

Otto Haalahti

# Pohjaveden sisältämien aineiden vaikutus teräsbetonirakenteiden suunnittelussa

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Rakennustekniikka

Insinöörityö

20.4.2015

Tekijä(t) Otsikko	Otto Haalahti Pohjaveden sisältämien aineiden vaikutus teräsbetonirakenteiden suunnittelussa
Sivumäärä Aika	61 sivua + 4 liitettä 20.4.2015
Tutkinto	Insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	Rakennustekniikka
Suuntautumisvaihtoehto	Rakennetekniikka
Ohjaaja(t)	Rakennesuunnittelun osastopäällikkö Olli Salo, S&R Oy Lehtori Juha Virtanen, Metropolia AMK
<p>Tämä insinööryö on tietopaketti rakennesuunnittelijoille suomalaisen pohjaveden yleisestä koostumuksesta, sen aiheuttamista kemiallisista rasituksista teräsbetonirakenteille sekä paineellisen pohjaveden vaikutuksista kloridien tunkeutumisoopeuteen. Työssä perehdyttiin eurokoodiin ja selvitettiin, mitä säilyvyysuunnittelua koskevia määräyksiä siinä on annettu. Aihe on ajankohtainen betonitunneleiden ja muiden maanalaisten teräsbetonirakenteiden suunnittelussa.</p> <p>Suomalaisessa pohjavedessä on keskimäärin melko vähän elektrolyyttejä eli siihen liuenneita aineita. Tämä ilmenee alhaisista sähkönjohtavuus-, pH- ja kovuusarvoista. Paikalliset erot ovat kuitenkin suuria ja johtuvat maaperän ominaisuuksista sekä ihmisen toiminnasta. Rannikkoalueilla sekä entisillä merenpohja-alueilla sähkönjohtavuus ja suolapitoisuus ovat keskimääräistä korkeampia. Liuenneiden aineiden pitoisuuksiin vaikuttavat myös maa- ja kallioperän mineraalikoostumus sekä pohjaveden viipymä.</p> <p>Teräsbetonirakenteille haitallisimmat pohjaveteen liuenneet aineet ovat kloridi ja sulfaatti. Rakenteen säilyvyyteen vaikuttaa myös veden pH-arvo eli sen happamuus. Lisäksi rasituksia aiheuttavat yleensä pohjavedessä vain pieninä määrinä esiintyvä ammonium sekä vapaa hiilidioksidi ja magnesium.</p> <p>Eurokoodin mukaisessa säilyvyysuunnittelussa rakennesuunnittelijan tehtävänä on määrittää betoniteräksen betonipeitepaksuus, betonin lujuus, vesi-sementtisuhde sekä rajoittaa betonin halkeamaleveyttä. Eurokoodissa ja kansallisissa ohjeissa on säilyvyysuunnittelun kannalta puutteita. Kloridipitoisuuksille ei ole annettu minkäänlaisia raja-arvoja ja halkeamaleveyden enimmäisarvot ovat suuria esimerkiksi vanhaan suunnittelustandardiin verrattuna. Suunnittelijan on käytettävä omaa harkintaansa mitoittaessaan rakenteita kemiallisesti aggressiivisessä ympäristössä.</p>	
Avainsanat	pohjavesi, teräsbetoni, kloridi, sulfaatti, säilyvyys

Author(s) Title	Otto Haalahti The Effect of Groundwater Substances on the Design of Reinforced Concrete Structures
Number of Pages Date	61 pages + 4 appendices 20 April 2015
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Civil Engineering
Specialisation option	Structural Engineering
Instructor(s)	Olli Salo, Department Manager, Structural Engineering, S&R Oy Juha Virtanen, Lecturer, Metropolia AMK
<p>This Bachelor Thesis is an informational tool to structural designers about the general composition of groundwater, chemical stresses it causes to reinforced concrete structures and the effects of pressurized groundwater on chloride's penetration rate. In addition, the study examines the Eurocode to find out what kind of regulations there are on the durability guidelines. The subject is topical on the design of concrete tunnels and other underground reinforced concrete structures.</p> <p>There are quite few electrolytes, in other words, dissolved substances in Finnish groundwater. That can be seen as low electrical conductivity, pH and hardness values. Local differences, however, are large due to human activity and the characteristics of the soil. In coastal areas, as well as the former seabed areas, electrical conductivity and salinity are above average. The concentration of dissolved substances is also affected by both the composition of the soil and bedrock and, the groundwater retention time.</p> <p>The groundwater's most detrimental substances on reinforced concrete structures are chloride and sulfate. The durability of the structure is also affected by the pH value, free carbon dioxide, magnesium and ammonium, which usually only occurs in small quantities in groundwater.</p> <p>According to the durability guidelines of Eurocode, the task of a structural engineer is to define the concrete cover, strength and water-cement ratio of the concrete, as well as the maximum crack width. There are shortages in the Eurocode and national guidance about the durability design. There are no threshold values on chloride solution, and the maximum crack width is large in comparison with, for example, the old design standard. Thus the designer must use common sense while designing structures in a chemically aggressive environment.</p>	
Keywords	groundwater, reinforced concrete, chloride, sulfate, durability

## Sisällys

### Lyhenteet ja määritelmät

1	Johdanto	1
2	Pohjavesi	2
2.1	Yleistä	2
2.2	Pohjavesien alueellinen laatuvaihtelu Suomessa	3
2.2.1	Suomen kallioperän vesivarat	8
2.3	Pohjaveden liike	8
2.4	Pohjaveden yleinen kemiallinen koostumus	10
2.4.1	Suomalaisen pohjaveden sisältämät alkuaineet ja yhdisteet	13
3	Pohjaveden sisältämät haitta-aineet ja niiden aiheuttamat rasitukset teräsbetonirakenteissa	18
3.1	Rasitukset betonissa	18
3.1.1	Betonin sulfaattireaktiot	19
3.1.2	Happojen vaikutukset betonissa	22
3.1.3	Betonin magnesiumreaktiot	22
3.2	Rasitukset betoniteräksissä	23
3.2.1	Karbonatisoituminen	24
3.2.2	Kloridikorroosio	25
3.3	Paineellisen pohjaveden vaikutukset pohjaveden tunkeutumismopeuteen	28
3.4	Korroosion ehkäisy teräsbetonirakenteissa	31
3.4.1	Betonin koostumus	31
3.4.2	Keinot betonivalussa	31
3.4.3	Betonin rauditus	33
3.4.4	Muita keinoja säilyvyyden parantamiseksi	36
4	Maanalaisten teräsbetonirakenteiden säilyvyysuunnittelu	39
4.1	Suunnittelunormit ja ohjeet	39
4.2	Rakennesuunnittelijan tehtävät käyttöikäsuunnittelussa	40
4.3	Suunnittelukäyttöikä	40
4.4	Rasitusluokka	42
4.4.1	XA-rasitusluokat	43

4.5	Betonin koostumus	44
4.5.1	Lujuusluokka	44
4.5.2	Vesi-sementtisuhte ja vähimmäissementtimäärä	45
4.6	Betonipeitteen paksuus	46
4.7	Halkeamaleveyden rajoittaminen	50
5	Yhteenveto	53
	Lähteet	56

#### Liitteet

Liite 1. Rakenteiden vähimmäisvaatimukset rasitusluokkayhdistelmille by 51 mukaisesti

Liite 2. Kemikaalien aggressiivisuus betonille by 51 mukaisesti

Liite 3. Betonin puristuslujuusluokat EN 206 mukaisesti

Liite 4. Syövyttävyyden luokat ja sinkityskerroksen vähimmäispaksuudet EN ISO 14713-1 mukaisesti

## Lyhenteet ja määritelmät

Akviferi	Pohjavesivarasto. Pohjaveden kyllästämä ja vettä hyvin johdettava maa- tai kivilajiyksikkö, joka on hydraulisesti yhtenäinen muodostuma ja voi luovuttaa käyttökelpoisia määriä vettä.
Alkaliteetti	Kuvaa veden puskurikapasiteettia eli kuinka paljon vahvan hapon lisääminen veteen vaikuttaa sen pH-arvoon. Käytännössä alkaliteetti kuvaa emäksisten yhdisteiden kokonaismäärää vedessä.
Alunasavi	Merenpohjaan sedimentoitunut hienojakoinen aines.
Arteesinen lähde	Tilanne, jossa paineellisen pohjaveden pinta pyrkii vapaata aluetta vastaavalle tasolle.
Arteesinen pohjavesi	Paineellinen pohjavesi. Tilanne, jossa pohjavesi sijaitsee esimerkiksi vettä läpäisemättömän kerroksen alla siten, että veden painetaso on läpäisemättömän kerroksen alla korkeampi kuin muualla.
Diffuusio	Molekyylien siirtyminen väkevämmästä pitoisuudesta miedompaan tasoittaen pitoisuuserot ajan mittaan.
Dissosiaatio	Molekyylin hajoaminen kahdeksi tai useammaksi molekyyliksi tai atomiksi.
Elektrolyytti	Aine, joka veteen liuenneena jakaantuu ioneiksi. Tällöin vesi alkaa johtaa sähköä.
GTK	Geologian tutkimuskeskus.
Hydraulinen gradientti	Virtauksen aiheuttama energiatason alenema, jota kuvataan hydraulisen korkeuden muutoksella tietyllä matkalla.
Hydraulinen murtuma.	Tilanne, jossa paineellinen pohjavesi pääsee purkautumaan vettä läpäisemättömän kerroksen murtuessa.

Hydroksidi-ioni	Veden ja hapen muodostama anioni, joka on voimakkaan emäksinen. Vaikuttaa pohjaveden pH-arvoon.
Konsentraatio	Molaarisuus eli suure, joka ilmoittaa liuenneen aineen pitoisuuden liuoksessa.
Kriittinen kloridipitoisuus	Pitoisuus, jonka ylittyttyä raudoitteiden kloridikorrosio on mahdollista.
Märkälaskeuma	Laskeuma, jossa jokin aine laskeutuu maahan sateen yhteydessä.
Orsivesi	Tiiviin, vettä läpäisemättömän maakerroksen päälle kerääntynyttä vettä, joka on varsinaisen pohjavesisiintymän yläpuolella.
Reliktinen merivesi	Jäännösmerivesi, joka on peräisin ajalta, jolloin meri peitti laajoja nykyään maatuneita rannikkoalueita.
Viipymä	Viipymä kuvaa veden vaihtuvuutta. Se tarkoittaa aikaa, jossa tietty vesimäärä vaihtuu kokonaan hydrologisen kierron vaikutuksesta.

## 1 Johdanto

Saanio & Riekkola Oy on yritys, jonka erityisosaamista ovat kalliotilojen suunnittelu ja ydinjätteen loppusijoitustekniikka. Yritys on mukana monien suurien tunnelihankkeiden suunnittelussa. Tällainen on esimerkiksi Tampereen rantatunneli, josta tulee valmistuttuaan Suomen pisin liikennetunneli. Pohjavesi on hyvin usein läsnä suunniteltaessa betonitunneleita tai maanalaisia teräsbetonirakenteita, kuten kalliotunnelien sisäisiä rakenteita. Pohjaveden koostumus ja pitoisuudet vaihtelevat suuresti eikä rakennesuunnittelijoilla aina ole tarkkaa tietoa eri aineiden vaikutusmekanismeista.

Aihe on juuri nyt ajankohtainen, sillä yrityksellä on useita tämänkaltaisia projekteja työn alla tai alkamassa lähitulevaisuudessa. Projekteissa otetaan näytteitä pohjavedestä, jolloin tiedetään veden kemiallinen koostumus. Tätä tietoa on kuitenkin vaikea hyödyntää, jollei tiedetä keskimääräisen pohjaveden pitoisuuksia tai kuinka aineet reagoivat teräsbetonin kanssa.

Suomen pohjavesien koostumuksesta ja erilaisten haitta-aineiden vaikutuksista teräsbetonirakenteisiin on tehty paljon tutkimuksia. Tämän työn tavoitteena on kerätä tietoa erilaisista kirjallisuuslähteistä ja koota aiheesta tietopaketti, joka kasvattaa suunnittelijoiden tietämystä pohjaveden koostumuksesta, sen vaikutuksista teräsbetonirakenteisiin sekä paineellisen pohjaveden vaikutuksesta kloridien tunkeutumiseen. Lisäksi tavoitteena on perehtyä eurokoodiin ja selvittää, minkälaisia määräyksiä siinä on säilyvyyden kannalta asetettu kemiallisesti rasitettuja rakenteita koskien.

Opinnäytetyö tehdään rakennesuunnittelijan näkökulmasta, mutta sen sisältämä tieto voi hyödyttää myös muiden suunnittelualojen suunnittelijoita. Työssä käsitellään vain aineita, joita pohjavesi yleisesti Suomessa sisältää eli pilaantuneen tai saastuneen maaperän vaikutuksia pohjaveteen tai muita poikkeuksellisempia tapauksia ei käsitellä.



## 2 Pohjavesi

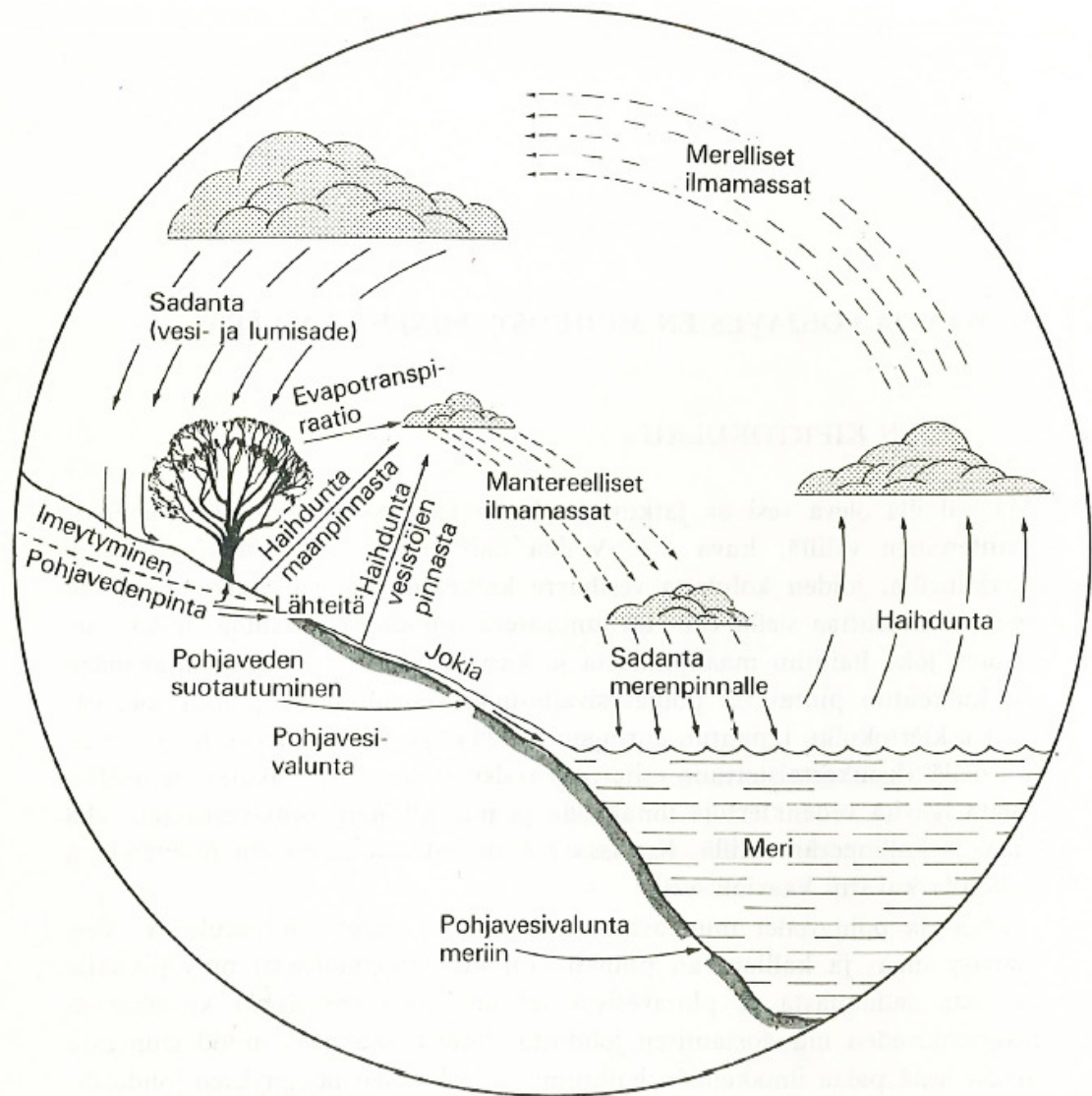
### 2.1 Yleistä

Pohjavedellä tarkoitetaan maaperän vapaata vettä, joka sijaitsee maa- ja kallioperän vedellä kyllästyneessä vyöhykkeessä. Sillä voidaan myös laajemmin tarkoittaa kaikkea maanalaista vettä, koska pohjaveden laatuun vaikuttaa merkittävästi se, mitä vedelle tapahtuu sen virratessa maaperän kyllästymättömän vyöhykkeen läpi. [25.]

Vesi maapallolla on jatkuvassa kiertoliikkeessä mantereiden, ilmakehän ja meren välillä. Pohjavesi on osa tätä hydrologista kiertoa eli veden kiertokulkua (kuva 1, s. 3). Se kuvaa veden olomuodon muutoksia nesteestä vesihöyryksi ja jääksi tai päinvastoin. Maaperään imeytynyt vesi muodostaa pohjavettä, jota siirtyy kapillaarivoimien ja kasvilisuuden vaikutuksesta maanpinnalle ja haihtuu pintavetenä ilmakehään. Tämän jälkeen vesi tiivistyy ilmakehässä ja sataa maanpinnalle, josta osa imeytyy maaperän läpi takaisin pohjavedeksi. Ei ole varmaa, onko kierrossa olevan veden kokonaismäärässä globaalia vajausta, mutta todennäköisesti viimeisen 500 miljoonan vuoden aikana vesimäärässä ei ole tapahtunut pysyvää muutosta. [1, 25.]

Paikalliset erot pohjaveden määrässä ovat suuria. Eniten pohjaveden määrään Suomessa vaikuttaa sade ja sulamisvesien määrä. Sateesta maaperään imeytyy keskimäärin noin puolet, mutta vain pieni osa siitä muodostaa pohjavettä. Sadeveden paikallisiin imeytymisolosuhteisiin vaikuttavat mm. maaston muoto, maanpinnan laatu (luonnontilainen, muokattu), kasvillisuus, päällystäminen sekä viemäröinti. [25.]

Vaihtumisaikaa voidaan käyttää veden vaihtumisen nopeuden vertailussa kiertokulun eri osissa. Se ilmoittaa veden vaihtumiseen keskimäärin tarvittavan ajan hydrosfäärissä eli koko maapalloa ympäröivässä vesikehässä tai sen osassa. Vaihtumisaika koko hydrosfäärille on noin 2800 vuotta, mutta syvemmissä maankuoren osissa vaihtumiseen voi mennä jopa 5000 vuotta. Keskimääräinen vaihtumisaika pohjavesien ylimmälle kerrokselle on noin 330 vuotta. [1.]

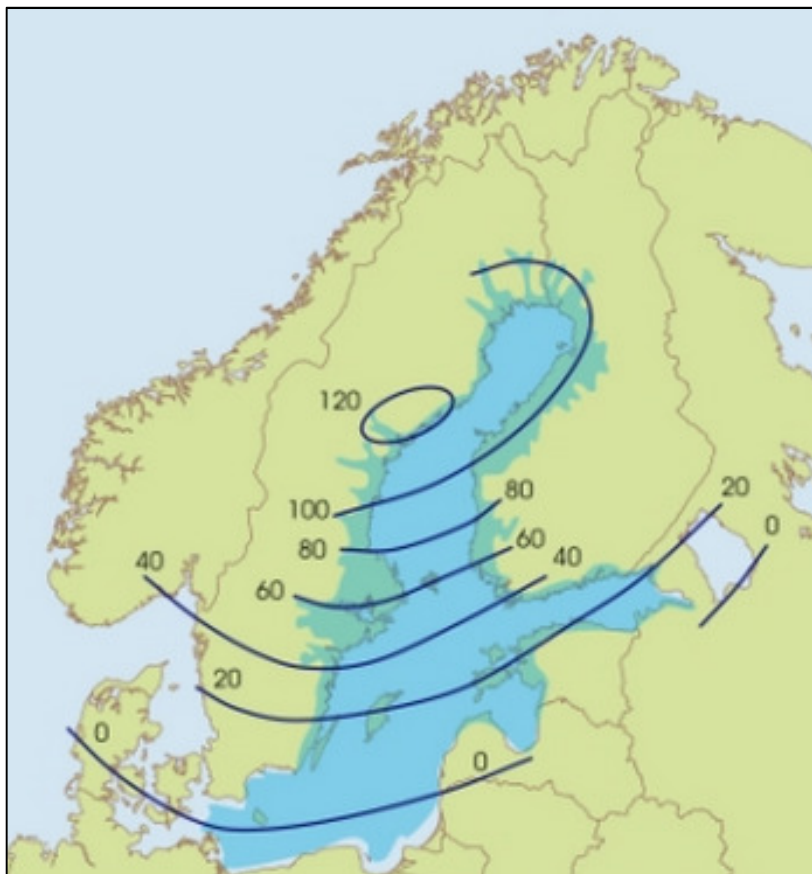


Kuva 1. Hydrologisen kierron periaatekuva. [1.]

## 2.2 Pohjavesien alueellinen laatuvahtelu Suomessa

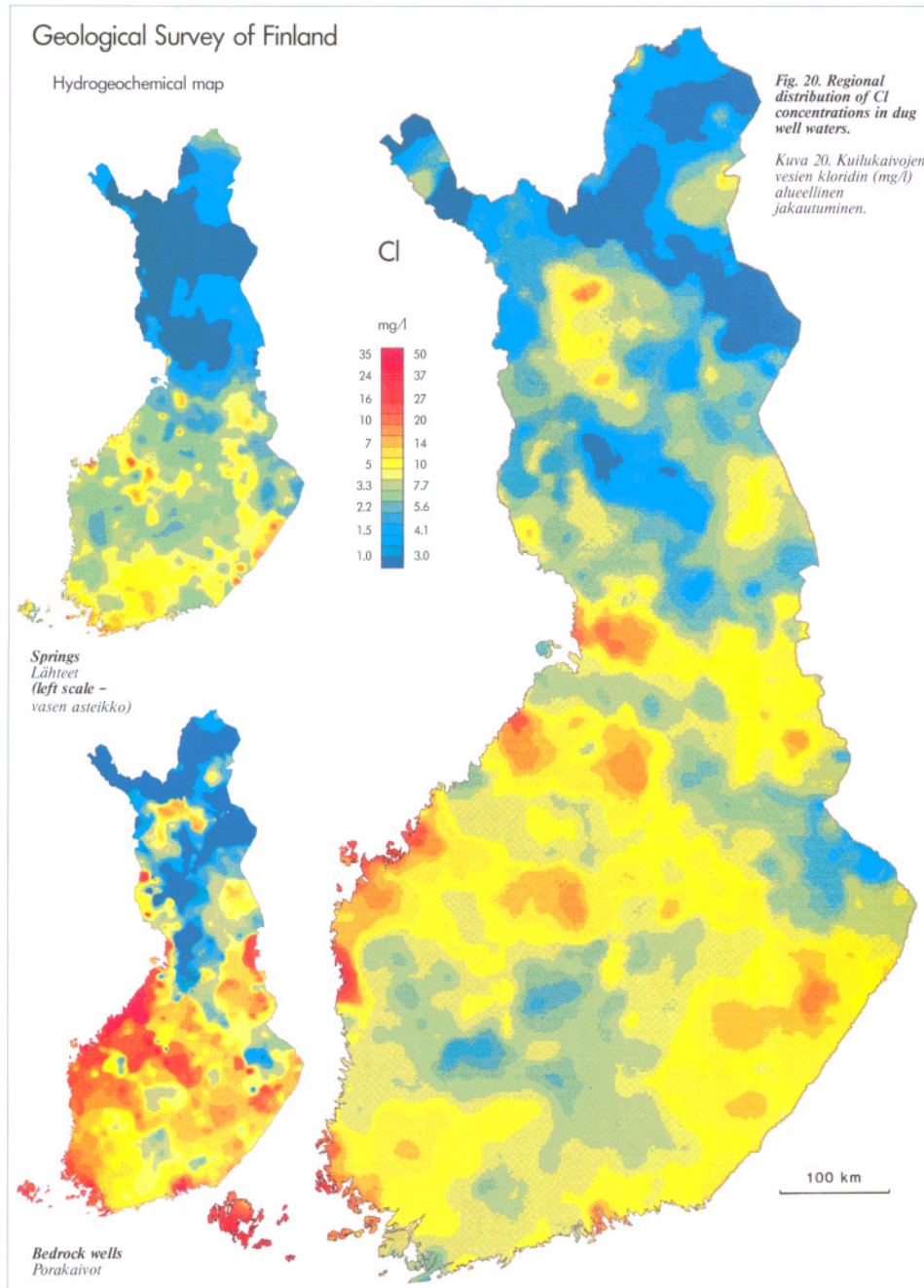
Suomen pohjavesissä esiintyy alueellista laadun vaihtelua, joka johtuu maaperän geologisesta luonteesta sekä ihmisen toiminnasta. Pohjaveteen on liennut valtakunnallisella tasolla melko vähän aineita. Tämän näkee mm. alhaisesta sähkönjohtavuudesta sekä veden pH- ja kovuusarvoista. [25.] On muistettava, että tarkkoja pohjaveden pitoisuuksia ei saa ilman kohdekohtaisia tutkimuksia. Itä-Suomesta Outokummun kallioperästä löydettiin 2,5 km syvyydestä pohjavettä, joka oli hyvin suolaista ja kaasupitoista. Sen suolapitoisuus kohosi 70 grammaan litrassa, joka on kaksinkertainen määrä valtameriveteen verrattuna. [12.]

Rannikon ja sisämaan välillä on eroja johtuen suolaisen meriveden vaikutuksesta. Meren läheisyys näkyy Suomen rannikkoalueilla keskiarvoa korkeampana sähkönjohtavuutena sekä kloridi-, sulfaatti- ja natriumpitoisuutena. Meriveden kloridit siirtyvät pääasiallisesti ilmaitse rannikkoalueiden pohjavesiin. Muita kloridipitoisuutta nostattavia tekijöitä ovat reliktilisen meriveden suolat sekä muinaiset merivaiheet. Samat tekijät nostavat myös pohjaveden natriumpitoisuutta rannikkoalueilla. Runsassuolaiset vedet rannikkoalueilla sijoittuvat pääosin Litorina-savien alueelle. Litorina-saviksi kutsutaan erityisesti Pohjanmaalla sijaitsevia sulfidipitoisia savikkoja. Ne muodostuivat noin 9000 vuotta sitten Litorinameren (kuva 2) aikaan, jolloin alue oli meren alla. Savesta, siltistä ja turpeesta koostuva kerros pohjavesiesiintymän päällä aiheuttaa sille ominaiset pohjavesigeologiset olosuhteet. Tällaisissa kerrostumissa pohjavesi viipyy kauemmin ja veden happi kuluu orgaanisen aineksen hajottamiseen. Tällöin akviferin kemialliset olot muuttuvat hapettavista pelkistäviksi. [14, 25.]



Kuva 2. Litorinameri 8000 vuotta sitten. Kuvassa olevat numerot kuvaavat senttimetreissä merenpinnan korkeuden eroa nykyiseen mereen. [14.]

