



Katodinen suojaus

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



Tilaaaja	Tiehallinto, Siltatekniikka PL 33 00521 HELSINKI Valtion ydinjätehuoltorahasto Kauppa- ja teollisuusministeriö PL 32 00023 VALTIONEUVOSTO Ratahallintokeskus PL 185 00101 HELSINKI Helsingin kaupungin rakennusvirasto PL 1500 00099 HELSINGIN KAUPUNKI Tampereen kaupunki Kaupunkiympäristön kehittäminen Viinikankatu 42 33800 TAMPERE Turun kaupunki Kiinteistölaitos, julkiset rakenteet PL 775 01050 TURKU
Tilaus	10365/2006/30/11. 23.1.2007 Dnro 24/2007SAF. 16.3.2007 276609. 18.1.2007 4580015943 / 29.01.2007 Dno YPA:/ 1019/ 07 / 2006. 15.1.2007 3892-2006 (065) 23.02.2007
Yhteyshenkilö VTT:ssä	Valtion teknillinen tutkimuskeskus Erikoistutkija Pertti Pitkänen Kemistintie 3, Espoo PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 6916 Faksi 020 722 7003 Sähköposti: pertti.pitkanen@vtt.fi

Tehtävä **Katodinen suojaus**

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

TIIVISTELMÄ

Raudoituksen korroosio on yleisimpiä teräsbetonirakenteiden korjaustoimenpiteitä aiheuttavia tekijöitä. Raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen ilmiö ja tätä korroosion sähkökemiallista luonnetta voidaan käyttää hyväksi raudoituksen korroosion estämisessä ja pysäyttämisessä. Raudoituksen sähkökemiallisia suojausmenetelmiä ovat katodinen suojaus, kloridien poisto ja uudelleenalkalointi. Mainituilla menetelmillä on samanlaiset perusteet ja monet käytännön yksityiskohdat. Pääasialliset erot koskevat virranvoimakkuutta ja käsittelyn kestoa. Katodinen suojaus on menetelmistä vanhin ja yleisimmin käytetty.

Tutkimusraportissa on tarkasteltu katodista suojausta ja sen käyttömahdollisuuksia Suomessa. Katodinen suojaus on korroosionestomenetelmä, jossa suojattavan materiaalin, teräsbetonirakenteissa raudoituksen, potentiaali siirretään negatiiviseen suuntaan niin paljon (immuunialueelle), että korroosiota ei tapahdu. Raudoitus toimii tällöin katodina eikä siinä tapahdu syöpymistä. Katodinen suojaus voidaan tehdä käyttämällä ulkopuolista virtalähdettä tai uhrautuvia anodeja.

Katodisesta suojauksesta on periaatteen lisäksi tarkasteltu suojauksen suunnittelua, suunnittelua edeltäviä tutkimuksia, käytön edellytyksiä, suojauksen toteutusta sekä suojauksen mahdollisia haittavaikutuksia betoniin ja teräkseen. Lopuksi on tarkasteltu katodisen suojauksen käyttömahdollisuuksia yleisesti ja erityisesti Suomessa. Tätä varten on haastateltu henkilöitä, jotka ovat käytännössä olleet tekemässä katodisen suojauksen kanssa.

Suomen olosuhteissa katodista suojausta kannattaa yleensä harkita vain, kun kloridikorroosion riski on huomattava. Yleisesti kysymykseen tulevat meriveden tai suolauksen kanssa kosketuksissa olevat rakenteet. Betonisilloissa mahdollisia harkittavia käyttökohteita ovat:

- Merellisessä ympäristössä olevat vanhat sillat. Näissä on usein betonin laatu huono ja betonissa on mitattu korkeita kloridipitoisuuksia.
- Voimakkaan suolarasituksen kohteena olevat siltojen pilarit ja välituet.
- Voimakkaasti suolatuilla teillä olevien siltojen maatuet, välituet, kansilaatan päädyt ja laakerialustat, joihin vuotavista saumoista pääsee kloridipitoisia vesiä.
- Paikkaukset, joiden ympäristössä on klorideja (uhrautuvat anodit).

Katodisen suojauksen käyttö edellyttää yleensä aina, ettei suojauksen asennusvaiheessa korroosio ole vielä vaikuttanut rakenteen kantavuuteen. Katodista suojausta on olemassa olevan tiedon valossa pidettävä vaihtoehtoisena menetelmänä, jonka käyttö meillä tulee kysymykseen harvoin. Suomessa olosuhteet korroosion kannalta eivät yleensä ole niin vaikeat, että katodisen suojauksen käyttö yleistyisi mainittavasti.

ABSTRACT

Corrosion of reinforcing steel is one of the main causes of repair works of reinforced concrete structures. Corrosion of reinforcing steel is electrochemical phenomenon and it is possible to use this electrochemical feature to prevent and stop corrosion. Electrochemical protection methods of reinforcement are cathodic protection, chloride extraction and realkalization. All these methods are based on same principles and many of their practical details are the same. The main differences are the current intensity and the duration of treatment. Cathodic protection is the oldest and most commonly used method.

This literature survey deals with cathodic protection and its use in Finland. Cathodic protection is a corrosion protection method, where the potential of the protected material, reinforcing steel, is shifted to negative direction enough (to immune region) to reduce corrosion current to a negligible level. Cathodic protection is based either on impressed current or sacrificial anodes.

In addition to the principle of cathodic protection also the design, surveys preceding design, requirements for use, execution and side effects on concrete and steel are considered here. Finally the use of cathodic protection generally and especially in Finland is considered. For this purpose experts working with cathodic protection in practice were interviewed.

In Finnish climatic conditions cathodic protection is normally worth considering only when the risk of chloride corrosion is high, e.g. structures in contact with seawater or exposed to de-icing salts. In concrete bridges such structures are:

- Old bridges in marine environment. Concrete is often of poor quality and has high chloride concentration.
- Piers and intermediate supports exposed to severe de-icing.
- Abutments and intermediate supports of intensively de-iced bridges, where strong chloride solution runs through leaking joints.
- Patches, surrounded by concrete containing chlorides (sacrificial anodes).

The requirement for cathodic protection is normally, that corrosion has not affected the bearing capacity of the structure. On the bases of present knowledge cathodic protection is an alternative corrosion protection method that rarely comes into question in Finland. The corrosive environment in Finland is normally not so severe that cathodic protection should become general.

SAMMANDRAG

Armeringskorrosion är en av de vanligaste faktorerna som förorsakar reparationsåtgärder i betongkonstruktioner. Armeringskorrosion är ett elektrokemiskt fenomen och denna elektrokemiska karakteren av korrosionen kan användas för att förhindra och stoppa korrosion. De elektrokemiska skyddsmetoderna för armering är katodiskt skydd, kloridernas borttagning och återalkalisering. Ovannämnda metoder baserar sig på samma grunder och många av de praktiska detaljerna är lika. De huvudsakliga skillnaderna gäller strömstyrkan och behandlingstiden. Katodiskt skydd är den äldsta och mest använda metoden.

Forskningsrapporten behandlar katodiskt skydd och dess användningsmöjligheter i Finland. Katodiskt skydd är en korrosionsskyddsmetod där det skyddade materialets, armeringens i betongkonstruktioner, potential förflyttas så mycket i negativ riktning att de elektrokemiska korrosionsreaktionerna hindras. Stålet är i detta fall katod där ingen korrosion sker. Katodiskt skydd kan förverkligas med hjälp av en yttre strömkälla eller med hjälp av offeranoder.

I tillägg till principen av katodiskt skydd har man också studerat planering, förundersökning före planering, förutsättningar för användning och förverkligande av katodiskt skydd samt dess biverkningar på armeringar och betong. Till slut har man studerat användningsmöjligheterna för katodiskt skydd generellt och speciellt i Finland. Därför har man intervjuat personer, som i praktiken har arbetat med katodiskt skydd.

I finska förhållanden lönar det sig i allmänhet att överväga katodiskt skydd endast då risken för kloridinitierad korrosion är avsevärd. Allmänt kommer konstruktioner, som är i kontakt med havsvatten eller berörs av saltning, ifråga. I betongbroar är möjliga användningsråden följande:

- Gamla broar i marin miljö. I dessa är betongkvaliteten ofta dålig och kloridhalten hög.
- Pelare och mellanstöd med kraftig saltbelastning.
- Landfästen och mellanstöd där kloridhaltigt vatten kan tränga in genom läckande fogar.
- Lagningar där omgivning innehåller klorider (offeranoder).

Andvändning av katodiskt skydd förutsätter överhuvudtaget alltid att korrosionen inte har påverkat konstruktionens bärförmåga. På basen av existerande kunskap kan man konstatera att katodiskt skydd är ett alternativ vars användning kommer hos oss mycket sällan ifråga. Med tanke på korrosion är förhållandena i Finland inte så svåra att användning av katodiskt skydd skulle bli allmänt.

