



Kloridien sähköinen poisto betonista

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



| | |
|------------------------------|--|
| Tilaaaja | Tiehallinto, ATP, 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 | OT9500-17 10365/2006/30/33 /TIEH ad 24/2007/SAF / 12.3.2008 /VYR Tilausnro 286013/-/212 /RHK Tilausnumero/Pvm 280019251/ 29.02.2008 /Helsinki Suullinen tilaus, Wille Siuko/Tampere Päätöspöytäkirja 23.5.2008, 3892-2006 (065)/ Turku |
| Yhteyshenkilö VTT:ssä | VTT Tutkija Liisa Salparanta Kemistintie 3, Espoo PL 1000, 02044 VTT Puh. 020 722 6913 Faksi 020 722 7002 Sähköposti: liisa.salparanta@vtt.fi |

Tehtävä **Kloridien sähköinen poisto betonista**

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

KLORIDIEN SÄHKÖINEN POISTO BETONISTA

| | |
|--|----|
| TIIVISTELMÄ | 3 |
| ABSTRACT..... | 4 |
| SAMMANDRAG | 5 |
| JOHDANTO | 6 |
| TEORIA..... | 6 |
| VAIKUTUS TOIMIVUUTEEN..... | 10 |
| SOVELTUVUUS | 11 |
| KÄYTÄNNÖN KOKEMUKSET..... | 14 |
| NORCURE | 28 |
| OHJEET, MÄÄRÄYKSET JA STANDARDIT SEKÄ TIEVIRANOMAISTEN KÄYTÄNTÖ..... | 28 |
| JOHTOPÄÄTÖKSET..... | 29 |
| YHTEENVETO..... | 29 |
| LÄHTEET..... | 32 |

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

TIIVISTELMÄ

Kloridien sähkökemiallisessa poistossa rakenteen pinnalle levitetään anodi ja raudoitteista tehdään virtapiirin katodi. Rakenteen pinnalle lisätään ulkoinen elektrolyytti, jonka välityksellä sähkövirta kulkee anodin ja rakenteen välillä, joka varmistaa anodin tasaisen sähköisen kontaktin rakenteeseen ja johon rakenteesta poistuvat kloridi-ionit kerääntyvät.

Sähkövirta kulkee pääasiassa lyhintä reittiä anodin ja katodin välillä. Siksi ionien siirtyminen raudoitteiden takaa on erittäin hidasta ja kloridien poistuminen on tehokkainta suojabetonikerroksesta. Klorideja poistuu yleensä 40-55 %. Kloridien sähkökemiallisen poistokäsittelyn seurauksena korrosio on hidastunut käytännössä 5 – 10 vuotta käsittelyn jälkeen. Rakenteen suojaaminen käsittelyn jälkeen kloridien tunkeutumista vastaan pidentää vaikutuksen kestoaikaa.

Menetelmän käyttöön liittyy väärin käytettynä haitallisia sivuvaikutuksia. Alkuaikojen huonot käyttökokemukset johtuvat nykykäsityksen mukaan menetelmän virheellisestä käytöstä ja soveltumattomista kohteista. Rakenteesta poistuu klorideja eikä haitallisia sivuvaikutuksia aiheudu, kun virtatiheys on pienempi kuin 5 A/ teräs-m² ja kokonaisvirta on pienempi kuin 1500 Ah/ teräs-m². Käsittely kestää yleensä 4 – 8 viikkoa. Jaksottainen käsittely, 2 vk käsittelyä – 1 vk taukoa, on tehokkaampi kuin yhtäjaksoinen. Pääosa raportoiduista käyttökokemuksista on positiivisia, kun menetelmää on käytetty oikein soveltuviin kohteisiin.

Menetelmä soveltuu teräsbetonirakenteisiin,

- jotka kärsivät kloridikorroosiosta
- jotka eivät ole jännitettyjä,
- jotka on raudoitettu harjatangoin,
- joiden betoni on korkeintaan vähän vaurioitunut,
- joiden kiviaines ei ole alkalireaktiivista (Jos kiviaines on alkalireaktiivista, menetelmän aiheuttamaa säröilyä voidaan ehkäistä käyttämällä litiumpitoista elektrolyyttiä.),
- joiden raudoitteiden sähköinen kontakti on kohtuullinen ja
- joiden betonin sähkövastus on kohtuullinen.

Menetelmän kustannukset riippuvat voimakkaasti käsiteltävästä rakenteesta ja sen kunnosta. Kirjallisuudessa raportoidut kustannustiedot vaihtelevat välillä 20 – 1 700 €/m².

Harvan maan tieviranomaiset ovat asettaneet vaatimuksia tai laatineet ohjeita koskien kloridien sähkökemiallista poistamista teräsbetonirakenteista. USA:n osavaltioiden tieviranomaiset pitävät kloridien sähkökemiallista poistamista vartenotettavana kunnostusmenetelmänä ja Norjan Statens vegvesen:llä on menetelmää koskevat vaatimukset. Eurooppalainen kloridien sähköistä poistamista koskeva standardi on valmisteilla. Ruotsin Vägverketin käyttämä konsultti Korrosionsinstitutet suhtautuu menetelmään kielteisesti.

Suomessa ei ole menetelmän käyttökokemusta.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

ABSTRACT

In electrochemical chloride removal an anode is spread over the surface of the structure and the reinforcement acts as the cathode of the circuit. An external electrolyte ensuring even electric contact to the structure and into which the chloride ions accumulate is used.

The electric current flows mainly through the shortest route between the anode and the cathode. Therefore the migration of the ions from behind the reinforcement is very slow and the chlorides are mainly removed from the concrete cover. Normally 40 – 55 % of the chlorides are removed. In practice the chloride corrosion is reduced for 5 – 10 years after the treatment. Preventing chloride ingress after treatment e.g. by coating prolongs the effect.

The method has negative side effects when misused. According to present knowledge poor experiences at early times resulted from misuse and application of the method on unsuitable structures. Chlorides are removed with no negative side effects when current density does not exceed 5 A/ steel-m² and the total current does not exceed 1500Ah/ steel-m². The treatment takes normally 4 – 8 weeks. A periodical treatment, 2 weeks on – 1 week off, is more effective than continuous treatment. Most of the reported practical experiences are positive when the method has been correctly applied on suitable structures.

The method is applicable for reinforced concrete structures

- that suffer from chloride corrosion,
- that are not pre or post stressed,,
- are reinforced with ribbed steel bars,
- with only slightly damaged concrete,
- with no alkali reactive aggregate (In case of alkali reactive aggregate cracking may be prevented using lithium containing electrolyte.),
- with at least moderate electric continuity of the reinforcements and
- with moderate concrete resistance.

The costs of the method depend strongly on the structure and its condition. The costs reported vary between 20 – 1 700 €/m².

The road authorities of only a few countries have set requirements or prepared directions for electrochemical chloride removal from reinforced concrete structures. The federal road authorities in USA consider the method suitable for restoration and Norwegian Statens vegvesen has set requirements for the method. A European standard for the electrochemical chloride removal is under preparation. The consult used by Swedish Vägverket (Korrosionsinstitutet) is set against the method.

The method has never been used in Finland.

SAMMANDRAG

I den elektrokemiska utdrivningen av klorider breds är en anod på strukturen och armeringen fungerar som den elektriska kretsens katod. En extern elektrolyt används för att säkra att anoden har jämn kontakt med strukturen och för att samla klorider i.

Den elektriska strömmen tar huvudsakligen den kortaste vägen mellan anoden och katoden. Därför rörs ionerna mycket långsamt bakom armeringen och klorider drivs effektivast ut från skyddsbetongen. Normalt minskar kloridhalten med 40 – 55 %. Den elektrokemiska kloridutdrivningen minskar korrosionen i praktiken för 5 – 10 år efter behandlingen. Skyddandet av strukturen mot kloridinträngning efter behandlingen förlänger effekten.

Missbruket av metoden innebär negativa sidoeffekter. De tidigare dåliga praktiska erfarenheterna av metoden orsakades enligt nuvarande kunskap av felaktig användelse av metoden och dess applicering på olämpliga objekter. Klorider avlägsnas utan negativa sidoeffekter då eltätheten är mindre än 5 A/ järn-m² och totalströmmen är mindre än 1500 Ah/ järn-m². Behandlingen tar normalt 4 – 8 veckor. Periodisk behandling, 2 veckor behandling – paus för 1 vecka, är effektivare än oavbruten behandling. De flesta av de rapporterade praktiska erfarenheterna är positiva då metoden har använts rätt på lämpliga objekter.

Metoden är lämplig för armerade betongkonstruktioner

- med kloridkorrosion,
- som inte är spända,
- med kamstång,
- där betongen har högst lätta skador,
- utan alkalieraktivt aggregat (I så fall kan sprickningen förhindras med litiumhaltig elektrolyt.),
- där armeringen har elektrisk kontinuitet och
- där betongen har moderat elektrisk resistans.

Kostnaderna av metoden beror kraftigt på strukturen och dess tillstånd. De rapporterade kostnader varierar mellan 20 – 1 700 €/m².

I ändast få länder har vägmyndigheterna ställt krav på eller utarbetat instruktioner för elektrokemisk kloridutdrivning från betong konstruktioner. Vägmyndigheter i USA:s delstater anser metoden lämplig för reovering och Norges Statens vegvesen har ställt krav på metoden. En europeisk standard på elektrokemisk kloridutdrivning från betongkonstruktioner är under beredning. Konsulten (Korrosionsinstitutet) för Vägverket i Sverige förhåller sig negativt till metoden.

Metoden har inte prövats i Finland.

JOHDANTO

Teräsbetonirakenteisiin voidaan soveltaa säilyvyyden parantamiseksi kolmenlaista perustetaan samanlaista sähkökemiallista menetelmää:

- katodinen suojaus (cathodic protection, CP). Joskus erotetaan katodinen suojaus tarkoitamaan käynnistyneen korroosion hillitsemistä ja katodinen ennaltaehkäisy (cathodic prevention, CPr) tarkoittamaan uuden rakenteen raudoitusten suojaamista.
- kloridien sähkökemiallinen poisto (electrochemical chloride extraction, ECE, electrochemical chloride removal, ECR, desalination) ja
- uudelleenalkalointi (realkalisation, ReA).

Menetelmät perustuvat sähköiseen virtapiiriin, jossa on ulkoinen anodi ja raudoitusteräket toimivat katodina. Menetelmät eroavat toisistaan pääasiassa virtatiheyden ja käsittelyn keston osalta taulukon 1 mukaisesti. Mitä tahansa edellä mainittua menetelmää käytettäessä, myös muiden menetelmien ilmiöitä tapahtuu samanaikaisesti.

Taulukko 1. Teräsbetonirakenteisiin sovellettavien sähkökemiallisten menetelmien yleisiä ominaisuuksia /33/,/47/,/53/.

| Menetelmä | Kesto | Tyypillinen virtatiheys |
|---|--------------------------------------|--|
| Katodinen suojaus: - käynnistyneen korroosion hillitseminen - uuden rakenteen suojaaminen | Pysyvä | 0,01 – 0,02 mA/ teräs-m ² 0,001 – 0,002 mA/ teräs-m ² |
| Uudelleen alkalointi | Päiviä | 1 A/ betoni-m ² |
| Kloridien poisto | Päiviä - viikkoja (4 – 8 viikkoa) | 1 – 2 A/ teräs-m ² 1 A/ betoni-m ² |

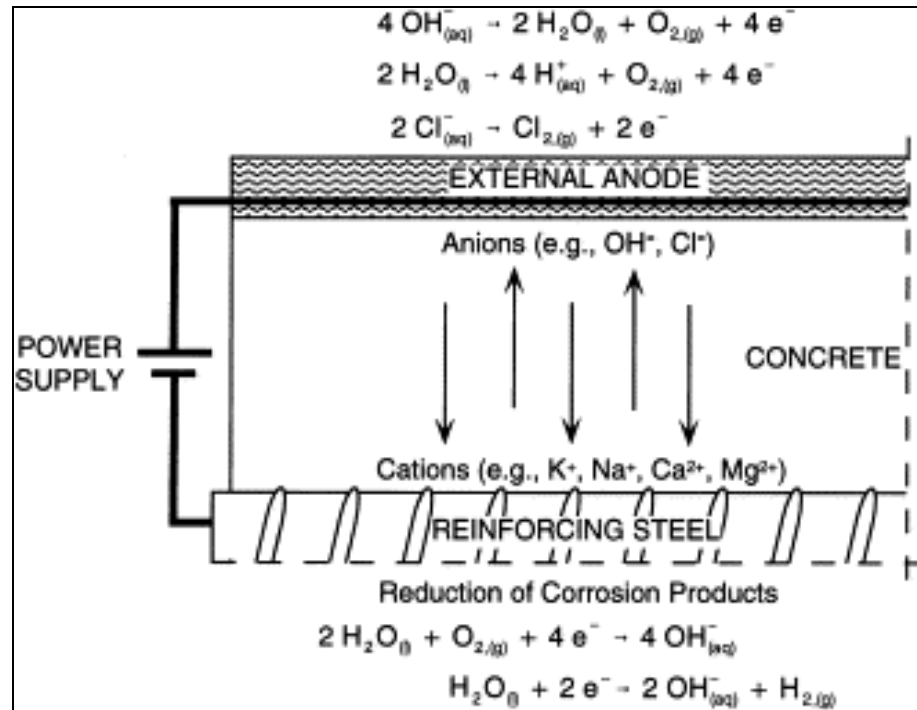
TEORIA

Kloridien sähkökemiallisessa poistossa rakenteen pinnalle levitetään anodi ja raudoitteista tehdään virtapiiriin katodi. Rakenteen pinnalle lisätään ulkoinen elektrolyytti, jonka välityksellä sähkövirta kulkee anodin ja rakenteen välillä, joka varmistaa anodin tasaisen sähköisen kontaktin rakenteeseen ja johon rakenteesta poistuvat kloridi-ionit kerääntyvät. Menetelmän periaate esitetään kuvassa 1.

