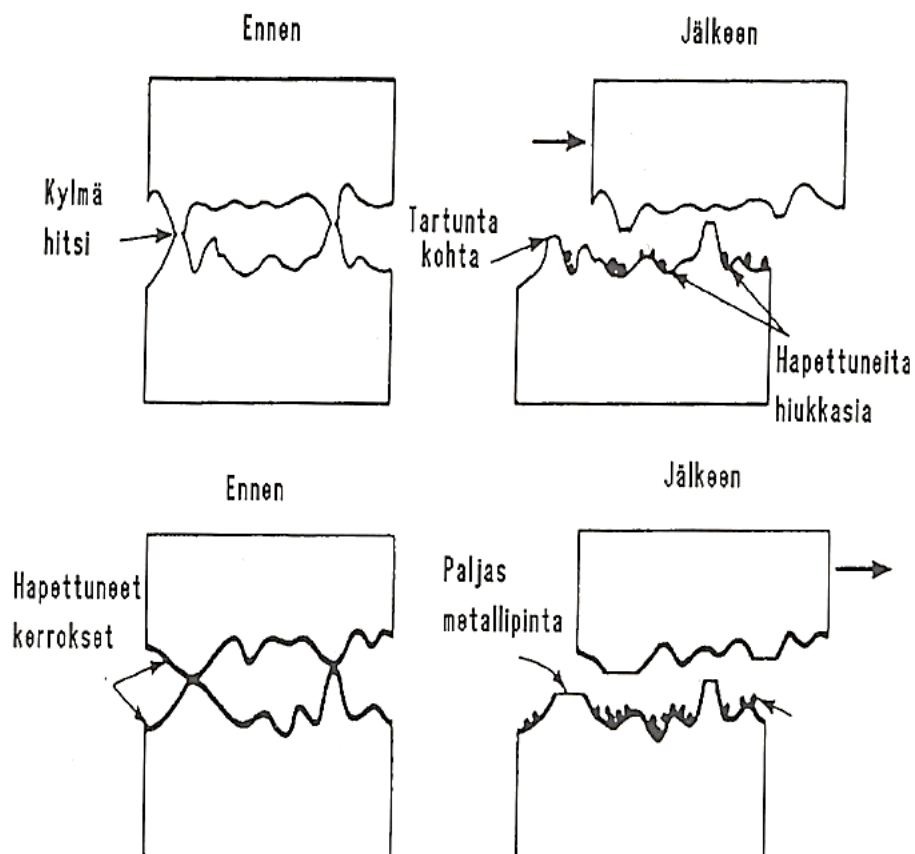
#### 4.4.5 Eroosio- ja kavitaatiokorroosio

Eroosiokorroosioilla tarkoitetaan, kun liuoksen virtausnopeuden kasvaa ja liuos voi rikkoa metallin pintaa sekä irrottaa suojaavia korroosiotuotekerroksia metallin pinnalta. Kavitaatiokorroosiossa on kyse nestevirtaukseen syntyneiden kaasukuplien luhistumisesta, jotka synnyttävät voimakkaita paineaaltoja. Paineaallot voivat rikkoa metallin pintaa suojaavan passivaatiokalvon tai muun korroosiota suojaavan kerroksen metallin pinnalta. (9, s. 110–112.)

#### 4.4.6 Hiertymäkorroosio

Hiertymiskorroosiota syntyy, kun kaksi toisissaan kiinni olevaa kappaletta pääsee värähdellessään liikkumaan. Korroosion mekanismeja ei ole täysin selvitetty ja on olemassa kaksi teoriaa korroosion synnystä. Toisen teorian mukaan kappaleiden huiput hitsaantuvat yhteen ja murtuvat liikkeen ansiosta. Jatkuvan liikkeen johdosta metallipartikkeleita irtoaa ja nämä pienet hiukkaset aiheuttavat hiertymiskulumista. Toisen teorian mukaan huippujen luontainen oksidikerros

murtuu muodostaen oksidipartikkeleita. Pinnan hapettuessa uudelleen kuluminen jatkuu. Kuvassa 8 esitetty hiertymiskorroosion periaate oletetuista mekanismeista. (9, s. 114.)



