



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Mikko Riihijärvi

# Kovettuneen betonin kuntotutkimus- menetelmät

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Laboratorioanalyttikko (AMK)

Laboratorioanalytiikka

Opinnäytetyö

19.11.2020

|  |  |
|--|--|
| Tekijä<br>Otsikko  | Mikko Riihijärvi<br>Kovettuneen betonin kuntotutkimusmenetelmät  |
| Sivumäärä<br>Aika  | 20 sivua<br>19.11.2020   |
| Tutkinto   | laboratorioanalyttikko (AMK)   |
| Tutkinto-ohjelma   | laboratorioanalytiikka   |
| Ammatillinen pääaine   |  |
| Ohjaaja  | lehtori Miika Kuivikko   |
| <p>Betoni on maailman käytetyin rakennusmateriaali, ja sille on olemassa vakioitu käyttöikäsuunnittelumenettely. Betonin huolellisella ja kohteeseen sopivalla valmistamisella on suuri merkitys. Huolettomalla valmistamisella ja löyhillä tarkastuksilla betonin käyttöikä voi vähentyä huomattavasti ja kunto romahtaa. Mikään betoni ei kestä ikuisesti, ja on vain ajasta kiinni, kun rakenteisiin vaaditaan korjaustoimenpiteitä. Ennen toimenpiteitä on erittäin tärkeää suorittaa betonirakenteille kattava kuntotutkimus.</p> <p>Kuntotutkimuksilla kartoitetaan kaikkia mahdollisia rakenteellisia vaurioita joko ulkopuolisen rasituksen- tai huonon valmistuksen seurauksena. Betonirakenteisiin voi tulla rapautumaa, halkeamia, raudoitteiden ruostumista eli korroosiota joko liiallisesta kloridipitoisuudesta tai tarpeeksi syvälle edenneestä karbonatisoitumisesta.</p> <p>Opinnäytetyössä on käyty läpi kirjallisuuskatsauksena neljä oleellista analyysimenetelmää. Standardin ASTM C856-18a mukaan suoritetaan ohuthieanalyysiä, jolla tutkitaan tarkemmin useampaa vahinkoaluetta. Standardin SFS-EN 14629 mukaan tutkitaan betonin kloridipitoisuutta ja raudoitteiden mahdollista korroosiota. Standardin SFS 5445 ohjeiden avulla saadaan selvitettyä rapautumisen laajuutta vetolujuudella täydentävänä menetelmänä ja edullisempaa ohuthieanalyysiin verrattuna. Standardin SFS-EN 14630 mukaan tutkitaan karbonatisoitumissyvyyttä ja myös korroosiota. Tutkimusmenetelmillä saadaan selvyys betonin tarvittaviin korjaustoimenpiteisiin.</p> |  |
| Avainsanat   | betoni, kloridipitoisuus, ohuthieanalyysi, vetolujuus, rapautuminen, raudoitus, karbonatisoituminen, korroosio |

|  |  |
|--|--|
| Author<br>Title  | Mikko Riihijärvi<br>Condition examination methods for hardened concrete                                    |
| Number of Pages<br>Date  | 20 pages<br>19 November 2020   |
| Degree   | Bachelor of Laboratory Sciences  |
| Degree Programme   | Laboratory Sciences  |
| Professional Major   | Chemistry  |
| Instructors  | Senior Lecturer Miika Kuivikko   |
| <p>Concrete is the most used building material in the world and it has a standardized lifetime usage design procedure. Meticulous and destination suitable manufacturing has a great meaning for concrete. Careless manufacturing and lax inspections can reduce the lifetime usage of concrete significantly which has a negative effect on the concrete's condition. No concrete lasts forever and it is only a matter of time when the structures demand repairing procedures. It is highly important to execute comprehensive condition examination for the concrete before the procedures.</p> <p>Condition examinations map every possible structural damage either from bad manufacturing or outside stress such as decay. Concrete structures can show scaling, cracks, rebar corrosion either from too high of chloride content or from too advanced carbonation.</p> <p>This thesis goes through four essential analysis methods in literature review. Thin section analysis can be used to examine multiple different damage areas with the use of standard ASTM C856-18a. Standard SFS-EN 14629 is used to examine the chloride content of concrete and the possible corrosion of rebars. Standard SFS 5445 is used to examine the pull-off strength of concrete and it is also an accessory and cheaper examination method compared to thin section analysis. Standard SFS-EN 14630 is used to examine the carbonation depth of concrete and possible corrosion of rebar. Examination methods clarify the necessary repairing procedures of concrete.</p> |  |
| Keywords   | Concrete, chloride content, thin section analysis, pull-off strength, decay, rebar, carbonation, corrosion |

## Sisällys

### Lyhenteet

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto  | 1  |
| 2     | Teoria  | 2  |
| 2.1   | Betoni rakennusmateriaalina                               | 2  |
| 2.2   | Betonin käyttökohteet ja ominaisuudet                     | 3  |
| 2.3   | Kovettuneen betonin ohuthieanalyysi                       | 4  |
| 2.4   | Kovettuneen betonin kloridipitoisuuden määrittäminen      | 5  |
| 2.5   | Kovettuneen betonin vetolujuus                            | 6  |
| 2.6   | Kovettuneen betonin karbonatisoituminen                   | 7  |
| 3     | Kovettuneen betonin analyysimenetelmät                    | 8  |
| 3.1   | Kovettuneen betonin ohuthieanalyysi                       | 8  |
| 3.1.1 | Näytteenotto  | 8  |
| 3.1.2 | Näytteen valmistelu ja analysointi                        | 9  |
| 3.2   | Kovettuneen betonin kloridipitoisuuden määrittäminen      | 11 |
| 3.2.1 | Näytteenotto  | 11 |
| 3.2.2 | Kovettuneen betonin kloridianalyysi                       | 12 |
| 3.3   | Kovettuneen betonin vetolujuus                            | 15 |
| 3.3.1 | Näytteenotto  | 15 |
| 3.3.2 | Analysointi   | 15 |
| 3.4   | Kovettuneen betonin karbonatisoitumissyvyyden analysointi | 17 |
| 3.4.1 | Näytteenotto  | 17 |
| 3.4.2 | Analyysi  | 18 |
| 4     | Yhteenveto  | 20 |
|       | Lähteet   | 21 |

## Lyhenteet

|                  |   |
|------------------|---|
| ASTM             | American Society for Testing and Materials, Amerikan testaus- ja materiaalijärjestö |
| $\mu\text{S/cm}$ | mikrosiemens per senttimetri  |
| mV               | Millivoltti   |
| SFS              | Suomen standardoimisliitto SFS ry.  |
| SFS-EN           | Suomen standardoimisliitto SFS ry, englannin-kielinen standardi.                    |

## 1 Johdanto

Betoni on yksi tärkeimmistä ja käytetyimmistä rakennusmateriaaleista. Sitä käytetään erilaisissa rakenteissa ja rakennusosissa. Betonilla on lukuisia hyviä ominaisuuksia, kuten hyvä saatavuus, edullinen hinta, muokattavuus, erinomainen palon- ja kosteudenkesto, lujuus ja jäykkyys. Kohteeseen oikein valittu betoni kestää hyvin rankkojakin olosuhteita, kunhan työ on myös tehty huolellisesti. [1.]