Kun sähkövirtaa ei kulje lainkaan tai virtatiheys on hyvin alhainen (esim. katodilla < 1 mA/m²), ionien kulkeutumista määrää pääasiassa huokosliuoksen ja ulkoisen elektrolyytin konsentraatiogradientista aiheutuva diffuusio. Tällöin kaikki ionit liikkuvat kohti anodia, jossa niiden väkevyys on suhteellisen alhainen. Mitä korkeampi ionilajin diffuusiokerroin on sitä nopeammin ionit liikkuvat. Cl⁻-ionien poistuminen on tällaisessa tapauksessa melko hidasta. /57/

Kun virtatiheys kasvaa ionit alkavat siirtyä myös sähkökentän gradientin aiheuttamalla elektromigraatiolla. Anionit kuten Cl⁻, OH⁻, CO₃²⁻ ja SO₄²⁻ siirtyvät raudoitteiden läheisyydestä kohti anodia ja elektrolyytissä tai huokosliuoksessa olevat sekä sementtihydraateista vapautuvat kationit kuten Ca⁺, K⁺ ja Na⁺ kulkeutuvat vastakkaiseen suuntaan kohti katodisia raudoitteita. Ioneja siirtyy suhteessa niiden kuljetuslukuun. /20/, /21/, /26/, /30/, /32/, /33/, /52/, /57/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.



Kuva 1. Kloridien sähkökemiallisen poistamisen periaate teräsbetonirakenteesta /37/.

Kun virtatiheys edelleen kasvaa, migraatiosta tulee määräävä anodin ja katodin välisellä alueella ja elektro-osmoosin ja adsorption aiheuttama elektrolyytin kulkeutuminen ja konsentraatiogradientin aiheuttama ionidiffuusio ovat merkityksettä /18/, /33/. Suuremmalla virtatiheydellä (esim. katodilla $> 8 \text{ A/m}^2$) raudoitteiden läheisyydestä siirtyy enemmän Cl^- -ioneja pois, kuin sinne siirtyy migraatiolla K^+ ja Na^+ -ioneja. Myös OH^- -ionien konsentraatio kasvaa teräskatodilla nopeammin. Raudoitusteräskatodin takana ionit siirtyvät edelleen diffusiolla ja virtatiheyden kasvu vaikuttaa erittäin vähän Cl^- -ionien poistumiseen raudoitteiden takaa. /57/

Huokosliuoksessa olevat erilaiset ionit osallistuvat kokonaissähkövirtaan konsentraatiosuhteessaan, c_i , ja ionin liikkuvuutensa, u_i , suhteessa. Kloridin kuljetusluku, t_{Cl} , määrää kuinka paljon tasavirtaa kloridi-ionit kuljettavat, I_{Cl} , suhteessa kokonaisvirtaan, I_{tot} . /20/

$$t_{\text{Cl}} = \frac{I_{\text{Cl}}}{I_{\text{tot}}} = \frac{c_{\text{Cl}} u_{\text{Cl}} |z_{\text{Cl}}|}{\sum c_i u_i |z_i|} \quad (1)$$

missä t = kuljetusluku

I = tasavirta (A/m^2)

c = konsentraatio (mol/m^3)

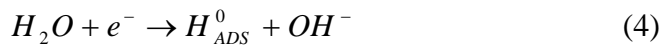
u = ionin liikkuvuus ($\text{m}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

z = ionin varaus

Raudoitteille kulkeutuvat kationit passivoivat teräspinnan. Tämän lisäksi raudoitteilla muodostuu OH^- -ioneja, jotka kohottavat huokosliuoksen pH:n raudoitteiden läheisyydessä, mikä

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

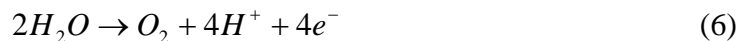
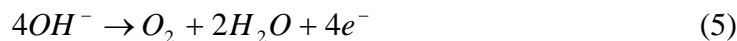
myös on eduksi raudoitteille. Teräs/betoni rajapinnassa voi kehittyä myös vetyä, kun teräksen potentiaali laskee ”vety-viivan” alapuolelle. /26/, /33/, /37/, /49/:



Kaavassa $4 H_{ADS}^0$ on naskentti vety (yksittäinen vetyatomi, joka on olemassa lyhyen aikaa, mutta riittävän kauan vaikuttaakseen kemiallisiin reaktioihin.), joka voi joko tunkeutua metalliin tai muodostaa vetykaasua /49/.

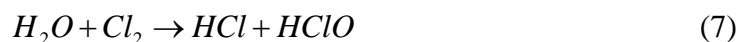
Raudoitteille kulkeutuvat kationit (kuten Ca^+ , K^+ ja Na^+) reagoivat katodireaktiossa muodostuvien OH^- -ionien kanssa muodostaen alkalihydroksideja /32/.

Anodilla voi kehittyä kloorikaasua ja elektrolyytti voi happamoitua /18/, /26/, /33/, /37/, /49/:



Anodilla tapahtuvat ainoastaan reaktiot 5 ja 6, kunnes ulkoiseen elektrolyyttiin tulee anioneja betonista. H^+ -ionit lähtevät kohti negatiivista raudoitusta ja kohtaavat matkalla vastakkaiseen suuntaan kulkevat OH^- ja Cl^- -ionit. Ionit reagoivat keskenään, jolloin muodostuu vettä, H_2O , ja suolahappoa, HCl . Anodille saapuvat Cl^- ionit muodostavat kloorikaasua yhtälön 7 mukaisesti. /18/

Elektrolyytissä voi tapahtua seuraava reaktio /49/:



Sähkökemiallisessa kloridien poistossa kloridit poistuvat aluksi nopeasti. Sitten poistuminen hidastuu merkittävästi. Ensin poistuu huokosliuoksessa oleva vapaa kloridi. Poistuneet Cl^- -ionit korvautuvat sisemmältä tulleilla Cl^- -ioneilla. Koska sitoutuneen ja vapaan kloridimäärän välillä on kemiallinen tasapaino, prosessi aiheuttaa betoniin sitoutuneen kloridin vapautumista huokosliukseen, josta se edelleen poistuu ulos betonista. Prosessissa laskevat siis sekä vapaa- (vesiliukoinen) että kokonais- (happoliukoinen) kloridipitoisuus. /1/, /18/, /22/, /33/, /39/

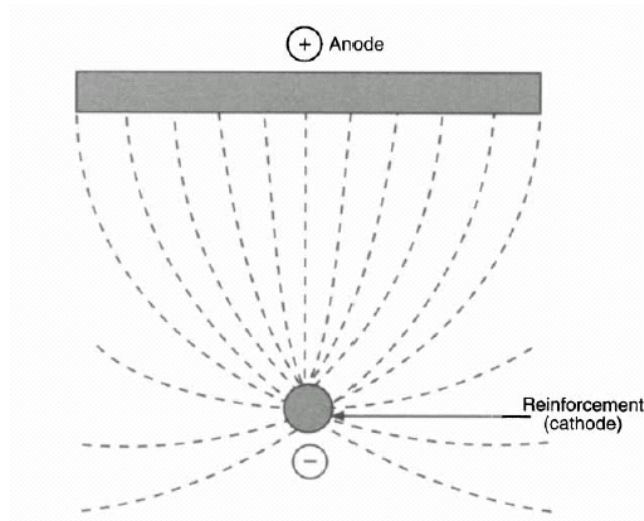
Prosessin edetessä Cl^- -ionien poistuminen hidastuu ja lopulta lakkaa, koska sitoutuneita klorideja vapautuu huokosliukseen hitaammin kuin niitä poistuu ja koska muut anionit, erityisesti katodilla muodostuvat OH^- -ionit, kilpailevat anodille kulkeutumisessa Cl^- -ionien kanssa ja koska lisäksi vielä OH^- ionit kulkeutuvat tehokkaammin kuin Cl^- -ionit, koska niiden kuljetusluku on huomattavasti suurempi, OH^- -ioneja muodostuu katodilla nopeammin kuin niitä

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

kulkeutuu pois. Siksi OH^- -ionien konsentraatio kasvaa katodin läheisyydessä. /10/, /26/, /30/, /49/

Koska sitoutuneen kloridin vapautuminen on hidasta vapaan kloridin poistumiseen verrattuna, vapaa kloridi loppuu ja poistokäsittely muuttuu tehottomaksi. Siksi jaksottainen käsittely parantaa tehoa. Riittävä käsittelyväli on päiviä. Elsenerin mukaan jaksotus voisi olla 2 vk käsittelyä – 1 vk taukoa. /20/

Sähkövirta kulkee pääasiassa lyhintä reittiä anodin ja katodin välillä (kuva 2). Raudoitteiden takana ja raudituskerrosten välissä ionit siirtyvät diffuusiolla, joka on huomattavasti hitaampaa kuin kulkeutuminen sähkökentän vaikutuksesta. Lisäksi raudoitteiden takaisten Cl^- -ionien on kuljettava negatiivisesti varautuneen ulomman raudituskerroksen ohi matkallaan ulos betonista. Siksi ionien siirtyminen raudoitteiden takaa on erittäin hidasta. /22/, /57/



Kuva 2. Raudoitusterästangon ja betonin pinnalla olevan anodin välisen sähkökentän virtausviivat /18/.

Eri lähteiden mukaan klorideja voidaan yleensä poistaa betonista sähkökemiallisesti 40-55 % alkuperäisestä kloridimäärästä /1/, /4/, /22/, /26/, /41/. Huomattavasti suurempiakin lukuja on raportoitu, kuten 80 % betonin pinnasta ja 50 - 80 % raudoitteiden tasalta /20/, /27/.

Klorideja poistuu tehokkaimmin suojabetonikerroksesta, josta poistuu huomattavasti suurempi osuus klorideista kuin syvemmältä. Kaikkein tehokkainta poistuminen on raudoitusterästankojen läheisyydestä n. 10 mm vyöhykkeeltä. Klorideja jää sinne, missä sähkövirta on alhaisin – raudoitteiden väliin ja taakse. Klorideja poistuu raudoitusterästankojen takaa vain aivan tankojen läheisyydessä, ei kauempaa /1/, /4/, /18/. Kloridien poisto raudoitteiden tasalta ja niiden takaa tehostuu, kun käytetään ulkoista katodia etäällä kloridien lähteestä /1/.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

VAIKUTUS TOIMIVUUTEEN

Kloridien sähkökemiallinen poisto laskee Cl^- -ionipitoisuuden aktiivisissa pistekorrosiopisteissä vähentäen pistekorrosiota /42/.

Sen lisäksi, että raudoitteiden läheisyydestä poistuu klorideja, teräksen pinnalle muodostuu Ca(OH)_2 kerros, jonka takia kloridipitoisuuden kynnsarvo kohoaa ja siksi kloridien poisto estää raudoitteiden korrosiota, vaikka klorideja jäisi runsaastikin betoniin. Lisäksi raudoitteiden ympäristö alkalisoituu ja teräksen passiivikalvo uudistuu eli teräs uudelleen passivoituu /4/, /18/, /20/, /21/, /28/, /33/, /34/. Korrosio on hidastunut vielä kauan kloridien sähkökemiallisen poiston jälkeen /22/. Vaikutuksen kesto aika on käytännössä vuosia, ehkä 5 – 10 vuotta /28/.

Marcotte ym:n laboratoriotutkimuksessa kloridien sähkökemiallinen poisto pysäytti kloridikorroosion, mutta kiihdytti yleistä korrosiota. Tämä johtuu OH^- -ionien paikallisesta kerääntymisestä ja hapen sähkökemiallisesta pelkistymisestä teräs/betoni -rajapinnalla. Ensimmäinen aiheuttaa betonin pH:n kohoamisen teräs/betoni -rajapinnassa niin korkeaksi, että korrosio on mahdollinen, ja jälkimmäinen estää uudelleenpassivoitumisen. Siten on mahdollista, että yleinen korrosio jatkuu itsepintaisesti käsitellyillä alueilla kunnes saavutetaan uudelleen tasapaino teräs/betoni -rajapinnassa (eli OH^- -ionien diffuusio betonipeitekerroksen läpi ja hapen diffuusio teräspinnalle). Vasta, kun tämä tilanne on saavutettu, käsiteltyä rakennetta voi pitää kunnostettuna /37/. Marcotte ym:n kokeessa virtatiheys oli huomattavasti korkeampi ($8,37 \text{ A/ teräs-m}^2$) kuin käytännössä ($1-2 \text{ A/ teräs-m}^2$), joten käytännössä näin ei tapahdu.

Kloridien sähkökemiallisen poiston yhteydessä alkali-ionien (Na^+ , K^+) kerääntyminen teräs/betoni -rajapintaan johtaa betonin uudelleenalkaloitumiseen raudoitteiden läheisyydessä. Sivuvaikutuksena on sementtisilikaattihydraattien pehmeneminen sekä raudoitteiden ja betonin välisen tartunnan heikkeneminen. Alkaleja kerääntyy ja siten myös tartunta heikkenee sitä enemmän mitä korkeampi alkuperäinen Cl^- -ionipitoisuus on ja mitä korkeampaa virtatiheyttä käytetään /32/, /49/. Myös rakenteen geometria ja rauditusjärjestelmä vaikuttavat alkalien kerääntymiseen /31/. Laboratoriokokeiden tulosten perusteella teräs/betoni -rajapinnan muutokset heikentävät rakenteiden, joissa on erikoislujasta teräksestä valmistetut raudoitteet, rakenteellista toimintaa, kun virtatiheys on suurempi kuin $1,0 \text{ A/ betoni-m}^2$ /32/. Bennett J. ym:n mukaan tartunnan kannalta ei suositella virtatiheyden 5 A/ teräs-m^2 ja kokonaisvirtamäärän $1500 \text{ Ah/ teräs-m}^2$ ylittämistä, kun kyseessä ovat pehmeästä teräksestä valmistetut pyörötangot /4/. (Yleensä virtatiheys 1 A/ betoni-m^2 on huomattavasti pienempi kuin 5 A/ teräs-m^2 .)

Raudoitteiden pinnassa oleva ruoste parantaa tartuntaa. Paisuvien korrosiotuotteiden eliminointuminen, kun klorideja poistetaan sähköisesti, laskee tartuntalujuutta. Kun käsittely kestää riittävän kauan, tartuntalujuus laskee ei-ruostuneen teräksen tasolle /32/, /49/. Tartunnan heikkeneminen vaikuttaa ainoastaan pyörötankojen toimintaan. Harjaterästankojen tartunta perustuu harjoihin ja niiden tartunta ei heikkene /4/, /28/.

