



## Korroosion ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät

Tilaaaja: Tiehallinto  
Valtion ydinjätehuoltorahasto  
Ratahallintokeskus  
Helsingin kaupungin rakennusvirasto  
Espoon kaupunki  
Tampereen kaupunki  
Turun kaupunki



---

<b>Tilaaaja</b>	Tiehallinto, Siltatekniikka PL 33 00521 HELSINKI  Valtion ydinjätehuoltorahasto Kauppa- ja teollisuusministeriö PL 32 00023 VALTIONEUVOSTO  Ratahallintokeskus PL 185 00101 HELSINKI  Helsingin kaupungin rakennusvirasto PL 1515 00099 HELSINGIN KAUPUNKI  Espoo kaupunki, Tekninen keskus PL 4 02070 ESPOO  Tampereen kaupunki, Katu- ja vihertuotanto Viinikankatu 42 33800 TAMPERE  Turun kaupunki Ympäristö- ja kaavoitusosasto Linnankatu 31 20100 TURKU
<b>Tilaus</b>	Sop.nro OT9500-4/178/2000/20//85, 9.2.2006, TIEH Päätös ad7/2004/SAF, 10.3.2006 / VYR Tilausnro 266011, 10.2.2006 /RHK Tilausnumero 4580013397/27.2.2006 / Hki Dnro 998/241/2006, 20.2.2006 / Espoo Päätöspöytäkirja Ote Dno YPA: 1019/07/2006 / Tre Päätöspöytäkirja 15.3.2006, 3892-2006 (065) / Turku
<b>Yhteyshenkilö VTT:ssä</b>	<b>VTT</b> Erikoistutkija Pertti Pitkänen Lämpömiehenkuja 2, Espoo PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 6916, Faksi 020 722 7003 Sähköposti: <a href="mailto:pertti.pitkanen@vtt.fi">pertti.pitkanen@vtt.fi</a>

---

**Tehtävä**     **Korroosion ainettarikkomattomat tutkimusmenetelmät**

---

## TIIVISTELMÄ

Tutkimusraportissa on tarkasteltu kenttäolosuhteisiin soveltuvia raudoituksen korroosion ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Korroosion tutkimusmenetelmien tarve on ilmeinen, sillä siltojen betonirakenteiden ikääntyessä niiden vaurioiden määrä lisääntyy ja raudoituksen korroosio on yleisimpiä vaurioita. Korjaustarpeen ja oikean korjausajankohdan määrittäminen edellyttää, että sillan kunto tunnetaan mahdollisimman luotettavasti.

Tutkimusraportissa on tarkasteltu aluksi lyhyesti korroosion perusteita, korroosionopeuteen vaikuttavia tekijöitä ja halkeamien vaikutusta kloridien aiheuttamaan korroosioon. Koska raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen ilmiö, on luonnollista että tähän perustuvat mittausmenetelmät ovat tulleet käyttöön raudoituksen korroosiotilan arvioinnissa. Kenttäolosuhteisiin soveltuvat ainetta rikkomattomat mittausmenetelmät ovat potentiaalimittaus, betonin ominaisvastuksen mittaus ja korroosionopeuden mittaus. Mittausmenetelmistä on esitetty niiden perusteet, tarkasteltu tekijöitä joita on otettava huomioon mittausta tehtäessä, tulosten tulkintaa sekä mahdollisia virhelähteitä. Mittausmenetelmien osalta on tehty myös arviointia niiden soveltuvuudesta käytäntöön.

Mittausmenetelmistä korroosionopeuden mittaus antaa eniten tietoa raudoituksen tilasta. Korroosionopeuden mittauksen yhteydessä mitataan myös potentiaalit ja betonin ominaisvastus, mikä lisää raudoituksen tilasta saatavaa tietoa. Korroosionopeuden mittauksen yleistymistä haittaa mittalaitteiden kallis hinta. Potentiaalimittauksen avulla voidaan päätellä luotettavasti onko korroosio käynnissä vai ei. Korroosion nopeudesta voidaan tehdä ainoastaan karkeita arvioita. Betonin ominaisvastuksen mittausta ei erillisenä mittauksen kannata suorittaa, sillä sen tuloksista saatava hyöty on vähäinen.

Ainetta rikkomattomien mittausmenetelmien merkittävin hyöty on siinä, että niiden avulla voidaan tehdä päätelmiä korroosion käynnissä olosta ennen kuin rakenteen pinnassa on näkyviä merkkejä korroosiosta. Menetelmien heikkous on siinä, ettei mikään menetelmä anna luotettavaa tietoa todellisesta raudoituksen poikkileikkauksen tilasta.

---

## ABSTRACT

This research report reviews non-destructive inspection methods of reinforcement corrosion suitable on-site. The need for such testing methods is obvious, because of the simultaneous increase in age and damage of concrete bridges with reinforcement corrosion being one of the most common damage types. In order to define the need for repair and the right time for repair, the condition of the structure must be known as reliably as possible.

The research report first shortly studies the fundamentals of steel corrosion, factors affecting the corrosion rate and the effect of cracks on corrosion caused by chlorides. Because steel corrosion is an electrochemical phenomenon, it is therefore natural that the inspection methods based on electrochemistry are used when estimating corrosion conditions of reinforcement. The different inspection methods suitable on-site are potential mapping, concrete resistivity measurements and corrosion rate measurements. The report presents the basis of the corrosion inspection methods, factors that should take into account when corrosion measurements are made, assessment of the results and possible source of errors. Assessment is made about how suitable the inspection methods are in practice.

Comparing different inspection methods, the corrosion rate measurement gives the most information about the corrosion condition of the reinforcement because at the same time when the corrosion rate is measured, the potential and concrete resistivity is also measured. The increase in the ability to measure the corrosion rate hinders the high price of the measuring devices. Using potential measurements it is only possible to make a reliable assessment of whether corrosion has been initiated or not, while for the corrosion rate it is possible to make only rough estimations. There is no use in making the concrete resistivity measurement alone, as the benefit is so small.

The advantage of non-destructive corrosion inspection methods is that it is possible to make assessments of the corrosion condition without noting any visible signs on the surface of the structure. The weakness of the methods is that none of the methods give reliable information about the real condition of the reinforcement cross-section.

---

## SAMMANDRAG

I forskningsrapporten har granskats forskningsmetoder angående armeringskorrosionen med oförstörande provning som är lämpad för fältförhållanden. Behovet av forskningsmetoder är betydande emedan åldrande broar utsätts för allt större skador och korrosion är ett av de allmännaste. Reparationsbehovet och den rätta tidpunkten för detsamma förutsätter att brons tillstånd är möjligast pålitligt känt.

I forskningsrapporten har först granskats grunderna för korrosionen, faktorer som påverkar korrosionshastigheten och sprickornas betydelse vid korrosionsskador förvållade av klorider. Eftersom armeringskorrosion är ett elektrokemiskt fenomen, är det naturligt att mätningarna är baserade på detta vid bedömning av armeringskorrosionens tillstånd. Mätningar lämpade för fältförhållande enligt oförstörande provning, är potentialmätning, resistivitetmätning av betong samt mätning av korrosionens hastighet. Av mätmetoderna har grunderna för dessa presenterats, faktorer som bör iakttas vid mätning har granskats, tolkning av resultatet samt eventuella felkällor har även presenterats. För mätmetodernas del har även gjorts en uppskattning över deras lämplighet i praktiken.

Korrosionens hastighetsmätningen är den metod som ger mest information om armeringens tillstånd. I samband med mätningen av korrosionshastigheten mäts även potentialerna och resistivitet vilket ger mer information om armeringens tillstånd. När mätning av korrosionens hastighet har blivit allmännare är en nackdel mätinstrumentens höga pris. Med hjälp av potentialmätning kan man tillförlitligt bestämma om korrosionen har kommit igång eller inte. Om korrosionens hastighet kan endast göras grova uppskattningar. Mätning av betongens resistivitet, som enskild mätning, lönar det sig inte att utföra eftersom nyttan av resultatet är liten.

Den betydelsefullaste nyttan av oförstörande provning är den, att med hjälp av den kan dras slutsatser om korrosionen innan det syns märken av densamma på konstruktionens yta. Svagheten med metoderna ligger däri, att ingen metod ger tillförlitlig information angående det verkliga tillståndet hos armeringens tvärsnitt.

---

## ALKUSANAT

Raudoituksen korroosion tutkiminen ja korjaustarpeen määrittäminen on yksi vuoden 2004 - 2006 aikana VTT:ssä toteutetuista *Betoniteknillisiin siltatutkimuksiin* kuuluvista tutkimuksista. *Betoniteknilliset siltatutkimukset* on Tiehallinnon, Ratahallintokeskuksen, Helsingin kaupungin rakennusviraston, Valtion ydinjätehuoltorahaston (Säteilyturvakeskuksen), Espoon kaupungin teknisen keskuksen, Tampereen kaupungin katuyksikön ja Turun kaupungin ympäristö- ja kaavoitusosaston rahoittamaa jatkuvaa projektitoimintaa, joka koostuu useista osatutkimuksista.

---

## SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ .....	2
ABSTRACT .....	3
SAMMANDRAG .....	4
ALKUSANAT .....	5
1 YLEISTÄ .....	7
2 KORROOSION PERUSTEISTA .....	8
2.1 Betonissa olevan teräksen korroosio .....	8
2.2 Korroosionopeus .....	9
2.3 Halkeamien vaikutus kloridien aiheuttamaan korroosioon .....	12
3 KORROOSION MÄÄRITYSMENETELMISTÄ .....	15
4 SÄHKÖKEMIALLISET KORROOSION MÄÄRITYSMENETELMÄT .....	16
4.1 Potentiaalimittaus .....	16
4.1.1 Yleistä .....	16
4.1.2 Menetelmän periaate ja tuloksiin vaikuttavat tekijät .....	16
4.1.3 Mittauksen suoritus käytännössä .....	18
4.1.4 Tulosten tulkinta ja mahdollisia virhelähteitä .....	20
4.2 Ominaisvastuksen mittaus .....	22
4.2.1 Yleistä .....	22
4.2.2 Betonin ominaisvastukseen vaikuttavat tekijät .....	23
4.2.3 Ominaisvastuksen mittaus .....	24
4.2.4 Tulosten tulkinta ja mahdollisia virhelähteitä .....	26
4.3 Korroosionopeuden mittaus .....	27
4.3.1 Yleistä .....	27
4.3.2 Menetelmän periaate .....	27
4.3.3 Mittauksen suoritus käytännössä .....	30
4.3.4 Tulosten tulkinta ja mahdollisia virhelähteitä .....	31
4.4 Menetelmien arviointia .....	33
4.4.1 Olosuhteiden vaikutus mitattuihin tuloksiin .....	33
4.4.2 Menetelmien soveltuvuus käytännössä .....	36
5 YHTEENVETO .....	38
LÄHTEET .....	41

---

## 1 YLEISTÄ

Siltojen betonirakenteiden ikääntyessä niissä ilmenevien vaurioiden määrä kasvaa ja korjaustarve lisääntyy. Oikean korjausajankohdan ja korjaamistarpeen määrittäminen edellyttää, että rakenteen kunto tunnetaan mahdollisimman luotettavasti. Betonirakenteen kunnan tutkimisessa käytetään sekä ainetta rikkovia että ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Koska ainetta rikkova betonirakenteen kunnan tutkiminen on yleensä aina suuritöistä, ovat ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät suuren kiinnostuksen ja kehitystyön kohteena. Ainetta rikkomattomalta tutkimusmenetelmältä odotetaan että se on helppokäyttöinen, sillä laajojen alueiden tutkiminen voidaan tehdä nopeasti ja saadut tulokset ovat riittävän luotettavia johtopäätösten tekemistä varten.

Raudoituksen korroosio on yleisimpiä betonirakenteissa ilmeneviä vaurioita. Käynnissä oleva korroosio ilmenee rakenteen pinnassa ensin ruosteläikkinä, pitemmälle edenneenä raudoituksen suuntaisina halkeamina rakenteen pinnassa ja lopulta betonipeitteen lohkeiluna. Jos rakenteen pinnassa ei ole ulkoisia merkkejä raudoituksen korroosioista, on raudoituksen tilan määrittäminen tehty yleensä rakenteesta valituista kohdista epäsuorasti tutkimalla raudoitusta ympäröivän betonin tila, pääasiassa karbonatisoitumissyvyys ja kloridipitoisuus eri syvyyksillä betonista irrotetuista näytteistä. Kun raudoituksen asema tunnetaan, karbonatisoitumissyvyyden ja betonin kloridipitoisuuden perusteella on arvioitu raudoituksen korroosion mahdollista käynnissäoloa tai odotettavissa olevaa käynnistymisajankohtaa. Tarvittaessa on raudoitusta piikattu esille ja raudoituksen kunto on tarkastettu silmämääräisesti. Esitetty menettely on yleensä hidaskäyttöinen ja suuritöinen. Luotettavien johtopäätösten tekemistä varten näytteitä on irrotettava riittävästi ja näytteiden irrotuspaikkojen ja raudoituksen piikkauskohtien valinta edellyttää kokemusta.

Koska raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen prosessi, on luonnollista että tähän perustuvat mittaamenetelmät ovat tulleet käyttöön raudoituksen korroosiotilan arvioinnissa. Yleisimmin käytössä olevat ja kenttäolosuhteisiin soveltuvat mittaamenetelmät ovat potentiaalimittaus, betonin vastuksen mittaus ja korroosionopeuden mittaus. Näistä potentiaalimittauksista on käytetty sen rajoituksista huolimatta pitkään. Viime aikoina erityisesti korroosionopeuden mittaus on kehittynyt ja mittauksen suorittamista varten on tullut kaupallisia laitteita. Korroosionopeuden mittauksella saadaan tällä hetkellä käytettävistä menetelmistä luotettavin kuva raudoituksen korroosiotilasta. Menetelmien avulla on mahdollista tehdä päätelmiä korroosion käynnissäolosta ennen kuin rakenteen pinnassa on näkyviä merkkejä korroosioista. Kullakin mittaamenetelmällä on kuitenkin omat rajoituksensa jotka mittauksen suorittajan on tunnettava. Mm. sääolosuhteet mittaushetkellä ja betonin kosteus-tila vaikuttavat tuloksiin, mikä on otettava huomioon tuloksia tulkittaessa. Tulosten tulkinta edellyttää kokemusta eikä ole aina yksiselitteistä.

Tässä raportissa tarkastellaan aluksi lyhyesti betonissa olevan raudoituksen korroosion perusteita, korroosionopeuteen vaikuttavia tekijöitä ja halkeamien vaikutusta kloridien aiheuttamaan korroosioon. Lopuksi on tarkasteltu korroosion arviointiin kenttäolosuhteissa käytettäviä sähköisiä mittaamenetelmiä, niiden soveltuvuutta ja rajoituksia sekä mittaustulosten tulkintaa.



---

## 2 KORROOSION PERUSTEISTA

### 2.1 Betonissa olevan teräksen korroosio

Seuraavassa on esitetty lyhyesti betonissa olevan teräksen korroosion perusteet. Tarkemmin betonissa olevan teräksen korroosiota on käsitelty useissa ”Betonitekniisiin siltatutkimuksiin” kuuluneissa osatutkimuksissa.

Betoni antaa sisässään olevalle teräkselle sekä fysikaalisen ja kemiallisen suojan. Fysikaalinen suoja estää korroosiolle välttämättömien aineiden tai korroosiota edistävien aineiden pääsyn teräksen läheisyyteen. Korroosiolle välttämättömiä aineita ovat vesi ja happi, korroosiota edistäviä aineita betonisilloissa lähinnä kloridit.

Betonin kemiallinen suojavaikutus johtuu betonin emäksisyydestä ja teräksen ominaisuudesta muodostaa emäksisessä ympäristössä pinnalleen tiivis rautaoksidien muodostama passiivikalvo. Tiiviillä passiivikalvolla on erittäin korkea polarisaatiovastus, minkä johdosta teräksen korroosionopeus on olematon.

Betonissa olevan teräksen korroosion käynnistymisen ja etenemisen edellytykset ovat /3/:

- passiivikalvon on rikkouduttava
- teräksen pinnalla on oltava potentiaalieroja
- elektrolyytin on ympäröitävä terästä
- teräksen ympäristössä on oltava happea ja vettä (kosteutta).

Potentiaalieroja (anodi- ja katodialueita) muodostuu terästangon pinnalle aina, sillä sen pinnalla esiintyy paikallisia jännitysvaihteluja ja olosuhteet sekä teräksen koostumus tangon pinnalla vaihtelevat paikallisesti. Vaihtelujen johdosta toiset alueet ovat kemiallisesti aktiivisempia kuin toiset.

Korroosio voi alkaa kun passiivikalvo rikkoutuu betonin emäksisyyden laskiessa karbonatisoitumisen johdosta tai kloridien tunkeutuessa betoniin ja kloridipitoisuuden noustessa ns. kynnyksarvon yläpuolelle teräksen läheisyydessä.

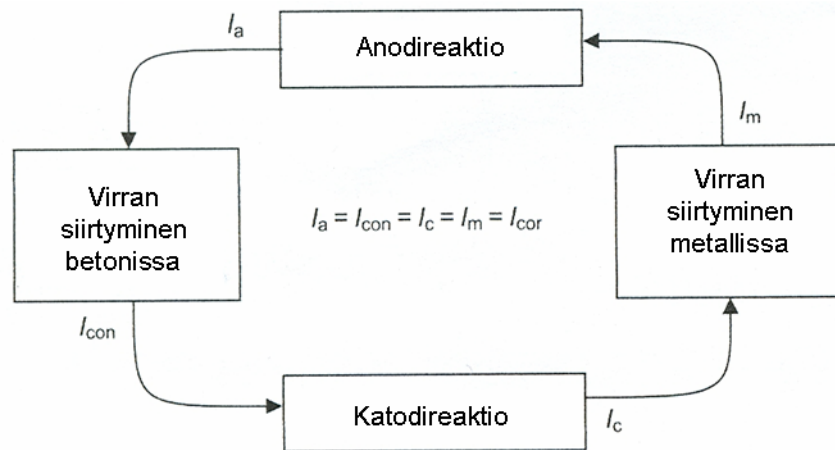
Passiivikalvon rikkouduttua teräksen pintaan muodostuu syöpyvä kohta. Syöpyvä kohta toimii anodina ja tässä kohdassa tapahtuvaa reaktiota kutsutaan anodireaktioksi. Lähellä oleva syöpymätön kohta muodostaa katodin. Betonin huokosissa oleva kosteus yhdistää anodin ja katodin ja muodostaa mikropiirin. Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva betonissa olevan teräksen korroosion sähkökemiallisesta mekanismista /3/.