Rakennusmateriaalina betoni on ainoa, jolle on olemassa vakioitu käyttöikäsuunnittelu- menettely. Säilyvyysvaatimusten laiminlyönnin seurauksena betoni voi jäädä heikkolaa- tuiseksi ja vaurioitua joko raudoitteiden ruostumisen tai betonin rapautumisen seurauk- sena. Ulkotiloissa betonirakenne voi vaurioitua teräskorroosion tai pakkasrapautumisen vuoksi. Betoniraudoituksen korroosio voi käynnistyä, jos terästä suojaava betoni pääsee karbonatisoitumaan tai jos betoniin pääsee haitallisessa määrin klorideja. Useimmiten syynä on terästä suojaavan betonikerroksen ohuus. Betoni on käytännössä aina jonkin verran huokoista, ja betonin huokosverkoston ollessa jäätymistilanteessa täysin veden kyllästämä- huokosissa olevan veden jäätyessä tapahtuva noin 10 %:n laajeneminen voi rikkoa betonin rakennetta. [2, s. 10–11; 3, s. 20.]

Olosuhteiden, säärasituksen ja muiden tekijöiden vaikutuksesta betonirakenteisiin voi tulla muutoksia. Tällöin betonin ominaisuudet voivat heikentyä ja heikentyminen aiheut- taa erilaisia rakenteiden korjaustarpeita. Ikääntyvissä rakenteissa yleinen syy ominai- suuksien muuttumiselle on säärasitus, joka voi laukaista rinnakkaisia, yhtä aikaa tapah- tuvia vaurioitumismekanismeja. [4, s. 1.]

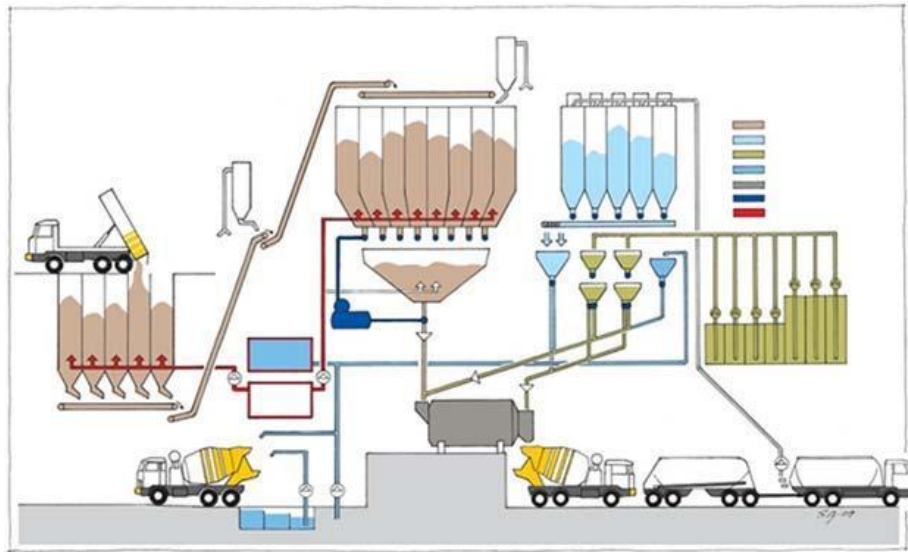
Rakenteisiin syntyvät vauriot ja niiden eteneminen edellyttävät korjaustoimenpiteitä. Ra- kennusten ja rakenteiden kuntoa pyritään pitämään mahdollisimman kauan taloudelli- sesti kannattavassa kunnossa ja käyttökelpoisena. Kuntotutkimuksen avulla voidaan sel- vittää kohteen kunto, mahdolliset vauriot sekä niiden syyt ja eteneminen sopivan kor- jausmenetelmän löytämiseksi. Riittävän varhaisessa vaiheessa suoritettua kuntotutki- muksen perusteella voidaan valita vaurioitumista hidastavia- tai vaurioitumisen eteni- men lopettavia huolto- ja korjaustoimenpiteitä sekä mahdollisesti jopa välttää kalliit ja suu- ret korjaukset. [2, s. 15; 5.]

Tässä opinnäytetyössä käsitellään neljä olennaista kovettuneen betonin analyysimenetelmää laatustandardien American Society for Testing and Materials C856-18a:n (ASTM C856-18a), Suomen standardoimisliitto SFS ry -EN 14629:n (SFS-EN 14629), SFS 5445:n ja SFS-EN 14630: vaatimusten pohjalta. Aihe opinnäytetyöhön saatiin työnantajalta Tampereen asbesti- ja kuitulaboratorio Oy:ltä. Opinnäytetyön tarkoituksena on tuottaa tietoa kovettuneesta betonista ja sen analyysimenetelmistä kirjallisuuskatsauksena.

## 2 Betonin teoria

### 2.1 Betoni rakennusmateriaalina

Betoni on keinotekoista kiveä, joka koostuu suurimmaksi osaksi sementistä ja vedestä eli sementtipastasta ja kiviaineksesta. Sementtipastassa tapahtuu hydrataatioreaktio vettä lisäämällä sementtiin, jolloin seos myös hiljalleen kovettuu kiinteäksi. Seoksessa trikalsiumsilikaatin tai dikalsiumsilikaatin ja veden reaktiossa syntyy hydratoitunutta trikalsiumsilikaattia ja kalsiumhydroksidia. Sementtipasta on muokattavaa vielä veden lisäämisen jälkeen, mutta reaktioiden edetessä sementtipasta muuttuu kiinteäksi. Seoksesta tulee myös kiinteänä veteen liukenematonta. Kiviaineksen tulee olla tiivistä ja lujaa materiaalina, tavallisesti luonnon muovaamaa kiviainesta tai murskattua kalliokiviainesta. Esimerkkinä savesta valmistettu kevytsora tai uusiokäyttöön murskattu betoni soveltuu myös kiviainekseksi. Betonin valmistuksessa käytetään myös lisä- ja seosaineita, joilla voidaan vaikuttaa betonin työstettävyyteen, säilyvyyteen tai valmistuksen kustannuksiin- (Kuva 1).



Kuva 1. Betonin yksinkertaistettu valmistusprosessi. [6.]

Kaikkien osa-aineiden välistä seossuhdetta kutsutaan suhteutukseksi, joka määrittää pääosin sekä tuoreen että kovettuneen betonin ominaisuudet. Toimivassa betonisuhteutuksessa on kaikenkokoista kiviainesta niin, että rakenne muodostuu mahdollisimman tiiviiksi ja yhtenäiseksi yhdistämällä kiviainesta sementtipastaan. Sementin laadulla, hienoudella ja määrällä on suuri vaikutus betonin lujuuteen, lämmönkehitykseen ja säilyvyysominaisuuksiin. [7, s. 10.]