ALKUSANAT

Katodinen suojaus on yksi vuoden 2007 aikana VTT:ssä toteutetuista *Betoniteknillisiin siltatutkimuksiin* kuuluvista tutkimuksista. *Betoniteknilliset siltatutkimukset* ovat Tiehallinnon, Valtion ydinjätehuoltorahaston (Säteilyturvakeskuksen), Ratahallintokeskuksen, Helsingin kaupungin rakennusviraston, Tampereen kaupungin kaupunkiympäristön kehittämissyksikön ja Turun kaupungin kiinteistölaitoksen rahoittamaa jatkuvaa projektitoimintaa, joka koostuu useista osatutkimuksista.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SAMMANDRAG	4
ALKUSANAT	5
1 YLEISTÄ	7
2 RAUDOITUKSEN SÄHKÖKEMIALLISET SUOJAUSMENETELMÄT JA NIIDEN PERUSTEET	7
3 KATODINEN SUOJAUS.....	10
3.1 Periaate	10
3.2 Edeltävät tutkimukset ja käytön edellytyksiä	11
3.3 Suojauksen suunnittelu	12
3.4 Anodisysteemit	15
3.5 Suojauksen toteutus ja toiminnan varmistaminen	17
3.6 Suojauksen mahdolliset haittavaikutukset betoniin ja teräkseen	18
4 MILLOIN KATODISTA SUOJAUSTA KANNATTAA KÄYTTÄÄ.....	18
5 YHTEENVETO	20
LÄHTEET.....	21

1 YLEISTÄ

Raudoituksen korroosio on yleisimpiä teräsbetonirakenteissa korjaustoimenpiteitä aiheuttavista tekijöistä. Suurin osa korroosion aiheuttamien vaurioiden korjaustoimenpiteistä tehdään tavanomaisilla menetelmillä jotka edellyttävät usein huomattavia purkamistoimenpiteitä korjattavassa rakenteessa. Raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen ilmiö ja tätä korroosion sähkökemiallista luonnetta voidaan käyttää hyväksi raudoituksen korroosion estämisessä ja pysäyttämässä. Sähkökemiallisia raudoituksen suojausmenetelmiä käyttämällä voidaan välttää ja pienentää betonipeitteiden purkamista ja korjaamista, mikäli nämä eivät ole jo ehtineet vaurioitua. Tämä edellyttää että sähkökemiallisia menetelmiä käytetään ennen kuin merkittäviä vaurioita on ehtinyt syntyä.

Katodinen suojaus on sähkökemiallinen korroosionestomenetelmä, jossa suojattavan materiaalin, teräsbetonirakenteissa raudoituksen, potentiaali siirretään negatiiviseen suuntaan niin paljon (immuunialueelle), että korroosiota ei tapahdu. Raudoitus toimii tällöin katodina eikä siinä tapahdu syöpymistä. Katodinen suojaus voidaan tehdä käyttämällä ulkopuolista virtalähdettä tai uhrautuvia anodeja.

Katodista suojausta on käytetty perinteisesti korjausten yhteydessä vanhoissa rakenteissa joissa korroosiota on odotettavissa jonkin ajan kuluttua. Uutena katodisen suojauksen muotona ulkomailla on otettu käyttöön nk. katodinen estäminen. Katodista estämisestä on käytetty uusissa rakenteissa, joissa tulevaisuudessa korroosion käynnistymisen riski on ilmeinen. Katodinen estäminen on ”kevyempi” ja halvempi toteuttaa kuin katodinen suojaus, koska on helpompi estää korroosion käynnistyminen kuin pysäyttää käynnissä oleva korroosio.

Katodista suojausta on käytetty jo vuosikymmeniä suojaamaan laivoja, vedessä olevia teräsrakenteita, maassa olevia putkia ja teräspaaluja. Betonirakenteissa katodista suojausta on käytetty 1970 luvulta lähtien ensin siltojen kansirakenteissa, myöhemmin siltojen pääkannattajissa ja pilareissa, merirakenteissa, pysäköintitasoissa ja teollisuusrakennuksissa. Katodista suojausta käytettäessä korroosion aiheuttajina tai korroosiouhan aiheuttajana on ollut yleensä kloridirasitus.

Tässä esityksessä tarkastellaan aluksi lyhyesti raudoituksen sähkökemiallisia suojausmenetelmiä ja niiden perusteita sekä yksityiskohtaisemmin katodista suojausta. Lopuksi tarkastellaan katodisen suojauksen käyttömahdollisuuksia Suomessa.

2 RAUDOITUKSEN SÄHKÖKEMIALLISET SUOJAUSMENETELMÄT JA NIIDEN PERUSTEET

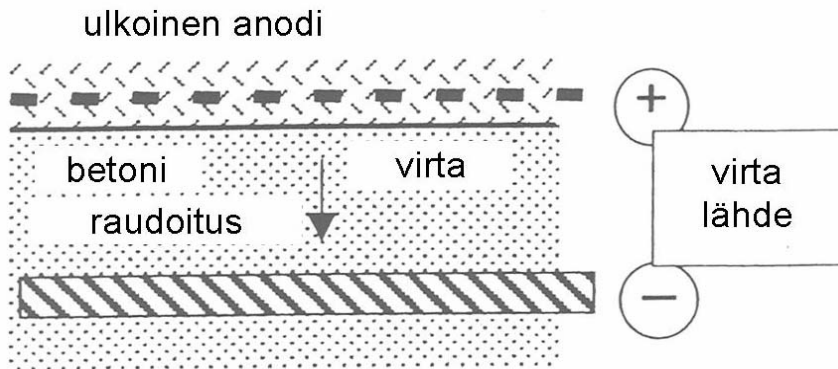
Betonirakenteissa käytettyjä sähkökemiallisia raudoituksen (korroosion) suojausmenetelmiä ovat:

- katodinen suojaus
- kloridien poisto ja
- uudelleenalkalointi.

Mainittuja menetelmiä kutsutaan yleisesti myös sähkökemiallisiksi ylläpitomenetelmiksi tai kunnossapitomenetelmiksi /3/.

Kaikilla edellä mainituilla raudoituksen suojausmenetelmillä on samanlaiset perusteet ja monet käytännön yksityiskohdat. Pääasialliset erot koskevat käytettävää virranvoimakkuutta ja käsittelyn kestoa.

Kuvassa 1 on esitetty periaatekuva, joka soveltuu kaikkiin edellä mainittuihin menetelmiin. Virtapiiriin on lisätty ulkoinen anodi, jonka kautta ulkoinen virta johdetaan elektrolyytinä toimivan betonin välityksellä katodina toimivaan raudoitukseen. Ulkoisen virtalähteen avulla katodina toimivan raudoituksen potentiaali siirretään passiiviselle alueelle. Tällöin polarisaation (kemiallinen muutos teräksen ja betonin rajapinnassa) aiheuttaman raudoituksen passivoitumisen seurauksena korrosio hidastuu tai lakkaa, aggressiiviset kloridi-ionit alkavat poistua betonista ja betonin huokosrakenne alkaa uudelleen alkaloitua.



Kuva 1. Periaatekuva sähkökemiallisten suojausmenetelmien rakenteesta /3/.

Taulukossa 1 on esitetty sähkökemiallisten suojausmenetelmien keskeiset erot.

Taulukko 1. Sähkökemiallisten suojausmenetelmien keskeiset erot /3/.

Menetelmä	Kesto	Tyypillinen virran tiheys
Katodinen suojaus	Pysyvä	10 mA/m ²
Uudelleen alkalointi	Päivistä viikkoihin	1 A/m ²
Kloridien poisto	Viikoista kuukausiin	1 A/m ²

Katodinen suojaus on suojausmenetelmistä vanhin. Katodinen suojaus on osoittautunut toimivaksi menetelmäksi vedessä olevien teräsrakenteiden ja maahan upotettujen rakenteiden suojaamisessa (putkilinjat). Betoniraidoituksen katodinen suojaus eroaa muiden teräsrakenteiden suojauksesta johtuen elektrolyytinä toimivan betonin suuresta vastuksesta ja epähomogeenisuudesta. Toisaalta betonissa olevan teräksen suojaus on helpompi saada aikaan johtuen betonin muodostamasta suojusta. Potentiaalinen pudottaminen korrosiopotentiaalilla alapuolelle riittää. Katodinen suojaus toimii niin kauan kuin virtapiirissä kulkee virta. Virta voi olla poissa myös lyhyen aikaa ilman että suojaus kärsii /3/.

Uudelleen alkalointi ja kloridien poisto ovat uudempiä menetelmiä. Menetelmien tarkoituksena on palauttaa alkuperäinen passiivinen ympäristö raudoitusta ympäröivään betoniin poistamalla korroosion edellytykset; toisin sanoen korroosiota aiheuttavat kloridit poistetaan tai alkalisuus palautetaan. Molemmissa menetelmissä ulkopuolista virtaa käytetään ainoastaan määrätyn ajan ja käsittelyn loputtua asennettu anodisysteemi poistetaan rakenteesta. Tämän jälkeen korroosion suojaamisesta huolehtii raudoitusta suojaava betonipeite.