Korroosioprosessi voidaan yhteenvetomaisesti esittää seuraavalla reaktiolla /3/:

Teräs + happi + vesi → korroosiotuotteet.

Todellisuudessa tämä sähkökemiallinen reaktio muodostuu seuraavista neljästä osaprosessista:

- Teräksen hapettuminen (anodireaktio), jolloin vapautuu metallielektroneja ja muodostuu rautaioneja, joiden hydrolyysi tuottaa happea.
- Hapen pelkistyminen (katodireaktio), joka kuluttaa nämä elektronit ja tuottaa alkalisuutta.
- Anodilla syntyneiden elektronien kulkeutuminen teräksessä katodille.
- Hydroksyyli-ionien kulkeutuminen betonin huokosissa katodilta anodille (edellyttää kosteutta betonissa).



Kuva 1. Periaatekuva betonissa olevan teräksen korroosion sähkökemiallisesta mekanismista /3/.

Edellä mainitut neljä osaprosessia tapahtuvat samalla nopeudella. Korroosionopeuden määrää mainituista osaprosesseista hitain.

Koska raudoituksen sähköinen vastus on mitätön verrattuna betonin vastukseen, ei tämä rajoita koskaan korroosion nopeutta. Siksi kolme muuta osaprosessia määräävät korroosion nopeuden. Korroosion nopeus on olematon, jos jokin seuraavista kolmesta ehdosta on voimassa:

- Anodireaktio on hidas raudoituksen ollessa passiivitilassa, betoni ei ole karbonatisoitunut eikä sisällä klorideja.
- Katodireaktio on hidas hapen pääsyn raudoituksen pintaan ollessa hidasta, betoni on esim. veden kyllästämä.
- Betonin ominaisvastus on suuri, ts. betoni on kuivassa tilassa tai sen suhteellinen kosteus on alhainen.

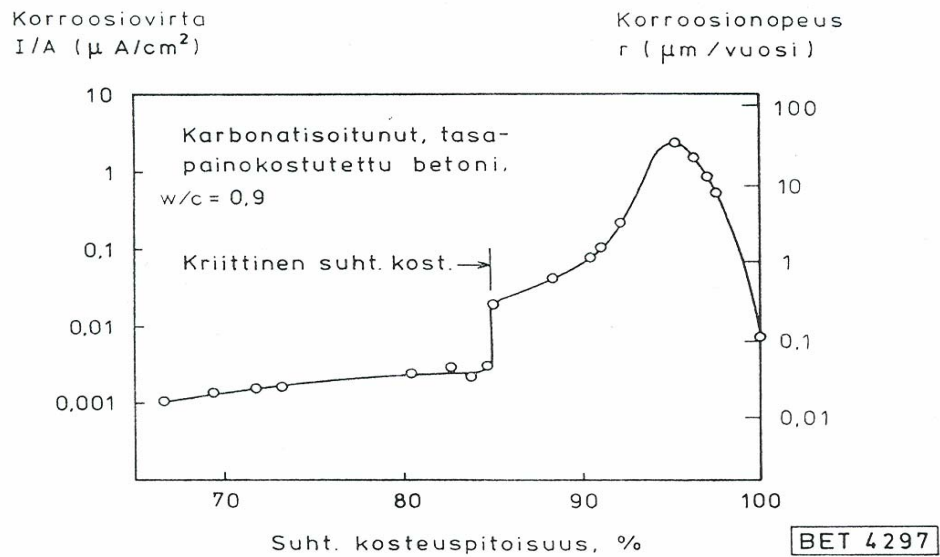
Betonin karbonatisoituminen tai kloridien tunkeutuminen raudoituksen tasalle aiheuttavat passiivikerroksen tuhoutumisen. Betonin karbonatisoituminen rikkoo suojakerroksen kokonaan laajalta alueelta. Tämän johdosta karbonatisoitumisen aiheuttama korrosio esiintyy yleensä koko sillä alueella missä raudotus on kontaktissa karbonatisoituneeseen betoniin, puhutaan yleiskorroosiosta.

Kloridit sitä vastoin rikkovat suojakerroksen tavallisesti paikallisesti. Kloridien aiheuttama korrosio on siksi yleensä paikallista, puhutaan paikalliskorroosiosta. Jos klorideja on huomattava määrä, voi passiivikerros tuhoutua laajalta alueelta ja korrosio on tällöin luonteeltaan yleistä.

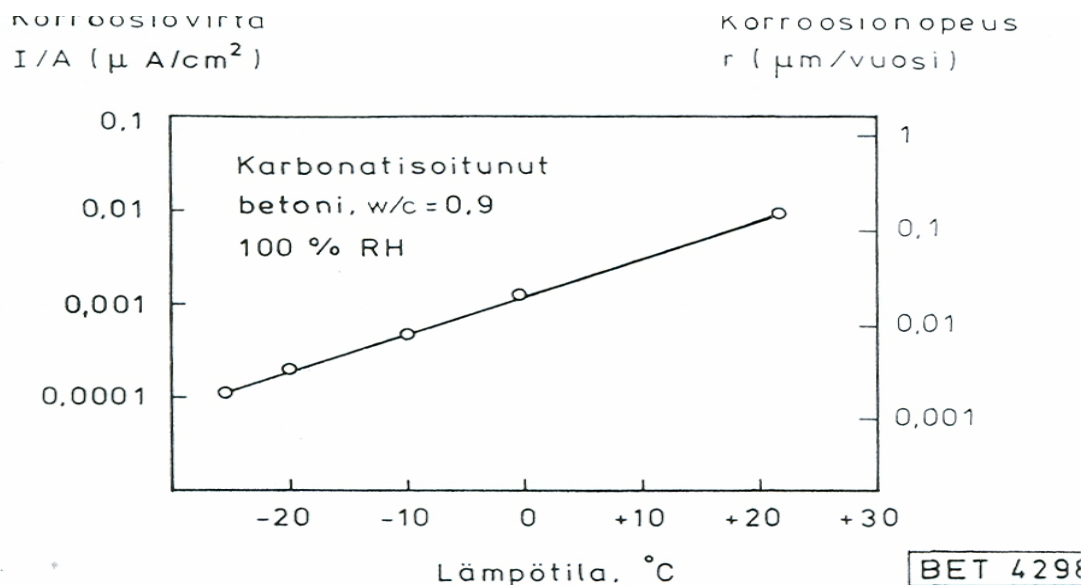
Koska teräksen johtavuus on erittäin suuri, virran voimakkuus kuvassa 1 olevassa virtapiirissä riippuu betonin johtavuudesta lähellä teräksen pintaa olevassa kerroksessa. Tällä elektronien "rikastamalla" (runsasti elektroneja sisältävä) kerroksella on voimakas polarisaatio ominaisuus, kuten suuri kapasitanssi. Tämä polarisaatio ominaisuus muodostaa perustan korroosionopeuden sähkökemiallisille mittaus-tekniikoille /12/.

## 2.2 Korroosionopeus

Korroosion käynnistyttyä sen nopeus riippuu merkittävästi betonin suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta. Mainitut tekijät on otettava huomioon suoritettaessa mittauksia ulko-olosuhteissa ja arvioitaessa tuloksia. Kuvissa 2 ja 3 on esitetty, kuinka korroosiovirta ja korroosionopeus riippuvat ilman suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta /16/.



Kuva 2. Korroosiovirta ja korroosionopeus ilman suhteellisen kosteuden funktiona /16/.



Kuva 3. Korroosiovirta ja korroosionopeus lämpötilan funktiona /16/.

Korroosiovirta ja korroosionopeus saavuttavat suurimman arvonsa ilman suhteellisen kosteuspitoisuuden ollessa noin 95 % RH. Tämä johtuu siitä, että korroosionopeus riippuu toisaalta hapen kulkunopeudesta betonin läpi ja toisaalta betonin vastuksesta. Betonin vastus pienenee kosteuspitoisuuden kasvaessa, mikä johtaa korroosionopeuden (ja korroosiovirran) kasvuun. Toisaalta hapen diffuusio alkaa kuitenkin nopeasti pienentyä suhteellisen kosteuden lähestyessä 100 %, jolloin korroosionopeus (ja korroosiovirta) pienenee.

Kuvasta 3 nähdään, että korroosionopeus kasvaa noin 10 -kertaiseksi lämpötilan noustessa noin 20°C.

Korroosionopeus ei riipu merkittävästi betonin vesi-sementtisuhteesta. Sementtilaatu vaikuttaa korroosionopeuteen jonkin verran. Jos korrosio on alkanut kloridien johdosta, on korroosionopeus huomattavasti suurempi kuin jos karbonatisoituminen on korroosion aiheuttaja.

Kun puhutaan betonissa olevan raudoituksen korroosionopeudesta, on erotettava toisistaan hetkellinen korroosionopeus ja keskimääräinen korroosionopeus /3/.

Hetkellinen korroosionopeus on sähkökemiallisia menetelmiä, lähinnä polarisaatiovastusmittausta käyttäen määritetty nopeus. Mittaamalla määritettyyn korroosionopeuteen vaikuttavat mittaushetkellä vallitsevat olosuhteet kuten lämpötila ja kosteus. Koska korroosionopeus on hetkellinen arvo, on tämä otettava huomioon verrattaessa tuloksia muina ajankohtina tehtyihin mittausten tuloksiin ja arvioitaessa yleensä korroosiota.

Keskimääräinen korroosionopeus on nk. ”insinöörin arvo”, jota tarvitaan ja käytetään arvioitaessa rakenteen vaurioiden etenemisnopeutta sekä käyttöikäkalkelmien paikkansapitävyyttä. Keskimääräinen korroosionopeus voidaan määrittää keskimääräisenä arvona pitkän ajan kuluessa painon häviön perusteella laboratorioissa tai poikkileikkauksen häviönä kentällä. Jos korroosion käynnistymisajankohtaa ei tunneta, keskimääräisen korroosionopeuden määrittäminen on vaikeaa. Lisäksi todellisessa rakenteessa muuttuvat ulkoiset olosuhteet aiheuttavat vaihtelevia korroosionopeuksia.

Korroosionopeus ilmoitetaan varsinkin laboratorioissa tehtävien kokeiden yhteydessä käyttäen sähkökemiallisia yksiköitä ( $\text{mA}/\text{m}^2$  tai  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ). Käytännön insinöörin näkökulmasta on parempi ilmoittaa korroosionopeus poikkileikkauksen syöpymisnopeutena, jonka yksikkö on yleensä  $\mu\text{m}/\text{v}$ . Korroosiovirran ja syöpymissyvyyden välisen riippuvuuden ilmoittaa Faradayn laki.

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{M}{zF\rho} i_{\text{corr}} \quad (1)$$

missä

x	on syöpymissyvyys
M	molekyyliainepaino (teräs 56 g)
z	ionien varausnumero (teräksellä 2)
F	Faradayn vakio
$\rho$	tiheys (teräksellä $7,85 \text{ g}/\text{cm}^3$ )
$i_{\text{corr}}$	korroosiovirran tiheys (usein $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).

Teräksen ollessa kysymyksessä  $1 \text{ mA}/\text{m}^2$  tai  $10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  vastaa massahävikkiä  $90 \text{ g}/\text{m}^2$  vuotta kohti ja syöpymissyvyyttä  $11,7 \mu\text{m}/\text{v}$ .

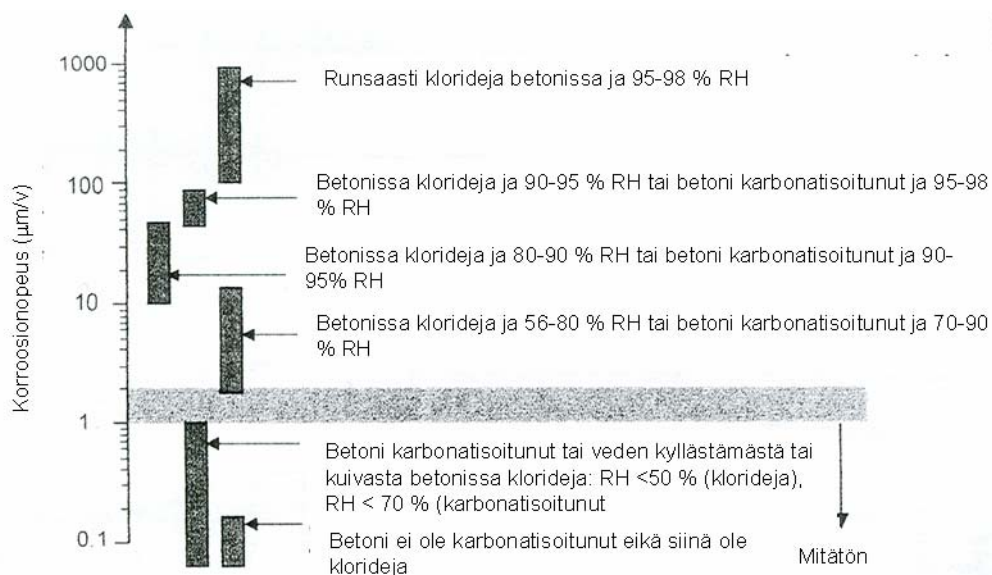
Korroosionopeuden arvostelemista varten on lähteessä /3/ annettu taulukossa 1 esitetyt arvot.

Taulukko 1. Korroosion arvostelu syöpymisnopeuden perusteella /3/.

Arvostelu	Korroosionopeus $\mu\text{m}/\text{v}$
Olematon	< 2
Pieni	2 - 5
Kohtuullinen	5 - 10
Keskimääräinen	10 - 50
Suuri	50 - 100
Erittäin suuri	> 100

Normaali ilmatilassa olevilla rakenteilla korroosionopeuden voidaan olettaa olevan 10-15  $\mu\text{m}$  vuodessa, jos korrosio on alkanut karbonatisoitumisen johdosta. Kloridien vaikutuksesta alkanut korrosio etenee noin 25-50  $\mu\text{m}$  vuodessa /3/.

Kuvassa 4 on esitetty tyypillisiä korroosionopeuksia kun betonissa on klorideja tai raudoitus on karbonatisoituneessa betonissa ja ympäristön suhteellinen kosteus (RH) vaihtelee.



Kuva 4. Kaavamainen esitys teräksen korroosionopeuksista kun betonissa on klorideja tai raudoitus on karbonatisoituneessa betonissa ja ympäristön suhteellinen kosteus (RH) vaihtelee /3/.

### 2.3 Halkeamien vaikutus kloridien aiheuttamaan korroosioon

Halkeamilla on betoniterästen korroosion kannalta seuraavat kolme erityisvaikutusta /11/:

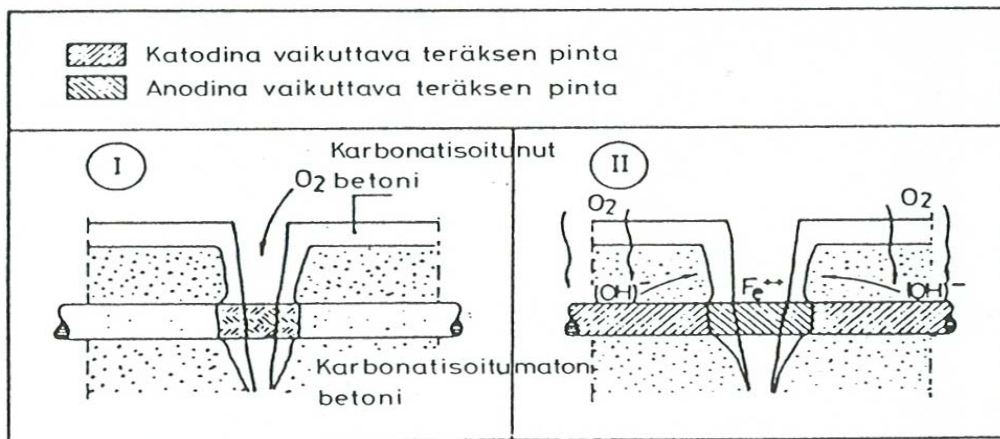
- Hiilidioksidin ja kloridien pääsy raudoitteiden tasolle helpottuu, jolloin korroosion aktivoituminen voi tapahtua aikaisemmin kuin ehjän betonin kohdalla.
- Halkeamat helpottavat korroosion kannalta välttämättömien aineiden, kuten hapen ja veden kulkeutumisesta korroosioalueelle, jolloin korrosio nopeutuu.

- Halkeamat aiheuttavat merkittävän epäjatkuvuuskohdan teräksiä ympäröivälle kemialliselle ja fysikaaliselle ympäristölle, jolloin rakenteessa vallitsee sellaiset olosuhteet, joissa voimakas teräksen pistemäinen korrosio on mahdollista ja myös todennäköistä.

Halkeamaleveyden ollessa 0,2 – 0,3 mm ja betonipeitteen paksuuden 25 – 35 mm on koetulosten perusteella todettu, että raudoituksen pinnan passiivisuuden häviäminen on mahdollista jo alle kahdessa vuodessa /9/.

Poikittaishalkeaman (< 0,5 mm) ympäristössä tulevat kysymykseen seuraavat korroosiomekanismit (kuva 5):

- Passiivisuutensa menettäneen teräksen pinnassa halkeamassa korrosio etenee kuten suojaamattoman teräksen pinnassa. Katodina ja anodina vaikuttavat pinnan osat ovat halkeamassa vierekkäin ja hapen kulkeutuminen tapahtuu halkeaman kautta.
- Passiivisuutensa menettänyt teräksen pinta halkeamassa toimii anodina ja passiivinen teräksen pinta halkeaman molemmilla puolin katodina. Hapen diffuusio katodille tapahtuu halkeamattomassa betonissa halkeaman molemmilta puolilta.



Kuva 5. Korroosiomekanismit poikittaishalkeamassa /9/.