## 2.2 Betonin käyttökohteet ja ominaisuudet

Betonilla on melkein loputtomasti eri käyttökohteita, minkä takia se onkin eniten käytetty rakennusmateriaali maailmassa. Betoni on muun muassa monien infrarakenteiden rakennusmateriaali, esimerkiksi siltojen, patojen, satamien ja voimalaitoksien. Myös rakennusten perustuksissa betoni on ylivoimaisesti käytetyin rakennusmateriaali. Betonia valmistetaan vuosittain noin 14 miljardia kuutiometriä. [8.]

Betoni kestää erinomaisesti puristusta ja sen puristuslujuutta kyetään säätämään muuttamalla veden ja sementin suhdetta. Vetorasituksien vuoksi betoniin asennetaan raudoitusta, joka voi olla harjaterästä, jännepunoksia tai erilaisia kuituja (Kuva 2).





Kuva 2. Betonin rauditus. Rakenteisiin lisätään raudoituksia tuomaan lisävahvuutta tiettyjen rakennelmien lujuutta vaativiin osiin. [9.]

Betonirakenteisiin voi ajan saatossa tulla muutoksia olosuhteiden, säärasituksen tai muiden tekijöiden vaikutuksesta. Tämän takia betonin ominaisuudet voivat heikentyä tai vaurioitua, ja ilman säännöllisiä tarkastuksia uudelleenrakentamiskustannukset voivat kasvaa merkittävästi. [8.]

### 2.3 Kovettuneen betonin ohuthieanalyysi

Betonin mikrorakennetutkimuksella- eli hietutkimuksella (ohut- tai pintahie) tyypillisesti tutkitaan ja arvioidaan pakkasenkestävyyttä, huokosten täytteisyyttä, mahdollisia haitallisia reaktioita, syntyneitä halkeamia ja niiden suuntautuneisuutta, betonin yleistä laatua, sekä tarvittaessa karbonatisoitumissyvyyttä. Betonin suojahuokossuhdetta määrittämällä voidaan arvioida sen mahdollista pakkasrapautumista ja pakkasenkestävyyttä. [2, s. 90–91.]

Betoniin aiheutuvat säröt ja halkeamat johtuvat rapautumisesta, ja niiden määrä kasvaa tämän edetessä. Mikrorakennetutkimuksella saadaan enemmän selvyyttä rapautumisen laajuudesta. Rapautumistilannetta kannattaa tarkentaa ja varmentaa hietutkimuksella,

jos rapautumista ei voida todentaa muilla mahdollisilla menetelmillä ja jos rapautumistilanne on kriittinen (Kuva 3). [2, s. 90–91; 10.]



Kuva 3. Betonin selkeä ja laajalle levinnyt rapautuminen. [11.]

Ohut- ja pintahietutkimuksissa ohuthieanalyysillä saadaan luotettavampaa ja tarkempaa tulosta kuin pintahietutkimuksella. [2, s. 91.]

## 2.4 Kovettuneen betonin kloridipitoisuuden määrittäminen

Kloridi-ionien imeytyminen betonin rakenteeseen vaikuttaa sen passiivisuuteen ja voi täten tuhota sen. Nämä ionit ovat syövyttävimpiä betonin teräksiselle raudotteelle. Kloridi voi saavuttaa betonin rakenteessa monia eri muotoja, kuten kemiallisesti sitoutuneen tilan, fyysisesti imeytyneen, tai olla vapaana, joista vain vapaa kloridi aiheuttaa betoni-raudalle korroosiota. Kloridia voi betoniin päästä betoniseosta tehtäessä vedestä, kontaminaationa täyteaineesta, teiden suolauksesta, merivedestä tai kloridia sisältävistä sekoituksista. Betoniin on voitu valmistusvaiheessa myös käyttää kiihdyttävänä lisäaineena kalsiumkloridia ( $\text{CaCl}_2$ ). [2, s. 87; 4, s. 1; 12; 13.]

Betonin raudoitteiden ruostuminen on yksi tuhoisimmista vaurioista, mitä betonille voi käydä (Kuva 4). Se vaikuttaa niin betonin käyttökelpoisuuteen, kuin myös sen kestävyys-  
teen. Raudoitteiden korroosio heikentää rakenteen kantavuutta, voi aiheuttaa lohkeilua  
sekä halkeilua ja voi täten olla hengenvaarallista korjaamattomana ja tutkimattomana.  
[2, s. 87; 14.]



Kuva 4. Betonin raudoituksien ruostuminen. [15.]

## 2.5 Kovettuneen betonin vetolujuus

Betonin rapautumisastetta pystytään arvioimaan erilaisilla vetolujuusmittauksilla. Rapautumisen sivutuotteena betonirakenteisiin voi syntyä mikrohalkeamia, jotka heikentävät kokonaisvaltaisesti betonin lujuutta. Pelkästään arvona vetolujuuden lisäksi menetelmällä kyetään myös estimoimaan yleisesti betonin korjattavuutta ja laatua, kuten esimerkiksi kiinnitysaineiden pitävyyttä. [16; 17, s. 59.]

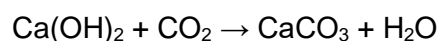
Vetolujuutta yleisesti suositellaan tehtäväksi laboratorio-olosuhteissa, mutta tähänkin menetelmään on olemassa erilaisia apuvälineitä kenttäkokeita varten, esimerkiksi Proceq DY-2 -sarjan testereitä (Kuva 5). Laboratoriossa tehtävä vetolujuusmittaus antaa luonnollisesti tarkempaa tulosta kuin kenttäkoe. Rakenteesta otetusta näytteestä voidaan mitata vetolujuutta koko matkalta, toisin kuin kentällä tehtävistä kokeista.



Kuva 5. Proceq DY-2 -sarjan vetolujuustesteri. Käytetään kentällä tehtävissä kokeissa. [18]

## 2.6 Kovettuneen betonin karbonatisoituminen

Karbonatisoitumisella tarkoitetaan betonin eri neutralisoitumisreaktioita. Reaktioiden edetessä tarpeeksi syväälle- betonin raudoitteiden passiivisuus voi hävitä ja korroosio alkaa. Betonin huokosrakenteeseen on pitänyt päästä vettä sisälle, esimerkiksi sadeveden kautta. Tätä kutsutaan huokosvedeksi. Karbonatisoitumisreaktioiden pääedellyttäjä on ilman sisältämä hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ). Hiilidioksidi etenee betonin rakenteeseen hiljalleen, esimerkkinä seuraava yksinkertaistettu reaktioyhtälö:



Karbonatisoituminen tunkeutuu hitaasti betonin pinnasta syvemmälle. Karbonatisoitumisreaktiot tapahtuvat kerroksessa, jossa rakenteessa on hydroksideja ja ilmasta tullutta hiilidioksidia. Betonin pH-arvo alenee reaktioiden edetessä noin arvoon 8,5.