Aineiden liukeneminen sementtikivestä kloridien sähkökemiallisessa poistossa kasvattaa huokoisuutta ja pehmentää sementtikiveä raudoitteiden läheisyydessä. Pehmeneminen on vähäistä. Eräässä laboratorioskokeessa pehmeneminen ulottui 10 mm:n etäisyydelle raudoitteen pinnasta. Muuttunut sementtikivi on hygroskooppista, joten kyseinen alue näkyy raudoitteen ym-

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

päristön tummuutena /4/, /30/. Eräissä kokeissa huokoisuus kasvoi 25 – 30 %. Huokoskoko pienenee ja huokosten välimatka lyhenee. Halkaisijaltaan sekä 0,001 - 1 µm että 1 - 10 µm huokosten määrä kasvaa merkittävästi. /3/, /4/, /49/, /52/. Huokoisuuden muutos ei ole haitallista, kun virtatiheys on pienempi kuin 5 A/ teräs-m² ja kokonaisvirta ei ylitä 1500 Ah/ teräs-m² /4/. Sementtikiven pehmenemistä ja puristuslujuuden laskua ilmenee suuremmilla virtatiheyksillä (3 A/ betoni-m²), mutta pienemmillä tiheyksillä (1 A/ betoni-m²) vaikutus on merkityksetön /27/, /30/, /34/, /49/. Joissakin tutkimuksissa ei ole todettu tilastollisesti merkittävää muutosta mikrokovuudessa, kun käsittely on kestänyt 12 viikkoa ja virtatiheys on ollut 5 mA/m²... 5 A/m² /49/. (Lähteessä ei ole mainittu onko virtatiheys ilmoitettu betonin vai teräksen pinta-alaa kohti. Teräs-m²:ä kohti ilmaistuna virtatiheys on yleensä suurempi luku kuin betoni-m²:ä kohti ilmaistuna. Luku voi olla jopa 5 –kertainen.)

Karbonisoituneessa betonissa alkaleja kerääntyy vähemmän kuin karbonisoitumattomassa betonissa. Alkaliin aiheuttama sementin silikaattihydraattien pehmeneminen on siis oletettavasti vähäisempää karbonisoituneessa betonissa. /31/

Kloridien sähkökemiallisessa poistossa käytettävä korkea jännite johtaa väistämättä naskentin vedyn muodostumiseen (kaava 4). Mikäli vety absorboituu metalliin, se voi johtaa vetyhaurastumiseen ja heikentää teräksen murtositkeyttä. Tämä koskee myös pehmeää terästä, joka ei kuitenkaan ole niin herkkä vetyhaurastumiselle kuin korkealujuusteräs. Vetyhaurastuminen vaikuttaa vain väliaikaisesti ja riski on marginaalinen. Sen sijaan vedyn aiheuttama jännityskorroosiosäröily on vaarallinen, koska se voi johtaa yhtäkkiseen ja odottamattomaan rakenteen murtumiseen. Mikäli muodostuu vetykaasua paine voi paikallisesti kohota ja aiheuttaa halkeilua. Nykytietämyksen mukaan vedyn muodostuminen ei haittaa rakennetta, mikäli virtatiheys on korkeintaan 1 A/ betoni-m². /7/, /49/, /53/ Samaa virtatiheyden arvoa, 1 A/ betoni-m², pidetään turvallisena vaikutuksiltaan myös muihin ominaisuuksien /4/, /27/, /30/, /32/, /34/, /49/.

Alkalimetalli- ja OH⁻ -ionien kerääntyminen raudoitteiden läheisyyteen kloridien sähkökemiallisen poiston yhteydessä voi aiheuttaa alkalisilikareaktion, jos kiviaines on alkalireaktiivista /4/, /49/, /53/. Alkalisilikareaktiot voidaan estää käyttämällä elektrolyyttinä litiumboraattia /4/.

Kloridien sähkökemiallinen poisto aiheuttaa betonin pinnalle tiiviisti kiinni olevaa valkoista ainetta. Aineen poisto on vaikeaa. Ilmiö on tapahtunut myös oikeissa siltakansissa. Ainetta ilmaantuu raudoitusterästankojen kohdalle. Ilmeisesti muodostunutta ainetta on jokaisen raudoitusterästangon kohdalla koko betonipeitteen paksuudelta. Valkoista ainetta saostuu myös halkeamiin ja huokosiin. Saostuvan aineen pH on korkea ja se on ilmeisesti kalsiumhydroksidiä. Saostuminen johtune OH⁻:n muodostumisesta teräksellä ja siitä, että vedyn kupliminen tuo tämän OH⁻:n pintaan, jolloin muodostuu Ca(OH)₂ /20/, /49/. Myös teräspinnalta on löydetty valkoista tuotetta käsittelyn jälkeen /21/.

SOVELTUVUUS

Perinteiseen kloridipitoisen vaurioituneen teräsbetonirakenteen korjaamiseen kuuluu kloridipitoisen betonin poistaminen. Jos poistettava betoni on hyväkuntoista, kloridien sähkökemiallinen poisto voi Ihekwan mukaan olla parempi vaihtoehto /30/. Menetelmä soveltuu parhaiten ja on kustannustehokkaimmillaan ennen, kun betoni on varioitunut merkittävästi ja rau-

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

doitteet ovat aktiivisessa korroosiotilassa /4/, /20/. Käsittely sekä laskee kloridipitoisuutta että uudelleenpassivoi raudoitteet. Jaksottainen käsittely tehostaa vaikutusta /20/. Mietzin mukaan sähkökemiallinen kloridien poisto ja katodinen suojaus ovat ainoat mahdolliset runsaasti klorideja sisältävien pilareiden, perustusten tai monoliittisten rakenneosien säilyvyyden varmistavat menetelmät /18/. Bennettin mukaan kloridien poistomenetelmä soveltuu parhaiten kuivalla maalla oleville yksinkertaisille rakenteille /5/. Rakenteen suojaaminen käsittelyn jälkeen kloridien tunkeutumista vastaan pidentää käsittelyn vaikutusaikaa /20/. Kun kloridipitoisuus on korkea ja korroosionopeus suuri, kloridien sähkökemiallinen poisto ei riitä takaamaan rakenteen käyttöiän pitenemistä /21/.

Kloridien poistotehokkuus riippuu käsiteltävästä rakenteesta ja sen muodosta sekä raudoitteiden muodosta, määrästä ja sijainnista. Menetelmä toimii paremmin pyöreäpoikkileikkauksissa kuin litteissä rakenteissa, koska kaarevissa rakenteissa raudoitusterästangot ovat tyypillisesti tiheämmässä ja raudoitteiden määrä on suurempi, jolloin kloridien sähkökemiallinen poisto on tehokkaampaa. Litteissä rakenteissa menetelmä toimii tehokkaimmin, kun raudoitukset ovat rakenteen kummallakin pinnalla samanlaiset ja kohdakkain. Erityisesti litteät rakenteet saattavat tarvita uusintakäsittelyä. /22/, /31/, /33/

Taulukossa 2 esitetään eri tekijöiden vaikutus kloridien sähkökemialliseen poistoon /49/.

Taulukko 2. Eri tekijöiden vaikutuksia kloridien sähkökemialliseen poistoon /49/.

| Tekijä | Vaikutus |
|---|----------------------------------|
| Tiheämpi raudoite | Kiihdyttää kloridien poistumista |
| Käytetyn jännitteen kohottaminen | Kiihdyttää kloridien poistumista |
| Korkeampi kloridikonsetraatio | Kiihdyttää kloridien poistumista |
| Raudoitusverkkojen oleminen kohdakkain | Kiihdyttää kloridien poistumista |
| Lämpötilan nousu yli 35 asteen | Kiihdyttää kloridien poistumista |
| Käsittelyn toistaminen useaan kertaan | Tehostaa kloridien poistumista |
| Alkuperäisen kloridipitoisuuden vaikutus lopulliseen pitoisuuteen | Ei vaikutusta |
| Potenttiostaattinen tai galvanostaattinen menettely | Ei vaikutusta |
| Anolyytin uusiminen väkevyysgradientin maksimoimiseksi | Ei vaikutusta |
| Käsiteltävän pinnan karbonatisoituminen | Hidastaa kloridien poistumista |

Mikäli rakenne on vaikeapääsyinen, klorideja voidaan poistaa sähkökemiallisesti myös kaukana kohdasta, jota kautta kloridit tunkeutuvat rakenteeseen. Tällöin kloridien poistamista voidaan tehostaa ulkoisen katodin käytöllä. Ulkoinen katodi edesauttaa myös kloridien poistumista rakenteen sisästä raudoitteiden takaa. /1/

Karbonatisoitumisrintama hidastaa kloridien poistoa. Ihekwaaba ym:n laboratoriokokeissa karbonatisoitunut betoni vaati lähes kaksinkertaisen polarisaatiojännitteen samalla virtatiheydellä /31/.

Ulkoinen elektrolyytti ei saa päästä suoraan kosketukseen raudoitteiden kanssa, koska kaikki sähkövirta kulkisi kosketuskohdan kautta ja seuraisi oikosulku. Siksi halkeamat ja muut vauriot, joita kautta elektrolyytti pääsee suoraan teräksen pinnalle, tulee korjata ennen käsittelyä

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

/18/. Sidelankojen sijainti vain muutaman mm:n etäisyydellä käsiteltävästä pinnasta, ei vaikuta menetelmän toimivuuteen. Oikosulku on tietysti vältettävä myös sidelankojen kohdalla /42/.

Nykykäsityksen mukaan < 0,6 mm:n halkeamat eivät merkittävästi vaikuta käsittelyyn /42/. Käsittelyssä halkeamiin kerääntyvä saostuma (ilmeisesti $\text{Ca}(\text{OH})_2$) täyttää halkeamia. Usein leveydeltään < 0,5 mm:n halkeamat täyttyvät kokonaan. Valkoinen saostuma on rumaa eikä toivottavaa, joten USA:ssa pienetkin halkeamat suositellaan korjattavaksi ennen käsittelyä /49/, /4/. Yleensä > 0,2 mm suljetaan muista syistä /42/.

Ainakin vielä vuonna 1993 USA:ssa halkeilleille rakenteille suositeltiin ruiskutettua selluloosaa käyttävää järjestelmää, koska siinä ei käytetä kierrätettävää elektrolyyttiä, joka kulkeutuu halkeamien kautta pois kloridien poistojärjestelmästä. Suosituksen syy on kustannussäästö, kun halkeamia ei tarvitse sulkea /2/. Kierrätettävää elektrolyyttiä voidaan käyttää kloridien poistossa pystypinnoilta. Järjestelmässä elektrolyytti pumpataan anodiverkon yläreunan ja rakenteen väliin, josta elektrolyytti valuu rakenteen pintaa pitkin alas, kerätään talteen ja pumpataan jälleen ylös.

Betonipeitekerrospaksuus ja paksuuden vaihtelu vaikuttavat kloridien sähkökemiallisen poiston tehokkuuteen. Mitä paksumpi betonipeitekerros on sitä heikompi kloridien poistumisteho on /40/, /49/. Lisäksi betonipeitekerroksen laatu vaikuttaa käsittelyn tehokkuuteen. Menetelmää on käytetty onnistuneesti, vaikka käsiteltävän rakenteen pinnalla on ollut lateksimodifioitu betonikerros. Tällöin jännite on ollut korkeampi ja käsittelyaika pidempi. Tällaisesta rakenteesta pitäisi ennen käsittelyä ottaa koepala ja testata laboratoriossa onnistuuko käsittely kohdallisessa ajassa /4/.

On myös raportoitu, että betonipeitekerroksen paksuuden vaihtelu ei juuri vaikuta virtatiheyden jakaantumiseen /4/. Polderin kokeessa betonipeitekerroksen paksuuden vaihtelu välillä 15...30 mm ei vaikuttanut virran jakaantumiseen /42/.

Vaikka kloridien sähkökemiallinen poisto voi käynnistää alkalisilikareaktion, jos kiviaines on alkalireaktiivista, käytännössä ilmiö on ollut merkityksetön ja käsittelyn vaikutukset betoniin ovat olleet huomattavasti vähäisemmät kuin tavanomaisten korjausten /39/. Alkalisilikareaktiot voidaan estää käyttämällä elektrolyyttinä litiumboraattia /4/.

Useassa tutkimuksessa on todettu, että kovettuneeseen betoniin imeytettävät ns. tunkeutuvat inhibiittorit eivät tunkeudu betoniin juuri lainkaan. Tutkimuksissa tunkeutuminen on perustunut diffuusion - ei migraation /51/. Siegwart ym. lisäsivät korroosioinhibiittoria sähkökemiallisen kloridien poiston yhteydessä käytettävään elektrolyyttiin, mutta inhibiittorit eivät tunkeutuneet betoniin riittävästi edes sähkövirran avulla /51/. Asiaa on kokeiltu aiemminkin yhtä heikoin tuloksin /53/.

Vedyn muodostuminen kloridien sähkökemiallisen poiston yhteydessä saattaa aiheuttaa vetyhaurastumista ja jännityskorroosiosäröilyä. Vetyhaurastuminen heikentää väliaikaisesti teräksen taipuisuutta. Vedyn aiheuttama jännityskorroosiosäröily on huomattavasti vaarallisempaa, koska se johtaa yhtäkkieseen ja odottamattomaan rakenteen murtumiseen. Jännityskorroosiosäröilyriskin takia kloridien sähköistä poistomenetelmää ei pidä käyttää jännitettyihin betonirakenteisiin /50/, /53/.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Taulukossa 3 esitetään Bennettin ja Shuen laatima taulukko, jossa esitetään mitä rakenteilta vaaditaan, että kloridien sähkökemiallinen poisto soveltuu ja mitkä ominaisuudet parantavat menetelmän tehoa /2/.

Taulukko 3. Tapaukset, joille kloridien sähkökemiallinen poisto soveltuu ja menetelmän tehoa parantavat seikat /2/.

| Vaatus (Toteaminen) | Tehoa parantaa (Toteaminen) |
|--|--|
| Kloridikorroosio (Potentiaalimittaus) | Betonin vaurioituminen korkeintaan vähäistä |
| Ei jännitetty | Ei pinnoitetta tai päällystettä |
| Ei alkalireaktiivinen kiviaines (Ohuthie) | Raudoitteet paljastuneet korkeintaan vähän |
| Kohtuullinen raudoitteiden sähköinen jatkuvuus | Raudoitteiden sähköinen kontakti erinomainen |
| (Volttimittari) | (Volttimittari) |
| Kohtuullinen betonin sähkövastus | Alhainen betonin sähkövastus |
| | Vähäinen liikennehäiriö |
| | Yksinkertainen geometria |

KÄYTÄNNÖN KOKEMUKSET

N:o 1

Kloridien sähkökemiallista poistoa teräsbetonirakenteesta kokeiltiin ensimmäisen kerran käytännön kohteeseen USA:ssa vuonna 1975, jolloin sitä kokeiltiin osalle Marysville Bridgen siltakantta. Vuonna 1993 kannen käsitellyn ja käsittelemättömän alueen välillä ei ollut eroja. Tosin käsittely oli ollut lievä ja kummassakaan alueessa ei ollut korroosiota sen enempää ennen käsittelyä kuin vuoden 1993 tarkasteluajankohtana. /4/

N:o 2

The Kansas Department of Transportation kokeili menetelmää siltakannelle vuonna 1976. Käytetty jännite oli 220 V ja virtatiheys 20 A/ betoni- m². Seurauksena oli betonin läpäisevyyden raju kasvu. /19/ (Kokeilussa käytetty virtatiheys ylitti moninkertaisesti nykyisen suurimman suositellun virtatiheyden, 1 A/ betoni-m², joka on nykykäsitetyksen mukaan rakenteelle turvallinen.)