Sähkökemiallisten menetelmien raudoituksen korroosiota suojaava vaikutus perustuu seuraaviin seikkoihin /3/:

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

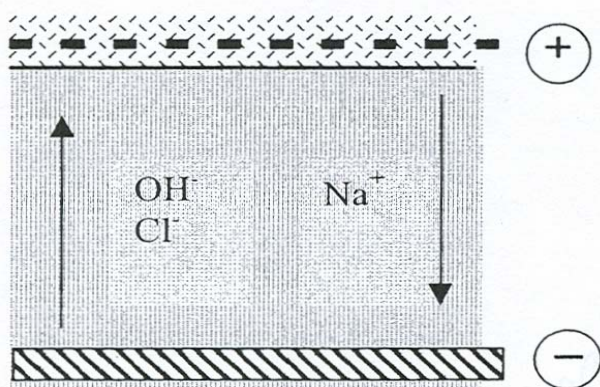
VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

- katodiseen polarisaatioon
- elektrolyysiin
- sähkökentän aiheuttamaan ionien kulkeutumiseen
- sähkökentän aiheuttamaan osmoosiin.

Katodinen polarisaatio tarkoittaa sitä että raudoituksen potentiaali ”painetaan” korroosiopotentiaalin alapuolelle, jolloin korrosio pysähtyy tai sen nopeus putoaa hyväksyttävälle tasolle. Katodisen suojauksen pääasiallinen tarkoitus on polarisoida raudoituksen potentiaali korroosion pysäyttämistä ajatellen riittävän pieneksi. Tapauksesta riippuu miten alas potentiaali on painettava.

Sähkövirta betonissa aiheuttaa elektrodeissa (anodi ja katodi) kemiallisia reaktioita ja elektrolyysin. Nämä reaktiot tuottavat hydroksidi-ioneja katodilla. Tämän seurauksena lähellä raudoitusta olevan betonin pH nousee mikä passivoi uudelleen raudoitusta ja suurentaa korroosion käynnistymisen edellyttämää kriittistä kloridipitoisuutta. Uudelleen alkaloinnin tarkoitus on hydroksidi-ionien tuottaminen teräksen pinnalle.

Sähkövirta betonissa aiheuttaa negatiivisesti varattujen ionien, kuten kloridi- ja hydroksyyli-ionien, siirtymisen teräksen pinnalta positiivisesti varattuun elektrodiin (anodi) ja positiivisesti varattujen ionien siirtymisen negatiivisesti varattuun elektrodiin, raudoitukseen (katodi). Kloridien poiston päätarkoitus on kloridi-ionien siirtäminen teräkseltä anodille.



Kuva 2. Betonipeitteeseen syntyvän sähkövirran aiheuttama ionien liike /3/.

Sähkövirrasta johtuva osmoosi aiheuttaa nesteen siirtymistä huokoisessa materiaalissa. Siirtymisen nopeus riippuu nesteen ja materiaalin ominaisuuksista sekä käytetystä potentiaalista. Sähkövirran aiheuttama alkalisen nesteen siirtyminen betoniin mahdollistaa teräksen uudelleenpassivoinnin, mikä on uudelleen alkaloinnin tarkoitus. Sähkökentän aiheuttama osmoosi tapahtuu myös karbonatisoituneessa betonissa.

Yhteistä sähkökemiallisille menetelmille on, että niitä käytetään yleensä vain rakenteissa, joissa rakenteellisen toiminnan ja kantavuuden suhteen ei ole ongelmia. Menetelmiä käytettäessä pienemmät tavanomaiset korjaustoimenpiteet, kuten rakenteen pinnassa oleva huonokuntoinen betoni, irti olevat betonikerrokset ja lohkeamat, on korjattava. Kloridien saastuttamaa ja karbonatisoitunutta betonia ei tarvitse kuitenkaan poistaa kuten tavanomaisessa korjauksessa.

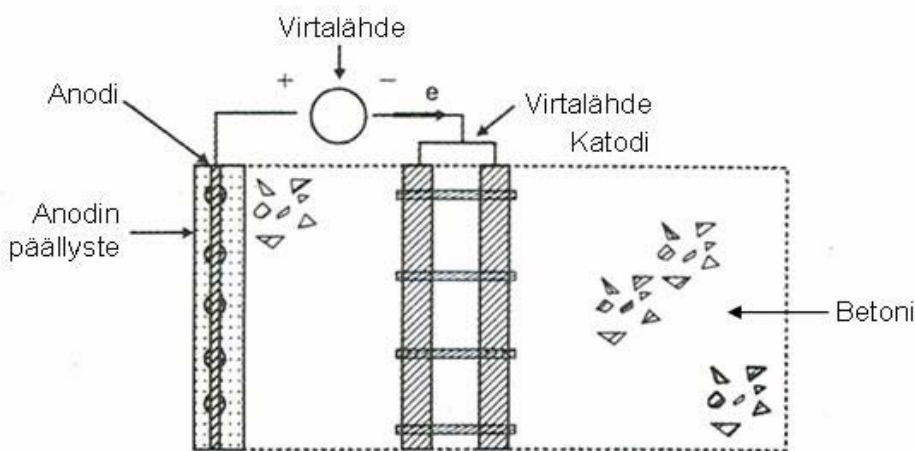
3 KATODINEN SUOJAUS

3.1 Periaate

Korroosio voidaan estää tai pysäyttää lisäämällä virtapiiriin ylimääräinen elektrodi, jonka potentiaali on vielä alhaisempi kuin anodialueiden. Katodisessa suojauksessa suojattava rauditus muutetaan korroosioparin katodiksi kytkemällä rakenteeseen ulkopuolinen anodi ja syöttämällä piiriin tasavirtaa. Koska virta kulkee aina anodilta katodille, korroosio hidastuu tai estyy kokonaan.

Katodinen suojaus voidaan tehdä käyttämällä ulkopuolista virtalähdettä tai uhrautuvia anodeja. Uhrautuvalla anodilla tarkoitetaan epäjalosta metallista valmistettua elektrodiä, joka suojatessaan terästä syöpyy itse. Menetelmä perustuu galvaanisen korroosion hyväksikäyttöön eikä se ei tarvitse ulkoista virtalähdettä. Suojattavaan rakenteeseen liitetään epäjalvoja metallianodeja, jotka luovuttavat syöpyessään elektroneja ja tuottavat tarvittavaa suojausvirtaa. Uhrautuvan anodin potentiaalinen on oltava alhaisempi kuin ruostuvan teräksen. Anodimateriaaleina käytetään tavallisimmin sinkki-, alumiini- ja magnesiumseoksia. Menetelmä on paljon yksinkertaisempi kuin käytettäessä ulkoista virtalähdettä.

Tehokkaampi suojaus saadaan käyttämällä ulkoista virtalähdettä. Ulkoisen virtalähteen järjestelmä koostuu ulkoisesta tasavirtalähteestä, virtajohtimina toimivista liukenemattomista anodeista ja referenssielektrodeista. Virtajohtimina toimivat anodit jakavat suojavirran tasaisesti rakenteeseen. Tarvittava suojavirta otetaan yleensä tasasuuntaajan välityksellä yleisestä vaihtovirtaverkosta.



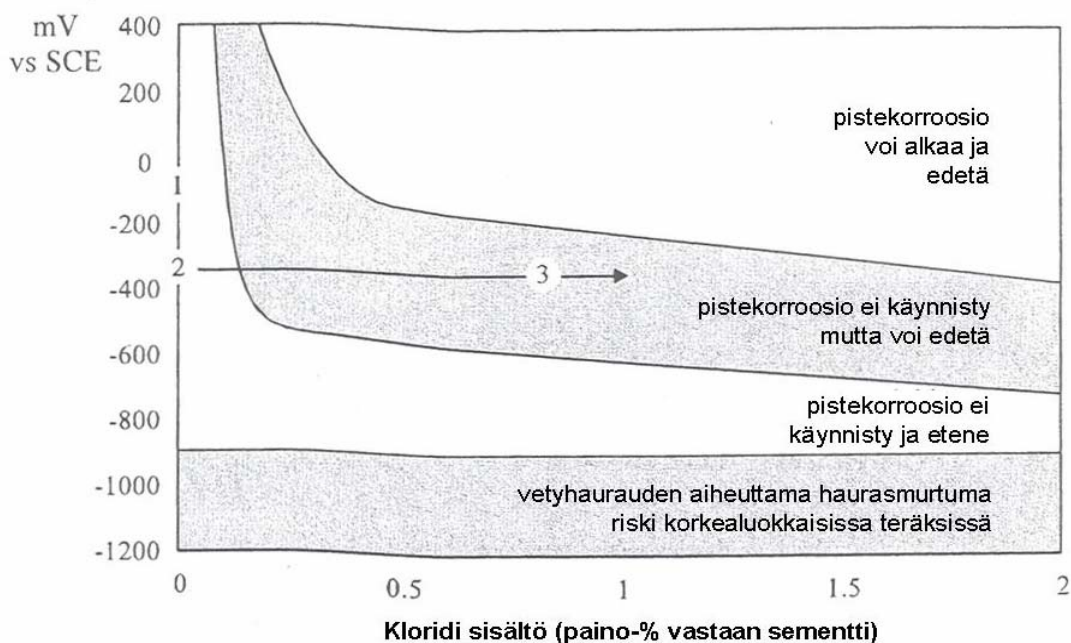
Kuva 3. Katodisen suojauksen periaate käytettäessä ulkoista virtalähdettä /5/.