Kuva 8. Oletettu mekanismi, ylempänä kuluminen värinästä ja alempi kuvaa oksidikerroksen kulumista (9, s. 114).

#### 4.4.7 Raerajakorroosio

Metalliseosten raerajoille voi syntyä korroosion kestävyttä heikentäviä yhdisteitä jähmettymisestä, lämpökäsittelystä, hitsauksesta tai korkean lämpötilan käytöstä johtuen. Yleensä korroosion kestävyttä heikentävät epäpuhtaudet, seoksen rikastuminen tai köyhtyminen raerajapinnoilla. (9, s. 115.)



#### 4.4.8 Valikoiva liukeneminen

Valikoivalla liukenemisella tarkoitetaan, että metalliseoksen seosaineen tai mikrorakenteen nopeampaa liukenemistä ympärillä olevan seosaineen liukenemisnopeuteen. Tämä saattaa luoda metalliin sienimäisen reikiä täynnä olevan rakenteen. (9, s. 116.)

#### 4.4.9 Jännityskorroosio

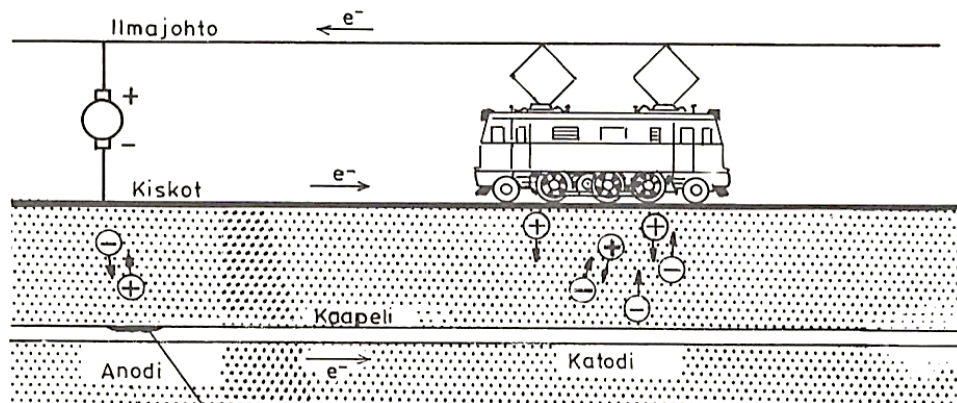
Jännityskorroosiossa metalliin muodostuu murtumia korroosion sekä pinnassa vaikuttavista vetovoimista johtuen. Jokaisella metallilla on spesifinen korroosioympäristö. Vetojännitys voi olla sekä ulkoista- että sisäistä kuormitusta tai jompaakumpaa. Ulkoisia kuormituksia voi olla staattinen kuorma, terminen mittamuutos, ruuviliitoksen kiristysvoima, paineesta, pyörimisliikkeen hitausvoimasta tai värähtelystä. Sisäisiä kuormituksia aiheuttavat esimerkiksi kylmämuokkaus, lastuaminen, leikkaus, lävistäminen, lämpökäsittely ja hitsaus. Erityisesti sisäiset jännitykset ovat vaarallisia, koska niiden suuruutta ei pysty ennustamaan ja ne ovat usein hyvin suuria. Erittäin vaaralliseksi tilanne muodostuu, kun sisäiset ja ulkoiset jännitykset vaikuttavat samaan aikaan. Happi ja muut voimakkaat happeattajat lisäävät korroosioherkkyyttä. (9, s. 117–119.)