Slater J.E. ym raportoivat vuonna 1976 ilmestyneessä lehtiartikkelissa ilmeisesti samasta USA:ssa siltakannella tehdystä kenttäkokeesta kuin edellä. Klorideja poistui betonipeitekerroksesta 90 % ja teräksen läheisyydestä 88 %. Potentiaalimittausten mukaan ruostuvat raudoitteet olivat muuttuneet passiivisiksi. /54/

Huonon käyttökokemuksen vuoksi menetelmän kehitys pysähtyi USA:ssa. Menetelmää kehitettiin edelleen Norjassa 1980-luvulla, jossa se myös patentoitiin /43/. Tämän jälkeen menetelmää on kehitetty edelleen. /19/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

N:o 3

Vuonna 1978 rakennetussa jälkijännitetyssä Engeløy lavbrussa todettiin vuonna 1988 vakava kloridikorroosio konsoleissa, kannessa, pääkannattajissa ja poikkipalkeissa. Klorideja oli lisätty massaan, mutta suurin osa oli tunkeutunut ulkoa. Vuonna 1989 klorideja poistettiin sähköisesti sillan kahdesta palkista ja niiden väliseltä siltakannen alueelta, jossa oli näkyviä vaurioita ja jonka kloridipitoisuus oli 0,04 - 0,6 % betonin painosta. Teräsverkkoanodi asennettiin palkkien kummallekin sivupinnalle ja kumpikin anodi kytkettiin lähimpään raudoitukseen eli järjestelmät olivat toisistaan riippumattomat. Anodin alle ja päälle ruiskutettiin $\text{Ca}(\text{OH})_2$:lioksella kasteltu selluloosakuitu. Käsittely kesti 5 viikkoa. Kloridipitoisuus ei laskenut merkittävästi. Käsittelyä jatkettiin 6 viikkoa eikä tulos juuri parantunut. Käsittelyjärjestelmää muutettiin siten, että kummankin palkin vastakkaisilla sivupinnoilla olevat teräsverkkoanodit kytkettiin yhteen niin, että toinen oli anodi ja toinen katodi ja koko palkki oli niiden välissä. Kloridien poistokäsittelyä jatkettiin tällä uudella järjestelyllä 5 viikkoa. Kloridipitoisuus ei edelleenkään laskenut. Betoni lohkeili ja raudoitteita paljastui, kun pintaa painepestiin. Raudoitteiden pinnassa oli 1 - 2 mm:n paksuinen kerros saostumaa, jota oli laminoituneilla betonialueilla muuallakin. Käsittely siis epäonnistui. Ilmeisesti silta oli liian huonokuntoinen. /19/

Varhaisimmat anodijärjestelmät koostuivat määstä betonin pinnalle ruiskutetusta selluloosakuidusta, jonka päällä oli pehmeästä teräksestä valmistettu anodiverkko ja toinen ruiskutettu märkä selluloosakuitukerros. Norjalainen kaupallinen menetelmä NORCURE on tällainen järjestelmä. /8/

N:o 4

NORCUREa kokeiltiin Burlington Skyway –sillalla Ontariossa vuonna 1989. Silta on rakennettu vuonna 1955. Kokeilussa käsiteltiin pilari, jonka suojabetonikerroksen paksuus oli vähintään 75 mm. Potentiaalimittauksista 90 % osoitti lievää korroosiota. Kalkkiliuoksella kasteltu 25 mm:n paksuinen kuitukerros (sanomalehteä) ruiskutettiin pilarin pinnalle. Kuitukerroksen päälle asennettiin rakennusteräsverkko, jonka päälle ruiskutettiin uusi 25 mm:n selluloosakerros. Käsittely kesti 8 viikkoa, jona aikana kokonaisvirta oli 610 Ah/betoni- m^2 . Kolmen ensimmäisen viikon aikana klorideja poistui suhteellisen nopeasti ja poistuminen hidastui prosessin edetessä. 13 kk käsittelyn jälkeen todettiin, että kloridit olivat poistuneet hyvin ja korroosio oli lähes lakannut. Käsiteltyjen alueiden pastan huokoisuus oli kohonnut 25 – 30 %. 0,001 – 1 μm :n kokoiset huokokset olivat lisääntyneet. Bennett ja Shue arvioivat, ettei huokoisuuden kasvu vaikuta läpäisevyyteen. Raudoitteiden läheisyyteen oli kerääntynyt suhteellisen paljon kaliumia, mutta sementtipastan tai kiviaineksen laatu ei ollut heikentynyt. Betoni oli raudoitteiden vieressä märän tai öljyisen näköistä, mikä johtuu alkalimetallikationeiden kerääntymisestä ja pH:n kasvusta. Muuttuneesta ulkonäöstä huolimatta pasta tai kiviaines ei osoittanut merkkejä kemiallisista muutoksista. Vuoden 2002 tiedon mukaan korroosio on edelleen hyväksyttävissä rajoissa. /3/, /8/, /20/, /36/ (Joidenkin lähteiden mukaan Burlingtonin silta on Kanadassa joidenkin mukaan USA:ssa. Kyseessä lienee kuitenkin sama Kanadassa sijaitseva silta.)

USA:ssa useiden siltojen kloridien poistoon on kuitukerroksen sijasta käytetty huopapeitteitä ja anodina metallien oksidisekoituksella pinnoitettua metalliverkkoa. Sitten Euroopassa erilaisiin rakenteisiin on käytetty betonin pinnalle kiinnitettyjä elektrolyyttitankkeja. /8/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

N:o 5

Valtatie A5:llä lähellä Solothurnia Sveitsissä sijaitsevan 1968 rakennetun risteyssillan 26 m:n pituisesta idänpuoleisesta maatuesta poistettiin klorideja sähkökemiallisesti vuonna 1989. Lännenpuoleinen maatuki korjattiin perinteisesti poistamalla kloridipitoinen betoni ja korvaamalla se uudella. Betonin poistamisen yhteydessä todettiin, että raudoitteiden korroosio oli juuri käynnistynyt. Maatukien betoni oli hyvälaatuista. Betonipeitekerroksen paksuus oli 25 – 35 mm. Kloridipitoisuus raudoitteiden syvyydellä oli 0,4 – 3 % sementin painosta. Raudoitteiden korroosio ei ollut voimakasta. Potentiaalimittaukset korreloivat hyvin kloridipitoisuuden kanssa. /20/

Klorideja poistettiin Norcure-menetelmällä. Anodina oli aktivoitu titaaniverkko. Jännite oli 36 – 40 V. Virtatiheys laski käsittelyn aikana 0,75:stä 0,3.een A/ m². 6 kk:n kuluttua käsittely uusittiin alueilla, joiden kloridipitoisuus oli > 1 % sementin painosta. Virtatiheys laski käsittelyn aikana 1:stä 0,7.ään A/ m². Kokonaisvaraus kummassakin käsittelyssä oli n. 5 000 000 C/ m². Käsittely kesti 6 – 8 viikkoa. Kloridien poiston jälkeen rakenne päällystettiin 1,6 m:n korkeudelle polymeerimodifioidulla sementtisellä pinnoitteella. /20/ (Artikkelista ei ilmene onko virtatiheydet ilmoitettu betoni- vai teräspinta-alaa kohti.)

Ensimmäisessä käsittelyssä kloridipitoisuus laski 70 – 40 %, keskimäärin n. 50 %. Klorideja poistui eniten sieltä, missä pitoisuus oli korkein eli raudoitteiden syvyydeltä, jossa pitoisuus laski 2,5 %:sta 1 %:iin. Vaikka raudoitteet olivat potentiaalimittausten mukaan passiiviset, käsittely uusittiin alueilla, joiden kloridipitoisuus oli käsittelyn jälkeen yli 0,4 %. Uusintakäsittelyssä kloridipitoisuus laski 50 % ja raudoitteiden potentiaalit siirtyivät selvästi positiiviseen suuntaan. /20/

Vuonna 2005, 15 vuotta kloridien poiston jälkeen, raudoitteet olivat edelleen täysin passiiviset /20/.

N:o 6

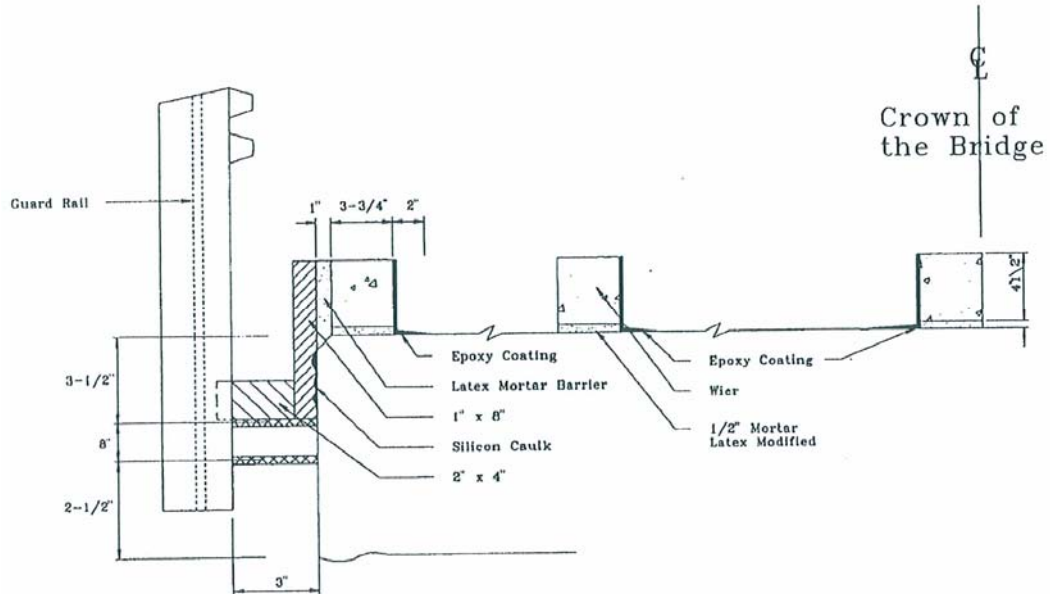
Pohjois-Englannissa sijaitsevalla pyöröterästangoilla raudoitetulla sillalla on kokeiltu kloridien sähkökemiallista poistamista moninkertaisesti tavanomaista suuremmalla kokonaissähkövirralla ja erittäin korkealla virtatiheydellä, jolloin tankojen tartuntalujuus on laskenut 50 %. Harjaterästangoilla tartunta ei heikkene. /28/

N:o 7

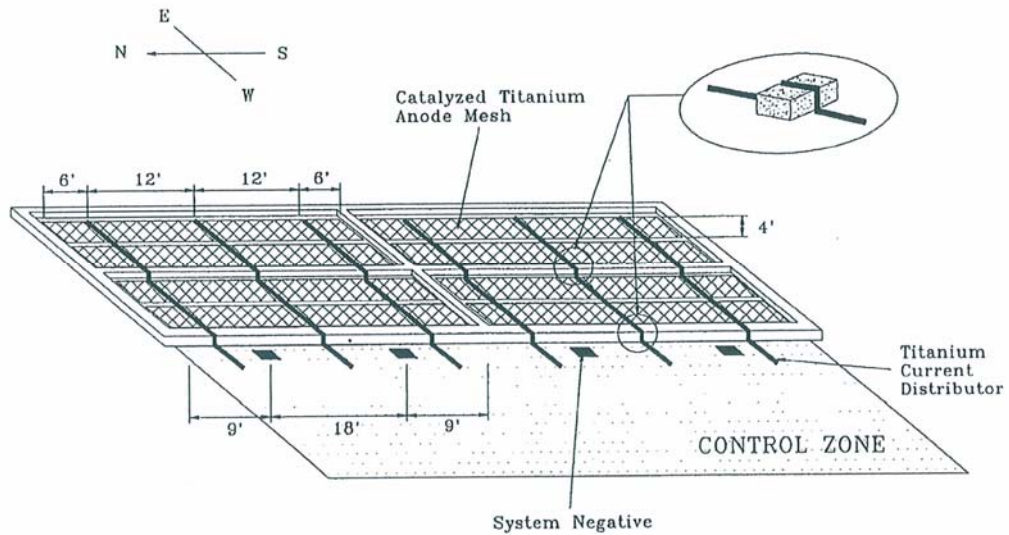
Ohiossa USA:ssa klorideja poistettiin sähkökemiallisesti sillan kannesta vuonna 1991. Kansi oli päällystämätön, mutta sillan viereinen alue oli asfaltoitu ja asfalttia oli joutunut myös sillan kannelle ja se peitti n. 25 % kannen alasta. Asfaltti pehmennettiin kemiallisesti ja poistettiin suurpainepesulla. Toinen puoli kannesta jätettiin käsittelemättä. Käsiteltävä pinta-ala oli 130 m². Betoni oli hyväkuntoista, mutta sen kloridipitoisuus oli korkea, pinnassa 14 kg/m³ ja raudoitteiden syvyydellä 2 kg/m³. Raudoitteiden korroosio oli käynnissä. Kannelle rakennettiin allas elektrolyyttiä varten. Altaan periaatekuva esitetään kuvassa 3. Elektrolyytti oli 0,08 molaarinen natriumboraattiliuos. Anodina oli katalysoitu titaaniverkko. Anodiverkko ja anodivirranjakaja esitetään kuvassa 4. Betonin sähkövastus oli korkea ja lisäksi sää oli käsittelyn aikana kylmä, joten virtatiheys oli alhainen, aluksi 0,7 / betoni-m², lopuksi 0,3 A/ betoni- m², joten käsittelyaika oli pitkä, 61 vrk. Käsittely poisti 20 % klorideista. Betonin kimmovasaralla mitattu lujuus ei muuttunut ja petrografisen tutkimuksen perusteella käsittely ei aiheuttanut betonille haittaa. Käsittelyn pitkäai-

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

käisvaikutusta ei voi arvioida, koska käsittely on tehty vain vähän ennen raportin kirjoittamista (1993). /5/



Kuva 3. Elektrolyyttiä varten rakennetun altaan periaatekuva /5/.