Reaktioiden nopeuteen vaikuttaa oleellisesti betonin diffuusiovastus hiilidioksidin tunkeutumista vastaan, ilman hiilidioksidipitoisuus (ulkoilmassa käytännöllisesti katsoen vakio) ja karbonatisoituvan aineen määrä. Hiilidioksidin tunkeutumiseen vaikuttaa ratkaisevasti betonin huokosrakenteen kunto ja kosteuspitoisuus. Näihin kyseisiin ominaisuuksiin

vaikuttaa eniten hydratoitumisaste ja betonin vesi-sementtisuhte. Betonin lujuuden kasvaessa ja vesi-sementtisuhteen pienentyessä betonin tiiviys kasvaa merkittävästi. Betonin perusteellisella jälkihoidolla on iso vaikutus, koska karbonatisoituminen etenee pinnasta alkaen. Karbonatisoitumisen kulkiessa kohti betonin rakenteita ja raudotteita hiilidioksidin tunkeutuminen karbonatisoitumisvyöhykkeelle hankaloituu entisestään. Täten karbonatisoitumisen nopeus pienenee koko ajan ja voi tiiviissä rakenteessa melkein seisahtua kokonaan. Betonin huokosrakenteen täytyessä vedellä hiilidioksidin eteneminen heikentyy, täten vähentäen karbonatisoitumisnopeutta. Näin ollen esimerkiksi sadevesi hidastaa voimakkaasti karbonatisoitumista. Mikäli karbonatisoituvan aineen, lähinnä kalsiumhydroksidin, määrä kasvaa betonissa, se hidastaa karbonatisoitumista. Betonin hydratoitumisaste- sekä sideaineen määrä ja laatu vaikuttavat kalsiumhydroksidin ja kalsiumsilikaattihydraatin määrään. Karbonatisoitumisnopeus pienenee sementtimäärän ja hydratoitumisasteen kasvaessa. [2, s. 83–85; 14; 19; 20.]

### **3 Kovettuneen betonin analyysimenetelmät**

#### **3.1 Kovettuneen betonin ohuthieanalyysi**

##### **3.1.1 Näytteenotto**

Näytteenotto sekä näytekappaleen valmistelu ja analysointi suoritetaan standardin ASTM C856-18a mukaan. Ohuthieanalyysi suoritetaan laboratoriossa ja laboratorioon vietävät näytteet tulisi aina ottaa timanttiporaamalla (Kuva 6). [21.]





Kuva 6. Näytteenotto betonista timanttiporaamalla. [22.]

Jos selkeää rapautumista ei ole havaittu, näyte tulisi ottaa kohdasta, mistä se kaikista todennäköisimmin voisi alkaa. Mikäli rakenteessa on havaittavaa mahdollista rapautumista, näyte/näytteet tulisi porata juuri kyseisestä kohdasta. Tästä voidaan todeta, onko rapautumista tapahtunut ja mistä se mahdollisesti johtuu. Jos rakenteessa todetaan selkeää paikoittaista rapautumista, näytteet tulee porata läheltä näkyvää rapautumista, kuitenkin ehjältä alueelta betonia. Laajalle levinneen ja selkeän rapautumisen ollessa ilmi-selvää- näytteet tulee ottaa huomattavasti vähemmän rasittuneemmista kohdista. [2, s. 92; 23.]

### 3.1.2 Näytteen valmistelu ja analysointi

Ohuthieanalyysi on erittäin aikaa vievä ja tarkka työkokonaisuus. Se sisältää lukuisia eri vaiheita ja vaatii useamman vuoden koulutuksen käyneen henkilön, jotta analyysi on luotettava ja sitä voi tehdä. Työssä käydään pääpiirteittäin tärkeimmät alueet analyysistä läpi.

Poratusta näytteestä hiottava palanen eli hie melkein aina otetaan julkisivun puolelta kohtisuoraan rakenteen pintaa vasten. Tästä nähdään erinomaisesti mahdollinen pak-kashalkeilu, joka onkin juuri rakenteen pinnan suuntaista. Poratusta näytteestä sahataan kivisahalla analysointiin vähintään 2 millimetrin kokoinen pala, tai paksumpi betonin vahvuudesta riippuen (koko saattaa vaihdella laboratoriosta ja välineistöstä johtuen joitakin millimetrejä).

Sahattua näytekappaletta suositellaan hiomaan, jotta se pystytään liimaamaan aluslasiin kiinni mahdollisimman tasaisesti. Hiomisen jälkeen näytekappale liimataan kiinni aluslasiin.

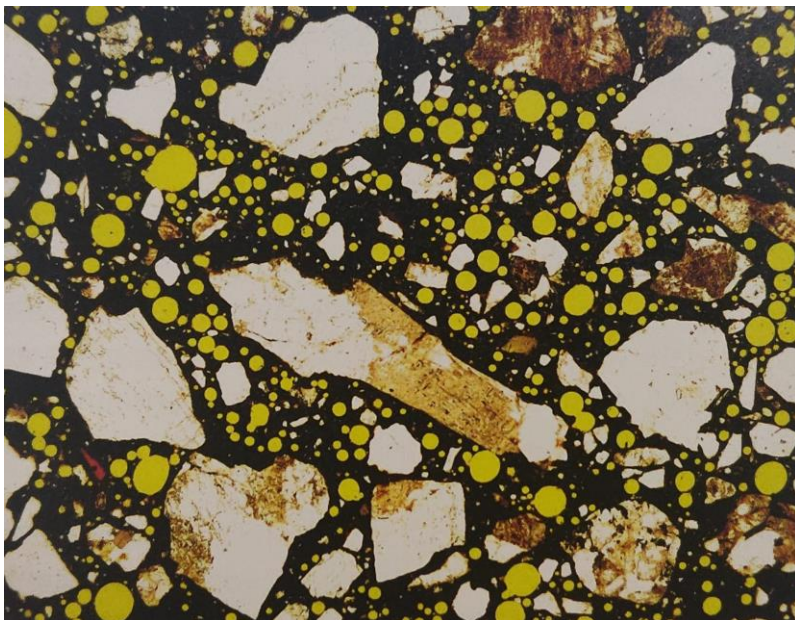
Liimatessa on tärkeää huomioida lasien ja liiman taitekertoimia. Lasit tulee liimata kiinni betonikappaleeseen käyttäen taitekertoimien 1,410–1,785 liimoja, riippuen tutkittavasta osa-alueesta. [21.]

Kuivumisen jälkeen näyte hiotaan erittäin ohueksi, tyypillisesti noin 25-30 µm ohueksi. Ohuuden tarkoituksena on, että valo kulkee näytteen läpi. Näytekappaleen hiomiseen olisi suositeltavaa käyttää työhön tarkoitettua hiontavälineistöä esimerkiksi Buehlerin PetroThin-laitetta (Kuva 7). Tämä nopeuttaa, sekä helpottaa työtä ja vähentää ihmisvirheen määrää. [10, s. 6; 21; 24.]