#### 4.4.10 Korroosioväsyminen

Korroosioväsymistä ilmenee, kun kappale joutuu lämpötilamuutosten, värähtelyn tai suuntaa vaihtavien kuormitusten alaiseksi. Korroosioväsymystä ilmenee todennäköisemmin tilanteissa, jossa materiaali on altis muille paikallisen korroosion muodoille, esimerkiksi pistekorrosiolle. Korroosioväsymystä voi esiintyä tasaisen syöpymin johdosta tai hyvinkin pienessä korroosioympäristössä. Tällöin jännitysvaihtelut aiheuttavat materiaalin pinnassa passivaatiokerroksen rikkoutumisen ja/tai muodostavat epäjalomman pinnan muuhun pintaan nähden, joka anodisena syöpyy. (9, s. 119–120.)

#### 4.4.11 Hajavirtakorroosio

Hajavirtakorroosiota aiheuttavat sähkölaitteiden hajavirrat, joita voi muodostua tasavirtalähteiden lähistöllä. Hajavirta vuotaa maaperään ja hakeutuu maassa oleviin metalleihin. Hajavirtakorroosiota aiheuttavat esimerkiksi muuntajat, sähköjunien ja raitiotievaunujen raiteet, katodisesti suojatut putkistot, sähköradat ja kaapelit. (11, s. 21.) Kuvassa 9 on esitetty hajavirtakorroosion kaaviokuva sähköradalla.



Kuva 9. Hajavirtakorroosion kaaviokuva (9, s. 170).

#### 4.4.12 Muita korroosioesiintymiä

Edellä mainittujen lisäksi muitakin korroosimuotoja esimerkiksi korkean lämpötilan korrosio mutta niitä ei käsitellä tässä tutkimuksessa, koska ne eivät liity aiheellisesti tasavirtoihin.

#### 4.5 Suojautuminen korroosiolta

Korroosioestotekniikassa yritetään estää korroosioreaktion tapahtumaehtojen täyttyminen. Tämä voidaan toteuttaa pysäyttämällä liukenemisreaktio tai saattamalla se hallittuihin mittasuhteisiin. (12.)

## 4.5.1 Sähköinen suojautuminen

### 4.5.1.1 Katodinen suojaus

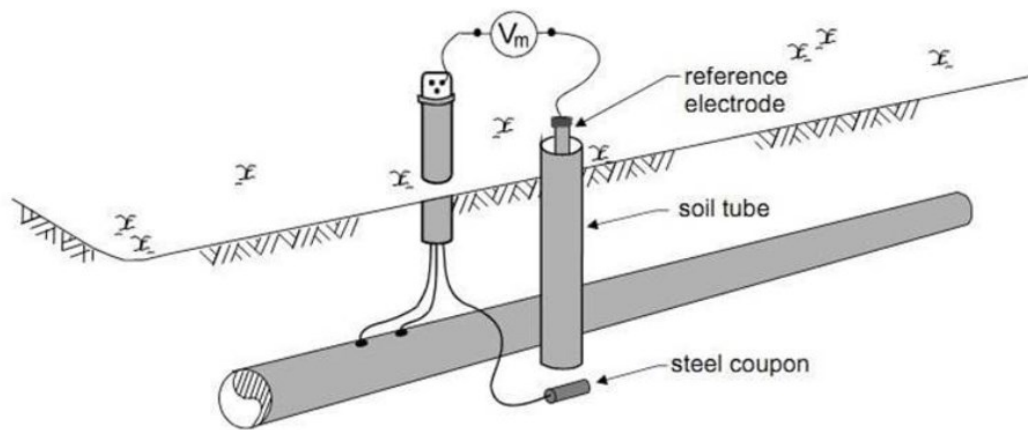
Katodisessa suojauksessa voidaan käyttää uhrautuvaa anodia tai korroosiovirtapiiri kumotaan muodostamalla vastakkaissuuntainen virta ulkoisen virtalähteen avulla (9, s. 796–798.)

Korroosioreaktiolle kulkee vastakkaissuuntainen virta, joka kumoaa korroosioreaktion aiheuttaman virran. Menetelmän nimi on tullut siitä, että suojattava rakenne toimii niin sanottuna katodina. Menetelmän toiminta perustuu sähkövirran kulkuun. Menetelmää voidaan käyttää maanalaisille rakenteille ja syövyttäviin nesteisiin. (9, s. 796–798.)