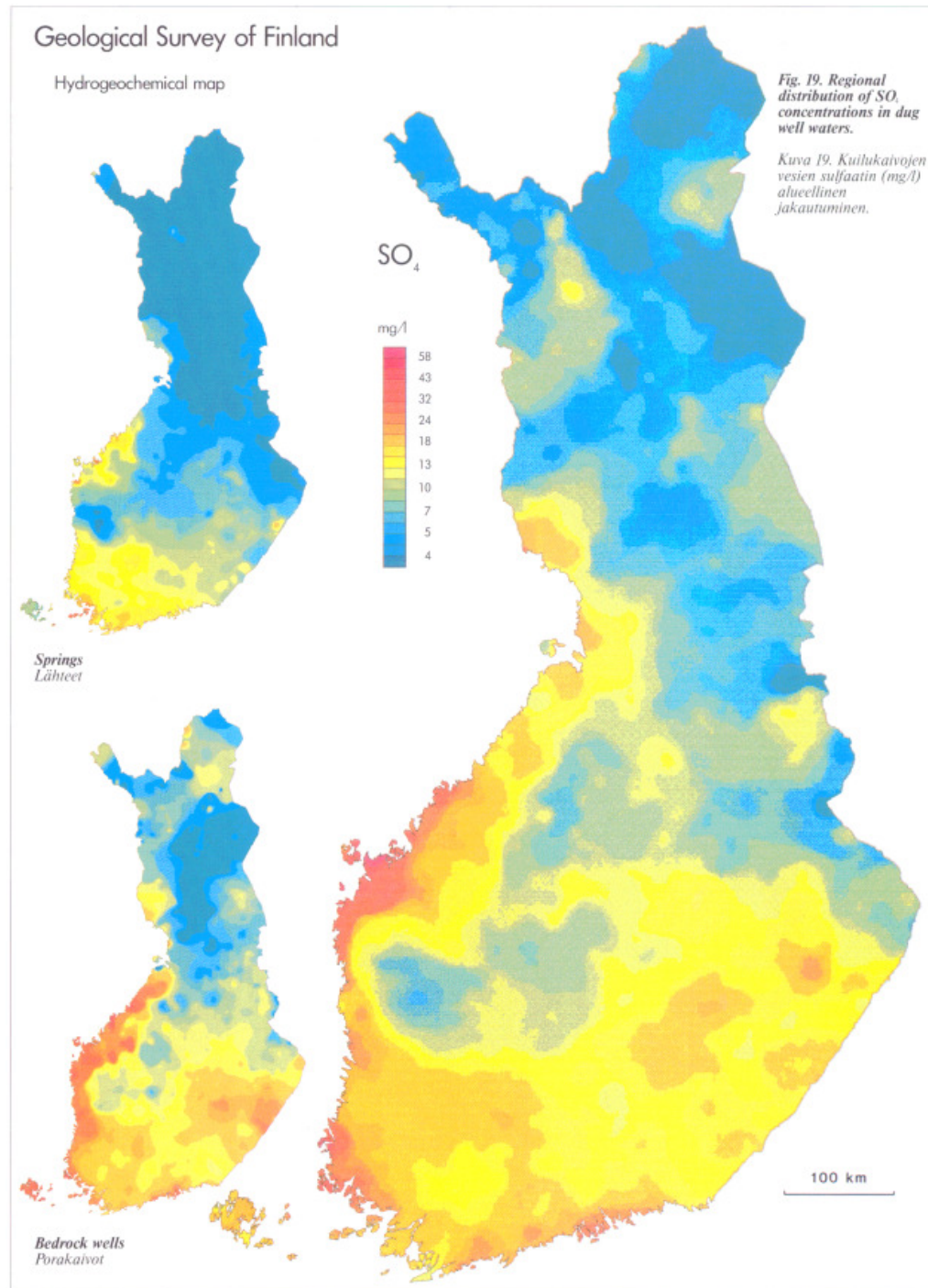
GTK on julkaissut useita tutkimuksia pohjaveden laadun alueellisesta vaihtelusta. Alla olevassa kartassa on esitetty kloridipitoisuuden arvoja ympäri Suomea (kuva 3). Kartat ovat peräisin vuonna 1990 tehdystä valtakunnallisesta tutkimuksesta, jonka näytteet on otettu kuilukaivoista, porakaivoista sekä lähteistä.



Kuva 3. Pohjavedestä vuonna 1990 mitattuja kloridipitoisuuksia Suomessa. [27.]

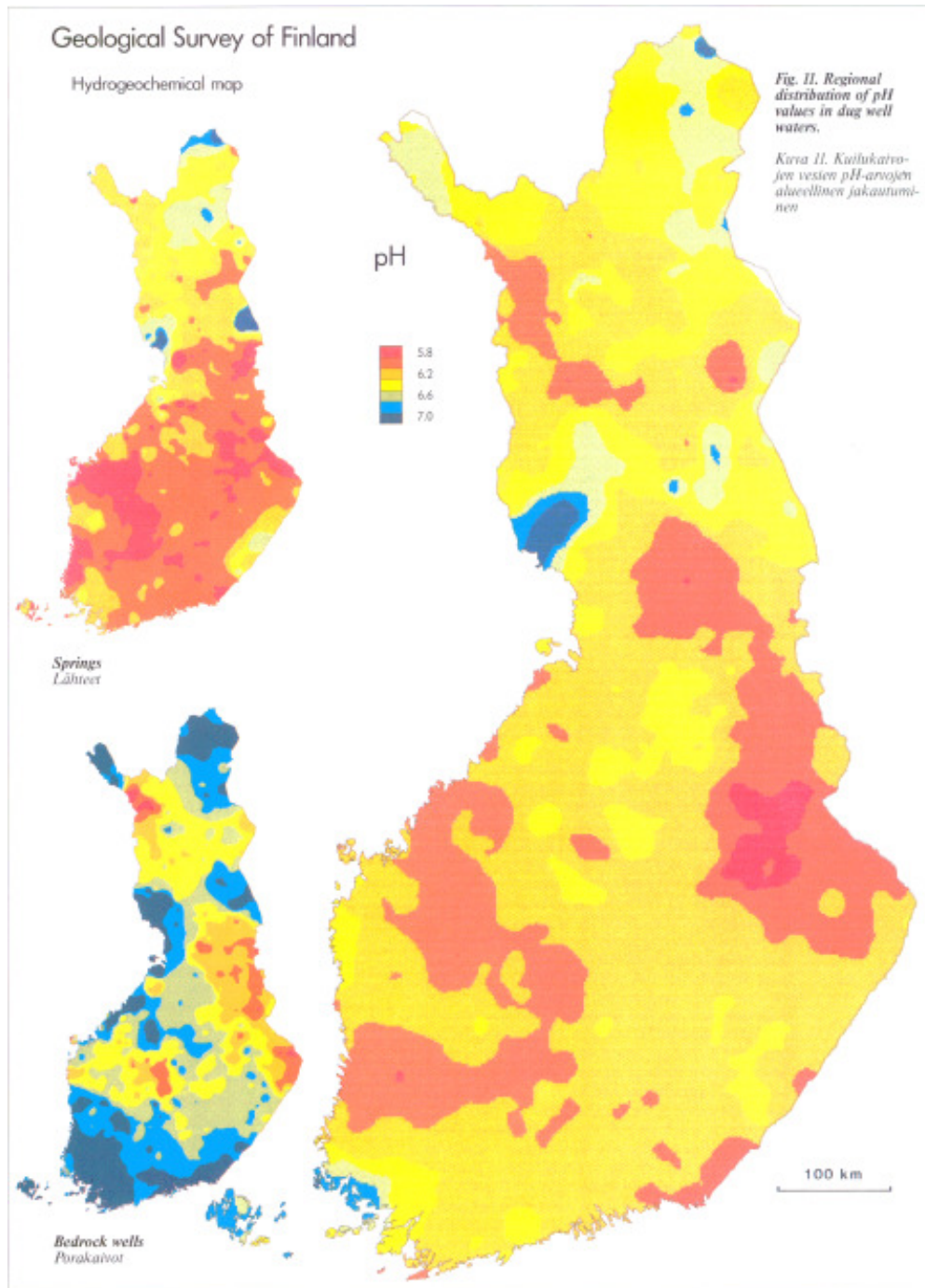


Alla olevasta kuvasta 4 nähdään sulfaattipitoisuuden alueellista vaihtelua Suomessa. Pohjaveden sulfaatti tulee pääosin ilmateitse märkälasseumana. Veden sulfaattipitoisuutta lisää eniten meren läheisyys. [25.]



Kuva 4. Pohjavedestä vuonna 1990 mitattuja sulfaattipitoisuuksia Suomessa. [27.]

Kuvasta 5 nähdään pH-arvojen alueellista jakautumista. Keskimääräinen pH on Suomessa alhainen eli vesi on hapanta. [25.]



Kuva 5. Pohjavedestä vuonna 1990 mitattuja pH-arvoja Suomessa. [27.]

### 2.2.1 Suomen kallioperän vesivarat

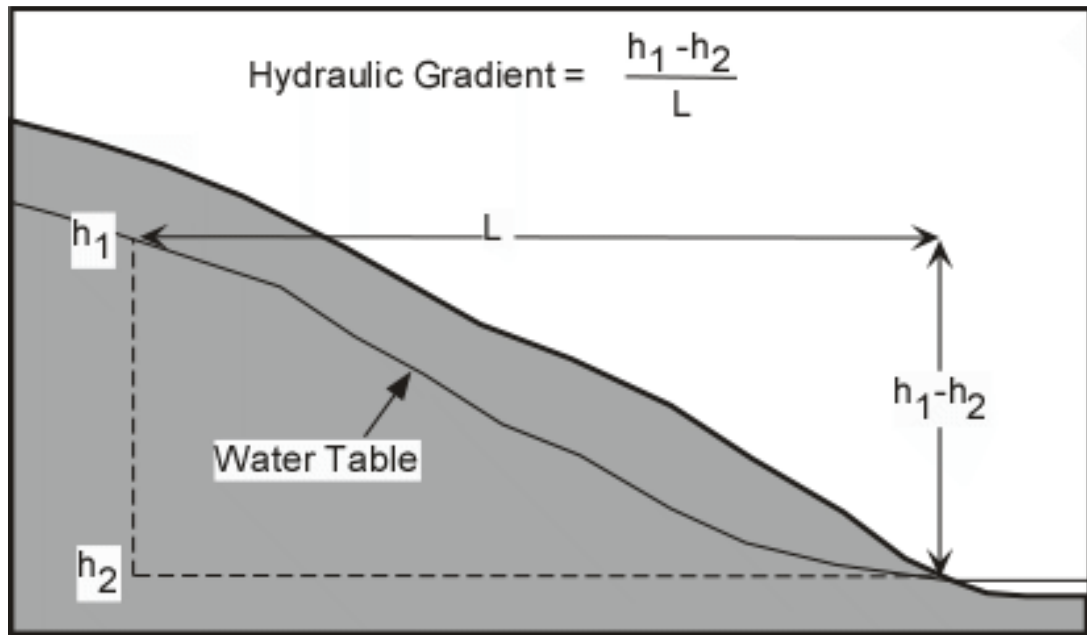
Suomen kallioperä koostuu suurelta osin magmaattisista syväkivilajeista sekä metamorfisista kiteisistä gneisseistä ja liuskeista. Kivet ovat likimäärin vettä läpäisemättömiä ja kivimassasta puuttuvat läpi ulottuvat primääriset huokosrakenteet eli ontelot. Myöhemmät maankuoren liikkeet ovat kuitenkin ruhjoneet kallioperää. Liikkeet ovat saaneet rakoilua aikaan erityisesti happamissa kivissä, kuten graniitissa. Veden virtaus Suomen kallioperässä on kuitenkin pientä verrattuna muualla yleisiin kalkkikivi- ja sedimenttialueisiin. [25.]

Pääsääntöisesti kalliopohjavesi varastoituu kalliopinnan rapautumiskerrokseen, halkeamiin, rakoihin ja rikkonaisuusvyöhykkeisiin. Tämä johtuu siitä, että kallioperämme kivilajit eivät ole itsessään kovin huokoisia. Rakoilun tiheys ja luonne riippuvat kivilajista. Peruskalliossa voi olla jopa satojen kilometrien pituisia rikkoutumisvyöhykkeitä eli ruhjeita. Avoimia rakoja ruhjevyyhykkeessä on syvemmällä kuin kiinteässä kalliossa. Nämä raot ovat erittäin kapeita, alle 1 mm leveitä. Ruhjeet varastoivat huomattavasti pohjavettä ja ne muodostavatkin varsinaiset pohjavesialtaat. [25.]

Suomen kalliioakvifereihin kuuluvat pienet, mutta runsaslukuiset pohjavesialtaat, pieni veden varastotilavuus sekä yleensä pienialainen ja lyhytaikainen hydrologinen kierto. Porakaivojen vedenantoisuus on keskimäärin  $30 \text{ m}^3/\text{vrk}$  ja keskisyvyys 60 m. [25.]

### 2.3 Pohjaveden liike

Pohjaveden pinta on suhteellisen tasainen ja noudattaa väljästi pinnan muotoja. Maassa oleva vesi virtaa hydrostaattisen paineen mukaisesti suuremmasta painekorkeudesta pienempään. Liike kuluttaa energiaa, joten pohjaveden pinnan hydraulinen korkeus laskee veden kulkeman matkan kasvaessa. Virtauksen aiheuttamaa energiatason alenemaa kuvaa hydraulinen korkeusero tietyllä matkalla. Tätä energiatason alenemaa kutsutaan hydrauliseksi gradientiksi (kuva 6, s. 9). Pohjaveden tehokas virtausnopeus luonnossa on yleensä jotain väliltä  $1,5 \text{ cm/v}$ – $1500 \text{ cm/vrk}$ . Maa-aineksen raekoon sekä pohjaveden kaltevuuden ollessa erittäin suuria, voi virtausnopeus olla kuitenkin jopa yli  $1 \text{ cm/s}$ . [25.]



Kuva 6. Hydraulisen gradientin periaatekuva. Water table = pohjaveden pinta. [36.]

Arteesinen eli paineellinen pohjavesi tarkoittaa tavallisesti tilannetta, jossa pohjavesi sijaitsee vettä läpäisemättömän kerroksen alla siten, että veden painetaso on läpäisemättömän kerroksen alla korkeampi kuin muualla. Tällaisena läpäisemättömänä kerroksena voi toimia esimerkiksi salpaava savikerros. Kun tämän kerroksen läpi kaivaudutaan rakennettaessa, muodostuu arteesinen lähde, jossa paineellisen pohjaveden pinta pyrkii vapaata aluetta vastaavalle tasolle. [22, 58.]

Paineellista pohjavettä voi esiintyä myös kallioperän luonnollisiin rakoihin varastoituneena vetenä. Vesi voi saada virtausyhteyden esimerkiksi tunnelin louhinnan yhteydessä. Hydrostaattinen paine on sitä suurempi, mitä syvemmällä maan sisällä ollaan. Paineellisen pohjaveden aiheuttama hydraulinen murtuma tunnelissa voi olla erittäin voimakas, jolloin rakennuskohteessa joudutaan mahdollisesti ryhtymään mittavaan veden pois pumppaamiseen. Tällainen voi pysäyttää rakennustyöt pitkäksi aikaa aiheuttaen suuria taloudellisia menetyksiä. [58, 63.]

Salpaavan kerroksen päällä voi olla myös vettä, jonka korkeustaso ja vastaava vedenpaine eroavat huomattavasti pohjaveden kanssa. Tällaista vettä kutsutaan orsivedeksi eikä sitä lasketa varsinaiseksi pohjavesiesiintymäksi. [22.]



## 2.4 Pohjaveden yleinen kemiallinen koostumus

Pohjaveden koostumus määräytyy maaperään imeytyvän veden sisältämästä suolasta, maa- ja kallioperän rakenteesta sekä niiden mineraalikoostumuksesta. Pohjaveteen imeytyy sitä suurempi määrä aineita, mitä pidempi viipymä on eli mitä hitaammin vesi vaihtuu osana hydrologista kiertoa. Saven alla pitkään virranneessa pohjavedessä on yleensä moninkertaiset pitoisuudet liuenneita aineita verrattuna hyvin vettä johtavien karkeiden maalajien pohjaveteen. Veteen liuenneiden aineiden pitoisuudet ovat suurimmat syvällä kallioperän ruhjeissa ja halkeamissa, joissa pohjaveden viipymä on pitkä. [19.]

Pohjavettä voidaan pitää elektrolyyttien liuoksena. Siihen liuenneiden aineiden kokonaismäärästä noin 90 % koostuu pääkationeista (Ca, Mg, Na, K) ja pääanioneista ( $\text{HCO}_3$ ,  $\text{SO}_4$ , Cl). Näitä sanotaan pohjaveden pääkomponenteiksi (taulukko 1). Kuitenkin jotkut pieninäkin määrinä esiintyvät aineet voivat olla merkityksellisiä. [25.]

Taulukko 1. Pohjavesien B ja C pääkomponentit sekä niiden keskimääräiset pitoisuudet. [25.]

Komponentit (mg/l)	A	B	C	D
Kalsium ( $\text{Ca}^{2+}$ )	0,2–1,4	5,7–6,6	4,4–30,4	400
Magnesium ( $\text{Mg}^{2+}$ )	0,07–0,15	1,8–2,2	1,4–10,9	1272
Natrium ( $\text{Na}^+$ )	0,2–0,5	2,5–2,6	2,5–22,0	10556
Kalium ( $\text{K}^+$ )	0,1–0,3	1,0	1,0–8,7	380
Bikarbonaatti ( $\text{HCO}_3^-$ )			2,0–123	140
Sulfaatti ( $\text{SO}_4^{2-}$ )	1,5–6	4,7–5,2	5,0–34,0	2649
Kloridi ( $\text{Cl}^-$ )	0,3–1,0	2,5–2,6	2,6–25,8	18980
Rauta ( $\text{Fe}^{2+}$ )			0,05–0,3	0,01

A = sadevesi (Järvinen 1986)  
 B = matalapohjavesi (Lahermo et al. 1990)  
 C = pohjavesi (Lahermo et al. 1990)  
 D = merivesi (Mason 1966)

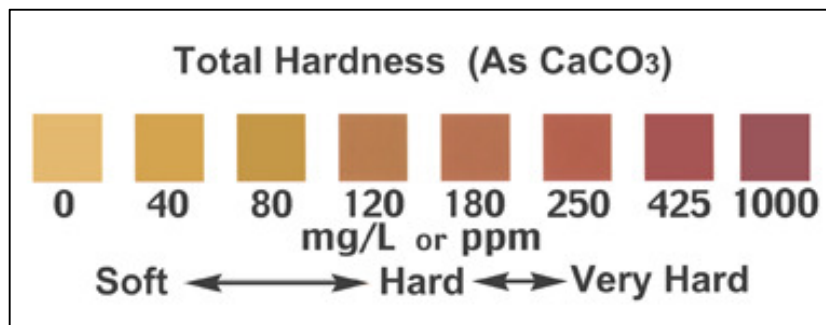
Veden kovuudella tarkoitetaan rasvahappoja saostavien kationien pitoisuutta, joita ovat mm. magnesium, kalsium, rauta, alumiini, mangaani, strontium ja sinkki. Näistä yleisimmät ovat kalsium ja magnesium, joten kokonaiskovuus määritetään yleensä ionisoituvan kalsiumin ja magnesiumin summaksi. Näistä kalsium on määräävämpi tekijä, sillä

sitä on pohjavedessä huomattavasti enemmän. Pohjavedet Suomessa ovat keskimäärin pehmeitä. Veden kovuus ilmaistaan usein kalsiumkarbonaattikovuutena, jonka yksikkönä on mg/l ja joka voidaan laskea alla olevalla kaavalla. [25.]

$$Hr = 2.5 * Ca + 4,1 * Mg \quad (1)$$

Veden kovuutta luokitellaan erilaisten taulukoiden mukaan (taulukko 2).

Taulukko 2. Taulukko veden kalsiumkarbonaattikovuuden luokittelua varten. [45.]



Pohjaveden sähkönjohtokyky on sitä korkeampi, mitä enemmän siinä on liuenneita ioneita. Sähkönjohtokyky kertoo myös veden elektrolyyttipitoisuuden, kun sen kertoo luvulla 0,6. Veden ominaisvastus saadaan, kun mitataan tilavuusyksikön kokoisen vesikuution vastus, jolloin yksiköksi tulee ohmimetri ( $\Omega$ m). Sähkönjohtokyky on tämän vastuksen käänteisarvo, josta saadaan yksiköksi S/m ( $S = 1/\Omega$ ). Lämpötila vaikuttaa suuresti sähkönjohtokykyyn, kasvattaen sitä 2-2,5 % yhtä lämpötila-astetta kohden. Vedestä mitatut arvot muutetaan usein korjauskertoimilla vastaamaan +25 °C, jotta arvot olisivat vertailukelpoisia. Suomen pohjavesien sähkönjohtokyky on yleensä alle 50 mS/m eli alhainen. Tällöin vedessä on myös vähän elektrolyyttejä. Reliktisistä merivesistä liuenneet suolat voivat kuitenkin nostaa suuresti sähkönjohtavuutta. Kemin lähellä sijaitsevan porakaivon vedestä mitattiin sähkönjohtavuudeksi 988 mS/m, +25 °C. [19, 25.]

Alkaliteetti ilmaisee veden puskurikapasiteettia eli kykyä vastustaa happamoitumista. Se on suurempi emäksisten kivilajien alueilla kuin happamien kivilajien alueilla. Alkaliteetti ilmoitetaan joko millimooleina litrassa, milliekvivalentteina litrassa tai bikarbonaatti ( $\text{HCO}_3^-$ )- ja karbonaatti ( $\text{CO}_3^{2-}$ )- pitoisuuksina mg/l. Suurin osa vetykarbonaattien eli bikarbonaattien määrästä on peräisin silikaattimineraalien rapautumiseen osallistuvasta

biogeenisestä hiilihaposta. Lisäksi osa vetykarbonaatin hiilestä on peräisin kasvien hajotessa syntyvästä veteen liuenneesta hiilihaposta ja karbonaattimineraalista. Pieni alkaliteetti on siis kaiken kaikkiaan seurausta ympäristön happamoitumisesta sekä happamien kivilajien rapautumisesta. Alkaliteetti ja sähkönjohtavuus ovat riippuvaisia toisistaan ja niiden alueelliset jakaumat ovat pohjavesissä lähes samat. Suomen pohjavesien alkaliteetin mediaaniarvo on yleensä noin 0,2-1,8 mmol/l. [19, 39.]

Veden pH tarkoittaa sen happamuusastetta ja se ilmaisee vedessä vallitsevan vetyionikonsentraation. Koska vetyionia ( $H^+$ ) ei vapaana vedessä esiinny, lasketaan veden pH yleensä oksoniumionikonsentraation ( $H_3O^+$ ) eli vesimolekyyleihin sitoutuneiden vetyionien avulla. pH voidaan määrittellä alla olevasta kaavasta. Yhdisteen yksikkönä käytetään mol/l. [20, 25.]

$$pH = -\log[H_3O^+] \quad (2)$$

Puhtaassa vedessä on yhtä paljon oksoniumioneja ja hydroksidi-ioneja ( $OH^-$ ). Jos oksoniumionien määrä vedessä on näistä suurempi, pH on alle 7 ja vesi on hapanta. Jos taas hydroksidi-ioneja on näistä enemmän, on pH yli 7 ja vesi emäksistä. Pohjaveden pH Suomessa on keskimäärin 6,5, kun taas esimerkiksi valtamerien pH on keskimäärin 8. Pohjaveden pH vaihtelee suuresti riippuen veden viipymästä maaperässä. Veden pH-arvoon vaikuttavat myös alkaliteetti sekä hiilidioksidipitoisuus ( $CO_2$ ). Vesi on syövyttävää teräkselle, jos pH ja alkaliteetti ovat alhaiset. Alla olevasta taulukosta 3 nähdään Pohjoismaiden laatusuosituksia verkostovedelle putkien korroosion vähentämiseksi. Kaikkien maiden suositukset pH-arvolle ovat Suomen pohjaveden keskimääräistä arvoa korkeampia. [25, 37, 47.]

Taulukko 3. Verkostoveden laatusuosituksia korroosion vähentämiseksi vesiputkissa. [35.]

Muuttuja	Suomi (VVY 2000)	Suomi (Sitra 1980)	Ruotsi	Norja
pH	yli 7,5	yli 8,3	7,5 – 9,0	7,5 – 8,5
Alkaliteetti (mmol/l)	yli 0,6	yli 0,6	yli 1,0	0,6 – 1,0
Kalsium (mg/l)	yli 10		20 – 60	15 – 25
Kloridit (mg/l)		alle 50	alle 100	
Sulfaatit (mg/l)		alle 100	alle 100	
KMnO <sub>4</sub> (mg/l)		alle 20	alle 8,0	
Korroosioindeksi*	yli 1,5			

\* Korroosioindeksi = alkaliteetti [mmol/l]/(kloridi [mg/l]/35,5 + sulfaatti [mg/l]/48)

Pohjaveden lämpötila riippuu kunkin alueen ilmasto-olosuhteista. Ilman ja pohjaveden keskilämpötilat eroavat yleensä vain muutamalla asteella. Suomen pohjavesien lämpötila on yleensä +2 °C ja +11 °C väliltä. [25.]

#### 2.4.1 Suomalaisen pohjaveden sisältämät alkuaineet ja yhdisteet

Pohjavedessä olevien kiintoaineiden kokonaispitoisuus voidaan määrittää esimerkiksi haihdutusjäännöksestä, jolloin saadaan karkea arvio liuenneiden aineiden määrästä. Tätä arviota kutsutaan termillä TDS (*Total Dissolved Solids*) ja se voi vaihdella muutamasta kymmenestä jopa yli tuhanteen milligrammaan litrassa. Se ei kuitenkaan kerro mitään veden aggressiivisuudesta, vaan sitä varten täytyy analysoida veden kukin aine erikseen. [25.]

GTK on julkaissut tutkimusaineistoa mm. Pohjois-Suomen pohjavesistä. Tutkimuksessa otettiin noin 2700 näytettä. Taulukosta 4 voidaan nähdä tutkimuksessa olleiden pohjavesien sisältämien aineiden tunnuslukuja. [19.]

Taulukko 4. Pohjois-Suomen pohjavesien analyysitulosten tunnuslukuja. Max. = enimmäisarvo, min. = vähimmäisarvo, ka. = keskiarvo, med. = mediaani. [19.]

	max.	min.	ka.	med.
pH	10,7	4,7	6,3	6,5
Sähkönjohtavuus mS/m, 25 °C	988	<1	15,6	9,2
KMnO <sub>4</sub> mg/l	205	<1	12,4	5,4
HCO <sub>3</sub> mg/l	814	<1	52,1	26,2
SO <sub>4</sub> mg/l	650	<1	9,9	5
Cl mg/l	3300	<1	11,7	2,1
Br mg/l	35	<1	<1	<1
F mg/l	1,13	<0,1	<0,1	<0,1
NO <sub>3</sub> mg/l	109	<0,2	<1	<1
Ca mg/l	380	<1	14,1	6,8
Mg mg/l	180	<1	3,4	1,4
Na mg/l	1480	<1	7,5	2,7
K mg/l	520	<1	4,5	1,2
Al µg/l	1000	<1	27	1,8
As µg/l	13,4	<1	<1	<1
Cd µg/l	8,1	<0,02	<1	<1
Co µg/l	80	<1	<1	<1
Cr µg/l	10,2	<0,2	<1	<1
Cu µg/l	850	<1	12,2	4
Fe mg/l	50	<0,03	0,26	0,05
Mn µg/l	15500	<1	95,1	20
Mo µg/l	31,2	<1	<1	<1
Ni µg/l	890	<1	3,9	2
Pb µg/l	500	<0,03	1,2	1
Sb µg/l	<1	<1	<1	<1
Sr µg/l	474	<1	30,2	11,3
U µg/l	33,7	<1	<1	<1
V µg/l	10,2	<1	<1	<1
Zn µg/l	12800	<1	142,6	20

Alumiini (Al) on yleisimpiä alkuaineita maa- ja kallioperässä. Sen pitoisuudet Suomen pohjavesissä ovat luokkaa 30 µg/l. Alunasavimailla eli alueilla, joilla merenpohjaan on aikoinaan sedimentoitunut hienojakoista ainesta, on kuitenkin pitoisuudeksi mitattu jopa useita milligrammoja litrassa. Happamoituminen vesistöissä ja maaperässä lisää suu-  
resti alumiinin liukenemista maaperästä pohjaveteen. [25, 28.]