Kuva 7. Buehler PetroThin. Käytetään saavuttamaan tarvittava ohuus betonikappaleesta. [25.]

Hionnan jälkeen betonin vastahiotulle puolelle liimataan peitelasi. Näytekappaleet analysoidaan sekä stereomikroskoopilla- että polarisaatiomikroskoopilla analysaattorilla ja ilman (Kuva 8). [26.]



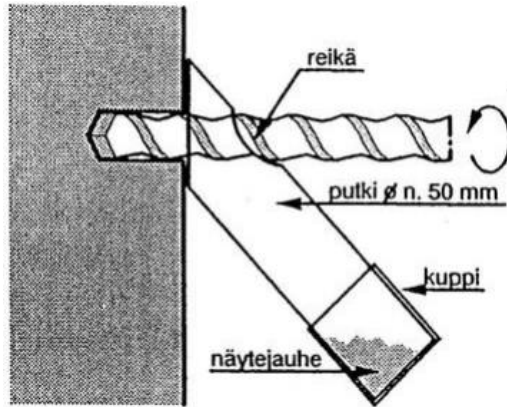
Kuva 8. Ohuthienäytekappale mikroskoopin alla, keltaiset pallot ovat suojuhuokosia. [2, s. 91.]

### 3.2 Kovettuneen betonin kloridipitoisuuden määrittäminen

#### 3.2.1 Näytteenotto

Kloridipitoisuutta tutkittaessa näytteenotto suoritetaan parhaiten poravasaralla poraamalla reikä betoniin, ja tämän yhteydessä betonijauhetta otetaan talteen (Kuva 9). Porattaessa on suositeltavaa käyttää halkaisijaltaan 30-50 mm olevaa poranterää.





Kuva 9. Poravasaran kuvitettu näytteenotto-ohje. [2, s. 88.]

Jos porattava betoni on 200 - 300 metrin päässä meren rantaviivasta, tämä tulee ottaa huomioon ja selvittää, ovatko kloridit peräisin valmistuksen ajalta vai ulkopuolelta. Valmistusvaiheessa kloridipitoisuuden pitäisi olla kauttaaltaan sama kaikkialla ja ulkopuolisen rasituksen tuoma kloridipitoisuus alenee syvemmälle mentäessä. Vastaavassa paikassa näytettä otettaessa jauhetta tulee ottaa siis talteen eri syvyyksiltä. [2, s. 88; 27.]

### 3.2.2 Kovettuneen betonin kloridianalyysi

Kloridianalyysi suoritetaan standardin SFS-EN 14629 mukaan.

Kloridipitoisuuden analysointi suoritetaan joko Volhardin metodilla tai potentiometrisellä titrauksella. Tässä työssä keskitytään ja käydään läpi potentiometrinen titraus menetelmänä. Menetelmän laitteistot ja välineet näkyvät alla olevassa taulukossa 1.

Taulukko 1. Kloridianalyysiin tarvittavat laitteet ja välineet.

| <b>Laitteisto ja välineet</b>                      |
|--|
| Murskaus- ja hienontamisvälineet                   |
| 1,18 mm:n siivilä tai pienempi                     |
| Ilmastoituu uuni (lämpötila tasaisena 105°C ± 5°C) |
| Vaaka 5 grammaan asti 1 mg:n tarkkuudella          |
| Eksikaattori                                       |
| Byretti 0,05 ml:n tarkkuudella                     |
| 250 ml:n dekantterilasi                            |

|   |
|---|
| Magneettisekoittaja   |
| Lämpölevy   |
| Tarpeen vaatiessa potentiometrinen titrauslaitteisto, esimerkiksi hopea / hopeakloridielektrodi tai vastaava ja korkean resistanssin mV-mittari |

Jos betonia ei ole suoraan otettu poraamalla ja näyte vaatii jauhamista, näytekappale täytyy kuivata muuttumattomaan painoon  $105 \pm 5$  °C:ssa ja näytekappaleen annetaan jäähtyä huoneenlämpöiseksi esimerkiksi eksikaattorissa. Jäähtynyt näyte sitten jauhetaan hienoksi jauheeksi, kunnes se läpäisee enintään 1,18 mm:n koon siivilän ja homogenisoidaan lopuksi.

Saatua betonijauhetta punnitaan 1-5 grammaa, asetetaan 250 ml:n dekantterilasiin, lisätään 50 ml vettä ja 10 ml 5 mol/l typpihappoa ja lopuksi 50 ml kuumaa laboratoriovettä.

Liuosta kuumennetaan lämpölevyllä kiehuvaan asti ja sekoitetaan magneettisekoittajalla kiehuvana vähintään kolme minuuttia. Tarpeen vaatiessa seos suodatetaan keskilaatuisen tekstuurin suodatinpaperilla, pestään dekantterilasi, magneettisekoitin- sekä myös suodatinpaperin jäännös.

Taulukko 2. Kloridianalyysiin vaadittavat kemikaalit.

|                                |
|--------------------------------|
| <b>Kemikaalit</b>              |
| Deionisoitu vesi (max 2 µS/cm) |
| Hopeanitraattiliuos 0,02 mol/l |

Potentiometrisessä titrauksessa kloridipitoisuus määritetään taulukon 2 mukaisilla kemikaaleilla. AgNO<sub>3</sub>-liuoksen kulutusta ( $V_3$ ) seurataan ja otetaan tietoja ylös. Työssä käytetään ensimmäisen derivaatan metodologiaa. Metodissa lisätään pieniä määriä mittaliuosta näytteeseen, kirjataan mahdollisia muutoksia ja lisätään ensimmäisen derivaatan analyysi dataan, josta titrauksen päätepiste voidaan laskea.

Titrauksen jälkeen suoritetaan sama analyysi uudelleen nollanäytteellä (tarvittaessa lisätyllä kloridilla) ja kirjataan hopeanitraattiliuoksen kulutus ( $V_4$ ) nollatitrauksen ajalta.

Betonin kloridipitoisuus lasketaan prosentteina näytekappaleen massasta seuraavalla kaavalla 1:

$$CC = 3,545 * f * \frac{(V_4 - V_3)}{m}, \text{ jossa} \quad (1)$$

$V_3$  = hopeanitraattiliuoksen kulutus näyteliuoksessa [ml]

$V_4$  = hopeanitraattiliuoksen kulutus nollanäytteessä [ml]

$m$  = betoninäytekappaleen massa [g]

$f$  = hopeanitraattiliuoksen molaarisuus [27.]

Näytekappaleiden massa tulee ilmoittaa grammoina lähimpään 0,001 gramman arvoon ja tilavuus millilitroina lähimpään 0,05 millilitran arvoon. Keskiarvolta yhden näytteen kahdestakymmenestä tulisi olla laboratorion sisäinen standardi, jonka kloridipitoisuus on tunnettu. Tuloksien varmistamiseksi ja tarkkuuden ylläpitämiseksi joitakin näytteitä analysoidaan kahdesti ja verrataan saatuja tuloksia keskenään.