Kun katodista suojausta käytetään passiivivilassa olevaan teräkseen, jo kohtuullinen teräksen potentiaalinen alentaminen voi suurentaa korroosion käynnistämiseen tarvittavaa kriittistä kloridipitoisuutta. Tällöin tarvitaan myös pienempiä virran voimakkuuksia (tiheyksiä) ja ”estävän virran” vaikutus tunkeutuu syvemmälle rakenteeseen kuin passiivisuutensa menettäneiden terästen katodisessa suojauksessa. Lisäksi suojausten suunnittelu ja rakentaminen on paljon helpommin tehty, anodimateriaalia tarvitaan vähemmän ja käyttöikä on pitempi.

Kun katodista suojausta käytetään raudituksen korroosion estämiseen silloin kun korroosio ei ole vielä alkanut, on menetelmästä on alettu käyttää nimeä katodinen estäminen (Cathodic prevention, CPre) /1, 3, 4/.

Katodista estämistä voidaan pitää ennalta ehkäisevänä kunnossapitomenetelmänä. Katodista estämistä on käytetty kohteissa, joihin tulee kohdistumaan kloridirasitus ja tämän aiheuttama korroosio on odotettavissa. Nimen käyttöönotto johtuu siitä, että tällä on erilaiset tavoitteet, toimintaympäristö ja suojavirta kuin tavanomaisella katodisella suojauksella. Koska korroosion käynnistyminen on helpompi estää kuin pysäyttää käynnissä oleva korroosio, katodinen estäminen on ”kevyempi” ja halvempi toteuttaa kuin katodinen suojaus /1/.

Tilannetta havainnollistaa kuva 4, jossa teräksen potentiaalia on alennettu 100 mV. Alentamisen seurauksena teräs säilyttää passiivisuutensa vaikka kloridipitoisuus kasvaa huomattavasti. Passiivisuuden säilyttämisen edellytyksenä on että korroosio ei ole alkanut. Jos korroosio on alkanut, ei mainitun suuruinen potentiaalinen alentaminen riitä estämään käynnistynyttä korroosiota.



Kuva 4. Periaatekuva betonissa olevan teräksen korroosion riippuvuudesta potentiaalista ja kloridipitoisuudesta. Kuvasta käy ilmi miten paljon katodinen estäminen (potentiaalinen lasku) suurentaa kriittistä kloridipitoisuutta /4/.

Menetelmää käytettiin ensimmäistä kertaa uuteen betonirakenteeseen ja jännitettyyn rakenteeseen Italiassa 1989.

3.2 Edeltävät tutkimukset ja käytön edellytyksiä

Ennen kuin katodisen suojauksen suunnittelua voidaan aloittaa, on suojattavan betonirakenteen kunto tunnettava. Samalla on selvitettävä eräät katodisen suojauksen toiminnan kannalta oleelliset seikat.

Kuntotutkimus tehdään tavanomaisia kuntotutkimusmenetelmiä käyttäen. Kuntotutkimuksessa selvitettäviä seikkoja ovat:

- betonipeitteen paksuus
- karbonatisoitumissyvyyydet
- kloridipitoisuudet ja kloridiprofiili

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

-
- raudoituksen korroosioalueet
 - betonivauriot (lohkeamat, pintojen kiinteys, halkeamat)
 - raudoituksen sähköinen jatkuvuus.

Muita selvitettäviä seikkoja ovat raudoituksen laatu, lähinnä onko suojattavassa rakenteessa jänneteräksiä sekä betonissa käytetyn kiviaineksen mahdollinen alkalireaktiivisuus.

Betonipeitteen osalta määritetään sen paksuus ja sen vaihtelut. Suuret vaihtelut betonipeitteen paksuudessa aiheuttavat epätasaisen virran jakautumisen. Jos vaihtelut ovat suuria, ne voivat vaikeuttaa sähkökemiallisten menetelmien käyttöä.

Karbonatisoitumissyvyyden määrittäminen on kuntotutkimukseen kuuluva perusselvitys. Tämä kannattaa tehdä samanaikaisesti kun betonipeitteen paksuus määritetään.

Kloridipitoisuuden määrittäminen on keskeisellä sijalla, koska katodista suojausta käytetään yleisesti kohteissa, joissa kloridikorroosiota ilmenee tai sen riski on ilmeinen. Kloridipitoisuuden määrä ja sen vaihtelut rakenteen eri osissa on selvitettävä kuntotutkimuksessa. Myös kloridien lähde on selvitettävä.

Raudoituksen korroosioalueet on tunnettava. Yleensä ne määritetään ainettarikkomattomilla menetelmillä, kuten potentiaalimittauksella tai mittaamalla korroosionopeus.

Katodisen suojauksen käytön kannalta oleellisia seikkoja ovat:

- raudoituksen jatkuva sähköinen kontakti ja
- betonin muodostama sähköinen yhteys anodin ja raudoituksen välillä.

Raudoitus joka ei ole sähköisen kontaktin piirissä, on suojausvaikutuksen ulkopuolella. Suojauksen piiriin kuulumattomaan raudoitukseen voi kohdistua hajavirtoja mikä voi aiheuttaa näissä korroosion nopeutumista. Jos raudoituksessa on useita alueita tai tankoja, jotka eivät ole kontaktissa muun raudoituksen kanssa, voi tämä tehdä katodisen suojauksen käytön kannattamattomaksi. Suojauksen asennuksen yhteydessä on tietysti aina mahdollista lisätä puuttuvat kontaktit.

Betonin välityksellä muodostuu sähköinen yhteys raudoitustankojen ja anodin välille. Siksi betonissa, lähinnä betonipeitteessä, ei saa olla irronneita alueita, suuria halkeamia tai vanhoja suuren vastuksen omavia paikkauksia (mm. polymeerilaastilla tehtyjä korjauksia tai pinnoitteita), koska nämä voivat estää virran tasaisen jakautumisen. Kaikki epätasaisen virran jakautumisen aiheuttavat seikat on selvitettävä ja korjattava ennen katodisen suojauksen asentamista tai sen yhteydessä.

Kuntotutkimuksen tulokset varmistavat lopullisesti, onko katodista suojausta mahdollista ja kannattava käyttöä. Jos esimerkiksi todetaan, että rakenteen kunto edellyttää huomattavia tavanomaisilla menetelmillä tehtäviä korjauksia, voi katodisen suojauksen käyttö tulla kannattamattomaksi.

3.3 Suojauksen suunnittelu /1, 3, 5/

Katodisen suojauksen on toimittava koko rakenteen suunnitellun käyttöiän. Tämän johdosta suunnittelussa on otettava huomioon kaikki suojauksen kestävyysvaikuttavat tekijät. Suojauksen on kyettävä toimittamaan suojavirtaa koko suunnitellun käyttöajan.

Katodinen suojaus suunnitellaan aina tapauskohtaisesti jokaiselle rakenteelle. Suunnittelussa on otettava huomioon suojattavan alueen pinta-ala ja muoto, korroosioympäristö, raudoituksen määrä ja laatu sekä anodien sijoittelu. Lisäksi suunnitteluun kuuluvat sähköinen systeemin suunnittelu (virtalähde, vyöhykkeet, kaapelointi) ja toiminnan seurantasysteemin (monitorointi) suunnittelu.

Katodista suojausta suunniteltaessa on ratkaistava mm. seuraavat perusasiat /5/:

- pyritäänkö täydelliseen vai osittaiseen suojaukseen; potentiaalikriteeri (suojauskriteeri)
- suojattavien betoniterästen pinta-ala (suojattava ala)
- suojattavan kohteen lepopotentiaali (lähtötaso)
- minkä suuruinen virta tarvitaan siirtämään potentiaali suojausarvoon
- mikä on tarvittava virranvoimakkuus
- järjestelmän toimintaperiaate
 - vakiovirtamenetelmä
 - vakiojännitemenetelmä
 - potentiostaattinen menetelmä
 - virtalähteen kapasiteetti.

Suojauskriteerillä tarkoitetaan sitä, miten raudoitteen potentiaali tulee säätää että suojaus on tehokas mutta ei liiallinen. Ulkona olevissa betonirakenteissa ei ole itsestään selvää käyttää kiinteätä potentiaaliarvoa suojauskriteerinä. Syynä on betonista johtuva monimutkainen suojausmekanismi joka käsittää teräksen pinnan uudelleen passivoitumisen, kloridien siirtymisen pois teräksen pinnasta sekä huokosveden pH-arvon paikallisen kohoamisen teräksen aikaisemmin anodisissa osissa.