Arseeni (As) on siitä poikkeava aine, että se lähtee tehokkaammin liikkeelle neutraalis-  
sa ja lievästi emäksisessä, kuin happamassa ympäristössä. Sitä esiintyy yleisimmin  
arseenikiisussa, joka on metallinkiiltainen mineraali. Pohjavesissä on pintavesiä  
enemmän arseenia ja kallioperässä olevat arseenipitoiset sulfidimineraalit nostavat  
arseenipitoisuutta osassa Suomea, esimerkiksi Keski-Lapin vihreäkivivyöhykkeellä.  
Porakaivojen vesissä arseenipitoisuudet ovat suurimmillaan. Pitoisuudet ovat yleisim-  
min välillä 0,05-20 µg/l. [19.]

Pohjaveden kalsiumin (Ca) lähteitä ovat pääasiassa kalsiumkarbonaatti, kalkkikivi, kal-  
siumsulfaatti, kipsi sekä kalsiitti. Sitä päätyy pohjaveteen sadeveden mukana sekä mi-  
neraalien rapautuessa. Kalsiumia joutuu ympäristöön myös maatalouden lannoitteista  
ja päästöistä. [19, 25.]

Kadmiumia (Cd) vapautuu mustaliuskeiden rapautumisessa pieniä määriä. Mustaliuske  
on pienirakeinen ja liuskeinen kivi, jonka päämineraalit ovat kvartsi, biotiitti, grafiitti ja  
kiisumineraalit. Eniten kadmiumia kuitenkin joutuu ympäristöön kaivos- ja metalliteolli-  
suuden päästöistä sekä jätteitä poltettaessa ja fossiilisista polttoaineista. Kadmium on  
raskasmetalli, joka on karsinogeeninen ja mutageeninen. Suomen pohjavesiin sitä  
pääsee yleensä hyvin vähän, vain noin 0,02-0,5 µg/l. [17, 61.]

Luonnontilaisessa makeassa vedessä on klorideja (Cl) yleensä alle 10 mg/l. Pohjave-  
den kloridipitoisuus on vain pieniltä osin peräisin mineraaliaineksen rapautumisesta.  
Pääasiallisesti kloridit ovat lähtöisin tuulen kuljettamasta merisuolasta. Korkeita kloridi-  
pitoisuuksia esiintyy vanhoilla merenpohja-alueilla sekä tiesuolauksen- ja jätevesien  
vaikutusalueilla. Tällöin kloridipitoisuus voi kohota useisiin satoihin tai jopa tuhansiin  
milligrammoihin litrassa. Teräksen korroosiovaikutukset alkavat voimistua kloridipitoi-  
suuden ylittäessä 10 mg/l. Mitä pehmeämpää vesi on, sitä helpommin kloridipitoinen  
vesi syövyttää terästä. [25, 38.]

Suurin osa pohjaveden hiilidioksidista ( $\text{CO}_2$ ) on peräisin maaperän pintakerroksesta ja pieni osa ilmakehästä. Sitä syntyy pääasiassa orgaanisten aineiden hajotessa maaperässä tai vedessä. Vapaa hiilidioksidi dissosioi eli hajottaa veden molekyyli-rakennetta, jolloin muodostuu bikarbonaatti-ioneja ( $\text{HCO}_3^-$ ) sekä vetyioneja ( $\text{H}^+$ ). Hiilidioksidi on heikko happo, joten se vaikuttaa veden aggressiivisuuteen ja sitä kautta herkästi veden pH-arvoon. Porakaivoissa ja ympäristöhallinnon pohjavesiaineiston vesissä hiilidioksidin mediaanipitoisuudet Suomessa olivat välillä 12-16 mg/l. [25, 39.]

Yleisin kuparia (Cu) sisältävä sulfidimineraali on kuparikiisu. Myös lannoitteet, jätevedet sekä kaatopaikat toimivat kuparin lähteinä. Yleensä kuparia on pohjavedessä hyvin pieniä määriä, noin 2-10  $\mu\text{g/l}$ . [19, 25.]

Pohjaveden fluoridi (F) on pääsääntöisesti peräisin maa- ja kallioperän mineraaliaineksesta. Fluoridia löytyy lähinnä fluoriitista ja apatiitista sekä pieniä määriä sarvivälkkeestä. Fluoridipitoisuus saattaa kasvaa veteen joutuneista kasvinuojeluaineista, desinfiointiaineista sekä lasi- ja kemianteollisuuden jätevesistä. Suomen rapakivialueilla fluoridipitoisuus voi olla useita milligrammoja litrassa, mutta muualla Suomessa pitoisuudet ovat vähäisiä. Pohjavesien fluoridipitoisuus Suomessa on yleensä välillä 0,01-2,0 mg/l. [25.]

Rauta (Fe) on pintakierron runsain raskasmetalli. Sitä voi liueta veteen lähes kaikkialta, koska sitä on niin yleisesti maa- ja kallioperässä. Karkearakenteisissa maalajeissa rautapitoisuus on yleensä n. 0,1 mg/l eli hyvin vähän. Hapettomissa olosuhteissa tiiviiden maakerrosten alla pitoisuus voi kuitenkin olla jopa useita kymmeniä milligrammoja litrassa. Vähähappinen, pelkistävä tila edistää raudan liukenemistä pohjaveteen. [19, 25.]

Kalium (K) on yleisin alkaliryhmän metalli natriumin jälkeen. Sitä on lähinnä vaikealiukoisissa maasälvissä. Kaliumia päätyy vesiin vain vähän ja sen vedessä kulkeutuva määrä riippuu maaliuoksen happamuudesta, alumiinin ja piin pitoisuuksista sekä maan ioninvaihtokykyisten savimineraalien määrästä. Kaliumia on yleensä pohjavesissä vain muutama milligramma litrassa. Jos alueella on paikallisia likaavia tekijöitä, kaliumipitoisuus on korkeampi. [19.]

Magnesium (Mg) on yksi runsaimmista maan vaihtuvista kationeista. Magnesium on ihmisen toiminnan seurauksien lisäksi peräisin dolomiitista, magnesiitista sekä tummien kivien mineraaleista. Pohjavesien magnesiumipitoisuudet ovat yleensä vain muuta-

mia milligrammoja litrassa. Magnesium ilmaisee kalsiumin kanssa pohjaveden kokonaiskovuutta. [19, 25.]

Mangaanin (Mn) geokemia on samankaltainen kuin raudan ja sekin liukenee hapettomissa tiloissa. Sitä on pohjavedessä keskimäärin saman verran kuin rautaa. Pääosa mangaanista maa- ja kallioperässä on piilevänä tummissa päämineraaleissa. [19, 25.]

Natrium (Na) on alkuaine, jota esiintyy yleisesti pohjavesissä. Pitoisuus riippuu mm. meren läheisyydestä, maaperän laadusta, maantiesuolauksesta ja jätevesivaikutuksesta. Osa natriumista on peräisin rannikon savi- ja silttikerrosten reliktisistä meriveden suoloista. Yleensä natriumpitoisuus Suomen pohjavesissä on 1-5 mg/l, mutta vanhoilla merenpohja-alueilla se voi olla 50-100 mg/l. Kallioporakaivosta on mitattu jopa 1480 mg/l natriumpitoisuus. [19, 25.]

Nikkeliä (Ni) on pentlandiitissa ja muissa sulfideissa. Ympäristöön kulkeutuu pieniä määriä nikkeliä myös kaivosten ja metalliteollisuuden päästöistä ja fossiilisista polttoaineista. Pohjavesien nikkeliipitoisuudet ovat lähes aina hyvin pieniä, noin 2 µg/l. [19.]

Pääosa pohjaveden nitraateista ( $\text{NO}_3$ ) on alun perin peräisin ilmakehän kaasuista. Ympäristöön tyyppiyhdisteitä tulee maan tyyppipitoisen orgaanisen aineen hajoamistuotteista, sadevesistä, kuivasta laskeumasta  $\text{NH}_4^+$ -,  $\text{NO}_2^-$  ja  $\text{NO}_3^-$ ioneina sekä maatalouden lannoitteista ja jätevesistä. Nitraattipitoisuudesta voidaan nähdä ihmiskunnan aiheuttamaa pohjavesien happamoitumista ja liikaantumista. Nitraattipitoisuus on hajatapauksia lukuun ottamatta yleensä vain muutamia milligrammoja litrassa. [19.]

Maaperässä, vesissä, kasveissa ja ilmassa on pieniä määriä lyijyä (Pb). Ihmisen toiminta on lisännyt lyijyn määrää elävässä luonnossa suhteellisesti enemmän kuin mitään muuta metallia. Pääosa kallioperässä olevasta lyijystä on vaikeasti rapautuvissa maasälvissä. Pohjaveteen voi joutua lyijyä myös jätelietteistä ja yhdyskuntajätteistä. Se on yksi haitallisimmista ympäristömyrkyistä ja sen liikkuvuus ja myrkyllisyys kasvaa, jos maa happanee. Lyijyä on Suomen pohjavesissä keskimäärin alle 1 µg/l. [19.]

Piin (Si) pitoisuus pohjavedessä on vasta neljänneksi tai viidenneksi suurin, vaikka se onkin hapen jälkeen yleisin alkuaine maan kuoressa. Tämä johtuu siitä, että piitä sisältävät savimateriaalit ovat heikkoliukoisia happamassa ja neutraalissa ympäristössä.

Piin määrä pohjavedessä on yleensä 5-40 mg/l, mutta Suomen pohjavesissä 20 mg/l pitoisuus ylittyy harvoin. [25.]

Sulfaattia ( $\text{SO}_4$ ) on Suomen pohjavesissä keskimäärin n. 10 mg/l eli melko vähän lukuun ottamatta sulfidimalmialueita ja rannikon alunamaita, joissa pitoisuus voi olla jopa satoja milligrammoja litrassa. Pohjaveden sulfaatti on pääosin ihmisen toiminnan seurausta, johtuen ilmateitse tulevasta märkälasseumasta. Veden sulfaattipitoisuutta lisäävät pintaveden käsittelyssä käytetty alumiinisulfaatti sekä meren läheisyys. Sulfaattipitoisuudet korreloivat hyvin sähkönjohtavuuden kanssa. [25, 38.]

Uraani (U) on aktinidiryhmään kuuluva radioaktiivinen metalli, jonka radioaktiivisia hajoamistuotteita ovat radium (Ra) ja radon (Rn). Uraania on yleisesti Suomen pohjavesissä  $<1 \mu\text{g/l}$ , vaikka poikkeuksiakin löytyy. Vuonna 1977 Olkkavaarassa sijaitsevasta porakaivosta mitattiin  $1,15 \text{ mg/l}$  uraanipitoisuus. Vesistöjen radonpitoisuudet voivat olla korkeita myös alueilla, joiden kallioperässä on paljon uraania. [19.]

Sinkki (Zn) on yksi yleisimpiä raskasmetalleja hydrologisessa kierrossa. Sinkkivälke on yleisin sinkkimineraali, mutta sinkkiä on myös muissa sulfideissa. Sitä leviää myös pieninä määrinä ympäristöön metalliteollisuuden, fossiilisten polttoaineiden, maatalouden ja liikenteen aiheuttamana. Lisäksi sitä käytetään korroosionestoaineena. Sinkkiä on usein enemmän pintavedessä kuin pohjavedessä, koska sen kulkeutuminen ja liukeneminen lisääntyvät pH-arvon laskiessa. Maan happamassa pintaosassa liuennut sinkki sitoutuu uudelleen syvemmissä, emäksisemmissä maakerroksissa. [19.]



### 3 Pohjaveden sisältämät haitta-aineet ja niiden aiheuttamat rasitukset teräsbetonirakenteissa

Lukuisista suomalaisen pohjaveden yleisesti sisältämistä aineista, vain pieni osa vaikuttaa merkittävästi teräsbetonirakenteisiin. Kemiallista rasitusta aiheuttavat eniten aggressiiviset ionit  $\text{Cl}^-$  ja  $\text{SO}_4^{2-}$ . Pienemmässä määrin rasitusta aiheuttavat veden koivuuteenkin vaikuttava ioni  $\text{Mg}^{2+}$  sekä pH eli happamuus ja siihen liittyvä alkaliteetti. Muita pienempiä vaikutuksia voi olla veteen liuenneella hiilidioksidilla ja ammoniumilla. Liitteessä 2 on esitetty erilaisia teräsbetonirakenteille haitallisia kemikaaleja sekä niiden aggressiivisuusluokat. [3, 15, 32, 47.]

Taulukko 5. Suolaisten pohjavesien arvoja Suomen porakaivonäytteistä. [17.]

Site of the drilled well	Jurmo	Maxmo	Espoo	Säkylä	Polvijärvi
pH	7.0	7.1	6.4	7.0	6.8
$\text{HCO}_3^-$ mg/l	201	222	54	6.1	35
$\text{Cl}^-$ mg/l	880	1722	4280	1423	1875
$\text{SO}_4^{2-}$ mg/l	150	210	25	35	1.7
$\text{Ca}^{2+}$ mg/l	180	272	1600	220	650
$\text{Mg}^{2+}$ mg/l	51	94	53	36.4	25
DIN value $W_0/W_D$	-6/ 0	-5/ 2	-14/ -5	-12/ -2	-11/ -1

Taulukossa 5 on esitetty suolaisista pohjavesistä mitattuja pitoisuuksia Suomessa. Taulukon alin suure DIN-arvo ilmaisee saksalaisen standardin luokitusta veden korrodoivuudesta. Siinä on otettu huomioon muun muassa veden liike, kloridi- ja sulfaattipitoisuus, pH sekä alkalisuus. Arvon  $W_0$  ollessa  $\leq -8$ , on pistekorroosion riski betoniteräksessä kyseisen luokituksen mukaan korkea. [15.]

#### 3.1 Rasitukset betonissa

Betoni antaa raudoitukselle niin mekaanisen, kuin kemiallisen suojan. Jos tämä suoja-kerros rapautuu haitta-aineiden tai pakkasen vaikutuksesta, teräksen korroosiota edistävien aineiden pääsy raudoituksen läheisyyteen nopeutuu. Myös hiilidioksidin pääsy betoniterästen läheisyyteen edesauttaa teräksen korrodoitumista (ks. luku 3.2.1). [21.]

Betonin kemiallinen vaurioituminen johtuu yleensä sementtikiven eri hydrataatituotteiden kemiallisista reaktioista betonin ulkopuolisten aineiden kanssa. Betoniin voi muodostua hydrataatituotteita paisuttavia tai liuottavia yhdisteitä, jotka vahingoittavat betonirakennetta. Merkittävän kemiallisen korroosion edellytyksenä ovat haitta-aineiden pitoisuuksien suuri määrä sekä riittävä kosteus, sillä aineet tunkeutuvat betoniin yleensä veden mukana. Betonin vaurioitumista nopeuttavat veden liike tai paine sekä betonin ajoittainen kuivuminen. Tavallisimmat betonille vahingolliset aineet voidaan luokitella pitoisuuksiensa perusteella kolmeen eri luokkaan. [3, 21.]

- 1) Sulfaatti on pohjaveden merkittävin haitta-aine betonille. Se reagoi sementin sisältämän trikalsiumaluminaatin ja sen hydrataatituotteiden kanssa tuottaen ettringiittiä. Ettringiitti paisuttaa betonia suuren tilavuutensa vuoksi eikä kovettunut betoni kestä tätä. [3.]
- 2) Hapot liuottavat sementtiä sekä yhdisteitä, jotka syntyvät sementin hydrataatiossa. Mitä alhaisempi veden pH on, sitä aggressiivisempaa ja happamampaa vesi on. Myös kalkkikivi, jota mahdollisesti käytetään betonin kiviaineksena, liukenee happoihin. Hiilidioksidin vesiliuoksella on kyky liuottaa sementin kalsiumyhdisteitä. Samalla tavalla toimii pienissä määrissä pohjavesistä löytyvä ammonium-ioni ( $\text{NH}_4^+$ ). [3.]
- 3) Pohjaveden magnesium-ioni ( $\text{Mg}^{2+}$ ) muuttaa kalsiumyhdisteitä vastaaviksi magnesiumyhdisteiksi ioninvaihdon kautta. Magnesiumyhdisteillä ei ole alkuperäisiä sideaineominaisuuksia, joten magnesium myös itse saostuu betonin huokosiin. [3.]

### 3.1.1 Betonin sulfaattireaktiot

Sulfaatti on rikkihapon suola. Se imeytyy pohjavedestä betonin huokosiin diffuusion avulla ja reagoi sementin kanssa. Sementin sisältämä  $\text{C}_3\text{A}$  eli trikalsiumaluminaatti on hydratoituneena erittäin arka sulfaateille. Niiden reaktiossa syntyy ettringiittiä, jonka tilavuus on jopa noin 330 % lähtötuotteisiin nähden. Tämä aiheuttaa betoniin suuren sisäisen paineen. Kun tämä paine ylittää betonin vetolujuuden, aiheuttaa se rakenteessa halkeilua ja rapautumista. Ettringiittireaktiosta syntyneistä halkeamista rakenteeseen pääsee lisää sulfaatteja, jolloin reaktiot kiihtyvät entisestään. Sulfaatit reagoivat myös

sementtikiven kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kipsiä, joka ettringiitin tavoin laajenee, muttei kuitenkaan yhtä paljon. [11, 23, 34, 42.]



Kuva 7. Sulfaatinkestävyyssuoritus. Vasemmalla on murenneita betonipalkkeja, jotka ovat täysin hajoaneet, kun taas sulfaatinkestävät palkit säilyivät vahingoittumattomina. [11.]

Betonin sulfaatinkestävyys riippuu lähinnä sementin  $C_3A$ -pitoisuudesta eli yleisesti voidaan ajatella, että mitä pienempi sementin valmistuksessa käytetyn klinkkerin  $C_3A$ -pitoisuus on, sitä paremmin rakenne kestää sulfaattirasitusta (kuva 7). Suomessa sementtiä pidetään sulfaatinkestävänä, jos sen sisältämän klinkkerin  $C_3A$ -pitoisuus on enintään 3 %. [11.] Sulfaattireaktioon vaikuttaa myös moni muu asia. Sen voimakkuuteen ja reaktion aiheuttamiin vaurioihin vaikuttavia päätekijöitä ovat:

- Sementin  $C_3A$ -pitoisuus. Pitoisuutta voidaan pienentää esimerkiksi käyttämällä masuunikuonaa sideaineena, sillä se ei sisällä ollenkaan trikalسيومaluminaattia. Kun 70 % sideaineen kokonaismäärästä on masuunikuonaa, voidaan sitä pitää sulfaatinkestävänä sementtinä. Myös pienempi masuunikuonan lisäys vaikuttaa sulfaatinkestävyyteen positiivisesti, jos näin suuri lisäys ei ole mahdollista.
- Betonin vedenläpäisevyys. Tiiveyttä voidaan parantaa esimerkiksi pienentämällä betonin vesi-sideainesuhdetta.

- Pohjaveden sulfaattipitoisuus. Suomen pohjavesissä pitoisuus on keskimäärin noin 10 milligrammaa litrassa (kuva 4, s. 6), mutta rannikkoalueilla arvo voi nousta satoihin milligrammoin litrassa.
- Sulfaattien liikkuvuus pohjavedessä. Veden paineellisuus kasvattaa tunkeutumisenopeutta.
- Muiden pohjavedessä esiintyvien kationeiden laatu, esim.  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  jne. Ne voivat muodostaa sulfaatin kanssa reaktioita, joilla on negatiivisia vaikutuksia sementtiliimalle ja sitä kautta kovettuneelle betonille.
- Pohjaveden pH. Tutkimuksissa on havaittu, että betonin huokosveden pH-arvon ollessa matala, sulfaattireaktion voimakkuus kasvaa joko ettringiitin suuremman laajenemisen tai betonin lujuuden heikkenemisen muodossa.
- Muiden pohjaveteen liuenneiden suolojen, kuten kloridien ja karbonaattien määrä. Kloridit voivat esimerkiksi ehkäistä sulfaattien betonia vaurioittavaa vaikutusta lisäämällä reaktiossa muodostuneiden yhdisteiden liukoisuutta.
- Lämpötila altistumishetkellä. Lämpötilan lasku kiihdyttää sulfaattireaktiota.
- Betonin  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  eli kalsiumhydroksidipitoisuus. Sen on yhdiste, joka mahdollistaa ettringiittireaktion tapahtumisen.
- Betonin valmistuksessa käytetyn veden koostumus.
- Sulfaattiliuoksen mukana syntyneiden reaktiotuotteiden luonne. Myös reaktiotuotteilla voi olla haitallisia vaikutuksia betonille. [32, 34, 42, 62.]

Sulfaattipitoisen veden aggressiivisuutta betonille voidaan yrittää luokitella erilaisin taulukoin. Taulukosta 6 nähdään espanjalaisissa betonirakennemääräyksissä esiintyvä luokittelu sulfaattipitoisuuden perusteella. [34.]

Taulukko 6. Veden ja maaperän sulfaattipitoisuuden potentiaalinen aggressiivisuus betonille. [34.]

Aggressive medium	$(\text{SO}_4^{2-})$ content	Aggressiveness of attack		
		Slight	Medium	High
Water	mg/l	200–600	600–3,000	>3,000
Soil	mg/kg	2,000–3,000	3,000–12,000	>12,000

### 3.1.2 Happojen vaikutukset betonissa

Sementtikivi on emäksistä, joten hapot syövyttävät sementtikiven yhdisteitä. Syöpyessä sementtikiven kalsiumyhdisteet muuttuvat kyseisten happojen kalsiumsuoloiksi, jolloin sementtikiven sisäinen rakenne turmeltuu täysin. Jos happona on vahva epäorgaaninen liuos, syöpyvät kaikki sementtikiven yhdisteet. Jos taas kyseessä on heikko liuos, syöpyy lähinnä sementtikiven kalsiumhydroksidi. Tällaisia heikkoja happoja pohjavedessä voivat olla aggressiivinen CO<sub>2</sub> sekä ammonium-ioni (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>). Aggressiivisella hiilidioksidilla tarkoitetaan ylimääräistä vapaata hiilidioksidia vedessä. [3, 42, 53.]

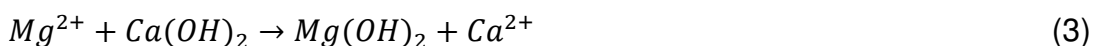
Vaurioitumisnopeuteen vaikuttavat hapon määrä, hapon aggressiivisuus sekä varsinkin muodostuvien suolojen liukenemisnopeus. Suolat liukenevat nopeammin virtaavaan, kuin seisovaan liuokseen. Betonin pintaan syntyy joidenkin happojen vaikutuksesta niin vaikealiukoinen saostumakerros, että korrosio betonissa pysähtyy. Tähän kerrokseen kohdistuva mekaanisesti kuluttava rasitus edistää kemiallista korroosiota. [42.]

Hapot vaikuttavat yleensä aluksi betonin pintaan, josta alkaen sementtikiven rakenne turmeltuu. Betoni voi vaurioitua siihen tunkeutuvasta haposta myös syvemmillä, jos betoni ei ole tarpeeksi tiivistä. Erilaisten sementtilaatujen haponkestävyyksissä ei ole suuria eroja ja usein betonin pinnoittaminen on ainoa keino suojautua aggressiivisilta hapoilta. Suomen pohjavesien kesimääräinen pH on 6,5 eli vesi on melko hapanta. [42.]

### 3.1.3 Betonin magnesiumreaktiot

Pohjaveden magnesium-ioni korvaa kalsiumin kalsium-silikaatti-hydraatissa (C-S-H) eli sementtigelissä muuttaen sen magnesium-silikaatti-hydraatiksi (M-S-H), jolla ei ole alkuperäisiä sideaineominaisuuksia. Tällöin magnesium myös itse saostuu betonin huokosiin. [60.]

Lisäksi magnesium-ioni muuttaa sementtikiven kalsiumyhdisteitä vastaaviksi magnesiumyhdisteiksi ioninvaihdon kautta. Reaktiossa muodostunutta magnesiumyhdistettä kutsutaan brusiitiksi ja reaktion kemiallinen kaava on: [33, 60.]



Magnesiumhydroksidin molaarinen tilavuus on kalsiumhydroksidia suurempi, joten betoniin muodostuu paisumisesta vetojännityksiä. Tämä voi aiheuttaa betonissa halkeilua ja huonontaa sen tiiveyttä. [3, 60.]

### 3.2 Rasitukset betoniteräksissä

Teräksen rauta pyrkii ruostuessaan muuttumaan niiksi yhdisteiksi, joina se luonnossa esiintyy. Tällaisia ovat esimerkiksi oksidit ja hydroksidit. Ruostuminen on sähkökemiallinen tapahtuma eli kemiallisten ainekomponenttien lisäksi myös sähkövaraukset ottavat osaa reaktioihin. Sähkökemiallinen korroosio vaatii potentiaalieron teräksen kahden kohdan välille (anodi ja katodi), sähköä johtavan yhteyden (raudoitustanko itsessään) sekä elektrolyytin (vesi tai korkea ilmankosteus). Korroosio on käytännössä raudan palamista, joten se vaatii aina myös happea. Korroosio vaikuttaa betoniteräkseen pienentämällä sen poikkipinta-alaa ja siten pienentämällä rakenteiden mekaanista kykyä kantaa kuormia. Tämän lisäksi paisuvat korroosiotuotteet aiheuttavat usein ympäröivän betonikerroksen halkeamista ja rapautumista. [21, 26.]

Korroosio teräsbetonirakenteessa aiheutuu betonin oksidikalvon tuhoutumisesta. Oksidikalvon tuhoutuminen voi johtua karbonatisoitumisen aiheuttamasta pH-arvon alenemisesta betonin huokosilmassa tai kloridien tunkeutumisesta betoniin. Teräsbetonirakenteessa voi ilmaantua myös jännityskorroosiota ja vetyhaurautta sen ollessa samanaikaisesti vetojännityksen sekä korroosiota aiheuttavien tekijöiden vaikutusten alaisena. Jännityskorroosiossa teräkseen syntyy halkeamia paikallisten anodireaktioiden vaikutuksesta. Vetyhaurautta muodostuu, kun katodireaktiosta syntyy atomimuodossa olevaa vetyä. Kun vety tunkeutuu teräkseen, aiheuttaa se siinä muuttuessaan suuren sisäisen paineen ja halkeamia. Näitä korroosimuotoja esiintyy varsinkin jännitetyissä teräsbetonirakenteissa. [42.]