Katodista suojausta käytetään pinnoitteen kanssa antamaan lisäsuojaa pinnoitetulle metalliesineelle. Käyttämällä pinnoitteen kanssa menetelmää saavutetaan molempien menetelmien edut, koska katodinen suojaus hakeutuu itsestään pinnoitteessa esiintyviin virhe- ja vauriokohtiin. Pinnoite pienentää taas suojattavaa pinta-alaa eristämällä johtavan kerroksen sekä tarvittavaa sähkövirtaa. (9, s. 796–798.)

Uhrautuvat anodi menetelmällä käytetään hyväksi galvaanista korroosiota. Uhrautuvaksi anodiksi valitaan epäjalompi materiaali kuin suojattava on. Yleensä uhrautuvat materiaalit ovat sinkki-, alumiini- ja magnesiumseokset. (9, s. 796–798.)

Ulkoisen virtalähteen menetelmässä käytetään suojavirran tuottamiseen ulkoista virtalähdettä. Anodit valmistetaan suhteellisen jalosta materiaalista, jonka kautta syötetään suojavirta. Suojavirta voidaan säätää käsin tai automaattisesti. Automaattisesti säätävässä virtalähteessä on vertailuelektrodit, jotka ovat sijoitettu lähelle suojattavaa kohdetta. (9, s. 796–798.) Kuvassa 10 ulkoisen virtalähteen periaate.



Kuva 10. Ulkoisen virtalähteen käyttäminen katodisessa suojauksessa (13).

#### 4.5.1.2 Anodinen suojaus

Anodisella suojauksella pyritään muodostamaan metallin pinnalle passiivinen suojakerros. Anodisessa suojauksessa sähkövirran suunta on päinvastainen kuin katodisuojuksessa, koska anodisuojuksessa metallin pintaa pyritään lievästi syövyttämään. Syövyttämistä jatketaan, kunnes syöpymätuotteet muodostavat tiiviin kalvon metallin pintaan. Suojakalvo läpäisee huonosti sähkövirtaa, mistä johtuen virrantarve oleellisesti pienenee suojakalvon muodostumisen jälkeen. Menetelmän edellytyksenä on, että metalli pystyy passivoitumaan, eli metallin potentiaali saadaan muutettua potentiaali pH-piirrosten mukaisille passiivointialueille. (9, s. 798–799.)

#### 4.5.2 Mekaaninen suojautuminen

##### 4.5.2.1 Materiaalin valinta ja suunnittelu

Materiaalin valinnalla ja suunnittelulla pyritään poistamaan potentiaalierot eri rakenteiden väliltä sekä suunnittelemalla rakenne niin, ettei rakenteeseen kerry epäpuhtauksia tai kosteutta. Potentiaalieroja voidaan vähentää valitsemalla metallit, jotka ovat jännitesarjaltaan lähekkäin. Rakenteiden suunnittelu voidaan

huomioida niin, ettei lopputuotteeseen jää kuoppia tai muita korroosiolle alttiita kohtia. (9, s. 807–808.)