Kuva 4. Anodiverkko ja anodivirranjakaja /5/.

Käsittelyn euromääräiset kustannukset muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon esitetään kustannuslajeittain Taulukossa 4. Muunnos on tehty vuoden 1991 valuuttakurssin ja tilastokeskuksen rahanarvokertoimen avulla /56/. Taulukossa 4 esitetään myös vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset Yhdysvaltain dollareina.

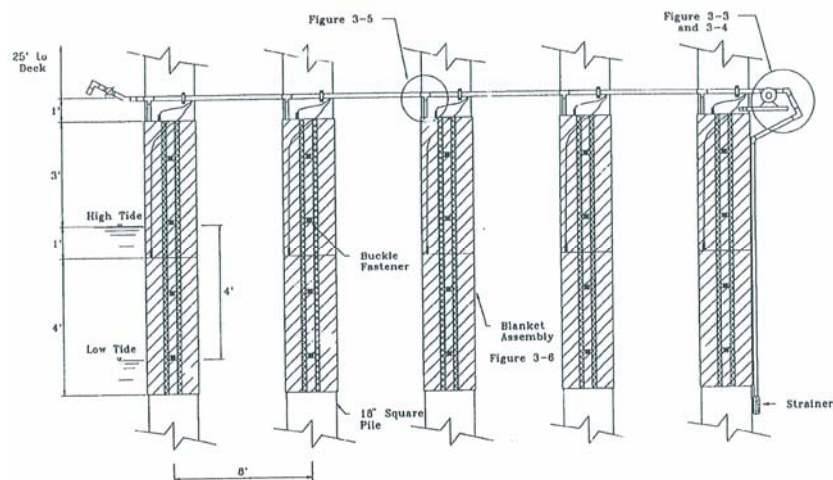
Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Taulukko 4. Käsittelyn euromääräiset kustannukset kustannuslajeittain muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon sekä vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset USA:n dollareina. Käsittelyn alueen pinta-ala oli 130 m². /5/

| Kustannuslaji | Kustannukset, USD (1991) | | Kustannukset, €(2007) | |
|------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| | Yhteensä | /m ² | Yhteensä | /m ² |
| Kertakäyttöhyödykkeet | 16 000 | 123 | 21 000 | 162 |
| Kuolettavat hyödykkeet | 14 000 | 107 | 18 000 | 138 |
| Työvoimakulut | | | | |
| Asennus | 5040 | 39 | 6550 | 50 |
| Käyttö | 4770 | 37 | 6200 | 48 |
| Purkaminen | 970 | 7 | 1250 | 10 |
| Yhteensä | 40 780 | 313 | 53 000 | 408 |

N:o 8

Potentiaalimittausten perusteella Floridassa meressä olevan sillan pilarin raudoitteissa oli vesirajassa ja sen alapuolella todennäköisesti korrosio käynnissä vuonna 1991. Roiskevesirajan yläpuolella korrosio oli epätodennäköinen. Betonin kloridipitoisuus oli korkea ja siinä oli korrosion aiheuttamaa halkeilua. Betonin sähköinen vastus oli erittäin alhainen, 20 V. Pilarien ympärille asennettiin peitteet, joiden sisässä oli anodi. Peitteet ulottuivat 1 m ylävesirajan yläpuolelle ja 1,5 m sen alapuolelle. Järjestelmä esitetään kuvassa 5. Kokeilussa käytettiin elektrolyyttinä merivettä, jota pumpattiin jatkuvasti peitteiden yläreunaan, josta se valui alas. Peitteet käärittiin muoviin, jotta sähkövirta ei vuotaisi mereen. Virtatiheys oli 3,3 A/ betoni-m² ja 18 vrk:n käsittelyaikana kokonaissähkövirta oli 1350 Ah/ betoni-m². Todellisuudessa rakenteeseen kohdistunutta virtatiheyttä ei tiedetä, sillä sähköä virtasi mereen. Rakenteesta poistui klorideja ja raudoitteet polarisoituivat voimakkaasti, mutta koska virtatiheyttä ei tiedetä, kloridien poistamiskäsittelyn onnistuneisuutta on vaikea arvioida. Käsittelyn pitkäaikaisvaikutusta ei voi arvioida, koska käsittely on tehty vain vähän ennen raportin kirjoittamista (1993). Sähkövirran vuoto veteen merivesirakenteita käsiteltäessä on ongelma, johon tulisi kehittää ratkaisu. /5/



Kuva 5. Kloridien poistojärjestelmä Floridalaisella sillalla /5/.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

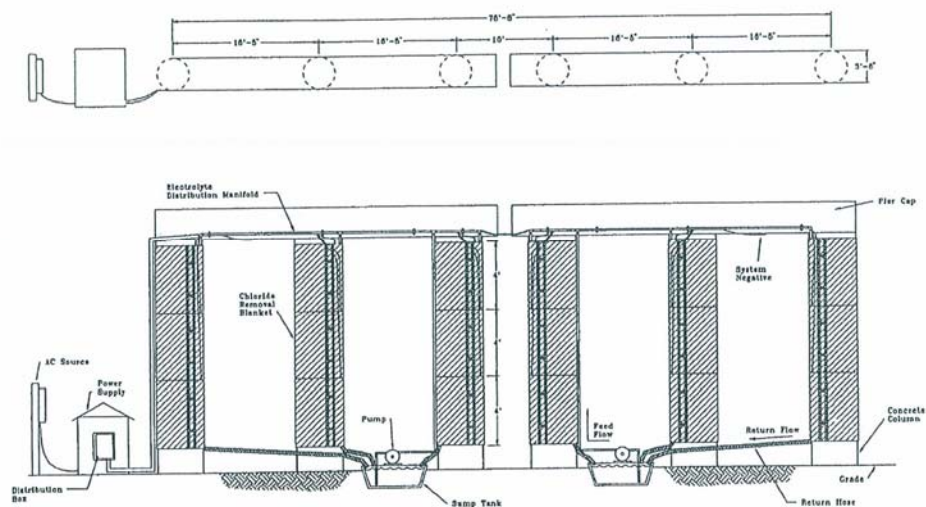
Käsittelyn euromääräiset kustannukset muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon esitetään kustannuslajeittain Taulukossa 5. Muunnos on tehty vuoden 1991 valuuttakurssin ja tilastokeskuksen rahanarvokertoimen avulla /56/. Taulukossa 5 esitetään myös vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset Yhdysvaltain dollareina.

Taulukko 5. Käsittelyn euromääräiset kustannukset kustannuslajeittain muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon sekä vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset USA:n dollareina. Käsitellyn alueen pinta-ala oli 22 m². /5/

| Kustannuslaji | Kustannukset, USD (1991) | | Kustannukset, €(2007) | |
|------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| | Yhteensä | /m ² | Yhteensä | /m ² |
| Kertakäyttöhyödykkeet | 990 | 45 | 1 290 | 60 |
| Kuolettavat hyödykkeet | 7 600 | 345 | 9 850 | 450 |
| Työvoimakulut | | | | |
| Asennus | 4 600 | 210 | 5 960 | 270 |
| Käyttö | 125 | 5,7 | 160 | 7,4 |
| Purkaminen | 1 185 | 54 | 1 540 | 70 |
| Yhteensä | 14 500 | 660 | 18 800 | 855 |

N:o 9

New Yorkissa sijaitsevan sillan kuuden pilarin betonissa oli vuonna 1991 runsaasti klorideja ja betoni oli laminoitunut. Kloridit olivat epätasaisesti jakautuneet, josta syystä ei saatu täsmällisesti selville kuinka paljon klorideja oli saatu poistumaan. Pilareihin kiinnitettiin peitteet, joiden sisässä oli anodi. Kierrätettävä elektrolyytti oli 0,03 molaarinen natriumboraattiliuos, jota pumpattiin peitteiden yläreunaan, josta se valui alas. Järjestelmä esitetään kuvassa 6. Käsittelyn aikana virtatiheydet olivat paikoitellen kohonneet niin, että anodi oli syöpynyt. Kuitenkin käsittelyä pidettiin onnistuneena. Käsittelyn pitkäaikaisvaikutusta ei voi arvioida, koska käsittely on tehty vain vähän ennen raportin kirjoittamista (1993). /5/



Kuva 6. Kloridien poistojärjestelmä New Yorkilaisella sillalla /5/.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Käsittelyn euromääräiset kustannukset muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon esitetään kustannuslajeittain Taulukossa 6. Muunnos on tehty vuoden 1991 valuuttakurssin ja tilastokeskuksen rahanarvokertoimen avulla /56/. Taulukossa 6 esitetään myös vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset Yhdysvaltain dollareina.

Taulukko 6. Käsittelyn euromääräiset kustannukset kustannuslajeittain muunnettuna vuoden 2008 kustannustasoon sekä vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset USA:n dollareina. Käsitellyn alueen pinta-ala oli 880 m². /5/

| Kustannuslaji | Kustannukset, USD (1991) | | Kustannukset, €(2007) | |
|------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| | Yhteensä | /m ² | Yhteensä | /m ² |
| Kertakäyttöhyödykkeet | 2 080 | 2,4 | 2 700 | 3,1 |
| Kuolettavat hyödykkeet | 15 800 | 18 | 20 540 | 23 |
| Työvoimakulut | | | | |
| Asennus | 4 580 | 5,2 | 5 950 | 6,8 |
| Käyttö | 800 | 0,9 | 1 040 | 1,2 |
| Purkaminen | 960 | 1,1 | 1 250 | 1,4 |
| Yhteensä | 24 220 | 28 | 31 480 | 36 |

N:o 10

Vuonna 1991 Ontariossa Kanadassa sijaitsevan vesistö sillan maatumien raudotteiden korrosio oli käynnissä, betonin kloridipitoisuus oli korkea ja betoni oli halkeillut. Halkeamat injektointiin epoksilla ennen kloridien poistokäsittelyä. Maatukiin kiinnitettiin peitteet, joiden sisässä oli anodi. Kiviaines oli alkalireaktiivista, joten elektrolyyttiin lisättiin litium-ioneja. Kierrätettävä elektrolyytti oli 0,2 molaarinen litiumboraattiliuos. Elektrolyyttiä pumpattiin peitteiden yläreunaan, josta se valui alas takaisin tankkiin. Jännite oli 40 V. Virtatiheys oli keskimäärin 1,5 A/betoni-m². Käsittely kesti 23 vrk. Käsittely poisti klorideja tehokkaasti. Petrografisen tutkimuksen mukaan betoni ei kärsinyt käsittelyssä. Käsittelyn pitkäaikaisvaikutusta ei voi arvioida, koska käsittely on tehty vain vähän ennen raportin kirjoittamista (1993). /5/

Käsittelyn euromääräiset kustannukset muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon esitetään kustannuslajeittain Taulukossa 7. Muunnos on tehty vuoden 1991 valuuttakurssin ja tilastokeskuksen rahanarvokertoimen avulla /56/. Taulukossa 7 esitetään myös vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset Yhdysvaltain dollareina.

Taulukko 7. Käsittelyn euromääräiset kustannukset kustannuslajeittain muunnettuna vuoden 2008 kustannustasoon sekä vuoden 1991 kustannustason mukaiset kustannukset USA:n dollareina. Käsitellyn alueen pinta-ala oli 17 m². /5/

| Kustannuslaji | Kustannukset, USD (1991) | | Kustannukset, €(2007) | |
|------------------------|--------------------------|-----------------|-----------------------|-----------------|
| | Yhteensä | /m ² | Yhteensä | /m ² |
| Kertakäyttöhyödykkeet | 3 380 | 200 | 4 395 | 260 |
| Kuolettavat hyödykkeet | 10 000 | 590 | 13 010 | 765 |
| Työvoimakulut | | | | |
| Asennus | 6 920 | 405 | 8 995 | 530 |
| Käyttö | 1 125 | 65 | 1 465 | 85 |
| Purkaminen | 585 | 35 | 760 | 45 |
| Yhteensä | 22 010 | 1 295 | 28 625 | 1 685 |

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

N:o 11

Swiss Federal Highway Agency on raportoinut 2 vuotta kestäneen tutkimuksen, jossa rakenteesta poistettiin 8 viikkoa kestäneellä sähkökemiallisella käsittelyllä 50 % klorideista. Käsittelyn seurauksena potetiaalimitausarvot muuttuivat 80 – 100 mV positiivisemmiksi. Menetelmä osoittautui tehokkaaksi. Koska kloridit ovat jakautuneet rakenteeseen epätasaisesti, käsittely saatetaan joutua uusimaan. /18/

N:o 12

Salvøy silta Norjassa on rakennettu vuonna 1954. Vuonna 1994 sillan tarkastuksessa todettiin kohtalaisen korkea kloridipitoisuus, 0,16 % betonin painosta, ja alkavaa kloridikorroosiota /45/. Sillalla kokeiltiin kloridien sähköistä poistamista, jonka tuloksena kloridipitoisuus laski 0,08 %:iin. Tulos oli hyvä ja poistomenetelmää päätettiin käyttää koko siltaan. Betonipeitekerroksen paksuus oli palkeissa vähintään 40 mm, kannen alapinnassa yleensä yli 20 mm, mutta paikoitellen vain 5 mm. Karbonatisoitumissyvyys oli vajaa 5 mm. Betoni oli hieman lohkeillut ja halkeillut. Mahdollinen suoja-ainekäsittely poistettiin hiekkapuhaltamalla. Kloridipitoisuus oli pinnassa 0,16 – 0,20 % ja 54 - 60 mm:n syvyydellä 0,064 - 0,098 % betonin painosta. Palkkien kloridipitoisuus laki raudoitteiden läheisyydessä keskimäärin 69 % (0,047:ään) ja laatan alapinnassa 55 % (0,066:een). /24/, /25/

Ennen kloridien poistoa raudoitteiden pinnalla oli kevyttä ruskeaa pintaruostetta ja paikoitellen pistekorroosiota. Käsittelyn jälkeen raudoitteiden pinta oli lähes musta ja tasainen. 12 kk käsittelyn jälkeen raudoitteiden potentiaali oli alkuperäistä positiivisempi ja betonin vastus alkuperäistä korkeampi todennäköisesti kloridien poistumisen takia. /19/, /24/, /25/

Betonin kiviaines ei ollut alkalireaktiivista. Käsittelyn seurauksena mikrosäröily suurten kivien ympärillä kasvoi hieman. Tutkimusaineisto oli liian vähäinen mikrosäröilyä koskevien johtopäätösten tekemiseksi. /19/, /25/

Salvøy sillan kloridien poistokäsittelyn euromääräiset kustannukset muunnettuna vuoden 2007 kustannustasoon esitetään toimenpiteittäin Taulukossa 8. Muunnos on tehty vuoden 1995 valuuttakurssin ja tilastokeskuksen rahanarvokertoimen avulla /56/. Taulukossa 8 esitetään myös vuoden 1995 kustannustason mukaiset kustannukset Norjan kruunuina.