Lämpötilan nousulla on korroosiota kiihdyttävä vaikutus. Teräksen korroosionopeuden on hiiliteräksessä havaittu kaksinkertaistuvan lämpötilan noustessa 10 °C. Luonnonveissä kuitenkin hapen diffuusionopeus on yleensä korroosionopeutta rajoittava tekijä. Tilanteessa jossa teräsbetonirakenne on kosketuksissa luonnonveden kanssa, korroosionopeus kaksinkertaistuu lämpötilan noustessa 30 °C. Korroosionopeus kasvaa lämpötilaan nähden varsin suoraviivaisesti, kunnes laskee huomattavasti lämpötilan lähestyessä 80 °C. [15.]

Myös pohjaveden pH vaikuttaa teräksen korroosionopeuteen. Vuonna 1993 tehdyssä tutkimuksessa upotettiin sementtilaastin sisään valettuja raudoitustankoja keinotekoiseen meriveteen. Kun veden pH oli 7, tangoissa oli havaittavissa vain pientä korroosiota. Kun veden pH oli 3,5, korroosio samalla vaikutusajalla oli huomattavaa. [21, 49.]

### 3.2.1 Karbonatisoituminen

Kun sementti reagoi veden kanssa, syntyy mm. kalsiumhydroksidia ja betonin huokosveden pH nousee yli 13. Betonin emäksinen ympäristö suojaa betoniteräksiä korroosiolta. Betoniteräs muodostaa tällaisessa emäksisessä ympäristössä pinnalleen oksidikalvon, joka estää korroosion etenemisen teräksessä. Tätä ilmiötä kutsutaan passivoitumiseksi. Passivoituminen on mahdollista vain, jos betonin huokosissa on riittävästi happea. Tämän takia hapettomissa oloissa karbonatisoituminen on erittäin nopeaa. Korroosion alkaminen on mahdollista, vasta kun betonin emäksinen ympäristö terästen ympärillä neutraloituu karbonatisoitumisen seurauksena pH-arvoon 8,5 tai sen alle. [3, 11, 21, 59.]

Karbonatisoituminen eli neutraloitumisreaktio on seurausta hiilidioksidin tunkeutumisesta betoniin (kuva 8, s. 25). Hiilidioksidi voi tunkeutua vain ilmatäytteisiin huokosiin betonissa, joten karbonatisoituminen on sateelta suojatuissa rakenteissa nopeampaa kuin sateelta suojaamattomissa. Karbonatisoitumisen kemiallisen reaktion yksinkertaistettu kaava eli kalsiumhydroksidin reaktio hiilidioksidin kanssa on:



Karbonatisoituminen on reaktio joka alkaa rakenteen pinnalta ja etenee tasaisena rintamana. Eteneminen on hidastuvaa ja sen nopeuden määrää betonin tiiveys. [3, 21, 41, 42.]

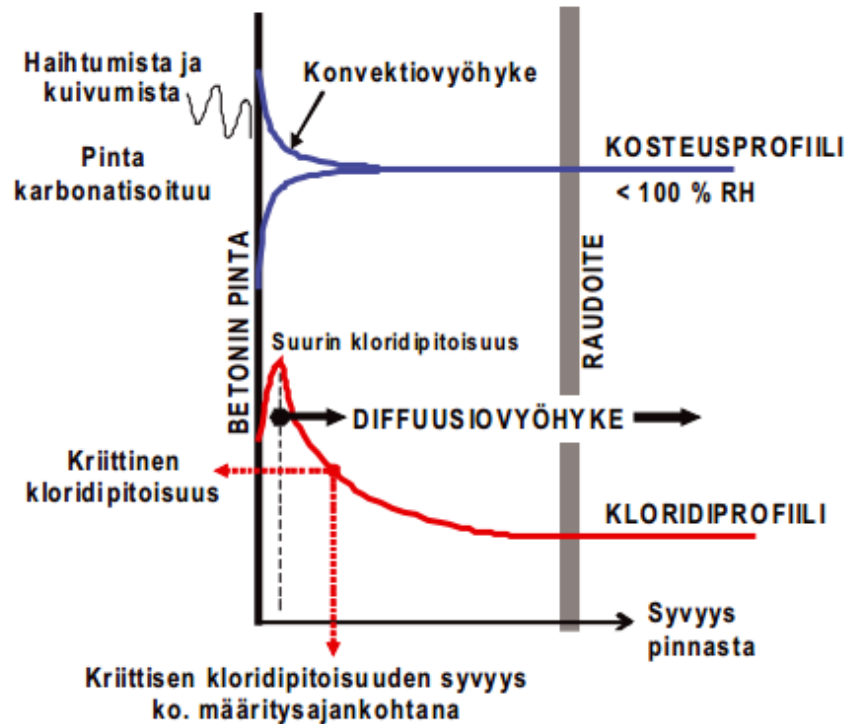


Kuva 8. Fenoliftaleiini reagoi alkalisessa pH >9 ympäristössä muuttaen betonin punaiseksi. Värjäytymätön osa betonista on karbonatisoitunut. [7.]

### 3.2.2 Kloridikorrosio

Kloridien läsnä ollessa teräskorroosio voi alkaa myös emäksisessä ympäristössä eli vaikka teräksen pinnalla olisi suojaava oksidikalvo. Kloridit liikkuvat betonin sisällä yleensä diffuusion eli väkevyyserojen tasoittumisen avulla. Jos betoni pääsee välillä kuivumaan, voivat kloridit myös tunkeutua sen pintaosan kapillaarihuokosiin pohjaveden mukana. Kloridittoman ja kloridipitoisen betonin välille ei muodostu jyrkkää rajaa kuten kuvasta 9 (s. 26) voidaan nähdä. Kriittinen kloridipitoisuus tarkoittaa pitoisuutta, jolla oksidikalvo häviää ja raudotteiden korrosio on mahdollista. Kriittinen kloridipitoisuus on yleensä noin 0,05...0,12 % betonin painosta ja 0,4...0,9 % sementin painosta. [18, 21, 48.]

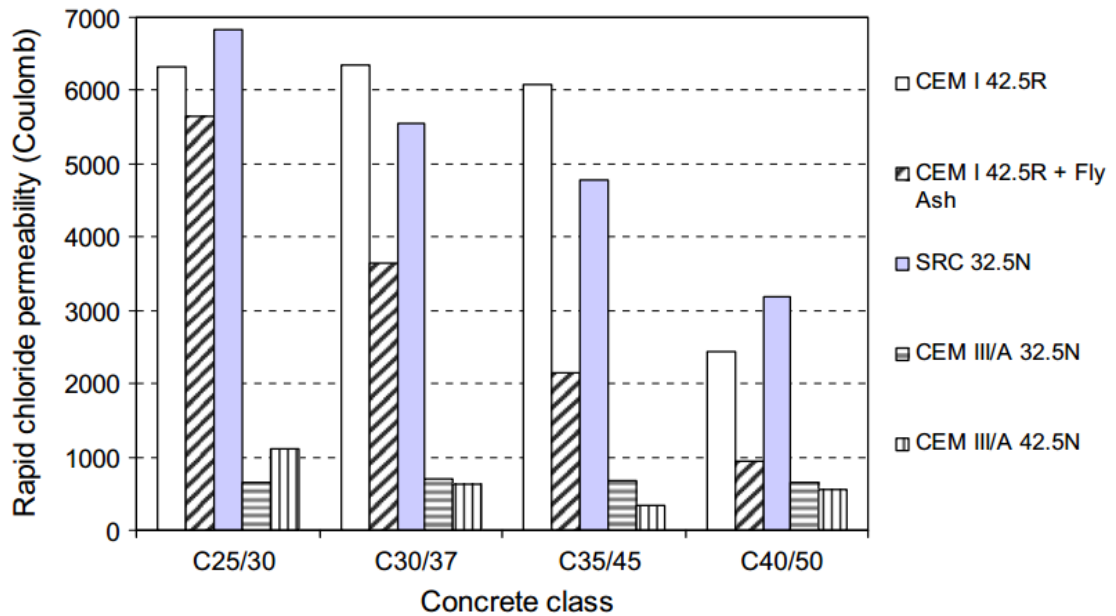




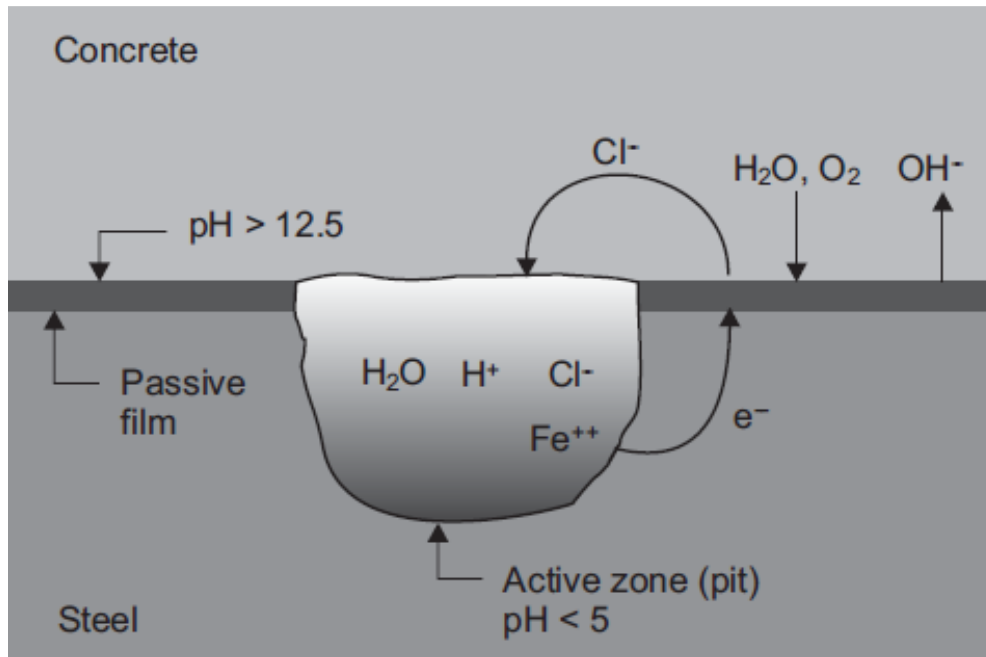
Kuva 9. Ylemmässä kuvaajassa kloridit tunkeutuvat veden mukana betonin pintaosaan. Alemmassa kuvaajassa kloridit etenevät diffuusiolla hitaasti syvemmälle betoniin. [48.]

Kloridien tunkeutumisnopeus betoniin riippuu suurimmaksi osaksi betonin tiiveydestä, mutta myös sementtilaadun kyvystä sitoa klorideja. Sementin kyky sitoa klorideja riippuu sen kalsiumaluminaattipitoisuudesta. Se vaikuttaa kriittiseen kloridipitoisuuteen, sillä vain huokosvedessä olevat kloridit aiheuttavat teräksen korroosiota. Vuonna 2009 tehtiin tutkimus, jossa tutkittiin kloridin tunkeutumisnopeutta käytettäessä erilaisia sementtilaatuja betonissa. Sementtien järjestys kloridien tunkeutumisnopeuden mukaan hitaimmasta nopeimpaan oli masuunikuonasementti, lentotuhkasementti, portlandsementti ja sulfaatinkestävä sementti. Myös silikan käyttäminen seosaineena pienentää tunkeutumisnopeutta, sillä se lisää betonin kemiallista kestävyyttä, tiiveyttä sekä koosapysyvyyttä. Masuunikuonasementti on kuitenkin ylivoimaisesti käyttökelpoisin kloridipitoisessa ympäristössä (taulukko 7, s. 27). [21, 64.]

Taulukko 7. Kloridien tunkeutumismuutoksia erilaisilla sementtilaaduilla. Sementit ylhäältä alaspäin ovat portlandsementti, lentotuhkasementti, sulfaatinkestävä sementti sekä kaksi erilaista masuunikuonasementtiä. [64.]



Teräs syöpyy kloridien vaikutuksesta pistekorrosiona (kuva 10, s. 28). Siinä teräksen syöpyminen keskittyy pienille alueille metallin pinnalla synnyttäen paikallisia kuoppamaisia syvänteitä. Pistesyöpymä pysähtyy yleensä, kun kuopat ovat saavuttaneet tietyn syvyyden ja se etenee harvoin massiivisten rakenteiden läpi. Pistekorrosio on yleinen korrosiomuoto, jos korroosionkestävyys perustuu passiivikerrokseen. Kloridipitoisessa teräsbetonissa kloridi-ionit syrjäyttävät passiivikerroksen vesimolekyylejä. Passiivikerroksessa olevien virheiden kohdalla, normaalisti osaksi passiivikerrosta hydratoituvat metalli-ionit liukenevat ja muodostavat metallikloridikomplekseja, jotka edelleen hajaantuvat. Tällöin passiivikerrokseen jää aukko, josta metallin liukeneminen jatkuu ja pistesyöpyminen alkaa. Olosuhteet syöpymän kohdalla muuttuvat syöpymisen jatkuessa. Kloridi-ionit konsentroituvat syöpymän alueelle ja happamuus alueella lisääntyy. [40.]



Kuva 10. Korkean kloridipitoisuuden aiheuttama pistekorrosio teräsbetonirakenteessa. [8.]

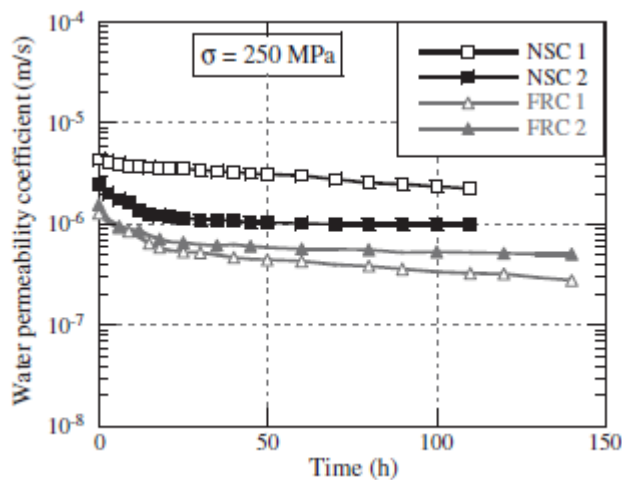
Kloridien tunkeutuminen halkeamassa on todella nopeaa. Betoniterästen kanssa samansuuntaiset halkeamat ovat yleensä haitallisempia korroosion kannalta kuin poikittaiset halkeamat. Kloridikorrosio voi kuitenkin olla vaarallinen myös poikittaisissa halkeamissa, koska se voi edetä paikallisesti erittäin nopeasti ja katkaista yksittäisiä betoniteräksiä. Pienet eli leveydeltään alle 0,3 mm halkeamat eivät lisää raudoituksen korroosiota oleellisesti. Tämä johtuu hapen hitaasta kulkeutumisesta betonipeitteen läpi sekä halkeamien täyttymisestä muun muassa betonista liukenevilla aineilla ja korrosiotuotteilla. [42.]

### 3.3 Paineellisen pohjaveden vaikutukset pohjaveden tunkeutumisnopeuteen

Kemialliset yhdisteet imeytyvät betoniin veden mukana joko diffuusiolla, kapillaarisesti rakenteen kastuessa ja kuivuessa toistuvasti tai rakojen ja halkeamien kautta. Näistä kaikki voivat tapahtua samanaikaisesti, vaikka jokin imeytymismuodoista onkin yleensä vallitseva. Paineellinen pohjavesi kasvattaa veden läpätunkeutuvuutta ja lisää sitä kautta kemiallisten yhdisteiden kulkeutumista syvemmälle diffuusion vaikutuksesta. [9.]

Betonilla on kyky paikata pieniä halkeamia itsestään. Tätä kutsutaan halkeamien itsestävyydelliseksi. Ilmiö tapahtuu kun betonissa on hydratoitumatonta sementtiä ja vettä,

joita kovettuessaan tukkivat jo muodostuneet halkeamat. Lisäksi halkeamia tukkivat betonipartikkelit ja veden epäpuhtaudet. Itsetiivistyminen on aluksi nopeaa, mutta hidastuu ajan myötä. Tiivistyminen on nopeampaa pienissä kuin suurissa halkeamissa. Tutkimuksessa mitattiin halkeamien itsetiivistymistä teräbetonipalkeilla, joiden päälle laitettiin halkeamien muodostumista varten kuorma, joka muodosti betoniteräksiin 250 MPa vetojännityksen. Palkkiin kohdistettiin paineellista vettä. Kuuden päivän kuormituksen jälkeen itsetiivistyminen oli pienentänyt veden tunkeutumista ensimmäiseen päivään nähden 50 % tavallisella betonilla ja 70 % kuiduilla vahvistetulla betonilla (kuva 11). [9, 21.]



Kuva 11. Veden tunkeutumisnopeus kuuden päivän ajalta. NSC = tavallinen betoni, FRC = kuiduilla vahvistettu betoni. [9.]

Veden tunkeutumisnopeudesta betoniin paineellisen veden alaisena on tehty useita tutkimuksia. Vuonna 2014 tehdyssä tutkimuksessa teräsbetonirakenne altistettiin paineelliselle vedelle, jonka natriumkloridipitoisuus (NaCl) oli 5 %. Tutkimuksessa käytettiin viittä erilaista betonityyppiä, joiden koostumukset voidaan nähdä taulukosta 8 (s. 30). [66.]

Taulukko 8. Tutkimuksessa käytettyjen betonityyppien koostumus. Erilaisten ainesten yksikönä on  $\text{kg/m}^3$ . [66.]

Code	Cement	Sand	Gravel	Water	Slag	Fly ash	W/C (W/B)
A	380	579	1269	152	0	0	0.4
B	320	653	1267	160	0	0	0.5
C	304	579	1269	152	38	38	0.4
D	342	579	1269	152	0	38	0.4
E	304	579	1269	152	0	76	0.4

Veden ja kloridien tunkeutumisnopeus mitattiin kolmella eri vedenpaineella 120 ja 240 tunnin ajanjaksojen jälkeen. Tulokset on esitetty taulukossa 9. [66.]

Taulukko 9. Tutkimuksessa saatuja tunkeutumisnopeuksia vedelle sekä klorideille. [66.]

Type of Concrete	Applied Pressure, MPa	Duration of Appl. Pressure, Hours	Water Penetr. Depth, mm	Chloride Penetr. Depth, mm
A	0.3	120	27.52	6.32
		240	36.32	13.3
	0.7	120	39.30	10.86
		240	49.14	21.14
B	0.3	120	35.38	7.6
		240	40.38	15.6
	0.7	120	47.98	12.96
		240	61.54	24.20
C	0.3	120	14.30	2.62
		240	18.36	4.98
	0.7	120	24.34	4.60
		240	31.22	9.46
D	0.3	120	15.66	3.03
		240	20.84	6.06
	0.7	120	29.66	5.38
		240	34.28	10.42
E	0.3	120	21.98	4.26
		240	25.86	7.68
	0.7	120	35.92	8.48
		240	40.66	15.74

Tutkimuksessa saatiin selville, että alle 0,1 MPa paineella ei ole huomattavaa vaikutusta kloridien tunkeutumisnopeuteen. Vasta paineen ylittäessä 0,3 MPa, alkaa tunkeutu-

misnopeus ja kloridien määrä betonissa kasvaa merkittävästi. Veden ja kloridien tunkeutumisenopeuksien ero voidaan selittää sillä, että veteen liuenneita kiintoaineita suodattuu matkalla betoniin, miedomman liuoksen jatkaessa syvemmälle betonin huokosiin. Tämä kuitenkin kiihdyttää kloridien tunkeutumista diffuusiolla, jonka vuoksi ero veden ja kloridien tunkeutumissyvyydessä tasaantuu ajan kuluessa. [66.]

#### 3.4 Korroosion ehkäisy teräsbetonirakenteissa

Helpoin tapa estää korroosio betoniteräksissä on eristää teräkset haitallisilta olosuhteilta. Olennaisin yksittäinen haitta-aineiden kulkeutumista hidastava keino on betonin tiiveys. Betonin ollessa riittävän hapen- tai vedenpitävää eli jos kapillaarihuokoisuus on alhainen, ei raudoituksen korroosiota pääse tapahtumaan. Betonin tiiveys myös hidastaa betonille haitallisten aineiden kuten sulfaatin ja happojen etenemistä. Muita vaihtoehtoja korroosionkestävyyden parantamiseksi ovat betoniterästen pinnoittaminen, erikoisterästen käyttö tai ei-metallisten vahvistusmateriaalien käyttö. [42, 48.]

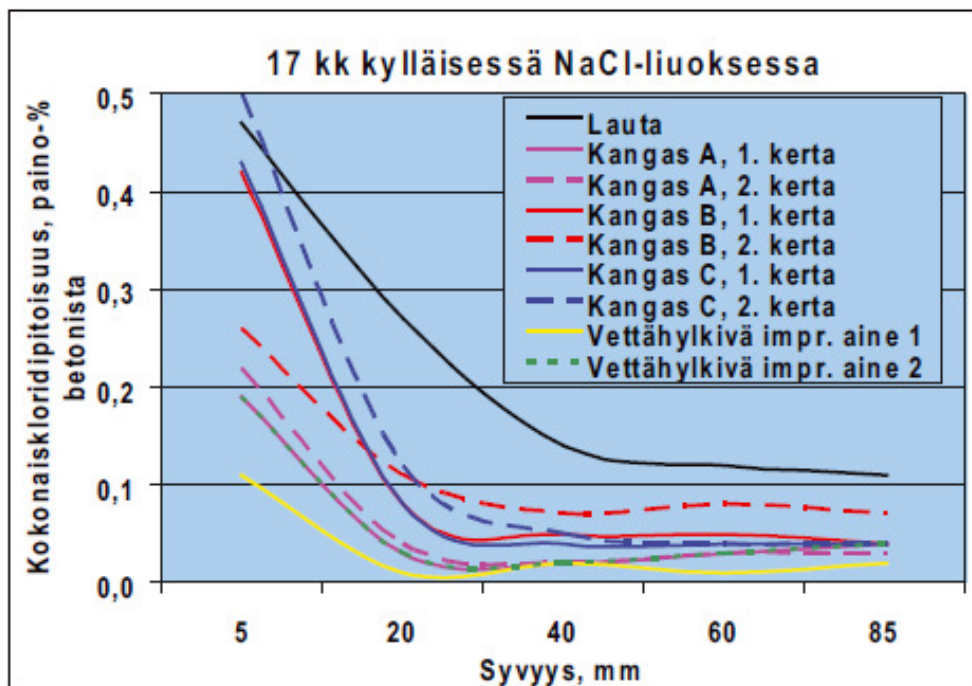
##### 3.4.1 Betonin koostumus

Tärkein ominaisuus tiiveyden parantamiseksi on matala vesi-sideainesuhde. Se nostaa betonin tiiveyttä ja vaikuttaa kapillaarihuokosverkoston määrään ja yhtenäisyyteen. Muita keinoja ovat mm. kiviaineksen rakeisuuden ja muodon säätö sekä rakeisuuskäyrän- ja hienoainemäärän optimointi tiiviisti pakkautuvaksi. Silika lisää betonin tiiveyttä, mutta pienentää myös sementin kykyä sitoa klorideja ja laskee huokosveden emäksisyyttä, jolloin kriittinen kloridipitoisuus laskee. Mikrohalkeilu lisää betonin läpäisevyyttä ja sitä kautta haitta-aineiden tunkeutumista betoniin. Tällaista halkeilua esiintyy varsinkin korkealujuusbetoneissa niiden sisäisen kuivumisen vuoksi. [48.]

##### 3.4.2 Keinot betonivalussa

Kun tuoretta betonia tiivistetään, siirtyy vettä ja ilmaa betonimassasta kohti muottipintaa. Jos muottimateriaali on tiivis, kuten esimerkiksi teräsmuotti, vesi-sementtisuhde betonin pintakerroksessa kasvaa ja siten myös pinnan huokoisuus kasvaa. Jos taas muottimateriaali imee vettä tuoreesta betonista, vesi-sementtisuhde betonin pinnalla laskee ja sen pinnasta tulee tiiviimpää. Tällainen voisi olla esimerkiksi lautamuotti tai mikä tahansa muotti käytettäessä muottikangasta. [48.]

Muottikankaasta on hyötyä pystymuottiin valettaessa, mutta sen kiinnittäminen muotin pintaan vaatii huolellisuutta. Muottikangas toimii kaikkien muottien kanssa samalla periaatteella eräänlaisena salaojituksena. Se poistaa vettä ja ilmaa betonin pinnalta, jolloin sen vesi-sementtisuhde pienenee ja tiiveys paranee. Muottikankaan etuna esimerkiksi pinnoitteisiin nähden on, että betonin pinnasta tulee tiivis eikä se normaalitilanteessa vaadi uudelleen käsittelyä rakenteen käyttöiän aikana. VTT teki tutkimuksen, jossa tutkittiin kloridien tunkeutumista kolmea erilaista muottikangasta käytettäessä verrattuna tavalliseen lautamuottiin. Kaikki muottikankaat olivat Tiehallinnon (nykyisin Liikennevirasto) käyttöönsä hyväksymiä. Tutkimuksessa koekappaleet olivat 17 kuukautta alapinnastaan imeytymässä kyllästyneessä natriumkloridiliuoksessa. Koekappaleiden yläpinta pääsi kuitenkin kuivumaan vapaasti. Tulokset osoittivat, että muottikankaan käyttö betonivalussa hidastaa tehokkaasti haitta-aineiden imeytymistä betonin pinnalta (kuva 12). Lisäksi selvisi, että kaikki muottikankaat toimivat hyvin myös toiseen kertaan käytettäessä. [43, 48.]



Kuva 12. Erilaisia muottimateriaaleja vastaan valettujen betonikappaleiden kloridipitoisuusprofiilit niiden oltua 17 kk NaCl-liuosimetyksessä. Kaksi lautamuotteja vasten valetuista tutkimuspinnosta oli impregnoitu vettähylykivällä impregnointiaineella. [48.]

Myös jälkihoidolla on vaikutusta betonin säilyvyyteen. Jotta kapillaarihuokosten muodostuminen minimoitaisiin, on jälkihoito aloitettava heti valun jälkeen ja betonin pinta pidettävä märkänä mahdollisimman pitkään. Suositeltava aika on vähintään viikko, jon-

ka aikana myös estetään veden haihtuminen betonin pinnasta jälkihoitoaineen tai peitteiden avulla. [48.]

### 3.4.3 Betonin rauditus

Mikäli rakenteen korroosionkestävyyttä ei saavuteta riittävällä betonipeitteellä tai korroosionkestävyydestä halutaan varmistua, voidaan betoniteräkset pinnoittaa, käyttää erikoisteräksiä tai ei-metallisia vahvistusmateriaaleja. Pinnoitteet jaotellaan uhrautuviin ja eristäviin pinnoitteisiin. Uhrautuva pinnoite on metalli, joka syöpyy teräksen sijasta eli toimii uhrautuvana anodina. Tämä johtuu pinnoitemateriaalin korkeammasta elektronegatiivisuudesta rautaan nähden. Eristäviä pinnoitteita ovat muovit, maalit ja metallit. Ne toimivat eristämällä teräksen ympäristöstään sekä hidastamalla kemiallista reaktiota. Taulukossa 11 (s. 36) on esitetty yhdysvaltalaisessa artikkelissa julkaistu vertailu erilaisista betonin vahvistusmenetelmistä. [57.]

Teräksen suojaukseen tarkoitetuista maalityypeistä yleisesti käytetään epoksimaalusta. Se on pinnoitusmenetelmä, jonka tehtävä on erottaa teräs ympäristöstään. Tällöin korroosioon vaadittavat happi, kosteus ja kloridit eivät pääse kosketuksiin teräksen kanssa. Epoksin ongelmana on pinnoitteen suuri rikkoutumisvaara. Pinnoite voi rikkoutua kuljetuksen, säilytyksen tai asentamisen yhteydessä, jolloin raudoite voi pahimmassa tapauksessa menettää kaiken kestäväytensä kloridia kohtaan. Epoksinpinnoitettua terästä voi hitsata, kunhan korjaa maalipinnan hitsauskohdassa jälkeinpäin vastaavalla pinnoitteella. [4, 5.]