Ensimmäisessä korroosiomekanismissa korroosionopeus pienenee korroosion edetessä, koska katodin ala on pieni ja korroosiotuotteet jäävät halkeamaan hidastaen ja estäen korroosion etenemistä. Tämän johdosta toista korroosiomekanismia pidetään määrävänä poikittaishalkeamassa.

Toisessa korroosiomekanismissa korroosionopeus riippuu hapen kulkeutumisen nopeudesta betonipeitteen läpi ja betonin ominaisvastuksesta. Mitä paremmin betonipeite estää hapen kulkeutumisen ja mitä suurempi on betonipeitteen ominaisvastus, sitä pienempi on korroosionopeus.

Hapen kulkeutumisen nopeuteen vaikuttavat betonipeitteen paksuus, huokoisuus (vesi-sementtisuhde) ja ympäristöolosuhteet, erityisesti suhteellinen kosteus. Betonin ominaisvastukseen vaikuttaa merkittävästi betonin kosteuspitoisuus.

Pitkittäishalkeamassa (pituussuuntaisessa halkeamassa) korroosiomekanismit ovat periaatteessa samat kuin poikittaishalkeamassa. Niiden toiminnassa on kuitenkin eroja.

Ensimmäisessä korroosiomekanismissa on pitkittäishalkeamassa toimivien pintaosien ala huomattavasti suurempi kuin poikittaishalkeamassa. Siksi pitkittäishalkeamassa korroosion hidastuminen on vähäisempää ja pysähtyminen epätodennäköisempää kuin poikittaishalkeamassa. Korroosion hidastumisen edellytyksenä on, että betonipeite kestää lohkeamatta korroosiotuotteiden aiheuttaman paineen.

Pitkittäishalkeamassa toinen korroosiomekanismi tulee kysymykseen tankojen risteyskohdassa, jossa halkeaman suunnassa kulkeva tanko on sähköisesti kontaktissa halkeaman poikki kulkevan tangon kanssa. Muilta osin korroosiomekanismi ja sen toiminta on vastaava kuin poikittaishalkeaman ollessa kysymyksessä.

Raudoituksen korroosion kannalta betonipeitteeseen syntyvillä halkeamilla ja niiden leveydellä on merkittävä vaikutus. Halkeamat nopeuttavat korroosiota edistävien ja korroosion kannalta välttämättömien aineiden tunkeutumista betoniin ja raudoituksen pintaan.

Korroosion käynnistymiseen ja etenemiseen halkeilleessa betonissa vaikuttavat mm.

- halkeaman koko ja liike
- betonipeitteen paksuus ja laatu
- johtuuko korroosio halkeaman karbonatisoitumisesta vai kloridien tunkeutumisesta halkeamaan
- onko raudoitus halkeamaan nähden poikittain vai pituussuuntaisesti
- ympäristöolosuhteet ja
- halkeamien mahdollinen itsetiivistyminen.

Edellä mainittuja tekijöitä tarkasteltaessa on otettava huomioon myös mainittujen tekijöiden yhteisvaikutus, joka voi aiheuttaa huomattavia vaihteluja korroosionopeudessa.

Halkeaman leveydestä puhuttaessa tarkastellaan näkyvää rakenteen pinnassa olevaa halkeamaa. Pinnassa näkyvä halkeama ei aina etene rakenteessa yhtenäisenä raudoitteiden tasalle, vaan halkeama voi olla jakautunut betonipeitteessä useampiin pienempiin halkeamiin, jotka yhdessä muodostavat verkoston, jota pitkin haitalliset aineet pääsevät tunkeutumaan helpommin raudoituksen tasalle kuin ehjässä betonissa. Kuitenkin yleensä aina halkeaman leveys raudoituksen pinnalla on huomattavasti pienempi kuin rakenteen pinnalla oleva näkyvä halkeama.

Raudoituksen korroosion kannalta kriittisen halkeamaleveyden määrittäminen on vaikeaa. Tavallisimmin kriittisen halkeamaleveyden rajat on asetettu eri maiden normeissa välille 0,1-0,4 mm rasitusolosuhteista ja rakenteen raudoituksen laadusta riippuen.

Betonissa olevat halkeamat nopeuttavat kloridien tunkeutumista ja alentavat kloridikorroosion käynnistymisen kynnsarvoa. Käynnistymisen kynnsarvoon vaikuttavat halkeamien leveys, olosuhteet ja betonipeitteen paksuus.

Kun teräksen korroosion aiheuttajana on kloridien tunkeutuminen raudoituksen tasalle halkeaman kautta, pidetään korroosion alkamisajankohtana yleensä sitä hetkeä, jolloin halkeamakohta joutuu ensi kerran kosketuksiin kloridien kanssa. Tämä johtuu siitä, kloridien tunkeutuminen raudoituksen tasalle on hyvin nopeaa.

Pettersonin tutkimusten mukaan vedessä olevassa halkeilleessa korkealuokkaisessa betonissa (betonipeite 30 mm, vesi-sideainesuhde 0,30 ja halkeamaleveys 0,4 mm) kloridikorroosion kynnsarvo alenee ainoas-

taan vähän verrattuna halkeamattomaan betoniin. Toisaalta saman betonin ollessa kysymyksessä, ulko-olosuhteissa kynnysarvo putosi lähelle nolaa /4/.

Laajojen kentällä ja laboratoriossa halkeilleilla normaalilujuuksilla betoneilla (vesi-sideainesuhte 0,50-0,70) Venäjällä ja Saksassa tehtyjen tutkimusten tulosten perusteella halkeamaleveyteen 0,3 mm saakka ulko-olosuhteissa oli vähäinen vaikutus syöpymissyvyyksiin pitkän ajan kuluessa. Veden alla olevassa betonissa halkeamien seurauksena korroosio alkaa aikaisemmin. Korroosion alkaessa sen nopeus oli suuri, mutta nopeus pieneni nopeasti ja lähestyi ehjän betonin korroosionopeutta /4/.

Halkeamien vaikutusta kynnysarvoon ja korroosionopeuteen on tarkasteltu lähteessä /9/ ja pääjohtopäätökset ovat seuraavat.

Halkeamassa tapahtuvan kloridien aiheuttaman korroosion etenemiseen vaikuttaa merkittävästi betonipeitteen paksuun ja huokoisuus (betonin tiiviys). Mikäli betonipeitteen paksuus ja tiiviys ovat riittäviä antamaan pitkäaikaisen suojan halkeamattomassa betonissa kloridien aiheuttamaa korroosiota vastaan, on vastaavissa olosuhteissa samassa betonipeitteessä olevassa poikittaishalkeamassa aina halkeamaleveyteen 0,4 mm saakka odotettavissa ainoastaan pintaruostumista.

Mikäli betonipeite ei ole riittävän paksu ja tiivis, on halkeamattomassa betonissa odotettavissa voimakasta korroosiota. Halkeamassa korroosio ilmenee ainoastaan aikaisemmin.

Pitkittäishalkeamassa kloridien aiheuttama korroosio alkaa aikaisemmin ja korroosionopeus on suurempi kuin poikittaishalkeamassa. Raudoitustangon suuntaisessa pitkittäishalkeamassa kloridien aiheuttama korroosio on yleensä aina nopeaa.

Poikittaishalkeamassa käynnistyneen kloridien aiheuttaman korroosion huomattava hidastuminen tai joskus lähes pysähtyminen johtuu halkeaman itsetiivistymisestä ja halkeaman täyttymisestä korroosiotuotteista, jolloin kloridien ja hapen pääsy raudoitukseen vaikeutuu. Edellytyksenä ovat halkeamakoon lisäksi edellä mainitut riittävän paksu ja tiivis betonipeite. Koska todellisuudessa varsinkin vanhoissa betonisilloissa mainitut ehdot ovat harvoin voimassa, on halkeamassa tapahtuvaan kloridien aiheuttamaan korroosioon suhtauduttava varovaisuudella.

### **3 KORROOSION MÄÄRITYSMENETELMISTÄ**

Betoniterästen korroosion arvioimiseen käytetyt mittausmenetelmät voidaan jakaa kolmeen ryhmään /17/:

1. Menetelmät, jotka arvioivat raudoitusta suojaavan betonipeitteen tilaa ja suojauskykyä.
2. Menetelmät, joilla arvioidaan teräs-betoni yhdistelmän sähköisiä tai sähkökemiallisia ominaisuuksia.
3. Menetelmät, joilla arvioidaan korroosion aste tai määrä tai rakenteen tila korroosion johdosta.

Ryhmään 1 kuuluvat betonipeitteen paksuuden, betonin läpäisevyyden, karbonatisoitumissyvyyden ja kloridipitoisuuden mittausmenetelmät. Menetelmät ovat yleisessä käytössä kenttäolosuhteissa tehtäessä betonirakenteiden kuntotutkimuksia.

Ryhmään 2 kuuluvia menetelmiä käytetään korroosioalueiden paikallistamiseen ja korroosionopeuden arviointiin. Ryhmään kuuluvia menetelmiä ovat betonin vastuksen mittaus, potentiaalimittaus ja sähkökemialliset korroosionopeuden mittausmenetelmät.



Ryhmään 3 kuuluvat korroosion seurauksia mittaavat menetelmät, jotka usein perustuvat ultraäänen, mekaanisten värähtelyjen tai sähkömagneettisten aaltojen heijastumiin betonirakenteesta. Menetelmät ovat vielä kehittelyvaiheessa ja niiden käyttö rajoittuu lähinnä laboratorio-olosuhteisiin.

## 4 SÄHKÖKEMIALLISET KORROOSION MÄÄRITYSMENETELMÄT

### 4.1 Potentiaalimittaus

#### 4.1.1 Yleistä

Potentiaalimittaus on vanhin ja yleisimmin käytetty raudoituksen korroosiotilan tutkimusmenetelmä /3/. Käytön yksinkertaisuudesta johtuen sen käyttö on yleistä ja menetelmästä on runsaasti käytännön kokemuksia. Potentiaalimittauksella voidaan suhteellisen luotettavasti paikallistaa korroosioalueet. Menetelmästä on olemassa amerikkalainen standardi ASTM C876-91, kansallisia standardeja ja RILEMin antamat suositukset /6/.

Potentiaalimittaus soveltuu pääasiassa ulkona oleviin betonirakenteisiin. Menetelmää voidaan käyttää riippumatta betonipeitteen paksuudesta ja raudoituksen tankokoosta. Menetelmällä saadaan selville myös syvemmällä olevien raudoituskerrosten korroosiotila.

Potentiaalimittauksella suositellaan käytettäväksi seuraavissa tapauksissa /6/:

1. Betonirakenteen kuntotutkimuksissa paikantamaan korroosion esiintymisalueet ja arvioimaan raudoituksen nykyinen korroosiotila.
2. Niiden alueiden määrittämiseen joilta on tehtävä ainetta rikkovia tutkimuksia (näytteiden irrotus kloridimäärittäystä varten, raudoituksen paljastaminen sen tilan määrittämistä varten ym.).
3. Raudoituksen korroosiotilan tarkistamiseen korjauksen jälkeen korjaustyön laadun arvioimiseksi.
4. Suunniteltaessa katodisessa suojauksessa anodien sijoittelua tai suunniteltaessa sähkökemiallista entistämistä.

Potentiaalimittauksen avulla voidaan ainoastaan määrittää alueet, joilla korroosio on käynnissä (aktiivinen korroosioalue). Potentiaalimittauksella ei saada selville korroosionopeutta eikä korroosion määrää.

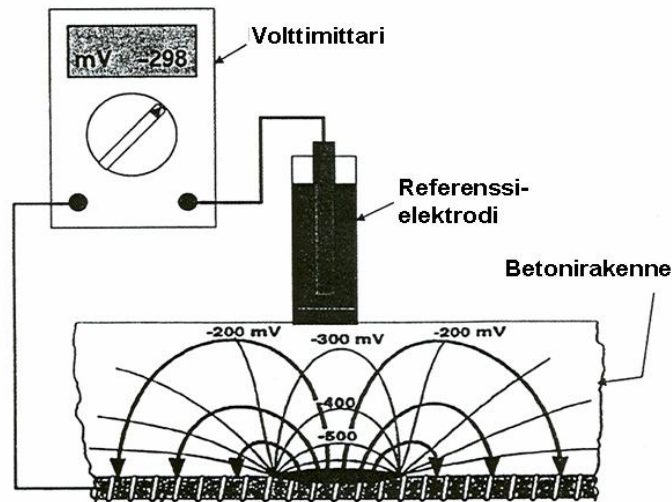
Korroosionopeuden selvittämiseksi potentiaalimittauksen rinnalla on käytettävä muita menetelmiä, kuten korroosionopeuden mittausta.

#### 4.1.2 Menetelmän periaate ja tuloksiin vaikuttavat tekijät

Raudoitustangon alkaessa ruostua, muodostuu anodi- ja katodireaktioiden seurauksena teräksen pinnalle toisistaan poikkeavan potentiaalilin omaavia alueita ja betoniin sähkövirta. Potentiaalimittaus perustuu betonissa olevan raudoituksen toimimiseen elektrodina elektrolyytissä, jolloin raudoituksen sähkökemiallinen tila (suhteellinen potentiaali) voidaan määrittää yhdistämällä se tunnetun potentiaalilin omaavaan referenssielektrodiin.

Kuvassa 6 on esitetty mittauksen periaate. Mittauksessa käytetään volttimittaria, jonka toinen napa on yhdistetty raudoitustankoon ja toinen referenssielektrodiin. Kun referenssielektrodi asetetaan betonin pinnalle, syntyy sähköinen yhteys kostean betonin muodostaman sillan kautta. Betonissa olevan raudoituksen ja referenssielektrodin välinen potentiaaliero riippuu raudoituksen korroosiotilasta ja käytetystä

referenssielektrodista, jonka potentiaali pysyy vakiona. Kun referenssielektrodiä liikutellaan betonin pinnalla, muuttuu potentiaali sen mukaan mikä on raudoituksen tila referenssielektrodin kohdalla.



Kuva 6. Periaatekuva raudoitustangon potentiaalin mittaamisesta /13/.

Mitatut potentiaalit ovat suhteellisia arvoja ja ne ilmoitetaan suhteessa mittauksessa käytetyn referenssielektrodin potentiaaliin. Yleisimmät käytetyt referenssielektrodit ovat

- standardivetyelektrodi
- kupari-kuparisulfaattielektrodi
- kalomelielektrodi
- hopeakloridielektrodi.

Kentällä tehtävissä mittauksissa käytetään yleensä kupari-kuparisulfaattielektrodiä (CSE). Kalomeli- ja hopeakloridielektrodeja käytetään laboratorioissa. Yksityiskohtaisemmin referenssielektrodeja on käsitelty mm. julkaisussa /17/.

Mitattujen potentiaalien suuruus riippuu raudoituksen korroosiotilasta. Mitattuihin arvoihin vaikuttavat lisäksi merkittävästi betonin kosteus (vaikuttaa vastukseen) ja betonipeitteen paksuus.

Betonipeitteen kosteuden kasvaessa potentiaaliarvot siirtyvät negatiiviseen suuntaan, mutta potentiaalimuutokset ja paikalliset potentiaaliminimikohdat (korroosio-kohtat) eivät muutu. Kosteuspitoisuuden vaihtelu (kuiva/passiivinen ja märkä/korroosio) suurentaa potentiaalieroja korroosioalueen ja passiivialueen välillä. Hyvin kuivassa betonissa ruostunutta raudoitusta on vaikea havaita.

Yleensä mitatut potentiaalit ovat välillä +100 mV - 700 mV (CSE). Suuremmat arvot osoittavat betonin olevan kuivaa.

Betonipeitteen paksuuden kasvaessa potentiaalilukemat pienenevät. Tämän johdosta paikallisten pienialaisten korroosio-kohtien havaitseminen vaikeutuu. Korroosio-kohtia voidaan kuitenkin paikallistaa potentiaalimuutoksen (gradientin) perusteella.

Eri sementtilaaduilla ei ole havaittu olevan systemaattista vaikutusta potentiaalilukemiin. Kokemuksesta kuitenkin tiedetään, että potentiaalilukemat ovat negatiivisempia kuonabetonissa kuin Portlandsementti-betonissa.

Korroosion ollessa paikallista, referenssielektrodi ei mittaa "todellista" anodin ja katodin korroosiopotentiaalia vaan sekapotentiaalin, joka riippuu elektrodin sijainnista ja betonin ominaisvastuksesta. Negatiivisimmat (pienimmät) potentiaaliarvot ovat aina paikallisen anodin kohdalla. Todellisiin potentiaalinarvoihin vaikuttavat betonipeitteen paksuus ja betonin ominaisvastus.

Paikallisparin virta vaikuttaa katodin potentiaaliin. Anodi polarisoi passiivitilassa olevaa raudoitusta korroosiokohdan lähellä negatiivisen potentiaalın suuntaan. Pienen ominaisvastuksen omaavassa betonissa (kosteaa, kloridipitoinen) tämä siirtää potentiaalia selvästi negatiiviseen suuntaan, mikä edesauttaa erittäin pienten korroosiokohtien havaitsemista mittaussälin ollessa suhteellisen suuri. Suuren ominaisvastuksen omaavassa betonissa (kuiva, karbonatisoitunut) selvä ero anodin ja katodin välillä on havaittavissa ainoastaan pienellä alueella, jolloin pienten korroosioalueiden havaitseminen on vaikeampaa.

Maahan upotetuissa ja vedessä olevissa betonirakenteiden osissa potentiaalit ovat pieniä johtuen rajoitetusta hapen määrästä.

#### 4.1.3 Mittauksen suoritus käytännössä

Mittauksessa tarvittavat laitteet ovat

- volttimittari
- referenssielektrodi ja
- referenssielektrodin ja raudoituksen välinen johto.

Volttimittarilla on oltava suuri impedanssi, jotta referenssielektrodin läpi kulkeva virta ei häiritse referenssielektrodiä eikä sen potentiaalia. Normaaleissa ulko-olosuhteissa pienin hyväksyttävä impedanssi on 10 M $\Omega$ , kuivan betonin ollessa kysymyksessä betonin impedanssin tulisi olla suurempi kuin 1000 M $\Omega$ . Mittauksessa käytettävän volttimittarin resoluution tulee olla mahdollisimman suuri, luokkaa 0,1 mV /14/.