Raportin tulee standardin mukaan sisältää asiakkaan nimi, analyysin päivämäärä, ainutlaatuinen näytenumero (jäljitettävyyden takia), massa, koko, näytteen tyyppi, kloridipitoisuus massaprosentteina betonin massasta, kloridipitoisuus ja tarkkuus laboratorion referenssinäytteestä, kloridipitoisuus sementin massasta ja miten se on laskettu, metodisekä referenssi standardiin jota on käytetty.

Huomioon tulee myös ottaa nykypäivänä myynnissä olevat automaattiset potentiometrisen titrauksen laitteistot (Kuva 10). Kyseinen laite vähentää ihmisvirheen määrää, sekä helpottaa ja nopeuttaa analysointia. [2, s. 21; 27.]



Kuva 10. VWR Titroline 7750 automaattinen titrauslaitteisto. [28.]

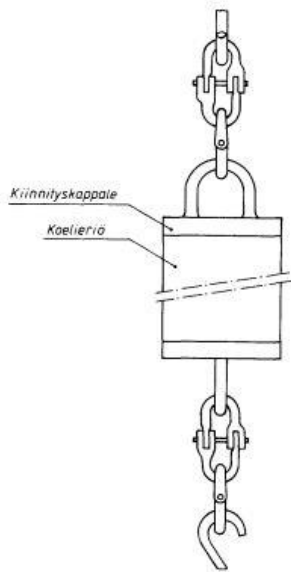
### 3.3 Kovettuneen betonin vetolujuus

#### 3.3.1 Näytteenotto

Betonin vetolujuuden testaamisessa noudatetaan standardin SFS 5445 ohjeita. Laboratorioanalysointia varten näytteet suositellaan ottamaan poraamalla lieriötä rakenteesta. Yleiseksi kooksi näytelieriölle suositellaan halkaisijaltaan 50 tai 75 mm olevaa poralieriötä.

#### 3.3.2 Analysointi

Vetolujuuden mittaaminen on erittäin yksinkertainen testausmenetelmä. Saatujen näytekappaleiden molemmat päät hiotaan tasaiseksi, liimataan laitteistoon kuuluvat kappaleet näytteen molempiin päihin ja asetetaan vetolujuuslaitteeseen mittaukseen (Kuva 11). [29.]



Kuva 11. Betonin vetolujuuden testaus, kuvassa liimatut kappaleet näytelieriön molemmissa päissä. [29.]

Mittaustuloksia tarkastellessa tukena voidaan hyödyntää esimerkiksi seuraavaa taulukkoa (Taulukko 3).

Taulukko 3. Mittaustuloksien tukitaulukko. [2, s. 93]

| Vetolujuus  | Rapautumisaste             |
|-------------|----------------------------|
| 0 MPa       | Huomattavaa rapautumista   |
| 0,5–1,0 MPa | Rapautumaa voi olla hieman |

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\geq 1,5 \text{ MPa}$ | Hyvin epätodennäköistä, tai olematonta |
|------------------------|--|

Jotta taulukkoa 3 voidaan hyödyntää, pitää huomioida, onko mahdollinen murtuma tapahtunut esimerkiksi teräksen tai suurehkon kiven kohdalta. Betonin heikko vetolujuus voi aiheutua myös muustakin kuin rapautumisesta, esimerkiksi muista kuormittavista tekijöistä, laadusta tai muuten huonosta lujuustasosta. Vetolujuus on tästä syystä siis täydentävä menetelmä muiden rinnalla. Menetelmää voidaan hyödyntää etenkin rapautumisen laajuuden selvittämisessä, kun näytemäärä on huomattava, ja tällä päästään budjetillisesti nopeammin ja halvemmin haluttuun lopputulokseen kuin ohuthieanalyysillä. [2, s. 93; 16.]

### 3.4 Kovettuneen betonin karbonatisoitumissyvyyden analysointi

#### 3.4.1 Näytteenotto

Karbonatisoitumisnopeuteen on lukuisia eri tekijöitä. Esimerkiksi halkeamat, huonot pinnoitteet, tuoreena käsitellyt julkisivupinnat ja sateensuojassa olevat sisäpinnat voivat edesauttaa hiilidioksidin läpäisyä.

Jo rakentamisvaiheessa voidaan ottaa mahdollinen karbonatisoituminen huomioon ja estää, tai ainakin hidastaa karbonatisoitumista tulevaisuudessa. Erittäin kuivissa olosuhteissa neutraloitumisreaktiot pysähtyvät kokonaan. Pintarakenteiden ja pinnoitteiden laadulla, keraamisilla laatoilla, sekä tiililaatoilla voidaan hidastaa karbonatisoitumista.

Laboratio-oloissa karbonatisoitumissyvyyttä voidaan tutkia esimerkiksi lohkaistuista betonikappaleista- tai syvempää betonin ytimestä otetuista näytteistä. Otetut näytteet merkataan kukin osoittamaan niille kuuluvaa näytteenottopaikkaa. Kaikki pintavesi pitää poistaa otetuista näytteistä ja kappaleista mahdollisimman pian, jotta analyysistä ei saada vahingossa väärää tulosta. Näytteet tulee myös sijoittaa kuivaan paikkaan odottamaan analysointia, ja analysoinnin tulee tapahtua mahdollisimman nopeasti näytteenoton jälkeen. Leikattuja (ei koske vesileikattua) ja porattuja pintanäytteitä ei käytetä,

koska niistä voi paljastua ja uudelleenaktivoitua hydratoimattomia sementtipartikkeleita muuten täysin karbonatisoituneessa betonissa, mistä johtuen ne voivat usein antaa vääriä tuloksia.

Isommat näytteet pyritään leikkaamaan mahdollisimman kohtisuoraan ydintä kohden, 90 asteen kulmassa pintaan nähden ja pienempiä näytteitä voidaan käyttää analyysiin sellaisenaan- ja mielellään heti näytteenoton jälkeen kentällä. Leikkaamisen jälkeen kappaleista tulee poistaa kaikki ylimääräinen lika- sekä muut mahdolliset partikkelit.

### 3.4.2 Analyysi

Karbonatisoitumissyvyyden analysointiin on olemassa eri standardeja, ja tähän työhön soveltuu erinomaisesti esimerkiksi SFS-EN 14630 ”kovettuneen betonin karbonatisoitumissyvyyden määrittäminen fenoliftaleiinin menetelmällä”.

Näytteitä otettaessa halutaan tietää, kuinka pitkälle karbonatisoituminen on edennyt betonissa ja onko se menettänyt passiivisuuttaan.

Analyysimenetelmä ei sovellu betonille, jonka valmistusvaiheessa on käytetty kalsiumalumiinaattiyhdisteitä. Menetelmä on siitä hyvä, että sitä voi käyttää heti kentällä- tai laboratorio-olosuhteissa. [2, s. 83.]