Betoniterästen yleisin metallipinnoite on sinkki. Se toimii sekä eristämällä, että uhrautumalla ja sillä saavutetaan korroosionkestävyyden lisäksi mm. korkeaa lämpötilan kestoa. Erilaisia sinkitysmenetelmiä ovat kuumasinkitys, sähkösinkitys, mekaaninen sinkitys, ruiskusinkitys, sherardisointi ja sinkkipölymaalaus, joista kuumasinkitys on varteenotettavin menetelmä betoniteräksille. Siinä puhdistettu teräs upotetaan sulaan, noin 450 asteiseen sinkkiin, jolloin sinkki reagoi teräksen kanssa ja muodostaa pinnoitteelle metallisen sidoksen. Sinkkikerroksen kestoikä on riippuvainen sen kerrospaksuudesta. Liitteessä 4 on esitetty standardin EN ISO 14713-1 mukaiset syövyttävyysluokat ympäristölle ja sinkkikerrosten vähimmäispaksuudet näissä luokissa. Kuumasinkityksen rajoituksena on sinkitysaltaiden koko, mutta menetelmä on hyvä vaihtoehto kalliin ruostumattoman teräksen tilalle. Kuumasinkittyä betoniterästä voidaan hitsata



kaikilla tavanomaisilla menetelmillä, kunhan hitsauskohtien sinkityskerros korjataan jälkeensä paikamaalauksella. [4, 57.]

Ruostumattomat teräkset ovat SFS-EN 10020 standardin mukaan seostettuja erikoisteräksiä, joissa on alle 1,2 % hiiltä ja vähintään 10,5 % kromia. Ruostumattomassa teräksessä kromi reagoi hapen kanssa ja muodostaa suojaavan kalvon teräksen pinnalle. Suojakalvon muodostumista metallipinnalle kutsutaan passivoitumiseksi. Passiivikalvon voivat tuhota rikkiyhdisteet, rikkivety tai halidit eli halogeenin yhdisteet, jossa halogeeni on elektronegatiivisempina osapuolena. Ruostumaton teräs ei siis ole täysin vastustuskykyinen ruostumista vastaan, vaikka sen nimestä niin voisikin päätellä. Se on kuitenkin erittäin paljon tavallista terästä kestävämpi korroosiota vastaan. Ruostumatonta terästä voidaan myös leikata ja hitsata tavanomaisin menetelmin, mutta sen hinta on korkea moneen muuhun korroosionestomenetelmään verrattuna (taulukko 10). [4.]

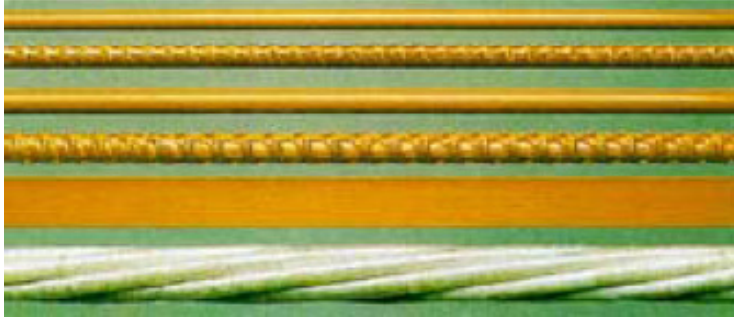
Ruostumattomasta teräksestä on olemassa muunnelma, jota sanotaan kansankielellä ”haponkestäväksi” teräkseksi. Se on ruostumaton teräs, jonka sekaan on lisätty muiden seosaineiden lisäksi myös molybdeeniä. Molybdeeni parantaa teräksen pistesyöpymiskestävyyttä kloridipitoisessa ympäristössä. Haponkestävällä teräksellä on myös hyvät muovaus- ja hitsausominaisuudet, mutta sen kilohinta on tavallista ruostumatonta terästä korkeampi. [4.]

Taulukko 10. Erilaisten raudoitustyyppien hintavertailu tavalliseen hiiliteräkseen verrattuna. Tulokset ovat suuntaa-antavia arvioita. [5, 10, 24.]

Raudoitustyyppi	Suhdeluku
Tavallinen hiiliteräs	1
Epoksinnoitettu teräs	1,25 - 1,5
Kuumasinkitty teräs	1,5
Ruostumaton teräs	4,5
Haponkestävä teräs	5,5

Raudoitusmateriaalina voi teräksen sijasta olla myös kuitulujitteinen polymeeri eli FRP (*Fiber Reinforced Polymer*). Se on komposiittimateriaali, joka valmistetaan kuiduista, hartsista ja mahdollisista lisäaineista. Kuidut ovat yleensä joko hiili- tai lasikuituja, mutta

myös aramidikuituja ja erilaisia kuituyhdistelmiä on käytetty. Hartsit toimii sideaineena kuiduille ja siirtää rasituksia niiden välillä. Lisäaineina voidaan käyttää erilaisia epäorgaanisia materiaaleja. Betonirakenteissa raudotteiden asemasta käytetään ei-metallisista tuotteista yleensä tankoja tai punoksia (kuva 13). Niiden hyötyjä teräkseen nähden ovat mm. ruostumattomuus, pienempi vaadittava betonipeitekerros, 1,5-2,0 kertaa suurempi vetolujuus sekä moninkertaisesti pienempi paino. Ruisku- ja kuitubetonissa käytetään yleensä joko teräksestä tai polymeereistä valmistettuja kuituja. [46.]



Kuva 13. Erilaisia FRP-tankoja ja punoksia. [46.]

Polymeeriraudotteet ovat erittäin kestäviä, mutta niitä pitää kuitenkin käsitellä huolellisesti. Terävällä esineellä tehdyt viillot laskevat niiden kestävyyttä. Myös auringonvalon ultraviolettisäteet voi aiheuttaa niihin pintavahinkoa eli ulkona säilytettäessä ne täytyy peittää läpikuultamattomalla peitteellä. Polymeeriraudote on tavallista terästä kalliimpaa, mutta ruostumatonta terästä halvempaa. Erilaisista polymeeriraudotteista lasikuitulujitteinen on huomattavasti hiilikuitulujitteista halvempaa. Polymeeriraudotteita ei voi hitsata, mutta niitä voi katkaista kulmahiomakoneella tai metallisahalla. [46.]

Taulukko 11. Yhdysvaltalaisessa artikkelissa julkaistu vertailutaulukko erilaisista betonin vahvistusmenetelmistä. GFRP = lasikuitulujitteinen polymeerirautoite. [5.]

Type of rebar	Times more corrosion resistant than black rebar	Scratch and chip resistance	Bending	Cutting	Welding	Chloride threshold
Epoxy-coated ■ Damage level 0.5% ■ Damage level 0.004%	150 to 1,175 69 to 1,762	Easily damaged, requiring field repairs	Allowed but can damage epoxy coating	Allowed; coating of cut end required	Allowed; coating of weld required	Same as black rebar Very high
Galvanized (zinc-coated)	38	Very tough; hard to damage	Allowed but may weaken coating	Allowed; coating of cut end required	Allowed; coating of weld required	4 to 10 times higher than black steel
GFRP	Won't corrode	Fairly tough; difficult to damage	Field bends not allowed	Allowed; sealing of cut end may be required	Nonweldable	Immune to chloride attack
Solid stainless steel	800 to 1,500	Not an issue	Allowed	Allowed	Allowed; special welding procedures apply	15 to 24 times higher than black rebar
Stainless-steel-clad	Same as solid stainless-steel rebar	Very tough; nearly impossible to damage	Allowed	Allowed; coating of cut end may be required	Allowed; special welding procedures apply	Same as solid stainless-steel rebar <sup>3</sup>

#### 3.4.4 Muita keinoja säilyvyyden parantamiseksi

Vettähyлкivien impregnointiaineiden toiminta perustuu siihen, että ne rajoittavat veden ja sen mukana kulkeutuvien suolojen tunkeutumista betoniin. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että betonin huokosten seinämät peitetään hyvin ohuella vettähyлкivällä kerroksella, jollaisia ovat esimerkiksi silikonihartsit ja siloksaanit. Vettähyлкivästä impregnoinnista ei ole mitään hyötyä, jos betonin pinta on niin tiivis, ettei aine tunkeudu riittävän syväälle. Tällainen tilanne voi olla esimerkiksi muottikangasta käytettäessä. Pitää myös muistaa, että hiilidioksidin pääsy rakenteeseen helpottuu, jos betonin huokokset eivät ole vesitäytteisiä. Tämä tarkoittaa nopeampaa karbonatisoitumista. [29.]

Tavalliset impregnointiaineet suojaavat betonia muodostamalla ohuen epäjatkuvan kalvon sen pinnalle tai reagoimalla muilla tavoin sen kanssa. Tällaisia aineita ovat esimerkiksi silikaatit, epoksit, polyuretaanit sekä akryylit. Akryylit muodostavat ohuen kalvon, kovettavat betonin pintaa ja estävät tällä tavoin tehokkaasti veden tunkeutumista

rakenteeseen. Silikaatit reagoivat sementin hydrataatiotuotteiden kanssa muodostaen lujia, liukenemattomia yhdisteitä, parantaen betonipinnan tiiveyttä. Aineet eivät yleensä estä karbonatisoitumista tai aiheuta uudelleenalkalisoitumista. [29.]

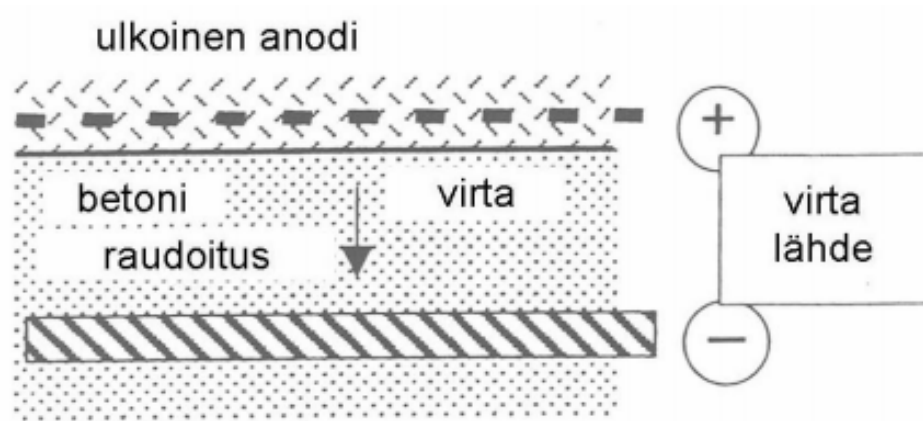
Betonin pinnoitteita käyttämällä voidaan estää karbonatisoitumista sekä veden imeytymistä betoniin ja hidastaa sitä kautta esimerkiksi raudoituksen korroosiota. Hyvin tehty, joustava pinnoite silottaa pienet halkeamat, estää hiilidioksidin tunkeutumisen ja suojaa rakennetta vähintään 10 vuoden ajan, jonka jälkeen se täytyy uusida. Sillä voi myös vaikuttaa rakenteen ulkonäköön. Pinnoitteita tehdään mm. polymeereistä ja akryylihartseista. Taulukossa 12 on esitetty erilaisten suoja-aineiden ominaisuuksia. [29.]

Taulukko 12. Betonin suoja-aineiden ominaisuuksia Liikenneviraston vaatimukset täyttävillä aineilla. [29.]

Ominaisuus	Vettähykkivät impregnointiaineet	Impregnointiaineet	Pinnoitteet
Kalvon muodostuminen pintaan	eivät muodosta kalvoa	useimmat muodostavat epäjatkuvan kalvon	muodostavat kalvon
Ainepaksuus	-	-	ohuet pinnoitteet $\geq 0,3$ mm paksut pinnoitteet $\geq 2,0$ mm
Vedenimu	vähentää	vähentää	vähentää
Vesihöyrynläpäisevyys	ei vaikutusta	vähentää	vähentää
Hiilidioksidinläpäisevyys	mahdollisesti lisää	vähentää	vähentää voimakkaasti
Pakkasen- ja pak- kassuolakestävyyden parantaminen	parantaa	parantaa	parantaa voimakkaasti
Vedessä olevien vahingollisten aineiden tunkeutumisen vähentäminen	vähentää mahdollisesti	vähentää mahdollisesti	vähentää
Vaikutus ulkonäköön	ei	mahdollinen	vaikuttaa
Betonin kosteus suoja- aine käsittelyä tehtäessä	kuiva	kuiva	kuiva tai korkeintaan kosteaa
Halkeamansilloitus	ei	ei	riippuu pinnoitteesta

Raudoituksen korroosiota pystytään ehkäisemään myös sähkökemiallisilla suojausmenetelmillä (kuva 14, s. 38), joita ovat katodinen suojaus, kloridien poisto ja uudelleenalkalointi. Katodinen suojaus on korroosionestomenetelmä, jossa raudoituksen potentiaali siirretään tarpeeksi paljon negatiiviseen suuntaan eli immuunialueelle. Raudoitus toimii tällöin katodina, eikä siinä tapahdu korroosiota. Katodinen suojaus voidaan tehdä käyttämällä ulkopuolista virtalähdettä tai uhrautuvia anodeja. Uhrautuvalla anodilla tarkoitetaan epäjalosta metallista valmistettua elektrodia, joka syöpyy itse suojatessaan betoniterästä. Uusille rakenteille voidaan myös tehdä ns. katodinen estäminen, jolla estetään korroosion käynnistyminen. Se on halvempi toteuttaa, sillä se on paljon hel-

pompaa kuin käynnissä olevan korroosion pysäyttäminen. Suomessa näitä suojausmenetelmiä käytetään yleensä harvoin. Menetelmiä käytetään esimerkiksi vanhojen siltojen korjauksissa, joissa betoni on huonolaatuista ja ympäristön kloridipitoisuus suuri tai uudisrakenteissa, joiden ympäristössä on huomattavan suuri kloridipitoisuus. [44.]



Kuva 14. Sähkökemiallisten suojausmenetelmien rakenteen periaatekuva. [29.]

Uudelleenalkaloinnin ja kloridien poiston periaatteina on palauttaa raudoitusta suojaavaan betoniin sen alkuperäinen passiivinen ympäristö. Menetelmissä käytetään ulkopuolista virtaa määrätty aika, jonka jälkeen anodisysteemi poistetaan rakenteesta. Menetelmästä riippuen systeemi joko poistaa kloridit tai palauttaa alkalisuuden, jonka jälkeen betonipeite huolehtii taas raudoituksen suojaamisesta. [29.]

## 4 Maanalaisten teräsbetonirakenteiden säilyvyysuunnittelu

### 4.1 Suunnittelunormit ja ohjeet

Ympäristöministeri allekirjoitti uuden asetuksen kantavista rakenteista 17.6.2014 ja se tuli voimaan 1.9.2014. Asetus oli osana rakentamismääräyskokoelman uudistusta, jonka tavoitteena oli kitkeä kansallisten standardien ristiriitaisuudet EN-standardeihin verrattuna. [6, 65.]

Ympäristöministeriön asetuksen käyttöikäsuunnittelua koskevassa kohdassa sanotaan:

#### 8 § Suunniteltu käyttöikä

Suunnittelijan on määritettävä rakenteen suunniteltu käyttöikä, joka on suunnittelussa oletettu ajanjakso, jolloin rakennetta tai sen osaa käytetään suunniteltuun tarkoitukseensa ennakoitun kunnossapitotoimenpitein, ja ympäristö-olosuhteita kuvaavat rasitusluokat. Rakennushankkeeseen ryhtyvän on huolehdittava, että rakenne suunnitellaan ja toteutetaan siten, että rakenne ja sen valmistamiseen käytetyt rakennusaineet säilyttävät suunnitelmissa edellytetyt ominaisuutensa koko suunnitellun käyttöiän ajan. [6.]

Rakentamismääräysten uudistamisen yhteydessä luovuttiin kansallisten kantavien rakenteiden mitoitusta koskevien suunnittelumääräysten- ja ohjeiden ylläpitämisestä. Samana päivämääränä kumottiin yhdeksän rakentamismääräyskokoelman B-osaa, joissa oli rakenteiden suunnittelua koskevia määräyksiä ja ohjeita. B9 eli betoniharkkorakenteiden ohjeet on ainoa nykypäivänä voimassa oleva B-osan kokoelma. Rakenteiden yksityiskohtaisessa suunnittelussa tullaan jatkossa käyttämään hyväksyttävänä ratkaisuna eurokoodia yhdessä ympäristöministeriön vahvistamien kansallisten liitteiden kanssa. [65.]

Eurokoodi EN 1992-1-1 mukaan suunnittelijan täytyy ryhtyä tarpeellisiin toimenpiteisiin jokaisen rakenneosan suojaamiseksi ympäristörasituksia vastaan, jotta rakenteen suunniteltu käyttöikä saavutetaan. [55.]

Suomen betoniyhdistys on laatinut suunnitteluohjeita eurokoodin ja rakentamismääräyskokoelmien määräysten pohjalta helpottamaan suunnittelutyötä. Kirjoitushetkellä kattavimmiksi betonin käyttöikänsä ja laatuvaatimuksiin liittyviksi kirjoiksi osoittautuivat Betoninormit 2012 (by 50) ja Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu 2007 (by 51).

## 4.2 Rakennesuunnittelijan tehtävät käyttöikäsuunnittelussa

Tärkein suunnittelijan tehtävä käyttöikäsuunnittelussa on valita rakenteelle rasitusluokka sekä suunniteltu käyttöikä vallitsevien olosuhteiden ja vaatimusten perusteella. Loput vaatimukset löytyvät näiden avulla normien taulukoista. Suunnittelijan tehtäviä käyttöikäsuunnittelussa on määrittää rakenteelle:

- Suunnittelukäyttöikä
- Rasitusluokka
- Lujuusluokka
- Betonipeitteen nimellisarvo ja sen sallittu mittapoikkeama
- Halkeamien enimmäisleveys
- Kiviaineksen ylänimellisraja (raudoituksen mukaan)
- Vesi-sementtisuhde vähintään rasitusluokissa XD ja XS
- Erityisen vaativissa kohteissa sementtityyppi yhdessä betonin valmistajan kanssa

Betonin valmistajan vastuulle jää pakkasenkestävyysvaatimusten varmistus sekä yleensä sementtityypin määrittäminen rasitusluokan mukaan. [3.]

## 4.3 Suunnittelukäyttöikä

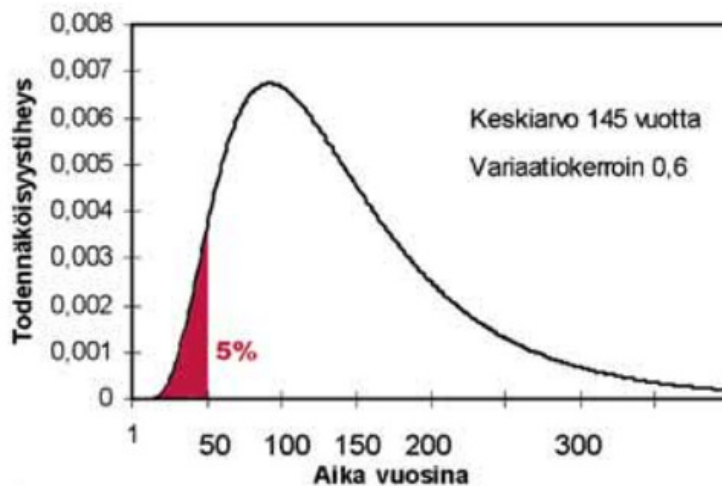
Säilyvyys- eli käyttöikäsuunnittelu alkaa sillä, että rakennuksen tilaaja määrittää käyttö-tarkoituksen perusteella sille tavoiteikänsä. Rakennesuunnittelija määrittelee tämän tavoiteikänsä perusteella rakennuksen suunnittelukäyttöikänsä (taulukko 13, s. 41). Tämän jälkeen suunnittelija määrittää tärkeimmille rakennusosille suunnittelukäyttöiät, koska käyttöikävaatimuksen ei tarvitse olla yhtä pitkä jokaisessa rakennusosassa. Esimerkiksi perustusten suunnittelukäyttöikäksi on valittava vähintään rakennuksen suunnittelukäyttöikä, kun taas helposti vaihdettavan tai korjattavan rakennusosan suunnittelukäyttöikä voi olla selvästi tätä pienempi. [3.]

Taulukko 13. Viitteellisiä suunnittelukäyttöikä EN 1990 mukaisesti. [50.]

Suunnitellun käyttöiän luokka	Viitteellinen suunniteltu käyttöikä (vuosia)	Esimerkkejä
1	10	Tilapäisrakenteet <sup>(1)</sup>
2	10...25	Vaihdeavissa olevat rakenteen osat, esim. nosturiratapalkit, laakerit
3	15...30	Maatalous- ja vastaavat rakennukset
4	50	Talonrakennukset ja muut tavanomaiset rakenteet
5	100	Monumentaaliset rakennukset, sillat ja muut maa- ja vesirakennuskohteet

<sup>(1)</sup> Sellaisia rakenteita tai niiden osia, jotka voidaan purkaa uudelleen käytettäväksi, ei pidetä tilapäisinä.

Suunnittelukäyttöikä tarkoittaa ajanjaksoa, jolla 95 % varmuustasolla betonirakenteen ominaisuudet säilyvät vaadittavalla tasolla, edellyttäen että rakennetta pidetään asianmukaisesti kunnossa (kuva 15). Toisin sanoen rakenne pysyy käyttökuntoisena todennäköisesti paljon suunniteltua käyttöikää pidempään. [3.]



Kuva 15. Käyttöiän jakautumiskäyrän esimerkki, kun suunnittelukäyttöikä on 50 vuotta. [3.]

Jos suunnittelukäyttöikä on 50 tai 100 vuotta, voidaan rakenteen määrittelyssä käyttää taulukkomitoitusmenetelmää. Tätä menetelmää käytetään tässä opinnäytetyössä, koska useimmat rakenteet kuuluvat näihin käyttöikiin. Taulukkomitoituksessa valitaan erilaisia suunnitteluparametreja taulukoissa esitettyjen vähimmäis- ja enimmäisarvojen perusteella. Laskennallisella menetelmällä on mahdollista suunnitella rakenteen käyttöiksi 50...200 vuotta. [32.]



#### 4.4 Rasitusluokka

Rasitusluokan (taulukko 14) valinta käyttötarkoituksen perusteella rakennusosittain on tärkeää kustannusten kannalta. Ylimoitettut betonirakenteet ovat kalliita ja mahdollisesti vaikea valmistaa. Esimerkiksi liian suuri raekoko voi tehdä työstämisestä vaikeaa ja sitä kautta aiheuttaa mikrohalkeilua huonon tiiveyden takia. Liian pieni vesi-sementtisuhde voi tehdä betonista niin paksua, ettei se mene kunnolla betonipumpun läpi tai estää ruiskubetonin ruiskuttamisen. Alimitoitettut rakenteet voivat olla turvallisuusriski. [3.]

Taulukko 14. Betonirakenteiden rasitusluokat EN 206 mukaisesti. [55.]

Luokan merkintä	Ympäristön kuvaus	Opastavia esimerkkejä paikoista, joissa rasitusluokkia voi esiintyä
<b>1 Ei korroosion tai rasituksen riskiä</b>		
X0	Raudoittamaton tai metalliosia sisältämätön betoni: Kaikkiin ympäristöihin lukuun ottamatta niitä, joissa esiintyy jäädytys-sulatus- tai kulutusrasitusta tai kemiallista rasitusta Raudoitettu tai metallia sisältävä betoni: hyvin kuiva	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on hyvin alhainen
<b>2 Karbonatisoitumisen vaikutuksista aiheutuva korrosio</b>		
XC1	Kuiva tai pysyvästi märkä	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on alhainen Pysyvästi vedenalainen betoni
XC2	Märkä, harvoin kuiva	Betonipinnat, jotka ovat pitkään kosketuksissa veden kanssa Usein perustukset
XC3	Kohtalaisen kostea	Betoni sisätiloissa, joissa ilman kosteus on kohtalainen tai suuri Ulkona oleva sateelta suojattu betoni
XC4	Märkä ja kuiva vaihtelevat	Betonipinnat, jotka ovat kosketuksissa veden kanssa, mutta eivät kuulu rasitusluokkaan XC2
<b>3 Muun kuin meriveden kloridien aiheuttama korrosio</b>		
XD1	Kohtalaisen kostea	Betonipinnat, jotka ovat alttiina ilman sisältämille klorideille
XD2	Märkä, harvoin kuiva	Uima-altaat Betoni on alttiina kloridipitoisille teollisuusvesille
XD3	Märkä ja kuiva vaihtelevat	Sillan osat, jotka ovat alttiina kloridipitoisille roiskeille Jalkakäytävät Paikoitustalojen laatat
<b>4 Meriveden kloridien aiheuttama korrosio</b>		
XS1	Kosketuksissa ilman kufettaman suolan kanssa, mutta ei suorassa kosketuksissa meriveteen	Lähellä rannikkoa tai rannikolla olevat rakenteet
XS2	Pysyvästi veden alla	Merirakenteiden osat
XS3	Vuoroveden ja roiskeen vyöhykkeellä	Merirakenteiden osat
<b>5 Jäädytys-sulatusrasitus jäänsulatusaineilla tai ilman niitä</b>		
XF1	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit pystysuorat betonipinnat
XF2	Kohtalainen vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet	Tierakenteiden pystysuorat betonipinnat, jotka ovat alttiina jäätymiselle ja ilman kufettamille jäänsulatusaineille
XF3	Suuri vedellä kyllästyminen ilman jäänsulatusaineita	Sateelle ja jäätymiselle alttiit vaakasuorat betonipinnat
XF4	Suuri vedellä kyllästyminen ja jäänsulatusaineet tai merivesi	Jäänsulatusaineille alttiit teiden ja siltojen kannet Suoralle jäänsulatusaineroiskeelle ja jäätymiselle alttiit betonipinnat Roiskevyöhykkeellä olevat jäätymiselle alttiit merirakenteet
<b>6 Kemiallinen rasitus</b>		
XA1	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen vähän aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi
XA2	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen kohtalaisen aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi
XA3	Standardin EN 206-1 taulukon 2 mukainen hyvin aggressiivinen kemiallinen ympäristö	Luonnon maaperä ja pohjavesi

Rakenne voi kuulua samanaikaisesti useampaan rasisitusluokkaan. Jos pohjavesi sisältää kloridia ja on mahdollisesti kosketuksissa betonirakenteen kanssa, valitaan jokin XD-luokista. Eurokoodi ei anna veden kloridipitoisuudelle mitään raja-arvoja. [2, 32.]

#### 4.4.1 XA-rasisitusluokat

Jos betoniin kohdistuu kemiallista rasisitusta pohjavedestä, katsotaan alla olevasta taulukosta 15 mihin XA-rasisitusluokista se kuuluu.

Taulukko 15. Pohjaveden aiheuttaman kemiallisen rasisituksen rasisitusluokkien raja-arvot EN 206 mukaisesti. Luokittelu perustuu olettamuksiin, että veden lämpötila on 5...25 °C ja virtausnopeus erittäin hidas. Yksittäisen kemiallisen ominaisuuden suurimman rasisituksen arvo määrittää luokan ja jos kaksi aggressiivista ominaisuutta johtaa samaan luokkaan, ympäristö luokitellaan seuraavaan korkeampaan luokkaan. [52.]