Ennen mittausta on tarkistettava laitteiden kunto ja referenssielektrodin kalibrointi, joka on suoritettava määrävälein. Kalibrointi tehdään yleensä laboratoriossa käytettävän kalomelielektrodin kanssa. Eron tulisi olla pienempi kuin 10 mV /6/.

Yleisimmin käytetty mittaustapa on nk. pistemittaus (point measurement). Pistemittauksessa voidaan käyttää tavallista volttimittaria tai kaupallisesti saatavia mittareita, joissa on yleensä tulosten tallennusmahdollisuus. Laaja-alaisten pintojen, kuten siltojen tai pysäköintitilojen kansien mittausta varten on ulkomailla kehitetty useita elektrodeja käsittäviä työnnettäviä mittaussäunuja. Näissä mittaustapahtuu automaattisesti säunua työnnettäessä mitattavan alueen pintaa pitkin ja tulokset tallentuvat säunussa olevan rekisteröintilaitteen muistiin (potential mapping).

Ennen mittauksen aloitusta on rekisteröitävä poikkeavat olosuhteet mitattavan alueen pinnasta myöhempiä tulosten analysointia varten. Tällaisia ovat mm. pinnan kosteuden vaihtelu ja näkyvissä oleva raudoitus. Poikkeavat alueet on hyvä esittää piirustuksessa.

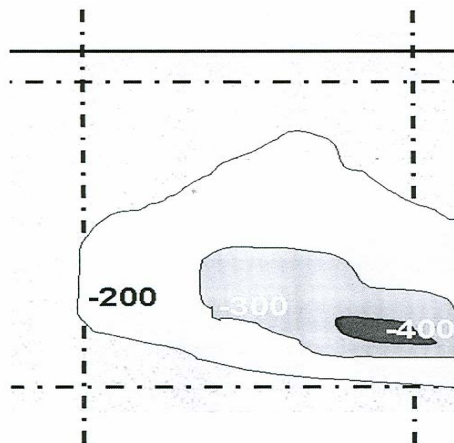
Mittauksen valmistelu ja suoritus käsittää yleensä seuraavat vaiheet ja niissä tehtävät toimenpiteet /14/:

- Mittausalueen valinta. Mittausalueen on oltava edustava ja riittävän iso, kooltaan mieluummin vähintään 5 m<sup>2</sup>. Mittausaluetta valittaessa on otettava huomioon mahdolliset mittauksessa virheitä aiheuttavat seikat.
- Raudoituksen aseman määrittäminen (peitemittari).
- Sähköisen kontaktin tekeminen raudoitukseen. Sähköinen kontakti raudoitukseen edellyttää raudoituksen paljastamista pieneltä alueelta ja virtajohdon kiinnitystä paljastettuun tankoon esim. "hauenleualla". Betoniin voidaan porata raudoituksen kohdalle teräkseen ulottuva reikä, johon kierteytetty ruuvi kiinnitetään.
- Raudoituksen sähköisen kontaktin varmistaminen. Raudoituksen sähköinen kontakti voidaan tarkistaa mittaamalla äärimmäisten mittauspisteiden välinen vastus. Tällöin vaihtovirralla mitatun vastuksen tulisi olla pienempi kuin 1 Ω (ilman johtojen vastusta). Jos vastus on suurempi, on kontaktikohtia raudoitukseen tehtävä useampia. (Pinnoitetuista tangoista muodostuvaa raudoitusta ei voi mitata).
- Mittauspisteiden valinta ja merkitseminen mittausalueella (pistemittaus). Mittauspisteet on syytä merkitä mitattavan alueen pintaan rakenteen geometria huomioiden sopivassa koordinaatistossa (esim. tasavälein). Karbonatisoitumisesta johtuvan korroosion ollessa kysymyksessä mittauspisteiden väli voi olla esim. 1 x 1 m. Kloridien aiheuttaman korroosion ollessa kysymyksessä väli voi olla esim. 0,2 x 0,2 m. Jos vierekkäisten mittapisteiden lukemien ero on suurempi kuin 100 mV, on mittauspisteiden väliä syytä tihentää.
- Mittausalueen kastelu hyvän sähköisen kontaktin aikaansaamiseksi. Betonipeitteen on oltava riittävän kostea, jotta raudoituksen ja referenssielektrodin välille saadaan riittävän hyvä kontakti. Käytännössä hyvä kontakti saadaan asettamalla kostea sieni referenssielektrodin ja betonipinnan väliin. Sientä on kostutettava mittauksen aikana. Referenssielektrodi ei saa olla kontaktissa suoraan raudoitukseen.
- Yhdistetään referenssielektrodin johto mittarin negatiiviseen napaan ja raudoitukseen kiinnitetty johto mittarin positiiviseen napaan.
- Luetaan mittauspisteiden potentiaalit. Mittaustulosten luotettavuuden varmistamiseksi on hyvä seurata vierekkäisten potentiaalieroa, joka ei saa olla suuri. Poikkeaviin mittaustuloksiin on syytä kiinnittää huomiota ja tarvittaessa varmistaa tulokset uusintamittauksella.

Pistemittauksessa (point measurement) potentiaalit luetaan mitattavista pisteistä. Mittalaitteesta riippuen tulokset kirjataan paperille tai mittalaitteen muistiin. Tulokset esitetään usein mittausalueelta olevassa piirustuksessa.

Potentiaalikartoituksessa (potential mapping) mittausvaunulla ajetaan mittausalue ennalta suunnitellusti. Mittausvaunussa oleva lukulaite tallentaa tulokset automaattisesti määrävälein vaunussa olevaan tallennuslaitteeseen.

Mikäli kartoitettu alue on laaja ja mittaustuloksia on paljon, tulosten esittäminen samapotentiaalikäyrästä on helpottava tulosten tulkittamiseksi ja on havainnollinen (kuva 7). Samapotentiaalikäyrästä piirretään manuaalisesti tai automaattisesti.



Kuva 7. Samapotentiaalikäyräkartta (käyrästä) /14/.

#### 4.1.4 Tulosten tulkinta ja mahdollisia virhelähteitä

Potentiaalimittauksen keskeisin tarkoitus on paikallistaa korroosioalueet betonirakenteessa. Tämä tapahtuu tarkastelemalla potentiaalilukemien suuruutta ja niiden muutoksia rakenteen eri osissa.

Potentiaalilukemien tulkinta ei ole kuitenkaan suoraviivaista, koska betonipeite ja sen ominaisvastus vaikuttavat lukemiin. Betonin ominaisvastukseen vaikuttavat mm. betonin kosteustila, kloridipitoisuus ja lämpötila.

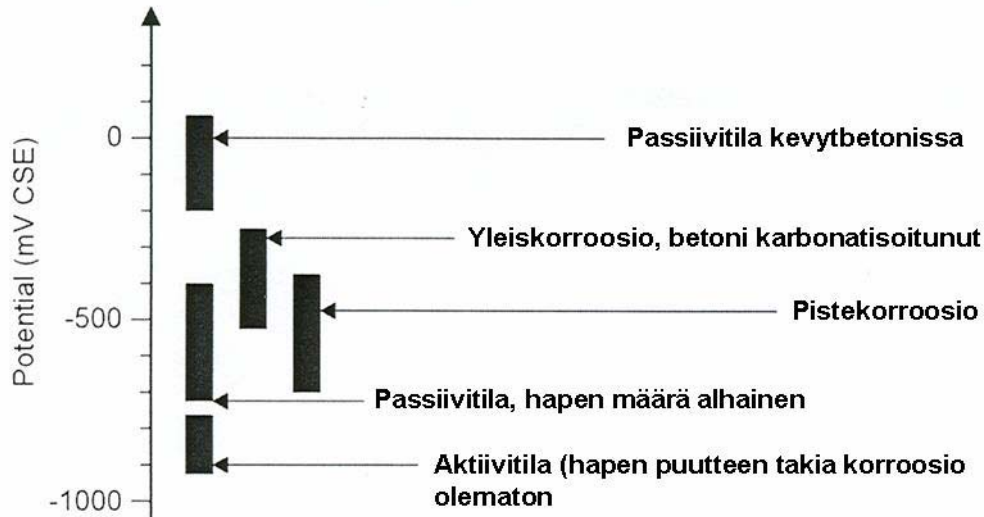
Taulukossa 2 on esitetty betonissa eri olosuhteissa olevan teräksen tyypillisiä potentiaalin arvoja /6/.

Taulukko 2. Tyypillisiä betonissa olevan tavallisen teräksen potentiaalin arvoja (kupari-kuparisulfaattielektrodi) /6/.

Olosuhteet betonissa	Potentiaali (mV)
Hapeton vedellä kyllästetty betoni	- 900 - 1000
Märkä kloridipitoinen betoni	- 400 - 600
Kostea kloriditon betoni	+ 100 - 200
Kostea karbonatisoitunut betoni	+ 100 - 400
Kuiva karbonatisoitunut betoni	+ 200 - 0,0
Kuiva betoni	+ 200 - 0,0

Kuvassa 8 on esitetty korroosiotilan karkea riippuvuus potentiaalilukemista /3/. Passiivitilassa olevan raudituksen potentiaalilukemat ulkona olevassa betonirakenteessa ovat välillä +50 ja -200 mV (CSE). Korroosion ollessa käynnissä potentiaalit muuttuvat negatiivisemmiksi; kloridien aiheuttaman piste-korroosion ollessa kysymyksessä potentiaalilukemat ovat välillä -400 ja -700 mV (CSE), karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion ollessa kysymyksessä välillä -200 ja -500 mV (CSE). Lukemat riippuvat merkittävästi betonin kosteudesta.

Erittäin negatiivisia potentiaaliarvoja, pienempiä kuin 700 mV (CSE), ilmenee rakenteissa jotka ovat pohjaveden tai meriveden kyllästämiä. Huolimatta alhaisista potentiaaliarvoista raudoituksen korroosionopeus ei ole tällöin merkittävä betonin ollessa veden kyllästämä.



Kuva 8. Korroosiotilan karkea riippuvuus potentiaalilukemista /3/.

Potentiaalimittausten tulosten tulkinnassa käytetään yleisesti standardia ASTM C 876 /6/. Standardin korroosipotentiaalin tulkintarajat on alun perin kehitetty Yhdysvalloissa siltalaattojen yläpinnan raudotteiden korroosiotilan arvioimiseksi.

Standardi ASTM C 876 antaa seuraavat arvot mitattujen korroosipotentiaalien tulkitsemiseksi:

1. Jos korroosipotentiaali alittaa  $-350$  mV (CSE), 90 %:n todennäköisyydellä korrosio on käynnissä mittaushetkellä kyseisessä kohdassa.
2. Jos korroosipotentiaali ylittää  $-200$  mV (CSE), 90 %:n todennäköisyydellä korrosio ei ole käynnissä kyseisessä kohdassa mittaushetkellä.
3. Jos korroosipotentiaali on  $-200$  mV:n ja  $-350$  mV:n välillä, korroosion aktiivisuutta ei pystytä varmuudella arvioimaan.

Koska edellä mainitut arvot on määritetty käytännön kokemukseen perustuen, eivät ne kaikissa tapauksissa täysin sovellu raudotteiden korroosiotilan tarkasteluun. Mm. erilainen betonin koostumus voi aiheuttaa muutoksia arvoihin. Lisäksi ääriarvoja lukuun ottamatta betonin kunnan vaikutusta potentiaalin ei tunneta riittävän hyvin ja siksi absoluuttisia potentiaaliarvoja ei voi luotettavasti käyttää korroosiotilan arviointiin.

Käytännön kokemusten mukaan, riippumatta olosuhteista, potentiaaliarvojen merkittävä poikkeaminen toisistaan viittaa korroosion käynnissäoloon. Yleensä huomattava korroosioriski on olemassa jos vierekkäisten mittauskohtien potentiaalilukemien ero on suurempi kuin 100 mV /14/.

Samapotentiaalikäyrät helpottavat korroosioalueiden (anodialueet) ja ei korroosioalueiden (katodialueet) paikallistamista. Mitä suurempi on potentiaaliero anodi- ja katodialueiden välillä, sitä suurempi on samapotentiaaliviivojen gradientti ja korroosioriski.

Käytettäessä potentiaalimittausta betonirakenteissa, on tuloksia arvosteltaessa otettava huomioon korroosipotentiaaliin vaikuttavat useat tekijät. Vaikuttavia tekijöitä ovat mm. /13, 14/:

- Betonin kosteuspitoisuus. Betonin vastus vaihtelee riippuen betonin kosteuspitoisuudesta. Kosteuspitoisuuden aiheuttamat vaihtelut voivat aiheuttaa potentiaalissa jopa 200 mV:n eroja. Betonin kosteuspitoisuuden kasvaessa, potentiaali muuttuu negatiiviseen suuntaan.
- Betonipeitteen paksuus. Betonipeitteen paksuuden kasvaessa pienenee passiivitilassa ja korroosiotilassa olevan raudoituksen potentiaaliero. Tämän johdosta pienialaisten korroosioalueiden paikantaminen vaikeutuu betonipeitteen paksuuden kasvaessa.
- Karbonatisoituminen. Karbonatisoituminen suurentaa betonin vastusta. Karbonatisoituneessa betonissa sekä passiivitilassa että korroosiotilassa olevan raudoituksen potentiaalierot ovat normaalia suurempia.
- Kloridipitoisuus. Lukuisten siltojen kansilaattojen mittausten tulokset osoittavat, että betonin kloridipitoisuuden ja potentiaalinvälillä on ilmeinen riippuvuus. Suurimmat negatiiviset potentiaalierot ovat olleet alueilla joissa kloridipitoisuus on ollut suurin.
- Happipitoisuus. Hapen pääsy määrää passiivitilassa olevan teräksen jäännöspotentiaalinvälillä. Alhainen happipitoisuus aiheuttaa selvän jäännöspotentiaalinvälillä pienentymisen. Märässä betonissa alhaisen hapen diffuusion johdosta voi potentiaali siirtyä negatiiviseen suuntaan, jolloin passiivitilassa oleva raudoitus voi osoittaa negatiivisia arvoja vastaavasti kuten korroosiotilassa oleva raudoitus. Tämän johdosta on olemassa vaara, että alhaisen happipitoisuuden omaavissa alueissa tulkitaan korroosion olevan käynnissä vaikka näin ei ole.

Mittauksessa itsessään virheellisiä lukemia voivat aiheuttaa seuraavat tekijät /14/:

- huono sähköinen kontakti raudoitukseen
- pinnassa oleva pinnoite, impregnointi, mineraaliöljyt tai muu orgaaninen aines
- pinnan suuntainen halkeilu mittauskohdassa
- galvanoitu raudoitus
- katodinen suojaus ja
- hajavirrat.

Sementtipohjaiset paikkaukset ja korjauskerrokset eivät vaikuta mittaukseen mikäli ne ovat kunnolla kiinni alustassa eivätkä sisällä paljon polymeereja.

Pistemittauksessa virhettä voi aiheuttaa mahdollinen lukeman muuttuminen jatkuvasti mittauksen aikana. Tämä voi johtua betonin kastumisesta minkä seurauksena betonin vastus muuttuu. Alle 20 mV muutos minuutissa voidaan kuitenkin hyväksyä /6/.

## 4.2 Ominaisvastuksen mittaus

### 4.2.1 Yleistä

Betonin ominaisvastus on yhdessä happipitoisuuden kanssa keskeinen raudoituksen korroosioon vaikuttavista tekijöistä. Betonin ominaisvastus vaikuttaa virran voimakkuuteen (ionien liikkumiseen) anodi- ja katodialueiden välillä ja siten korroosion nopeuteen. Ominaisvastuksen kasvaessa virran voimakkuus pienenee. Korroosionopeuden ja ominaisvastuksen välistä riippuvuutta on määritetty kokeellisesti rakenteista tehtyjen mittausten perusteella /14/.

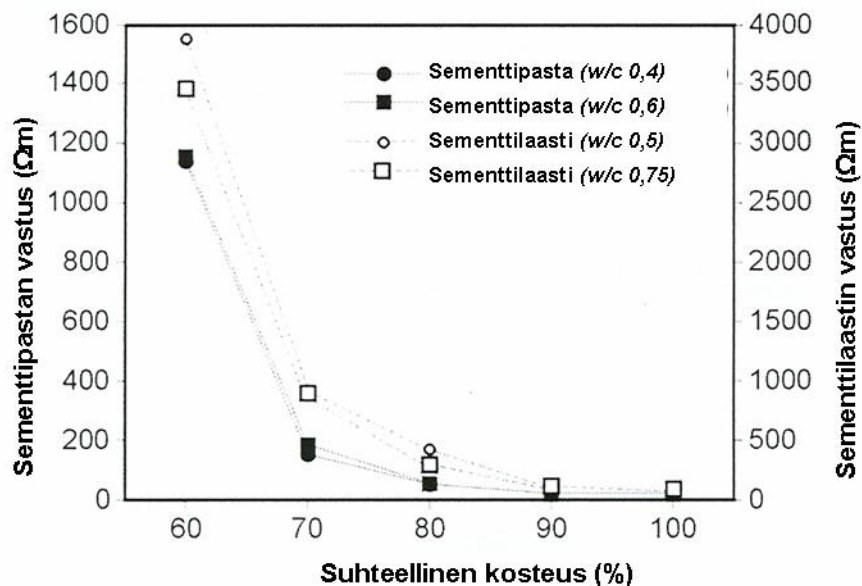
Ominaisvastuksen mittausta on käytetty yhdessä muiden mittausten menetelmien kanssa raudoituksen tilan tutkimisessa. Korroosioalueet voidaan määrittää esimerkiksi potentiaalimittauksella ja ominaisvastuksen

avulla voidaan arvioida korroosioalueilla korroosion maksiminopeus ja päätellä tulosten perusteella tilanteen vakavuus. Ominaisvastuksen avulla voidaan arvioida myös varhaisessa vaiheessa kloridien aiheuttaman korroosioriskin olemassaoloa, sillä yleensä alhainen betonin ominaisvastus korreloi nopean kloridien tunkeutumisen kanssa. Ominaisvastuksen kartoituksen avulla voidaan havaita huokoiset alueet, joissa kloridien tunkeutuminen tulee olemaan nopeinta ja korroosioriski tämän johdosta suuri.