Vakiovirtamenetelmässä virta pidetään muuttumattomana. Menetelmä sopii pinnoittamattomille rakenteille, joilla ylisuojauksen vaara on pieni. Vakiojännitemenetelmässä säädetään suojattavan kohteen ja anodin välistä jännitettä manuaalisesti referenssielektrodin avulla. Ylisuojauksen varalta virtalähteessä on yleensä virranrajoitin. Potentiostaattisessa menetelmässä suojattavan rakenteen potentiaali pidetään jatkuvasti halutussa suojapotentiaalissa. Suojauksen toimintaa valvotaan jatkuvasti referenssielektrodin avulla. Menetelmää käytetään silloin kun suojausalue on kapea ja/tai ympäristöolosuhteissa tapahtuu muutoksia.

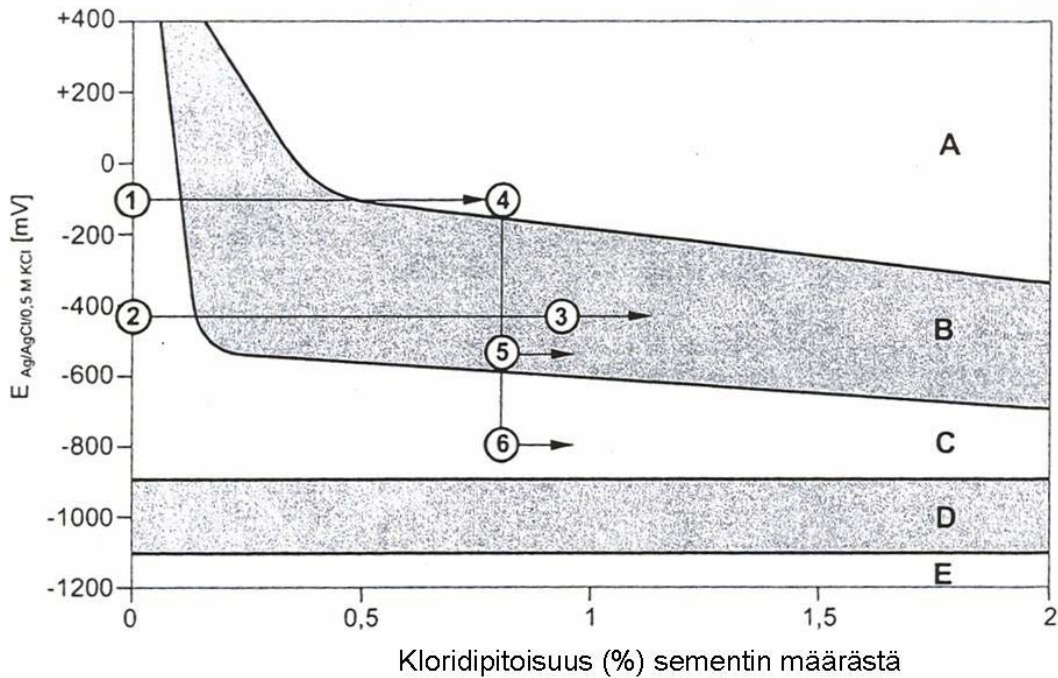
Eurooppalaisessa standardissa EN 12696 (v. 2000) esitetyt suojauskriteerit perustuvat korroosion sähkökemian ja käytännön kokemukseen /4/. Standardissa erotetaan kaksi tapausta. Uusi rakenne tai rakenne, jossa kloridit eivät ole tunkeutuneet raudoitukseen ja teräs on passiivitulassa, mutta joissa on odotettavissa kloridien aiheuttamaa korroosiota myöhemmin rakenteen käyttöiän aikana. Vanha rakenne, jossa korrosio on jo käynnissä.

Uudessa rakenteessa tai rakenteessa, jossa kloridit eivät ole tunkeutuneet raudoitukseen, katodisen suojauksen tarkoitus on lisätä betonissa olevan teräksen tai jänneteräksen korroosiokestävyyttä. Tällöin käytetään pientä katodista polarisaatiota käyttöiän alusta alkaen. Tämän polarisaation tehtävänä on pitää teräksen potentiaali pienempänä (negatiivisempänä) kuin E_{pit} (pistemäinen korroosion aiheuttava potentiaali) ja estää korroosion käynnistyminen. Aiheutettava polarisaatio myös estää kloridi-ioneja tunkeutumasta raudoituksen pintaan ja sen depassivoitumisen. Tätä ennalta ehkäisevää suojaustoimenpidettä kutsutaan, kuten aikaisemmin on mainittu, ”katodiseksi estämiseksi”.

Vanhassa rakenteessa jossa korrosio on käynnissä, katodinen suojaus on osa kunnostamistoimenpiteistä. Katodisen suojauksen tarkoitus on pienentää käynnissä olevan korroosion nopeus mitättömän pieneksi.

Tämän saavuttamiseksi teräksen potentiaali on alennettava suojauksen antavan suojapotentiaalin E_{prot} tasolle. Korroosiopotentiaali E_{corr} ja suojapotentiaali E_{prot} riippuvat ympäristön olosuhteista (kloridipitoisuus, lämpötila, kosteus, happipitoisuus jne.). Tyypillisen suojapotentiaalin suuruuden antaminen on mahdotonta eikä se ole edes tarpeellista. Tämä johtuu vaikuttavien eri tekijöiden yhteisvaikutuksesta ja käytännöstä saaduista kokemuksista.

Kuvassa 5 on kaavamainen esitys pistemäisen korroosion esiintymisalueiden riippuvuudesta potentiaalista ja kloridipitoisuudesta /4/.



Kuva 5. Kaavamainen esitys pistemäisen korroosion esiintymisalueiden riippuvuudesta potentiaalista ja sementin kloridipitoisuudesta (% sementin painosta) Pedeferrin mukaan. Alue A: Pistemäinen korroosio voi alkaa ja edetä. Alue B: Pistemäinen korroosio ei voi alkaa mutta voi edetä. Alue C: Pistemäinen korroosio ei voi alkaa eikä edetä. Alue D korkealuokkaisella teräksellä vetyhaurausriski. Alue E: Tartunnan heikkeneminen.

Katodinen estäminen (1 → 2 → 3). Katodinen passiivisuuden ylläpito (1 → 4 → 5). Korroosionopeuden pienentäminen katodisella suojauksella (1 → 4 → 6). /4/.

Tarvittava virrantiheys käynnissä olevan korroosion pysäyttämiseksi tai nopeuden saattamiseksi olemattomaksi on ulkona olevissa rakenteissa yleensä pienempi kuin 20 mA/m^2 raudituksen pinta-alaa kohti /3/. Vaadittava virran tiheys riippuu käytettävästä anodisysteemistä ja pienenee ajan kuluessa.

Jos korroosio ei ole käynnistynyt, tyypillinen tarvittava virrantiheys on $0,2 - 2 \text{ mA/m}^2$ /4/. Kentällä betonilaatoille tehdyissä kokeissa voimakkaan suolarasituksen kohteena oleilla betonilaatoilla virrantiheys $1-2 \text{ mA/m}^2$ on osoittautunut riittäväksi korroosion täydelliseksi estämiseksi. Suunnittelussa on huomioitava kaikki rauditus aina 0,5 m syvyyteen (jopa syvemmälle) sillä estävä virta tunkeutuu syvälle rakenteeseen. Voimakkaasta estävän virran leviämisestä seuraa että anodiin sijainti ei ole kriittinen.

Jos rakenteen eri osille ympäristön aiheuttama korroosiorasitus eroaa toisistaan, jaetaan rakenne eri sähköisiin vyöhykkeisiin. Jokaiselle vyöhykkeelle järjestetään oma virtalähde ja toiminnan seurantajärjestelmä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Suojausmenetelmästä on laadittava kuvaus ja hoito-ohjeet. Suojausmenetelmän käyttöikä on myös osoitettava.

Ruotsin tielaitoksen siltojen ylläpito-ohjeiden mukaan suojausmenetelmän kuvaukseen on sisällyttävä mm. seuraavia seikkoja /2/:

- suojaussysteemin kuvaus
- laskentaperusteet suunnittelua varten
- toiminnan kuvaus joka sisältää jännitteen, virranvoimakkuuden ja suojapotentiaalin arvot
- asennusohjeet
- materiaaliluettelot detaljipiirustuksineen ja
- varaosaluettelon
- käyttöohjeet seurantaohjeineen, koe- ja mittausohjeet
- virheiden etsintäohjeen
- ylläpito-ohjeet automaattista seurantaa varten jos tätä käytetään.