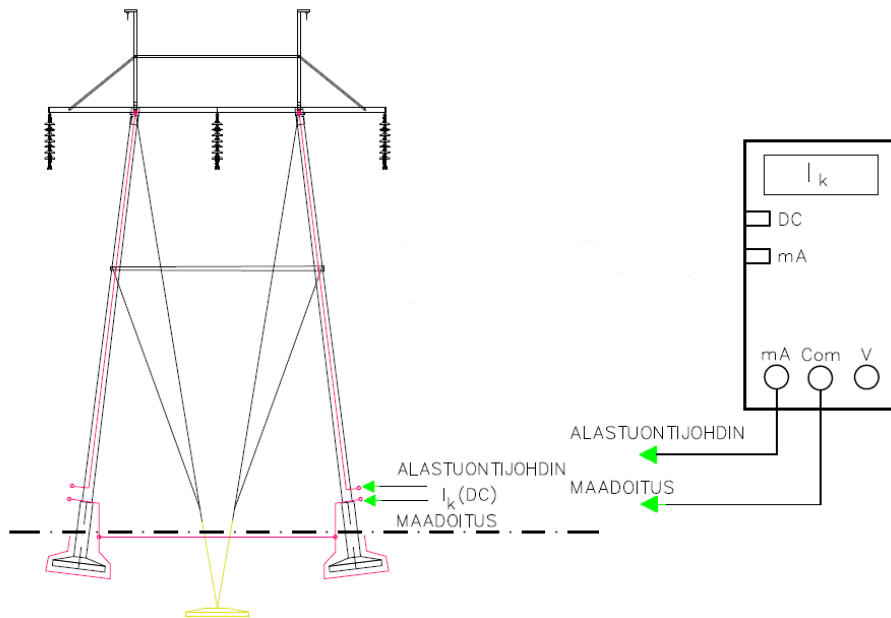
#### 4.5.2.2 Eristäminen ja pinnoitus

Korroosion muodostamista voi estää myös eristämis- tai pinnoitetekniikalla. Eristäminen voidaan toteuttaa esimerkiksi asentamalla sähköä eristävä kappale virtapiirin katkaisemiseksi. Tätä toimintatapaa on käytetty esimerkiksi voimajohdtopylväillä haruksiin asennettavalla eristyspalalla. (3, s. 39–40.)

Pinnoitusmenetelmiä on lukuisia kappaleen käyttötarkoituksen mukaan. Pinnoitus tehdään metallipinnoille myös monista eri syistä johtuen, korroosiosuojauksesta ulkonäköasioihin. (9. s. 568.)

## 5 Tehdyt mittaukset ja niiden tulokset

Tutkimustyössä tarkasteltiin vuosina 2019–2021 maadoitusmitattujen pylväiden 820 pylvään tasavirtamittaustuloksia, joiden tasavirta oli keskiarvollisesti -1,79 mA. Kuvasta 11 on nähtävissä, että negatiivinen tasavirta tarkoittaa, että tasavirta nousee maasta maadoituksen kautta perustuksiin, haruksiin tai ukkosjohtimiin. Maadoituksista perustuksiin, haruksiin tai ukkosjohtimen suuntaan olevan virran suuntaisia pylväitä oli mittauksissa 525 pylvästä, mitattujen tasavirtojen ollessa -3,11 mA. Pylvästä maadoituksiin tasavirran suunta oli 220 pylväällä ja mitatun tasavirran keskiarvo oli 0,75 mA. Pylväitä, joissa ei kulkenut virtaa kumpaankaan suuntaan, oli mittauksissa 75 pylvästä.



Kuva 11. Tasavirran mittauskytkentä (8, s. 19).

## 5.1 Maadoitusrakenteiden vaikutus

Tasavirtamittaustuloksissa maadoitusrakenteiden laajuudella tai sijainnilla ei tutkimuksessa havaittu yhteyttä. Maadoitusrakenteita ja -sijainteja tutkittiin maadoituspöytäkirjan karttamerkintöjen sekä tekomerkintöjen mukaisesti ja verrattiin näitä tasavirtamittauksiin. Myöskään potentiaalirohjauselektrodi ei ollut selkeää tasavirtaa kasvattava tai pienentävä tekijä. Korrelaatiota maadoitusrakenteiden laajuudella tai sijainnilla sekä näiden vaikutusta tasavirtaan ei voi todeta mittauksien perusteella.

## 5.2 Pylväsrakenteen ja -materiaalin vaikutus

Taulukon 5 mittaustuloksien keskiarvosta voi päätellä, että vapaasti seisovan tasavirrat ovat suurempia kuin harustetun puupylväiden.

Taulukko 5. Pylvästyypin ja materiaalin vaikutus tasavirtaan.