Kemiallinen ominaisuus	Referenssitestausmenetelmä	XA1	XA2	XA3
<b>Pohjavesi</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/l	EN 196-2	≥ 200 ja ≤ 600	> 600 ja ≤ 3 000	> 3 000 ja ≤ 6 000
pH	ISO 4316	≤ 6,5 ja ≥ 5,5	< 5,5 ja ≥ 4,5	< 4,5 ja ≥ 4,0
CO <sub>2</sub> mg/l aggressiivinen	EN 13577	≥ 15 ja ≤ 40	> 40 ja ≤ 100	> 100 kyllästymiseen asti
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> mg/l	ISO 7150-1	≥ 15 ja ≤ 30	> 30 ja ≤ 60	> 60 ja ≤ 100
Mg <sup>2+</sup> mg/l	EN ISO 7980	≥ 300 ja ≤ 1 000	> 1 000 ja ≤ 3 000	> 3 000 kyllästymiseen asti
<b>Maaperä</b>				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> mg/kg <sup>a)</sup> kokonaismäärä	EN 196-2 <sup>b)</sup>	≥ 2 000 ja ≤ 3 000 <sup>c)</sup>	> 3 000 <sup>c)</sup> ja ≤ 12 000	> 12 000 ja ≤ 24 000
Happamuus Baumann Gullyn mukaisesti ml/kg	prEN 16502	> 200	Ei esiinny käytännössä	
<p>a) Savimaat joiden läpäisevyys on pienempi kuin 10<sup>-5</sup> m/s voidaan luokitella alempaan luokkaan.</p> <p>b) Testausmenetelmä periaate on uuttaa SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> suolahapolla. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää vesiuuttoa, jos betonin käyttöpaikalla on siitä kokemusta.</p> <p>c) Raja-arvo 3 000 mg/kg lasketaan arvoon 2 000 mg/kg, jos betonin toistuva kuivuminen ja kastuminen tai kapillaarinen kastuminen saattavat aiheuttaa betonin sulfaatti-ionien kasaantumisriskin.</p>				

Tyypiyhdisteitä on Suomen kallioperässä hyvin vähän, joten ammoniumpitoisuus (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) harvoin ylittää taulukossa esitettyjä arvoja. Aggressiivinen CO<sub>2</sub> tarkoittaa ylimääräistä vapaata hiilidioksidia vedessä, jolla on kyky liuottaa sementin kalsiumyhdisteitä betonissa. [53, 20.]

On tarpeen suorittaa erityisselvitys silloin, jos rakenne on saastuneessa maassa, muiden kuin taulukossa olevien aggressiivisten kemikaalien läsnä ollessa, suurella nopeudella virtaavassa vedessä tai jos pitoisuudet ovat korkeampia, kuin taulukossa esiintyvät maksimiarvot. Selvitys pitää tehdä, jotta saadaan selville oikeat ympäristöolosuhteet betonin ominaisuuksien määrittämiseksi. [32.]

#### 4.5 Betonin koostumus

##### 4.5.1 Lujuusluokka

Lujuusluokka täytyy joskus asettaa korkeammaksi, kuin rakennesuunnittelu edellyttäisi. Tämä johtuu siitä, että hyvin säilyvän betonin tarvitsee olla riittävän lujaa, jotta se kestäisi siihen kohdistuvat ympäristörasitukset. Taulukosta 16 nähdään betonin vähimmäislujuusluokkien ja rasitusluokkien välinen yhteys.

Taulukko 16. Ohjeelliset minimilujuusluokat EN 1992-1-1 mukaisesti. [55.]

Taulukon 4.1 mukaiset rasitusluokat										
Korroosio										
	Karbonatisoitumisen vaikutuksista aiheutuva korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio			Meriveden kloridien aiheuttama korroosio		
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3
<b>[AC&gt;</b> Ohjeellinen minimilujuusluokka <b>&lt;AC]</b>	C20/25	C25/30	C30/37		C30/37			C35/45	C30/37	C35/45
Betonin vaurioituminen										
	Ei riskiä	Jäädytys-sulatusrasitus			Kemiallinen rasitus					
	X0	XF1	XF2	XF3	XA1	XA2	XA3			
<b>[AC&gt;</b> Ohjeellinen minimilujuusluokka <b>&lt;AC]</b>	C12/15	C30/37	C25/30	C30/37	C30/37			C35/45		

Liikennevirasto on julkaissut siltojen suunnittelun avuksi eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2, jossa on annettu vähimmäislujuusluokat XA-rasitusluokille (taulukko 17, s. 45).

Taulukko 17. Vähimmäislujuusluokat XA-rasitusluokille Liikenneviraston siltarakenteille tekemän eurokoodin soveltamisohjeen mukaisesti. [30.]

	<b>XA1</b>	<b>XA2</b>	<b>XA3</b>
<b>Väh. lujuusluokka</b>	<b>C30/37</b>	<b>C35/45</b>	<b>C40/50</b>
<b>Väh. sementtimäärä [kg/m<sup>3</sup>]</b>	<b>300</b>	<b>320</b>	<b>330</b>

#### 4.5.2 Vesi-sementtisuhde ja vähimmäissementtimäärä

Alla olevassa taulukossa 18 on esitetty suurin rasitusluokan sallima vesi-sementtisuhde sekä vähimmäissementtimäärä, kun rakenteen käyttöikä on 50 vuotta.

Taulukko 18. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun käyttöikä on 50 vuotta. [32.]

	Rasitusluokat																	
	Ei korroosion tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio						Jäädytys-sulatus-rasitus <sup>1)2)</sup>				Aggressiiviset kemialliset ympäristöt		
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä									
		X0	XC 1	XC 2	XC3	XC 4	XS1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2 <sup>3)</sup>	XF 3	XF 4 <sup>3)</sup>	XA 1	XA 2
w/c enintään		0,90	0,80	0,60	0,60	0,50	0,45	0,45	0,55	0,55	0,45	0,60	0,50	0,50	0,45	0,50	0,45	0,40
Vähimmäislujuusluokka	C12/15	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45					C30/37	C35/45	C40/50
Vähimmäissementtimäärä (kg/m <sup>3</sup> )		160	160	250	250	300	320	320	300	300	320	270	330	300	360	300	320	330
Ilmamäärä												4,0 <sup>4)</sup>	5,0	4,0 <sup>4)</sup>	5,5			

1) Lisäksi kelpoisuusvaatimukset Liitteen 5 taulukon 1 mukaan  
2) Rasitusluokissa XF2 ja XF4 edellytetyt betonin vesi-sementtisuhteen, ilmamäärän ja sementtimäärän vaatimukset ovat sementtilaaduille CEM I, CEM II/A-D CEM II/A-LL, CEM II/A-M ja CEM II/B-M taulukossa 4.8 esitetyin rajoituksin.  
3) Sementtilaatuja CEM II/A-S, CEM II/B-S ja CEM II/A-V käyttö tai sementtilaatuja CEM II/A-LL, CEM II/A-M ja CEM II/B-M koostumusrajoittamaton käyttö tai taulukon mukaisista suhteitusvaatimuksista poikkeaminen rasitusluokissa XF2 ja XF4 edellyttää betonin pakkasuolakestävyden osoittamista toiminnallisilla menetelmillä Liitteen 5 kohdan 3.2 mukaan.  
4) Ilmamäärävaatimus koskee betonia, jossa kiviaineksen ylänimellisraja on vähintään 16 mm. Ylänimellisrajan ollessa 12 mm ilmamäärävaatimusta nostetaan 0,5 %-yksikköä ja ylänimellisrajan ollessa 8 mm 1,0 %-yksikköä.

Jos ympäristön sulfaattipitoisuus johtaa rasitusluokkaan XA2 tai XA3, on rakenteessa käytettävä sulfaatinkestävää sementtiä tai sideaineen tulee sisältää masuunikuonaa vähintään 70 % sideaineen kokonaismäärästä. Rasitusluokka XA1 ei tuo sementille mitään lisävaatimuksia. [32, 52.] Taulukosta 19 (s. 46) nähdään betonin koostumuksen raja-arvot 100 vuoden käyttöiälle.

Taulukko 19. Betonin koostumuksen ja ominaisuuksien raja-arvot, kun käyttöikä on 100 vuotta.  
[32.]

	Rasitusluokat																		
	Ei korroosio- n tai rasituksen vaaraa	Karbonatisoitumisen aiheuttama korroosio				Kloridien aiheuttama korroosio						Jäädytys-sulatus-rasitus 1)				Aggressiiviset kemialliset ympäristöt			
						Merivesi			Kloridit muusta kuin merivedestä										
		X0	XC 1	XC 2	XC 3	XC 4	XS 1	XS 2	XS 3	XD 1	XD 2	XD 3	XF 1	XF 2 <sup>2)</sup>	XF 3	XF 4 <sup>2)</sup>	XA 1	XA 2	XA 3
w/c enintään		0,90	0,80	0,60	0,60	0,45	0,40	0,40	0,50	0,50	0,40	0,55		0,50		0,50	0,45	0,40	
Vähimmäis- lujuusluokka	C12/15	C20/25	C20/25	C30/37	C30/37	C30/37	C35/45	C35/45	C30/37	C30/37	C35/45						C30/37	C35/45	C40/50
Vähimmäisementti- määrä (kg/m <sup>3</sup> )		160	160	250	250	300	320	340	300	300	320	270		300			300	320	330
Ilmamäärä (%)												5,5 <sup>3)</sup>		5,5 <sup>3)</sup>					

1) Lisäksi kelppoisuusvaatimukset Liitteen 5 taulukon 1 mukaan  
2) Betonin pakkassuolakestävyys osoitetaan toiminnallisilla menetelmillä Liitteen 5 kohtien 3.1 ja 3.2 mukaan.  
3) Ilmamäärävaatimus koskee betonia, jossa kiviaineksen ylänimellisraja on vähintään 16 mm. Ylänimellisrajan ollessa 12 mm ilmamäärävaatimusta nostetaan 0,5 %-yksikköä ja ylänimellisrajan ollessa 8 mm 1,0 %-yksikköä

#### 4.6 Betonipeitteen paksuus

Betonipeitteen nimellisarvo esitetään rakennesuunnitelmissa ja se määritellään kaavalla:

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev} \quad (5)$$

$\Delta c_{dev}$  on betonipeitteen sallittu mittapoikkeama, jonka suositusarvo 10 mm. Elementti-  
tehtaat voivat kuitenkin laadunhallintajärjestelmillään vähentää mittapoikkeaman ar-  
voon 5 mm.

$c_{min}$  on betonipeitteen vähimmäisarvo, jolla taataan tartuntavoimien siirtyminen, teräk-  
sen suoja korroosiota vastaan sekä riittävä palonkestävyys. Se lasketaan kaavalla:

$$c_{min} = maks \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,y} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm}\} \quad (6)$$

$c_{min,b}$  tartuntavaatimuksesta johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo, ks. taulukko  
20 (s. 47)

Taulukko 20. Betonipeitteen vähimmäisarvon  $c_{min,b}$  vaatimukset tartunnan osalta. [55.]

Tartuntavaatimus	
Tankojen niputus	Betonipeitteen vähimmäisarvo $c_{min,b}$ *
Erilliset tangot	Tangon halkaisija
Niput	Ekvivalentti halkaisija ( $\varnothing_n$ ) (ks. kohtaa 8.9.1)
* Jos kiviaineksen suurin nimelliskoko on yli 32 mm, betonipeitteen vähimmäisarvoa $c_{min,b}$ suurennetaan 5 mm.	

HUOM. Kansallisessa liitteessä voidaan esittää kussakin maassa käytettävät betonipeitteen vähimmäisarvot  $c_{min,b}$  injektoitujen ankkurijänteiden pyöreille ja suorakaiteen muotoisille jännekanaville sekä tartuntajänteille. Suositusarvot ovat ankkurijänteiden suojausputkille:

pyöreät suojausputket: halkaisija

suorakaiteen muotoiset suojausputket: pienempi sivumitta tai puolet suuremmasta sivumitasta sen mukaan, kumpi on suurempi.

Yli 80 mm paksuutta ei edellytetä pyöreiltä eikä suorakaiteen muotoisilta suojausputkilta.

Tartuntajänteiden suositusarvot ovat:

1,5 x punoksen tai langan halkaisija

2,5 x kuviopintaisen langan halkaisija.

$c_{min,dur}$  ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvo, ks. taulukko 21

Taulukko 21. Betonipeitteen vähimmäisarvovaatimukset ympäristöolosuhteiden osalta EN 1992-1-1 kansallisen liitteen mukaisesti. XA- ja XF-luokkien vähimmäisarvovaatimukset on esitetty liitteessä 1. [54.]

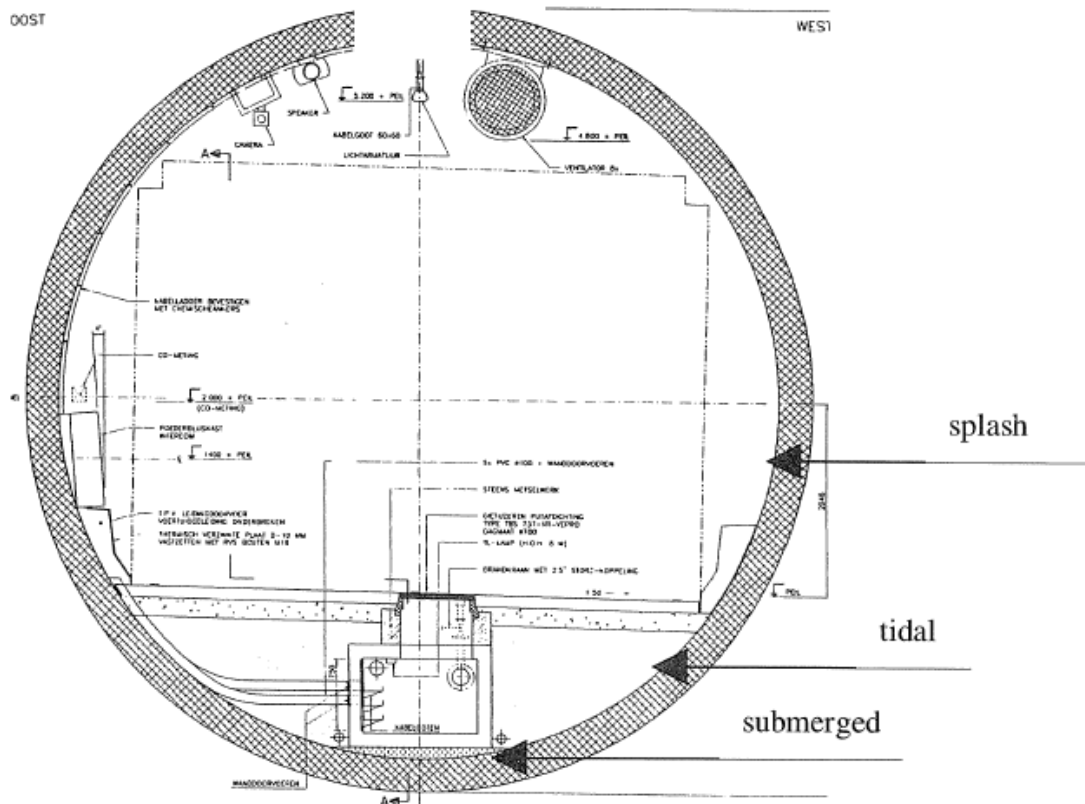
Ympäristöolosuhteista johtuva betonipeitteen vähimmäisarvovaatimus $c_{min,dur}$ (mm)								
Kriteeri	Rasitusluokka taulukon 4.1 mukaan							
	X0	XC1	XC2 XC3	XC4	XD1	XS1	XD2	XD3 XS2,3
Betoniteräs	10	10	20	25	30	30	35	40
Jänneteräs	10	20	30	35	40	40	45	50
100 vuoden suunniteltu käyttöikä <sup>1)</sup>	+0	+0	+5	+5	+5	+5	+5	+5
Lujuusluokka $\geq$	C20/25	C30/37	C35/45	C35/45	C35/45	C40/50	C35/45	C45/55
RakMK B4 1-rakenneluokka	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5

$\Delta c_{dur,y}$  lisävarmuustermi, suositusarvo 0 mm

$\Delta c_{dur,st}$  betonipeitteen vähimmäisarvon pienennys ruostumattoman teräksen käytön takia, suositusarvo 0 mm

$\Delta c_{dur,add}$  betonipeitteen vähimmäisarvon pienennys lisäsuojauksen takia, suositusarvo 0 mm [54, 55.]

Eurokoodin vaatima betonipeitevaatimus on liian alhainen ympäristössä, jossa on todella korkea kloridipitoisuus (kuva 16).



Kuva 16. TBM-tunnelin poikkileikkauksesta nähdään alueet, joilla voi liikennetunneleissa esiintyä erittäin suurta kloridirasitusta tiesuolan, kalliopohjaveden ja viemärin vuotoveden takia. Pitoisuudet voivat olla merivettäkin korkeampia. [56.]

Tarvittava betonipeitepaksuus tietylle käyttöiälle kloridirasitetussa rakenteessa voidaan laskea monella eri menetelmällä. Useassa tutkimuksessa on selvitetty todennäköisyys, jolla kloridikorrosio raudoituksessa käyttöikänsä aikana tietyllä betonipeitteellä alkaa. Tällöin betonipeite voidaan suunnitella tietylle käyttövarmuudelle. Kaikissa menetelmissä on käytetty oletuksia ja yksinkertaistuksia, joten menetelmät eivät ole luotettavia. Niistä voi kuitenkin saada hyviä suuntaa-antavia tuloksia. Tutkimuksissa on yleisesti käytetty Fickin lakia (*Fick's Law of Diffusion*), jolla on huomioitu kloridien liikkuminen betonin sisällä. [13.]

Tässä työssä esitetään yksinkertaistettu menetelmä halkeilemattoman betonipeitepaksuuden laskemiseksi. Betonin halkeilu nopeuttaa huomattavasti kloridien tunkeutumista, joten halkeaman kohdalla voidaan korroosion alkamiseen vaadittavaa aikaa pienen-



tää 30 %. Alla olevalla kaavalla voidaan laskea kloridipitoisuus betonissa tietyllä syvyydellä tietyn ajanjakson jälkeen. Erf (*error function*) tarkoittaa sulkulausekkeen sisällä olevaa virhefunktiota. [13.]

$$c(x, t) = c_s * \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2\sqrt{D_c * t}} \right) \right] \quad [\% \text{mm/mm}] \quad (7)$$

x            syvyys betonin pinnasta [mm]

t            aika, jona betoni on ollut kloridirasituksen vaikutuksen alaisena [a]

c<sub>s</sub>            kloridipitoisuus rasitetulla betonipinnalla [% sementin painosta]

D<sub>c</sub>            diffuusiokerroin [mm<sup>2</sup>/a]

Vastausta voidaan verrata kriittiseen kloridipitoisuuteen ja selvittää kuinka monen vuoden kloridirasituksella betoniteräksen korrosio alkaa. Kriittinen kloridipitoisuus vaihtelee hyvin paljon, mutta laskussa voidaan käyttää varmalla puolella olevaa arvoa 0,5 % sementin painosta. Diffuusiokertoimena voidaan käyttää arvoa 20 mm<sup>2</sup>/a roiske- ja vuorovesialueilla. Vedenalaisilla rakenteilla diffuusio on nopeampaa, jolloin kertoimena voidaan käyttää 50 mm<sup>2</sup>/a. Laskelmassa käytetyt diffuusiokertoimien vakiot ovat vain likiarvoja, sillä kloridien diffuusionopeus vaihtelee ajan kuluessa. [13.]

#### Esimerkkitalanne:

Ajotunnelin seinäelementtiin arvioidaan kohdistuvan pohjaveden ja tiesuolan yhteisvaikutuksesta kloridirasitus, joka vastaa pohjaveden kloridipitoisuutta 5000 mg/l. Betonissa on sementtiä 300 kg/m<sup>3</sup>. Lasketaan, riittääkö betonipeitteeksi 60 mm 100 vuoden käyttöiälle vai käynnistyykö kloridikorrosio betoniteräksessä.

Kloridipitoisuus rasitetulla pinnalla on  $c_s = \frac{5 \frac{g}{l} * 1000 \frac{l}{m^3}}{300 * 10^3 \frac{g}{m^3}} \approx 1,7 \%$

$$c(60 \text{ mm}, 100 \text{ v}) = 1,7 \% * \left[ 1 - \left( \frac{60 \text{ mm}}{2\sqrt{20 \frac{\text{mm}^2}{a} * 100 \text{ a}}} \right) \right] = 0,56 \% \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$



Tulos ylittää kriittisen kloridipitoisuuden arvon 0,5 %, joten 60 mm betonipeite ei riitä. Lisätään betonipeitteen paksuutta 65 millimetriin:

$$c(65 \text{ mm}, 100 \text{ v}) = 1,7 \% * \left[ 1 - \left( \frac{65 \text{ mm}}{2 \sqrt{20 \frac{\text{mm}^2}{a} * 100 \text{ a}}} \right) \right] \approx 0,47 \% \frac{\text{mm}}{\text{mm}}$$

Tulos ei ylitä kriittisen kloridipitoisuuden arvoa 0,5 %, joten 65 mm betonipeite riittää. Eurokoodin mukaan riittävä betonipeite 100 vuoden käyttöiällä rasitusluokassa XD3 on 45 mm ilman sallittua mittapoikkeamaa. [54.]

Jos korroosioreaktio kloridipitoisen veden vaikutuksesta alkaa, voidaan tutkimuksen mukaan olettaa korroosionopeuden betoniteräksessä olevan 91,74 µm/a roiskealueella, 18,64 µm/a vuorovesialueella ja 0,84 µm/a veden alla. Hapen puute veden alla rajoittaa suuresti korroosioreaktiota. Hyväksyttävänä halkaisijamitan menettämisenä voidaan raudoitusteräksessä pitää 0,2 mm. Siihen arvoon asti voidaan olettaa, että korroosiotuotteet eivät aiheuta halkeilua betonissa ja sitä kautta kiihdytä korroosioreaktiota. [13.]

#### 4.7 Halkeamaleveyden rajoittaminen

Halkeilua tulee rajoittaa, jottei se pienentäisi rakenteen säilyvyyttä tai sen asianmukaista toimintaa. Eurokoodi rajoittaa halkeamaleveyden enimmäisarvoa rasitusluokan mukaan (taulukko 22, s. 51). Sallittu halkeamaleveys määritetään mitoittavimman vaikutuksen antavan rasitusluokan suhteen. Rasitusluokissa X0 ja XC1 vaatimus on asetettu rakenteen kelvollisen ulkonäön takaamiseksi. [55.]

Taulukko 22. Halkeamaleveyden raja-arvot EN 1992-1-1 kansallisen liitteen mukaisesti. [54.]

Rasitusluokka	Teräsbetonirakenteet ja tartunnattomat ankkurijännerakenteet	Tartuntajännerakenteet ja injektoidut ankkurijännerakenteet
	Pitkäaikainen kuormayhdistelmä	Tavallinen kuormayhdistelmä
X0, XC1	0,4 <sup>1</sup>	0,2
XC2, XC3, XC4 XD1, XS1	0,3	0,2 <sup>2</sup>
XD2, XD3 XS2, XS3,	0,2	Vetojännityksetön tila
<p>HUOM. 1 Rasitusluokkien X0 ja XC1 yhteydessä halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen, ja tämä raja on asetettu kelvollisen ulkonäön takaamiseksi. Jos ulkonäköehtoja ei aseteta, tätä rajaa voidaan väljentää.</p> <p>HUOM. 2 Näiden rasitusluokkien yhteydessä tarkistetaan myös, ettei vetojännitystä esiinny kuormien pitkäaikaisen yhdistelmän vallitessa.</p>		

Eurokoodin halkeamaleveyksien raja-arvot ovat hieman liian suuria raskaan kemiallisen rasituksen rakenteille, eikä niissä oteta huomioon rakenteen käyttöikää tai suojabetonin paksuutta, kuten vanhassa normissa RakMk B4. Vanhassa normissa halkeamaleveyden perusvaatimus rasitusluokan perusteella on 0,1-0,3 mm ja sitä pienennetään taulukon 23 mukaisesti.

Taulukko 23. Kumotun RakMk B4 mukainen suurin sallittu halkeamaleveys, jos rasitusluokan mukainen perusarvo on 0,10 mm. Kuvassa  $w_{k50}$  on perusarvo 50 vuoden käyttöikä ja  $c$  betonipeitteen paksuus. [32.]

$c$ [mm]	$w_{k50}$ [mm]	$w_{k100}$	$w_{k150}$	$w_{k200}$
50	0,10	0,07	0,06	0,05
40	0,10	0,07	0,06	0,05
35	0,10	0,07	0,06	0,05
30	0,10	0,07	0,05	0,05
25	0,10	0,07	0,05	0,04
20	0,10	0,06	0,05	0,04

Liikennevirasto on myös julkaissut siltarakenteille eurokoodin soveltamisohjeen NCCI 2, jossa on annettu halkeamaleveyksien raja-arvot 100 vuoden käyttöiän rakenteille (taulukko 24, s. 52). 50 vuoden käyttöikää vastaavat halkeamaleveyden raja-arvot saadaan jakamalla taulukon arvot luvulla 0,7. [30.]

Taulukko 24. Halkeamaleveysrajan suositusarvot sekä vetojännityksettömän tilan vaatimukset 100 vuoden käyttöiälle Liikenneviraston siltarakenteille tekemän eurokoodin soveltamisohjeen mukaisesti. [30.]

Rasitusluokka <sup>a</sup>	SARAKE 1 Raudoitettut ja tartunnattomilla jänteillä jännitetyt rakenneosat		SARAKE 2 Tartunnallisilla jänteillä <sup>b</sup> jännitetyt rakenneosat	
	Tavallinen kuormitusyhdistely	Pitkäaikainen kuormitusyhdistely	Tavallinen kuormitusyhdistely	Pitkäaikainen kuormitusyhdistely
X0, XC1	-	0,3 <sup>c</sup>	-	0,2
XD1 <sup>d</sup> , XC2, XC3, XC4, XS1 <sup>d</sup>	0,2	0,15	0,07	Vetojännityksetön tila
XD2, XD3, XS2, XS3 <sup>d</sup>	0,15	0,1	Vetojännityksetön tila	Vetojännityksetön tila (-)

<sup>a</sup> Rasitusluokat rakenneosittain ovat määritetty kohdassa 4.2  
<sup>b</sup> Tähän luokkaan kuuluvat suojaputkeen injektoiduilla jänteillä varustetut rakenteet. Tällöin standardin EN 1992-1-1 kaavan (7.10)  $\xi_1 = 0$  halkeamaleveydestarkasteluja tehtäessä.  
<sup>c</sup> Rasitusluokissa X0 ja XC1 halkeamaleveydellä ei ole vaikutusta säilyvyyteen ja tämä raja on asetettu hyväksyttävän ulkonäön takaamiseksi.  
<sup>d</sup> Kloridirasitukset eivät aseta vaatimuksia rakenteen halkeilun suhteen, mikäli kloridirasitetut pinnat on suojattu kohdan 4.3 mukaisesti.

HUOM. Taulukon halkeamaleveysrajan saa korottaa luvulla  $c/c_{min,dur} \leq 1,4$

Suunnittelija voi käyttää harkintaansa ja käyttää eurokoodin vaatimuksia pienempiä halkeamaleveyden raja-arvoja, jos ympäristö on kemiallisesti erittäin aggressiivinen. Jos rakenteen on oltava vesitiivis, voidaan suunnitteluun käyttää eurokoodia EN 1992-3. Standardi koskee erityisesti nestesäiliöitä ja silloja, mutta sitä voidaan käyttää myös muiden nestetiiveyttä vaativien rakenteiden suunnittelussa. [51.]