Taulukko 8. Käsittelyn euromääräiset kustannukset toimenpiteittäin muunnettuna vuoden 2008 kustannustasoon sekä vuoden 1995 kustannustason mukaiset kustannukset Norjan kruunuina. Käsitellyn alueen pinta-ala oli 965 m². /5/

| Toimenpide | Pinta-ala m ² | Kustannukset, NOK (1995) | | Kustannukset, € (2007) | |
|-------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|---------------------------|-----------------|
| | | Yhteensä | /m ² | Yhteensä | /m ² |
| Varusteet ja yleiskulut | | 370 000 | | 55 760 | |
| Telineet | | 340 000 | | 51 238 | |
| Betonin korjaukset | | 163 000 | | 24 564 | |
| Kloridien poisto | 965 | 1 170 000 | 1 212 | 176 320 | 183 |
| Pinnan käsittely | 1 500 | 265 000 | 176 | 39 936 | 41 |
| Yhteensä | 1 500 | 2 308 000 | 1538 | 347 818 | 224 |

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Raporteissa listataan seuraavat johtopäätökset:

- Todennäköisesti rakenteisiin jäi riittävästi klorideja korroosion myöhemmälle käynnistymiselle, kun kloridit jakautuvat rakenteessa uudelleen ja niitä kulkeutuu raudoitteille /25/.
- Poistokäsittely heikkeni palkeissa, kun etäisyys raudoitteista kasvoi /25/.
- Vastaavaa heikkenemistä ei todettu laatan alapinnassa etäisyyden kasvaessa raudoitteista. Syy on ilmeisesti tiheämmässä raudoituksessa ja siten sähkövirran tasaistemmassa jakautumisessa /25/.
- Käsittely ei vaikuttanut betonin pakkas-suolakestävyyteen /25/, /19/.
- Kloridien poistuminen oli tehokkainta käsittelyn alussa /25/.
- Kloridien poistuminen oli tehokkainta lähimpänä pintaa /25/.
- Kloridien poistuminen oli sitä tehokkaampaa mitä korkeampi kloridipitoisuus oli /25/.
- Kloridien sähköinen poisto soveltuu Salvøy sillan kaltaisessa kunnossa olevien betonirakenteiden käsittelyyn /25/.
- Kloridipitoisuus laski 50-70 %. Tehokkuus riippuu alkuperäisestä pitoisuudesta, raudoitusterästankojen välisestä keskinäisestä etäisyydestä ja etäisyydestä raudoitusterästankoon /25/, /45/.
- Raudoitteiden korroosiosuojaus todennäköisesti parani /25/.

Kloridien poistokäsittelyn jälkeen silta käsiteltiin suoja-aineella /25/. Suoja-aine ei ole ollut säilyvää /23/. Silta tarkastettiin vuona 2003. Silta oli suhteellisen hyväkuntoinen ja vauriokehitys oli hidastunut. Kloridipitoisuus oli kohonnut samalle tasolle kuin ennen käsittelyä. Raudoitteissa ei ollut suurempaa kloridikorroosiota. Raudoitteiden pinnalla on tavanomaista (10 µm) paksumpi oksidikalvo 50 - 100 µm. Paksu oksidikalvo hidastanee korroosiota ja siten pidentää käyttöikää. Raudoitteet ovat pyörötankoja, jotka kestävät kloridikorroosiota paremmin kuin harjatangot. Pyörötangot on ankkuroitu taivuttamalla tangot koukulle. Betonipeitteen lohkeilu ei siten ole yhtä vaarallista kuin harjatankojen ankkuroinnille, joka perustuu profiiliin ja tankoja ei ole väännetty koukulle. Betoni oli hieman lohkeillut ja siinä oli pari ruosteläiskää. Kantavuuteen vaikuttavia vaurioita ei löytynyt. /9/, /24/

N:o 13

Pohjois-Irlannissa vuonna 1967 rakennetun moottoritien sillan The Bann River Bridgen kantavuus oli enää 45 % vaaditusta. Kannen liikuntasäätimet olivat murtuneet ja kloridipitoinen vesi valui kannen alapinnalle ja alusrakenteisiin. Raudoitteiden korroosio oli laajaa. Sillan korjausta vaativat osat olivat hankalapääsyiset ja betonin kloridipitoisuus oli erittäin korkea. Siksi päädyttiin kokeilemaan kloridien sähkökemiallista poistamista. Käsittely tehtiin vuonna 1997. /15/ Paljastuneiden raudoitteiden kohdat paikattiin ennen käsittelyä. /15/

Department of the Environment Roads Service epäili menetelmän toimivuutta, koska sillä ei ollut siitä kokemusta. Siksi menetelmää kokeiltiin ensin kolmelle ulokepalkille, jotka tutkittiin ennen ja jälkeen kokeilun. Käytetty virtatiheys oli 1-2 A/teräs- m² ja kokonaisvirta oli 278-570 Ah/ teräs- m². /15/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Potentiaalimittausten ja huokosliuosanalyysien perusteella menetelmä toimi hyvin. Korrosio oli lakannut, raudoitteet olivat uudelleen passivoituneet ja kokonaiskloridipitoisuus oli laskenut huomattavasti. Betonin kiviaines oli alkalireaktiivista, mutta petrografisessa tutkimuksessa ei nähty merkkejä alkalisilikareaktiosta. Tutkimus osoitti, että paikkaukset on tehtävä huolellisesti ennen käsittelyä. /15/

N:ot 1, 4, 14 - 42

Sharp ym:n raportissa listataan 31 USA:n siltaa, joille on tehty kloridien sähkökemiallinen kloridienpoistokäsittely vuosina 1975 – 2000. Ensimmäinen käsittely tehtiin yhden sillan kannelle vuonna 1975 (N:o 1), jonka jälkeen menetelmän soveltamisessa käytäntöön oli 14 vuoden tauko, kunnes Burlington Skyway Pier:n kansi käsiteltiin vuonna 1989 (N:o 4, Todennäköisesti Kanadassa sijaitseva silta). Suurimmalle osalle silloista käsittely on tehty kannelle tai pilarille. Kohteista, joista mitattiin kloridipitoisuus ennen ja jälkeen käsittelyn, poistui 27 – 84 % Cl ioneista. Tuloksia ei voi verrata toisiinsa, koska mittaus- syvyudet ovat erit. Neljälle sillalle tehtiin potentiaalimittaus ennen ja jälkeen käsittelyn. Kaikkien neljän sillan potentiaalimittaus osoittaa, että korroosion todennäköisyys oli pudonnut todennäköisestä erittäin epätodennäköiseen. /49/

N:o 43

Virginian osavaltiossa USA:ssa poistettiin klorideja 3 siltapilarista n. vuonna 1996. Käsittelyn aikainen kokonaissähkövirta oli 250 – 380 Ah/ m² ja käsittely kesti 10 – 11 viikkoa. 13 – 53 % Cl lähti 40 mm:n syvyydeltä. Ilmeisesti lyhyempi käsittelyaika olisi riittänyt. Betonissa ei todettu käsittelyn aiheuttamia vaurioita. /12/ (Artikkelista ei ilmene onko virtatiheydet ilmoitettu betoni- vai teräspinta-alaa kohti.)

N:o 44

N. 20 v:n ikäisen Pohjois-Englannissa sijaitsevan vuonna 1975 käyttöön otetun Tees Viaduct -sillan alusrakenne kärsi pahasta kloridikorroosiosta. Koska rakenne on raudoitettu pyöröterästangoin, raudoitteiden tartunta olisi saattanut heiketä kloridien sähkökemiallisen poistamisen yhteydessä. Silta purettiin ja siitä irrotettiin kappale, joka käsiteltiin laboratoriossa. Käsittelyn tuloksena betonin kloridipitoisuus pinnassa ja raudoitteiden syvyydellä laski kolmannekseen, korrosio hidastui huomattavasti, betonin sähkövastus kasvoi 6-kertaiseksi ja sen kyky vastustaa veden, hapen ja ionien tunkeutumista kasvoi. Tämä tekee betonista kestävämpää ja vastustuskykyisempää teräskorroosiota vastaan. Betonin puristuslujuus ei muuttunut ja sen pakkasenkestävyys parani. /7/

N:ot 45 - 48

Vuoteen 1996 mennessä kloridien sähköistä poistomenetelmää on käytetty Tanskassa neljään kohteeseen:

- Slotsherrensvej:n ylittävän moottoritien sillan pilari,
- Virumisa sijaitseva uima-allas,
- Bernstorffsvej:n tunnelin seinät ja
- Yhden asuintalon parvekkeet. /43/

Tanskassa saadut kokemuksen käsittelystä olivat positiiviset /43/.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

N:o 49

Vuonna 1997 Virginiassa, USA:ssa sijaitsevan 28 v vanhan sillan kannen betoni oli lohkeillut 2-5 % pinta-alasta. Kannesta poistettiin klorideja sähköisesti. Osa kannesta jätettiin vertailumielessä käsittelemättä. Ennen käsittelyä halkeamat peitettiin sementtilaastilla ja betonipeitekerroksen paksuutta lisättiin sinne, missä se oli liian ohut. /13/

Virtatiheys oli pienempi kuin 1 A/ betoni-m² ja kokonaisvirtamäärä oli 700 – 1100 Ah/ betoni-m². Eri alueilla kokeiltiin kolmea erilaista elektrolyyttiä, joista yksi sisälsi korroosioinhibiittoria:

- LiBO₃ + HO,
- LiBO₃ + H₂O + (C₆H₅)₄ (inhibiittori) ja
- Ca(OH)₂ + H₂O. /13/

Joidenkin elektrolyyttien pH laski jopa 3:een anodilla kehittyvän H⁺:n ja kloorikaasun tai HOCl:n takia. Inhibiittoria sisältäneen elektrolyytin pH laski eniten ilmeisesti melko hapan happaman inhibiittorin kuluttaessa litiumboraatin puskurointikyvyn. Kyseistä elektrolyyttiä laimennettiin vedellä ja Ca(OH)₂:lla. /13/

Jos elektrolyytti on liian kauan hapan, se syövyttää ja pehmentää betonipinnan. Tässä tapauksessa pinta pehmeni pintakovuusmittarilla mitattuna, mikä ei kuitenkaan haitannut lopputulosta, koska pinta hiekkapuhallettiin ennen päällevalua. /13/

Kloridipitoisuus laski raudoitteiden syvyydellä 70 – 80 %, mutta inhibiittori ei tunkeutunut betoniin. Betoni ei kärsinyt käsittelystä lukuun ottamatta yhden alueen happamasta elektrolyytistä johtunutta lievää syöpymistä. Syöpyminen voidaan välttää elektrolyytin pH:n pitämällä korkeana. /13/

Virginialaisen sillan kloridien poistokäsittelyn kustannukset olivat vuonna 1997 kaikkiaan 92 400 USD, mikä vastaa vuoden 2007 kustannustason mukaisesti 103 300 €. Käsitellyn alueen pinta-ala oli 720 m², joten kustannukset olivat 143 €/m². /13/

N:o 50

Vuonna 1994 Norjassa sillan kannesta poistettiin sähköisesti klorideja. Käsittely kesti 6 viikkoa. Vuonna 1995 käsiteltiin sillan muut rakenteet, myös pilarit. Kloridipitoisuus laski kaikkiaan 50-70 %, eniten raudoitteiden läheisyydessä, jossa kloridipitoisuus laski n. 0,06 %:iin betonin painosta. Muualla kloridipitoisuus laski keskimäärin 0,08 %:iin. Korrosio vähintäänkin hidastui, ellei lakannut ja koska kloridipitoisuus laski niin alas, jäljelle jääneen kloridin uudelleen jakaantuminen ja diffuutoituminen raudoitteiden luo muodostaa kyseisellä sillalla vain vähäisen korroosioriskin. /19/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Taulukossa 9 esitetään vuosina 1988 – 1996 vuosittain sähkökemiallisella kloridien poistolla käsitellyt pinta-alat /19/.

Taulukko 9. Vuosina 1988-1996 vuosittain kloridien sähköisellä poistomenetelmällä käsitellyt betonirakenteiden pinta-alat. Taulukon tiedot ovat maaliskuulta 1996. /19/

| Vuosi | Norja, m ² | Muu maailma, m ² | Yhteensä |
|----------------------------|-----------------------|-----------------------------|----------|
| 1988 | 90 | | 90 |
| 1989 | 25 | 1 140 | 1 165 |
| 1990 | 1 360 | 1 190 | 2 550 |
| 1991 | | 300 | 300 |
| 1992 | | 960 | 960 |
| 1993 | | 2 006 | 2 006 |
| 1994 | 1 760 | 4 627 | 6 387 |
| 1995 | 2 493 | 9 256 | 11 749 |
| 1996 | 2 117 | 10 349 | 12 466 |
| Yhteensä maaliskuussa 1996 | 7 845 | 29 828 | 37 673 |

Norges vegvesenin julkaisussa vuodelta 2004 todetaan, että 1 000 000 betonipinta-m² on käsitelty sähkökemiallisella uudelleenalkaloinnilla tai kloridien poistolla. Käsiteltyjen rakenteiden lukumäärä on 1 000. Samassa julkaisussa todetaan, että yhtä mahdollista tapausta lukuun ottamatta korroosion uusiutumista ei ole raportoitu. Poikkeava kohde on Sveitsin Bettlach Church, jossa tehtiin kevytsorabetonin soveltumaton koe-käsittely. /39/ (Ilmeisesti kyseessä on uudelleenalkalointi.)