Pylvästyypin	Materiaali	+ merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)	- merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)
Vapaasti seisova	Teräs	3,01	-4,99
Harustettu	Teräs	1,48	-3,30
Harustettu	Puu	0,68	-2,85

## 5.3 Maaperän vaikutus tasavirtaan

Mittaustuloksista voi päätellä, että tasavirta korreloi maalajin mukaan. Tämä johtunee maaperän ominaisvastuksesta, joka vaikuttaa myös sähkökemiallisen reaktion elektrolyytin johtavuuteen. Taulukossa 6 mittauksien keskiarvot maalajien mukaan.

Taulukko 6. Mittaustuloksien keskiarvot maalajeissa.

Pylvästyypin	+ merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)	- merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)
Savi	3,19	-6,75
Saven sekainen hiekka	-	-4,85
Lieju, turve, multa	1,11	-2,19
Hiekka, hieta	1,37	-1,85
Moreenisora	0,99	-0,85
Harjusora	0,44	-1,26
Graniittikallio	0,02	-0,58

## 5.4 Alueellinen vaikutus

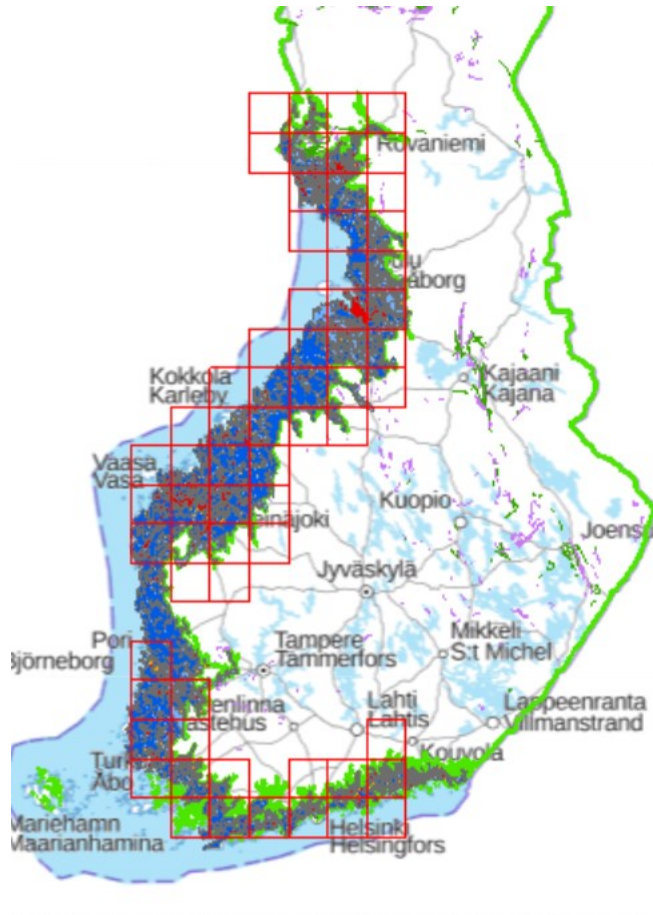
Tarkastelemalla alueellisesti tasavirran mittausarvoja, voidaan todeta, että länsi- ja eteläalueella olevien mittausten tulokset ovat keskiarvillisesti suuremmat kuin muilla alueilla. Taulukossa 7 on alueelliset keskiarvovertailut.

Taulukko 7. Alueelliset tasavirtamittausarvot.

	+ merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)	- merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)
Länsi	10,4	-6,46
Etelä	3,88	-5,21
Itä	0,27	-0,67
Sisämaa	1,31	-3,76

Länsi- ja eteläalueen mittaukset ovat suoritettu happamien sulfaattimaiden alueella. Maadoitusmittausten tasavirtakeskiarvojen perusteella voidaan päätellä, että happamien sulfaattimaiden alueilla tasavirta kasvaa. Happamat sulfaattialueet ovat pääosin rannikolla mutta myös sisämaassa esiintymiä on paikoitellen. Kuvassa 12 sinisellä happamien sulfaattimaiden esiintymät GTK-karttapalvelusta (14).