## 5 Yhteenveto

Suomalaisessa pohjavedessä on keskimäärin melko vähän liuenneita aineita, joka ilmenee alhaisista pH- ja kovuusarvoista sekä heikosta sähkönjohtokyvystä. Pehmeässä vedessä on vähän rasvahappoja seostavia kationeita, kuten kalsiumia ja magnesiumia, kun taas matala pH ilmaisee pohjaveden hydroksidi-ionien vähyyttä. Heikko sähkönjohtokyky puolestaan viittaa veteen lienneiden ionien vähäiseen kokonaismäärään.

Pohjavedessä esiintyy suurta alueellista laatuvariaatiota, jonka vuoksi sen vaikutuksia teräsbetonirakenteille on vaikea arvioida. Minkä tahansa pohjaveden aineen pitoisuus voi pohjatutkimuksissa osoittautua moninkertaisesti keskimääräistä korkeammaksi. Outokummun kallioperästä löydettiin 2,5 km syvyydestä pohjavettä, jonka suolapitoisuus kohosi 70 grammaan litrassa. Määrä on kaksinkertainen valtameriveteen verrattuna. Pohjaveden alueelliseen laatuvariaatioon vaikuttavat maaperän ominaisuudet sekä ihmisen toiminta. Sähkönjohtavuus ja suolapitoisuus ovat keskimääräistä korkeampia rannikkoalueilla sekä entisillä merenpohja-alueilla. Liuenneiden aineiden pitoisuuksiin vaikuttavat myös maa- ja kallioperän mineraalikoostumus sekä pohjaveden viipyminen. Litorina-savien alueella, erityisesti Pohjanmaalla, on erityiset pohjavesigeologiset olosuhteet. Pohjavesiesiintymän päälle on muodostunut savesta, siltistä ja turpeesta koostuva kerros noin 8000 vuotta sitten alueella sijainneen Litorinameren vaikutuksesta. Tällaisissa kerrostumissa pohjavesi viipyy kauemmin ja veden happi kuluu orgaanisen aineksen hajottamiseen. Ihmisen toiminta näkyy joillain alueilla esimerkiksi korkeina kloridi-, sulfaatti-, natrium- tai jopa lyijypitoisuuksina. Pitoisuuksiin vaikuttavat mm. tiesuolaus, yhdyskunta- ja jätealue sekä pintaveden käsittelyssä käytetty alumiinisulfaatti. Teräsbetonirakenteille haitallisimmat suomalaisessa pohjavedessä esiintyvät aineet ovat kloridi ja sulfaatti. Rakenteiden säilyvyyteen vaikuttavat myös veden pH-arvo, magnesium ja vapaa hiilidioksidi sekä yleensä pohjavedessä vain pieninä määrinä esiintyvä ammonium.

Kloridit aiheuttavat pistekorroosiota niiden kulkeutuessa diffuusion avulla betonipeitteen läpi betoniteräkseen. Kloridimäärää, joka vaaditaan terästä suojaavan oksidikalvon tuhoutumiseen, sanotaan kriittiseksi kloridipitoisuudeksi. Tämä pitoisuus on yleensä noin 0,4-0,9 % sementin painosta. Kloridien tunkeutumisenopeus riippuu erityisesti betonin tiiveydestä, jota voidaan parantaa esimerkiksi pienellä vesi-sideainesuhteella tai muottikankaan käytöllä. Tiiveyden lisäksi kloridien tunkeutumisenopeus riippuu myös sementtityypin kyvystä sitoa klorideita eli sementin kalsiumalumiinaattipitoisuudesta.

Tämä johtuu siitä, että ainoastaan betonin huokosvedessä olevat kloridit aiheuttavat betoniteräkselle korroosiota. Masuunikuonasementti on ylivoimaisesti käyttökelpoisinta kloridipitoisessa ympäristössä, mutta myös silikan käytöllä betonin seosaineena voidaan hidastaa kloridien tunkeutumista. Korroosionkestävyyden parantamiseksi voidaan kloridipitoisessa ympäristössä käyttää myös betoniterästen pinnoitteita, erikoisteräksiä tai ei-metallisia vahvistusmateriaaleja. Muita keinoja rakenteen säilyvyyden parantamiseksi ovat mm. erilaiset betonipinnoitteet ja impregnointiaineet.

Sulfaatti reagoi sementin sisältämän trikalsiumaluminaatin ( $C_3A$ ) ja sen hydrataatiotuotteiden kanssa tuottaen ettringiittiä. Ettringiitti paisuttaa betonia eikä kovettuneen betonin vetolujuus kestä tätä. Sulfaatit reagoivat myös sementtikiven kalsiumhydroksidin kanssa muodostaen kipsiä, joka ettringiitin tavoin laajenee, muttei kuitenkaan yhtä paljon. Betonin sulfaatinkestävyys riippuu suurimmalta osin sementin  $C_3A$ -pitoisuudesta. Suomessa sementtiä pidetään sulfaatinkestävänä, jos se sisältää enintään 3 % trikalsiumaluminaattia.

Pohjaveden magnesium-ioni korvaa kalsiumin kalsium-silikaatti-hydraatissa muuttaen sen magnesium-silikaatti-hydraatiksi, jolla ei ole alkuperäisiä sideaineominaisuuksia. Tällöin magnesium myös itse saostuu betonin huokosiin. Tämän lisäksi magnesium-ioni muuttaa sementtikiven kalsiumyhdisteitä vastaaviksi magnesiumyhdisteiksi ioninvaihdon kautta. Ioninvaihdossa muodostuneen magnesiumhydroksidin molaarinen tilavuus on kalsiumhydroksidia suurempi, joten betoniin muodostuu paisumisesta vetojännityksiä. Pohjavedessä esiintyvät hapot puolestaan liuottavat sementtiä sekä yhdisteitä, jotka syntyvät sementin hydrataatiossa. Mitä alhaisempi veden pH on, sitä aggressiivisempää ja happamampaa vesi on. Pohjavedessä mahdollisesti esiintyviä heikkoja happoja ovat ammonium ja veteen liuennut vapaa hiilidioksidi.

Paineellinen pohjavesi kasvattaa veden läpätunkeutuvuutta ja kiihdyttää kloridien ja muiden kemiallisten yhdisteiden liikkumista diffuusiolla. Alle 0,1 MPa paineella ei ole huomattavaa vaikutusta kloridien tunkeutumisnopeuteen, mutta paineen ylittäessä 0,3 MPa, on kloridien tunkeutumisvyvyys 10 päivässä tutkimuksen mukaan jo 5-15 mm riippuen betonin koostumuksesta.

Ympäristöministeri allekirjoitti vuonna 2014 uuden asetuksen kantavista rakenteista, jossa luovuttiin yhdeksän rakentamismääräyskokoelman B-osan ylläpitämisestä. Rakenteiden suunnittelussa tullaan jatkossa käyttämään ainoastaan eurokoodia yhdessä

kansallisten liitteiden kanssa. Eurokoodin mukaan rakennesuunnittelijan tulee käyttökäsuunnittelussa määrittää rakenteelle suunnittelukäyttöikä, rasitusluokka, lujuusluokka, betonipeitteen nimellisarvo, halkeamien enimmäisleveys, sementtityyppi vaativissa kohteissa sekä vesi-sementtisuhte rasitusluokissa XD ja XS.

Eurokoodi ottaa betoniin kohdistuvat kemialliset rasitukset huomioon pohjaveden pitoisuuksien raja-arvoilla, joiden ylittyessä rakenne luokitellaan johonkin XA-rasitusluokkaan. Kloridipitoisuudelle eurokoodi ei kuitenkaan anna mitään raja-arvoja, vaan kloridipitoisessa ympäristössä rakenteelle valitaan jokin XD-luokista. Edes XD3-luokan vaatimukset betonipeitteen paksuudelle tai halkeamien enimmäisleveydelle eivät ole riittäviä raskaasti kloridipitoisessa ympäristössä. Työssä esitettiin halkeamien enimmäisleveyden arvot myös Liikenneviraston siltarakenteille tekemän eurokoodin soveltamisohjeen mukaisesti. Lisäksi työssä oli viittaus kumotun rakentamismääräyskokoelman B4 mukaiseen tapaan määrittää halkeamien enimmäisleveys. Jos rakenteen ympäristö on kemiallisesti aggressiivinen, kannattaa suunnittelijan käyttää harkintaansa ja valita eurokoodin mukaista sallittua halkeamaleveyttä pienempi arvo.

Kloridipitoisessa ympäristössä vaadittavan betonipeitteen laskemiseen on tehty useita laskentatapoja, joita kutsutaan kloridien tunkeutumismalleiksi (*chloride ingress model*). Tällaisia ovat esimerkiksi tieympäristöön tehty Hetek-malli, DuraCrete-malli sekä Clin-Conc-malli. Ne perustuvat Fickin lakiin (*Fick's Law of Diffusion*), jolla huomioidaan kloridien liikkuminen betonissa. Tässä työssä esitettiin yksinkertaistettu malli, jolla voidaan laskea betonipeitteen vaadittava paksuus halkeilemattomassa betonissa pohjaveden kloridipitoisuuden ollessa useita tuhansia milligrammoja litrassa. Kaikissa menetelmissä on käytetty oletuksia ja yksinkertaistuksia, joten menetelmät eivät ole luotettavia. Niistä voi kuitenkin saada hyviä suuntaa-antavia tuloksia.

Opinnäytetyön aihe osoittautui erittäin laajaksi eikä kaikkia asioita voinut käsitellä erityisen syvällisesti. Työtä voisi jatkaa perehtymällä syvemmin kloridien tunkeutumismalleihin. Yhdestä malleista voisi laatia laskentapohjan, jota käyttää tunnelihankkeissa vaadittavan betonipeitteen tarkemmaksi arvioimiseksi kloridipitoisessa ympäristössä. Lisäksi voisi tutkia pilaantuneen maan pohjavettä ja sen vaikutuksia teräsbetonirakenteisiin sekä teräsbetonirakenteiden turmeltumista fysikaalisten ja mahdollisten biologisten rasitusten yhteisvaikutuksesta kemiallisesti aggressiivisessa ympäristössä.

## Lähteet

- 1 Airaksinen, Jussi, U. 1978. Maa- ja pohjavesihydrologia, s. 15-17. Oulu: Kirjapaino Osakeyhtiö Kaleva.
- 2 Angst, U.; Vennesland, Ø. 2009. Pdf-julkaisu: Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II, Critical chloride content in reinforced concrete – State of the art, s. 316. England, London: Taylor & Francis Group.
- 3 Anttila, Vesa; Matala, Seppo; Punkki, Jouni; Söderlund, Klaus; Mannonen, Risto. 2007. Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu 2007, by 51, s. 6-8, 11-12, 16, 21. Suomen Betoniyhdistys r.y. Espoo: Frenckellin Kirjapaino Oy.
- 4 Aromaa, Jari. 2005. Korroosioestotekniikan perusteet, s. 107-109, 119. Espoo: Otamedia Oy.
- 5 Basham, Kim. 1999. Pdf-julkaisu: Choices in corrosion-resistant rebar. Artikkel, The Aberdeen Group.
- 6 Bergman, Jukka; Viitanen, Pia. 2014. Pdf- julkaisu: Ympäristöministeriön asetus kantavista rakenteista, s. 1, 3.
- 7 CivilDigital. Carbonation of Concrete – Various Failure Mechanisms of Concrete. Verkkojulkaisu: <<http://civildigital.com/carbonation-concrete-various-failure-mechanisms-concrete/>>. Luettu 23.1.2015.
- 8 Danang construction department. Corrosion of steel in reinforced concrete structures. Verkkojulkaisu: <<http://www.sxd.danang.gov.vn/web/english/science-technology?articleId=110309>>. Luettu 26.1.2015.
- 9 Desmettre, C.; Charron, J.-P. 2012. Pdf-julkaisu: Cement and Concrete Research, Vol. 42, Water permeability of reinforced concrete with and without fiber subjected to static and constant tensile loading, s. 945-957. Canada, Montreal: Research Center on Concrete Infrastructure.
- 10 Epoxy Interest Group. Use & Applications, FAQ. Verkkojulkaisu: <<http://epoxyinterestgroup.org/index.cfm/FAQ#>>. Luettu 17.4.2015.
- 11 Finnsementti Oy. Suomalainen sementti. Pdf-julkaisu: <<http://www.finnsementti.fi/files/pdf/Sementti-opas.pdf>>, s. 32, 42-43.
- 12 Geologian tutkimuskeskus. Tiedote. Verkkojulkaisu: <[http://www.gtk.fi/\\_system/print.html?from=/\\_system/PressReleases/news\\_0103.html](http://www.gtk.fi/_system/print.html?from=/_system/PressReleases/news_0103.html)>. Luettu 19.12.2014.

- 13 Gulikers, Joost. 2001. Pdf-julkaisu: Historic Interpretation of Chloride Profiles for the Eastern Scheldt Storm Surge Barrier, s. 1-9. Research Department, Ministry of Transport, Public Works and Water. Netherlands.
- 14 Hakala, Anu. Itämeren historia. Geologia. Verkkojulkaisu: <<http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-39-11/2011-12-21-12-39-51/itaameren-historia>>. Luettu 19.3.2015.
- 15 Heinonen, Jussi. Pdf-julkaisu: Corrosion of strands and rebars used in rock bolting, Intermediate report on corrosion research, s. 2, 14, 16. Helsinki University of Technology. Department of Material Science and Rock Engineering. Laboratory of Corrosion and Material Chemistry.
- 16 Housecroft, Cathereine, E.; Sharpe, Alan, G. 2005. Pdf-julkaisu: Inorganic Chemistry. 2. painos. England, Essex: Pearson Education Limited.
- 17 Hyyppä, Juho. 1984. Pdf-julkaisu: Pohjaveden kemiallinen koostumus Suomen kallioperässä, s. 69. Geologian tutkimuskeskus, ydinjätteiden sijoitustutkimus.
- 18 Johansson, Eva, Lind. 1989. Pdf-julkaisu: Importance of Water Composition for Prevention of Internal Copper and Iron Corrosion, s. 83-84. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, Department of Sanitary Engineering, Dissertation no 8.
- 19 Johansson, Peter; Kujansuu, Raimo. 2005. Pdf-julkaisu: Pohjois-Suomen maaperä, s. 197-198, 200-209. Geologian tutkimuskeskus. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- 20 Jokialho, A. Word-julkaisu: Hapot, emäkset, pH ja neutralointi, s. 2. Metropolia opetusaineisto.
- 21 Järvinen, Maarit; Koreasalo, Raimo; Korhonen, Pekka; Leppänen, Risto; Miettinen, Harri; Saarinen, Olli; Sivula, Kari; Syrjänen, Pauli; Sääskilahti, Seppo; Söderlund, Klaus. 2007. Betonitekniikan oppikirja 2004, by 201, s. 60, 95, 97-99, 117. Suomen Betoniyhdistys r.y. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.
- 22 Kaivoihin liittyviä käsitteitä. Pdf-julkaisu: <<http://www.ymparisto.fi/download/noname/%7B71279CAC-75AF-4936-9F25-7C0A63B97D1B%7D/57610>>.
- 23 Karamäki, E., M. 1983. Epäorgaaniset kemikaalit, s. 305. Espoo: Kustannusliike Tietoteos.
- 24 Korhonen, Sami. 2010. Kandidaatintyö: Ruostumattomat teräkset ja niiden soveltuvuus konepajan ohutlevytuotantoon, s. 56. Lappeenrannan teknillinen yliopisto.



- 25 Korkka-Niemi, Kirsti; Salonen, Veli-Pekka. 1996. 1. Painos. Maanalaiset vedet – pohjavesigeologian perusteet, s. 13, 18-19, 26, 41, 43-44, 52-54, 78-84, 87, 93, 96. Turun yliopiston täydennyskoulutuskeskus. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- 26 Kunnossapitoyhdistys ry. 2004. 2. painos. Korroosiokäsikirja, s. 28. Kunnossapidon julkaisusarja n:o 12. Rajamäki: KP-Media Oy.
- 27 Lahermo, Pertti; Ilmasti, Maija; Juntunen, Risto; Taka, Matti. 1990. Pdf-julkaisu: Suomen Geokemian Atlas, osa 1, s. 15-17. Geologian tutkimuskeskus. Helsinki: PunaMusta.
- 28 Laita, Mika; Huuskonen, Irene; Keskitalo, Toni; Lehkonen, Emmi; Ellonen, Tuomo. 2008. Pdf-julkaisu: Vakka-Suomen alueen ilmanlaadun bioindikaattoritutkimus vuosina 2006-2007, Ympäristötutkimuskeskuksen tiedonantoja 164, s. 1. Jyväskylä: Koiپییvä Oy.
- 29 Liikennevirasto, taitorakenneyksikkö. 2012. Pdf-julkaisu: Siltojen korjaus, SILKO 1.251, s. 13-15. Kuopio: Koiپییvä Oy.
- 30 Liikennevirasto. 2012. Pdf-julkaisu: Betonirakenteiden suunnittelu, NCCI 2, s. 32, 66-67. Eurokoodin soveltamisohje. Helsinki.
- 31 Liikennevirasto. 2013. Pdf-julkaisu: Pohjaveden hallinta alikulkupaikoilla, geotekniikan käsikirja, s. 8. Helsinki.
- 32 Mattila, Jussi; Anttila, Vesa; Heikkilä, Esa; Hietanen, Tauno; Kovanen, Tuomo; Leivo, Markku; Matala, Seppo; Oivo, Pekka; Paukku, Elina; Petrow, Seppo; Punkki, Jouni; Räsänen, Ossi; Vesikari, Erkki; Virtanen, Jorma. 2012. Betoninormit 2012, by 50, s. 67, 88, 90, 93, 101, 108-109. Helsinki: Suomen Betoniyhdistys r.y. Lahti: Esa Print Oy.
- 33 Mehta, P., Kumar; Monteiro, Paulo, J.M. 2014. 4. painos. Word-julkaisu: Concrete in Seawater, Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. McGraw-Hill Education.
- 34 Menéndez, Esperanza; Matschei, Thomas; Glasser, Fredrik, P. 2013. Pdf-julkaisu: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, Sulfate Attack of Concrete, s. 10-11, 16-17. RILEM State-of-the-Art Reports.
- 35 Meriluoto, Jukka. 2002. Pdf-julkaisu: Kalkkikivialkalointi – opas veden syövyttävyyden vähentämiseksi, s. 8. Vesi- ja viemärlaitosyhdistys. Helsinki: Copy-Set.
- 36 Nelson, Stephen, A. Tulane University. Groundwater. Verkkójulkaisu: <<http://www.tulane.edu/~sanelson/eens1110/groundwater.htm>>. Luettu 12.1.2015.

- 37 Nordkalk. Veden pH ja alkaliteetti. Verkkajulkaisu: <<http://www.nordkalk.com/default.asp?viewID=717>>. Luettu 12.1.2015.
- 38 Nummelin, Ari. 2001. Pdf-julkaisu: Kaivotietoa, s. 15, 201. Haja-asutuksen vesi-huolto-työryhmä. Turku.
- 39 Opasnet. Pohjavesi. Verkkajulkaisu: <<http://fi.opasnet.org/fi/Pohjavesi>>. Luettu 16.1.2015.
- 40 Opetushallitus. Korroosionesto, esiintymismuodot. Verkkajulkaisu: <[http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka\\_f2\\_korroosionesto\\_esiintymismuodot.html](http://www03.edu.fi/oppimateriaalit/kunnossapito/mekaniikka_f2_korroosionesto_esiintymismuodot.html)>. Luettu 26.1.2015.
- 41 Ositum. Karbonatisoituminen ja korrosio. Verkkajulkaisu: <<http://www.ositum.fi/index.php?p=Karbonatisoituminen>>. Luettu 22.1.2015.
- 42 Penttala, Vesa; Kukko, Heikki; Linna, Kauko; Petrow, Seppo; Virtanen, Jorma; Virtanen, Matti, T.; Söderlund, Klaus. 1992. 2. painos. Betonirakenteiden säilyvysohjeet ja käyttöikämitoitus 1992, by 32, s. 34-35, 38, 42, 44. Suomen Betoniyhdistys r.y. Helsinki: PunaMusta.
- 43 PERI. Peridrain muottikangas. Verkkajulkaisu: <[http://www.perisuomi.fi/tuotteet.cfm/fuseaction/showproduct/product\\_ID/35/app\\_id/11.cfm](http://www.perisuomi.fi/tuotteet.cfm/fuseaction/showproduct/product_ID/35/app_id/11.cfm)>. Luettu 20.2.2015.
- 44 Pitkänen, Pertti. 2008. Pdf-julkaisu: Katodinen suojaus, s. 2, 7-8, 10. VTT tutkimus- ja selvitysraportti. Espoo: Valtion teknillinen tutkimuskeskus.
- 45 Public Drinking Water Fountain Testing Kits. Verkkajulkaisu: <<http://sciencefaircenter.com/522-public-drinking-water-fountain-testing/>>. Luettu 12.12.2014.
- 46 Ratvio, Juha. 2005. Pdf-julkaisu: Siltojen raudotteiden korvaaminen ei-metallisilla tangoilla ja punoksilla, s. 1-4, 26-27. Contesta Oy, tutkimusraportti A-5552.
- 47 RILEM Technical Committee. 1986. Pdf-julkaisu: Seawater Attack on Concrete and Precautionary Measures, Resistance of Concrete to Chemical Attacks, s. 223. Bordas-Gauthier-Villars.
- 48 Salparanta, Liisa; Kuosa, Hannele. 2008. Pdf-julkaisu: Kloridien tunkeutumisen pienentäminen betoniin, Betoni vol. 3, s. 82-84. Lehtiartikkeli, VTT.
- 49 Satola, Ilkka; Hakala, Matti. 2001. Pdf-julkaisu: Corrosion-protected cable bolts in long-term reinforcement, KOVA research project, s. 9. Helsinki University of Technology.

- 50 SFS- EN 1990, standardi. Vahvistettu 2006. Rakenteiden suunnitteluperusteet, s. 48. Suomen standardisoimisliitto.
- 51 SFS- EN 1992-3, standardi. Vahvistettu 2006. Nestesäiliöt ja siilot, s. 5. Suomen standardisoimisliitto.
- 52 SFS- EN 206, standardi. Vahvistettu 2014. Betoni ja siihen liittyvät tuotteet, s. 25, 82. Suomen standardisoimisliitto.
- 53 SFS-EN 13577, standardi. Vahvistettu 2007. Chemical attack on concrete, Determination of aggressive carbon dioxide content in water, s. 4. Suomen standardisoimisliitto.
- 54 SFS-EN 1992-1-1, kansallinen liite. Vahvistettu 2009. Betonirakenteiden suunnittelu, yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, s. 5, 8. Suomen standardisoimisliitto.
- 55 SFS-EN 1992-1-1, standardi. Vahvistettu 2005. Betonirakenteiden suunnittelu, yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, s. 48-51, 117-118, 203. Suomen standardisoimisliitto.
- 56 Siemes, Ton; Polder, Rob; de Vries, Hans. 1998. Pdf-julkaisu: Design of concrete structures for durability, Example: Chloride penetration in the lining of a bored tunnel, s. 235. HERON Vol. 43, No. 4.
- 57 Sistonen, Esko; Tukiainen, Pekka; Peltola, Susanna; Skriko, Sonja; Huovinen, Seppo. 2002. Teräsbetonirakenteiden korroosioriskin rajoittaminen ulko-olosuhteissa – osa II, s. 12, 14. Teknillisen Korkeakoulun talonrakennustekniikan laboratorion julkaisu 121. Tampere: Domus-Offset Oy.
- 58 Suomen Vesiyhdistys r.y. 2005. Pdf-julkaisu: Pohjavesitutkimusopas, käytännön ohjeita, s. 72. Vammala: Vammalan Kirjapaino Oy.
- 59 Taylor, H.,F.,W. 1997. Toinen painos. Pdf-julkaisu: Cement Chemistry, s. 359. England, London: Thomas Telford Publishing.
- 60 Tumidajski, Peter, J.; Chan, G, W. 1996. Pdf-julkaisu: Cement and Concrete Research, Vol. 26, Durability of High Performance Concrete in Magnesium Brine, s. 557. Canada, Ontario: Materials Laboratory, Institute for Research in Construction.
- 61 Turunen, Mikko. Mustaliuske, metamorfiset kivet A-Ö. Geologia. Verkkojulkaisu: <<http://www.geologia.fi/index.php/2011-12-21-12-30-30/2011-12-21-12-40-22/metamorfiset-kivet-a-oe/94-mustaliuske>>. Luettu 19.3.2015.
- 62 Van Tittelboom, Kim; De Belie, Nele; Hooton, R., Doug. 2013. Pdf-julkaisu: Performance of Cement-Based Materials in Aggressive Aqueous Environments, Test

Methods for Resistance of Concrete to Sulfate Attack – A Critical Review, s. 272. RILEM State-of-the-Art Reports.

- 63 Vantaa. Pohjavesi. Verkkojulkaisu: <[http://www.vantaa.fi/fi/asuminen\\_ja\\_rakentaminen/maaperatiedot/pohjavesi](http://www.vantaa.fi/fi/asuminen_ja_rakentaminen/maaperatiedot/pohjavesi)>. Luettu 12.1.2015.
- 64 Yildirim, Hasan; Ilica, Tolga; Sengul, Ozkan. 2010. Pdf-julkaisu: Construction and Building Materials, Effect of cement type on the resistance of concrete against chloride penetration, s. 1284, 1287. Turkey, Istanbul: Istanbul Technical University, Faculty of Civil Engineering.
- 65 Ympäristöministeriö. Tiedote 25.6.2014. Verkkojulkaisu: < [http://www.ymparisto.fi/FI/Ajankohtaista/Rakennusten\\_kantavia\\_rakenteita\\_ja\\_pohja%2830183%29](http://www.ymparisto.fi/FI/Ajankohtaista/Rakennusten_kantavia_rakenteita_ja_pohja%2830183%29)>. Luettu 27.2.2015.
- 66 Zhao, Y.; Wittmann, F., H.; Zhang, P.; Wang, P., G.; Zhao, T, J. 2014. Pdf-julkaisu: Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 20, Penetration of Water and Chloride Dissolved in Water into Concrete under Hydraulic Pressure, s. 119-121, 124-125.

## Rakenteiden vähimmäisvaatimukset rasitusluokkayhdistelmille by 51 mukaisesti

Taulukoissa esitetyt betonipeitteiden arvot ovat nimellisarvoja eli niihin on jo lisätty 10 mm mittapoikkeama. Tämän lisäksi betonin lujuudet ovat ilmoitettu rakentamismääräyskokoelman mukaisesti kuutiolujuuksina, jotka voidaan muuttaa Eurokoodin mukaisiksi lujuuksiksi liitteen 3 taulukon mukaan.

Betontekenteiden käytötkäsunnittelu 2007  
Liite 3 Rakennetyyppien vähimmäisvaatimukset taulukonitotuksessa by 51

### LIITE 3 RAKENNETTYYPPIEN VÄHIMMÄISVAATIMUKSET TAULUKKO-MITTOJUKSESSA

Taulukko L3.1 Rakennetyyppien eri rasitusluokkayhdistelmien vähimmäisvaatimukset taulukonitotusta käytettäessä. Betonipeitteen sallittu mittapoikkeama on 10 mm, mikäli käytetään poikkeavaa arvoa, on myös betonipeitteen nimellisarvoa korjattava.