N:o 51

Jacksonissa, Michiganissa, USA:ssa vuonna 1957 rakennetun sillan pilareiden kloridipitoisuus oli korkea ja korroosio oli käynnissä. Betoni oli halkeillut ja lohkeillut. Rakenteelle tehtiin kloridien sähkökemiallinen poistokäsittely vuonna 1999. Ennen käsittelyä vauriot korjattiin ja halkeamat injektointiin. Anodi oli uhrautuva teräsanodi (Kuva 7) joka oli ruiskutetun selluloosakuidun sisässä (Kuva 8). Elektrolyytti oli sammutetun kalkin 10-prosenttinen liuos, jotta elektrolyytin pH ei laskisi alle 9 ja betoni syöpyisi. Jännite oli 40 V ja virtatiheys 2 A/ betoni-m². Käsittely kesti 63 vrk. Klorideja poistui suhteellisesti eniten lähimpänä pintaa. Betonin puristuslujuus ei muuttunut. Teräsanodiverkko ruostui ja värjäsi betoniin pinnan ruskeaksi. Ruoste ei poistunut painepesulla. Se poistettiin hiekkapuhaltamalla. /34/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.



Kuva 7. Anodiverkon asennus /34/.



Kuva 8. Selluloosakuidun ruiskutus /34/.

N:o 52

Vuonna 2000 Sveitsin Uri kantonissa 15 v vanhojen siltapilareiden kloridipitoisuus oli raudotteiden tasalla n. 0,06 % betonin painosta. Suurimmaksi osaksi raudotteiden korrosio ei ollut käynnistynyt. Työsaumojen vieressä betonin huokoisuus oli korkea. Pila-reista poistettiin klorideja sähkökemiallisesti kahdessa jaksossa. Ensimmäinen jakso kesti 9 viikkoa ja 2 viikon tauon jälkeinen jakso kesti 5 viikkoa. Kloridipitoisuus laski 50-60 %. Käsittely värjäsi betonin pinnan, johon levitettiin tasoite ja pigmentoitu tiivistysaine. /46/

N:o 53

USA:ssa sijaitsevan Iowa Avenuen kävelysillan kannesta poistettiin klorideja sähkökemiallisesti vuonna 2003. Kannen raudotteet kärsivät korroosiosta. Betonissa oli klorideja 15 kg/ m³. Kannelle levitettiin kalkkia ja sen päälle huopakankainen suodatinkangas, johon

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

oli imeytetty elektrolyytti. Suodatinkankaan päälle levitettiin titaaniverkko. Siltakannelle johtavilla rampeilla käytettiin teräsverkkoanodia, jotta kallista titaaniverkkoa ei tarvinnut leikata. Anodiverkkojen asennus esitetään kuvissa 9 ja 10.



Kuva 9. Titaaniverkon asentamista siltakannelle /27/.



Kuva 10. Rampeille asennetut teräsverkkoanodit /27/.

Anodiverkkojen päälle asennettiin uudet suodatinkankaat. Suodatinkankaiden päälle levitettiin muovipeitteet. 8 viikkoa kestäneen käsittelyn aikana kloridipitoisuus laski pinnassa 80 % ja raudituksen tasalla 70 %. Betonin puristuslujuus ei muuttunut käsittelyssä. /27/

Käsittelyn kustannukset olivat 88 000 USD eli 25 USD/ m², mikä vastaa vuoden 2007 kustannustasolla 75 200 € ja 21 €/ m². /27/

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

N:ot 54 - 58

Saksalaisen kloridien poistoa tekevän yrityksen www-sivuilla kerrotaan viidestä esimerkikohteesta, joihin menetelmää on sovellettu vuosina 2002 – 2007 /11/:

- Utrichshausen silta tiellä A7 on kotelopalkkisilta. Kotelon lattiassa kloridipitoisuus oli enimmillään 3 % sementin painosta. Kloridienpoistokäsittely kesti 12 viikkoa. Kloridipitoisuus laski keskimäärin 75 %.
- Obereslungenissa sijaitsevan valtatieisteyssillan pilarin suolaroiskeille altistunutta aluetta käsiteltiin 6 viikon ajan, jonka jälkeen betonin pinta impregnoitiin vettähylykiväksi. Kloridien poisto ei vaikuttanut betonin pintaan.
- Osassa Elbe-joen ylittävää Dresdenissä sijaitsevaa Carola siltaa oli korroosio käynnissä ja osassa oli korroosion käynnistymisriski. Kloridipitoisuus oli korkea – myös jänteiden kohdalla. Klorideja poistettiin useassa jaksossa.
- Bayreuthissa sijaitsevan parkkitalon lattioista ja pilareiden alaosaista poistettiin klorideja.
- Regensburgissa sijaitsevasta Pfaffenstein-sillasta, jossa oli korkea kloridipitoisuus ja korroosio käynnissä, poistettiin klorideja.

N:o 59

Ruotsissa on ilmeisesti kerran kokeiltu 1990-luvulla kloridien sähkökemiallista poistamista runsaasti klorideja sisältävästä betonipilarista, jossa raudotteissa oli jonkin verran korroosiota. Käsittely aiheutti runsaasti mikrosäröilyä betoniin raudotteiden ympäristöön. Mikrosäröily on saattanut aiheutua suuresta virtatiheydestä. /14/

NORCURE

Kloridien sähkökemiallisen poistomenetelmän patentti kuuluu norjalaiselle Millab Consult As:lle. Menetelmän tavaramerkki on Norcure. Norjassa kahdeksalla yrityksellä on menetelmän käyttöön oikeuttava lisenssi. /29/

Millab Consult As:n www-sivujen mukaan kloridien poistomenetelmää käytetään säännöllisesti mm. Norjassa, Sveitsissä, Ruotsissa, Belgiassa, UK:ssa, Hong Kongissa, Australiassa, Yhdistyneissä Arabiemiirikunnissa, Japanissa ja Kanadassa. /29/

OHJEET, MÄÄRÄYKSET JA STANDARDIT SEKÄ TIEVIRANOMAISTEN KÄYTÄNTÖ

Ruotsin Vägverketin käyttämä konsultti Korrosionsinstitutet ei pidä kloridien sähkökemiallista poistamista käyttökelpoisena teräsbetonirakenteiden kunnostusmenetelmänä edes silloin, kun menetelmän käytön edellytykset olisivat parhaat mahdolliset (korkea kloridipitoisuus, korkeintaan vähäinen korroosio, betoni lähes ehjä, pehmeä rauditus, ...) /48/. Ruotsin Vägverketillä ei ole menetelmää koskevia ohjeita tai määräyksiä.

Norjan Statens Vegvesen pitää kloridien sähkökemiallista poistoa erikoismenetelmänä, jota voidaan käyttää, kun rakenne on liian huonokuntoinen pelkkään suoja-ainekäsittelyyn ja raudotteiden korroosio ei ole liian voimakas. Käytännössä tämä tarkoittaa yleensä sitä, että suojabetonikerroksessa on runsaasti klorideja ja korroosio on korkeintaan vähäistä. Norjassa ei

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

ole paljon siltoja tässä kunnossa, joten menetelmän käyttö on vähäistä. Käsittelyn jälkeen silta on suojattava kloridien tunkeutumiselta. Katodista suojausta käytetään paljon, koska se soveltuu minkä kuntoiselle rakenteelle tahansa ja tarjoaa pitkäaikaisen suojan /23/. Norges Vegvesenillä on menetelmää koskevat vaatimukset /44/. Norjassa valmistellaan myös standardia, johon yhtenä menetelmänä sisältyy kloridien sähkökemiallinen poisto /17/.

Suomessa ei ole kokeiltu kloridien sähkökemiallista poistamista /35/, /38/. Tiehallinnon SILKO-ohjeessa menetelmä kuvataan yhtenä raudoituksen suojausmenetelmänä /6/. Tiehallinnolla ei ole menetelmää koskevia ohjeita tai määräyksiä.

Tanskan Vejdirektoratetilla ei ole menetelmää koskevia ohjeita tai määräyksiä.

Britannian Highways Agencyn katodista suojausta koskevassa ohjeessa kuvataan kloridien sähköinen poistomenetelmä /16/. Highways Agencyllä ei ole menetelmää koskevia ohjeita tai määräyksiä.

Eurooppalainen kloridien sähköistä poistamista koskeva standardi on valmisteilla.

USA:n osavaltioiden tieviranomaiset pitävät kloridien sähkökemiallista poistamista varten otettavana kunnostusmenetelmänä /15/. USA:ssa on AASHTO:n menetelmän käyttöä koskeva standardi /55/.

JOHTOPÄÄTÖKSET

Kloridien sähkökemiallista poistomenetelmää teräsbetonirakenteista on käytetty siinä määrin suppeasti, että maailmanlaajuinen käyttö on melko hyvin tiedossa. Käyttö on kuitenkin ollut sen verran laajaa ja kokemuksia on kerääntynyt jo parin vuosikymmenen ajalta, että menetelmän toimivuutta voi arvioida. Alkuaikojen epäonnistumisten jälkeen menetelmää on parannettu ja pääosa raportoiduista käytännön kokemuksista on positiivisia.

Kirjallisuuden perusteella menetelmä on teknisesti käyttökelpoinen soveltuviin kohteisiin oikein käytettynä.

Menetelmän käytön yksikkökustannukset riippuvat käsiteltävästä rakenteesta ja sen kunnosta. Kirjallisuudessa raportoidut kustannustiedot vaihtelevat välillä 20 – 1 700 €/m². Kustannukset on kussakin tapauksessa arvioitava erikseen.

YHTEENVETO

Teräsbetonirakenteiden kloridien sähkökemiallisessa poistossa rakenteen pinnalle levitetään anodi ja raudoitteista tehdään virtapiirin katodi. Rakenteen pinnalle lisätään ulkoinen elektrolyytti, jonka välityksellä sähkövirta kulkee anodin ja rakenteen välillä, joka varmistaa anodin tasaisen sähköisen kontaktin rakenteeseen ja johon rakenteesta poistuvat kloridi-ionit kerääntyvät.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Kun virtapiiriin kytketään sähkövirta, anionit kuten Cl^- , OH^- , CO_3^{2-} ja SO_4^{2-} siirtyvät sähkökentässä kohti ulkoista anodia ja kationit kuten Ca^+ , K^+ ja Na^+ siirtyvät kohti raudoitteita. Raudoitteille kulkeutuvat kationit passivoivat teräspinnan. Tämän lisäksi raudoitteilla muodostuvat OH^- -ionit kohottavat huokosliuoksen pH:n raudoitteiden vieressä, mikä myös on eduksi raudoitteille.

Kloridit poistuvat aluksi nopeasti ja prosessin edetessä ionien poistuminen hidastuu. Klorideja voidaan yleensä poistaa betonista sähkökemiallisesti 40-55 %. Poistuminen on tehokkainta suojabetonikerroksesta. Kloridien poistamisen korroosiota hidastava vaikutus kestää arviolta 5 – 10 vuotta. Rakenteen suojaaminen käsittelyn jälkeen kloridien tunkeutumista vastaan pidentää käsittelyn vaikutusaikaa.

Menetelmään sisältyvä riski on mahdollinen vedyn kehittyminen teräs/betoni –rajapinnassa. Vety voi tunkeutua metalliin ja aiheuttaa vetyhaurastumista (tai jännitetyissä raudoitteissa jännityskorroosiosäröilyä) tai muodostaa vetykaasua, jonka muodostumispaine voi aiheuttaa betonin paikallista halkeilua. Lisäksi anodilla voi kehittyä myrkyllistä kloorikaasua ja elektrolyytti voi happamoitua. Hapan elektrolyytti syövyttää betonin pintaa. Kun kiviaines on alkali-reaktiivista, betoniin voi muodostua säröilyä. Aineiden liukeneminen sementtikivestä huokosliuokseen kasvattaa betonin huokoisuutta ja pehmentää betonia. Nykytietämyksen mukaan haittoja ei aiheudu, kun menetelmää käytetään oikein ja soveltuviin kohteisiin.

Alkuaikojen käytännön kohteissa tehtyjen kokeilujen epäonnistumisten on raportoitu johtuneen:

- Liian suuresta jännitteestä,
- Liian suuresta virtatiheydestä ja
- Kokeilukohteen liiasta huonokuntoisuudesta.

Perinteiseen korjaukseen verrattuna, joissa hyväkuntoinenkin kloridipitoinen betoni poistetaan ja korvataan uudella, kloridien sähkökemiallinen poisto voi olla parempi vaihtoehto. Menetelmä soveltuu parhaiten, kun betoni ei ole varioitunut merkittävästi ja raudoitteet ovat passiiviset. Halkeillut ja lohkeillut betoni pitää korjata ennen käsittelyä ja oikosulut tulee estää. Korjausmateriaalin sähkövastuksen tulee olla samaa luokkaa kuin betonin. 0,6 mm:a kaapeamat halkeamat eivät vaikuta käsittelyyn merkittävästi, mutta saostumien kerääntyminen halkeamiin voi rumentaa ulkonäköä.

Menetelmä soveltuu teräsbetonirakenteisiin,

- jotka kärsivät kloridikorroosiosta
- jotka eivät ole jännitetyjä,
- jotka on raudoitettu harjatangoin,
- joiden betoni on korkeintaan vähän vaurioitunut,
- joiden kiviaines ei ole alkalireaktiivista (Jos kiviaines on alkalireaktiivista, menetelmän aiheuttamaa säröilyä voidaan ehkäistä käyttämällä litiumpitoista elektrolyyttiä.),
- joiden raudoitteiden sähköinen kontakti on kohtuullinen ja
- joiden betonin sähkövastus on kohtuullinen

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Menetelmä soveltuu erityisen hyvin teräsbetonirakenteisiin,

- joissa on runsas raudoitus,
- joiden vastakkaisten pintojen raudoitus on samanlainen ja kohdakkain (Koskee litteitä rakenteita.)
- joiden kloridipitoisuus on korkea,
- jotka sijaitsevat kuivalla maalla (Jos käsiteltävä rakenne on vedessä, sähkövirtaus veteen pitää estää, mikä on hankalaa.),
- jotka ovat monoliittisia,
- joilla on yksinkertainen geometria,
- jotka ovat vaikeapääsyisiä (Ulkoisen katodi tehostaa kloridien poistumista ja edesauttaa niiden poistumista rakenteen sisästä raudoitteiden takaa.),
- jotka eivät ole karbonisoituneet (Karbonisoituminen hidastaa kloridien poistoa, mutta ei estä sitä.),
- joiden betonipeitekerros on hyvin sähköä johtava,
- joissa ei ole päällystettä tai pinnoitetta ja
- joiden betonipeitekerrospaksuus on tasainen.