Kuva 12. Happamat sulfaattimaat kartalla (14).

## 5.5 Ulkoiset tekijät

Tutkimalla karttaluonnoksia, selityksiä sekä tasavirtamittaustuloksia, voidaan päätellä, että suurimmat tasavirtojen aiheuttajat ovat ulkopuolisia rakenteita. Isojen tasavirtojen aiheuttajana on usein vesijohto, maakaasulinjasto, rata tai vastaavat metalliset rakennelmat. Taulukosta 8 voi havainnoida, että kaupunkialueella olevien pylväiden tasavirrat ovat keskiarvoltaan suuremmat kuin haja-asutusalueella sijaitsevien pylväsmaadoitusten tasavirrat. Mittaustuloksien perusteella voi päätellä, että kaupunkien maanalaiset rakennelmat kasvattavat tasavirtoja sekä korroosioriskiä.

Taulukko 8. Kaupunki- ja haja-asutusalueen tasavirtojen keskiarvo.

	+ merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)	- merkkisten tasavirtojen keskiarvo (mA)
Kaupunki	5,62	-6,13
Haja-asutus	0,36	-2,14

## 6 Yhteenveto

Insinööriyön aiheena oli tutkia pylväsmaadoituselektrodeissa kulkevien tasavirtojen aiheuttajia sekä mahdollisia tasavirran häiritsevyyksiä.

Kupariset maadoituselektrodit toimivat katodina sekä maanalaiset teräsrakenteet toimivat anodina galvaanisessa korroosiparissa. Suomen ulkopuolella käytetään maadoitusmateriaalina myös terästä, jolloin maadoituksen ja maanalaisen teräsrakenteiden potentiaaliero on pieni ja näin ollen korroosioreaktiota ei synny. Suomessa maadoituselektrodien materiaalina käytetään lähes aina kuparia hyvän johtavuuden sekä sen oman korroosiokestävyyden takia. Yksittäisen järjestelmän kuparin korvaaminen ei poistaisi korroosioriskiä laajojen kuparisten maadoitusasennuksien esimerkiksi pienjännitemaadoitusten vuoksi ja kaikkien kuparisten maadoituselektrodien vaihtaminen olisi todella iso kustannus ja työ.

Tasavirtoihin vaikuttaa korroosioteorian mukaisesti useampi tekijä ja etenkin hajavirrat ovat vaikeasti selvitettävissä. Suurimmat tasavirrat johtuivat pääsääntöisesti maanalaisista putkista tai vastaavista rakenteista. Tähän vaikuttaa, että edellä mainituissa laitteistoissa on käytössä katodinen suojaus ja tasavirrat syntyvät ns. hajavirtoina. Yhteys maanalaisiin rakenteisiin havaittiin siinä, että DC-virrat olivat kaupunkialueella suurempia kuin haja-asutusalueella.

Tasavirrat ovat voimajohdon harusrakenteille vaarallisia galvaanisen korroosion sekä hajavirtakorroosion vuoksi. Nykyään lähes kaikki harusrakenteet ovat joko eristetty tai teräksisen harusvartaan on korvannut betoninen pilariharusankkuri.