#### 4.2.2 Betonin ominaisvastukseen vaikuttavat tekijät

Betonin ominaisvastuksen suuruuteen vaikuttavat betonia ympäröivän tilan olosuhteet ja betonin koostumus. Betonin ominaisvastus riippuu betonin kosteudesta ja lämpötilasta. Betonin laadun osalta ominaisvastukseen vaikuttavat merkittävästi sementin laatu ja määrä sekä vesisementtisuhde. Myös betonin huokosten koko ja tilavuusosuus sekä huokosissa olevan veden koostumus (alkalipitoisuus, kloridipitoisuus) vaikuttavat ominaisvastukseen /3, 14/.

Betonin laadusta ja ympäröivistä olosuhteista riippuen betonin ominaisvastus voi vaihdella huomattavasti, 100:sta aina 100000  $\Omega$  m:iin. Ominaisvastus on suuri jos betoni on kuiva ja sen vesisementtisuhde on pieni. Kuvassa 9 on esitetty vesisementtisuhteen ja suhteellisen kosteuden vaikutus sementtipastan ja sementtilaastin vastukseen /3/.



Kuva 9. Vesisementtisuhteen ja suhteellisen kosteuden vaikutus pastan ja sementtilaastin vastukseen /3/.

Koska betoni ei ole homogeenista, vaihtelee sen ominaisvastus. Mm. isot runkoainerakeet vaikuttavat ominaisvastukseen. Betonin karbonatisoituessa ominaisvastus kasvaa /8/.

Lämpötilalla on huomattava vaikutus ominaisvastuksen suuruuteen. Kosteuden ollessa vakio, pienenee ominaisvastus lämpötilan noustessa. Koska betonin koostumus ja kosteus vaikuttavat betonin ominaisvastukseen ja sen lämpötilariippuvuuteen, on lämpötilan tarkan vaikutuksen määrittäminen vaikeaa. Karkeasti voidaan otaksua, että lämpötila-alueella 0 - 40 °C ominaisvastus kaksinkertaistuu lämpötilan laskiessa 20°C, tai ominaisvastus muuttuu 3 - 5 % lämpötilan muuttuessa asteen /3/.



On osoitettu, että korroosion sähkökemiallisen luonteen johdosta passiivisuutensa menettäneen raudoituksen korroosionopeus betonissa on kääntäen verrannollinen betonin ominaisvastukseen. Riippuvuus ei ole vakio, sillä betonin koostumus vaikuttaa tähän. Yleisesti betonirakenteessa alueilla joissa ominaisvastus on pieni, on korroosionopeus suurempi kuin alueilla missä ominaisvastus on suuri.

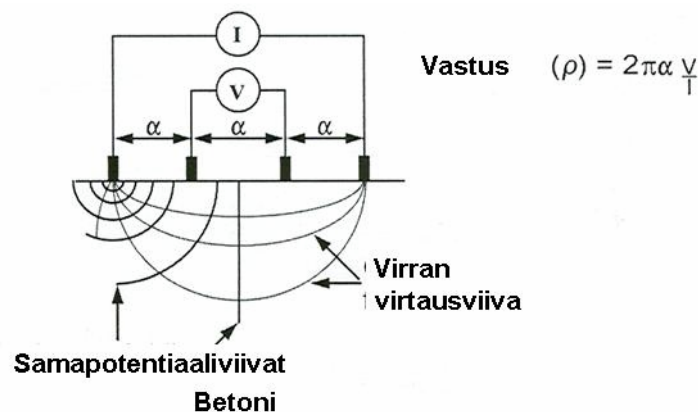
#### 4.2.3 Ominaisvastuksen mittaus

Betonin ominaisvastus voidaan määrittää suoraan rakenteen pinnasta tai rakenteesta irrotetuista betoninäytteistä laboratoriossa. Kaikissa kenttäolosuhteissa käytettävissä betonin ominaisvastuksen mittausmenetelmissä on vähintään kaksi elektrodia, joista toinen voi olla raudoitustanko. Mittauksessa elektrodien välille asetetaan jännite, syntyvä virran muutos mitataan ja ohmisen vastuksen muutos saadaan virran ja jännitteen muutosten suhteena. Betonin ominaisvastus saadaan kertomalla mitattu vastus anturin vakiolla.

Rakenteen pinnasta mittaus tapahtuu käyttäen 2- tai 4- elektrodimenetelmää. Mainituista menetelmistä 4- elektrodimenetelmä on käytetyin ja mittauslaitteita on saatavilla kaupallisesti.

4- elektrodimenetelmä kehitettiin Wennerin toimesta alun perin geofysikaalisiin mittauksiin, mutta sitä käytetään nykyisin yleisesti myös betonin ominaisvastuksen mittauksiin. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 10 /14/.

Menetelmässä on neljä toisistaan samalla etäisyydellä olevaa elektrodia betonin pinnassa. Elektrodien etäisyys toisistaan on yleensä 50 mm. Kaupallisissa laitteissa on elektrodien yläpäässä jousi, joka painaa elektrodit tiiviisti betonin pintaan. Mitattaessa vaihtovirta johdetaan ulompiin elektrodeihin ja potentiaali mitataan kahden sisemmän elektrodin väliltä. Mittauksessa vaihtovirran suuruus on tyypillisesti 250  $\mu$ A ja taajuus vaihtelee välillä 25 - 150 Hz /14/. Volttimittarin resoluution (erottelukyky) on oltava hyvä, mieluummin pienempi kuin 0,1 mV.



Kuva 10. Vastusmittauksen periaate 4-elektrodimenetelmällä /14/.

Kun vaihtovirran suuruus on  $I$  ja mitattu potentiaaliero kahden sisemmän elektrodin välillä  $V$ , voidaan betonin ominaisvastus laskea seuraavasta lausekkeesta

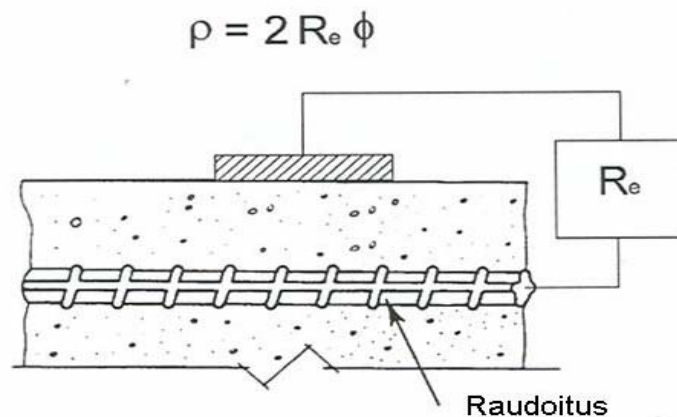
$$\rho = 2\pi\alpha \frac{V}{I} \quad (2)$$

missä  $\rho$  on betonin ominaisvastus,  $k\Omega\text{cm}$   
 $\alpha$  elektrodien välinen etäisyys, mm  
 $V$  jännite,  
 $I$  virta.

Edellä ominaisvastuksen laskentakaavassa on oletettu, että mitattavan kohteen koko on suuri verrattuna elektrodien välimatkaan ja betoni on homogeenista.

2 – elektrodimenetelmässä mitataan betonin pintaan asetetun elektrodin ja raudoituksen välinen vastus jonka avulla määritetään betonin ominaisvastus. Menetelmän periaate on esitetty kuvassa 11.

Menetelmässä käytettävä mittalaite koostuu johtavasta materiaalista olevasta anturista (pyöreä levy), potentiostaatista ja referenssielektrodista. Mitattaessa määritetään jännitteen muutoksen aiheuttama vastuksen muutos ja betonin ominaisvastus saadaan kertomalla vastus anturin vakiolla.



Kuva 11. 2 - elektrodimenetelmän periaate /8/.

Menetelmässä ulkoisen elektrodin (anturi) on oltava tiiviisti betonin pinnassa. Menetelmän heikkoutena on anturin vakion tarkkuus, sillä anturin vakion suuruuteen vaikuttavat betonin pinnassa olevan elektrodin koon lisäksi mm. betonipeitteen paksuus.

Betonin ominaisvastuksen mittaukseen suositellaan yleisesti 4-elektrodimenetelmää. Seuraavassa on esitetty tiivistetysti 4-elektrodimenetelmää käytettäessä mittauksen suorituksen vaiheet, niissä tehtävät toimenpiteet ja virheiden minimoimiseksi huomioonotettavia seikkoja /14/:

- Mittauksessa tulisi käyttää vaihtovirtaa (tavallisesti  $250 \mu\text{A}$ ) taajuuden ollessa välillä 25 – 150 Hz.
- Anturien välimatkan tulisi olla vähintään 1,5 kertaa kiviaineksen suurin raekoko jotta välttyttäisiin mittaamasta yksittäisen kiviaineksen vastusta. Anturien välimatkan tulisi olla pienempi tai yhtäsuuri kuin 0,25 kertaa betonipoikkileikkauksen paksuus jotta vältettäisiin rakenteen koosta aiheutuva virhe.
- Anturien tulisi olla betonin reunasta vähintään etäisyydellä kaksi (2) kertaa anturien välimatka reunavaikutuksen eliminoimiseksi.
- Raudoitusta ei tulisi olla mittauskohdassa. Jos mittauksessa raudoitusta ei voida välttää, tulee mittaus suorittaa mieluummin kohtisuoraan raudoitusta vastaan kuin raudoituksen suunnassa. Tämä oikosulun eliminoimiseksi. Jos mittaus joudutaan suorittamaan samansuuntaisesti alla olevan raudoituksen

kanssa, anturien välimatkan tulee olla pienempi kuin kaksi kolmasosaa (2/3) betonipeitteen paksuudesta oikosulun eliminoinemiseksi.

- Pinnassa mahdollisesti olevat pinnoitteet on poistettava kontaktikohdan suuren vastuksen eliminoinemiseksi.
- Mittausta ei pidä suorittaa erittäin märästä pinnasta tai vuorokauden sisällä sateesta. Jos pinta on märkä, anturin välin on oltava vähintään 40 mm.
- Jos pinnassa on pienen vastuksen omaava kerros ja on tarkoitus mitata tämän alla olevan kerroksen vastus, on anturien välimatkan oltava vähintään kahdeksan (8) kertaa kerroksen paksuus.
- Mittauksia tulisi tehdä kolmesta tai neljästä lähekkäin sijaitsevasta kohdasta tulosten vaihtelun selvittämiseksi.

#### 4.2.4 Tulosten tulkinta ja mahdollisia virhelähteitä

Tulosten tulkinta perustuu kokemukseen. Jos on todennäköistä, että korroosio on käynnissä, 4-elektrodi-menettelmällä saatujen tulosten perusteella voidaan korroosionopeuden arviointiin käyttää taulukoissa 3 ja 4 esitettyjä arvoja.

Taulukko 3. Korroosionopeuden arviointi ominaisvastusmittauksen tuloksiin perustuen /14/.

Ominaisvastus $\Omega\text{m}$	Arvio korroosionopeudesta
> 200	pieni
100 - 200	alhaisesta kohtalaiseen
50 - 100	suuri
< 50	erittäin suuri

Taulukossa 4 on esitetty lähteessä /3/ annetut ominaisvastuksen arvot korroosionopeuden arvioimiseksi. Raja-arvot eroavat jonkin verran taulukossa 3 esitetyistä arvoista.

Taulukko 4. Karkeat kriteerit korroosionopeuden arvioimiseksi ominaisvastusmittauksen tulosten perusteella portlandsementtibetonissa ulko-olosuhteissa /3/.

Ominaisvastus $\Omega\text{m}$	Arvio korroosionopeudesta
> 1000	olematon
> 500	pieni
200 - 500	kohtuullinen
100 - 200	suuri
< 100	erittäin suuri

Korroosion nopeudesta voidaan ominaisvastuksen mittauksen avulla tehdä arvioita ainoastaan jos mitatut ominaisvastukset ovat taulukoissa mainittujen arvojen sisällä. Jos ominaisvastus on pienempi kuin 100  $\Omega\text{m}$  (10  $\text{k}\Omega\text{cm}$ ), ei tämä ole virran voimakkuuden kannalta määräävä tekijä. Jos ominaisvastus on

suurempi kuin  $1000 \Omega\text{m}$  ( $100 \text{ k}\Omega\text{cm}$ ), on vaikea tehdä eroa aktiivitilassa tai passiivitilassa olevan raudoituksen välillä, koska betonin suuri ominaisvastus estää korroosion.

Ominaisvastuksen määrittämisen tarkkuuteen vaikuttaa merkittävästi miten homogeenista on betoni. Yleisesti ominaisvastuksen määrittämisen tarkkuuteen vaikuttavat seuraavat tekijät /14/:

- rakenteen geometria
- betonin epähomogeenisuus
- heikko kontakti pinnassa
- pinnassa olevan kerroksen muusta betonista poikkeava vastus
- rauditus ja sen asema
- muutokset ympäröivissä olosuhteissa.

Suurin ongelma käytettäessä nelipistemittausta aiheutuu raudoituksesta, joka voi aiheuttaa oikosulun ja antaa harhaanjohtavan korkeita tuloksia. Tehtyjen selvitysten perusteella virhe on pieni, jos mittaus tehdään kohtisuoraan yksittäistä raudoitustankoa vastaan. Edellä esitetystä seuraa, että ennen ominaisvastuksen mittausta raudoitustankojen suunta ja betonipeitteen paksuus on syytä aina selvittää.

### 4.3 Korroosionopeuden mittaaminen

#### 4.3.1 Yleistä

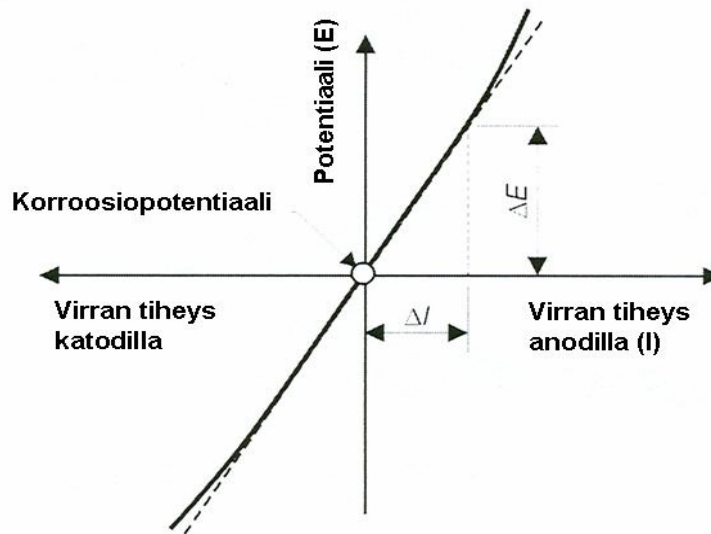
Korroosionopeuden tunteminen rakenteessa antaa todellista tietoa korroosion etenemisnopeudesta. Korroosionopeuden tunteminen on hyödyllistä arvioitaessa rakenteen korjaustarvetta ja korjausajankohtaa. Tuntemalla korroosionopeus voidaan jo varhaisessa vaiheessa päätellä onko syytä ryhtyä korjaustoimenpiteisiin. Korroosionopeuden perusteella voidaan tarvittaessa myös päätellä korjaustyön onnistuminen.

Korroosionopeuden mittaamiseksi on olemassa useita menetelmiä. Nykyisin kaupallisesti saataviin kenttäolosuhteissa tehtäviin mittauksiin soveltuvien mittalaitteiden toiminta perustuu joko lineaariseen polarisaatiovastukseen tai galvanostaatiseen pulssitekniikkaan /12/. Menetelmiin perustuvia laitteita on kaupallisesti saatavana useita, kuten Gecor ja Galva-Pulse. Ruotsissa on kehitetty nk. SP-laite, jota ei kuitenkaan vielä ole kaupallisesti saatavilla.

#### 4.3.2 Menetelmän periaate

Koska teräksen johtavuus on suuri, virran voimakkuuden korroosiovirtapiirissä määrää ionien liike (virta) betonissa, joka riippuu betonin johtavuudesta lähellä teräksen pintaa olevassa kerroksessa. Tällä ionien rikastamalla kerroksella on polarisaatio ominaisuus, kuten suuri kapasitanssi. Tämä polarisaatio ominaisuus muodostaa perustan sähkökemiallisille korroosionopeuden mittaustekniikoille /12/.

Lineaarinen polarisaatiovastusmenetelmä perustuu havainnolle, että polarisaatiokäyrä on lineaarinen korroosipotentialin lähellä. Polarisaatiovastus ( $R_p$ ) voidaan määrittää metallipinnan potentiaalimuutoksen  $\Delta E$  vastukseksi vakio-tilassa, kun ulkopuolisen virran muutos  $\Delta I$  on pieni. Polarisaatiovastuksella  $R_p$  tarkoitetaan kulmakerrointa  $\Delta E/\Delta I$  ( $\Delta E$  on potentiaalimuutos,  $\Delta I$  on vastaava virran muutos) (kuva 12).



Kuva 12. Polarisaatiokäyrä korroosipotentiaalın lähellä /3/.

Polarisaatiomittauksessa mitataan ensin teräksen korroosipotentiaali. Tämän jälkeen teräksen korroosipotentiaalia muutetaan (poikkeutetaan) määrällä  $\Delta E$  käyttäen ulkopuolista virran muutosta  $\Delta I$ . Polarisaatiovastus lasketaan lausekkeesta  $R_p = \Delta E / \Delta I$ .

Yksinkertaistettuna polarisaatiovastusmittauksessa mitataan sen virranvoimakkuuden suuruutta, mikä on syötettävä teräksen pintaan jotta teräs polarisoituu (sen sähkökemiallinen potentiaali siirtyy korroosipotentialista).

Yleensä virran muutos valitaan siten, että potentiaalın muutos ei ole suurempi kuin  $\pm 20$  mV, yleisesti käytetyt arvot ovat välillä 5 -10 mV.

Kun polarisaatiovastus tunnetaan, voidaan korroosiovirta laskea Stern-Geary yhtälöstä.

$$i_{corr} = \frac{B}{R_p} \quad (3)$$

missä B kokeellisesti määritetty kerroin  
 $\Delta E$  potentiaalın muutos  
 $\Delta I$  virran muutos  
 $R_p = \Delta E / \Delta I$ .