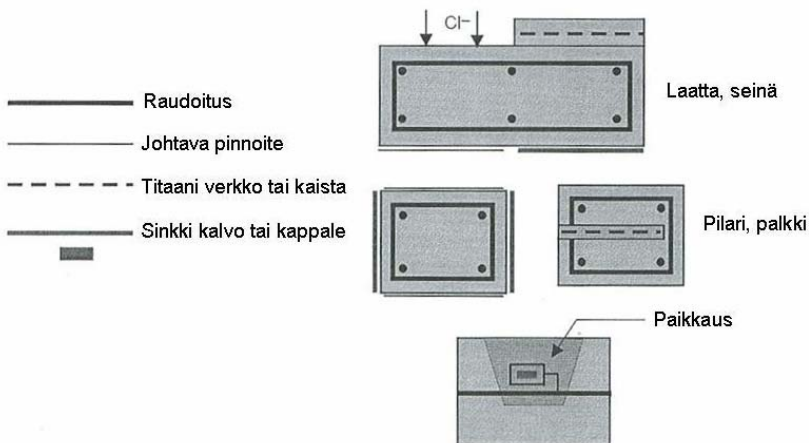
3.4 Anodisysteemit

Katodiseen suojaukseen kuuluu anodi (rakennelma, systeemi), katodi, virtalähde sekä suojauksen toiminnan seurantajärjestelmä. Virtapiirin katodina toimii raudoitus. Anodina voi olla rakenteen pintaan kiinnitettävä verkko, johto tai kaista joka on asennettu betoniin tehtyyn reikään tai uraan ja täytetty sementtipohjaisella tai sähköä johtavalla materiaalilla tai sähköä johtava kerros (päällyste) joka peittää betonipinnan.

Anodin on tuotava virta koko odotettavissa olevan käyttöiän. Anodisysteemille asetettavia yleisiä vaatimuksia ovat mm /3/:

- tarttuvuus betonin pintaan
- soveltuvuus suojattavaan pintaan (yläpinta, alapinta, sivupinta, kaareva pinta, jne.)
- hyvä kestävyys
- pienet asennuskustannukset
- pieni paino
- hyväksyttävä vaikutus rakenteen ulkonäköön ja mittoihin (mittasuhteisiin).

Anodit on yleensä valmistettu syöpymättömästä tai hyvin korroosiota kestävästä materiaalista, jotta niiden käyttöikä olisi mahdollisimman pitkä. Kuvassa 6 on esimerkkejä anodissysteemeistä ja niiden sijainnista betonipoikkileikkauksessa.



Kuva 6. Esimerkkejä anodisysteemeistä ja niiden sijainnista betonipoikkileikkauksessa /1/.

Titaaniverkko on eniten käytetty ja hyvin toimiva anodisysteemi. Titaaniverkko voidaan helposti kiinnittää kaikkiin pintoihin. Sen käyttöikä on pitkä, 25 vuodesta jopa 100 vuoteen. Käytettävissä on verkkoja, joissa on vinoneliökuviointi ja joita voidaan käyttää betonipinnassa virrantiheyksillä 20, 30 tai 40 mA/m². Titaaniverkko vaatii sementtipohjaisen päällysteen, joka on usein ruiskubetoni.

Muita titaanianodeja ovat titaanikaistat, jotka asennetaan betoniin tehtyihin uriin tai reikiin, jotka täytetään asennuksen jälkeen sementtipohjaisella juotoslaastilla tai grafiitti täytteellä. Yleisesti titaani systeemien avulla on mahdollista tuottaa huomattavan suuria suojarvirtoja ilman että niiden säilyvyys vaarantuu.

Katodisessa estämisessä anodina käytetään myös titaaniverkkoa tai -kaistoja. Anodin virrantiheys on rajoitettu 100 mA/m² anodin pinta-alaa kohti riittävän pitkän käyttöiän saavuttamiseksi. Alhaisesta virrantiheydestä seuraa että anodimateriaalia tarvitaan vähän. Esimerkiksi metri aktivoitua titaanikaistaa (leveys 20 mm) betonin pinnassa voi riittää raudituksen korroosion estämiseen yhden neliömetrin alueelta rauditusmäärän ollessa suuri.

Johtavia pinnoiteanodeja ovat orgaaniset pinnoitteet ja metallipinnoitteet. Orgaaninen pinnoite koostuu orgaanisesta johtavasta päällysteestä ja betonin pintaan kiinnitetyistä erillisistä anodeista tai pinnoitteesta olevista johteista, joiden tehtävä on jakaa virta pinnoitteeseen. Metallipinnoitteet koostuvat kuumana ruiskutetuista metallipinnoitteista. Anodina on käytetty sinkkiä, sinkkiseoksia ja titaania.

Johtavia pinnoiteanodeja käytettäessä betonialustan käsittely ennen pinnoitteen asentamista ja pinnoitteen tartunta betoniin ovat oleellisia seikkoja, jotta anodina toimiva pinnoite toimii suunnitellun käyttöiän.

Sähköä johtavia asfalttipäällysteitä on käytetty pitkään ja menestyksellä Pohjois-Amerikassa siltojen ja pysäköintilaitosten kansirakenteissa. Ne eivät sovellu sivu- ja alapintoihin.

On myös käytetty usean tyyppisiä anodeja, kuten päällysteitä joissa on hiilirakeita tai hiilikuituja metallisten pinnoitteiden kanssa, sähköä johtavaa keramiikkaa jne.. Näistä on kuitenkin vähän pitkän ajan kokemusta.

Uhrautuvina anodeina käytetään tavallisimmin sinkki- alumiini- ja magnesiumseoksia. Uhrautuva anodi on suorassa kosketuksessa teräksen kanssa. Uhrautuvan anodin etuna on usein sen yksinkertaisuus ja helppo käyttö. Kysymysmerkkinä on käyttöikä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Tarvittava sähkövirta otetaan yleensä yleisestä sähköverkosta muuntajan/tasasuuntaajan välityksellä, joka muuntaa vaihtovirran riittävän alhaiseksi tasavirraksi. Virtayksikön tehtävänä on pitää virta tai jännite (riippuen kumpaa halutaan) määrätyllä tasolla.

Tarvittava virran tiheys ulko-olosuhteissa olevissa rakenteissa on teräspinta-alaa kohti pienempi kuin 20 mA/m^2 . Vaadittava virran tiheys laskee ajan kuluessa, tavanomaiset virrantiheydet ovat esimerkiksi aktivoitua anodisysteemiä käytettäessä pienempiä kuin 10 mA/m^2 . Vedessä olevissa rakenteissa riittävä polarisaatio saadaan virrantiheydellä $0,2\text{-}2 \text{ mA/m}^2$.

3.5 Suojauksen toteutus ja toiminnan varmistaminen

Suojauksen asentaminen on tehtävä huolellisesti. Asennuksessa on huomioitava betonoinnin aiheuttamat raskitukset. Betonointi ei saa vaurioittaa johdotuksia ja liitoksia. Monen suojauksen pitkäaikaiskestävyyden on pilannut huolimaton asennus.

Katodisen suojauksen toiminnan seuraamista varten on oltava järjestelmä (monitorointi-järjestelmä). Tällä varmistetaan että suojaamisen edellyttämät ehdot saavutetaan ja ylisuojausta ei tapahdu. Järjestelmä koostuu yleensä raudoituksen potentiaalimittaavista ja toiminnan kannalta edustaviin paikkoihin sijoitettua referenssielektrodeista tai vaimenemisen ilmaisevista antureista.

Eniten katodisen suojauksen toiminnan seuraamisen kriteerinä käytetään 100 mV :n depolarisaatiota. Joissakin tapauksissa, esimerkiksi vedenalaisissa tai roiskevyöhykkeillä olevissa rakenteissa potentiaalimittaus on osoittautunut sopivammaksi.

Nykyisin katodinen suojaus varustetaan data loggereilla ja siihen järjestetään mahdollisuuksien mukaan kaukovalvonta. Kaukovalvonta mahdollistaa systeemin toiminnan jatkuvan seuraamisen käymättä paikalla.

Asennuksen jälkeen varmistetaan suojauksen toiminta. Toimintaa testataan säännöllisesti alkuvaiheessa ja tehdään tarpeelliset virran voimakkuuden tai jännitteen säädöt. Kun suojaus toimii suunnitellusti, alkaa normaali käyttövaihe. Normaalin käytön aikana suojauksen toimintaa seurataan säännöllisesti.

Katodisen suojauksen tavoitteena on saada suojattavan teräksen (rakenteen) potentiaali- ja suojavirranjakautuma pysymään halutulla tasolla. Suojauksen toimivuuden varmistaminen edellyttää määrävälein tehtäviä mittauksia. Tätä varten mittauskohtia on oltava riittävän tiheässä.

Katodisen suojauksen käytännön ongelma on se, että suojausvirta pyrkii aina kulkemaan sieltä, missä vastus on pienin, eli käytännössä usein lyhyintä reittiä anodilta katodille. Tämä aiheuttaa sen, että suojattavan rakenteen eri osien välillä on aina jonkin verran virrantiheys- ja potentiaalieroja.