Rasitusluokkayhdistelmän numero, (annettu kohdan 6 taulukoissa)	Rasitusluokkayhdistelmä	Suunnittelukäyttöikä	Rauditustyyppi	Lujuusluokka	Vesi-sementtisuhde	Pakkasenkestävyysvaatimus	Betonipeitteen nimellisarvo [mm], (Sallittu mittapoikkeama on 10 mm)
1	X0	50 - 100 v	br	K25	-	-	20
2	X0	50 - 100 v	Jr	K15	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K20	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K25	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K30	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K35	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K40	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K45	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K50	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K55	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K60	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K65	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K70	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K75	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K80	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K85	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K90	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K95	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K100	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K105	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K110	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K115	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K120	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K125	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K130	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K135	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K140	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K145	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K150	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K155	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K160	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K165	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K170	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K175	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K180	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K185	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K190	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K195	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K200	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K205	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K210	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K215	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K220	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K225	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K230	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K235	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K240	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K245	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K250	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K255	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K260	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K265	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K270	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K275	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K280	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K285	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K290	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K295	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K300	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K305	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K310	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K315	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K320	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K325	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K330	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K335	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K340	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K345	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K350	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K355	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K360	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K365	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K370	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K375	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K380	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K385	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K390	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K395	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K400	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K405	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K410	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K415	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K420	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K425	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K430	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K435	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K440	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K445	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K450	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K455	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K460	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K465	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K470	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K475	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K480	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K485	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K490	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K495	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K500	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K505	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K510	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K515	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K520	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K525	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K530	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K535	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K540	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K545	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K550	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K555	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K560	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K565	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K570	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K575	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K580	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K585	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K590	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K595	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K600	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K605	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K610	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K615	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K620	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K625	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K630	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K635	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K640	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K645	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K650	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K655	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K660	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K665	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K670	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K675	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K680	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K685	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K690	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K695	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K700	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K705	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K710	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K715	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K720	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K725	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K730	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K735	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K740	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K745	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K750	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K755	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K760	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K765	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K770	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K775	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K780	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K785	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K790	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K795	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K800	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K805	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K810	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K815	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K820	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr	K825	-	-	20
3	X0	50 - 100 v	Jr				

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu 2007  
Liite 3 Rakennetyyppien vähimmäisvaatimukset taulukkomitolluksessa

by 51

Taulukko jatkuu									
17	XC3,4; XD1; XF1	50	br	K35	0,55	F1,0	40	50	40
		100	jr	K45	0,50	F2,0	45	55	45
18	XC3,4; XD1; XF2 ja XC4; XD1; XF2	50	br	K35	0,55	P25	40	50	40
		100	jr	K45	0,50	P50	45	55	45
		100	jr	K45	0,50	P50	50	60	50
19	XC4; XD1; XF3	50	br	K35	0,50	F1,5	40	50	40
		100	jr	K45	0,50	F3,0	45	55	45
20	XC3,4; XD2; XF2 ja XC4; XD2; XF2	50	br	K35	0,55	P25	45	55	45
		100	br	K45	0,50	P50	50	60	50
		100	jr	K45	0,50	P50	60	70	60
21	XC4; XD2; XF3	50	br	K35	0,50	F1,5	45	55	45
		100	jr	K45	0,50	F3,0	50	60	50
22	XC3,4; XD2; XF4	50	br	K35	0,55	P40	45	55	45
		100	jr	K45	0,50	P80	50	60	50
23	XC3,4; XS1; XF2 ja XC4; XS1; XF2	50	br	K40	0,50	P25	40	50	40
		100	jr	K45	0,45	P50	45	55	45
		100	jr	K45	0,45	P50	55	65	55
24	XC2; XS2	50	br	K45	0,45	-	45	55	45
		100	jr	K45	0,40	-	50	60	50
25	XC3,4; XS3; XF4	50	br	K45	0,45	P40	50	60	50
		100	jr	K45	0,40	P80	60	70	60
26	XC3,4; XD3; XF4 ja XC4; XD3; XF4	50	br	K45	0,45	P40	50	60	50
		100	jr	K45	0,40	P80	60	70	60

Taulukko jatkuu

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu 2007  
Liite 3 Rakennetyyppien vähimmäisvaatimukset taulukkomitolluksessa

by 51

Taulukko jatkuu									
27	XC3; XA1	50	br	K40	0,50	-	35	45	35
		100	jr	K40	0,50	-	40	50	40
28	XC2; XA2	50	br	K45	0,45	-	30	40	30
		100	jr	K45	0,45	-	35	45	35
		100	jr	K45	0,45	-	45	55	45
29	XC3,4; XF3; XA2	50	br	K45	0,45	F1,5	35	45	35
		100	jr	K45	0,45	F3,0	40	50	40
30	XC4; XD1; XA3	50	br	K50	0,40	-	40	50	40
		100	br	K50	0,40	-	45	55	45
		100	jr	K50	0,40	F1,5	50	60	50
31	XC4; XD1; XF3; XA3	50	br	K50	0,40	F1,5	40	50	40
		100	jr	K50	0,40	F3,0	45	55	45

## Kemikaalien aggressiivisuus betonille by 51 mukaisesti

Betonirakenteiden käyttöäsuunnitelu 2007  
Liite 1 Kemikaalien aggressiivisuus betonille

by 51

### LIITE 1 KEMIKAALIEN AGGRESSIIVISUUS BETONILLE (EN 206/NA-NL Taulukko A.2)

Aggressiivisuusluokat:

- 1 = vaaraton
- 2 = lievästi aggressiivinen
- 3 = kohtalaisen aggressiivinen
- 4 = voimakkaasti aggressiivinen
- 5 = erittäin voimakkaasti aggressiivinen

Aggressiivisuuteen vaikuttaa aineen kemiallisen koostumuksen lisäksi mm. aineen pitoisuus, liuoksen pH sekä lämpötilä.

KEMIKAALIEN AGGRESSIIVISUUS BETONILLE		
Aine	Reaktiotapa	Aggressiivisuus- luokka
<b>Hapot:</b>		
Eikkahappo	liuottaa	3 – 4
Borihappo	liuottaa	2
Fanoli	liuottaa/ionivaihto	2 – 3
Sitruunahappo	liuottaa	4
Fosforihappo	liuottaa	4
Humushappo	liuottaa	4
Malohappo	liuottaa	3
Muraahishappo	liuottaa	3
Cytsaalihappo	liuottaa	1
Typphappo	liuottaa	5
Parkkihappo	liuottaa	1 – 2
Fluorivetyhappo	liuottaa	5
Vinihappo	liuottaa	1
Suolahappo	liuottaa / teräskorroosio	5
Rikkivety	liuottaa	2
<b>Rikkihappo</b>	<b>liuottaa / paisuttaa</b>	<b>5</b>
<b>Suolat:</b>		
Ammoniumkarbonaatti	ioninvaihto	2
Kaliumkarbonaatti	paisuttaa	2
Natriumkarbonaatti	paisuttaa	2
Alumiinikloridi	ioninvaihto / teräskorroosio	3
Ammoniumkloridi	ioninvaihto / teräskorroosio	3

90

Taulukko jatkuu			
Kalsiumkloridi	teräskorroosio	1	
Kaliumkloridi	teräskorroosio / paisuttaa	1	
Kuparikloridi	teräskorroosio	1	
Eitohopeakloridi	teräskorroosio	1	
Magnesiumkloridi	ioninvaihto / teräskorroosio	3	
Natriumkloridi	teräskorroosio / paisuttaa	2	
Rautakloridi	teräskorroosio	2	
Sinkkikloridi	teräskorroosio	2	
<b>Ammoniumluoridi</b>	<b>ioninvaihto</b>	<b>4</b>	
Ammoniumhydroksidi		1	
Kalsiumhydroksidi	paisuttaa	1	
Kaliumhydroksidi	paisuttaa	2	
Natriumhydroksidi	paisuttaa	2	
<b>Ammoniumnitraatti</b>	<b>ioninvaihto</b>	<b>5</b>	
Kalsiumnitraatti		1	
Kaliumnitraatti	ioninvaihto / paisuttaa	3	
Natriumnitraatti	ioninvaihto / paisuttaa	3	
<b>Alumiinisulfaatti</b>	<b>ioninvaihto / paisuttaa</b>	<b>4</b>	
Ammoniumsulfaatti	ioninvaihto / paisuttaa	5	
Kalsiumsulfaatti	paisuttaa	4	
Kaliumsulfaatti	paisuttaa	4	
Kuparisulfaatti	paisuttaa	4	
Mangaanisulfaatti	paisuttaa	4	
Magnesiumsulfaatti	ioninvaihto / paisuttaa	5	
Natriumsulfaatti	paisuttaa	4	
Nikkelisulfaatti	paisuttaa	4	
Rautasulfaatti	paisuttaa	4	
Sinkkisulfaatti	paisuttaa	4	
<b>Maaojytsiiviset:</b>			
Bensoliini		1	
Kerosiini		1	
Naftaleeni		1	
Parafily		1	
Keuyf öljy		1	
Raakas öljy		1	
Dieselöljy		1	

91

by 51

Betonirakenteiden käyttöäsuunnitelu 2007  
Liite 1 Kemikaalien aggressiivisuus betonille

Taulukko jatkuu

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu 2007  
Liite 1 Kemikaalien aggressiivisuus betonille

by 51

Taulukko jatkuu	
<b>Kivihilitseerit:</b>	
Artseeni	1
Banzeeni	1
K:meeni	1
K:osociti	1
Parafini	1
Terva	1
Tolueni	1
Kybeeni	1
<b>Kasvöljyt:</b>	
Manteelily	ioninvaihto
K:nanpuudily	ioninvaihto
P:puvillaseemondily	ioninvaihto
K:okosdily	ioninvaihto
P:llaraseemondily	ioninvaihto
U:nkoseemondily	ioninvaihto
Maapähkinädily	ioninvaihto
Turpisdily	ioninvaihto
Risindily	ioninvaihto
S:ljapaudily	ioninvaihto
Mänyölyväripätili	ioninvaihto
Saksanpähkinädily	ioninvaihto
<b>Eiäinportaisot rasvat:</b>	
Hivensarvendily	liuottaa
San ihra	liuottaa
Kaladily	liuottaa
Taurasjätteet	liuottaa
<b>Sekalaiset:</b>	
Akkoheli	1
Aseoni	1
Ammoniikki	1
Öljyt	2
Valkaisainne, natriumhyppokloriitti	teräskorroosio
B:otaksi	1
L:peakivi	1

92

Betonirakenteiden käyttöikäsuunnittelu 2007  
Liite 1 Kemikaalien aggressiivisuus betonille

by 51

Taulukko jatkuu	
<b>Silideri, omenaviini</b>	liuottaa
Eetleri	4
Eeteriset öljyt	1
Fenoli	ioninvaihto
Formaldehydi	ioninvaihto
Rypälesokeri	ioninvaihto
Glyseriini	ioninvaihto
Hunaja	1
Puuhiekke	1
Kaliumpermanganaatti	1
Kalkki	1
Hilidoksidit	1
<b>Säilörehu</b>	liuottaa
Lyijy	1
Aurinkovoide	1
Melassi	ioninvaihto
Maito	3
<b>Lanta</b>	liuottaa, ioninvaihto
Sokeri, kuiva	1
Sokeriliuos	ioninvaihto
Tolueni	3
Triklooriyveeni	1
Urea	1
Virtaa	liuottaa / ioninvaihto
Vaselliini	3
<b>Hedelmärehu</b>	liuottaa
Vesilasi	4
Veri	1
Vini	liuottaa
Pehmeä vesi (kokonauskovuus < 0,55 mm/di)	1
Saippua	liuottaa
Rikki	3
	1

93



**Betonin puristuslujuusluokat EN 206 mukaisesti**

Puristuslujuusluokka	Betonin pienin ominaispuristuslujuus, joka on määritetty hieromaisen koekeppaleiden avulla $f_{ck,cyl}$ N/mm <sup>2</sup>	Betonin pienin ominaispuristuslujuus, joka on määritetty kuutiomaisten koekeppaleiden avulla $f_{ck,cube}$ N/mm <sup>2</sup>
C8/10	8	10
C12/15	12	15
C16/20	16	20
C20/25	20	25
C25/30	25	30
C30/37	30	37
C35/45	35	45
C40/50	40	50
C45/55	45	55
C50/60	50	60
C55/67	55	67
C60/75	60	75
C70/85	70	85
C80/95	80	95
C90/105	90	105
C100/115	100	115

## Syövyttävyyssluokat ja sinkityskerroksen vähimmäispaksuudet EN ISO 14713-1 mukaisesti

Syövyttävyyssluokka C Sinkin korroosionopeus (perustuen yhden vuoden altistukselle), $r_{corr}$ ( $\mu\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$ ) ja korroosion taso	Tyypilliset ympäristöt (esimerkkejä)	
	Sisäilma	Ulkollima
C1 $r_{corr} \leq 0,1$ Erittäin pieni	Lämmitetyt tilat, joissa on pieni suhteellinen kosteus ja saasteiden määrä merkityksetön, esim. toimistot, koulut, museot	Kuiva tai kylmä vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa hyvin vähän saasteita ja kosteutta, esim. tietyt aavikot, keskinen arktinen alue/Etelämanner
C2 $0,1 < r_{corr} \leq 0,7$ Pieni	Lämmittämättömät tilat, joiden lämpötila ja suhteellinen kosteus vaihtelevat. Harvoin tapahtuvaa kondensoitumista ja vähäinen saasteiden määrä, esim. varastot, urheiluhallit	Lauhkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa vähän saasteita ( $\text{SO}_2 < 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), esim. maaseutu, pienet kaupungit. Kuiva tai kylmä vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa lyhytaikaisesti kosteutta, esim. aavikot, subarktiset alueet
C3 $0,7 < r_{corr} \leq 2$ Keskimääräinen	Tilat, joissa kohtalaisesti kondensaatiota ja saasteita tuotantoprosesseista, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit	Lauhkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa kohtalaisesti saasteita ( $\text{SO}_2: 5 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tai vähäinen kloridien vaikutus, esim. kaupunkialueet, rannikkoalueet, joissa pieniä määriä klorideja, subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet, joissa vähän saasteita
C4 $2 < r_{corr} \leq 4$ Suuri	Tilat, joissa paljon kondensaatiota ja saasteita tuotantoprosesseista, esim. teollisuuslaitokset, uimahallit	Lauhkea vyöhyke, ilmasto-olosuhteet, joissa paljon saasteita ( $\text{SO}_2: 30 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 90 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) tai huomattava kloridien vaikutus, esim. saastuneet kaupunkialueet, teollisuusalueet, rannikkoalueet, joissa ei ole merivesiroiskeita, altistuminen jäänsulatusoloille, subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet, joissa kohtalaisesti saasteita
C5 $4 < r_{corr} \leq 8$ Erittäin suuri	Tilat, joissa erittäin runsaasti kondensaatiota ja/tai paljon saasteita tuotantoprosesseista, esim. kaivokset, teollisiin tarkoituksiin rakennetut luolat, ilmastoimattomat hallit subtrooppisilla ja trooppisilla vyöhykkeillä	Lauhkeat ja subtrooppiset vyöhykkeet, ilmasto-olosuhteet, joissa erittäin paljon saasteita ( $\text{SO}_2: 90 \mu\text{g}/\text{m}^3 \dots 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ja/tai merkittävä kloridien vaikutus, esim. teollisuusalueet, rannikkoalueet, katetut tilat rannikolla
CX $8 < r_{corr} \leq 25$ Äärimmäinen	Tilat, joissa lähes pysyvää kondensaatiota tai pitkiä altistumisia äärimmäiselle kosteudelle ja/tai paljon saasteita tuotantoprosesseista, esim. ilmastoimattomat hallit kosteilla trooppisilla vyöhykkeillä yhdessä ulkoilman saasteiden sekä ilmassa olevien kloridien ja korroosiota kiihdyttävien hiukkasten kanssa	Subtrooppiset ja trooppiset vyöhykkeet (erittäin pitkiä aikoja kosteutta), ilmasto-olosuhteet, joissa erittäin paljon saasteita ( $\text{SO}_2$ yli $250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), mukaan lukien tuotantoprosessien saasteet ja/tai voimakas kloridien vaikutus, esim. äärimmäiset teollisuusalueet sekä rannikko- ja offshore-alueet, joissa ajoittaisia merivesiroiskeita

HUOM. 1 Kloridien määrä rannikkoalueilla riippuu voimakkaasti merivedessä olevan suolan kulkeutumiseen vaikuttavista tekijöistä, kuten tuulen suunnasta ja nopeudesta, maaston muodoista, tuulelta suojaavista saarista, etäisyydestä mereltä jne.

HUOM. 2 Äärimmäistä kloridien vaikutusta, joka on tyypillistä merivedelle tai voimakkailla merivesiroiskeilla, ei käsitellä standardissa ISO 9223.

HUOM. 3 Tietyn käyttöolosuhteen syövyttävyyssluokkia, esim. kemianteollisuudessa, ei käsitellä standardissa ISO 9223.

HUOM. 4 Katetut ja sadevedeltä suojatut pinnat meriympäristössä, jossa on läsnä klorideja, voivat altistua suuremmalle syövyttävyyssluokalle johtuen kosteutta sitovista suoloista.

HUOM. 5 Ympäristöissä, joiden oletettu syövyttävyyssluokka on CX, suositellaan ilmasto-olosuhteiden syövyttävyyttä luokittelemaan yhden vuoden korroosiohäviöiden perusteella. Standardi ISO 9223 on uusittavana; luokka CX tullaan sisällyttämään uuteen painokseen.

HUOM. 6 Rikkidioksidin ( $\text{SO}_2$ ) pitoisuus olisi määriteltävä vähintään yhden vuoden ajalta ja esitettävä vuotuisena keskiarvona.

HUOM. 7 Yksityiskohtaiset kuvaukset sisäilmastoista syövyttävyyssluokissa C1 ja C2 esitetään standardissa ISO 11844-1. Sisäilmaston syövyttävyyssluokat IC1...IC5 on määritelty ja luokiteltu.

HUOM. 8 Luokittelukriteeri perustuu korroosionopeuksien määrittelyyn vakiokoekappaleilla syövyttävyyden arvioimiseksi (ks. standardi ISO 9226).

HUOM. 9 Paksuushäviöiden arvot vastaavat standardissa ISO 9223 määriteltyjä, paitsi arvoilla vähintään  $2 \mu\text{m}$  (per vuosi), jotka on pyöristetty kokonaisluvuiksi.

HUOM. 10 Vertailumateriaalina käytetty sinkki on määritelty standardissa ISO 9226.

HUOM. 11 Luokan C5 ylittävien korroosionopeuksien katsotaan olevan äärimmäisiä. Syövyttävyyssluokka CX viittaa tiettyyn meri- ja meri/teollisuusympäristöön.

HUOM. 12 Ensiolettamuksena pidetään kaikkien sinkkimetallipintojen korroosiota samana kyseisessä ympäristössä. Rauta ja teräs syöpyvät yleensä 10...40 kertaa sinkkiä nopeammin, suurimpien syöpymisnopeuksien ollessa yleensä runsaasti klorideja sisältävässä ympäristössä. Arvot ovat levymäisillä näytteillä saatuja standardien ISO 9223 ja ISO 9224 mukaisesti.

HUOM. 13 Ilmastollisissa olosuhteissa tapahtuu muutoksia ajan kuluessa. Useilla alueilla saasteiden pitoisuudet (erityisesti  $\text{SO}_2$ ) ilmassa ovat pienentyneet ajan kuluessa. Tämä on johtanut näiden alueiden syövyttävyyssluokan alentumiseen. Tämä on puolestaan johtanut aiempaa pienempiin sinkkipinnoitteiden korroosionopeuksiin verrattuna historiallisiin arvoihin. Toisille alueille on tullut lisääntyviä saasteita ja teollista toimintaa ja siksi näiden ympäristöjen syövyttävyyssluokka voi olla suurentunut.

HUOM. 14 Sinkki- ja sinkki-rautaseospinnoitteiden korroosionopeudet ovat suunnilleen samoja.



Järjestelmä	Viite- standardi	Vähimmäis- paksuus µm	Valittu syövyttävyyssluokka (ISO 9223) kestoikä min./max. (vuotta) ja kestävyyssluokka (VL, L, M, H, VH)							
			C3		C4		C5		CX	
Kuumasinkitys	ISO 1461	85	40/ > 100	VH	20/40	VH	10/20	H	3/10	M
		140	67/ > 100	VH	33/67	VH	17/33	VH	6/17	H
		200	95/ > 100	VH	48/95	VH	24/48	VH	8/24	H
Kuumasinkitty ohutlevy	EN 10346	20	10/29	H	5/10	M	2/5	L	1/2	VL
		42	20/60	VH	10/20	H	5/10	M	2/5	L
Kuumasinkitty putki	EN 10240	55	26/79	VH	13/26	H	7/13	H	2/7	L
Sherardisointi	EN 13811	15	7/21	H	4/7	M	2/4	L	1/2	VL
		30	14/43	VH	7/14	H	4/7	M	2/4	VL
		45	21/65	VH	11/25	H	6/11	M	3/6	L
Sähkösaostamalla pinnoitettu levy	ISO 2081	5	2/7	L	1/2	VL	1/1	VL	0/1	VL
		25	12/36	H	6/12	M	3/6	M	1/3	VL
Mekaaninen pinnoitus	ISO 12683	8	4/11	M	2/4	L	1/2	VL	0/1	VL
		25	12/36	H	6/12	M	3/6	L	1/3	VL

HUOM. 1 Kestoikää kuvaavat luvut on pyöristetty kokonaisluvuiksi. Kestävyysluokka perustuu keskimääräiseen pienimpään ja suurimpaan kestoikään ensimmäiseen kunnossapitoon asti, esim. 85 µm sinkkipinnoite syövyttävyyssluokassa C4 (sinkin korroosionopeus välillä 2,1...4,2 µm vuodessa) antaa odotetuksi kestoiksi 85 / 2,1 = 40,746 vuotta (pyöristetty 40 vuoteen) ja 85 / 4,2 = 20,238 vuotta (pyöristetty 20 vuoteen). Keskimääräinen kestoikä (20 + 40) / 2 = 30 vuotta – tunnus "VH".

HUOM. 2 Suojapinnoitejärjestelmien kestoikä ensimmäiseen kunnossapitoon: Tässä taulukossa esitetyt luettelot suojausjärjestelmistä ryhmitel-  
tyinä eri ympäristöluokkiin ja tyypillisiin aikoihin ensimmäiseen kunnossapitoon tarjoavat suunnittelijalle vaihtoehtoja. Pitkiä käyttökatavoiteita  
varten suositellut pinnoiteratkaisut antavat aina myös lyhytaikaisen suojan ja ovat usein tällöin myös taloudellisia.

HUOM. 3 Tätä taulukkoa voidaan soveltaa mille tahansa sinkkipinnoitetyypille määritettäessä kestoikää ensimmäiseen kunnossapitoon. Korroo-  
sionopeus eri ympäristöissä esitetään syövyttävyyssluokituksella C3...CX. Pinnoitejärjestelmän pienin ja suurin kestoikä ensimmäiseen kunnossa-  
pitoon esitetään taulukossa.

HUOM. 4 Pinnoitteilla on hyvin vaikea aikaansaada kauttaaltaan täysin tasaisia kerroksia. Taulukon kolmas sarake osoittaa pinnoitejärjestelmän  
pienimmän keskimääräisen kerrospaksuuden. Käytännössä keskimääräinen kerrospaksuus on huomattavasti tätä vähimmäisarvoa suurempi,  
mikä on tärkeää koska sinkkipinnoitteet suojaavat myös ympäröiviä alueita, joilta osa pinnoitteesta on saattanut tuhoutua.

HUOM. 5 Olisi huomattava, että paksuusvaatimukset standardissa EN 10240 ovat paikallisen kerrospaksuuden vähimmäisvaatimuksia. Edelleen  
olisi huomattava, etteivät pinnoitepaksuudet näissä taulukoissa välttämättä täsmää eräissä standardeissa annettuihin kerrospaksuuksiin.

HUOM. 6 Tässä taulukossa annetaan ohjeita kuumasinkityille rakenneteräsohutlevyille, kylmämuokatuille teräsohutlevyille ja kylmävalssatuille  
profiileille, sähkösinkityille teräslevyille, termisesti ruiskutetuille sinkkipinnoitteille, mekaanisesti pinnoitetuille tuotteille, sherardisointipinnoitteille  
ja valmistuksen jälkeen kappaleitavarsinkityille tuotteille. Ohuille materiaaleille, kiinnittimille ja muille lingotoille työstytyille kappaleille tai puolival-  
misteille tehdyissä kuumasinkityksissä on tavallisesti ohuimmat pinnoitepaksuudet (ks. myös kyseiset tuotestandardit). Koska kaikkien sinkki-  
pinnoitteiden kestoikä on jotakuinkin verrannollinen kerrospaksuuteen tai sinkkipinnoitemassaan, voidaan ohuempien pinnoitteiden kestoikä hel-  
posti arvioida.

HUOM. 7 Sinkki-alumiiniseospinnoitteet (sisältään 5...55 % alumiinia) kestävät yleensä kauemmin kuin puhdas sinkki, koska niitä ei ole käytetty  
laajalti, ei niitä tässä mainita. Täsmätyyppisistä materiaaleista on saatavana teknistä kirjallisuutta.

HUOM. 8 Tuotteen pinnassa olevan kuumasinkkipinnoitteen paksuus: Standardi ISO 1461 määrittelee > 6 mm paksun terästuotteen kuuma-  
sinkkipinnoitteen vähimmäiskerrospaksuudeksi 85 µm. Ohuemilla teräksillä, automaattilinjoilla valmistetuilla kuumasinkityillä teräsputkilla ja  
lingotuilla tuotteilla (yleensä kierteitetty kappaleet ja liittimet) kerrospaksuus on ohuempi, mutta yleensä yli 45 µm. Mikäli on päätetty käyttää  
näistä oletetuista poikkeavia kerrospaksuuksia, niiden elinikä voidaan arvioida kertoimilla; kaikkien sinkkipinnoitteiden kestoikä (lähtöarviona) on  
verrannollinen kerrospaksuuteen. Putkille standardi EN 10420 sisältää vaatimuksen tilaajalle määritellä paksimmat pinnoitevaatimukset, jotka  
antavat pitemmän kestoian. Paksumpia kuumasinkkipinnoitteita kuin 85 µm ei ole määritelty standardissa EN ISO 1461, mutta standardin yleiset  
vaatimukset pätevät silti ja yhdessä erityisten paksuusikäyrien kanssa voivat muodostaa pinnoitevaatimuksen kolmannen osapuolen hyväksy-  
essä. On tärkeä tällöin tuntea teräksen kokoomus ja ennen sen määrittelyä olisi neuvoteltava kuumasinkitsijän kanssa, koska näitä paksuja pin-  
noitteita ei voida saada aikaan kaikilla teräslajeilla. Mikäli teräs on sopiva, voidaan määritellä paksumpia pinnoitteita.

HUOM. 9 Tuotteen pinnassa olevan sherardisointipinnoitteen paksuus: Standardissa EN 13811 esitetään kolme kerrospaksuutta paksuuteen  
45 µm asti, mutta erikoisovelluksiin voidaan tarvita suurempia paksuuksia. Kerrospaksuuksia enintään 75 µm voidaan määritellä.  
Sherardisointialta olisi kysyttävä neuvoja, mikäli paksuja pinnoitteita vaaditaan, koska niitä ei voida saada aikaan kaikilla teräslajeilla.

HUOM. 10 Termisesti ruiskutetut pinnoitteet. Näitä pinnoitteita käytetään yleensä pinnoitteen tiivistyksen jälkeen osana korroosiosuojaus-  
järjestelmää. Pinnoitejärjestelmän toimivuus riippuu voimakkaasti tiivistyksen huolellisesta toteutuksesta. Standardin ISO 14713 tässä osassa  
ei esitetä tietoja näiden pinnoitteiden kestoikästä. Lisäohjeita esitetään standardissa EN 15520.