Raudoituksen ollessa aktiivisessa korroosiotilassa, kertoimelle B käytetään usein arvoa 26 mV ja passiivitulassa arvoa 52 mV. Käytännössä molemmissa tapauksissa voidaan käyttää arvoa 26 mV /14/.

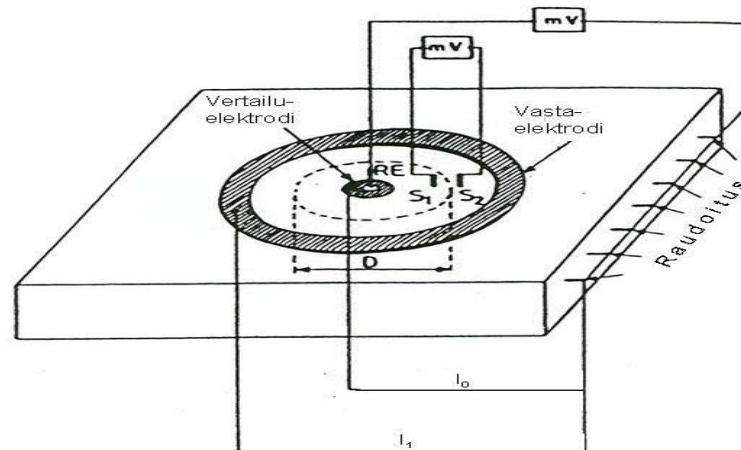
Kentällä tehtävissä mittauksissa ongelman muodostaa virran leviäminen laajalle alueelle vastaelektrodin ja raudoituksen välillä ilman erikoistoimenpiteitä. Tällöin polarisoituvan raudoituksen alaa ei tunneta eikä korroosion nopeutta ei voida tällöin määrittää Stern-Geary yhtälöstä.

Virran leviäminen riippuu betonin vastuksesta ja raudoituksen polarisaatiovastuksesta  $R_p$  (raudoituksen korroosiotilasta). Jos korroosio on käynnissä ja se on tasaista (polarisaatiovastus on pieni), keskittyy virta

lähes kokonaan vastaelektrodin alapuolelle. Jos raudoitus on passiivtilassa (polarisaatiovastus on suuri), virta leviää ilman erikoistoimenpiteitä laajalle alueelle. Tällöin mitattu polarisaatiovastus koskee raudoituksen alaa, joka voi olla jopa 100 kertaa suurempi kuin vastaelektrodin alapuolella olevan raudoituksen ala /3/.

Edellä mainittu virran leviäminen on kaupallisesti saatavissa laitteissa estetty käyttämällä ylimääräistä uloimpana sijaitsevaa vastaelektrodia (quard ring). Ulommasta vastaelektrodista syötetyllä virralla yhdensuuntaistetaan sisemmän vastaelektrodin ja raudoituksen välillä kulkeva virta. Tällä toimenpiteellä voidaan rajata raudoituksen pinta-ala, mihin sisemmän vastaelektrodin virta kohdistuu.

Kuvassa 13 on esitetty periaatekuva Gecor-laitteen toiminnasta. Mittalaitteessa virta  $I_0$  viedään keskellä olevasta vertailuelektrodista raudoitukseen. Vastaelektrodista tulevan virran  $I_1$  tehtävänä on estää virran  $I_0$  leviäminen mitta-alueen  $D$  ulkopuolelle. Virranvoimakkuuksia säädetään anturien  $S_1$  ja  $S_2$  välisen potentiaalinvuon avulla. Stationäärinen polarisaatiopotentiaali saadaan muuttamalla vertailuelektrodin ja raudoituksen välistä potentiaalia ohmisen potentiaalimuutoksen vähentämisen jälkeen. Tämän jälkeen korroosionopeus voidaan laskea Stern-Geary lausekkeesta.



Kuva 13. Periaatekuva lineaarisesta polarisaatiomittauksesta /18/.

Yksi mittaus kestää yleensä noin 3-5 minuuttia jos mittalaitteen anturia ei tarvitse kiinnittää rakenteeseen. Suoritettaessa mittausta pysty- ja alapinnoista, joudutaan anturi yleensä kiinnittämään rakenteeseen, mikä lisää mittausaikaa.

Galvanostaattinen pulssitekniikka perustuu samalle periaatteelle kuin lineaarinen polarisaatiotekniikka. Erona on se, että galvanostaattisessa pulssitekniikassa mitataan virtapulssin aiheuttamia polarisaatiopotentiaaleja, jolloin saadaan polarisaatiopotentiaalinvuon muutos ajan funktiona. Kun tunnetaan polarisaatiopotentiaalinvuon  $E_t$  muutos ajan funktiona, voidaan polarisaatiovastus  $R_p$ , kapasitanssi  $C_{dl}$  sekä ohminen vastus  $R_\Omega$  laskea sovittamalla mittaustulos lausekkeeseen (4). Tarkemmin määrittäminen on esitetty esim. lähteessä /17/.

$$E_t = I_p R_p \left( 1 - e^{-\frac{t}{R_p C_{dl}}} \right) I_p R_\Omega \quad (4)$$

Merkittävä etu galvanostaattisen pulssitekniikan käytöllä on sen vaatima lyhyt mittausaika. Yhden mittauksen vaatiman lyhyen ajan takia anturi voidaan pitää kädessä eikä sitä tarvitse kiinnittää rakenteeseen. Tämän johdosta isojen alueiden kartoitus nopeutuu huomattavasti (vrt. Gecor). Tanskalainen mittauslaite GalvaPulse perustuu galvanostaattiseen pulssitekniikkaan.

SP:ssä (Statens Provningsanstalt) tehdyissä vertailumittauksissa GalvaPulsella saadut korroosionopeudet ovat olleet usein huomattavasti suurempia (jopa monta kertaa suurempia) verrattuna Gecor mittalaitteen antamiin tuloksiin. Tämä havaittiin myös VTT:n tekemissä mittauksissa. Tang`in SP:ssä tekemissä selvityksissä eron aiheuttajaksi todettiin polarisaatiovastuksen kasvu ajan funktiona /12/.

Edellä mainitun johdosta SP:ssä on kehitetty omaa mittauslaitetta. SP:n kehittämä laite perustuu myös galvanostaattiseen pulssitekniikkaan. Mittalaitteessa polarisaatiovastus - aika yhteys mitataan usean sekunnin aikana ja tämän jälkeen polarisaatiovastus ekstrapoloidaan lineaarisesti logaritmisessa koordinaatistossa ajallisesti riittävän pitkään edellä mainitun ongelman eliminoimiseksi.

#### 4.3.3 Mittauksen suoritus käytännössä

Korroosionopeuden mittauksen vaiheet ovat pääosiltaan identtiset aikaisemmin esitetyn potentiaali-mittauksen vaiheiden kanssa.

Ennen mittauksen aloitusta on rekisteröitävä poikkeavat olosuhteet mitattavan alueen pinnasta myöhempää tulosten analysointia varten. Tällaisia ovat mm. pinnan kosteuden vaihtelu ja näkyvissä oleva raudoitus. Poikkeavat alueet on hyvä esittää piirustuksessa.

Mittauksen valmistelu ja suoritus käsittää yleensä seuraavat vaiheet ja niissä tehtävät toimenpiteet /7, 14/:

- Mittauskohteen, mittauslaitteen ja olosuhteita koskevien tietojen rekisteröinti.
- Raudoituksen aseman määrittäminen.
- Sähköisen kontaktin tekeminen raudoitukseen. Sähköinen kontakti raudoitukseen edellyttää raudoituksen paljastamista pieneltä alueelta ja virtajohdon kiinnitystä paljastettuun tankoon kuten potentiaalimittauksessa.
- Raudoituksen sähköisen kontaktin varmistaminen. Raudoituksen sähköinen kontakti voidaan tarkistaa mittaamalla äärimmäisten mittauspisteiden välinen vastus. Vastuksen tulisi olla pienempi kuin  $5 \Omega$ .
- Mittausalueen ja mittauskohtien valinta ja merkitseminen mittausalueella. Mittauskohdat on syytä merkitä mitattavan alueen pintaan rakenteen geometria huomioiden sopivassa koordinaatistossa (esim. tasavälein).
  - Aluksi voidaan tehdä yksittäisiä mittauksia muutamista kohdista korroosion voimakkuuden selvittämiseksi.
  - Edustavia mittauskohtia voidaan valita kunnoltaan vaihtelevista kohdista. Valinta voidaan tehdä silmämääräisten havaintojen tai potentiaalimittausten tulosten perusteella.
  - Mittauskohtia on syytä ottaa lohkeamia ja halkeamia sisältäviltä alueilta.
  - Mittauskohdassa ei saa olla läpäisemätöntä pinnoitetta.
  - Betonin pinnassa mittauskohdassa ei saa olla likaa tai epäpuhtauksia. Pinnan puhdistamiseen käytetyt aineet voivat vaikuttaa mittauksitulokseen.
  - Mittauskohta on yksittäisen raudoitustangon yläpuolella tai raudoitustankojen risteyskohdassa.
  - Mittauskohdassa anturit sijoitetaan raudoitustangon suuntaisesti.
- Mittausalueen kastelu hyvän sähköisen kontaktin aikaansaamiseksi. Betonipinnan on oltava riittävän kostea, jotta raudoituksen ja referenssielektrodin välille saadaan riittävän hyvä kontakti. Käytännössä

hyvä kontakti saadaan asettamalla kostea sieni referenssielektrodin ja betonipinnan väliin. Laittamalla useampia sieniä päällekkäin voidaan mittaus tehdä epätasaisesta tai lievästi kaarevasta betonipinnasta.

- Uusittaessa mittauksia aikaisemmin mitatusta kohdasta, voi vähäinen anturin paikan muuttuminen vaikuttaa mittaustulokseen. Mittaustuloksen muutos voi olla huomattava pistekorroosion ollessa kysymyksessä.

Käytännössä monesti ongelmia aiheuttaa rajauksen epäonnistuminen. Tällöin mittaus on uusittava. Usein mittaushetkellä joudutaan siirtämään.

#### 4.3.4 Tulosten tulkinta ja mahdollisia virhelähteitä

Korroosionopeuden mittaustuloksen tulkitsemiseksi ovat mm. järjestöt, laitevalmistajat ja eri tutkijat antaneet ohjeita. Alussa taulukossa 1 (sivu 12) on esitetty ohjeita syöpymisnopeuden perusteella. Taulukoissa 5 ja 6 on esitetty ohjeita korroosionopeuden tulkitsemiseksi mittaustulosten perusteella.

Taulukko 5. Ohjeita korroosionopeuden tulkitsemiseksi /14/.

Korroosiovirta $I_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Korroosionopeus (poikkileikkauksen syöpymisnopeus) $\mu\text{m}/\text{v}$	Korroosionopeuden tulkinta
0,1 – 0,2 saakka	1 – 2 saakka	erittäin pieni tai passiivitila
0,2 – 0,5	2 - 6	pienestä keskimääräiseen
0,5 – 1,0	6 - 12	keskimääräisestä suureen
> 1,0	> 12	suuri

1) Syöpymisen suuruuden määrittäminen perustuu Faradayn lakiin ja oletukseen että korroosiovirran tiheys on vakio.

Taulukko 6. Gecor – laitteen valmistajan antamat ohjeet korroosionopeuden arvostelua varten.

Korroosiovirta $I_{corr}$ $\mu\text{A}/\text{cm}^2$	Korroosionopeuden tulkinta
< 0,1	passiivitila
0,1 – 0,5	pieni
0,5 – 1,0	keskinkertainen
> 1,0	suuri

Korroosionopeuden mittauksen yhteydessä mitataan aina myös korroosipotentiaali ja betonin ominaisvastus, joita voidaan käyttää hyväksi arvioitaessa korroosionopeuden mittauksen luotettavuutta.

Mittauksia tehtäessä ja tuloksia arvioitaessa on seuraavia seikkoja otettava huomioon /14/:

- Mittausten suorittamista tulisi välttää jos lämpötila ja suhteellinen kosteus ovat korkeita (lämpötila suurempi kuin 50°C ja suhteellinen kosteus 80 % RH). Lämpötilan ollessa pienempi kuin 5°C,



tavanomaisia normaaleissa olosuhteissa (10°C–25°C) esiintyviä korroosionopeuksia ei saavuteta. Korroosionopeusmittareita ei pidä käyttää jäätävissä olosuhteissa.

- Korroosionopeuden mittaaminen perustuu tasaiseen korroosioon, minkä johdosta pistemäisen korroosion esiintyminen vaikuttaa mittauksen tarkkuuteen. Pistemäisellä korroosiolla on seuraavat vaikutukset:
  - korroosiovirta ei ole tasaisesti jakautunut raudoituksen pinnalle jolloin paikallinen poikkeavuuksien pieneminen aliarvioidaan,
  - korroosionopeus on paikallisesti erittäin suuri (5-10 kertaa suurempi) verrattuna tasaiseen korroosioon.
- Korroosionopeus saavuttaa suurimman arvonsa korroosion alkamisesta ensimmäisten halkeamien syntymiseen mennessä ja hidastuu tämän jälkeen. Tämä johtuu paikallisten korroosiokehtien lisääntymisestä ja niiden yhtymisestä. Seurauksena on yleiskorroosio, jolloin muodostuu halkeamien syntymisen edellyttämä määrä korroosiotuotteita.
- Huomattavia virheitä voi syntyä jos sähkökemiallisen käsittelyn, kuten katodisen suojauksen tai alkaloinnin vaikutus ei ole hävinnyt.
- Epätarkkuutta voi syntyä happiköyhissä olosuhteissa, jos korroosio on aikaisemmin ollut käynnissä olosuhteissa missä hapetta on ollut saatavilla. Esim. vedenpitävä kalvo on asennettu betoniin joka on myöhemmin kyllästynyt vedellä.
- Korroosionopeutta voi olla vaikea määrittää, jos korroosio etenee nopeasti hapen puutteen rajoittaessa virtaa.

Tangin mukaan seuraavat seikat aiheuttavat korroosionopeuden mittaustuloksissa epätarkkuutta ja tarvitsevat lisätutkimuksia /12/:

- Vakion B arvo ei välttämättä ole mittauksissa käytetty 26 mV vaan arvo vaihtelee tapauksesta riippuen. Jos raudoituksen korroosio on käynnissä, vakion B arvon tulisi tehtyjen selvitysten mukaan olla välillä 8 – 17 mV. Vakion B arvo 26 mV voi johtaa korroosionopeuden 2-3 kertaiseen yliarviointiin.
- Polaroidun alueen raudoituksen pinta-ala ei välttämättä ole oikea. Nykyisin koko ympyrän sisäpuolella oleva raudoituksen pinta-ala oletetaan polarisoituvaksi alaksi. Kuitenkin polarisoituva pinta-ala on mieluummin ympyrän sisäpuolella oleva se puoli raudoituksen pinta-alasta, mikä on vastaelektrodin puolella. Tämän johdosta todellinen korroosionopeus voi olla kaksi kertaa suurempi.
- Lähellä toisiaan ja päällekkäin olevien raudoitustankojen vaikutus kentällä tehtävissä mittauksissa on epäselvä.
- Pistemäisen korroosion ollessa kysymyksessä todellinen korroosionopeus voi olla 2 – 10 kertaa suurempi.
- Kentällä tehtävissä mittauksissa häiriöitä voivat aiheuttaa hajavirrat ja katodiset virrat.

Edellä mainituista seikoista johtuen voidaan Tangin mukaan sähkökemiallista polarisaatiomittausta tällä hetkellä pitää puoli-kvantitatiivisena mittauksena.

Sääolosuhteet vaikuttavat ulkona olevissa rakenteissa, kuten silloissa, korroosionopeuteen. Jos tehdään ainoastaan yksi mittaus ja sääolosuhteet mittaushetkellä ovat poikkeavat (esim. kuivat olosuhteet), mittaustulokset voivat aiheuttaa vääriä johtopäätöksiä koskien raudoituksen korroosiota.

---

Mainitun ongelman välttämiseksi ehdotetaan Contecvet tutkimusohjelman tuloksissa seuraavat vaihtoehtoiset menettelyt:

- tehdään useita mittauksia tietyssä ajanjaksona
- tehdään yksittäinen mittaus ja korjataan tulosta mittauksen yhteydessä irrotetusta betoninäytteestä tehdyn vastusmittauksen tuloksen perusteella.

Kun tehdään useita mittauksia, optimi tilanne on tehdä mittauksia vähintään 4 kappaletta vuoden aikana ottaen huomioon sääolosuhteet. Mittauksia tehdään ajankohtina, jolloin vallitsevat sääolosuhteet ennen mittausta ja sen aikana ovat seuraavat:

- kuivissa olosuhteissa ulkolämpötilan ollessa alhainen
- ulkolämpötilan ollessa alhainen ja vähintään vuorokauden, mieluummin kahden, ajan kestäneen sateen jälkeen
- kuivissa olosuhteissa ulkolämpötilan ollessa korkea
- ulkolämpötilan ollessa korkea ja vähintään vuorokauden, mieluummin kahden, ajan kestäneen sateen jälkeen.

Suorittamalla mittaukset edellä mainituissa olosuhteissa, saadaan tuloksista korroosionopeudelle lähes suurin ja pienin arvo. Mittaustulosten keskiarvo on edustava arvo korroosionopeudelle.

Kun tehdään yksittäinen mittaus, edustavan tuloksen saaminen on paljon epävarmempaa. Yksittäisen mittaustuloksen mahdollisimman tarkkaa tulkittamista varten suositellaan, että mittauksen yhteydessä irrotetaan rakenteesta betoninäytteitä läheltä jotakin mittausta. Laboratoriossa näytteistä määritetään niiden ominaisvastuksen minimiarvo ja ominaisvastuksen arvon 85 %:n suhteellisessa kosteudessa. Kentällä mitatun ominaisvastuksen ja laboratoriossa mitattujen ominaisvastusten sekä kentällä mitatun korroosionopeuden perusteella arvioidaan korroosionopeuden suurin ja pienin arvo ( $I_{\text{corr}} - \rho$  piirroksen avulla).