Eristyspala on kustannustehokas tapa eristää vanhat rakenteet ja yleensä eristyspalan rikkoutumisen huomaa visuaalisella tarkastuksella. On myös mahdollista, että eristyksen rikkoutuminen on piilossa, jolloin eristyspalan ehjyys on varmimmin tarkastettavissa resistanssimittauksen avulla. Betoniset haruspilari-ankkurit asennetaan tyypillisesti rakennettaville uusille johdoille. Betonin ominaisresistanssi kuivana on lähes sama kuin kallion ominaisresistanssi ja silloin korroosioreaktio ei oletettavasti pääse tapahtumaan elektrolyytin puuttumisen vuoksi. Betonin ollessa kosteana, sen ominaisresistiivisyys muuttuu mulla, liejun ja turpeen ominaisresistiivisyyttä vastaavaksi ja korroosioreaktio on mahdollinen. Rakenteellisesti betonisen haruspilariankkurin sisällä on enemmän terästä kuin harusvartaan mutta ajan kanssa korroosioreaktio voi syövyttää betoni-raudat elementin sisältä. Tasavirtoihin vaikuttanee myös perustus- ja pylväsraakenteet. Mittaustuloksissa havaittiin DC virtojen kasvavan sitä suuremmaksi, mitä enemmän pylväsraakenteessa oli terästä. Vapaasti seisovilla pylväillä tasavirta kasvaa oletettavasti pylväsperustuksen muodostaessa korroosioparin maadoituselektrodin kanssa.

Mittaustuloksista voidaan myös todeta, että tasavirrat kasvavat, kun maan johtavuus kasvaa. Alueellisesti tasavirrat kasvoivat, mitä lähemmäs rannikkoa siirryttiin. Tähän saattaa vaikuttaa rannikkoalueella esiintyvät happamat sulfaattimaat.

Tutkimuksen perusteella tasavirtojen muodostumiseen vaikuttaa moni yksittäinen tekijä ja näin ollen tasavirtojen syitä ei voida luotettavasti todentaa maadoitusmittausten yhteydessä, vaan jokainen tasavirran syy on tutkittava tapauskohtaisesti.

## Lähteet

- 1 Eltel yrityksenä. 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.eltelnetworks.fi/Eltel/>> Luettu 18.2.2022.
- 2 Ylönen, Hannu. Ammattina voimajohdot. Lentojätkästä voimajohtoammatilaiseksi. 2015.
- 3 Imatran Voima Oy. T&K tiedotteita, harusten korroosio. 1987. Helsinki.
- 4 Leena Korpinen. Sähköturvallisuus. Verkkojulkaisu. <[http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/7sahkoturvallisuus.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/7sahkoturvallisuus.pdf)>. Luettu 20.2.2022.
- 5 Standardi SFS 6001:2018 5. Painos Suurjännitesähköasennukset
- 6 Eltel Networks Oy, sisäinen ohje J5.22, 110...400 kV johtojen pylväsmäadoitusten suunnittelu
- 7 Chauvin Arnoux, Maadoitusvastuksen mittaussopas, <[https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI\\_-Jordtag\\_webb.pdf](https://chauvin-arnoux.fi/wp-content/uploads/2014/09/FI_-Jordtag_webb.pdf)>. Luettu 20.2.2022.
- 8 Eltel Networks Oy, sisäinen ohje J8.21, Pylväsmäadoitusten resistanssimittaus ja maadoituselektrodin kunnan määrääaikaistarkastus
- 9 Korroosioyhdistys. Korroosio käsikirja. 1988. Hanko. Hangon kirjapaino Oy.
- 10 Peda. Metallin jalousjärjestys. Verkkojulkaisu. <<https://peda.net/p/Riikka-Kotiranta/k7uoc/V/20>>. Luettu 19.2.2022
- 11 VTT. Ruostumattoman teräksen käyttö maa- ja vesiraketmisessä <<https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/workingpapers/2006/W65.pdf>>. Luettu 28.2.2022.
- 12 Opetushallitus, <[http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f3\\_korroosionesto\\_estotekniikka.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f3_korroosionesto_estotekniikka.html)>. Luettu 27.2.2022.
- 13 Kuva katodisesta suojauksesta ulkoisella virtalähteellä. Verkkojulkaisu. <<https://www.corrosionpedia.com/2/3067/corrosion-prevention/cathodic-protection/practical-techniques-for-cathodic-protection-potential-measurement>>. Luettu 28.2.2022.
- 14 Kuva happamista sulfaattimaista GTK-karttapalvelu. Verkkoaineisto. <<https://gtkdata.gtk.fi/hasu/index.html>>. Luettu 1.3.2022.