Ei voida sanoa yleisesti, että kloridien sähkökemiallinen poistaminen soveltuu aina, kun edellä luetellut ehdot täyttyvät, vaan menetelmän soveltuvuus on arvioitava tapauskohtaisesti. Soveltuvuuden arvioinnissa otetaan teknisen soveltuvuuden lisäksi huomioon kustannukset, saavutettavat hyödyt sekä menetelmän käyttöön sisältyvät riskit.

Menetelmän käytön yksikkökustannukset riippuvat käsiteltävästä rakenteesta ja sen kunnosta. Kirjallisuudessa raportoidut kustannustiedot vaihtelevat välillä 20 – 1 700 €/m².

Menetelmällä saavutettavat hyödyt ovat:

- Hyväkuntoisen kloridipitoisen betonin säilyminen rikkomattomana,
- Kloridimäärän väheneminen ja
- Teräksen uudelleen passivoituminen.

Menetelmän haittapuolia ovat:

- Ulkonäön mahdollinen huonontuminen vaaleiden pintaan kertyvien saostumien ja teräsanodin ruostumisen vuoksi. Käsitelty rakenne on syytä suojata kloridien tunkeutumisesta vastaan, joten suojauskäsittely kannattaa tehdä siten, että se peittää ulkonäköhaitat.
- Suomessa ei ole menetelmän käyttökokemusta. Lähimmät menetelmää käyttävät yritykset sijaitsevat Norjassa, joka puolestaan on menetelmän soveltamisen johtava maa.
- Elektrolyytin mahdollinen happamoituminen ja betonin pinnan syöpyminen. Elektrolyytin happamoituminen voidaan estää puskuroimalla eli lisäämällä elektrolyyttiin kemikaalia (ns. puskurianetta), jonka avulla liuoksen happamuusaste säädetään halutuksi.

Nykykäsitelyksen mukaan kloridit poistuvat eikä raudoitteille tai betonille aiheudu haittaa, kun virtatiheys < 5 A/ teräs-m² ja kokonaisvirta < 1500 Ah/ teräs-m². Käsitely kestää yleensä 4 – 8 viikkoa ja jaksoittainen käsittely on tehokkaampi kuin yhtäjaksoinen. Jaksotukseksi on ehdotettu esim. 2 vk käsittelyä – 1 vk taukoa.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

Vain harvan maan tieviranomaiset ovat asettaneet vaatimuksia tai laatineet ohjeita koskien kloridien sähkökemiallista poistamista teräsbetonirakenteista. Norjan Statens vegvesen :llä on menetelmää koskevat vaatimukset ja Norjassa valmistellaan standardia, johon sisältyy kloridien sähkökemiallinen poisto.

Britannian Highways Agencyn ja Suomen Tiehallinnon ohjeissa kuvataan kloridien sähköinen poistomenetelmä.

Eurooppalainen kloridien sähköistä poistamista koskeva standardi on valmisteilla.

USA:n osavaltioiden tieviranomaiset pitävät kloridien sähkökemiallista poistamista varten otettavana kunnostusmenetelmänä ja USA:ssa on AASHTO:n menetelmän käyttöä koskeva standardi.

Ruotsin Vägverketin käyttämä konsultti Korrosionsinstitutet suhtautuu menetelmään kielteisesti.

LÄHTEET

1. Arya C. & Sa'íd-Shawqi Q. Factors influencing electrochemical removal of chloride from concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 26, No. 6, ss. 851 – 860, 1996.
2. Bennett J. & Schue T.J. Chloride Removal Implementation Guide. SHRP-S-347. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington DC. 1993. 46 s.
3. Bennett J. & Schue T.J. Evaluation of NORCURE Process for Electrochemical Chloride Removal from Steel-Reinforced Concrete Bridge Components. SHRP-C-620. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington DC. 1993. 31 s.
4. Bennett J. ym. Electrochemical Chloride Removal and Protection of Concrete Bridge Components: Laboratory Studies. SHRP-S-657. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC 1993. 201 s + liitt.193 s.
5. Bennett J. ym.. Electrochemical Chloride Removal and Protection of Concrete Bridge Components: Field Trials. SHRP-S-669. Strategic Highway Research Program. National Research Council. Washington, DC 1993. 126 s + liitt. 21 s.
6. Betonirakenteet. Betoni sillankorjausmateriaalina. Yleiset laatuvaatimukset. Helsinki: Tiehallinto, 2007. 74 s + liitt. 8s. (SILKO 1.201) TIEL 2230095- SILKO 1.201.
7. Broomfield J.P. & Buenfeld N. R. Effect of Electrochemical Chloride Extraction on Concrete Properties. Investigation of Field Concrete. *Transportation Research Record*. Vol 1597, ss. 77-81, 1997.
8. Broomfield J.P. Electrochemical Chloride Extraction for Reinforced Concrete Structures. *Materials Performance*. January 2002, ss. 52-54.
9. Bru nr 11-0048 Salvøy bru. Rapport fra spesialinspeksjon. Statens vegvesen. Vegdirektoratet. Seksjon for bruteknikk. Rapport 2005-01 BRU. 2005. 25 s + liitt. 3 s.
10. Castellote M. ym. Electrochemical removal of chlorides – Modelling of the extraction, resulting profiles and determination of the efficient time of treatment. *Cement and Concrete Research*. Vol. 30, No.1, ss. 615 – 621, 2000.
11. CITec GmbH, Concrete Improvement Technologies, Dresden. <http://www.citec->

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

- [online.com](#), Tulostettu 30.5.2008
12. Clemeña G. G. & Jackson D. R. Pilot Applications of Electrochemical Chloride Extraction of Concrete Piers in Virginia. Federal Highway Administration. Virginia Transportation Research Council. Interim Report; VTRC 96-IR4. 32 s. 1996.
 13. Clemeña G.G. & Jackson D.R. Pilot Applications of Electrochemical Chloride Extraction on Concrete Bridge Decks in Virginia. Transportation Research Record. Vol 1597. 1997. ss. 70-76.
 14. Climent M. A. ym. Effect of Type of Anodic Arrangements on Efficiency of Electrochemical Chloride Removal from Concrete. ACI Materials Journal. Vol. 103, No. 4, ss. 243 – 250. 2006.
 15. Cromie J.A. ym The independent assessment of electrochemical chloride extraction treatment on a 30-year-old motorway bridge. The Structural Engineer. Vol. 77, Nos 23 & 24. ss. 38 – 41, 1999.
 16. Design Manual for Roads and Bridges: Volume 3 Highway Structures: Inspection and Maintenance. Section 3 Repair. Part 3 BA 83/02 Cathodic Protection for Use in Reinforced Concrete Highway Structures. Highway Agency, UK. 2002. 32 s. (Highway Agency:n [www.sivulla](#))
 17. Ehdotus norjalaiseksi standardiksi: prNS 3420-LT. Beskrivelsetekster for bygg, anlegg og installasjoner. Del LT: Rehabilitering av betong. 44 s. 2008.
 18. Electrochemical Rehabilitation Methods for Reinforced Concrete Structures. A State of the Art Report. European Federation of Corrosion Publications. Number 24. (ECP 24). Toimittanut Mietz J. 1998. 68 s.
 19. Elektrokjemisk kloriduttrekk. Statens vegvesen. Vegdirektoratet. Bruavdelningen. Rapport 97-01 BRU. 1997. 82 s + liitt. 55 s.
 20. Elsener B. Long-term durability of electrochemical chloride extraction. Materials and Corrosion. Vol. 59, No. 2, ss. 91 – 97, 2008.
 21. Fajardo G. ym. Electrochemical chloride extraction (ECE) from steel-reinforced concrete specimens contaminated by “artificial” sea-water. Corrosion Science. Vol 48, ss. 110 – 125, 2006.
 22. Garcés P. ym. Effect of reinforcement bar arrangement on the efficiency of electrochemical chloride removal technique applied to reinforced concrete structures. Corrosion science. Vol 48, ss. 531 – 545, 2006.
 23. Grefstad K. A, Sjefingneniør, Statens Vegvesen, Norge. Sähköposti 15.5.2008.
 24. Grefstad K. A. Betongbruer – forvaltning, drift og vedlikehold. Julkaisussa Drift og vedlikehold av betongkonstruksjoner. Teknologidagene 2007. Statens vegvesen. Teknologivdelingen. Rapport. Nr. 2497. 215 s.
 25. Grefstad K.A. ym. Electrochemical chloride extraction of Salvøy bridge. 10 s.
 26. Herrera J.C.O. Electro-chemical chloride extraction: Influence of C₃A of the cement on treatment efficiency. Cement and Concrete Research. Vol 36, ss. 1939 – 1946, 2006.
 27. Hosin D. L. ym. Effectiveness of electrochemical chloride extraction for the Iowa Avenue pedestrian bridge. Public policy center. Civil and anvironmental engineering. University of Iowa. 2005. 23 s.
 28. <http://www.concrete-testing.com> Tulostettu 7.5.2008
 29. <http://www.millab-consult.no>. 8.5.2008
 30. Ihekwa N.M. & Hope B.B. Mechanical properties of anodic and cathodic regions of ECE treated concrete. Cement and Concrete Research. Vol. 26, No. 5, ss. 771 - 780, 1996.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

31. Ihekwa N.M. ym. Carbonation and electrochemical chloride extraction from concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 26, No 7, ss. 1095 – 1107, 1996.
32. Ihekwa N.M. ym. Pull-out and bond degradation of steel rebars in ECE concrete. *Cement and Concrete Research*. Vol. 26, No. 2, ss. 267 – 282, 1996.
33. Ihekwa N.M. ym. Structural shape effect on rehabilitation of vertical concrete structures by ECE technique. *Cement and Concrete Research*. Vol. 26, No. 1, ss. 165 – 175, 1996.
34. Kahl S. Electrochemical chloride extraction. Michigan department of Transportation MDOT Research Report. R-1384. 2001. 103 s.
35. Lampinen Jorma, Insinööritoimisto Jorma Huura, Suullinen tieto toukokuu 2008.
36. Manning D. G. & Pianca F. Electrochemical Removal of Chloride Ions from Reinforced Concrete. Initial Evaluation of the Pier S19 Field Trial. *Transportation Research Record*. No. 1304, ss. 153 – 159, 1991.
37. Marcotte T.D. ym. The effect of the electrochemical chloride extraction treatment on steel-reinforced mortar. Part I - Electrochemical measurements. *Cement and Concrete Research*. Vol 29, No. 10, ss. 1555-1560, 1999.
38. Mattila Jussi, Tekn. tri, Tampereen teknillinen yliopisto. Suullinen tieto 22.5.08.
39. Miller J.B. Electrochemical Desalination (Chloride extraction) and Realkalisation julkaisussa NORECON network on Repair and Maintenance of Concrete Structures. Repair Methods – a Review. Toim. Byfors K. April 2004. S. 19-36.
40. Monteiro P. J. M. Influence of Water-cement Ratio and Cover Thickness on Chloride Extraction of Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*. Jen/Feb 2005.
41. Orellan J.C. Electrochemical chloride extraction: efficiency and side effects. *Cement and Concrete Research*. Vol 34, ss. 227 – 234, 2004.
42. Polder R.B. & van den Hondel a. W. M. Laboratory investigation of electrochemical chloride extraction from concrete with penetrated chloride. *Heron*. Vol. 47, No. 3, ss. 211-220,. 2002.
43. Poulsen E. Betonrenovering med elektro-kemiske metoder. HFB (=Håndbog for bygningsindustrien) 28 – 1996 . S. 712 - 718.
44. Prosesskode 2. Standard beskrivelsestekster for bruer og kaier. Hovedprosess 8. Retningslinjer. Håndbok 026. Statens Vegvesen. November 2007. 272 s.
45. Prøveprosjekt – kloriduttrekk. Salvøy bru. Prinsipp – elektrokjemisk kloriduttrekk. Statens vegvesen. Rogaland/Vegdirektoratet. Bruavdelningen. Rapport 95-05 BRU. 1995. 38 s + liitt. 36 s.
46. Schmid M. Elektrochemische Chloridentfernung (ECE): Praxisbespiel. *Tec21*, 31-32/2001. S. 21 – 23.
47. Schneck U. Investigations on the chloride transformation during the electrochemical chloride extraction process. *Materials and Corrosion*. 51, ss. 91-96, 2000.
48. Sederholm Bror, Tekn. Dr. Korrosionsinstitutet, Sverige. Sähköposti 21.5.2008.
49. Sharp S.R. ym. Electrochemical Chloride Extraction: Influence of Concrete Surface on Treatment. Report FHWA-RD-02-107. 49 s. 2002.
50. Siegwart M. Influence of Electrochemical Chloride Extraction on the Performance of Prestressed Concrete under Dynamic Loading Conditions. *Journal of Materials and Civil Engineering*. Vol 18, No. 6, ss. 800-812, 2006.
51. Siegwart M. ym. Application of Inhibitors to Reduce the Hydrogen Uptake of Steel During Electrochemical Chloride Extraction. *Corrosion*. Vol. 58, No. 3, ss. 257 – 266, 2002.

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.

52. Siegwart M. ym. Change of pore size in concrete due to electrochemical chloride extraction and possible implications for the migration of ions. *Cement and Concrete Research*. Vol. 33, ss. 1211 – 1221, 2003.
53. Siegwart M. ym. The effect of electrochemical chloride extraction on prestressed concrete. *Construction and Building Materials*. Vol 19, ss. 585 – 594, 2005.
54. Slater J.E. ym. Electrochemical Removal of Chlorides from Concrete Bridge Decks. *Transportation Research Record*. No. 604, ss. 6 – 15. 1976.
55. Standard Specification for Electrochemical Chloride Extraction. AASHTO Designation.
56. Rahanarvokerroin 1860 – 2007. Tilastokeskuksen www-sivut.
57. Wang Y. ym. A two dimensional model of electrochemical chloride removal from concrete. *Computational Materials Science*. Vol 20, No. 2, ss 196 – 212. 2001.

Espoo, 18.9.2008



Markku Leivo
Erikoistutkija



Liisa Salparanta
Tutkija

JAKELU

Tilaaaja
VTT / Kirjaamo

Alkuperäinen
Alkuperäinen

Tutkimustulokset pätevät ainoastaan tutkituille näytteille.