#### **4.4 Menetelmien arviointia**

##### *4.4.1 Olosuhteiden vaikutus mitattuihin tuloksiin*

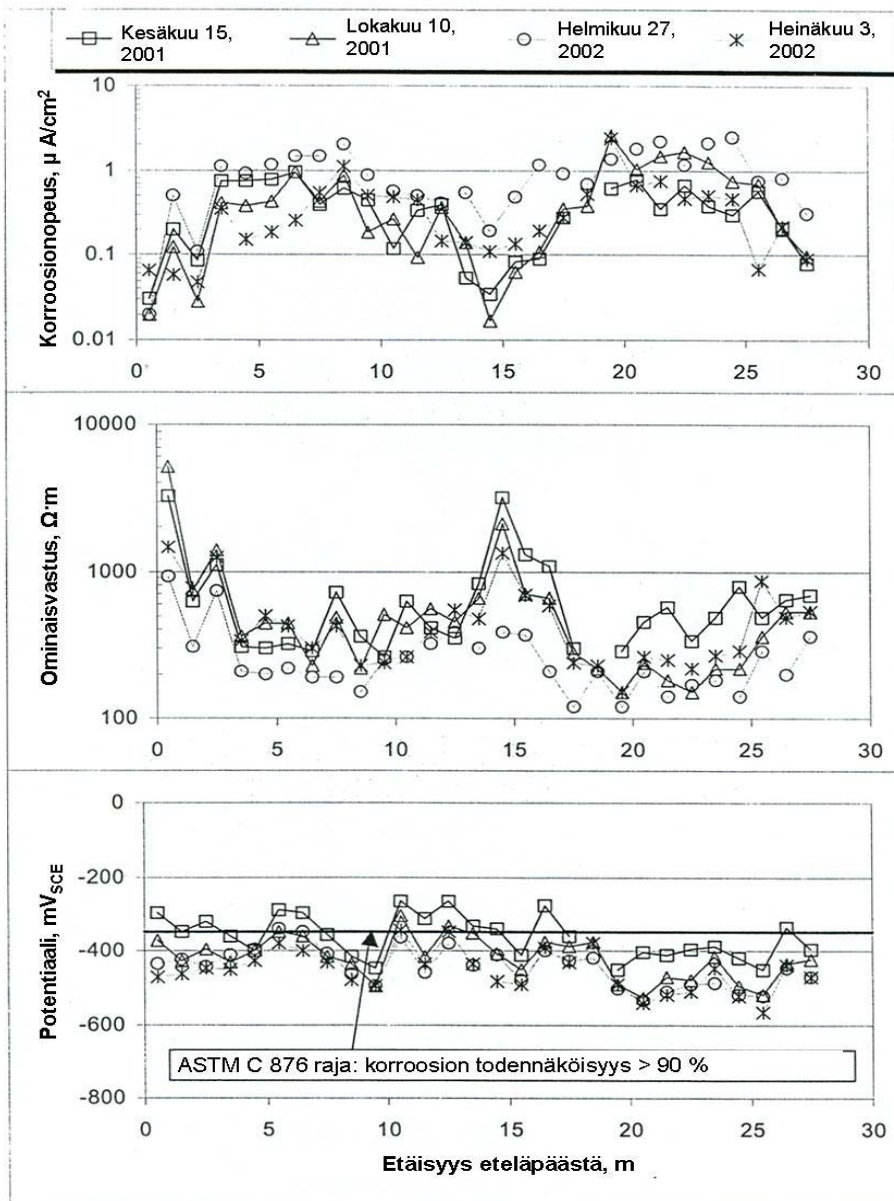
Kuten aikaisemmin on todettu, olosuhteet ennen mittauksia ja mittausten aikana vaikuttavat tuloksiin. Tämä vaikeuttaa joissakin tapauksissa tulosten tulkintaa.

Tang /12/ on suorittanut kahdella vanhalla sillalla reunapalkin korroosiomittauksia eri vuodenaikoina ja verrannut tuloksia. Vanhempi silta oli rakennettu 1937 ja siltaa on korjattu. Toinen silta oli rakennettu 1955.

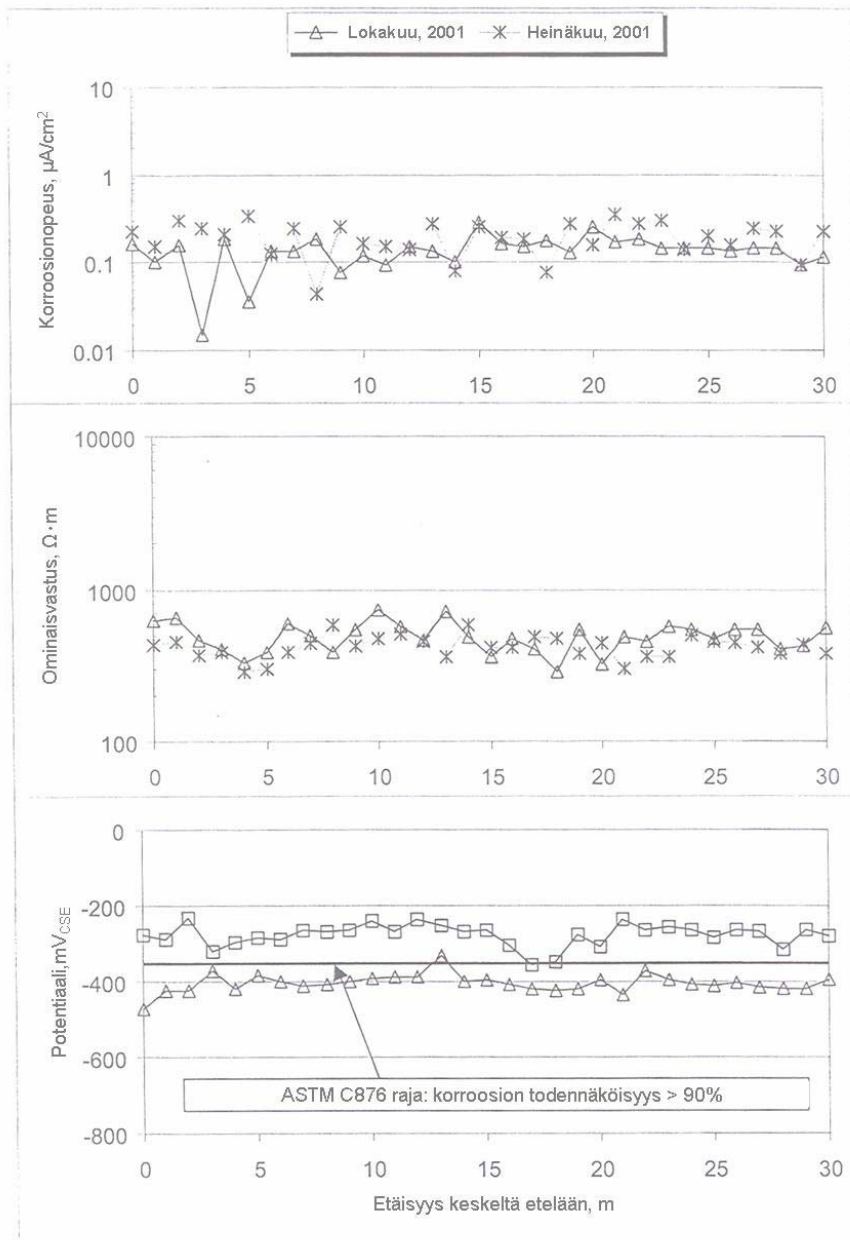
Mittaukset suoritettiin reunapalkin yläpinnasta. Taulukossa 7 on esitetty sääolosuhteet mittauspäivinä ja 3 päivää ennen mittausta. Mittaustulokset on esitetty kuvissa 14 ja 15.

Taulukko 7. Sää olosuhteet mittausajankohtina /12/.

Mittauspäivä	Sää mittaushetkellä	Mittaushetkeä edeltävä sää
15.06.2001	Pilvinen, ajoittain aurinkoinen Lämpötila 21-23°C, RH 60-65 %	Ei sadetta 3 edellisenä päivänä
10.10.2001	Sateinen ja tuulinen Lämpötila 11-13°C, RH > 90 %	Satoi ajoittain 3 edellisenä päivänä
27.02.2002	Sateinen ja tuulinen Lämpötila 11-13°C, RH > 90 %	Vuorottain lumi- ja vesisadetta 3 edellisenä päivänä
03.07.2002	Kirkas ja sadekuuroja Lämpötila 18-20°C, RH 75-80 %	Samanlainen sää 3 edellisenä päivänä kuin mittauspäivänä



Kuva 14. Sillan N29 (Åskloster) mittaustulokset /12/.



Kuva 15. Sillan N74 (Derome) mittaustulokset /12/.

Sillan N29 korroosionopeuden mittaustuloksista voidaan havaita, että korroosionopeus on huomattava suuri 20 - 25 m etäisyydellä eteläpäästä. Tulos oli todettavissa myös silmämääräisesti. 10-15 m etäisyydellä eteläpäästä korroosionopeus oli pieni johtuen luultavasti tehdystä korjauksesta. Tuloksissa on huomattavaa, että korroosionopeuden profiili sillan eri kohdissa ei merkittävästi muutu vuodenajan vaihtelun seurauksena, vaikka korroosionopeus kasvoi talvella 2002. Korroosionopeuden kasvu johtui suurelta osalta kosteista sääolosuhteista ja tien suolauksesta.

Ensimmäisen mittauksen jälkeen kesäkuussa 2001 sillan N29 reunapalkin yläpinta impregnoitiin välillä 3-6 m. Jälkeenpäin tehtyjen mittausten tulosten mukaan käsittelyn johdosta korroosionopeus pieneni aluksi jonkin verran, mutta talvella olosuhteiden ollessa erittäin kosteat, korroosionopeus kasvoi taas.

---

Sillan N74 korroosionopeus on tulosten mukaan suhteellisen pieni ja tasainen.

Sillan N29 betonin ominaisvastuksen mittaustulosten mukaan ominaisvastus riippuu merkittävästi mitausajankohdan sääolosuhteista. Mitä kuivempi ilma, sitä suurempi on vastus. Ensimmäisen mittauksen aikana kesäkuussa 2001 olosuhteet olivat kuivimmat ja ominaisvastus oli tällöin suurin. Helmikuussa 2002 olosuhteet olivat kosteimmat ja ominaisvastus oli tällöin pienin.

Impregnoinnin jälkeen impregnoidulla alueella betonin vastus kasvoi jonkin verran, mutta pieneni talvella kuten impregnoimattomassa alueessa. Tulosten perusteella heräsi kysymys, toimiiko käytetty impregnointiaine kylmässä ja pakkasolosuhteissa. Mittauksen suoritusta impregnointi ei näytä haittaavan.

Sillan N74 mitatut ominaisvastukset olivat tasaisia mikä viittaa siihen että betoni on homogeenista.

Molemmista silloista tehtyjen mittausten tulosten mukaan potentiaalien arvot (lukemat) olivat lähellä tai pienempiä kuin -350 V (CSE), joka ASTM C 876 standardin mukaan merkitsee, että korroosio on 90 % todennäköisyydellä käynnissä. Tulos on yhtäpitävä korroosionopeusmittausten tulosten kanssa, mutta potentiaalimittauksen tuloksesta ei voida sanoa mitään korroosion nopeudesta. Korroosionopeusmittausten tulosten mukaan korroosio on sillassa N29 merkittävästi vakavampi kuin sillassa N74. Myös silmämääräiset havainnot vahvistivat tämän.

#### 4.4.2 Menetelmien soveltuvuus käytännössä

Silmämääräisesti raudoituksen käynnissä olevan korroosion havaitseminen edellyttää, että rakenteen pintaan ilmestyy ruosteläikkiä tai ruostuvan raudoituksen kohdalta betonipeitteeseen syntyy halkeama. Tällöin raudoituksen korroosio voi olla edennyt jo varsin pitkälle.

Korroosion sähköisiä mittaamenetelmiä käyttämällä on mahdollista saada selville raudoituksen korroosiotila huomattavasti aikaisemmin, ennen kuin rakenteen pinnassa on mitään havaittavia merkkejä korroosiosta.

Seuraavassa on tarkasteltu esitettyjen menetelmien soveltuvuutta käytäntöön.

Potentiaalimittaus soveltuu rajoituksistaan huolimatta hyvin kentällä tehtäviin mittauksiin. Potentiaalimittauksen vaatima laitteisto on suhteellisen yksinkertainen, sen käytön oppii nopeasti eikä ylläpito ei vaadi merkittävää asiantuntemusta. Laitteisto on toki pidettävä kunnossa ja kalibroitava määrävälein.

Potentiaalimittaus on suhteellisen helppo ja nopea suorittaa. Tämä mahdollistaa laajan alueen kartoittamisen työpäivän aikana. Koska referenssielektrodi on kooltaan pieni, mittaus voidaan tehdä myös epätasaisista (piikatuista) ja kaarevista (pyöreä pilari) betonipinnoista.

Potentiaalimittauksen avulla voidaan päätellä luotettavasti ainoastaan onko korroosio käynnissä vai ei, mikä sinänsä on jo arvokas tieto. Lisäksi voidaan tulosten perusteella tehdä karkeita arvioita korroosion voimakkuudesta.

Koska mittaus on nopea suorittaa, seuraamalla mittaustulosten muutosta ja mittauspisteiden välimatkaa tihentämällä on myös mahdollista paikallistaa kloridien aiheuttama paikalliskorroosio.

Ominaisvastuksen mittauksen vaatima laitteisto (nelipistemittaus) on myös suhteellisen yksinkertainen eikä sen ylläpito vaadi merkittävää asiantuntemusta.

Ominaisvastuksen mittaus rakenteen pinnasta on suhteellisen helppo ja nopea suorittaa. Mittauspaikan valinnan suhteen on kuitenkin oltava tarkka. Suurin ongelma käytettäessä nelipistemittausta aiheutuu raudoituksesta, joka voi antaa harhaanjohtavan korkeita tuloksia.

Käytännössä betonin ominaisvastuksen mittausta erillisenä mittauksena ei kannata tehdä, sillä sen tulokista saatava hyöty on vähäinen. Betonin ominaisvastuksen mittausta voidaan käyttää yhdessä muiden menetelmien. Käytännössä betonin ominaisvastus mitataan korroosionopeuden mittauksen yhteydessä.

Korroosionopeuden mittaus antaa paljon enemmän tietoa raudoituksen tilasta kuin muut käsitellyt menetelmät. Korroosionopeuden mittaus on ainoa menetelmä, jonka tulosten perusteella voidaan tehdä päätelmiä korroosion nopeudesta ja arvioita raudoituksen poikkileikkauksen pienenemistä. Vaikka korroosion nopeus tunnetaan, on jäännöspoikkileikkauksen arviointi yleensä mahdotonta, sillä harvoin tunnetaan korroosion alkamisajankohta.

Korroosionopeuden mittaus kenttäolosuhteissa on huomattavasti hitaampi tehdä kuin potentiaalimittaus. Mittaus vaatii enemmän valmisteluja, mm. raudoituksen asema ja koko on selvitettävä ennen mittausta. Koska yksittäinen mittaus ottaa enemmän aikaa, kannattaa mittauskohtien valinta tehdä huolella. Mittauskohtien valintaa tehtäessä on myös huomattava, että mittauskohhta ei voi olla huomattavan epätasainen eikä sen kaarevuussäde voi olla pieni. Tämä vaikeuttaa mittaamista piikatuista pinnoista ja pyöreistä pilareista.

Merkittävä etu on se, että käytettävissä olevat korroosionopeuden mittalaitteet mittaavat myös potentiaalिन ja ominaisvastuksen. Korroosionopeuden mittalaitteiden kehittyessä, on ilmeistä että tulevaisuudessa menetelmän käyttö tulee lisääntymään. Tällä hetkellä käyttöä rajoittava merkittävä tekijä on mittalaitteiden korkea hinta.

Yleisesti mittauksia suorittavalta henkilöstöltä voidaan edellyttää seuraavia seikkoja:

- Kokemusta kuntotutkimuksista. Kokemus on avuksi valittaessa mittauspäikkoja. Siltojen betonirakenteiden mittauskohtien valinnassa on oltava perillä siltojen vaurioista ja niiden esiintymiskohdista, jotta mittausalueet ja kohdat voidaan valita järkevästi.
- Tuntevat laitteiston ja osaavat käyttää sitä. Laitteiden kalibroinnista huolehtiminen on tärkeää.
- Tuntevat menetelmän rajoitukset ja mahdolliset virhelähteet.
- Tuntevat tulosten tulkintaan vaikuttavat tekijät.

Potentiaalimittauksesta ja korroosionopeuden mittauksesta on merkittävä apu siltojen kuntotutkimuksissa. Paras hyöty saavutetaan silloin, kun näitä käytetään yhdessä muiden kuntotutkimusmenetelmien kanssa.

Yleisesti sähkökemiallisten menetelmien heikkous on siinä, että mikään menetelmä ei anna luotettavaa informaatiota todellisesta raudoituksen poikkileikkauksen tilasta. Lisäksi sääolosuhteet mittaushetkellä vaikuttavat merkittävästi tuloksiin, mikä on otettava huomioon tuloksia arvioitaessa.

Tällä hetkellä ainoa luotettava tapa selvittää raudoituksen todellinen kunto on visuaalinen tarkastus. Tämän johdosta on suositeltavaa, että mittausten yhteydessä tehdään myös silmämääräisiä havaintoja mittavasta kohteesta ja raudoituksen kunto tarkistetaan paikallisesti silmämääräisesti.

---

## 5 YHTEENVETO

Betonisiltojen ikääntyessä niissä ilmenevien vaurioiden määrä kasvaa ja korjaustarve lisääntyy. Raudoituksen korroosio on yleinen betonisilloissa ilmenevä vaurio. Oikean korjausajankohdan ja korjaamistarpeen määrittäminen edellyttää rakenteen kunnan luotettavaa tuntemista. Betonirakenteen kunnan tutkimisessa käytetään sekä ainetta rikkovia että ainetta rikkomattomia tutkimusmenetelmiä. Koska raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen prosessi, on luonnollista että tähän perustuvat ainetta rikkomattomat tutkimusmenetelmät on otettu käyttöön raudoituksen korroosiotilan arvioinnissa.