Käytännössä on osoittautunut että virtalähde ja vertailuelektrodien kestävyys ovat osoittautuneet suojauksen ”heikoimmaksi lenkiksi”. Virtalähde vaatii jatkuvaa vuosittain tapahtuvaa silmälläpitoa ja huoltoa. Jos suojauksen vaadittu käyttöikä on pitkä, seurantasysteemissä on oltava myös varmistus.

Jos katodisen suojauksen toiminta lakkaa jostakin syystä ja edeltävän ajan suojaus on toiminut suunnitellusti, kuluu korroosion käynnistymiseen aikaa. Tästä pitää huolen toimiva polarisaatio ja katodisen suojauksen aiheuttamat kemialliset muutokset betonissa.

3.6 Suojauksen mahdolliset haittavaikutukset betoniin ja teräkseen

Katodisella suojauksella on todettu useita haitallisia sivuvaikutuksia. Näitä on todettu lähinnä silloin kun suojausvirrat ovat olleet liian suuria. Seuraavia haitallisia sivuvaikutuksia on todettu /1, 4/:

- Vetyhauraus. Jos virranvoimakkuus on niin suuri, että teräksen potentiaali laskee pienemmäksi kuin -1000 mV (SCE), vetyä alkaa muodostua teräksen pinnassa. Tällöin korkealuokkaisia jänneteräksiä (murtolujuus > 700 MPa) koskeva vetyhaurausriski tulee ilmeiseksi. Tämän johdosta jännitetyissä rakenteissa Eurooppalaiset standardit rajoittavat potentiaalini - 900 mV (CSE). Vetyhaurausriski ei koske normaalia raudoitusta.
- Raudoituksen tartunnan heikkeneminen. Jos teräksen potentiaalit ovat erittäin alhaisia, voi raudoituksen ja betonin välinen adheesio heiketä, mikä vaikuttaa tartuntaan. Tartunnan heikkenemiseen liittyy monia epävarmuustekijöitä, mutta heikkeneminen on mahdollista pitkän ajan kuluessa, jos potentiaali laskee pienemmäksi kuin -1100 mV (CSE). Käytännössä tämä koskee pääasiassa sileitä raudoitustankoja.
- Betonin vaurioituminen anodin välittömässä läheisyydessä. Anodilla tapahtuvat reaktiot alkalien kanssa muodostavat happoja anodin ja betonin rajapintaan. Hapon muodostuminen voi olla haitallista anodin kanssa kosketuksissa olevalle betonille (sementti pasta) ja itse anodille, koska hapan ympäristö voi syövyttää betonia ja anodimateriaalia. Tavanomaisissa suojauksen käyttöolosuhteissa betoni ei vaurioidu. Kuitenkin jos virran voimakkuudet ovat suuria, voi betonin ja päällysteen tai pinnoitteen tartunta betoniin huonontua.
- Katodilla lisääntyvä alkalisuus voi vaurioittaa betonia, jos runkoaine on altis alkali-kiviaines reaktiolle. Suomessa käytetyt kiviainekset eivät yleensä ole alttiita mainitulle reaktiolle.
- Katodisen suojauksen yhteydessä esiintyy hajavirtakorroosion vaara.

Edellä mainitut seikat otetaan huomioon suunniteltaessa suojausta. Jos suojausvirrat ovat asianmukaiset, ei edellä mainituista seikoista ole haittaa katodisen suojauksen käytölle.

4 MILLOIN KATODISTA SUOJAUSTA KANNATTAA KÄYTTÄÄ /7/

Katodisen suojauksen käyttö edellyttää, että sen käytön ”sähköiset edellytykset” ovat voimassa. Muita vaikuttavia tekijöitä ovat rakenteen nykyinen kunto, korjauksen tavoiteltava käyttöikä sekä asennuksen ja korjauksen kustannukset. Ruotsin siltanormien siltojen ylläpitoa koskevassa osassa /2 / katodisen suojauksen käyttö edellyttää, ettei asennusvaiheessa korroosio ole vielä vaikuttanut rakenteen kantavuuteen.

Katodista suojausta on käytetty pääasiassa rakenteissa joissa on todettu kloridien aiheuttamaa korroosiota.

Koska rakennusten yksityiskohdat eroavat toisistaan, on mahdollista antaa ainoastaan yleisiä ohjeita katodisen suojauksen käytön edellytyksistä. Seuraavissa tapauksissa taloudelliset seikat tukevat katodisen suojauksen käyttöä /3/:

- Tärkeät rakenteet ja rakenteet, joiden edellytetään olevan jatkuvasti käytössä (esim. infrarakenteet, joiden korjaus aiheuttaa liikennekatkoksia).
- Vaikeasti korjattavat rakenteet. Näissä kunnossapidon tarve pienenee.
- Rakenteet, joihin vaurioita odotetaan syntyvän nopeasti.
- Rakenteet, joilta edellytetään pitkää käyttöikää.
- Rakenteet, joiden ulkonäkö on tärkeä tekijä.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VTT:n nimen käyttäminen mainoksissa tai tämän selostuksen osittainen julkaiseminen on sallittu vain VTT:stä saadun kirjallisen luvan perusteella.

Eräs vaikuttava tekijä voi myös joskus olla korjauksen aiheuttama melu, jota halutaan ympäristön takia välttää.

Suomessa katodista suojausta on käytetty useissa betonisilloissa. Ensimmäiset kohteet toteutettiin noin 20 vuotta sitten. Useissa toteutetuissa kohteissa korroosion tai korroosioriskin aiheuttaja on ollut karbonatisoituminen, minkä takia katodisen suojauksen käyttöä ko. kohteissa on jälkeinpäin kritisoitu. On kyseenalaista pysyykö katodinen suojaus toimintakunnossa riittävän pitkään, sillä karbonatisoituminen tapahtuu hitaasti ja sen aiheuttama käynnistynyt korroosio etenee hitaasti.

Suomessa betonisilloissa korroosio on merkittävä vaurioiden aiheuttaja. Syynä ovat suuressa osassa vanhoista silloista riittämätön betonipeite ja/tai betonipeitteen huono laatu. Aikaisemmin ei betonin laadun ja työnsuorituksen vaikutusta betonisillan rappeutumiseen ja käyttöikään huomioitu käytännössä juuri lainkaan. Tässä suhteessa tilanne on muuttunut merkittävästi.

Nykyisin tehtävissä betonisilloissa betonin laatu on merkittävästi parempi. Mikäli betonipeitteen paksuus on suunnitelmien mukainen ja betonipeitteen laatu on hyvä, karbonatisoitumisen aiheuttaman korroosion käynnistyminen tapahtuu pitkän ajan kuluttua. Myös kloridien tunkeutuminen betonipeitteeseen on hidasta.

Edellä esitetystä seuraa, että katodista estämistä eli katodisen suojauksen asentamista valmistuksen yhteydessä ei kannata käyttää. Suojaus ei todennäköisesti pysy käyttökunnossa ennen kuin siitä on käytännössä hyötyä.

Suomen olosuhteissa katodista suojausta kannattaa yleensä lähteä harkitsemaan vain kun kloridikorroosion riski on huomattava.

Betonisilloissa mahdollisia harkittavia käyttökohteita ovat :

- Merellisessä ympäristössä olevat vanhat sillat. Näissä on usein betonin laatu huono ja betonissa on mitattu korkeita kloridipitoisuuksia.
- Voimakkaan suolarasituksen kohteena olevat siltojen pilarit ja välituet.
- Voimakkaasti suolatuilla teillä olevien siltojen maatuet, välituet, kansilaatan päädyt ja laakerialustat, joihin vuotavista saumoista pääsee kloridipitoisia vesiä.
- Paikkaukset, joiden ympäristössä on klorideja (uhrautuvat anodit).

Katodisen suojauksen käyttö edellyttää lisäksi, ettei asennusvaiheessa korroosio ole vielä vaikuttanut rakenteen kantavuuteen, ts. raudoitus ei ole syöpinnyt. Katodisen suojauksen sähkökemiallisten edellytysten on luonnollisesti oltava voimassa.

Reunapalkeissa suolatuilla teillä kloridikorroosion riski on huomattava. Reunapalkissa katodisen suojauksen käyttö ei kuitenkaan yleensä tule kysymykseen, sillä betonin rapautuminen on määräävä rappeutumisilmiö.

Tällä hetkellä näyttää siltä, että katodinen suojaus on vaihtoehtoinen menetelmä, jonka käyttö meillä tulee kysymykseen harvoin, lähinnä erikoistapauksissa. Suomessa olosuhteet korroosion kannalta eivät ole niin vaikeat, että katodisen suojauksen käyttö yleistyisi mainittavasti.