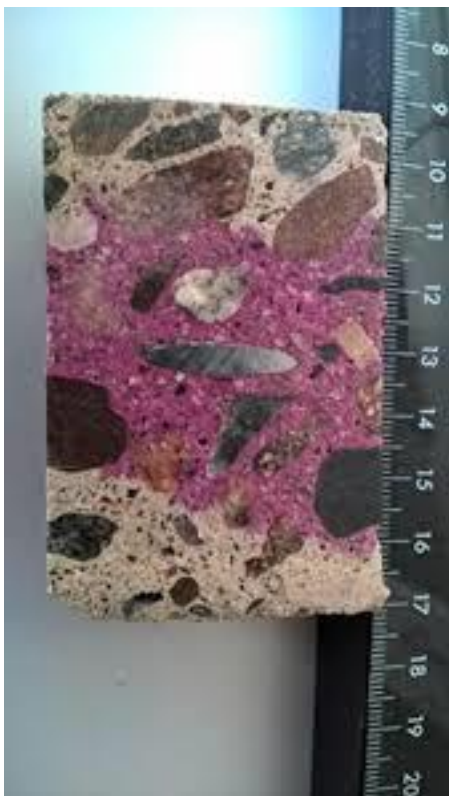
Värjäystä varten tarvitaan 1-prosenttinen fenoliftaleiiniliuos. Liuoksen valmistamiseen tarvittavat kemikaalit ovat taulukossa 4.

Taulukko 4. Karbonatisoitumissyvyyden analysoinnissa käytettävän fenoliftaleiiniliuoksen valmistusohje.

| Kemikaalit                                   |
|--|
| 1 g fenoliftaleiinia                         |
| 70 ml etyylialkoholia                        |
| 100 ml joko tislattua tai deionisoitua vettä |

Leikkauspinnalle suihkutetaan fenoliftaleiini-indikaattoria juuri sen verran, että pinta kostuu- eikä indikaattoria valuisi pintaa pitkin. Erittäin kuivan betonin irrottamisvaiheessa

kappaleisiin voidaan sumuttaa vähän vettä juuri ennen fenoliftaleiiniliuoksen laittoa. Tuloksien- eli värinmuutos pinkkiin tulisi näkyä 30 sekunnin sisällä, ja sen jälkeen voidaan ottaa mitat karbonatisoitumissyvyydestä. Karbonatisoituneella betonilla värinmuutosta ei tapahdu, kun taas normaali ehjä betoni värjäytyy pinkiksi (Kuva 12).



Kuva 12. Värjäämätön alue osoittaa karbonatisoitumissyvyyttä ja pinkki väri karbonatisoitumattomaa betonia. [14.]

Jos värinmuutos on hidasta- tai värjäytyneen alueen rajapinta on hajanaista, menetelmä ei tuota tarkkoja tuloksia ja voi osoittaa osittaista karbonatisoitumista. Tämä voi vaatia toisenlaista menetelmää, esimerkiksi petrografista tutkimista parempien tuloksien saamiseksi.

Erityishuomio analysointivaiheessa myös on pitää silmällä, jos betonissa on käytetty hydrofobisia materiaaleja, esimerkiksi silaania, siloksaania, polymeerisiä lisäaineita tai vettähyllkiviä sekoituksia. Nämä voivat myös tuottaa menetelmän ominaista pinkkiä väriä.



Metodilla ei pystytä osoittamaan emäksisyyden vähenemistä karbonatisoitumisesta joh-  
tuen- tai sitä, onko betoniin kohdistunut altistumista hapoille tai muille happamille kaa-  
suille. [2, s. 83-85; 14; 19; 20.]

#### 4 Yhteenveto

Betonin kuntotutkimusmenetelmiä on lukuisia, ja tässä opinnäytetyössä on käyty oleelli-  
simmat menetelmät läpi. Ohuthieanalyysillä tarkastellaan haitallisia reaktioita, pakkas-  
enkestävyyttä, syntyneitä halkeamia ja niiden suuntautuneisuutta, huokosten täyttei-  
syyttä ja betonin yleistä laatua. Betonin kloridipitoisuuden analysoimisella saadaan sel-  
ville mahdollinen raudotteiden korroosio. Vetolujuus on täydentävä ja suuntaa antava  
menetelmä, jota käytetään etenkin rapautumisen laajuuden selvittämisessä. Karbonati-  
soitumissyvyyttä analysoidessa otetaan selvää raudotteiden passiivisuuden häviämi-  
sestä ja mahdollisesta korroosiosta. Tarpeeksi pitkälle edennyt karbonatisoituminen al-  
kaa myös aiheuttaa korroosiota raudotteille.

Betonin valmistusvaiheessa on jo syytä tehdä kaikki vaiheet huolellisesti eikä kustannuk-  
sia säästämällä, jotta tulevaisuudessa voidaan säästyä kalliimmilta operaatioilta. Tämä  
edesauttaa betonin kestävyyttä ja sen elinikää. Säännöllisillä tarkastuksilla esimerkiksi  
pelkästään julkisivua silmäämääräisesti tarkastelemalla pystytään pitämään jo paremmin  
huolta rakenteista ja löytämään mahdolliset rapautumis- sekä muut vahinkoalueet. Liian  
pitkälle edennyt rapautuminen, halkeilu tai korroosio voi tuoda yllättäviä kustannuksia.

Opinnäytetyöllä pyrittiin tuottamaan uutta tietoa betonista ja kovettuneen betonin eri ana-  
lyysimenetelmistä työnantajalle. Työn tieto on haettu eri standardeista, kirjoista ja julkai-  
suista.

## Lähteet

- 1 Betoniteollisuus ry. 2020. Tietoa betonista – Perustietopaketti. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/>> Päivitetty 7.11.2020. Luettu 7.11.2020.
- 2 Suomen betoniyhdistys ry. 2019. By 42 Betonijulkisivun kuntotutkimus 2019. 4. painos. Vaasa: Waasa Graphics Oy.
- 3 Lahdensivu, Jukka; Huuhka, Satu; Annala, Petri; Pikkuvirta, Jussa; Köliö, Arto & Pakkala, Toni 2015. Betonielementtien uudelleenkäyttömahdollisuudet. Tampereen teknillinen yliopisto. Rakennustekniikan laitos. Rakennetekniikka. Tutkimusraportti 162. <[https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116584/lahdensivu\\_betonielementtien\\_uudelleenkayttomahdollisuudet.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/116584/lahdensivu_betonielementtien_uudelleenkayttomahdollisuudet.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. 15.1.2015. Luettu 15.10.2020.
- 4 Salparanta, Liisa & Kuosa, Hannele 2018. Kloridien tunkeutumisen pienentäminen betoniin. VTT. Betoni. <<https://betoni.com/wp-content/uploads/2015/10/BET0803-s-82-87.pdf>>. Päivitetty 8.3.2018. Luettu 24.10.2020.
- 5 Suomen betoniyhdistys ry. 2014. Tilaajan ohje. Betonijulkisivun ja parvekkeiden kuntotutkimus. Helsinki.
- 6 Mantila, Ari. 2019. Betonin valmistus ja siirrot. Rakennusteollisuus RT ry. Betonilaborantti- ja mylläri – pätevyöitymiskurssi 2019. <<https://docplayer.fi/132053448-Betonin-valmistus-ja-siirrot.html>> Päivitetty 12.3.2019. Luettu 12.11.2020.
- 7 Pyörny, Juho. 2018. Betonin ominaisuudet betonirakenteen valmistusketjun eri vaiheissa. Aalto-yliopisto. Diplomityö. <[https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/35561/master\\_Py%C3%B6rny\\_Juho\\_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/35561/master_Py%C3%B6rny_Juho_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y)>. 26.11.2018. Luettu 12.11.2020.
- 8 Betoniteollisuus ry. 2020. Tietoa betonista – Perustietopaketti – Betoni rakennusmateriaalina – Betonin ominaisuudet ja käyttö. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/betoni-rakennusmateriaalina/betonin-ominaisuudet-ja-kaytto/>>. Päivitetty 7.11.2020. Luettu 7.11.2020.
- 9 Tmi Kirvestyö Seppälä. 2020. Betoniraudoitusta rautaisalla ammattitaidolla. <<https://www.kirvestyoseppala.fi/perustukset/betoniraudoitus>>. Päivitetty 15.11.2020. Luettu 15.11.2020.