Betoni antaa sisässään olevalle teräkselle sekä fysikaalisen ja kemiallisen suojan. Fysikaalinen suoja estää korroosiolle välttämättömien aineiden, veden ja hapen, tai korroosiota edistävien aineiden, betonisilloissa lähinnä kloridien, pääsyn raudoituksen läheisyyteen. Betonin kemiallinen suojavaikutus johtuu betonin emäksisyydestä ja teräksen ominaisuudesta muodostaa emäksisessä ympäristössä pinnalleen tiivis rautaoksidien muodostama passiivikalvo. Tiiviillä passiivikalvolla on erittäin korkea polarisaatiovastus, minkä johdosta teräksen korroosionopeus on olematon.

Korroosio voi alkaa kun passiivikalvo rikkoutuu betonin emäksisyyden laskiessa karbonatisoitumisen johdosta tai kloridien tunkeutuessa betoniin ja kloridipitoisuuden noustessa ns. kynnyksarvon yläpuolelle teräksen läheisyydessä. Passiivikerroksen rikkouduttua teräksen pintaan muodostuu syöpyvä kohta. Syöpyvä kohta toimii anodina ja tässä kohdassa tapahtuvaa reaktiota kutsutaan anodireaktioksi. Lähellä oleva syöpymätön kohta muodostaa katodin. Betonin huokosissa oleva kosteus yhdistää anodin ja katodin ja muodostaa mikropiirin.

Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio esiintyy yleensä koko sillä alueella missä rauditus on kontaktissa karbonatisoituneeseen betoniin, puhutaan yleiskorroosiosta. Kloridit rikkovat suojakerroksen tavallisesti paikallisesti. Kloridien aiheuttama korroosio on siksi yleensä paikallista, puhutaan paikallis-korroosiosta.

Korroosion käynnistyttyä sen nopeus ei ole ulko-olosuhteissa vakio, vaan riippuu merkittävästi betonin suhteellisesta kosteudesta ja lämpötilasta, minkä johdosta on erotettava toisistaan hetkellinen korroosionopeus ja keskimääräinen korroosionopeus. Hetkelliseen korroosionopeuteen vaikuttavat mittaushetkellä vallitsevat olosuhteet, lämpötila ja kosteus. Keskimääräinen korroosionopeus on keskimääräinen arvo pitkän ajan kuluessa, joka voidaan määrittää joko painon häviön perusteella laboratoriossa tai poikkeileikkauksen häviönä kentällä. Keskimääräinen korroosionopeus on nk. ”insinöörin arvo”, jota tarvitaan ja käytetään arvioitaessa rakenteen vaurioiden etenemisnopeutta sekä käyttöikäkalkelmien paikkansa pitävyyttä.

Betonissa olevat halkeamat nopeuttavat kloridien tunkeutumista raudoituksen pintaan ja nopeuttavat korroosion käynnistymistä. Kun korroosion aiheuttajana on kloridien tunkeutuminen raudoituksen tasalle halkeaman kautta, pidetään korroosion alkamisajankohtana yleensä sitä hetkeä jolloin halkeamakohta joutuu ensimmäisen kerran kosketuksiin kloridien kanssa.

Halkeamassa tapahtuvan kloridien aiheuttaman korroosion etenemiseen vaikuttavat merkittävästi betonipeitteen paksuus ja tiiviys. Tutkimustulosten mukaan mikäli betonipeitteen paksuus ja tiiviys ovat riittäviä antamaan pitkäaikaisen suojan halkeamattomassa betonissa kloridien aiheuttamaa korroosiota vastaan, on vastaavissa olosuhteissa samassa betonipeitteessä olevassa poikittaishalkeamassa aina halkeamaleveyteen 0,4 mm saakka odotettavissa ainoastaan pintaruostumista. Mikäli halkeamattomassa

betonissa on odotettavissa voimakasta korroosiota, ilmenee halkeamassa korrosio ainoastaan aikaisemmin.

Poikittaishalkeamassa käynnistyneen kloridien aiheuttaman korroosion huomattava hidastuminen tai joskus lähes pysähtyminen johtuu halkeaman itsetiivistymisestä ja halkeaman täyttymisestä korrosio-  
tuotteista, jolloin kloridien ja hapen pääsy raudoitukseen vaikeutuu. Edellytyksenä ovat pienen halkeama-  
koon lisäksi edellä mainitut riittävän paksu ja tiivis betonipeite. Koska todellisuudessa varsinkin vanhojen  
siltojen betonirakenteissa mainitut ehdot ovat harvoin voimassa, on halkeamassa tapahtuvaan kloridien  
aiheuttamaan korroosioon suhtauduttava varovaisuudella.

Pitkittäishalkeamassa kloridien aiheuttama korrosio alkaa aikaisemmin ja korroosionopeus on suurempi  
kuin poikittaishalkeamassa. Raudoitustangon suuntaisessa pitkittäishalkeamassa kloridien aiheuttama  
korrosio on yleensä aina nopeaa.

Yleisimmin käytössä olevat ja kenttäolosuhteisiin soveltuvat raudoituksen korroosion  
tutkimusmenetelmät ovat potentiaalimittaus, betonin ominaisvastuksen mittaus ja korroosionopeuden  
mittaus.

Potentiaalimittaus on vanhin ja yleisimmin käytetty raudoituksen korroosiotilan tutkimusmenetelmä.  
Potentiaalimittaus perustuu betonissa olevan raudoituksen toimimiseen elektrodina elektrolyytissä, jolloin  
raudoituksen suhteellinen potentiaali voidaan määrittää yhdistämällä se tunnetun potentiaalın omaavaan  
referenssielektrodiin. Kun referenssielektrodi asetetaan betonin pinnalle, syntyy sähköinen yhteys kostean  
betonin muodostaman sillan kautta. Kun referenssielektrodiä liikutellaan betonin pinnalla, muuttuu  
potentiaali sen mukaan mikä on raudoituksen korroosiotila referenssielektrodin kohdalla.

Yleisimmin käytetty mittaustapa on nk. pistemittaus. Laaja-alaisten pintojen, kuten siltojen kansien,  
mittausta varten on olemassa useita elektrodeja käsittäviä työnnettäviä mittaussuunnuja, joissa tulokset  
tallentuvat vaunussa olevan rekisteröintilaitteen muistiin.

Potentiaalimittausten tulosten tulkinnassa käytetään yleisesti standardia ASTM C 876. Käytännön koke-  
musten mukaan, riippumatta olosuhteista, potentiaaliarvojen merkittävä poikkeaminen toisistaan viittaa  
korroosion käynnissäoloon. Potentiaalimittauksen avulla voidaan päätellä luotettavasti ainoastaan onko  
korrosio käynnissä vai ei. Korroosion voimakkuudesta voidaan tehdä vain karkeita arvioita.

Potentiaalimittaus soveltuu rajoituksistaan huolimatta hyvin kentällä tehtäviin mittauksiin. Potentiaali-  
mittauksen vaatima laitteisto on suhteellisen yksinkertainen, sen käytön oppii nopeasti eikä ylläpito ei  
vaadi merkittävää asiantuntemusta. Potentiaalimittaus on suhteellisen helppo ja nopea suorittaa. Tämä  
mahdollistaa laajan alueen kartoittamisen työpäivän aikana.

Betonin ominaisvastus on keskeinen raudoituksen korroosioon vaikuttava tekijä. Betonin ominaisvastus  
vaikuttaa korroosiovirran voimakkuuteen ja siten korroosion nopeuteen. Ominaisvastuksen kasvaessa  
korroosiovirran voimakkuus pienenee. Korroosionopeuden ja ominaisvastuksen välinen riippuvuus  
tunnetaan karkeasti kokeellisesti rakenteista tehtyjen mittausten perusteella.

Betonin ominaisvastus riippuu betonin koostumuksesta, betonin kosteudesta ja lämpötilasta. Betonin laa-  
dun osalta ominaisvastukseen vaikuttavat merkittävästi sementin laatu ja määrä sekä vesisementtisuhde,  
betonin huokosten koko ja tilavuusosuus sekä huokosissa olevan veden koostumus (alkalipitoisuus,



kloridipitoisuus). Betonin laadusta ja ympäröivistä olosuhteista riippuen betonin ominaisvastus voi vaihdella huomattavasti. Ominaisvastus on suuri jos betoni on kuiva ja sen vesisementtisuhde on pieni.

Betonin ominaisvastus voidaan määrittää suoraan rakenteen pinnasta tai rakenteesta irrotetuista betoninäytteistä laboratoriossa. Kaikissa kenttäolosuhteissa käytettävissä betonin ominaisvastuksen mittaamenetelmissä on vähintään kaksi elektrodia, joista toinen voi olla raudoitustanko. Mittauksessa elektrodien välille asetetaan jännite, syntyvä virran muutos mitataan ja ohmisen vastuksen muutos saadaan virran ja jännitteen muutosten suhteena. Betonin ominaisvastus saadaan kertomalla mitattu vastus mittalaitteen anturin vakiolla.

Kenttäolosuhteissa yleisin mittaamenetelmä on 4-elektrodimenetelmä. Menetelmässä on neljä toisistaan samalla etäisyydellä olevaa elektrodia betonin pinnassa. Mitattaessa vaihtovirta johdetaan ulompiin elektrodeihin ja potentiaali mitataan kahden sisemmän elektrodin väliltä.

Ominaisvastuksen mittaustulosten tulkinta perustuu kokemukseen. Eri lähteissä on ominaisvastuksen perusteella esitetty arvioita korroosionopeudesta.

Ominaisvastuksen mittaus rakenteen pinnasta on suhteellisen helppo ja nopea suorittaa. Suurin ongelma käytettäessä nelipistemittausta aiheutuu raudoituksesta, joka voi antaa harhaanjohtavan korkeita tuloksia.

Käytännössä betonin ominaisvastuksen mittausta erillisenä mittauksena ei kannata tehdä, sillä sen tulokista saatava hyöty on vähäinen. Betonin ominaisvastuksen mittausta suositellaan käytettävän yhdessä muiden menetelmien.

Korroosionopeuden mittaus on uusin raudoituksen korroosiotilan tutkimusmenetelmä. Korroosionopeuden mittauksen tulosten perusteella voidaan tehdä päätelmiä korroosion nopeudesta ja arvioida raudoituksen poikkileikkauksen pienenemistä.

Emäksisessä ympäristössä teräksen pinnalla on tiivis rautaoksidien muodostama passiivikalvo jolla on erittäin korkea polarisaatiovastus, minkä johdosta teräksen korroosionopeus on olematon. Korroosio-kohdissa polarisaatiovastus on pieni passiivikalvon rikkouduttua. Tämä polarisaatio ominaisuus muodostaa perustan sähkökemiallisille korroosionopeuden mittaustekniikoille.

Korroosionopeuden mittaamiseksi on olemassa useita menetelmiä. Kaupallisesti saatavien kenttäolosuhteissa tehtäviin mittauksiin soveltuvien mittalaitteiden toiminta perustuu joko lineaariseen polarisaatiovastukseen tai galvanostaattiseen pulssitekniikkaan.

Lineaarinen polarisaatiovastusmenetelmä perustuu havainnolle, että polarisaatiokäyrä on lineaarinen korroosipotentiaalin lähellä. Polarisaatiovastus voidaan määrittää metallipinnan potentiaalin muutoksen vastukseksi, kun ulkopuolinen virta muuttuu. Polarisaatiomittauksessa mitataan ensin teräksen korroosipotentiaali. Tämän jälkeen teräksen korroosipotentiaalia muutetaan (poikkeutetaan) käyttäen ulkopuolista virran muutosta. Polarisaatiovastus saadaan tämän jälkeen potentiaalin muutoksen suhteena virran muutoksen. Kun polarisaatiovastus tunnetaan, voidaan korroosiovirta laskea Stern-Geary yhtälöstä.

Galvanostaattisessa pulssitekniikassa mitataan virtapulssin aiheuttamia polarisaatiopotentiaaleja, jolloin saadaan polarisaatiopotentiaalin muutos ajan funktiona. Kun tunnetaan polarisaatiopotentiaalin muutos ajan funktiona, voidaan polarisaatiovastus laskea.

Käytännössä merkittävä etu galvanostaattisen pulssitekniikan käytöllä on sen vaatima lyhyt mittausaika. Lineaarista polarisaatiovastusmittausta käytettäessä yksi mittaus kestää huomattavasti pitempään.

Korroosionopeuden mittaus antaa enemmän tietoa raudoituksen tilasta kuin muut käsitellyt menetelmät. Korroosionopeuden mittaus on ainut menetelmä, jonka tulosten perusteella voidaan tehdä päätelmiä korroosion nopeudesta ja arvioita raudoituksen poikkileikkauksen pienenemistä. Korroosionopeuden tunteminen on hyödyllistä arvioitaessa rakenteen korjaustarvetta ja korjausajankohtaa. Korroosionopeuden perusteella voidaan tarvittaessa myös päätellä korjaustyön onnistuminen. Vaikka korroosion nopeus tunnetaan, on jäännöspoikkileikkauksen arviointi yleensä mahdotonta, sillä harvoin tunnetaan korroosion alkamisajankohta.

Korroosionopeuden mittalaitteiden kehittyessä, on ilmeistä että tulevaisuudessa menetelmän käyttö tulee lisääntymään. Tällä hetkellä käyttöä rajoittava merkittävä tekijä on mittalaitteiden korkea hinta.

Korroosiomittauksia suorittavalta henkilöstöltä on edellytettävä kokemusta betonirakenteiden kunto-tutkimuksista. Betonisilloissa mittauskohtien valinnassa on oltava perillä siltojen vaurioista ja niiden esiintymiskohdista, jotta mittausalueet ja kohdat voidaan valita järkevästi. Lisäksi mittauksen suorittajien on tunnettava laitteisto, mittausmenetelmän rajoitukset ja mahdolliset virhelähteet sekä mittauksien tulosten tulkinta.

Sähkökemiallisten korroosion tutkimusmenetelmien etu siinä, että näitä käyttämällä on mahdollista saada selville raudoituksen käynnissä oleva korroosio ennen kuin rakenteen pinnassa on ulkoisia merkkejä korroosion käynnissäolosta, jolloin korroosio voi olla edennyt jo pitkälle. Menetelmien heikkous on siinä, että mikään menetelmä ei anna luotettavaa informaatiota todellisesta raudoituksen poikkileikkauksen tilasta. Lisäksi sääolosuhteet mittaushetkellä vaikuttavat merkittävästi tuloksiin, mikä tämä otettava huomioon tuloksia arvioitaessa.

Tällä hetkellä ainut luotettava tapa selvittää raudoituksen kunto on visuaalinen tarkastus. Tämän johdosta on suositeltavaa, että mittauksien yhteydessä tehdään myös silmämääräisiä havaintoja mittavasta kohteesta ja raudoituksen kunto tarkistetaan paikallisesti silmämääräisesti.

## LÄHTEET

- /1/ Betonirakenteet. Reunapalkin uusiminen. Helsinki: Tiehallitus 1992. TIEL 2230096-SILKO 2.211.
- /2/ Betonirakenteiden säilyvyysohjeet ja käyttöikämitoitus 1992. Suomen Betoniyhdistys, julkaisu by 32, 1992. 66 s.
- /3/ Bertoni L, Elsener B, Pedferri P, Polder R. Corrosion of Steel in Concrete. John Wiley&Sons, Ltd. 2003, 409 s.
- /4/ Hetek, Chloride penetration into concrete, State-of-the –Art, Transport processes, corrosion initiation, test methods and prediction models. The Road Directorate. Report No. 53 1996. 151 s.
- /5/ Lindvall, A. Environmental actions on concrete exposed in marine and road environments and its response. Consequences for the initiation of chloride induced reinforcement corrosion. Chalmers University of Technology. Publication P-03:2. 2003.
- /6/ Rilem TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Half-cell potential measurements – Potential mapping on reinforce concrete structures, Recommendations. Materials and Structures, vol. 36, August-September 2003, s 461-471.

- /7/ Rilem TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Test methods for on-site corrosion rate measurement of steel reinforcement in concrete by means of the polarization resistance method, Recommendations. Materials and Structures, vol. 37, November 2004, s 623-643.
- /8/ Rilem TC 154-EMC: Electrochemical Techniques for Measuring Metallic Corrosion. Test methods for on site measurement of resistivity of concrete, Recommendations. Materials and Structures, vol. 33, December 2000, s 603-611.
- /9/ Schießl, P. Einfluss von Rissen auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbauten. Berlin 1986. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 370. S. 5-52.
- /10/ Schießl P, Raupach M. Laboruntersuchungen und Berechnungen zum Einfluss der Rissbreite des Betons auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton. Bauingenieur. vol 69, 1994. s 439-445.
- /11/ Sistonen, E, Tukiainen, P, Laitala, M, & Huovinen, S. Teräsbetonirakenteiden korroosioriskin rajoittaminen ulko-olosuhteissa. Teknillinen korkeakoulu. Talonrakennustekniikan laboratorio. Julkaisu 111. Espoo 200. 188 s.
- /12/ Tang L. Mapping Corrosion of Steel in Reinforced Concrete Structures. SP Rapport 2002:32, SP Swedish National Testing and Research Institute.
- /13/ Tang L. Mätning av armeringskorrosion i betong. Bygg&teknik 7/2002. s 65-67.
- /14/ The Concrete Society. Elektrochemical tests for reinforcement corrosion. Technical Report 60, The Concrete Society. Camberley, 2000. 24 s + liit 8 s.
- /15/ Vesikari E. Corrosion of reinforcing steels at cracks in concrete. Espoo 1981, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 11/1981. 39 s. + liitt. 4 s.
- /16/ Vesikari E. Betonirakenteiden käyttöikä. Espoo 1986, Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tutkimuksia 417/1986. 88 s.
- /17/ Vesikari E. Betoniterästen korroosion sähköiset mittausmenetelmät. VTT Rakennustekniikka. 1995. 20 s.
- /18/ Vesikari E. Potentiaalimitaus raudoituksen korroosion tutkimusmenetelmänä. VTT Tiedotteita 978. 1989. 46 s.

Espoo 8.12.2006



Eero Punakallio  
Palvelupäällikkö



Pertti Pitkänen  
Erikoistutkija

JAKELU

Tilajaat  
VTT/Arkisto

Alkuperäinen  
Alkuperäinen