5 YHTEENVETO

Raudoituksen korroosio on yleisimpiä teräsbetonirakenteissa korjaustoimenpiteitä aiheuttavista tekijöistä. Raudoituksen korroosio on sähkökemiallinen ilmiö ja tätä korroosion sähkökemiallista luonnetta voidaan käyttää hyväksi raudoituksen korroosion estämisessä ja pysäyttämässä. Betonirakenteissa käytettyjä sähkökemiallisia raudoituksen (korroosion) suojausmenetelmiä ovat katodinen suojaus, kloridien poisto ja uudelleenalkalointi. Mainituilla raudoituksen suojausmenetelmillä on samanlaiset perusteet ja monet käytännön yksityiskohdat. Pääasialliset erot koskevat käytettävää virranvoimakkuutta ja käsittelyn kestoa.

Katodinen suojaus on suojausmenetelmistä vanhin. Katodinen suojaus on pysyvä menetelmä. Uudelleenalkalointi ja kloridien poisto ovat uudempia menetelmiä. Uudelleenalkaloinnin ja kloridien poiston tarkoituksena on palauttaa alkuperäinen passiivinen ympäristö raudoitusta ympäröivään betoniin poistamalla korroosion edellytykset; korroosiota aiheuttavat kloridit poistetaan tai alkalisuus palautetaan.

Katodinen suojauksessa korroosio estetään tai pysäytetään lisäämällä virtapiiriin ylimääräinen elektrodi, jonka potentiaali on vielä alhaisempi kuin raudoituksena olevien anodialueiden. Katodisessa suojauksessa suojattava raudoitus muutetaan korroosioparin katodiksi kytkemällä rakenteeseen ulkopuolinen anodi ja syöttämällä piiriin tasavirtaa. Koska virta kulkee aina anodilta katodille, korroosio hidastuu tai estyy kokonaan.

Katodinen suojaus voidaan tehdä käyttämällä ulkopuolista virtalähdettä tai uhrautuvia anodeja. Uhrautuvalla anodilla tarkoitetaan epäjalosta metallista valmistettua elektrodiä, joka suojatessaan terästä syöpyy itse. Menetelmä perustuu galvaanisen korroosion hyväksikäyttöön eikä se ei tarvitse ulkoista virtalähdettä. Anodimateriaaleina käytetään tavallisimmin sinkki-, alumiini- ja magnesiumseoksia. Menetelmä on paljon yksinkertaisempi kuin käytettäessä ulkoista virtalähdettä.

Tehokkaampi suojaus saadaan käyttämällä ulkoista virtalähdettä. Ulkoisen virtalähteen järjestelmä koostuu ulkoisesta tasavirtalähteestä, virtajohtimina toimivista liukenemattomista anodeista ja referenssielektrodeista. Virtajohtimet toimivat anodit jakavat suojavirran tasaisesti rakenteeseen. Tarvittava suojavirta otetaan yleensä tasasuuntaajan välityksellä yleisestä vaihtovirtaverkosta.

Katodista suojausta on käytetty perinteisesti korjausten yhteydessä vanhoissa rakenteissa joissa korroosiota on odotettavissa jonkin ajan kuluttua. Uutena katodisen suojauksen muotona ulkomailla on otettu käyttöön nk. katodinen estäminen, jota on käytetty uusissa rakenteissa, joissa tulevaisuudessa korroosion käynnistyminen riski ilmeinen. Katodinen estäminen on ”kevyempi” ja halvempi toteuttaa kuin katodinen suojaus, koska on helpompi estää korroosion käynnistyminen kuin pysäyttää käynnissä oleva korroosio.

Ennen kuin katodisen suojauksen suunnittelu voidaan aloittaa, on suojattavan betonirakenteen kunto selvittävä. Tällöin on tärkeä selvittää raudoituksen korroosioalueet ja korroosion syy. Samalla on selvitettävä katodisen suojauksen toiminnan kannalta oleelliset seikat, raudoituksen jatkuva sähköinen kontakti ja betonin muodostama sähköinen yhteys anodin ja raudoituksen välillä. Kuntotutkimuksen tulokset varmistavat lopullisesti, onko katodista suojausta mahdollista ja kannattava käyttää. Jos esimerkiksi todetaan, että rakenteen kunto edellyttää huomattavia tavanomaisilla menetelmillä tehtäviä korjauksia, voi katodisen suojauksen käyttö tulla kannattamattomaksi.

Katodinen suojaus suunnitellaan aina tapauskohtaisesti jokaiselle rakenteelle. Katodisen suojauksen on toimittava koko rakenteen suunnitellun käyttöiän. Suunnittelussa on otettava huomioon suojattavan alueen pinta-ala ja muoto, korroosioympäristö, raudoituksen määrä ja laatu sekä anodien sijoittelu. Lisäksi

suunnitteluun kuuluvat sähköinen systeemin suunnittelu ja toiminnan seurantasysteemin (monitorointi) suunnittelu. Seurantasysteemillä varmistetaan että suojaamisen edellyttämät ehdot saavutetaan eikä ylisuojausta tapahdu.

Katodisella suojauksella on todettu haitallisia vaikutuksia mikäli suojausvirrat ovat liian suuria. Näitä ovat vetyhauraus, raudoituksen tartunnan heikkeneminen, betonin vaurioituminen anodin lähellä, alkali-kiviainesreaktio ja suojauksen yhteydessä esiintyvä hajavirtakorroosion vaara.

Katodisen suojauksen käyttö edellyttää yleisesti, ettei asennusvaiheessa korrosio ole vielä vaikuttanut rakenteen kantavuuteen. Katodista suojausta käyttämällä voidaan välttää ja pienentää betonipeitteiden purkamista ja korjaamista, mikäli nämä eivät ole jo ehtineet vaurioitua. Katodisen suojauksen sähkökemiallisten edellytysten on luonnollisesti oltava voimassa

Koska rakennusten yksityiskohdat eroavat toisistaan, on mahdollista antaa ainoastaan yleisiä ohjeita katodisen suojauksen käytön edellytyksistä. Pääasiassa katodista suojausta on käytetty rakenteissa joissa on todettu kloridien aiheuttamaa korroosiota. Kohteita ovat olleet tärkeät rakenteet ja rakenteet, joiden edellytetään olevan jatkuvasti käytössä (esim. infrarakenteet, joiden korjaus aiheuttaa liikennekatkoksia), vaikeasti korjattavat rakenteet ja rakenteet joilta edellytetään pitkää käyttöikää tai joiden ulkonäkö on tärkeä ja joihin vaurioita odotetaan syntyvän nopeasti.

Suomen olosuhteissa katodista suojausta kannattaa yleensä lähteä harkitsemaan vain kun kloridikorroosion riski on huomattava. Kysymykseen tulevat lähinnä meriveden tai suolauksen kanssa olevat rakenteet. Betonisilloissa mahdollisia harkittavia käyttökohteita ovat:

- Merellisessä ympäristössä olevat vanhat sillat. Näissä on usein betonin laatu huono ja betonissa on mitattu korkeita kloridipitoisuuksia.
- Voimakkaan suolarasituksen kohteena olevat siltojen pilarit ja välituet.
- Voimakkaasti suolatuilla teillä olevien siltojen maatuet, välituet, kansilaatan päädyt ja laakerialustat, joihin vuotavista saumoista pääsee kloridipitoisia vesiä.
- Paikkaukset, joiden ympäristössä on klorideja.

Katodista suojaus on olemassa olevan tiedon valossa pidettävä vaihtoehtoisena menetelmänä, jonka käyttö meillä tulee kysymykseen harvoin. Suomessa olosuhteet korroosion kannalta eivät yleensä ole niin vaikeat, että katodisen suojauksen käyttö yleistyisi mainittavasti.

LÄHTEET

/1/ Bertoni L, Elsener B, Pedferri P, Polder R. Corrosion of Steel in Concrete. John Wiley&Sons, Ltd. 409 s.

/2/ Bro 2002. Vägverkets allmänna tekniska beskrivning för underhåll av broar. Brounderhåll 2002. Publ 2002:48. Borlänge 2002. 90 s.

/3/ Cost 521 Workshop, Luxembourg, 18-19.2.2002. Luku 3.2 Electrochemical maintenance methods. s. 123-164.

/4/ EN 12696. Cathodic protection of steel in concrete. European standard 123-164.

/5/ Meuronen A, Westerlund E. Betoniterästen kloridikorrosio ja katodinen suojaus. Imatran Voima, T&K – tiedotteita. IVO-B-02/92. 45 s.

/6/ VTT tutkimusselostus N:o 202/0/89/BET. Betonirakenteiden katodinen suojaus, kirjallisuusselvitys.
24 s.

/7/ Seuraavien henkilöiden haastattelu: Jorma Huura / Insinööritoimisto Huura Oy, Erkki Lindberg / Konsultti, Teemu Montonen / Savcor Oy, Antti Rämetsä / Destia Oy.

Espoo 28.1.2008



Eero Punakallio
Palvelupäällikkö



Pertti Pitkänen
Erikoistutkija

JAKELU

Tilajaat
VTT/Arkisto

Alkuperäinen
Alkuperäinen