- 10 Klami, Jarkko. 2018. Betonin optiset tutkimusmenetelmät. VTT Expert Services Oy. <[http://www.betoniyhdistys.fi/media/4-klami\\_betonin-optiset-tutkimusmenetelmät-2018.pdf](http://www.betoniyhdistys.fi/media/4-klami_betonin-optiset-tutkimusmenetelmät-2018.pdf)>. Päivitetty 6.3.2018. Luettu 10.11.2020.
- 11 Jacobs, Adam. 2019. How to repair cracked concrete. <<https://www.powerblanket.com/blog/repairing-cracked-concrete/>>. Päivitetty 15.1.2019. Luettu 7.11.2020.
- 12 Betoniteollisuus ry. 2020. Tietoa betonista – Perustietopaketti – Ominaisuudet ja edut – Betonin vaurioituminen. <<https://betoni.com/tietoa-betonista/perustietopaketti/ominaisuudet-ja-edut/betonin-vaurioituminen/>>. Päivitetty 7.11.2020. Luettu 7.11.2020.
- 13 Al-Saleh, S. A. 2015. Analysis of total chloride content in concrete. Al Imam Mohammad Ibn Saud Islamic University, College of Engineering, Civil Engineering Department. <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509515300036>>. Julkaistu 19.6.2015. Luettu 24.10.2020.
- 14 Pyy, Hannu. 2019. Betonirakenteiden kemialliset vauriot. Betonirakenteiden korjaaminen 2019. Vahnen Rakennusfysiikka Oy. <<http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkr-2019/hannu-pyy-betonin-korjauskurssi-2019.pdf>>. Päivitetty 18.3.2019. Luettu 17.11.2020.
- 15 CivilDigital. 2020. Effects of Corrosion in Reinforcement. <<https://civildigital.com/effects-corrosion-reinforcement-signs-preventive-measures/>>. Päivitetty 13.1.2018. Luettu 12.11.2020.
- 16 Ositum Oy. 2020. Vetolujuus. <<https://www.ositum.fi/Vetolujuus>>. Päivitetty 6.11.2020. Luettu 17.11.2020.
- 17 Mattila, Jussi. 2018. Betonirakenteiden kuntotutkimus. Betonirakenteiden korjaus ja rakennusfysiikka. <[http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkrf-2018/4\\_by-patevoityskurssi-kuntotutkimukset-jm-16.1.2018.pdf](http://www.betoniyhdistys.fi/media/kurssimateriaalia/bkrf-2018/4_by-patevoityskurssi-kuntotutkimukset-jm-16.1.2018.pdf)>. Pätevyyskurssi 16.1.2018. Luettu 2.11.2020.
- 18 Raetesting group. 2020. Rebar and Corrosion Analyzer. <<http://www.raetesting.com/Product/Rebar-and-Corrosion-Analyzer/Adhesion-Testers-for-Concrete-Strength-Testing-Proceq-DY206.html>>. Päivitetty 12.11.2020. Luettu 12.11.2020.
- 19 SFS-EN 14630. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. 2007. Testausmenetelmät. Kovettuneen betonin karbonatisoitumissyvyyden määrittäminen fenoliftaleiinin menetelmällä. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.

- 20 Ley, Tyler. 2018. Carbonation – The eventual killer of reinforced concrete. <[https://www.youtube.com/watch?v=5Zq0C0cHqtM&t=333s&ab\\_channel=TylerLey](https://www.youtube.com/watch?v=5Zq0C0cHqtM&t=333s&ab_channel=TylerLey)>. Julkaistu 7.10.2018. Luettu 7.11.2020.
- 21 ASTM C856-18a. Standard Practice for Petrographic Examination of Hardened Concrete. 2018. West Conshohocken: ASTM International.
- 22 Timantec Oy. 2019. Timanttiporaus- ja sahaus. <[www.timantec.fi](http://www.timantec.fi)>. Päivitetty 2019. Luettu 23.11.2020.
- 23 Davies, Bethan. 2009. British and Fennoscandian Ice-Sheet Interactions during the Quaternary, Unpubl. PhD Thesis. Department of Geography. Durham University. <<http://www.antarcticglaciers.org/glacial-geology/techniques/thin-section-analysis/>>. Luettu 12.11.2020.
- 24 Buehler Materials. 2020. Using the PetroThin for Thin Section Preparation. <[https://www.youtube.com/watch?v=kj0oZG1TcPw&ab\\_channel=BuehlerMaterials](https://www.youtube.com/watch?v=kj0oZG1TcPw&ab_channel=BuehlerMaterials)>. Julkaistu 17.4.2020. Luettu 12.11.2020.
- 25 Buehler. 2020. PetroThin – Thin Section Machine. <<https://www.buehler.com/petroThin-thin-sectioning-system.php>>. Päivitetty 7.11.2020. Luettu 12.11.2020.
- 26 AAPG Wiki. 2019. Thin section analysis. <[https://wiki.aapg.org/Thin\\_section\\_analysis](https://wiki.aapg.org/Thin_section_analysis)>. Päivitetty 12.3.2019. Luettu 12.11.2020.
- 27 SFS-EN 14629. Betonirakenteiden suojaus- ja korjausaineet ja niiden yhdistelmät. 2007. Testausmenetelmät. Kovettuneen betonin kloridipitoisuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.
- 28 VWR International. 2020. Titraattori, potentiometriset ja volumetriset, Titroline® 7750. <[https://fi.vwr.com/store/catalog/product.jsp?product\\_id=11051883](https://fi.vwr.com/store/catalog/product.jsp?product_id=11051883)>. Päivitetty 15.11.2020. Luettu 24.10.2020.
- 29 SFS 5445. Betoni. 1988. Vetolujuus. Helsinki: Suomen standardoimisliitto.